

Recursos Naturales y Ambiente

ISSN 1659-1216

N° 61 Diciembre 2010



CATIE 

Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo



Departamento Administrativo de
Ciencia, Tecnología e Innovación
Colciencias
República de Colombia



Universidad
Tecnológica
de Pereira



Facultad de
Ciencias
Ambientales



G.A.T.A.
GRUPO DE INVESTIGACIONES
EN AGROCIENCIAS Y
TECNOLOGÍA AGROPECUARIA



La revista Recursos Naturales y Ambiente es producida por el CATIE, Sede Central.

Comité Editorial Internacional

José Joaquín Campos
CATIE

Ronnie de Camino
CATIE

Glenn Galloway
CATIE

Anita Varsa
Course Coordinator National Board of Education, Finland

Manuel Guariguata
Scientist, Environmental Services and Sustainable Use of Forests Programme, CIFOR, Indonesia

David Kaimowitz
Program Officer Environment and Development, USA/Mexico

Florencia Montagnini
Universidad de Yale, USA

Gerardo Budowski
Universidad para la Paz, Costa Rica

Kenton Miller
World Resources Institute, USA

Comité Editorial Operativo CATIE

Róger Villalobos
Lorena Orozco
Dietmar Stoian
Francisco Jiménez
Fernando Carrera

Editores técnicos

Óscar Marino Mosquera
Julián Chará
Juan Carlos Camargo García
José Alexander Rodríguez
Ángela María Arango

Equipo de Producción

Róger Villalobos, Director
Lorena Orozco, Editora
Elizabeth Mora, Corrección de estilo
Eyleen Angulo C., Revisión bibliográfica
Rocío Jiménez, Diseño y diagramación
Guiselle Brenes, Internet

Esta revista está indizada en la base de datos CABI

Recursos Naturales y Ambiente

ISSN 1659-1216

N° 61 Diciembre 2010

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela, España y el Estado de Acre en Brasil.

Dr. José Joaquín Campos
Director General

- La Revista Recursos Naturales y Ambiente, continuación de la Revista Forestal Centroamericana, es una publicación cuatrimestral, con una perspectiva integral, biológica, social y económica del aprovechamiento y conservación de los ecosistemas naturales y forestales, y del desarrollo rural.
- Nuestra Revista, que tiene un ámbito geográfico latinoamericano, espera servir como un foro donde se propongan y analicen modelos y experiencias de trabajo relevantes para los técnicos, productores y empresarios, para los gobiernos locales y para las autoridades estatales.

Los contenidos, ideas u opiniones expresadas en los artículos son responsabilidad de los autores; no reflejan necesariamente la opinión de los comités de la Revista Recursos Naturales y Ambiente ni del CATIE.

Se permite la reproducción parcial o total de la información aquí publicada, siempre y cuando se nombre la fuente, se remitan tres copias a la redacción y se utilice sin fines de lucro.

Se agradece a COLCIENCIAS Proyecto: Tecnologías para definir la madurez del culmo de guadua: Una contribución al desarrollo forestal del Eje Cafetero Colombiano, proyecto Código 1110452-21121; Contrato 442-1-2008 y a la Universidad Tecnológica de Pereira por el financiamiento con el cual ha sido posible esta edición de la Revista.





57



32



45



95

Editorial4

FORO

Pasado y futuro de los bosques de guadua en el Eje Cafetero colombiano. El caso de Yarima Guadua
Lucía Mejía Marulanda6

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Guadua angustifolia en la Ecorregión Cafetera colombiana.
1. Extracción y cuantificación de lignina insoluble
Oscar Marino Mosquera; Yeny Juliana Cortes; Jaime Niño Osorio 11

Guadua angustifolia en la Ecorregión Cafetera colombiana.
2. Cuantificación de carbohidratos libres presentes en extractos
Oscar Marino Mosquera Martínez; Anyela Marcela Ríos Ríos; Jaime Niño Osorio 18

Cambios en las propiedades físico-mecánicas de culmos de *Guadua angustifolia*
como indicadores del estado de madurez
Edison de Jesús Henao Castañeda; Jose Alexander Rodríguez.....26

Medición indirecta de la madurez del culmo de guadua por medio de las vibraciones mecánicas
*Andrés Felipe Duque Herrera; Adolfo Lara Castro; Héctor Fabio Quintero Riaza;
Edison Henao Castañeda; Mauricio Monroy Jaramillo*32

Aprovechamiento industrial de *Guadua angustifolia* a partir de sus extractos vegetales
Andrea Hernández Londoño; Carlos Arrabal Miguel; Jorge Augusto Montoya Arango38

Diversidad y estructura genética de *Guadua angustifolia* en la Ecorregión Cafetera colombiana
*Jaime Eduardo Muñoz Florez; Ximena Londoño; Paula Rugeles;
Andrés Mauricio Posso; Franco Alirio Vallejo*45

Beneficios de los corredores ribereños de *Guadua angustifolia* en la protección de ambientes
acuáticos en la Ecorregión Cafetera de Colombia. 1. Efectos sobre las propiedades del suelo
*Juan Carlos Camargo; Julián Chará; Lina Paola Giraldo Sánchez;
Ana Marcela Chará-Serna; Gloria Ximena Pedraza*53

Beneficios de los corredores ribereños de *Guadua angustifolia* en la protección de ambientes acuáticos
en la Ecorregión Cafetera de Colombia. 2. Efectos sobre la escorrentía y captura de nutrientes
Julián Chará; Lina Paola Giraldo Sánchez; Ana Marcela Chará-Serna; Gloria Ximena Pedraza60

Condiciones de calidad de *Guadua angustifolia* para satisfacer las necesidades del mercado
en el Eje Cafetero de Colombia
Jorge Hugo García Sierra, Juan Carlos Camargo García67

Bosques de guadua del Eje Cafetero de Colombia: oportunidades para su inclusión
en el mercado voluntario de carbono y en el Programa REDD+
Ángela María Arango Arango; Juan Carlos Camargo77

Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia
Juan Carlos Camargo; José Alexander Rodríguez, Angela María Arango86

Instrumentos de gestión para el manejo de bosques de guadua en el Eje Cafetero colombiano
Juan David Suárez Franco; José Alexander Rodríguez95

Determinación en campo de la madurez de culmos de *Guadua angustifolia*
en el Eje Cafetero de Colombia
José Alexander Rodríguez; Juan Carlos Camargo García; Juan David Suárez Franco100

Editorial

El bambú se perfila como una de las gramíneas más importantes de este siglo. El carácter de sostenibilidad, ligado a su rápido crecimiento, son las condiciones más relevantes para considerarla una planta con gran potencial para salvar a la humanidad y al planeta de los daños causados por el cambio climático.

Evolutivamente, estas plantas aparecieron sobre la tierra hace 23,7 a 5,3 millones de años; o sea que son bastantes jóvenes si consideramos que la tierra tiene 4.000 millones de años. El bambú es la única gramínea adaptada y diversificada a partir de los bosques, fenómeno que ocurrió en el periodo oligoceno-mioceno de la era terciaria. En su proceso evolutivo, adaptaciones como la lignificación de los culmos, la rápida elongación del renuevo, lo complejo de la ramificación, las floraciones cíclicas, gregarias y monocárpicas y la presencia de células raquimorfias en el tejido fotosintético de la lámina foliar le permitieron competir exitosamente con los árboles y las formaciones leñosas.

La subfamilia Bambusoideae reúne aproximadamente 1400 especies en 101-118 géneros. Hoy día, con el desarrollo de las técnicas moleculares se ha revolucionado el estudio de los patrones evolutivos; recientes estudios filogenéticos que combinan los datos de ADN con los morfológicos han permitido agrupar los bambúes en tres tribus: Arundinarieae, Bambuseae y Olyreae, con una variación significativa en cuanto al número de especies y géneros.

Las tribus Arundinarieae y Bambuseae reúnen a los bambúes leñosos temperados y tropicales, respectivamente. Ambas tribus poseen culmos lignificados y hojas caulinares sobre el nuevo brote; sin embargo, aun no se ha podido encontrar, a partir del ADN, evidencia de un origen común para estas dos tribus. La tribu Olyreae agrupa a los bambúes herbáceos que carecen de hojas caulinares; curiosamente, los estudios de ADN indican que estos bambúes herbáceos tienen un ancestro en común pero no se ha encontrado un carácter morfológico único que respalde esta teoría. Los bambúes se distribuyen ampliamente en el trópico, subtropico y zonas templadas de todos los continentes, con excepción de Europa. Esta gramínea prefiere ecosistemas húmedos y coloniza hábitats disturbados, pero no puede crecer en el desierto.

En todas las épocas de la historia de la humanidad, el bambú ha suplido algunas de sus necesidades básicas, especialmente alimentación y vivienda. Asia es el continente con mayor tradición en manejo, cultivo y transformación de esta planta; su uso se remonta allí

a más de 6000 años. En América, el bambú ha estado ligado a las comunidades rurales; en Ecuador y Colombia existen evidencias arqueológicas de que los pobladores americanos lo han venido utilizando durante los últimos 5000 años.

De todas las especies de bambúes en el neotrópico, *Guadua angustifolia* Kunth ha sido la única incorporada al quehacer sociocultural de las comunidades rurales y urbanas de América Latina. En la actualidad, regiones como el Eje Cafetero de Colombia son un ejemplo de este arraigo cultural.

El relato de Humboldt, a comienzos del siglo XIX, es un testimonio de la presencia del bambú en el paisaje andino de la región cafetera de Colombia. *“Al atravesar la montaña de Quindío, en el mes de octubre de 1801, a pie y seguidos de doce bueyes que cargaban nuestros instrumentos y colecciones, soportamos, durante los tres o cuatro días últimos, descendiendo la pendiente occidental de la cordillera, muchos y constantes aguaceros. El camino pasa por una región montañosa, cubierta de bambúes; las espigas de que están armadas las raíces de estas gramíneas gigantesas habían desgarrado nuestras botas, de suerte que nos vimos forzados, como todos los viajeros que no desean dejarse conducir a lomos de hombre, a caminar con los pies desnudos.”*

Guadua angustifolia es un bambú de excelentes calidades estructurales y de gran tamaño, con culmos que pueden medir hasta 30 metros de altura y 25 cm de diámetro. Estas características han facilitado su uso como material estructural para la construcción de viviendas y puentes, así como en la elaboración de muebles y artesanías y en la industria de laminados, pisos y paneles.

A diferencia de muchas otras especies de bambú de América, *Guadua angustifolia* ha recibido en las últimas décadas gran atención por parte de la academia, el Estado y los usuarios, quienes han promovido su estudio en diversas áreas del saber: botánica, ecología, biotecnología, anatomía, fisiología, genética molecular, silvicultura, economía, mercadeo, diseño e ingenierías. Sin embargo, durante este siglo XXI, gracias a los avances científicos y tecnológicos, se ha tenido acceso a la recopilación y análisis de nueva información que contribuye a entender mejor sus relaciones evolutivas, su importante papel como benefactor ambiental del planeta y su gran potencial de uso e industrialización.

Esta fascinante y misteriosa planta tiene aun muchas cosas por revelar. Al igual que todos los bambúes, la guadua provee incontables beneficios ambientales en el control de erosión, restauración de zonas degradadas,

fijación de CO₂, hábitat para la flora y fauna, regulación del caudal hídrico, mejoramiento de la calidad del agua, aporte de materia orgánica y embellecimiento del paisaje. Muchos de estos beneficios aun no han sido cuantificados, lo que impide su negociación en los mercados verdes mundiales. En este número de la revista Recursos Naturales y Ambiente se ofrecen los resultados de una serie de investigaciones realizadas por el Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos (GATA) de la Universidad Tecnológica de Pereira sobre los efectos benéficos de los guaduales ubicados a orilla de ríos y quebradas en la conservación y protección de ambientes acuáticos, reducción de la escorrentía superficial y retención de nutrientes de áreas agrícolas aledañas. Además, mediante la medición de las propiedades físicas de los suelos de las zonas ribereñas, se demuestra la contribución de este ecosistema a la regulación y estabilidad de las cuencas hídricas.

Asimismo, con los trabajos del proyecto “Tecnología para definir la madurez del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth: una contribución al desarrollo forestal del Eje Cafetero Colombiano” se ha generado conocimiento básico sobre esta gramínea, el cual contribuye al fortalecimiento de la industria de la guadua a través de la innovación tecnológica. El enfoque integral de este proyecto ha permitido conocer características del bambú como sus propiedades físico-mecánicas, contenidos de lignina y azúcares, compuestos químicos, edad óptima de aprovechamiento, estrategias de manejo, diversidad y estructura genética de los guaduales, cuantificación de la biomasa y de ciertos beneficios ambientales. Con toda esta información se busca garantizar la calidad del culmo y de sus derivados, con el fin de fortalecer la cadena productiva de la guadua en Colombia.

A diferencia de los árboles maderables, en los bambúes es difícil determinar la edad del culmo mediante variables dendrométricas como diámetro, altura y densidad de la madera. Para los efectos, en Colombia se han utilizado indicadores externos del culmo como color, presencia de líquenes y hongos; sin embargo, este método cualitativo y subjetivo no siempre es confiable. El desarrollo alcanzado por el sector transformador de la guadua en nuestro país exige materia prima de calidad, la cual se relaciona intrínsecamente con la edad. Las investigaciones del Proyecto ya empiezan a dar soluciones a este problema; así, se plantean prácticas objetivas relacionadas con patrones físico-químicos y estructurales y se

desarrolla un instrumento innovador para determinar la madurez del culmo mediante vibración libre.

Entre los bambúes tropicales, *Guadua angustifolia* es una de las mejores especies fijadoras de dióxido de carbono, lo cual contribuye a mitigar los efectos del cambio climático. Con su trabajo en dos plantaciones establecidas hace 7 y 8 años, el Proyecto ha evaluado el crecimiento, biomasa y contenido de carbono en los culmos y, además, ha empezado a analizar la posibilidad de incluir esta especie en los mercados globales de carbono a partir de un concepto local: los núcleos forestales productivos.

Después de Brasil, Colombia es el segundo país latinoamericano con mayor producción de biocombustibles. Por su sostenibilidad y rápido crecimiento, la guadua se ha convertido en una alternativa para generar energía a partir de su biomasa. En comparación con otras fuentes bioenergéticas, el bambú es significativamente más productivo y, además, ofrece características deseables para este fin como su bajo contenido de cenizas e índice de alcalinidad. Este uso potencial ha hecho que el Proyecto inicie una nueva línea de investigación para profundizar el conocimiento sobre la biomasa de la especie, tanto en bosque natural como en plantación, y se evalúe la posibilidad de incluir la guadua en el modelo de reducción de emisiones por deforestación y degradación evitada (REDD).

Por sus múltiples beneficios ambientales, sociales, económicos y culturales, el bambú se reconoce como **el oro verde del siglo XXI**, y la guadua como el oro verde de los Andes. Las personas interesadas en conocer los recientes avances científicos y tecnológicos sobre *Guadua angustifolia* encontrarán en este número de la RRNA un total de 13 artículos que les brindarán aportes relevantes al conocimiento de este extraordinario bambú y de su ecosistema. A continuación se exponen los resultados de investigaciones realizadas con disciplina y rigor, los cuales contribuirán de manera decisiva al desarrollo sostenible de esta especie agroforestal y al mejoramiento de la calidad de vida de los productores y transformadores de guadua en Colombia, permitiendo una Colombia rural más justa en lo ambiental, social y económico.

Ximena Londoño
Sociedad Colombiana del Bambú
ximelondo@gmail.com
www.sociedadcolombianadelbambu.com

Pasado y futuro de los bosques de guadua en el Eje Cafetero colombiano

El caso de Yarima Guadua

Lucía Mejía Marulanda¹

Durante los últimos once años, Yarima Guadua se consolidó como un ejemplo de manejo y aprovechamiento de los guaduales, en combinación con otras actividades agropecuarias como el cultivo de cítricos y piña y la ganadería. Esto ha permitido avanzar de manera integrada y enfrentar un medio que exige a los productores rurales diversificar sus productos ante las oscilaciones del mercado, los altos costos de producción y un entorno cambiante.

La conservación de los guaduales en la finca, a través de cuatro generaciones, ha sido el resultado del interés por mantener uno de los más grandes recursos naturales, con el cual se conserva no sólo la biodiversidad, suelo, agua, aire y el paisaje, sino además una identidad propia.

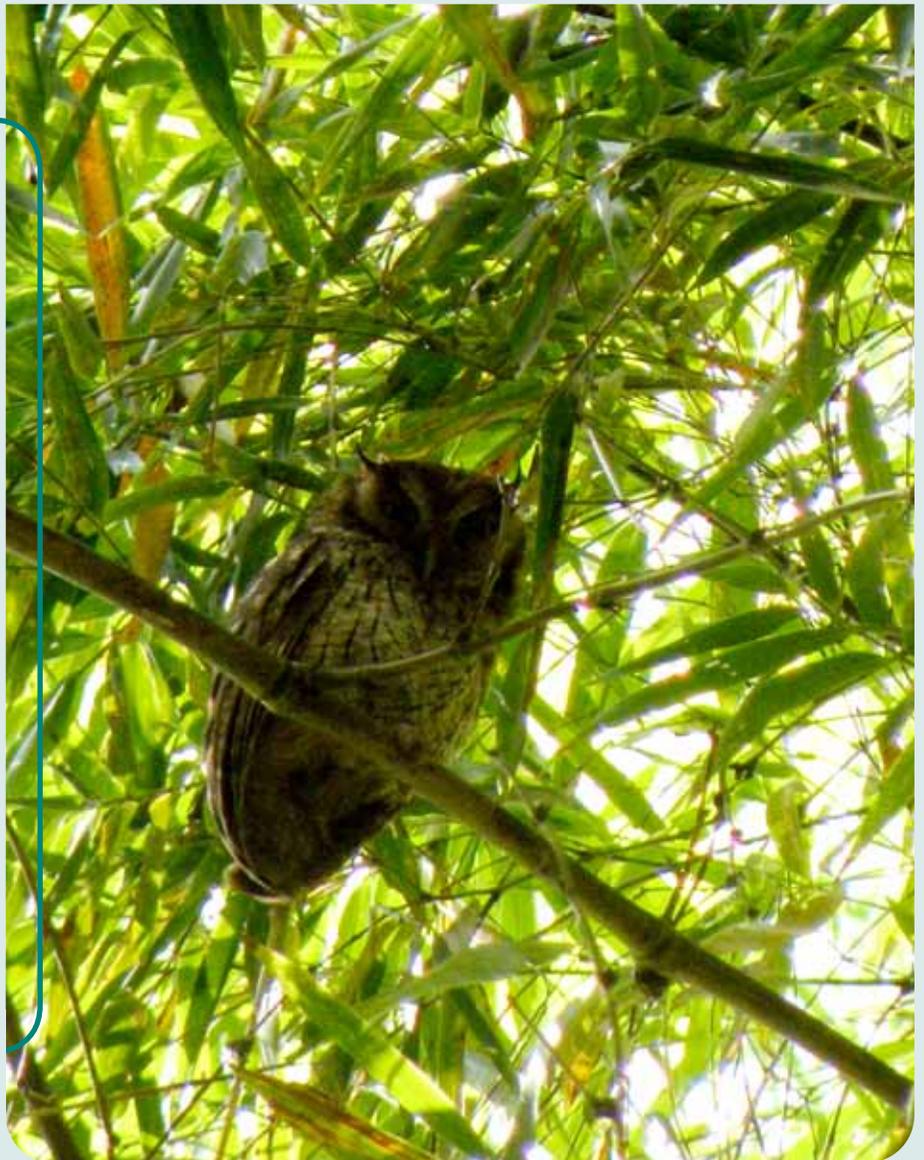


Foto: Lucía Mejía.

¹ Propietaria, Yarima Guadua E.U. yarimaguada@gmail.com

Los guaduales del Eje Cafetero colombiano

Los bosques naturales de guadua representan la cobertura boscosa más importante de la zona cafetera colombiana entre los 900 y los 2000 msnm, y aunque se encuentran altamente fragmentados, su significancia ecológica es muy alta. La mayoría de las fincas en la región poseen guaduales entremezclados con otros usos de la tierra, lo que conforma un paisaje donde los guaduales resaltan como pequeños parches o corredores que protegen las fuentes de agua.

Durante las últimas décadas se han dado cambios en el uso de la tierra por problemas asociados con el precio del café, las plagas y el incremento en el valor de la tierra. Esto ha hecho que los cultivos de café vayan siendo transformados en pasturas y cultivos de plátano. Los guaduales, sin embargo, han permanecido allí, cumpliendo con las funciones ecológicas que los caracterizan y proveyendo de materia prima para aplicaciones domésticas, especialmente.

La finca Yarima se ubica al sur del municipio de Pereira, Risaralda, Colombia, en las estribaciones de la Cordillera Central, a 1150 msnm, en una zona ecológica de transición entre las laderas de las montañas andinas hacia el valle del río Cauca. Sus propietarios se asentaron en estas tierras desde hace 125 años y se han dedicado a la agricultura y la ganadería. La conservación de los guaduales en la finca a través de cuatro generaciones ha sido el resultado del interés por mantener uno de nuestros más grandes recursos naturales, con el cual no solo conservamos la biodiversidad, suelo, agua, aire y el paisaje, sino además nuestra propia identidad. En tiempos pasados, la guadua suministraba la materia prima para toda la infraestructura agropecuaria y urbana; desafortunadamente, con el tiempo este recurso se ha convertido en material de segunda categoría.



Foto: Lucía Mejía.

En tiempos pasados, la guadua suministraba la materia prima para toda la infraestructura agropecuaria y urbana; desafortunadamente, con el tiempo este recurso se ha convertido en material de segunda categoría.

El aumento del valor de la tierra, la carga impositiva y los altos costos de producción han contribuido a la reducción del área cubierta por guaduales en el país. No obstante, la eliminación de los guaduales no contribuyó a mejorar la situación del sector agropecuario, sino que más bien la agravó al acelerarse el deterioro ambiental. Se resaltan, por ejemplo, la gravísima falta de agua en las épocas secas, las borrascas que arrasan con todo en la época de lluvias, la pérdida de biodiversidad y el aumento de la erosión en las laderas. Actualmente tenemos cuencas desprotegidas, escasez de materia prima para la construcción y vamos camino a la degradación de nuestras tierras.

Los guaduales naturales pudieran brindar un aporte significativo a la economía de los sistemas productivos rurales. Los ingresos que se generan pudieran simplemente equiparar al impuesto predial del área que ocupan, pero también pudieran asegurar beneficios sustanciales asociados con la comercialización y mercadeo de sus productos. Asimismo, hay beneficios intangibles (para muchos abstractos) representados por las funciones ecológicas y/o ambientales que cumplen los guaduales.

La conversión de los guaduales naturales en áreas productivas de nuestras fincas solo se logrará si el productor se compromete con

la intervención y manejo forestal que requieren. Este proceso debe asumirse de manera responsable y respetuosa del recurso; no se debe depositar el manejo en manos de terceros que, de manera indiscriminada, podrían hacer intervenciones dañinas con efectos negativos de difícil recuperación y, por ende, con nefastas repercusiones económicas y sobre el balance ecológico de las fincas.

Legislación y certificación forestal voluntaria del recurso guadua

Durante los últimos once años, Yarima Guadua se consolidó como un ejemplo de manejo y aprovechamiento de los guaduales, en combinación con otras actividades agropecuarias como el cultivo de cítricos y piña y la ganadería. Esto nos ha permitido avanzar de manera integrada y enfrentar un medio que exige a los productores rurales diversificar sus productos ante las oscilaciones del mercado, los altos costos de producción y un entorno cambiante.

En el año 2003, fuimos invitados por Carder (Corporación Autónoma Regional de Risaralda) y la GTZ (la agencia alemana de cooperación para el desarrollo) a formar parte del proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia. Este proyecto ofrecía la posibilidad de obtener la certificación forestal voluntaria (CFV), instrumento usado a nivel mundial para verificar que el manejo forestal cumpla con estándares de desempeño reconocidos y aceptados internacionalmente. Estos estándares combinan principios y criterios internacionales desarrollados por el *Forest Stewardship Council* (FSC), con indicadores y verificadores locales y regionales desarrollados por iniciativas nacionales del FSC. Para los guaduales se desarrollaron estándares específicos. El proceso de CFV generó un compromiso mayor y real del productor; así, después de tres años de capacitaciones, trabajo administrativo y de campo, se logró la certifi-

cación en el año 2006. Como resultado, se conformó la Corporación para el manejo sostenible de guaduales (Corguadua), organización no gubernamental creada entre seis de los 20 productores que logramos llegar al final del proceso.

La CFV se enfoca en lograr la sostenibilidad ambiental, social y económica, con un compromiso de trabajo bajo los principios y criterios establecidos por el FSC. Si estos principios y criterios se cumplen a cabalidad, el producto proveniente de bosques certificados tiene la posibilidad de obtener un mejor precio en el mercado, lo que genera un mayor nivel de competitividad entre los productores. Por otro lado, la CFV resulta un instrumento muy útil para contrarrestar los efectos de una inadecuada planificación del territorio. De hecho, algunos planes han viabilizado la expansión urbana hacia áreas con cobertura de guaduales, lo que significa un desestímulo a la conservación.

El manejo ecológico de un guadual no impide que sea comercialmente viable, ya que con un manejo adecuado se garantizan las funciones de protección y producción. Algunas corporaciones autónomas regionales (CAR), encargadas del control ambiental a nivel departamental, han sido muy rígidas y negligentes con el procedimiento requerido para que los productores obtengan los permisos de aprovechamiento de guaduales. En algunos casos, los procesos son muy complejos, lo que desestimula a los productores y estimula la cosecha ilegal e incluso la tala rasa. Si bien esta práctica puede ser penalizada con una multa, el monto no compensa el daño causado por la eliminación parcial o total de un bosque de guadua.

Según la ley, el tiempo para expedir el permiso por parte de la CAR no debe exceder los 20 días; durante ese tiempo y bajo condiciones normales, la autoridad respectiva debe

revisar el inventario y los planes de manejo y hacer la visita al campo. No obstante, con frecuencia los planes van de un funcionario a otro sin razón alguna, lo que alarga innecesariamente los tiempos. La expedición de un salvoconducto, por ejemplo, no toma más de diez minutos, pero en algunas CAR se tarda días o hasta un mes. A pesar de que existe una Norma Unificada que implica la definición de criterios y tiempos uniformes para todas las CAR, en la práctica no funciona.

Afortunadamente, las corporaciones en donde hay mayor conocimiento y experiencia con el manejo de los guaduales, trabajan de manera más expedita y los procesos son más simples y ágiles, lo que beneficia a los productores y obviamente a los guaduales. Lo desafortunado es que aún no se tiene una verdadera política a nivel local, regional y mucho menos nacional. Todo queda en manos de la conciencia de unos pocos que, si faltaran, se daría un retroceso lamentable. Al nivel nacional, por ejemplo, ni el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial ni el de Agricultura y Desarrollo Rural tienen un conocimiento adecuado sobre el recurso. Esto implica que para la economía nacional, el recurso guadua y los productores que lo manejan somos invisibles.

Esta visión centralista hace que se ignore lo que tenemos y que se podría perder a pasos agigantados. Si desaparecieran los guaduales naturales se perdería no solo un material versátil, potencial constructivo, fuentes de trabajo y paisaje inmejorables, sino también el suelo, el agua y el aire. Se perdería incluso una inmejorable posibilidad de restaurar los suelos degradados en la zona andina, los cuales ocupan mayor superficie cada día.

El manejo y las funciones ecosistémicas de los guaduales

Los guaduales naturales del Eje Cafetero ofrecen incomparables

ventajas como ecosistema, por su dinámica, densidad (5650 culmos por hectárea en Yarima), composición vegetal, biodiversidad asociada y servicios ambientales que ofrece. Para su conservación es indispensable mantener su equilibrio por medio de aprovechamientos e intervenciones programadas, bien dirigidas y, sobre todo, supervisadas. El guadual se debe manejar mediante un sistema de doble vía: es decir, manejarlo con cuidado y respeto para que el guadual devuelva con creces. El aprovechamiento o extracción de culmos no debe exceder la tasa de recuperación o regeneración, expresada como la cantidad de culmos nuevos que entran al guadual en un tiempo dado. Si este principio se respeta, la dinámica del guadual se verá estimulada y, entonces, será posible acortar los tiempos entre sacas, pues la respuesta a este manejo implica un incremento en la oferta de culmos.

Parte de la diversidad de los guaduales se asocia con árboles de distintas especies. Al hacer las labores propias del aprovechamiento, se deben respetar todos los árboles presentes porque, sin importar su tamaño, estos son y serán el soporte de los culmos en su etapa de crecimiento, ante vientos fuertes o tormentas. Algunas personas aseguran que la presencia de árboles en el guadual es competencia para la guadua; sin embargo, la experiencia nos ha demostrado que su papel como soporte y/o como hábitat de la fauna asociada a estos bosques es más representativo.

En Yarima, son evidentes las funciones ecológicas que cumplen los guaduales: protección de fuentes hídricas, conservación del suelo a través del control de la erosión, mejoramiento de la fertilidad y restauración de áreas deterioradas. Debido a la fragmentación que han sufrido los ecosistemas naturales, la conectividad que ofrecen los guaduales es una gran ventaja, pues



Foto: Lucía Mejía.

Debido a la fragmentación que han sufrido los ecosistemas naturales, la conectividad que ofrecen los guaduales es una gran ventaja, pues sirven como corredores biológicos para muchas especies de aves, mamíferos y reptiles

sirven como corredores biológicos para muchas especies de aves, mamíferos y reptiles. En Yarima se han contabilizado 13 especies de mamíferos, 50 de aves y 10 de anfibios y reptiles.

Materia prima de calidad para diversos usos

Es indudable el potencial de la guadua como material de construcción. Sus usos van desde simples aplicaciones de tipo doméstico, como cercas y corrales o estructuras temporales para andamios y casetones, hasta estructuras que requieren de un apropiado diseño ingenieril y arquitectónico. Ya sea rolliza o procesada, los productos de guadua logran satisfacer las necesidades

de distintos sectores del mercado. Además de ser el material de construcción ideal del presente y del futuro del Eje Cafetero, la guadua es una importante alternativa ante la deforestación de bosques, para el desarrollo de la agroindustria regional y el mejoramiento de la rentabilidad de nuestras fincas.

Este material es apto para construcciones en zonas de alta sismicidad. Por sus características, contribuye a la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo de pérdida de vidas humanas e infraestructura. No obstante, la falta de información entre los consumidores potenciales hace que no se conozcan las cualidades del material y se genera desconfianza al momento



La presencia de árboles en el guadua brinda soporte y/o hábitat para la fauna asociada a estos bosques

de tomar la decisión de utilizar la guadua. Además, el uso inapropiado del recurso le ha creado una mala imagen. Por ejemplo, el empleo de prácticas inadecuadas de construcción con guadua o el uso de materia prima de mala calidad hacen que las estructuras construidas no respondan a las expectativas. Esto ha ido en detrimento de la imagen del recurso, que ha sido calificado como material de segunda categoría. Curiosamente, cuando se cuestionan los resultados de estos procesos se denigra al recurso y no a quienes han hecho un mal uso del mismo.

La calidad de la guadua tiene que ver con varios aspectos. Los culmos deben cosecharse al llegar a la madurez apropiada (se deben respetar los criterios de definición de la madurez). Durante la cosecha, hay que proteger la corteza externa de los culmos; se deben cortar las ramas laterales para evitar daños que impliquen rupturas o desgarres

a partir del punto de corte. Después de cosechados, hay que manejar los culmos con cuidado: sin tirarlos ni golpearlos para evitar fisuras internas; además, hay que aplicar un adecuado proceso de preservación en la concentración correcta y por el tiempo necesario. En Yarima usamos una solución de boro en la que se sumergen los culmos. Para mejorar y homogenizar su aspecto, los culmos deben lavarse para eliminar hongos y líquenes. La calidad depende de que se hagan las cosas bien, respetando cada uno de los pasos del proceso. Como empresarios, podemos garantizar productos de calidad y estéticamente superiores.

Desafortunadamente, la mayoría de veces el consumidor compra por precio y no por calidad. Los culmos cosechados sin respeto por las normas de calidad mencionadas son más baratos, pero también se van a deteriorar rápidamente. Esto conlleva a la mala fama de la guadua...

Información e investigación

La falta de promoción y divulgación de los resultados de investigaciones realizadas por las instituciones académicas se aúna a la problemática mencionada. Es urgente implementar canales de comunicación que ayuden a difundir el conocimiento entre todos aquellos que lo necesitan; asimismo, al facilitarse el acceso a la información, se incrementan las posibilidades de uso del recurso. Por otra parte, algunas de las soluciones tecnológicas desarrolladas por la academia no pueden ser puestas en práctica a costos razonables. Es necesario, entonces, desarrollar tecnologías apropiadas para las condiciones de manejo de baja escala propias de la zona. *“Es necesario hablar menos y hacer más...”*

Por tratarse de un recurso de primordial importancia en el Eje Cafetero, el tema de la guadua debiera ser incluido en el pensum de los programas de ingeniería, arquitectura y otras carreras cuyos egresados tengan que ver en algún momento con este recurso. De esta manera, se lograría que los futuros profesionales tengan un mayor conocimiento de las potencialidades del recurso.

Hay que ser consecuentes con lo que vivimos y creemos y empezar a actuar desde todos los frentes y en todos los niveles, desde lo personal, local, regional, nacional, hasta lo gubernamental, académico y profesional. Hay que dejar de pontificar para empezar a ejecutar. Desde hace ya 60 años, en su tesis de grado el ingeniero agrónomo Francisco Mejía destacaba los usos ambientales e industriales de la guadua, así como las investigaciones necesarias. Esto demuestra que el tema no es nuevo, que hay inquietudes desde hace mucho tiempo y que las bondades del recurso se conocen desde hace muchos años. Ya es hora de sacar provecho a uno de nuestros recursos naturales más desaprovechados y amenazados. 🌱

Guadua angustifolia en la Ecorregión Cafetera colombiana.

1. Extracción y cuantificación de lignina insoluble

Oscar Marino Mosquera¹;
Yeny Juliana Cortes¹;
Jaime Niño Osorio¹

La determinación de lignina insoluble en culmos de *Guadua angustifolia* de diferentes edades mostró que los contenidos más altos se presentan alrededor de los 48 y 60 meses. A esta edad, la guadua es apta para ser usada con fines estructurales, puesto que en ese momento se incrementan la resistencia y las características mecánicas.



Foto: Óscar Marino Mosquera.

¹ Grupo de Biotecnología-Productos Naturales (GB-PN). Escuela de Tecnología Química. Facultad de Tecnología. Universidad Tecnológica de Pereira. AA 097. La Julita, Pereira, Colombia.
Autor para correspondencia: omosquer@utp.edu.co

Resumen

Se determinó la cantidad de lignina insoluble presente en 101 muestras de culmos de *Guadua angustifolia* con edades entre uno y diez años. Las muestras se colectaron en tres sitios diferentes de la Ecorregión Cafetera de Colombia: Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira, Fincas El Bambusal y Nápoles. La extracción de la lignina insoluble se hizo de acuerdo con la norma Tappi 222 om-06. Se encontró una variación entre 20,30% y 38,15% de lignina, la cual se relaciona con la madurez de los culmos. El porcentaje de lignina en individuos provenientes de un mismo sitio mostró poca variabilidad, pero se evidenciaron diferencias significativas ($\alpha \leq 0,005$) entre sitios de recolección y edad de los individuos. Los contenidos más altos de lignina se encontraron entre los cuatro y cinco años de edad. Los espectros de infrarrojo de la lignina insoluble contenida en diferentes muestras evaluadas mostraron absorciones típicas de los grupos funcionales hidroxilo, metoxilo y carbonilo.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; ligninas; culmo; madurez; zona cafetera; Colombia.

Summary

***Guadua angustifolia* in the Colombian coffee eco-region. 1. Extraction and quantification of insoluble lignin contents.** The amount of insoluble lignin found in 101 samples of *Guadua angustifolia* culms aged one to ten years was determined. Samples were collected in three sites from the Colombian coffee ecoregion: Botanical Garden of the Universidad Tecnológica de Pereira, Nápoles and Bambusal farms. Tappi method 222 om-06 was used for the extraction of insoluble lignin. Lignin content ranged from 20.30% to 38.15%; this variation was closely related to maturity. The percentage of lignin in individuals from the same collecting place showed little variability; however, there were significant differences ($\alpha \leq 0.005$) among sites and ages. The highest lignin contents were found in culms aged four or five. Infrared spectra of insoluble lignin in different samples showed absorptions typical for hydroxyl, methoxyl and carbonyl functional groups.

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; lignins; culm; maturity; coffee zone; Colombia.

Introducción

La guadua, o bambú, ha sido utilizada tradicionalmente en construcción por su excelente relación resistencia-peso, propiedades físico-mecánicas y flexibilidad arquitectónica. En el mundo existen alrededor de 1250 especies de bambú, localizadas principalmente en América, África y Asia. En Centro y Suramérica, una de las especies más usadas en construcción es *Guadua angustifolia* Kunt (Poaceae). Esta especie ha sido catalogada como una de las 20 especies de bambú de mayor sostenibilidad debido a su crecimiento rápido, gran tamaño y capacidad para la captación de CO₂ (Villegas 2005, López y Correal 2009).

La guadua está constituida principalmente por celulosa y lignina. Esta última es el segundo compo-

nente más importante de la pared celular de todas las plantas vasculares y representa entre 20-35% de la biomasa vegetal (Kuroda et ál. 2002). En general, la lignina se forma por deshidrogenación enzimática de los alcoholes fenilpropiónicos, *p*-cumarílico, coniferílico y sinapílico que se polimerizan y forman unidades monoméricas guaiacilo (G), siringerilo (S) y *p*-hidroxifenilo (H), por lo cual la lignina no tiene una estructura única (Buranov y Mazza 2008). En las gramíneas, la formación de lignina involucra los tres tipos de unidades monoméricas (H-G-S) (Del Río et ál. 2005), mientras que en las coníferas se forma por las unidades G-H (Sarkanen y Hergert 1971). Algunas de las funciones de la lignina son: la regulación de la hidratación de las moléculas hidrofílicas en las

paredes celulares, la capacidad de resistencia ante grandes compresiones y la protección contra ataques de patógenos y herbívoros (Anaya 2003).

Con este trabajo se pretendió determinar la importancia de este tipo de material para la construcción y fabricación de muebles. Los resultados de la investigación se presentan en dos partes, en este mismo número de la RRNA. En esta primera parte se busca: a) cuantificar el contenido de lignina insoluble presente en culmos de *G. angustifolia* y determinar si dicho contenido se correlaciona con la madurez de los culmos; b) establecer por espectroscopía infrarroja la naturaleza de los grupos funcionales predominantes en la lignina insoluble. En la segunda parte se busca determinar el efecto de la

madurez sobre el contenido de carbohidratos en sus extractivos y su relación con las secciones del culmo, para así inferir las condiciones de corte más adecuadas que permitan optimizar la utilización y preservación del producto.

Material vegetal

Se recolectó material vegetal de varios individuos de *G. angustifolia* en diferentes estados de madurez y en tres sitios: Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira (JB-UTP, 6 individuos), Finca Nápoles (FN, 1 individuo) y Finca El Bambusal (FB, 1 individuo), localizadas en Montenegro (Quindío). Además, de otros cuatro individuos se tomaron muestras de diferentes secciones para determinar el contenido de la lignina ácida insoluble (Fig. 1). En total se recolectaron 101 muestras (Cuadro 1).

Extracción y cuantificación de la lignina insoluble

De cada muestra se tomaron 5 g de material vegetal seco y molido, los cuales fueron sometidos a extracción con acetona a 45°C por 6 horas (dos veces); posteriormente, se extrajo con agua a 80°C por 1 hora (dos veces) y con etanol a 60°C por 6 horas (dos veces). Después de esto, el material vegetal extraído se secó a 60°C y se pasó por un tamiz de 20 Mesh para obtener una muestra de tamaño homogéneo.

Para la extracción de la lignina insoluble se siguió la metodología de la norma Tappi 222 om-06 (Tappi 2006) con algunas modificaciones: se tomaron 250 mg del material previamente tamizado, se agregaron 3,75 mL de ácido sulfúrico al 72% y se dejó reaccionar durante 2 horas a 15°C. Pasado este tiempo, se ajustó el volumen de la mezcla reaccionante con la adición de 143,75 mL de agua para que el ácido quedara al 1,9% y se sometió a ebullición durante cuatro horas; fue necesario adicionar agua frecuentemente para mantener constante la concentración del ácido. Posteriormente, la solución se dejó enfriar y se almacenó a 10°C durante 12 horas para permitir que la lignina insoluble decantara. Finalmente, el sobrenadante se filtró y el residuo se secó a 105°C. El porcentaje de lignina

insoluble en la muestra se determinó según Tappi (2006), mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Lignina insoluble} = (\text{Peso del residuo} / 250 \text{ mg}) \times 100$$

Esta extracción se realizó por triplicado en días diferentes para verificar la reproducibilidad del método de extracción.

Caracterización estructural de la lignina insoluble

La caracterización estructural de la lignina insoluble se llevó a cabo por espectroscopía infrarroja según los métodos descritos por Schultz et ál. (1985) y Abreu (1997). Se usó una pastilla de KBr al 1% en el espectrómetro de infrarrojo Satellite FT-IR (Thermo Mattson, Wisconsin,

Cuadro 1. Muestras de *Guadua angustifolia* analizadas

Zona de recolección	Individuo	Edad (meses)	Sección evaluada
Finca El Bambusal (1252 msnm; 4°51.8'N, 75°79.0'W)	1	12, 24, 36, 48, 60, 72, 84 y 120	Muestra representativa de todo el individuo, no se diferenció por secciones
	1	12, 24, 36, 48, 60 y 72	
Jardín Botánico UTP (1411 msnm; 4°47'N, 75°41'W)	2	12, 24, 36, 48 y 60	Baja, media y alta
	7	12, 24, 36 y 48	Muestra representativa de todo el individuo, no se diferenció por secciones
	9	12, 24, 36, 48 y 60	
	11	12, 24, 48, 36, 60, 84 y 96	Baja – baja, baja, media, alta
	13	12, 24, 36, 48 y 60	Baja – baja, baja, media, alta
Finca Nápoles (1250 msnm; 4°55.5'N, 75°80.2'W)	1	12, 24, 36, 48, 60, 72, 84 y 96	Baja, media y alta

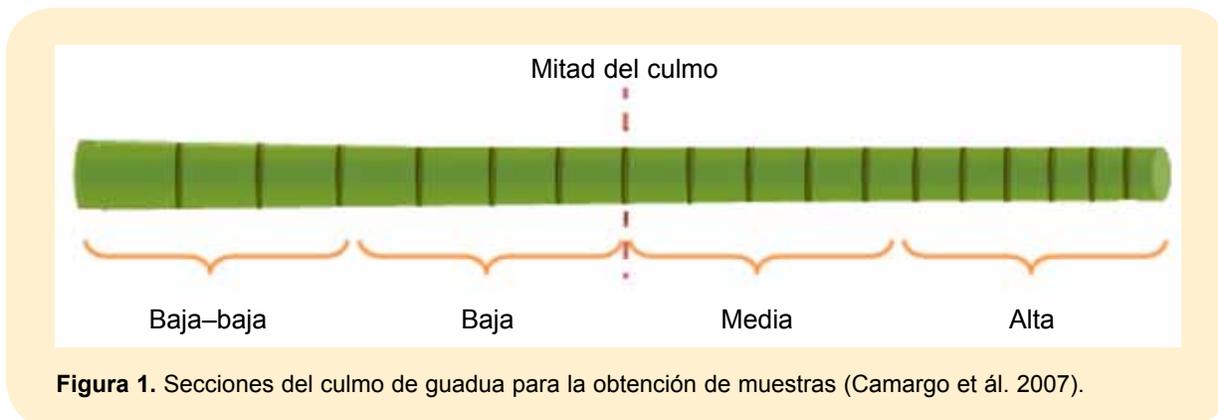


Figura 1. Secciones del culmo de guadua para la obtención de muestras (Camargo et ál. 2007).

EE.UU.) usando el software EZ Omnic (versión 6.0a).

Resultados y discusión

Extracción y cuantificación de la lignina insoluble

El contenido de lignina insoluble de los culmos de *G. angustifolia* varió entre 20,0% y 38,15% -resultados que concuerdan con los reportados para diferentes especies de bambú; por ejemplo, 23,4% para *Bambusa vulgaris* (Alves et ál. 2010), 26,1% para *Phyllostachys heterocyclus* y 23,8% para *Phyllostachys nigra* (Higuchi et ál. 1955). Los resultados obtenidos de las muestras colectadas en el JB-UTP se presentan en el Cuadro 2; el mayor porcentaje de lignina se encontró en la sección alta del culmo a los 48 y 60 meses de edad (Fig. 2). Aunque no se observaron diferencias significativas en el contenido de lignina insoluble entre las diferentes secciones del culmo, se evidenció una leve tendencia al aumento en los estados más avanzados de madurez. Lybeer y Koch (2005) encontraron resultados similares con la especie de bambú *Gigantochloa levis*.

En el Cuadro 3 se ofrecen los resultados obtenidos con las muestras recolectadas en las fincas Nápoles y El Bambusal. No se evidenciaron diferencias importantes en el contenido de lignina insoluble; en Nápoles, el mayor contenido se encontró en las secciones alta y media del culmo a los 60 y 96 meses de edad. Sin embargo, a los 96 meses también se presentó un alto contenido de lignina en la sección baja. En El Bambusal, el incremento con la edad fue mínimo.

Con base en los resultados obtenidos del porcentaje de lignina insoluble de las muestras colectadas en JB-UTP, FN y FB, se encontraron diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) entre los tres sitios de recolección y entre edades (12, 24, 36, 48 y 60 meses). Los contenidos de lignina más altos se obtuvieron en las muestras colectadas a los 48

Cuadro 2. Porcentaje de lignina ácida insoluble presente en muestras de *Guadua angustifolia* recolectadas en el Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira

Individuo	Edad (meses)	Sección	Lignina insoluble (%)*	DS
1	12	MR	25,17	1,23
	24		20,30	2,20
	36		21,90	2,10
	48		25,44	0,68
	60		24,10	1,45
	72		23,77	2,49
2	12	B	23,83	2,26
		M	23,84	2,08
		A	23,06	1,99
	24	B	23,22	2,02
		M	22,27	0,55
		A	31,24	1,52
	36	M	23,28	2,50
		A	21,63	2,52
		B	28,77	2,74
	48	M	31,33	1,86
		A	37,00	0,93
		B	21,53	1,61
60	M	31,57	1,51	
	A	35,35	1,60	
	B	26,54	0,83	
7	12	MR	26,54	0,83
	24		20,80	2,37
	36		22,14	1,38
	48		25,88	0,95
9	12	MR	29,96	1,22
	24		21,65	1,58
	36		23,80	1,61
	48		23,18	1,00
60	60	MR	26,34	1,31
	12		25,28	1,95
	B		26,13	2,10
	M		25,37	1,00
11	12	A	24,77	1,12
		B-B	21,59	2,31
		B	22,66	0,71
	24	M	22,30	0,92
		A	25,27	2,51
		B-B	25,93	1,72
	48	B-B	25,28	1,07
		B-B	28,20	1,81
		B-B	30,61	1,09
	96	B-B	23,96	0,42
		B	28,10	2,10
		A	25,31	0,44
13	12	B-B	22,56	0,34
		B	26,89	0,99
		M	26,88	1,28
	24	A	25,73	1,84
		B-B	26,04	1,10
		B	30,44	2,31
	36	M	25,47	0,20
		A	27,23	1,09
		B-B	24,66	2,60
	48	B	25,90	2,32
		M	27,17	0,55
		A	29,67	0,15
60	B-B	27,01	2,49	
	B	26,25	0,58	
	M	29,33	1,84	
60	A	29,86	1,08	

A: alta; B-B: baja-baja; B: baja; M: media; MR: muestra representativa (no diferenciada por secciones)

*Media de tres repeticiones

DS: desviación estándar

y 60 meses de edad en FN, seguidos por las muestras del JB-UTP (Fig. 3). Estos resultados se enmarcan en lo supuesto por Liese y Weiner (1997), en el sentido de que la madurez del bambú se alcanza entre los tres y cuatro años de edad con lignificación posterior, a medida que envejece.

En general, el porcentaje de lignina presentó poca variabilidad entre las diferentes secciones, aunque sí se evidenciaron diferencias significativas entre sitios de recolección (análisis de varianza con Test de Tukey al 5%). Asimismo, hubo variaciones en los contenidos de lignina a diferentes edades de recolección para un mismo individuo analizado. A medida que los individuos avanzan en el estado de madurez, el contenido de lignina aumenta, lo que correlaciona con la distribución de lignina durante el envejecimiento de los tejidos de los culmos de *Phyllostachys pubescens* determinada por Yang et ál. (2010). Con esta información se puede inferir que la guadua más apta para uso estructural -por sus propiedades físico-mecánicas- es la que tenga una edad superior a los 48 meses, ya que a esa edad es cuando se tienen los porcentaje de lignina más altos. Para el uso en la industria papelera, la mejor opción se presenta a edades tempranas cuando la cantidad de lignina es menor; a mayor cantidad de lignina residual, mayores son las dificultades para la remoción total, lo que implica un consumo excesivo de reactivos para el blanqueamiento (Barbosa et ál. 2008).

El rango porcentual de lignina obtenido en este estudio (20,30 a 38,15%) es muy cercano al reportado por Li (2004) para maderas blandas (24 a 37%). Adicionalmente, se encontró que la desviación estándar entre los porcentajes obtenidos fue baja para la mayoría de las muestras, lo cual indica que la dispersión entre los datos de las tres repeticiones fue baja y, por lo tanto, el método de extracción implementado resultó reproducible.

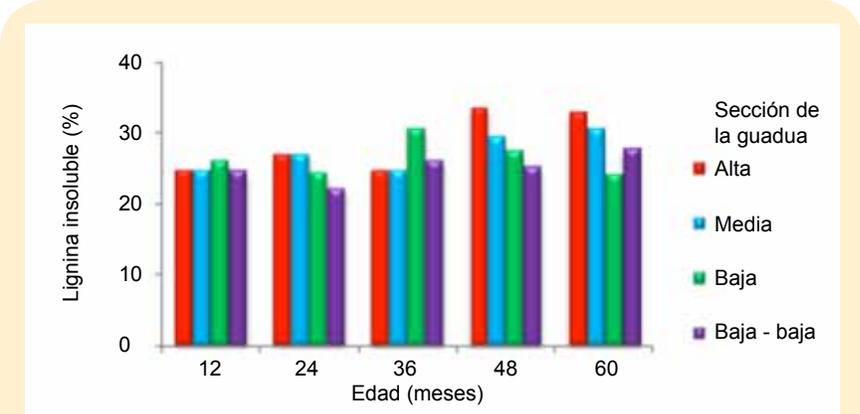


Figura 2. Contenido de lignina insoluble en diferentes secciones y edades de los individuos colectados en el Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira

Cuadro 3. Porcentaje de lignina ácida insoluble presente en las muestras de *Guadua angustifolia* Kunth recolectadas en las fincas Nápoles y El Bambusal

Individuo	Edad (meses)	Sección	Lignina insoluble (%)*	DS
Finca Nápoles				
7	12	B	23,65	0,94
		M	32,42	2,31
	24	A	23,61	1,02
		B	27,32	1,03
	36	M	25,91	1,38
		A	29,45	1,39
	48	B	30,02	0,91
		M	30,35	2,33
	60	A	34,11	0,15
		B	32,11	1,41
	72	M	33,58	2,99
		A	32,90	1,82
	84	B	29,88	1,61
		M	37,80	2,11
	96	A	33,97	0,81
		B	29,96	2,72
	120	M	33,86	2,61
		A	38,15	2,28
Finca El Bambusal				
1	12	MR	21,15	1,08
	24		21,84	0,66
	36		21,69	0,78
	48		23,75	1,18
	60		24,16	2,31
	72		23,92	1,78
	84		25,95	0,92
	120		23,65	0,31

A: alta; **B-B:** baja-baja; **B:** baja; **M:** media; **MR:** muestra representativa (no diferenciada por secciones)

*Media de tres repeticiones

DS: desviación estándar

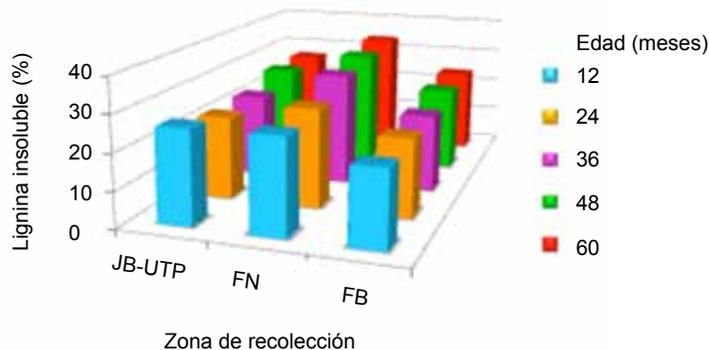


Figura 3. Contenido de lignina insoluble en las muestras colectadas en JB-UTP (Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira), FN (Finca Nápoles) y FB (Finca El Bambusal)

Cuadro 4. Absorciones características de la lignina en espectroscopía infrarroja

Grupo funcional		Frecuencia (/cm)	Característica
Señal	Tipo		
I	O-H	3320	Hidroxilo: Fenol y/o alcohol
II	C=O	1720	Carbonilo
	C-H Aromático	1600-1590 y 1596	Anillo aromático de guaiocilo
III	C-H Aromático	1505-1511	Anillo aromático de siringerilo
IV	C-O	1268	Metoxilo de guaiocilo
	C-O	1244	Metoxilo de siringerilo

Fuente: Abreu (1997).

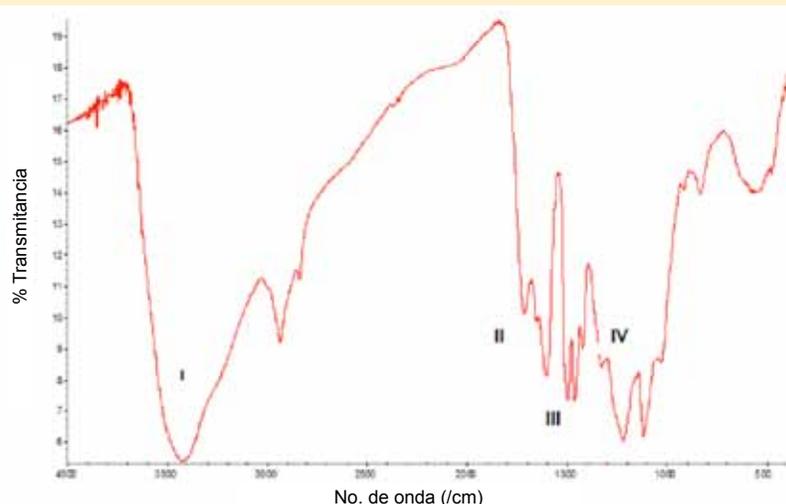


Figura 4. Espectro infrarrojo de lignina insoluble obtenida de culmos de *G. angustifolia* (individuo 7) recolectados en la Finca Nápoles

Caracterización estructural de la lignina insoluble

La caracterización estructural de la lignina insoluble proveniente de culmos de *G. angustifolia* se hizo por medio de espectroscopía infrarroja (IR). Los espectros IR se midieron en el rango de 4000 a 600/cm y en porcentaje de transmitancia en el espectrómetro Satellite FT-IR. En la Fig. 4 se presenta el espectro infrarrojo de la lignina insoluble obtenida de la sección baja del individuo 7 de 12 meses de edad, recolectado en la Finca Nápoles. En el Cuadro 4 se muestran las absorciones en el espectro infrarrojo presentadas por los principales grupos químicos; tales valores son típicos para este tipo de compuestos, y similares a los presentados por Boeriu et ál. (2004) y muy cercanos a los de la lignina de madera de *Pinus oocarpa* (tipo guaiocilo) (Morais et ál. 2005).

Al realizar el análisis de los espectros IR de lignina obtenida de varias muestras recolectadas en las tres zonas no se observó ninguna diferencia entre ellas, como se ilustra en la superposición de espectros presentada en la Fig. 5. Con base en los grupos químicos caracterizados y los datos bibliográficos se sugiere que la lignina de *G. angustifolia* corresponde al tipo siringil-guaiocilo (SG) (Carballo et ál. 2004).

Conclusiones

La determinación de lignina insoluble en culmos de *Guadua angustifolia* de diferentes edades mostró que los contenidos más altos se presentan alrededor de los 48 y 60 meses. A esta edad, la guadua es apta para ser usada con fines estructurales, puesto que en ese momento se incrementan la resistencia y las características mecánicas.

La cantidad de lignina no difiere significativamente entre las diferentes secciones de culmos provenientes de un mismo sitio de recolección. Esto demuestra el alto grado de aprovechamiento de este recurso natural, ya que se pueden utilizar todas las partes de un mismo individuo; sin

embargo, se evidenciaron diferencias entre los sitios de recolección y la edad de los individuos.

Estructuralmente, no se observaron variaciones de la lignina insoluble obtenida en los individuos provenientes de los diferentes sitios de recolección.

Agradecimiento

Los autores expresan agradecimiento a COLCIENCIAS (Proyecto Código 1110452-21121; Contrato 442-1-2008) y a la Universidad Tecnológica de Pereira por el financiamiento parcial del proyecto. Agradecemos también a los propietarios de las fincas Nápoles y El Bambusal por conceder el permiso de recolección de los materiales vegetales.

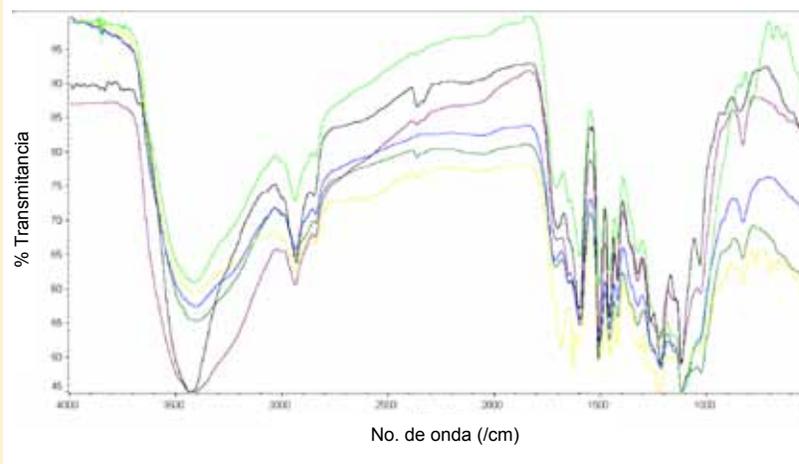


Figura 5. Superposición de espectros de infrarrojo de diferentes muestras de lignina de culmos de *G. angustifolia* obtenidos en el Jardín Botánico de la Universidad Técnica de Pereira y las fincas El Bambusal y Nápoles

Literatura citada

- Abreu, HS. 1997. Estimativa por infravermelho da concentração da unidade estrutural b-O-4 em ligninas de angiospermas tropicais. *Química Nova* 20: 592-598.
- Alves, EF; Bose, SK; Colodette, JL; Iakovlev, M; Van Heiningen, A. 2010. Carbohydrate composition of eucalyptus, bagasse and bamboo by a combination of methods. *Carbohydrate Polymers* 82:1097-1101.
- Anaya, AL. 2003. *Ecología química*. México, DF, México, Plaza y Valdés. 349 p.
- Barbosa, LC; Maltha, CR; Lopes, V. 2008. Determinação da relação siringila/guaiacila da lignina em de eucalipto por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (PI CG/EM). *Química Nova* 31: 2035-2041.
- Boeriu, CG; Bravo, D; Gosselink, RJA; van Dam, JEG. 2004. Characterization of structure-dependent functional properties of lignin with infrared spectroscopy. *Industrial Crops and Products* 20: 205-218.
- Buranov, AU; Mazza, G. 2008. Lignin in straw of herbaceous crops. *Industrial Crops and Products* 28: 237-259.
- Camargo, JC; Morales T; García JH. 2007. *Mensura e inventario forestal para la planificación y manejo sostenible de bosques de Guadua*. Dosquebradas, Colombia, Grupo de Investigación en Gestión de Agrosistemas Tropicales Andinos. 125 p.
- Carballo, LR; Orea, UI; Cordero, EM. 2004. Composición química de tres maderas en la provincia de Pinar del Río, Cuba, a tres alturas del fuste comercial. Parte No 1: *Corymbia citriodora*. *Revista Chapingo (Serie Ciencias Forestales y del Ambiente)* 10: 57-62.
- Del Río, JC; Gutiérrez A; Hernando, M; Landín, P; Romero, J; Martínez AT. 2005. Determining the influence of eucalypt lignin composition in paper pulp yield using Py-GC/MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 74: 110-115.
- Kuroda, KI; Nishimura, N; Izumi, A; Dimmel, DR. 2002. Pyrolysis of lignin in the presence of tetramethylammonium hydroxide: a convenient method for S/G ratio determination. *Journal of Agricultural Food and Chemistry* 50: 1022-1027.
- Higuchi, T; Kawamura, I; Kawamura H. 1955. Properties of the lignin decayed wood. *Journal of the Japanese Forest Society* 37: 298-302.
- Li, X. 2004. Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. Master Thesis. Louisiana State University, Agriculture and Mechanical College. 76 p.
- Liese, W; Weiner, G. 1997. Modifications of bamboo culm structures due to ageing and wounding. In Chapman, G. (Ed). *The Bamboos*. London, Academic Press. Linnean Society Symposium Series. p. 313-322.
- López, LF; Correal, JF. 2009. Estudio exploratorio de los laminados de bambú *Guadua angustifolia* como material estructural. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 11: 171-182.
- Lybeer, B; Koch, G. 2005. Lignin distribution in the tropical bamboo species *Gigantochloa levis*. *IAWA Journal* 26: 443-456.
- Morais, SAL; Nascimento, EA; Melo, DC. 2005. Análise da madeira do *Pinus oocarpa*. Parte II: Caracterização estrutural da lignina de madeira moída. *Revista Árvore* 29: 471-478.
- Sarkanen, KV; Hergert, HL. 1971. Classification and distribution. In Sarkanen KV, Ludwig CH (Ed). *Lignins: occurrence, formation, structure and reactions*. New York, Wiley & Sons. p. 43-94.
- Schultz, T; Templeton, M; McGinnis, G. 1985. Rapid determination of lignocelluloses by diffuse reflectance fourier transform infrared spectrometry. *Analytical Chemistry* 57: 2867-2869.
- TAPPI (Leading Technical Association for the Pulp, Paper, and converting Industry). 2006. T 222 om-06. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. 5 p.
- Villegas, M. 2005. *Guadua: arquitectura y diseño*. Bogotá, Colombia Villegas Editores. Edición ilustrada. 208 p.
- Yang, SM; Jiang, ZH; Ren, HQ; Fei, BH; Liu, XE. 2010. Determination of lignin distribution during ageing of bamboo culms (*Phyllostachys pubescens*) with visible-light spectrophotometry. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis* 30: 3399-3404.

Guadua angustifolia en la Ecorregión Cafetera colombiana.

2. Cuantificación de carbohidratos libres presentes en extractos

Oscar Marino Mosquera Martínez¹;
Anyela Marcela Ríos Ríos¹;
Jaime Niño Osorio¹

Para establecer las condiciones óptimas de utilización de la guadua en aplicaciones estructurales y/o industriales, se deben determinar sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Principalmente, se deben considerar los contenidos de almidón y carbohidratos libres, ya que estos influyen en la vida útil y la calidad del material, puesto que entre menor sea la concentración de carbohidratos en los culmos, menos susceptibles serán al ataque de hongos, bacterias e insectos.

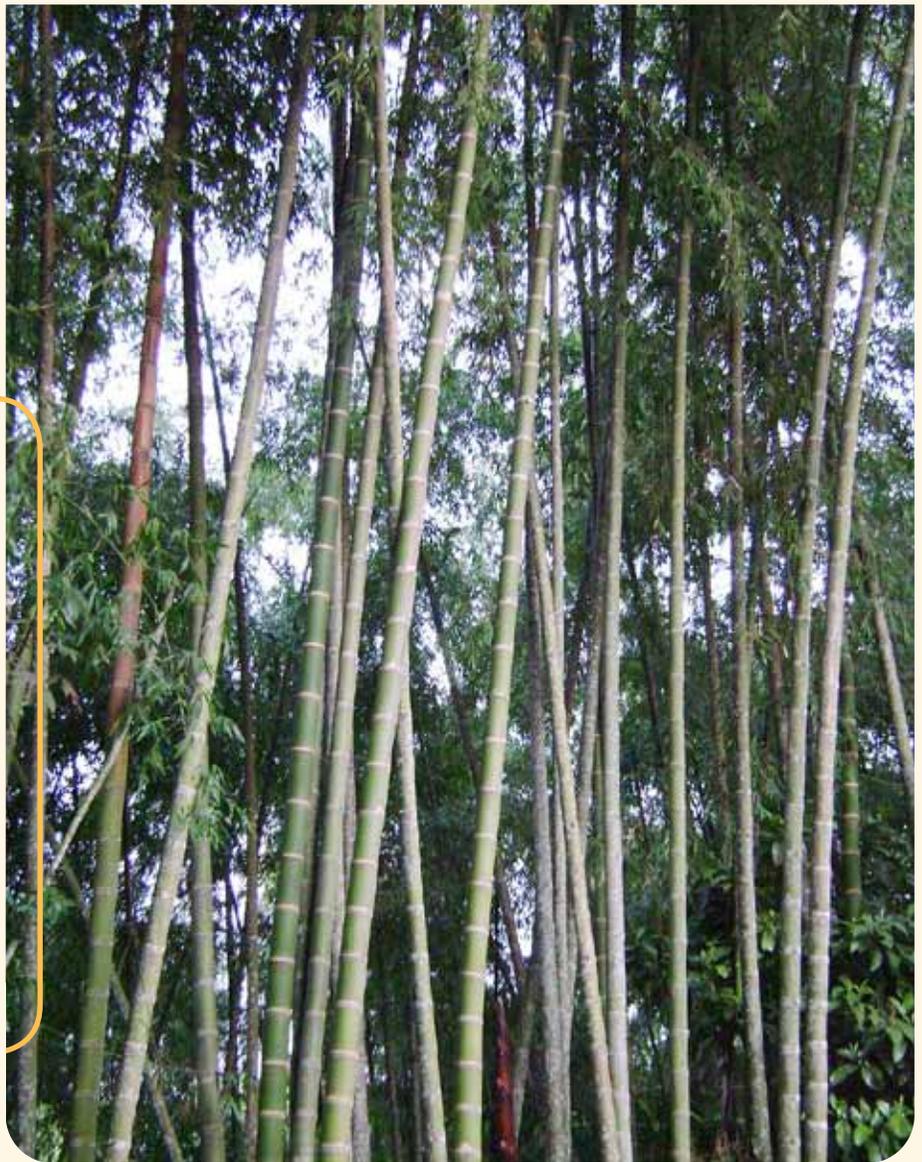


Foto: Óscar Marino Mosquera.

¹ Grupo de Biotecnología-Productos Naturales (GB-PN). Escuela de Tecnología Química. Facultad de Tecnología. Universidad Tecnológica de Pereira. AA 097. La Julita. Pereira, Colombia.
Autor para correspondencia: omosquer@utp.edu.co

Resumen

En este trabajo se evaluaron 101 muestras de culmos de *Guadua angustifolia* de diferentes edades y secciones del culmo, colectadas en tres zonas de la Ecorregión Cafetera de Colombia (Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira, fincas El Bambusal y Nápoles). Mediante cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC), se determinó el contenido de los carbohidratos arabinosa, fructosa, glucosa, sacarosa y xilosa presentes en extractos obtenidos aplicando las normas TAPPI 204 y 264 cm-07. La concentración de carbohidratos varió entre 0,0034 y 2,4748%; se estableció que las zonas de recolección, la edad y la sección del culmo incidieron en el contenido de carbohidratos. Los porcentajes más altos se obtuvieron en muestras de dos y tres años de edad, colectadas en el Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira, de tres años en Nápoles y de cinco años en El Bambusal. Los carbohidratos predominantes en las muestras del Jardín Botánico y El Bambusal fueron fructosa y glucosa y arabinosa en finca Nápoles. Se determinó que la edad propicia para la cosecha de *G. angustifolia* es a los 48 meses, cuando se tienen los contenidos más bajos de carbohidratos totales.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; culmo; arabinosa; glucosa; fructosa; sacarosa; xilosa; carbohidratos; madurez; zona cafetera; Colombia.

Summary

***Guadua angustifolia* in the Colombian coffee eco-region. 2. Determination of free carbohydrates in extracts.** In this study, 101 *Guadua angustifolia* samples of different ages and culm sections were evaluated. Samples were collected in three sites from the Colombian coffee ecoregion: Botanical Garden of the Universidad Tecnológica de Pereira, Nápoles and Bambusal farms. By high performance liquid chromatography (HPLC), the contents of carbohydrates (arabinose, fructose, glucose, sucrose and xylose) were determined in extracts obtained using Tappi methods 204 and 264 cm-07. Carbohydrates concentration varied from 0.0034 to 2.4748%; it was established that collection site, age and culm section influence on the carbohydrate contents. The highest sugar percentages were obtained in samples aged two and three years collected at the Botanical Garden, three years in Nápoles, and five years in El Bambusal. Fructose and glucose were the most abundant carbohydrates in the samples collected in both the Botanical Garden and El Bambusal, and arabinose in Nápoles farm. The ideal age for harvesting *G. angustifolia* is at 48 months, when the species total carbohydrate contents are the lowest.

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; culms, carbohydrates; arabinose, glucose, fructose, sucrose, xylose; maturity; coffee zone; Colombia.

Introducción

Guadua angustifolia Kunth es una de las especies más destacadas del género por su valor comercial como materia prima para la construcción de viviendas, balsas, puentes, elaboración de artesanías y la obtención de pulpa y papel (Perea et ál. 2003). La especie se distribuye ampliamente en las Cordilleras Central y Occidental de Colombia, princi-

palmente en los departamentos de Cundinamarca, Quindío, Risaralda y Valle del Cauca, donde las condiciones climáticas y edáficas son muy favorables para su desarrollo.

Los principales constituyentes de la guadua son celulosa, hemicelulosa y lignina; además, posee extractos en proporciones bajas, constituidos por una serie de metabolitos primarios y secundarios como taninos, aceites,

grasas, resinas, ceras, gomas, almidones y carbohidratos. Los extractos no son componentes estructurales de la madera, pero influyen en los procesos de obtención y en la calidad de las pulpas celulósicas; pueden ser extraídos con agua caliente, alcohol u otros solventes y su concentración en metabolitos varía con la madurez, época de recolección y sección del culmo (Li 2004).

Los guaduales tienen efectos protectores sobre los suelos y las aguas de las microcuencas. Con su sistema radicular contribuyen a la conservación y recuperación de los suelos, puesto que lo estabilizan en las laderas y orillas de los ríos evitando la erosión y los derrumbes. La guadua produce gran cantidad de oxígeno y es una excelente fijadora del dióxido de carbono atmosférico. Por su capacidad de rebrote y de manejo sostenible, la especie ofrece gran potencial para la reforestación de las cuencas hidrográficas, lo cual implica el aprovechamiento y manejo racional del cultivo (Chiluita y Hernández 2009).

Sin embargo, en Colombia no se tiene una producción sostenida del recurso. Si bien existen unas pocas parcelas cultivadas, el aprovechamiento mayoritario se da en poblaciones naturales que crecen cerca de los ríos. Los culmos verdes o maduros se cortan de forma artesanal y empírica. Puesto que no se tiene conocimiento del estado de madurez óptimo para ser cosechada, en muchas ocasiones se cortan los culmos inmaduros lo que genera un producto de baja calidad y una pérdida innecesaria del material (Camargo 2006, Marín et ál. 2008).

Debido a la importancia de este tipo de material para la construcción y fabricación de muebles se desarrolló este trabajo con el objetivo de determinar el estado de madurez óptimo de la *G. angustifolia* Kunth y de esta forma inferir las condiciones más adecuadas al momento de realizar el corte de la guadua para optimizar su utilización y preservación. Los resultados de la investigación se presentan en dos partes, en este mismo número de la RRNA. En la primera parte se evaluaron los contenidos de lignina insoluble presente en culmos de *G. angustifolia* y su correlación con la madurez de los culmos; además, por espectroscopía infrarroja, se estableció la naturaleza de los grupos funcionales predominantes en la lignina insoluble. En esta segunda parte

se busca determinar el efecto de la madurez sobre el contenido de carbohidratos en guadua y su relación con las secciones del culmo, para así inferir las condiciones de corte más adecuadas.

Materiales y métodos

Obtención de extractos crudos

En la primera parte de este artículo, en este mismo número de la RRNA, se detallan los mecanismos de recolección del material vegetal. De cada muestra se tomaron 5 g de material vegetal seco y molido, los cuales fueron sometidos a extracción con acetona a 45°C por 6 horas (dos veces); posteriormente, se extrajo con agua a 80°C por 1 hora (dos veces) y con etanol a 60°C por 6 horas (dos veces). Este protocolo es una adaptación de las metodologías de las normas TAPPI 204 y 264 cm-07 (TAPPI 2007a y 2007b). Los extractos acuosos y etanólicos fueron concentrados a 50°C y almacenados a -10°C hasta su utilización para la cuantificación de carbohidratos por cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC). Cada extracción se realizó por duplicado en días diferentes. Para determinar la reproducibilidad del método, se seleccionaron 53 muestras de las cuales se analizaron, por HPLC analítico, los dos extractos acuosos y los dos etanólicos. De las 48 muestras restantes, solamente se analizaron los extractos obtenidos en una de las extracciones.

Cuantificación de carbohidratos mediante HPLC

La cuantificación de carbohidratos en extractos de muestras de guadua se realizó en un cromatógrafo analítico 1100 Hewlett Packard (California, EE.UU.) con inyector manual Reodhyne, desgasificador, bomba cuaternaria, horno para la columna, *loop* de 20 µL y detector de índice de refracción (serie 1260 Infinity) a 35°C. Se utilizó una columna ultra amino (Restek, Pensilvania, EE.UU)

de 5 mm de tamaño de partícula de relleno y 150x4,6 mm d.i a 30°C, con el sistema acetonitrilo-agua (75:25) grado HPLC como fase móvil y un flujo de 1 mL/min (Chávez 2007, Norma chilena 2006). Los datos fueron procesados con el programa de adquisición de datos ChemStation (Versión B.04.03). De cada muestra analizada se inyectaron 20 µL con una microjeringa de 50 mL de capacidad (Hewlett Packard).

Preparación de las muestras

De cada uno de los extractos acuosos y etanólicos secos obtenidos de las 101 muestras analizadas se prepararon soluciones a 10.000 mg/L disueltas en acetonitrilo-agua (1:1) grado HPLC; posteriormente se filtraron a través de una membrana de polivinildenedifloride (PVDF) de 0.2 µm (Millipore, Darmstadt, Alemania) y finalmente se inyectaron por triplicado en el cromatógrafo de HPLC.

Curva de calibración de carbohidratos

Se preparó un patrón que contenía arabinosa, fructosa, glucosa, sacarosa y xilosa (marcas Sigma y Supelco (Missouri, EE.UU) a 5000 mg/L cada uno en agua desionizada, a partir del cual se obtuvieron soluciones a concentraciones de 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1000, 1600, 2000 y 3000 mg/L. Las soluciones se filtraron con una membrana de PVDF de 0.2 µm (Millipore) y se inyectaron por triplicado en el equipo HPLC analítico. Las curvas de calibración se realizaron cada semana para verificar su linealidad y el tiempo de retención de los carbohidratos analizados, por medio del *software* del cromatógrafo líquido HP-1100 (ChemStation B.04.03). Tanto los patrones como los extractos obtenidos de las 101 muestras de guadua se analizaron bajo las condiciones cromatográficas descritas.

Análisis estadístico

Los resultados fueron analizados mediante los paquetes informáticos

SPPS versión 10 e InfoStat versión 2007.03. Se evaluó el Anova con prueba t a un 95% de confiabilidad.

Resultados y discusión

Obtención de extractos crudos

La extracción de 5 g de cada una de las 101 muestras de *G. angustifolia* produjo en promedio 237 mg de extractos acuosos (EA) y 35 mg de extractos etanólicos (EE), lo que corresponde al 4,74% de extractos en agua y 0,7% en etanol. Li (2004) obtuvo resultados similares con *Phyllostachys pubescens* (Poaceae).

Los mayores porcentajes de EA se presentaron en las secciones alta, media y baja² de la guadua principalmente a los 24 y 60 meses de edad; la sección baja-baja presentó la menor cantidad de extractos (Fig. 1A). En las secciones media y baja, el contenido de EA aumentó progresivamente hasta los 48 y 36 meses de edad, respectivamente. Con respecto a las zonas de recolección, los mayores contenidos de EA se presentaron a los 36 y 60 meses en las muestras colectadas en FB y FN, respectivamente. En general, los porcentajes más bajos de EA se encontraron en las muestras de 48 meses; en FN, las concentraciones

más bajas se observaron a los 12 meses (Fig. 1B). Estos resultados concuerdan con los reportados por Li (2004) para *Phyllostachys pubescens*: a los 12 meses, las secciones baja, media y alta mostraron contenidos similares a los de nuestro estudio; tales valores aumentaron gradualmente hasta los 48 meses con una variación de 4,89-7,43%.

El contenido de EE disminuyó gradualmente con la edad (de 12 a 60 meses) en la sección baja-baja; en las secciones baja, media y alta, el contenido aumentó solo hasta los 24 meses, y el mayor porcentaje de EE se encontró en la sección baja (Fig. 2A). En las tres zonas de recolección se presentaron tendencias similares: los mayores contenidos de estos extractos se encontraron en muestras de 12 y 24 meses de edad. En contraste, los valores más bajos se obtuvieron a los 36 y 48 meses (Fig. 2B). Estos resultados concuerdan con lo reportado para los extractos de etanol-tolueno en *Phyllostachys pubescens*, cuyo valor aumentó con la edad desde la sección baja a la alta; ello permitió establecer una edad de corte óptima de 48 meses (Li et al. 2007).

Para determinar la reproducibilidad del método de extracción

empleado se cuantificaron los carbohidratos presentes en los EA y EE resultantes de las dos extracciones realizadas a 53 de las 101 muestras evaluadas; tales resultados se analizaron mediante prueba t a un 95% de confiabilidad por medio del software SPPS. La diferencia promedio entre el porcentaje de carbohidratos totales de ambas extracciones fue de 0.0068, lo que demuestra la reproducibilidad del método de extracción.

Cuantificación de carbohidratos mediante cromatografía líquida de alta eficiencia

El método utilizado para cuantificar los carbohidratos de las muestras de guadua por HPLC presentó buena selectividad; no se detectaron señales producidas por el sistema de elución ni por la preparación de las muestras analizadas que interfirieran con el tiempo de retención de los carbohidratos cuantificados. La resolución fue mayor a 1,5 (Quattrocchi et al. 1992) y, con las condiciones cromatográficas empleadas, hubo buena separación de dichos carbohidratos en las muestras. La precisión y reproducibilidad del método fueron evaluadas a nivel de repetibilidad en el mismo día y por semana, al realizar la curva de

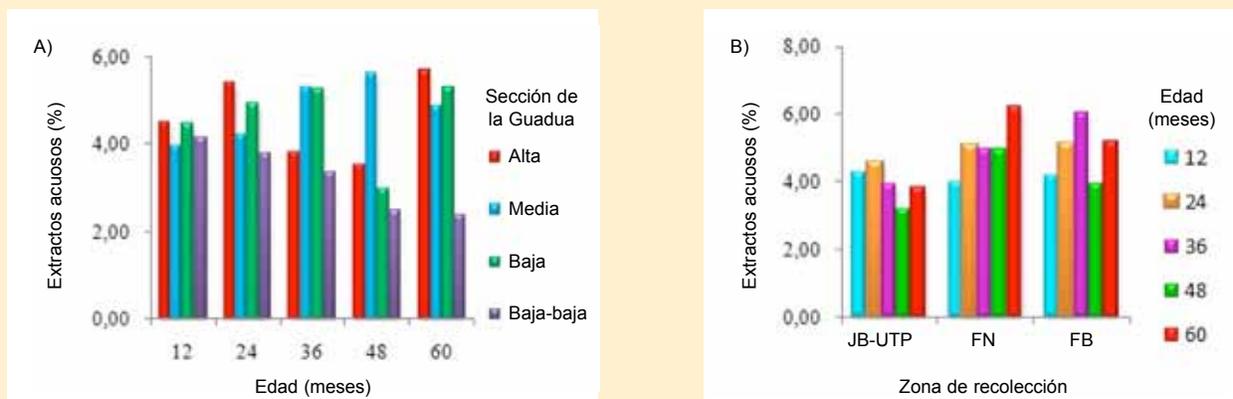


Figura 1. Contenido de extractos acuosos en *G. angustifolia*: A) por sección y edad; B) por edad y zona de recolección: JB-UTP (Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira), FN (Finca Nápoles), FB (Finca El Bambusal)

² Ver secciones de un culmo en Fig. 1, en la primera parte de este artículo.

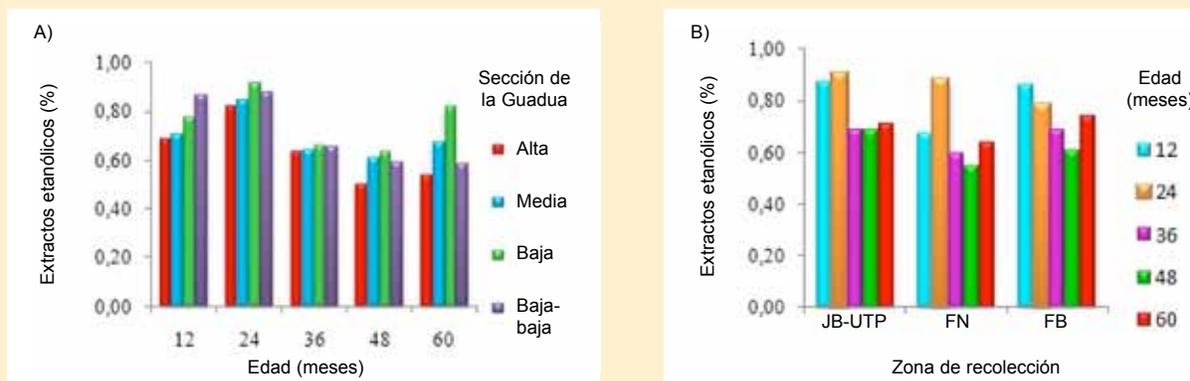


Figura 2. Contenido de extractos etanólicos en *G. angustifolia*: A) por sección y edad, B) por edad y zona de recolección: JB-UTP (Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira), FN (Finca Nápoles), FB (Finca El Bambusal)

calibración. Los tiempos de retención mostraron una variación menor al 4% (margen de variación establecido en el método) para la arabinosa, fructosa, glucosa, sacarosa y xilosa -valores promedio de 6,068, 5,485, 6,273, 8,645 y 4,609 minutos, respectivamente-. Las curvas de calibración empleadas para la cuantificación de carbohidratos presentaron buena linealidad con un coeficiente de correlación (r^2) promedio de 0,9987.

La reproducibilidad en la cuantificación fue buena. En esta evaluación se usaron muestras del individuo 9 del JB-UTP a los 36 meses de edad; al determinar la desviación estándar y el coeficiente de variación del contenido de carbohidratos calculado para las tres inyecciones de extractos acuosos y etanólicos de cada muestra se obtuvieron valores bajos (Cuadro 1). En la Fig. 3 se presentan las curvas de calibración empleadas durante este análisis y el cromatograma de

dicho individuo. Los extractos acuosos presentaron mayor contenido de carbohidratos que los etanólicos (datos no mostrados). En el Cuadro 2 se presenta el porcentaje de carbohidratos totales obtenidos por secciones en las muestras colectadas en el JB-UTP y la FN.

En general, el porcentaje de carbohidratos totales varió entre 0,0034 y 2,4748%, encontrando que en las secciones media y alta de *G. angustifolia* dicho porcentaje aumentó progresivamente con la edad y alcanzó el nivel máximo a los 36 meses, en tanto que en la sección baja-baja el mayor contenido de carbohidratos se presentó a los 60, 24 y 12 meses (Fig. 4A). En la sección alta fue donde se reportaron los menores contenidos de carbohidratos. Las muestras colectadas en el JB-UTP presentaron las concentraciones más altas de carbohidratos totales, seguidas por la FB. En general, los contenidos más bajos

de carbohidratos se registraron a los 48 meses (0,21%), como se evidencia en la Fig. 4B.

Estos resultados son similares a los reportados para *Bambusa blumeana*, *B. vulgaris* y *Gigantochloa scortechinii*, cuyo comportamiento con respecto al contenido de carbohidratos varió con la secciones y edades evaluadas. Por ejemplo, en *G. scortechinii* el porcentaje más alto se presentó en la sección alta a los 24 meses (5,60%), mientras que en *B. blumeana* y *B. vulgaris* los valores más altos se mostraron en la sección media a los 36 meses (5,36 y 3,53%, respectivamente). Adicionalmente, en estas tres especies se encontró mayor cantidad de sacarosa, fructosa y glucosa (Abd. Latif et ál. 1991).

De acuerdo con Abd. Latif et ál. (1991), para establecer las condiciones óptimas de utilización de la guadua en aplicaciones estructurales y/o industriales, se deben determinar sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Principalmente, se deben considerar los contenidos de almidón y carbohidratos libres, ya que estos influyen en la vida útil y la calidad del material, puesto que entre menor sea la concentración de carbohidratos en los culmos, menos susceptibles serán al ataque de hongos, bacterias e insectos. Según estos autores, un contenido de carbohi-

Cuadro 1. Concentración de fructosa en las tres inyecciones realizadas de los extractos acuoso y etanólico de la muestra J-9-3.

Parámetro	Concentración de fructosa (ppm)	
	Extracto acuoso	Extracto etanólico
Inyección N°1	207,33	76,48
Inyección N°2	206,42	75,90
Inyección N°3	194,07	72,69
Promedio	202,60	75,02
Desv. estándar	7,40	2,04
Coef. de variación	3,66	2,72

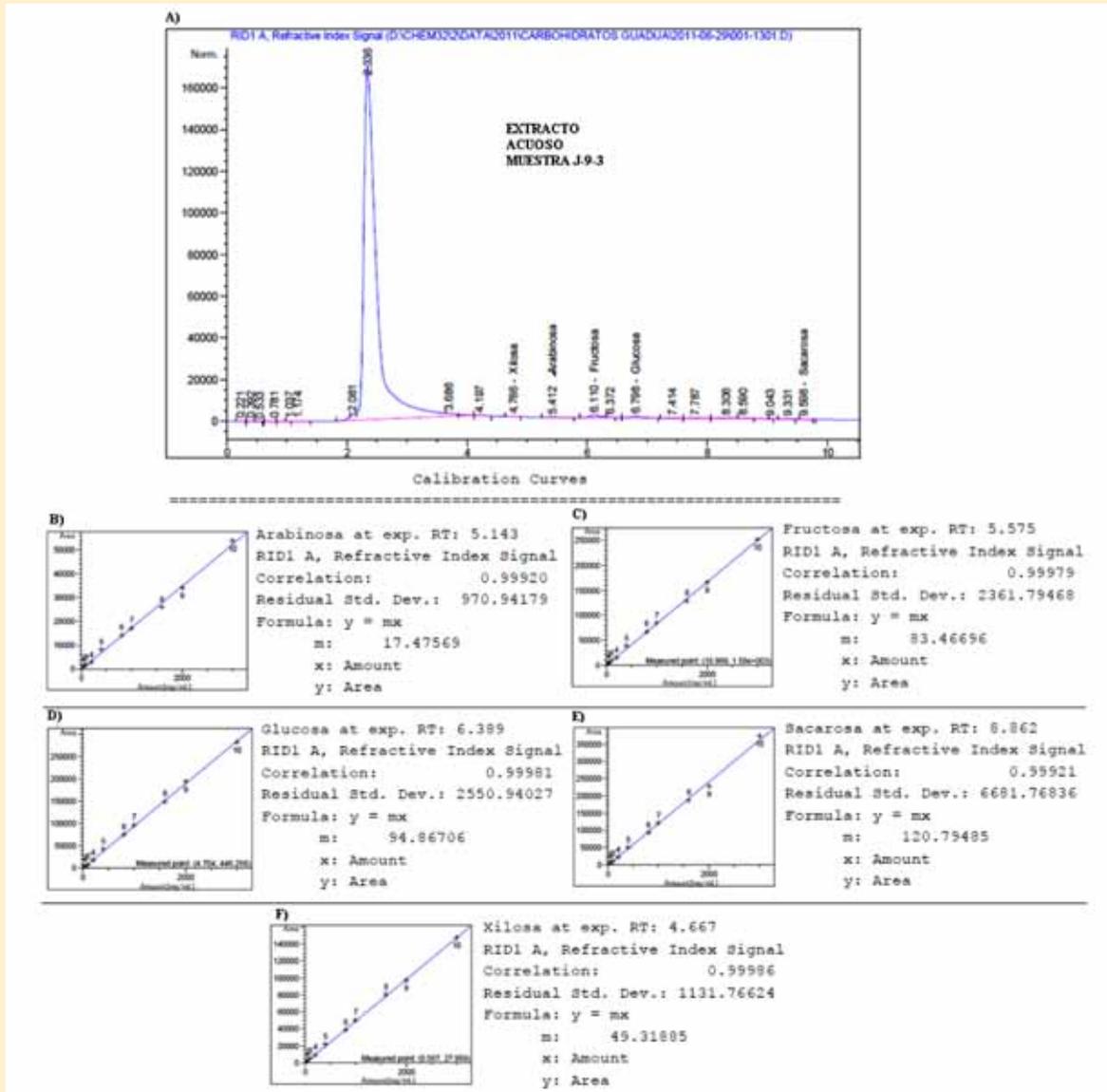


Figura 3. A) Cromatograma del individuo 9 del JB-UTP a los 36 meses de edad. Curvas de calibración de: B) arabinosa; C) fructosa; D) glucosa; E) sacarosa y F) xilosa.

dratos libres por debajo de 0,6% da mayor resistencia a la degradación, con lo que mejora la calidad. Es evidente, entonces, que las muestras analizadas de *G. angustifolia* son altamente resistentes a la degradación por agentes biológicos, pues su contenido de carbohidratos libres es menor a 0,6%, excepto las muestras del JB-UTP de 24 y 36 meses, cuyos contenidos promedio fueron 0,69 y 0,66% respectivamente. Si la recolección se realiza a los 48

meses de edad, todas las secciones de la guadua presentarían buena calidad y resistencia. Esto confirma lo establecido por Burgos (2003), quien consideró que para mejorar la calidad y resistencia del bambú al deterioro biológico, se debe cosechar cuando los contenidos de los carbohidratos sean los más bajos posibles.

En las muestras de *G. angustifolia* evaluadas se encontró una mayor abundancia de fructosa y glucosa en las muestras del JB-UTP, arabinosa

en FN y fructosa en FB (Cuadro 3); la mayor concentración de arabinosa, fructosa, glucosa, sacarosa y xilosa se encontró en las muestras de 24 a 36 meses de edad (Fig. 5A). Los contenidos de xilosa y arabinosa fueron similares entre sitios y entre edades (Fig. 5B).

Morales (2002) encontró que el contenido de carbohidratos varía con el biotipo de *G. angustifolia* evaluado. Además, determinó que existe una relación entre la humedad

Cuadro 2. Porcentaje de carbohidratos en las muestras del JB-UTP y FN, por secciones de la guadua.

Zona de recolección	Edad / meses	Sección del culmo	CT (%)	Sección del culmo	CT (%)			
Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira	12	Baja-baja	0,1101	Media	0,1481			
	24		0,1529		0,3985			
	36		0,2805		0,3991			
	48		0,0840		0,2296			
	60		0,1774		0,2396			
	12		Baja		0,1437	Alta	0,1246	
24	0,2300	0,1576						
36	0,8381	0,5128						
48	0,1119	0,0582						
60	1,0356	0,1769						
Finca Nápoles	12	Baja-baja		No evaluada	Media		0,0544	
	24		0,0892					
	36		0,5336					
	48		0,1964					
	60		0,1021					
	12		Baja			Alta	0,0254	0,0034
	24						0,0081	0,0190
	36						0,2134	0,0589
	48						0,0920	0,0183
	60						0,0377	0,0740

CT: Carbohidratos totales (sumatoria del porcentaje de carbohidratos presentes en los extractos acuoso y etanólico de cada muestra)

Cuadro 3. Porcentaje de carbohidratos en las muestras de *Guadua angustifolia* evaluadas

Zona de recolección	Edad (meses)	Porcentaje de carbohidratos en la muestra (%)					CT (%)
		A	F	G	S	X	
Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira	12	0,0075	0,2340	0,1596	0,0083	0,0230	0,4325
	24	0,1191	0,2238	0,4576	0,0181	0,0326	0,8512
	36	0,0374	0,2923	0,1973	0,0888	0,0444	0,6602
	48	0,0216	0,1697	0,1336	0,0051	0,0055	0,3356
	60	0,0900	0,2740	0,1790	0,0172	0,0206	0,5807
Finca Nápoles	12	0,0051	0,0014	0,0016	0,0093	0,0017	0,0277
	24	0,0175	0,0062	0,0034	0,0038	0,0079	0,0388
	36	0,1626	0,0117	0,0639	0,0059	0,0246	0,2687
	48	0,0197	0,0043	0,0728	0,0024	0,0031	0,1022
	60	0,0277	0,0036	0,0311	0,0030	0,0060	0,0713
Finca El Bambusal	12	0,0371	0,0053	0,0628	0,0016	0,0156	0,1223
	24	0,0320	0,0239	0,0224	0,0131	0,0113	0,1025
	36	0,0199	0,1683	0,0078	0,0072	0,0052	0,2084
	48	0,0338	0,0338	0,0062	0,0000	0,0043	0,0781
	60	0,0231	0,1386	0,1313	0,0111	0,0555	0,3595

A: arabinosa; F: fructosa; G: glucosa; S: sacarosa; X: xilosa; CT: carbohidratos totales.

del suelo y el contenido de carbohidratos totales –la concentración de carbohidratos es menor en períodos secos-. Por lo tanto, es posible que el bajo contenido de carbohidratos

encontrado en las muestras de FN se deba a la menor humedad del suelo en esta zona.

Los carbohidratos no estructurales funcionan como señales

metabólicas y moléculas reguladoras que permiten el almacenamiento y transporte de carbono durante el período de crecimiento (hasta 24 o 36 meses de edad) de diferentes especies de bambú. Por eso, la planta requiere niveles altos de producción durante dicho período, especialmente de sacarosa y los productos de su hidrólisis, fructosa y glucosa (Roitsch y González 2004). Por ejemplo, en *Sasa palmata*, la sacarosa, fructosa y glucosa constituyen la mayor cantidad de carbohidratos solubles cuando esta especie está en período de maduración (12 a 24 meses) y se reportan concentraciones bajas de sacarosa, debido a que esta es hidrolizada por invertasas presentes en el apoplasto, el citoplasma y la vacuola de la célula vegetal para asimilar fácilmente el carbono, con lo que aumenta la concentración de fructosa y glucosa (Magel et ál. 2006).

Conclusiones

La edad de corte apropiada para *G. angustifolia* Kunth se encuentra entre los 48 – 60 meses, si se la quiere emplear como materia prima para construcción y elaboración de artesanías. Sin embargo, la edad óptima es a los 48 meses, cuando el contenido de extractos acuosos (3,81%) y etanólicos (0,63%) es menor, así como los carbohidratos totales (0,21%). Bajo estas condiciones, la resistencia del material a los ataques de agentes biológicos es mayor. 🌱

Agradecimiento

Los autores expresan agradecimiento a COLCIENCIAS (Proyecto Código 1110452-21121; Contrato 442-1-2008) y a la Universidad Tecnológica de Pereira por el financiamiento parcial del proyecto. Agradecemos también a los propietarios de las fincas Nápoles y El Bambusal por conceder el permiso de recolección de los materiales vegetales.

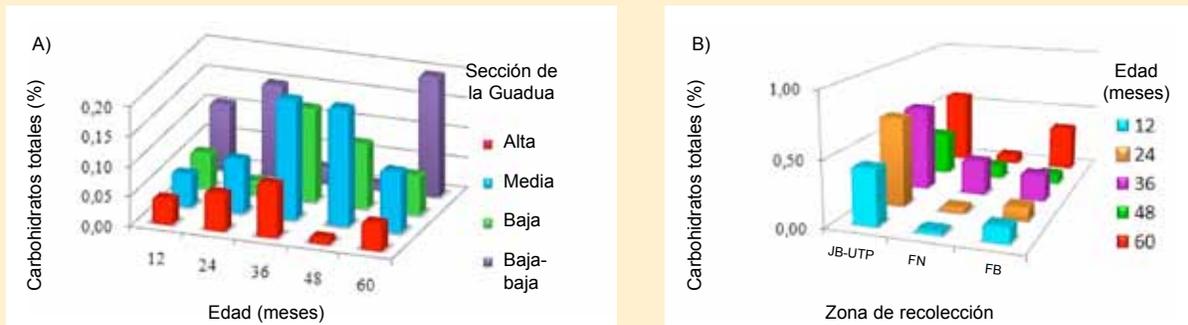


Figura 4. Contenido de carbohidratos totales en *G. angustifolia*: A) por sección y edad; B) por edad y zona de recolección: JB-UTP (Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira), FN (Finca Nápoles), FB (Finca El Bambusal)

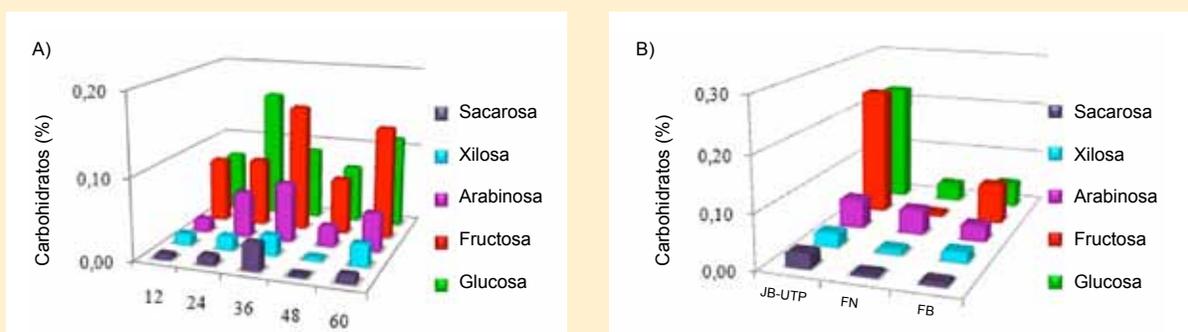


Figura 5. Porcentaje de los carbohidratos individuales caracterizados en *G. angustifolia*: A) por zona de recolección; B) por edad

Literatura citada

- Abd. Latif, AM; Khoo, KC; Nor, AM. 1991. Carbohydrates in some natural stand of Bamboos. *Journal of Tropical Forest Science* 4: 310-316.
- Burgos, A. 2003. Revisión de las técnicas de preservación del bambú. *Revista Forestal Latinoamericana* 33: 11-20.
- Camargo, JC. 2006. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth in the Coffee Region of Colombia. Ph.D Tesis. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 205 p.
- Chávez, JL. 2007. Estudios de estabilidad en preparados de base láctea suplementados con diferentes fuentes de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga. Tesis Doctoral. Barcelona, España, Facultad de Farmacia, Universidad de Barcelona. 352 p.
- Chiluiza, CI; Hernández, JP. 2009. Elaboración de papel artesanal de caña guadua (*Guadua angustifolia* K). Tesis de Pregrado. Quito, Ecuador, Escuela Politécnica Nacional. 186 p.
- Li, X. 2004. Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. Tesis de Maestría. Luisiana, Estados Unidos, Universidad Estatal de Luisiana. 76 p.
- Li, XB; Shupe, TF; Peter, GF; Hse, CY; Eberhardt, TL. 2007. Chemical changes with maturation of the Bamboo species *Phyllostachys pubescens*. *Journal of Tropical Forest Science* 19: 6-12.
- Magel, E; Kruse, S; Lütje, G; Liese, W. 2006. Soluble carbohydrates and acid invertases involved in the rapid growth of developing culms in *Sasa palmata* (Bean) Camus. *The Journal of the American Bamboo Society* 19: 23- 29.
- Marín, D; Guédez, Y; Márquez, L. 2008. Las plantaciones de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) y bambú (*Bambusa vulgaris* Wendland) de San Javier, estado Yaracuy, Venezuela. I. Aspectos climáticos y caída de hojarasca. *Revista de la Facultad de Agronomía (Universidad del Zulia)* No. 25: 261-285.
- Morales, T. 2002. Ensayo preliminar de contenido de azúcar en la guadua; técnicas naturales de preservación. [Seminario – Taller Avances en la investigación sobre guadua, Pereira, Col. 16, 17 y 18 de mayo]. 8 p.
- Norma Chilena. 2006. NCh574-2006: Miel de abejas – Determinación del contenido de fructosa, glucosa, sacarosa, turanosa y maltosa – Método HPLC con detector IR. 12 p.
- Perea, JJ; Vellegas, JP; Cerquera, Y; Cortés, MP. 2003. Evaluación y documentación de prácticas sobresalientes sobre el manejo de la cosecha y maduración de la guadua en el departamento del Huila. Neiva, Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria. 122 p.
- Quattrocchi, OA; Abelaira, SL; Laba, RE. 1992. Introducción a la HPLC, aplicación y práctica. Buenos Aires, Argentina, Editorial Artes Gráficas S.A. p. 306-340.
- Roitsch, T; González, MC. 2004. Function and regulation of plant invertases: sweet sensations. *Trends in Plant Science* No. 9: 605-613.
- TAPPI (Leading Technical Association for the Pulp, Paper, and converting Industry). 2007a. T 204 cm-07. Solvent extractives of wood and pulp. 4 p.
- TAPPI (Leading Technical Association for the Pulp, Paper, and converting Industry). 2007b. T 264 cm-07. Preparation of wood for chemical analysis. 4 p.

Cambios en las propiedades físico-mecánicas de culmos de *Guadua angustifolia* como indicadores del estado de madurez

Edison de Jesús Henao Castañeda;
Jose Alexander Rodríguez¹

Las propiedades físico-mecánicas de *Guadua angustifolia* están asociadas con la madurez. Los mejores valores de resistencia a la compresión y al corte se presentaron a los 60 meses después de emergido el culmo. Estas propiedades aumentan con la edad; los valores se incrementan entre los 12 y 60 meses, y luego empiezan a decrecer.



Foto: Grupo de Investigación GATA.

¹ Universidad Tecnológica de Pereira. La Julita, Colombia. edisonhenao@utp.edu.co y pauloalejo@utp.edu.co.

Resumen

Guadua angustifolia Kunth se utiliza cada vez más como elemento estructural y, como tal, es necesario que el material posea las características físico-mecánicas adecuadas. Con el fin de determinar algunas características físico-mecánicas asociadas con la madurez, se evaluaron muestras de culmos provenientes del Eje Cafetero colombiano: ocho individuos del Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira, dos de la finca El Bambusal y tres de la finca Nápoles, con edades entre uno y cinco años. Se determinaron los esfuerzos de compresión y corte y la dureza Brinell siguiendo las normas ISO/TR 22157-1, ISO/TR 22157-2 y DIN EN 1534. Los valores de las pruebas realizadas se agruparon por madurez y por sitio para establecer comparaciones. Los mejores valores de resistencia a la compresión y al corte se presentaron a los 60 meses después de emergido el culmo. Se comprobó que tanto la resistencia a la compresión como la resistencia al corte se relacionan con la madurez y que los valores se incrementan entre los 12 y los 60 meses, y luego empiezan a decrecer. La dureza Brinell presentó valores aleatorios que no dependen de la madurez.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; culmo; resistencia a la compresión; resistencia al corte; dureza brinell, zona cafetalera; Colombia.

Summary

Changes in *Guadua angustifolia* physical and mechanical properties as an indicator of maturity. *Guadua angustifolia* Kunth is being increasingly used as structural element, and as such, it must offer the adequate physical and mechanical properties. In order to determine some physical and mechanical characteristics associated to maturity, different sections of culms from Jardín Botánico (8 culms), finca El Bambusal (2) and finca Nápoles (3), with ages from 12 to 60 months, were sampled and evaluated. The shear and compressive strength, as well as Brinell hardness number were determined using the ISO/TR 22157-1, ISO/TR 22157-2 and DIN EN 1534 standards. Results were grouped by level of maturity and provenance and then comparisons were established. The best values of compressive and shear strengths were achieved around 60 months after the rise of culms. It was proved that both compressive strength and shear strength are related to maturity with increasing values from 12 to 60 months of age, and then gradually declining. The Brinell hardness number showed random values unrelated to maturity.

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; culms; compressive strength; shear strength; brinell hardness number; coffee zone; Colombia.

Introducción

Para la industria, la construcción y la actividad artesanal en el Eje Cafetero de Colombia, *Guadua angustifolia* Kunth significa una fuente alternativa de materia prima. El uso de la guadua en la construcción de viviendas, estructuras, puentes, cercos, puertas, conducción de aguas, fabricación de muebles y artesanías, laminados, molduras, tablillas y pisos, arroja balances positivos para la economía local, ya que solo en la zona cafetera existen

alrededor de 28.000 ha de bosques y plantaciones de guadua (Kleinn y Morales 2006).

Las propiedades mecánicas de la guadua varían según la especie botánica, el estado de madurez, la sección del culmo y las propiedades físicas del sitio (Camargo et ál. 2008). Tradicionalmente la madurez de los culmos se ha asociado a características externas del tallo, tales como su color y la presencia de líquenes u hongos. Sin embargo, estudios más recientes realizados

por Gritsch et ál. (2004) y Ortega y Zuluaga (2006) muestran la relación que existe entre la madurez del culmo y sus propiedades. Según la Norma Técnica Colombiana 5300, la guadua madura a una edad mínima de cinco años (NTC 2008). Para Ortega y Zuluaga (2006), un culmo se considera maduro después de los dos años de haber emergido, aunque su estado de madurez óptimo está cercano a los cinco años.

Con esta investigación se buscó determinar la relación entre el

estado de madurez de los culmos y los cambios en las propiedades mecánicas, resistencia a la compresión, resistencia al corte y dureza Brinell. Las probetas se tomaron de diferentes secciones de culmos previamente identificados y marcados, de los cuales se conocía el estado de madurez determinado de forma convencional. El material evaluado provino de tres sitios del eje cafetero: el Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira y las fincas El Bambusal y Nápoles, en Montenegro, Quindío.

En cada sitio se realizó un proceso de identificación de secuencias de culmos pertenecientes a un mismo individuo. Los culmos de guadua emergen cronológicamente; o sea que entre 12 y 18 meses después de haber emergido un culmo puede emerger otro a partir del anterior (Camargo et ál. 2011). Entonces, se identificaron culmos conectados por medio de los rizomas, pero con diferentes grados de madurez y se les hicieron pruebas de resistencia al corte, resistencia a la compresión y dureza Brinell. Los resultados se agruparon de acuerdo a la madurez y se promediaron para

obtener el valor de cada propiedad físico-mecánica evaluada; por último se compararon los valores determinados para los tres sitios. Las propiedades físico-mecánicas se determinaron a partir de las normas ISO/TR 22157-1.2004, ISO/TR 22157-2.2004 y DIN EN 1534. 2004.

Clasificación de las probetas

Se evaluaron culmos de ocho individuos del Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira, dos individuos de la finca El Bambusal y tres individuos de la finca Nápoles, con edades entre uno y cinco años. Cada culmo se dividió en cuatro secciones (Fig. 1): (1) la parte más baja del culmo, donde se midió el diámetro a la altura del pecho; (2) sección media; (3) sección media alta y (4) sección alta. Para la determinación de la resistencia a la compresión y al corte se evaluaron dos probetas por sección; cada probeta tenía un nudo en cada extremo y correspondía a un canuto. Para determinar la dureza Brinell se midieron probetas de 7 cm de longitud por 2,5 cm de ancho, las cuales fueron obtenidas de tres muestras por sección.

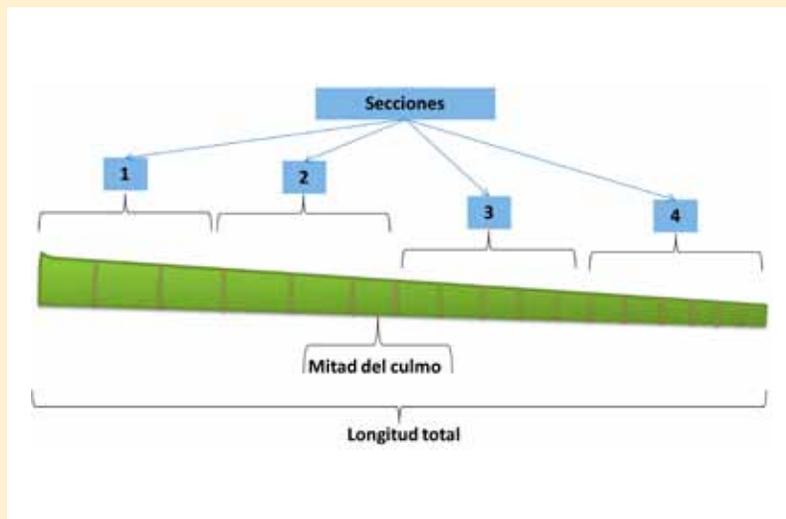


Figura 1. Seccionamiento del culmo para la toma de probetas para las pruebas físico-mecánicas

Equipo utilizado

Para determinar las propiedades físico-mecánicas se utilizaron tres máquinas del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UTP (Figs. 2, 3 y 4).

Análisis de los datos

Para el análisis de los datos se aplicó el método “estadísticos agrupados” debido a que se tienen réplicas de las mediciones obtenidas con las pruebas aplicadas a los culmos de cada uno de los individuos (Figliola y Beasley 2003). Si se considera M réplicas de una medición de la variable X , cada una de las N lecturas repetidas permite obtener un conjunto de datos X_{ij} , donde $i = 1, 2, \dots, N$ y $j = 1, 2, \dots, M$. Se asume que el error de sesgo permanece despreciable en cada réplica. La media agrupada de X se define mediante:

$$\bar{X} = \frac{1}{IN} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N X_{ij}$$

La desviación estándar agrupada de X se define por:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{I(N-1)} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X})^2} = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{j=1}^M S_{\bar{x}_j}^2}$$

La desviación estándar agrupada de las medias de X se define mediante:

$$S_{\bar{X}} = \frac{S_x}{\sqrt{MN}}$$

Posteriormente se realizaron comparaciones de las propiedades físico-mecánicas evaluadas mediante un análisis de varianza para determinar diferencias estadísticamente significativas entre culmos (SPSS 10 para Windows).



Figura 2. Escleroscopio HP-250 marca Werkstoffprüfmaschinen, para determinar la dureza Brinell



Figura 3. Máquina universal de ensayos WPM ZD 40, para determinar la resistencia al corte

Resultados

Los valores de resistencia a la compresión paralela a la fibra correspondieron a los promedios hallados entre las cuatro secciones de cada culmo para todos los individuos de un mismo sitio (Cuadro 1). Estos valores están dentro de los rangos obtenidos por Camargo (2006) y Silva y López (2000): entre 15 y 30 Mpa. La resistencia a la compresión paralela a la fibra para cada estado de madurez se incrementó con la edad de los culmos (Fig. 5). El mayor valor promedio (30,39 Mpa) se obtuvo a los 60 meses de edad; asimismo, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre edades ($p < 0,05$). Estos valores coinciden con lo reportado por Camargo (2006).

El Cuadro 2 muestra los valores de resistencia al corte paralelo a la fibra, los cuales son consistentes con los reportados por Camargo (2006) y Silva y López (2000): promedios de 7,53 y 6,87 Mpa respectivamente. La resistencia al corte aumenta con la edad de los culmos; de nuevo, la mayor resistencia al corte se

obtuvo a los 60 meses (Fig. 6), valor que está por encima de lo reportado por Camargo (2006) y Silva y López (2000), así como de los valores reportados para otras especies como *Bambua blumeana* y *Bambusa vulgaris*, según Camargo (2006).

Los valores encontrados de resistencia a la compresión son comparables con los reportados para maderas de uso convencional en estructuras medianas, tales como el aliso (*Alnus glutinosa*) con 35,7 Mpa, arboloco (*Montanoa quadrangularis*) con 40,5 Mpa y otras maderas con 40 Mpa (Duque y Lara 2010).

Finalmente, para la determinación de los valores de dureza Brinell



Figura 4. Máquina universal de ensayos Mod. UMIB-600-SW, para determinar la resistencia a la compresión

Cuadro 1. Resistencia a la compresión en MPa para culmos provenientes de tres sitios del Eje Cafetero de Colombia

Madurez [meses]	Jardín Botánico				El Bambusal				Nápoles			
	MN	\bar{X}	S_x	$S_{\bar{x}}$	MN	\bar{X}	S_x	$S_{\bar{x}}$	MN	\bar{X}	S_x	$S_{\bar{x}}$
12	52	15,31	5,31	0,74	13	25,30	9,56	2,65	20	23,65	6,68	1,50
24	62	21,95	8,35	1,06	15	26,82	3,08	0,80	23	28,62	12,48	2,60
36	62	24,94	10,00	1,27	16	26,32	7,49	1,87	13	25,88	7,53	2,09
48	62	25,42	7,64	0,97	16	29,72	3,94	0,99	22	28,99	8,42	1,79
60	53	30,00	7,99	1,10	16	31,46	6,55	1,64	13	30,32	5,72	1,59

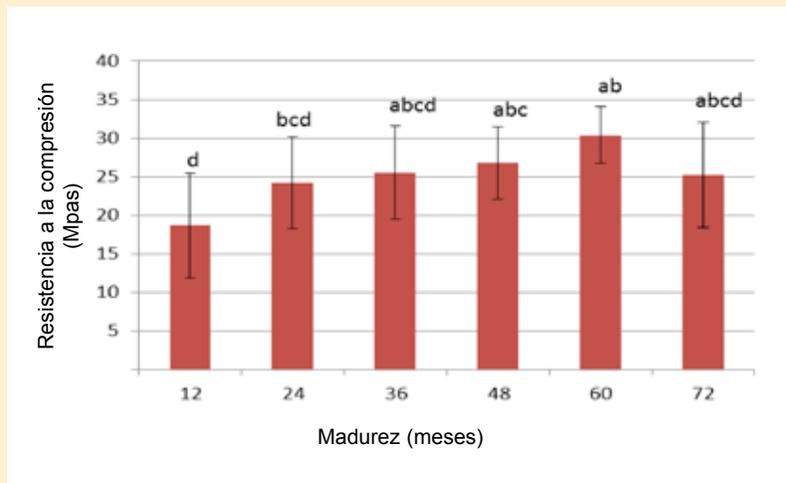


Figura 5. Comparación de la resistencia a la compresión en MPa para culmos provenientes de tres sitios del Eje Cafetero de Colombia. Líneas verticales sobre las barras indican la desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$)

Cuadro 2. Resistencia al corte en MPa para culmos provenientes de tres sitios del Eje Cafetero de Colombia

Madurez [meses]	Jardín Botánico				El Bambusal				Nápoles			
	MN	\bar{X}	S_x	$S_{\bar{x}}$	MN	\bar{X}	S_x	$S_{\bar{x}}$	MN	\bar{X}	S_x	$S_{\bar{x}}$
12	52	7,92	3,56	0,49	15	6,89	4,72	1,22	13	7,80	4,09	1,14
24	58	10,54	4,53	0,59	14	12,94	7,53	2,01	15	7,83	4,19	1,08
36	62	11,72	5,14	0,65	16	11,40	6,28	1,57	6	10,91	3,86	1,57
48	58	11,24	5,42	0,71	16	12,52	6,31	1,58	14	9,89	5,17	1,38
60	48	12,75	5,64	0,81	15	13,28	6,82	1,76	12	8,58	4,62	1,33

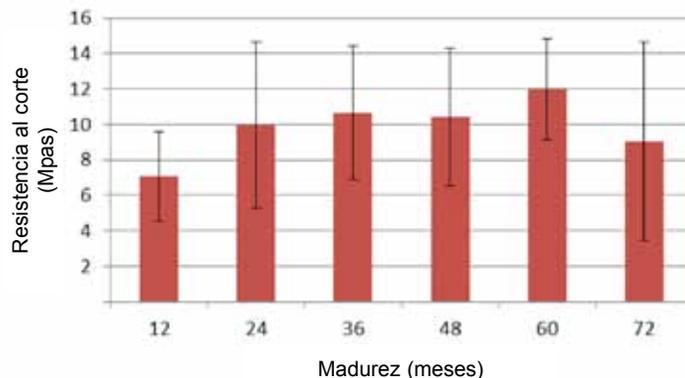


Figura 6. Comparación de la resistencia al corte en MPa para culmos provenientes de tres sitios del Eje Cafetero de Colombia. Líneas verticales sobre las barras indican la desviación estándar.

se evaluaron probetas para cada estado de madurez obtenidas de las cuatro secciones del culmo. A las probetas se les retiró la capa externa y la interna con el fin de obtener una tablilla cuya base inferior y superior fuera lo más paralela posible, a fin de evitar desviaciones en la perpendicularidad del punzón de la máquina con la probeta. Los resultados permitieron comprobar que la dureza Brinell no es una propiedad que se pueda relacionar con la edad (Cuadro 3, Fig. 7), debido a que la dureza es una propiedad de la capa superficial de un material y no de su composición. Londoño et ál. (2002) ya habían encontrado resultados similares.

Conclusión

La resistencia a la compresión y al corte se relacionan directamente con la madurez del culmo de *Guadua angustifolia*. Estas propiedades aumentan con la edad y presentan sus mejores valores alrededor de los 60 meses, lo que permite validar lo establecido por la norma NTC 5300.

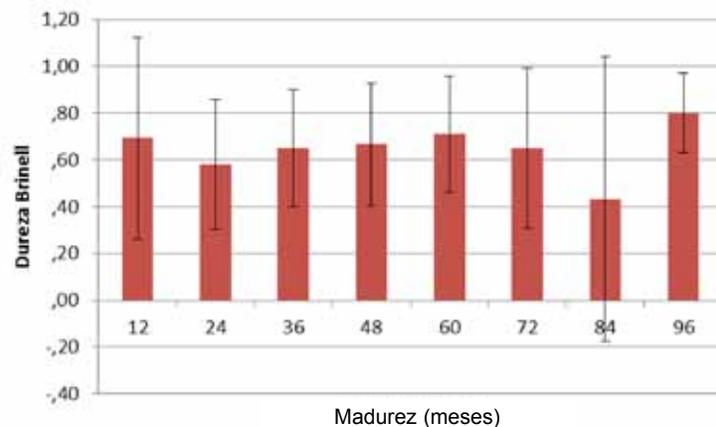


Figura 7. Comparación de la dureza Brinell para culmos provenientes de tres sitios del Eje Cafetero de Colombia. Líneas verticales sobre las barras indican la desviación estándar.

Cuadro 3. Dureza Brinell para culmos provenientes de tres sitios del Eje Cafetero de Colombia

Madurez [meses]	Jardín Botánico				El Bambusal				Nápoles			
	MN	\bar{X}	S_x	$S_{\bar{x}}$	MN	\bar{X}	S_x	$S_{\bar{x}}$	MN	\bar{X}	S_x	$S_{\bar{x}}$
12	41	0,95	0,45	0,07	7	0,66	0,12	0,05	11	0,44	0,10	0,03
24	57	0,71	0,23	0,03	15	0,51	0,07	0,02	9	0,77	0,29	0,10
36	51	0,74	0,24	0,03	16	0,58	0,11	0,03	6	0,72	0,13	0,05
48	55	0,74	0,18	0,02	16	0,53	0,08	0,02	9	0,93	0,25	0,08
60	48	0,83	0,42	0,06	16	0,58	0,10	0,03	13	0,50	0,13	0,04

Literatura citada

- Camargo, JC. 2006. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth in the Coffee Region of Colombia. Ph.D. Tesis. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 205 p.
- Camargo, JC; Morales, T; García, JH. 2008. Inventario y mensura forestal para el manejo sostenible de bosques de guadua. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira / Colciencias, Grupo de Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. 94 p.
- Camargo, JC; Rodríguez, JA; Henao, E; Quintero, H; Mosquera, OM y Niño, J. 2011. Cuarto Informe Técnico Proyecto Tecnología para definir la madurez del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth: una contribución al desarrollo forestal del Eje Cafetero Colombiano. Proyecto Código 1110452-21121; Contrato 442-1-2008. Pereira, Colombia, Colciencias. 34 p.
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 2004. DIN e 1534: Determination of resistance to indentation (Brinell-Test method). European Standards.
- Duque, AFH; Lara, IAC. 2010. Diseño y construcción de un dispositivo económico para medir indirectamente la madurez del culmo de guadua basado en un análisis de vibraciones. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. 89 p.
- Figliola, R; Beasley, D. 2003. Mediciones mecánicas: teoría y diseño. México, Alfaomega. 3 ed. 656 p.
- Gritsch, C; Abranson, K; Camayo, G; Rashid, M; Murphy, R; Londoño, X; Camargo, J C. 2004. Anatomical culm analysis of *Guadua angustifolia* in relation to age, site, and physic-mechanical properties. In Proceedings International Symposium Guadua [2004, Pereira, Colombia].
- ISO (International Organization for Standardization). 2004. ISO TR 22157-1/2 Bamboo: determination of physical and mechanical properties. Laboratory manual. 19 p.
- Kleinn, C; Morales, D. 2006. An inventory of guadua (*Guadua angustifolia*) bamboo in the Coffee Region of Colombia. European Journal of Forest Research 125(4): 361-368.
- Londoño, X; Camayo, G; Riaño, N; López, Y. 2002. Caracterización anatómica del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth. In Seminario-Taller Avances sobre la investigación sobre Guadua.
- NTC (Norma Técnica Colombiana). 2008. NTC 5300: cosecha y postcosecha del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth. Bogotá, Colombia, ICONTEC.
- Ortega, JA; Zuluaga, CA. 2006. Comprobación y comparación de las propiedades fisicomecánicas de la *Guadua angustifolia* por región y por edad. Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. 127 p.
- Silva, MF; López, LF. 2000. Comportamiento sismorresistente de estructuras en bahareque. Manizales, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, 139 p.

Medición indirecta de la madurez del culmo de guadua por medio de las vibraciones mecánicas

Andrés Felipe Duque Herrera¹;
Adolfo Lara Castro²;
Héctor Fabio Quintero Riaza³;
Edison Henao Castañeda⁴;
Mauricio Monroy Jaramillo⁵

El método indirecto para la determinación experimental de la madurez de *Guadua angustifolia*, mediante la vibración libre, muestra ser viable utilizando un parlante como sensor. El uso de este parlante permite predecir la madurez de los culmos mediante métodos indirectos de determinación de la frecuencia natural, la cual tiende a incrementarse, pero en un momento dado empieza a disminuir.



Foto: Grupo de Investigación GATA.

¹ Universidad Tecnológica de Pereira, La Julita, Pereira, Colombia. afdh@hotmail.com; ivan_lara88@hotmail.com²; hquinte@utp.edu.co³; edisonhenao@utp.edu.co⁴; mauriciomonroy@utp.edu.co⁵.

Resumen

Un esfuerzo importante de la industria maderera se centra en el desarrollo de ensayos robustos no destructivos para determinar las propiedades intrínsecas de la madera. En este trabajo se presenta un método indirecto para la determinación experimental de la madurez de los culmos de guadua a partir de un ensayo de vibración libre. En sistemas mecánicos, las vibraciones libres ocurren porque la energía cinética se convierte en energía potencial elástica debido a la deformación del sistema, y retorna a energía cinética repetidamente durante el movimiento. En el caso de la madera, la frecuencia natural se asocia con la rigidez propia del sistema que, a la vez, está directamente relacionada con las propiedades físico-mecánicas del culmo y estas con la madurez. En el ensayo experimental, después de un golpe sobre el culmo se captura la señal de vibración con dos sensores: un acelerómetro o un parlante; mediante la transformada rápida de Fourier se determina la frecuencia natural del culmo analizado. Los resultados obtenidos muestran que este procedimiento es viable, utilizando el parlante como sensor; en el caso del acelerómetro, se requiere más procesamiento de la señal para que sea de utilidad.

Palabras claves: *Guadua*; bambúes; métodos; transformada rápida de Fourier; propiedades de la madera; propiedades mecánicas; culmo; madurez.

Summary

Indirect measurement of maturity in culms of *Guadua angustifolia* using mechanical vibration signals. An important effort of the wood industry is focused on the development of robust non-destructive tests to predict intrinsic properties of wood. Basing on a free vibration test, an indirect method for experimental determination of culm maturity was developed. In mechanical systems, free vibrations occur because kinetic energy is converted into elastic potential energy due to deformation of the system, and it repeatedly changes back to kinetic energy during the movement. In the case of wood, the natural frequency is associated to the system rigidity which directly relates to the culm's physical and mechanical properties and those to the culm's maturity. In these experimental tests, after hitting a culm, the vibration signal was captured with two sensors: an accelerometer or a tiny speaker, and the natural frequency of the culm was determined using the fast Fourier transform (FFT). The results showed that the procedure using the speaker as sensor is viable; in the case of the accelerometer more signal processing is required.

Keywords: *Guadua*; bamboos; methods; fast Fourier Transform; wood properties; mechanical properties; culms; maturity.

Introducción

Guadua angustifolia Kunth es un importante recurso forestal de la biodiversidad colombiana. Esta especie de bambú se aprovecha por sus beneficios ambientales, económicos, sociales y culturales en las áreas donde se encuentra presente. La guadua es una especie forestal con buenas posibilidades económicas, ya que su utilización como mate-

ria prima en la construcción y en la industria permite reducir costos (Salas 2006). Asimismo, por ser una de las especies forestales nativas con mayor número de aplicaciones gracias a sus excelentes propiedades físico-mecánicas, la guadua tiene un impacto socioeconómico muy significativo en Colombia (Camargo 2006). El buen aprovechamiento de la especie depende, en gran parte,

de los métodos utilizados para su recolección; por ello, la adopción de nuevas herramientas que permitan tecnificar el manejo de la especie es de necesidad prioritaria.

Dada su capacidad de propagación, rápido crecimiento, utilidad y tradición de uso, así como sus características benéficas para el medio ambiente y su enorme potencial para la construcción, elaboración de

muebles, artesanías, fabricación de papel, pisos, modulares y combustible, la demanda y aceptación de la guadua por parte del sector productivo ha ido en aumento (Martínez et ál. 2005). En consecuencia, a medida que la industria de la guadua crece, se incrementa también la demanda en términos de cantidad de materia prima y calidad de las propiedades físico-mecánicas. En buena medida, la calidad depende de los procesos de cosecha, secado y preservación, pero principalmente tiene que ver con características intrínsecas de los culmos de guadua.

Uno de los principales atributos de la guadua para aplicaciones estructurales es el corto tiempo que requiere para alcanzar la madurez, en comparación con otras maderas. Sin embargo, la determinación de la madurez es subjetiva y se basa en características externas, como la presencia de líquenes u hongos sobre la superficie del tallo, lo cual depende de las condiciones del sitio. En consecuencia, es posible que culmos dentro de un rango de edades muy amplio sean clasificados en el mismo grado de madurez.

Tradicionalmente la calidad de la madera de guadua se asocia con la medición de variables dendrométricas (longitud, altura, diámetro) y la observación visual de características superficiales (cantidad y distribución de los nodos, hongos y otros defectos). Dependiendo de estos parámetros, se asignan diferentes grados de calidad, con rangos amplios para las propiedades físicas. Aunque esta clasificación es suficiente para los usos en que la apariencia es la consideración primordial, es cuestionable para aplicaciones estructurales en las que la rigidez y la resistencia son las variables de mayor importancia.

Ya se han hecho estudios de las propiedades físico-mecánicas de la guadua, pero es poco lo que se sabe sobre la determinación de la edad óptima de corte. A diferencia de los

árboles, en lo que es posible relacionar la edad con las dimensiones dendrométricas del tallo (diámetro y altura), los culmos de guadua alcanzan su mayor dimensión en la madurez temprana (Salas 2006, Judziewicz et ál. 1999). Sin embargo, durante esos primeros meses sólo se observan pequeños cambios en los entrenudos como resultado de la maduración meristemática (Liese y Weiner 1996).

Medición de la madurez mediante vibraciones y señales acústicas

La medición indirecta de la madurez mediante el análisis de vibraciones y señales acústicas se ha utilizado con éxito en frutos (Valente y Ferrandis 2003, Hernández et ál. 2005) y en maderas (Ross y Pellerin 1985, Wang et ál. 2001). Uno de los ensayos más utilizados consiste en producir una perturbación en el elemento y medir la respuesta del sistema. En el ensayo se induce una onda de vibración o acústica dentro del material y se mide su respuesta característica; por ejemplo, se mide el tiempo de viaje y la forma de la onda para obtener el espectro de frecuencia. La onda puede ser inducida mediante un golpe con martillo y la respuesta se mide con un acelerómetro en contacto con la pieza evaluada. Otro método consiste en producir una onda de sonido dentro del material.

La determinación experimental de las frecuencias naturales, formas modales y relación de amortiguamiento se conoce como *análisis modal experimental*. El objetivo de este ensayo es medir la respuesta con suficiente precisión y extensión en los dominios de frecuencia y espacio, para realizar el análisis y determinar las propiedades dinámicas según los modos de vibración de la estructura. En este análisis se incorporan los conceptos de vibración mecánica, instrumentación, procesamiento de señales e identificación modal (Rao 2004).

La medición de la señal creada y la determinación de la magnitud de la respuesta se basan en la velocidad de la señal. El análisis de la señal se basa en los algoritmos de la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), con la que se obtiene la función de la respuesta en frecuencia. Básicamente, la señal análoga del dominio del tiempo se convierte en una información discreta en el dominio de la frecuencia (Rao 2004). Para la medición experimental de la madurez de los culmos, se implementa un ensayo en el que se golpea al culmo con un martillo para producir una vibración en estado libre sobre el culmo. Mediante un acelerómetro o un parlante se capta la señal y se identifica la frecuencia natural del sistema mediante un análisis de frecuencia; este análisis se obtiene con los algoritmos de la FFT. Este tipo de análisis modal es ampliamente utilizado en la evaluación de estructuras civiles, fuselajes de avión, detección de fallas en tuberías, etc. Las pruebas del análisis modal en estructuras se han incrementado en los últimos años debidos a los avances en los computadores y en la instrumentación, lo que permite lograr ensayos de gran precisión (Rao 2004).

Este tipo de análisis permite: i) visualizar los modos de vibración de la estructura con el propósito de afinar los modelos físico y entender las propiedades dinámicas complejas de la estructura; ii) comparar el comportamiento de la vibración real de la estructura con los parámetros correspondientes predichos con un modelo teórico; iii) corregir o refinar los modelos teóricos; iv) predecir los efectos de modificaciones realizadas, o predecir las modificaciones que se requieren para cambiar el comportamiento de la estructura; v) predecir el comportamiento de la estructura conformada por dos o más componentes; vi) detectar daños u otros cambios en la integridad de la estructura en el ciclo de vida; vii)

identificar parámetros impredecibles como amortiguamiento, efectos de la fricción dinámica, fuerzas de excitación de fuentes desconocidas (Ewins 2001).

La frecuencia natural de un sistema es cuando se da una vibración libre; esta es una característica propia del sistema. La vibración libre ocurre cuando la energía almacenada se convierte en otra forma de energía de manera repetida. En sistemas mecánicos, la vibración libre puede ocurrir porque la energía cinética -manifestada como la velocidad de las masas- se convierte en energía potencial elástica debido a la deformación del sistema y retornar a energía cinética, repetidamente, durante el movimiento. La frecuencia natural se asocia con la rigidez propia del sistema que, en el caso de la madera, depende de las propiedades físico-mecánicas del culmo. Se entiende por rigidez la relación entre una fuerza aplicada y la deformación del sistema; la rigidez depende de la capacidad del sistema para almacenar energía potencial elástica (Silva 2000).

Descripción del ensayo

Para determinar la madurez del culmo por medio de vibraciones mecánicas, se impacta en el culmo de tal manera que ese golpe genere una vibración en el cuerpo del culmo, la cual se mide con el acelerómetro o con el parlante. Para generar el golpe se construyó un dispositivo con un martillo que se sujeta al culmo y que al soltarlo desde una inclinación determinada impacta al culmo y genera una vibración (Fig. 1).

En cada uno de los culmos se realizaron cinco ensayos con ambos sensores (parlante, acelerómetro), con el fin de garantizar la repetitividad de los datos en un mismo culmo. El número de culmos por secuencia fue variable pues algunos de ellos se cayeron o dañaron durante el proceso; la toma de datos se hizo únicamente con los culmos en pie y sin daños significativos que alteraran sus propiedades físico-mecánicas. La señal procesada mediante el acelerómetro o el parlante fue filtrada y amplificada

antes de almacenarse mediante un osciloscopio digital portátil. Con la ayuda de Matlab se obtuvo el valor de la frecuencia. Este valor fue el utilizado para comparar las diferentes secuencias, y sobre todo para verificar la hipótesis que las frecuencias varían con respecto a la edad del individuo y a sus características físicas.

Los ensayos se realizaron en tres lugares diferentes: Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira (6 secuencias), hacienda Nápoles (7 secuencias) y hacienda La Esmeralda (3 secuencias); ambas haciendas se localizan en el municipio de Montenegro, departamento del Quindío. Las secuencias de la Universidad y la Esmeralda constaron de más de cuatro culmos, en tanto que en Nápoles sólo se evaluó un culmo por secuencia debido a que estos guadales habían sido aprovechados recientemente.

Resultados y discusión

En la Fig. 2 se representa la forma de onda de un ensayo y el espectro



Figura 1. Impacto sobre el culmo

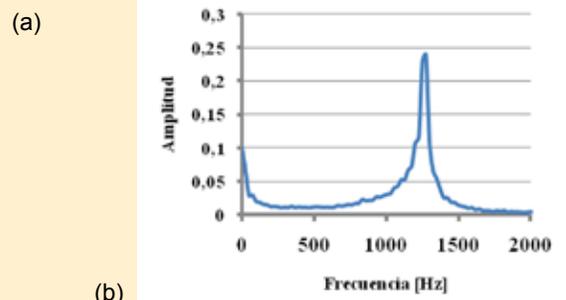
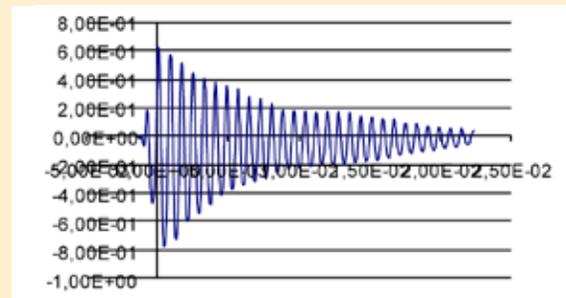


Figura 2. Onda característica (a) y espectro de frecuencia (b) del culmo No. 1, secuencia 3, evaluado en la Hacienda Nápoles

Cuadro 1. Frecuencias naturales encontradas con el sensor parlante en la secuencia 3 de la Hacienda Nápoles

Culmo no.	Frecuencia (Hz)					Media	Desv.
	P1	P2	P3	P4	P5		
1	1250	1275	1275	1275	1275	1270	11,18
2	1299	1299	1299	1299	1299	1299	0
3	1373	1373	1373	1373	1370	1372	1,34
4	1765	1765	1765	1765	1765	1765	0
5	1905	1905	1905	1905	1905	1905	0
6	1808	1808	1808	1808	1808	1808	0

Cuadro 2. Frecuencias naturales encontradas con el sensor parlante en la secuencia 3 de la Hacienda La Esmeralda

Culmo no.	Frecuencia (Hz)					Media	Desv.
	P1	P2	P3	P4	P5		
1	903,8	903,8	903,8	903,8	903,8	903,8	0
2	1075	1075	1075	1075	1075	1075	0
3	1114	1114	1114	1114	1114	1114	0
4	1075	1075	1075	1075	1075	1075	0
5	1172	1172	1172	1172	1172	1172	0
6	1490	1490	1490	1490	1490	1490	0
7	1685	1685	1685	1685	1685	1685	0

de frecuencia obtenida mediante la FFT. En los ensayos con un mismo espécimen se logró una alta repetitividad de los resultados, en tanto que en los ensayos con diferentes individuos, la forma de onda fue muy similar y, por ende, el espectro de frecuencia lo fue también. Al utilizar el parlante como sensor, el espectro de frecuencia mostró un valor pico para cada culmo a una frecuencia $f = 1275$ Hz (Fig.

2b). Este valor pico en el espectro de frecuencia permite identificar con precisión la frecuencia natural característica. En los Cuadros 1 y 2 se presentan los resultados de frecuencia natural obtenidos en dos secuencias de dos sitios diferentes. Para cada culmo se realizaron cinco pruebas (P1 a P5); la numeración de los culmos corresponde al nivel de madurez de los mismos, siendo el no. 1 el culmo menos

maduro. En las dos secuencias estudiadas se observó una tendencia al incremento de la frecuencia natural con la madurez. Sin embargo, en los resultados del Cuadro 1 es evidente que el último individuo tiene una menor frecuencia natural; el mismo comportamiento se dio en todas las secuencias analizadas de los tres sitios seleccionados.

En la Fig. 3 se presentan la señal obtenida y su espectro de frecuencia

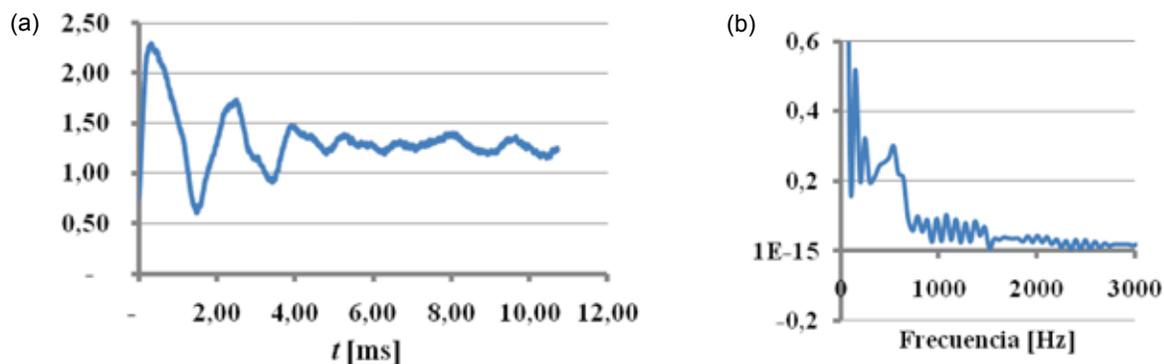


Figura 3. Onda característica (a) y espectro de frecuencia (b) del culmo No. 1, secuencia 23, determinadas mediante acelerómetro en la Hacienda Nápoles

al utilizar el acelerómetro. Como se observa en la Fig. 3b, el espectro de frecuencia de la vibración medida con el acelerómetro es complejo y no permite la identificación de un valor característico. A diferencia del espectro del sensor acústico, el espectro de frecuencia del acelerómetro no presenta un pico característico que permita asociarlo con la frecuencia natural del culmo. Por ello se consideró como valor característico el valor pico del espectro de frecuencia. En el Cuadro 3 se presentan los resultados obtenidos con dos secuencias de la hacienda Nápoles; es evidente la poca claridad de la caracterización de la frecuencia natural con este sensor; tampoco se nota una variación consistente entre la frecuencia natural y la madurez de los culmos analizados. La envolvente del espectro de frecuencia no permitió definir con claridad la frecuencia natural que se debe especificar debido a la existencia de varios picos.

Cuadro 3. Valores medios de frecuencia para las secuencias 5 y 14 de la Hacienda Nápoles

Culmo No.	Frecuencia (Hz)	
	Secuencia 5	Secuencia 14
Culmo 1	634	587,7
Culmo 2	391	537,7
Culmo 3	582	587,3
Culmo 4	439	668,5
Culmo 5	433	
Culmo 6	597	

Conclusiones

Los resultados demostraron que el uso del parlante como sensor permite predecir la madurez de los culmos de guadua mediante métodos indirectos de determinación de la frecuencia natural en un ensayo de vibración libre. La frecuencia natural tiende a incrementarse con la madurez, pero en un momento dado empieza a disminuir.

Puesto que la edad se relaciona con las propiedades físico-mecánicas de los culmos de guadua, mediante un *software* ya existente es posible utilizar la frecuencia natural para determinar la edad del culmo y su capacidad de uso. Dicho procedimiento permitirá tecnificar el proceso de selección y corte de la guadua que, hasta ahora, es bastante empírico.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Colciencias por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación mediante el Proyecto código no. 1110452-21121; Contrato 442-1-2008.

Literatura citada

- Camargo, JC. 2006. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth in the Coffee Region of Colombia. Ph.D. Thesis. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 205 p.
- Ewins, DJ. 2001. Modal analysis, experimental. In Braun, S; Ewins, DJ; Rao, SS. (Eds.). Encyclopedia of Vibrations. p. 805-813. Available at: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1873&VerticalID=0
- Hernández, A; Wang, J; Pereira, AG. 2005. Impulse response of pear fruit and its relation to Magness-Taylor firmness during storage. *Postharvest Biology and Technology* 35: 209-215.
- Judziewicz, EJ; Clark, LG; Londoño, X; Stern, M. 1999. American bamboos. Washington D.C., Smithsonian Institution press. 392 p.
- Martínez, HJ; Pinzón, N; Espinosa, D. 2005. La cadena de la guadua en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Bogotá, Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural / Observatorio Agrocadenas. 24 p.
- Liese, W; Weiner, G. 1996. Ageing of bamboo culms: A review. *Wood Science and Technology* 30: 77-89.
- Rao, SS. 2004. Mechanical vibration. 4 ed. New Jersey, USA, Pearson Prentice Hall. 1078 p.
- Ross, RJ; Pellerin, RF. 1985. NDE of Wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal* 38(5): 39-45.
- Salas, E. 2006. Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia. Tesis Doctoral. Barcelona, España, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Silva, C. 2000. Vibration fundamentals and practice. 2 ed. Florida, USA, CRC Press. 925 p.
- Valente, M; Ferrandis, JY. 2003. Evaluation of textural properties of mango tissue by a near-field acoustic method. *Postharvest Biology and Technology* 29: 219-228.
- Wang, X; Ross, RJ; McClellan, M; Barbour, RJ; Erickson, JR; Forsman, JW; McGinnis, GD. 2001. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I: Acoustic wave behavior. *Wood and Fiber Science* 33(4): 522-533.

Aprovechamiento industrial de *Guadua angustifolia* a partir de sus extractos vegetales

Andrea Hernández Londoño¹;
Carlos Arrabal Miguel²;
Jorge Augusto Montoya Arango³

La composición química del tallo de *Guadua angustifolia* es similar a la de la madera dura, excepto en lo referente a los extractos alcalinos. Esta especie presenta tres tipos de compuestos identificados en los ensayos con solventes no polares y con polaridad media, los cuales presentaron alta aplicabilidad en la industria cosmética, farmacéutica, automotriz y química fina. El entrenudo, en la fase polar y de polaridad media, es la parte más apta para ser aprovechada industrialmente.



Foto: Grupo de Investigación GATA.

¹ Administradora Ambiental, Grupo de Investigación PML, Universidad Tecnológica de Pereira. andreahernandez@utp.edu.co

² Ingeniero de Montes, Profesor Titular Universidad Politécnica de Madrid. carlos.arrabal@upm.es

³ Ingeniero Mecánico, Profesor Asociado Grupo de Investigación PML Universidad Tecnológica de Pereira. jorgemontoya@utp.edu.co

Resumen

Mediante una serie de experimentos se buscó explorar el rendimiento y los compuestos químicos presentes en los extractos de *Guadua angustifolia*. Se encontraron tres tipos de compuestos en los ensayos con solventes no polares y con polaridad media, los cuales presentaron alta aplicabilidad a nivel de la industria cosmética, farmacéutica, automotriz y química fina. Tales compuestos fueron identificados como tetraetil silicato, diacetona alcohol y dietilenglicol. Además, se evaluó el potencial de dichos extractos en cada parte estudiada (entrenado, diafragma y nudo). Se encontró que el entrenado en la fase polar y de polaridad media es la parte más apta para ser aprovechada industrialmente a partir de los componentes químicos presentes en su estructura física.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; composición química; extractos vegetales; propiedades físicoquímicas; usos; industrialización.

Summary

Industrial utilization of *Guadua angustifolia* starting from its vegetal extracts. Many experiments were made in order to explore the performance and the chemical compounds in the extracts of *Guadua angustifolia*. From the tests with non-polar and medium polarity solvents, three types of compounds were found which presented high applicability in the cosmetics, pharmacist, automotive and chemistry industries. They were identified as tetraethyl silicate, diacetone alcohol and diethylene glycol. Also, the potential of these extracts on each section evaluated (internode, diaphragm and node) was rated, being the internode in the non-polar and medium polarity phases the most suitable for industrial use.

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; chemical composition; plant extracts; chemico-physical properties; uses; industrialization.

Introducción

Guadua angustifolia Kunth es la especie de bambú de mayor importancia ecológica, social, económica, cultural y comercial en Colombia. Si bien se considera uno de los recursos forestales más valiosos del país, a pesar de los esfuerzos de conservación e investigación que se han realizado, la especie sigue siendo asociada, básicamente, a la construcción de viviendas para la población rural pobre y la artesanía (Londoño et ál. 2002). Puesto que sólo en el eje cafetero el bambú cubre el 2,7% del territorio colombiano (26.986 ha), es de vital importancia que Colombia se apropie de la investigación y el desarrollo científico de esta especie nativa (Moreno 2003).

La composición química del tallo de bambú es similar a la de la

madera dura, excepto en lo referente a los extractos alcalinos. La composición química de esta parte de la planta es en su mayoría celulosa, hemicelulosa y lignina y en menor proporción resina, taninos, ceras y sales inorgánicas. Entre el 50-70% es holocelulosa, 30% pentosa y 20-25% lignina (Hidalgo 2003). Esta composición varía con las especies, condiciones de crecimiento, edad, parte del tallo y época del año. Por ejemplo, los nudos contienen menos extractos solubles en agua, pentosas y lignina, pero más celulosa que los entrenados; el contenido de sílice es alto en la epidermis, muy bajo en los nudos y ausente en los entrenados (Seethalakshimi y Muktesh 1998). La presencia de silicatos (en forma de dióxido de silicio o SiO₂) se evidencia en el contenido de

cenizas (Liese y Kumar 2003). Las propiedades químicas de la planta varían significativamente entre el nudo y el entrenado, la posición a lo largo del culmo y la posición del entrenado muestreado. Una investigación sobre las propiedades químicas del bambú *Dendrocalamus asper* (Prasetya 1995), a partir de una extracción acuosa, mostró un contenido de carbohidratos solubles tales como monosacáridos, disacáridos y hemicelulosa soluble.

Materiales y métodos

La presente investigación forma parte de un esfuerzo conjunto entre la Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales y la Universidad Politécnica de Madrid, dentro del Convenio marco de colaboración académica, científ-

fica y cultural con Latinoamérica. Con este estudio se busca explorar el potencial de uso de los extractos de la *Guadua angustifolia* Kunth mediante un proceso experimental, que permita proponer nuevas aplicaciones industriales de la especie. Esta investigación fue de tipo exploratorio y descriptivo (Hernández et ál. 1995), dado que el tema ha sido poco estudiado. A pesar de que el estudio se enfoca en las ramas, la experimentación se realizó con cepas, basas y sobrebases, pues el culmo concentra la mayor cantidad de biomasa, lo que finalmente podrá ser un buen indicador del contenido de compuestos químicos en las ramas. Para la recolección de muestras se aplicó un diseño experimental factorial completamente aleatorio, diferenciando entre individuos maduros y sobremaduros, tramos del tallo (cepa, basa y sobrebasa) (Fig. 1) y ubicación de la muestra en

el tramo (nudo, entrenudo y diafragma), como se observa en la Fig. 2.

En total se colectaron 54 muestras que fueron codificadas con un número y sus características particulares. En primer lugar, se cortaron los individuos en tramos de dos metros para sacarlos del guadual, después se cortó la parte a ser utilizada, la cual se llevó al laboratorio para ser molida y tamizada. El potencial de aprovechamiento de los extractos se evaluó mediante la construcción de una matriz que permitió identificar la parte con mayor potencial de aprovechamiento y el solvente más apropiado para obtener los mejores rendimientos.

Material vegetal. Para la selección y corte del material vegetal se tuvieron en cuenta tres factores: edad, parte del tramo y ubicación de la muestra en el tramo. La distribución de las 54 muestras seleccionadas fue la siguiente:

Características	Muestras
madura – cepa – nudo	3
madura – cepa – entrenudo	3
madura – cepa – diafragma	3
madura – basa – nudo	3
madura – basa – entrenudo	3
madura – basa – diafragma	3
madura – sobrebasa – nudo	3
madura – sobrebasa – entrenudo	3
madura – sobrebasa – diafragma	3
sobremadura – cepa - nudo	3
sobremadura – cepa – entrenudo	3
sobremadura – cepa - diafragma	3
sobremadura – basa - nudo	3
sobremadura – basa - entrenudo	3
sobremadura – basa - diafragma	3
sobremadura – sobrebasa - nudo	3
sobremadura – sobrebasa - entrenudo	3
sobremadura – sobrebasa - diafragma	3

Reactivos. En la extracción de muestras se varió la polaridad de los disolventes, siguiendo el índice de polaridad de los solventes para luego llevar a cabo el análisis químico mediante la técnica de cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas. La polaridad se fue aumentando en cada jornada de experimentación en este orden n-hexano, solución 1:1 de hexano: acetona, acetato de etilo y solución 1:1 de metanol:agua.

Índice de polaridad	Solvente
0,0	N-hexano
4,3	Acetato de etilo
5,4	Acetona
6,6	Metanol
9,0	Agua

Equipos. Se utilizaron evaporadores rotatorios (marca Büchi B-490), bomba de vacío (marca Büchi Vac V - 500), ultrasonido (marca Fisher Scientific F S60H), balanza analítica (marca Ohaus analytical plus con cinco cifras decimales), un molino de cuchillas (MF 10 basic Ika Werke), un cromatógrafo de gases acoplado a espectrómetro de masas (marca Shimadzu) y un HPLC 2000 plus (marca Jasco, equipado con una bomba de gradiente cuater-

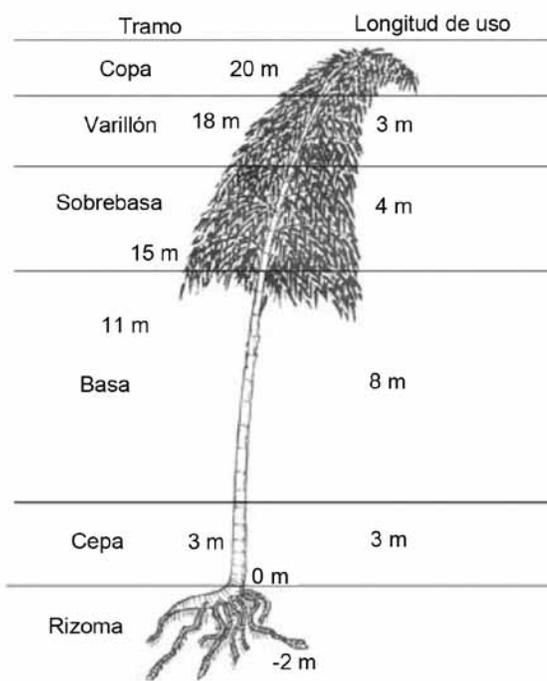


Figura 1. Tramos en que se divide una guadua (González et ál. 2006)

nario PU-2089 Plus, un automuestreador inteligente AS-2059 Plus, un horno para columna CO-2065 Plus, un detector inteligente de arreglo de diodos MD-2015 Plus, y un LC Net II/ADC, controlado por el Software EZChrom Elite. Todos los equipos pertenecen al Laboratorio de Calidad de Productos Naturales de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Proceso de extracción. Del material molido, se tomaron muestras por duplicado de 3 a 5 gramos para ser sometidas a una extracción sólido-líquido con tres volúmenes de 20 ml de solvente. Las muestras fueron llevadas a ultrasonido en tres periodos de 20 minutos cada uno. El homogenizado que se obtuvo después de este procedimiento se filtró y concentró al vacío en un rotavaporador a 40°C y a 95 rpm hasta llevarlo a sequedad total para separar el extracto de la planta del solvente.

El extracto fue redisoluto en 5 ml del mismo solvente en el que fue extraído con el fin de inyectarlo en el cromatógrafo de gases acoplado a espectrómetro de masas, para el caso de los extractos con polaridad media y apolar. Para la fase polar, se aplicó un proceso de centrifugación que elimina los pequeños sólidos que se formaron durante la separación del solvente; posteriormente se inyectó 1 ml de muestra en el HPLC.

Criterios de evaluación seleccionados. Con este estudio se evaluó el potencial de uso de cada una de las partes del tramo para proponer una nueva alternativa productiva que permita desarrollar procesos productivos a partir de los extractos vegetales de *G. angustifolia*. Para ello se tomaron en cuenta los siguientes criterios referidos a los resultados de tipo cuantitativo, cualitativo y factibilidad de uso.

Rendimiento: es la cantidad en masa del extracto que se puede obtener con un solvente determinado. En este caso, para cada solvente y cada parte estudiada, se evaluó el porcen-



Figura 2. Sección transversal del culmo de *Guadua angustifolia*

taje de rendimiento obtenido en la fase experimental. La calificación fue la siguiente:

- 3 = Parte del culmo con el mayor porcentaje de rendimiento
- 2 = Parte del culmo con un porcentaje de rendimiento intermedio
- 1 = Parte del culmo con el menor porcentaje de rendimiento

Componentes encontrados: se midió el número de componentes encontrados en cada extracción. Se otorgó 1 punto al menor número de componentes encontrados y 3 al mayor número de componentes.

Aplicabilidad industrial: este criterio se refiere al reconocimiento e identificación de cada componente químico en diferentes sectores industriales.

- 3 = Compuesto químico con alta aplicabilidad industrial
- 2 = Compuesto químico con buena aplicabilidad industrial
- 1 = Compuesto químico con baja aplicabilidad industrial

Disponibilidad de biomasa: es necesario determinar la cantidad de material aprovechable en las ramas de la planta, pues la morfología y las dimensiones de cada parte (entrenudo, nudo y diafragma) presentan variaciones significativas. De esta forma se considera que:

- 3 = alto contenido de biomasa
- 2 = bajo contenido de biomasa
- 1 = inexistencia de biomasa

Finalmente, a partir de los componentes químicos encontrados, se definieron los siguientes rangos que permitieron determinar si la biomasa que queda en el guadual después de la cosecha es apta para aplicaciones industriales:

1 - 4= baja viabilidad de la parte de la planta para explotarla industrialmente como extracto vegetal.

5 - 8= es posible utilizar los componentes químicos de la parte de la planta, teniendo en cuenta el tipo de solvente a utilizar.

≥ 9= alto potencial y viabilidad de la parte de la planta para aprovechar sus extractos vegetales, obtener el mayor rendimiento posible según la fase de polaridad óptima y el compuesto más aplicable a nivel industrial.

Para totalizar los resultados se realizó la sumatoria de las filas que corresponden a la parte de la planta estudiada y al nivel de polaridad en que variaron los solventes utilizados. Para una mejor comprensión y visibilidad de los resultados se utilizaron los colores característicos de un semáforo: verde para el mayor potencial de aprovechamiento, amarillo para un posible uso, según las

condiciones del procedimiento de extracción y rojo para el menor potencial de aprovechamiento.

Resultados

Las extracciones se realizaron con n-hexano como solvente no polar, solución 1:1 de hexano:acetona y acetato de etilo como solventes con polaridad media y solución 1:1 de metanol:agua como solvente polar. Los datos cuantitativos obtenidos se referenciaron a un porcentaje de rendimiento que indica la cantidad en masa del extracto que se puede obtener con un solvente determinado (Ecuación 1). Además, se obtuvieron resultados cualitativos gra-

cias al reconocimiento de los componentes químicos contenidos en cada parte de la planta.

Ecuación 1. Rendimiento del extracto (%)

$$\left(\frac{\text{Peso del Extracto}}{\text{Peso de la muestra} - \text{Peso del Extracto}} \right) 100$$

Solventes no polares

El rendimiento del extracto en esta fase fue mayor en el entrenudo (Fig. 3); el registro más alto fue de 1,2919%, seguido por el diafragma (0,8482%). En las cromatografías realizadas se observó un solo pico que indica la presencia de un solo

compuesto mayoritario, el cual fue identificado como tetraetil silicato en la base de datos del *software* GCM Solutions utilizada por el cromatógrafo de gases acoplado a masas. Este compuesto es utilizado como anticorrosivo en la industria de revestimientos de piedra y cemento, como secador de piezas arqueológicas y además se emplea en pinturas y lacas; a nivel farmacéutico se usa en la línea de cosméticos (Morales y Sánchez 2008).

Solventes con polaridad media

Al igual que en el caso anterior, los resultados cuantitativos muestran un orden de rendimiento descendente de entrenudo, diafragma y nudo; el primero con 4,0439% y el segundo con 2,1967% (Fig. 4). Con respecto a los resultados cualitativos obtenidos con la extracción en hexano:acetona, se evidenció un solo compuesto mayoritario identificado como 2-pentanona, 4-hidroxi-4-metil. Este compuesto es comúnmente utilizado como solvente de diversas sustancias; por ejemplo, para la conservación de fármacos, en soluciones anticongelantes para fluidos hidráulicos, y en la preparación de óxido de mesitilo, metilisobutilcetona y hexilenglicol. Además se registró un uso ilícito, dado que sirve como solvente para la producción de acetona (CICAD 1990).

Con el segundo solvente de polaridad media utilizado en las extracciones de las muestras (acetato de etilo), los resultados de tipo cuantitativo sugieren que el rendimiento del extracto fue mayor en el entrenudo seguido por el diafragma. De nuevo, los porcentajes más bajos se registraron en el nudo (Fig. 5). Sin embargo, en comparación con los resultados obtenidos con los solventes anteriormente discutidos, se nota una menor diferencia en cuanto a rendimiento entre las partes, pues el diafragma presentó un rendimiento de 5,4524% y el entrenudo de 5,7448%.

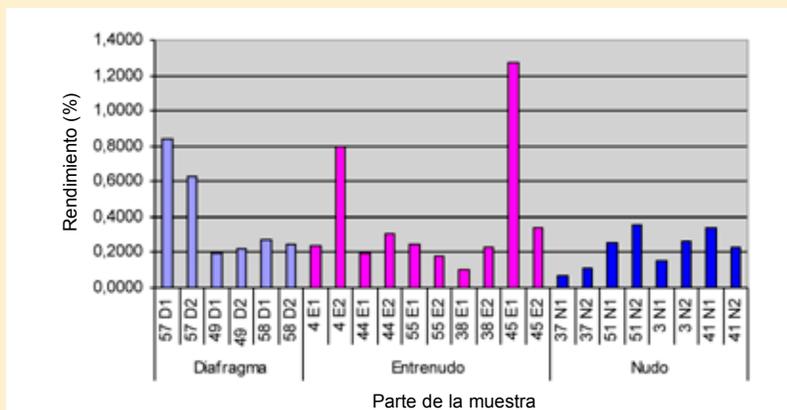


Figura 3. Rendimiento de los extractos en hexano según parte del tramo

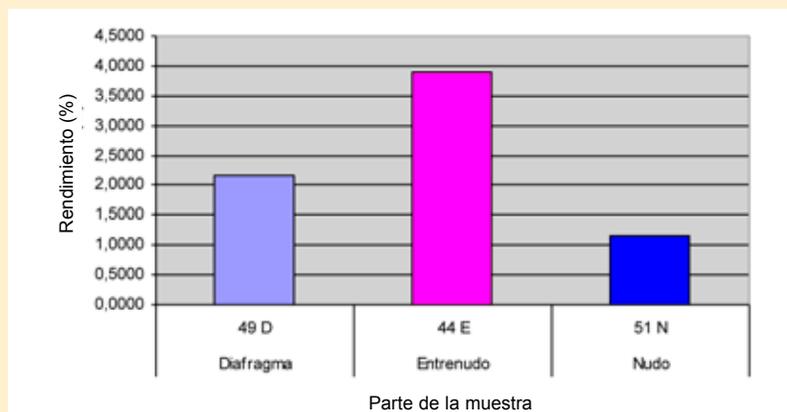


Figura 4. Rendimiento de los extractos en hexano:acetona según parte del tramo

En los resultados cualitativos, nuevamente se observó un solo compuesto identificado como etanol, 2,2'-oxibis, el cual es conocido por su nombre químico como "diétilenglicol". Este compuesto se utiliza principalmente como anticongelante y en algunas ocasiones como espesante sustituto de la glicerina en la síntesis de resinas alcídicas y de poliéster saturado e insaturado. Entre sus usos están la elaboración de muebles de baño, bases de cocina, sillas de concreto, losetas, autopartes, tuberías y tanques de almacenamiento. También funciona como agente humectante y plastificante en la industria de celofán, colas y adhesivos, textiles, tintas de impresión, cuero, cosméticos, papel y productos farmacéuticos; puede ser utilizado como aditivo auxiliar en la molienda del cemento (QuimiNet.com 2000).

Solventes polares

Para el análisis de las muestras extraídas con metanol:agua (1:1) se utilizó la técnica HPLC. Los resultados de tipo cuantitativo denotan una disminución del rendimiento del extracto en el entrenudo, el cual registró los mayores porcentajes de rendimiento en los demás análisis. Con el disolvente polar, el entrenudo obtuvo un valor de rendimiento de 1,3927% seguido por el nudo con 2,3505% y el diafragma con el mayor valor de 4,4232% (Fig. 6).

En los cromatogramas realizados en esta fase se intuyó la presencia de compuestos de tipo flavonoide (parte de la familia de los polifenoles), dado que su espectro de absorción se caracteriza por presentar bandas separadas a longitudes de onda largas (Botanical Online. 2008), las cuales se observaron en el cromatograma realizado a 300nm de longitud de onda.

Potencial de uso de los extractos

Los sectores industriales de cosmética, química y automotriz son los que podrían aprovechar mejor los componentes encontrados, seguido

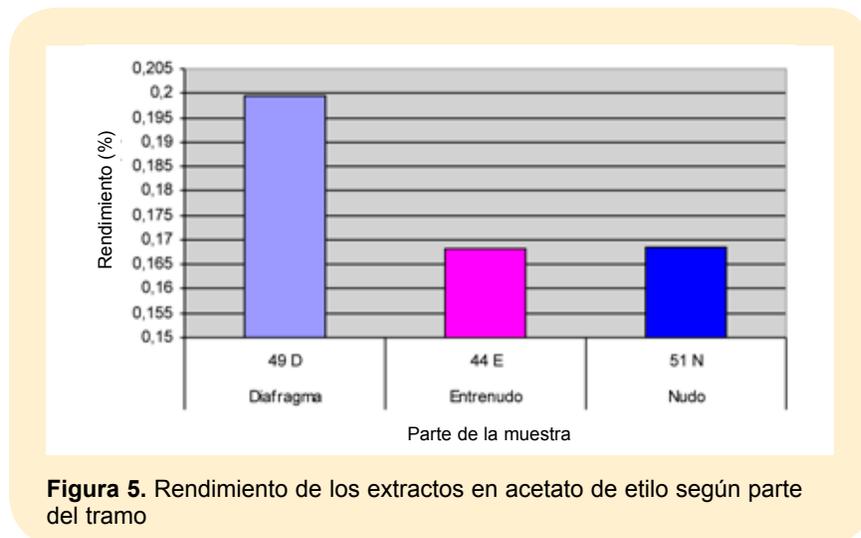


Figura 5. Rendimiento de los extractos en acetato de etilo según parte del tramo

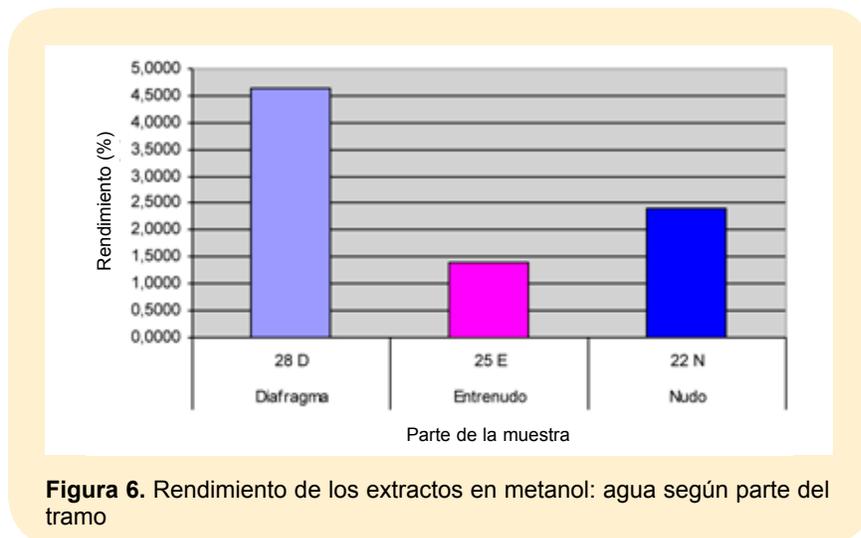


Figura 6. Rendimiento de los extractos en metanol: agua según parte del tramo

por el sector farmacéutico (Cuadro 1). Hay que hacer notar, sin embargo, que para algunos componentes no se encontraron usos potenciales. Los entrenudos analizados en la fase apolar y de polaridad media presentaron los puntajes más altos (Cuadro 2); esto quiere decir que esta sección del culmo es la parte de la planta más apta para el aprovechamiento industrial de sus componentes químicos. Además, es la sección que más cobertura tiene en las ramas, lo que permitiría una extracción más eficiente en comparación con las otras dos partes estudiadas.

En las fases apolar y de polaridad media solo se encontró un

componente químico, en tanto que en la fase polar no fue posible determinar un número de componentes en la extracción debido al equipo utilizado (Cuadro 2). Los colores empleados en este mismo cuadro muestran el nivel de posibilidad de uso de los componentes; por ejemplo, los nudos en la fase polar ofrecen una baja posibilidad de aprovechamiento como extractos vegetales (color rojo). Los resalta-dos con color amarillo indican que no se descarta totalmente la posible utilización de los componentes químicos y los resalta-dos en color verde serían los más aptos para su utilización industrial.

Cuadro 1. Propuestas de uso para los compuestos químicos encontrados en *Guadua angustifolia*

Compuesto químico	Propuestas de aplicación	Sector de aplicación	Aplicabilidad industrial	
Tetraetil silicato	Revestimiento	Construcción	1	
	Anticorrosivo	Arqueología	1	
	Secador			
Diacetona alcohol	Antioxidante, antirradical	Cosmética	3	
	Solvente de sustancias	Química	3	
	Conservante	Farmacéutico	2	
	Anticongelante	Automotriz	3	
	Barniz, capa aislante	Eléctrico	1	
	Componente Intermedio	Química	3	
Dietilenglicol	Anticongelante	Automotriz	3	
	Espesante sustitutivo	Química	3	
	Humectante Plastificante Solvente	Celofán		1
		Adhesivos	Textil	
		Tintas		
		Farmacéutico		
	Aditivo auxiliar	Cuero		1
		Cosmética		3
		Papelero		1
	Resina de poliéster	Autopartes		1
Tuberías				
Tanques				
Flavonoides1*	Antioxidante, antirradical, proliferación de células	Cosmética	3	

* Los flavonoides son un grupo de compuestos químicos (Botanical Online 2008).

Conclusiones

Tres tipos de compuestos identificados en los ensayos con solventes no polares y con polaridad media mostraron alta aplicabilidad a nivel de la industria cosmética, farmacéutica, automotriz y química fina. Estos fueron el dietilenglicol (el de mayor aplicabilidad), seguido por tetraetil silicato y diacetona alcohol.

La parte del tramo más apta para ser aprovechada industrialmente –según el contenido de componentes químicos presentes en su estructura física– es el entrenudo en la fase polar y de polaridad media.

Cuadro 2. Potencial de uso de las secciones evaluadas en culmos de *Guadua angustifolia*

Nivel de polaridad Partes del culmo	Criterios de evaluación	Rendimiento	Componentes encontrados	Aplicabilidad industrial	Disponibilidad de biomasa	Total
Apolar	E	3	1	2	3	9
	N	1	1	2	2	6
	D	2	1	2	1	6
Polaridad Media	E	3	1	3	3	10
	N	1	1	3	2	7
	D	2	1	3	1	7
Polar	E	2		1	3	6
	N	1	N.A.	1	2	4
	D	3		1	1	5

E = entrenudo; N = nudo; D = diafragma

Literatura citada

- Botanical Online. 2008. Características de los flavonoides. Disponible en <http://www.botanical-online.com/medicinalesflavonoides.htm>
- CICAD (Comisión Interamericana para el Control del Abuso de Drogas). 1990. Químicos utilizados en la producción ilícita de drogas. OEA. Disponible en http://www.cicad.oas.org/Main/Default_SPA.asp
- González, HA. Montoya, JA. Bedoya, JR. 2006. Esfuerzo de tensión y la influencia de la humedad relativa del ambiente y la altura a lo largo del tramo en la especie de bambú *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica* Universidad Tecnológica de Pereira 12 (32): 445-450.
- Hernández, SR; Fernández, CC; Pilar, BL. 1995. Metodología de la investigación. México, McGraw-Hill. 501 p.
- Hidalgo, LO. 2003. Bamboo: the gift of gods. Bogotá, Colombia, D'VINNI LTDA. p. 98-106.
- Liese, W; Kumar, S. 2003. Bamboo preservation compendium. New Delhi, India, The Centre for Indian Bamboo Resource and Technology – CIBART. Technical report.
- Londoño, X; Camayo, GC; Riaño, NM; López, Y. 2002. Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *Bamboo Science and Culture: The journal of the American Bamboo Society* 16(1):18-31.
- Morales, NN; Sánchez, LJV. 2008. Contribución al estudio fito-químico de las hojas de *Guadua angustifolia* Kunth. Armenia, Colombia, Universidad del Quindío.
- Moreno, RD. 2003. Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia: Área Piloto Eje Cafetero-Tolima-Valle del Cauca. Pereira, Colombia, CARDER.
- Prasetya, B. 1995. Chemical properties of node and internode along the culm height of *Dendrocalamus asper*. *Bamboo, People and the Environment* Vol. 3: Engineering Utilization. Puspipstek, Serpong, Indonesia.
- QuimiNet.COM. 2000. Origen, tipos y aplicaciones de los etilenglicoles. Disponible en [http://quiminet.com.mx/pr5/Monoetilenglicol%2Band%2BDietilenglicol%2B\(%2BMEG%2B%2BDEG\).htm](http://quiminet.com.mx/pr5/Monoetilenglicol%2Band%2BDietilenglicol%2B(%2BMEG%2B%2BDEG).htm)
- Seethalaskshimi, K; Muktesh, MS. 1998. Bamboos of India: a Compendium. New Delhi, India, Kerala Forest Research Institute, International Network for Bamboo and Rattan. Technical Report N°17, p. 11-13.

Diversidad y estructura genética de *Guadua angustifolia* en la Ecorregión Cafetera colombiana

Jaime Eduardo Muñoz Florez¹;
Ximena Londoño²;
Paula Rugeles¹;
Andrés Mauricio Posso¹;
Franco Alirio Vallejo¹

Guadua angustifolia presenta alta diversidad genética en la región cafetera de Colombia lo que indica que la población tiene alta posibilidad de tolerar cambios ambientales por su gran número de genotipos y cuenta con una base genética amplia para iniciar programas de mejoramiento.



Foto: Jorge E. Arango.

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, A.A. 237, Palmira, Valle del Cauca. Correo electrónico: jemunozf@unal.edu.co.
² Sociedad Colombiana del Bambú, A.A.11574, Cali, Valle del Cauca. ximelondo@gmail.com

Resumen

Se recolectaron muestras de hojas jóvenes del follaje apical de culmos de *Guadua angustifolia* en 30 sitios de la región cafetera de Colombia con el fin de extraer el ADN y evaluar nueve marcadores microsatélites. Como grupo externo se usaron tres introducciones procedentes del Perú. El material evaluado presentó una alta diversidad genética ($H_e=0,54$) y un valor alto de H_o (0,68) que indica exceso de individuos heterocigotos; esto se explica por la estructura floral de la especie o por un posible caso de incompatibilidad genética. Las introducciones colombianas y peruanas mostraron características diferenciadas. La variación genética al interior de los guaduales se explica por la floración bianual y la presencia de plántulas de origen sexual dentro de cada guadual. Se halló moderada estructura poblacional ($F_{st}=0,09$), asociada a agrupamientos geográficos que se explican, en parte, por el valor de alto flujo genético entre los grupos ($N_m=2,51$).

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; diversidad genética; biodiversidad; marcadores moleculares; zona cafetera; Colombia.

Summary

Diversity and genetic structure of *Guadua angustifolia* in the Colombian coffee eco-region. *Guadua angustifolia* young leaves were collected in 30 collecting places within the Colombian coffee region, in order to isolate DNA and evaluate nine microsatellites molecular markers. As a control group, three Peruvian samples were used. High genetic diversity ($H_e=0.54$) and a high H_o value (0.68) indicated a heterozygote individual excess that could be explained by the flower structure or a possible genetic incompatibility. A high differentiation between Colombian and Peruvians materials was detected. Genetic variation within bamboo forests was explained by its sexual and vegetative reproduction systems. The population structure was medium ($F_{st}=0.09$) and associated with geographical grouping partly explained by its high genetic flow ($N_m=2.51$).

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; genetic diversity; biodiversity; molecular markers; coffee zone; Colombia.

Introducción

La especie de bambú *Guadua angustifolia* Kunth (Poaceae) se distribuye en Colombia en los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda, Valle del Cauca, Antioquia, Boyacá, Cauca, Caquetá, Casanare, Cundinamarca, Chocó, Huila, Meta, Nariño, Norte de Santander, Putumayo, Santander y Tolima (Londoño 1991). El área de guaduales naturales y plantados durante los últimos 25 años (1980-2005) es de 51.000 ha: 46.000 ha (90%) naturales y 5.000 ha (10%) cultivadas (Castaño y Moreno 2004).

En la ecorregión del Eje Cafetero de Colombia, por debajo de los 2000 m de elevación, *Guadua angustifolia*

es la especie de bambú más abundante, aprovechada y promisoría. De acuerdo con el último inventario, en esta zona hay alrededor de 28.000 ha cubiertas de guaduales (Morales y Kleinn 2004) que, en su mayoría, no reciben un manejo adecuado (Camargo 2006). Dichos guaduales presentan características distintas en términos de estructura y composición florística; en particular, número de culmos producidos con fines comerciales y calidad del culmo determinada por sus propiedades físicas y mecánicas (Camargo 2006).

La explotación de la guadua se ha incrementado en los últimos años, lo que indica que hay un mer-

cado creciente para la especie. En el periodo 1993-2004, el departamento del Quindío produjo el 50,3%, Valle del Cauca el 21,2%, Risaralda el 19,1%, Caldas el 8,8% y Tolima solo el 0,6% de la guadua usada en el mercado nacional (Moreno 2006). La industria de la construcción es el principal usuario de la guadua en Colombia; dos terceras partes del producto comercializado se destina a este sector (Held y Manzano 2004). Esta especie se utiliza en construcción desde la época precolombina; de hecho, Colombia es reconocida en el ámbito internacional como pionera en sistemas constructivos con bambú, mejoramiento de los sistemas de uniones y normalización

de ciertos procesos constructivos (Muñoz 2011). Actualmente, existen grandes expectativas sobre el incremento de productos a partir del ecosistema guadua y de la consolidación de una industria alrededor de productos transformados a partir del culmo de guadua. De seguir esta tendencia, se requeriría mayor producción de materia prima, ordenación de los guaduales existentes y plantación de nuevas áreas (Muñoz et ál. 2008).

La diversidad genética de una especie no depende del ambiente y provee información que puede ser útil para orientar los programas de mejoramiento. Tal diversidad se puede estimar mediante marcadores moleculares de ADN. La variabilidad molecular de *Guadua angustifolia* en Colombia ha sido estudiada con ocho loci microsatélites (Torres 2008), con marcadores microsatélites de caña y arroz (Marulanda et ál. 2007), con marcadores dominantes AFLP (Marulanda et ál. 2002) y mediante evaluaciones preliminares con marcadores RAM (*random amplified microsatellites*) (Muñoz et ál. 2008, Rugeles 2011).

El objetivo de esta investigación es estudiar y explicar la diversidad genética de los guaduales del Eje Cafetero; identificar zonas geográficas de alta diversidad genética que permitan orientar las estrategias de conservación, y establecer un banco de ADN de *Guadua angustifolia* y de especies relacionadas en el laboratorio de biología molecular de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira.

La zona de estudio

A partir de información obtenida de los trabajos de tesis de Muñoz (2011), se ubicaron 30 sitios en la región cafetera de Colombia debidamente georreferenciados en cuatro departamentos: Quindío, Risaralda, Caldas y norte del Valle del Cauca (Cuadro 1). Se tomaron muestras de hojas jóvenes del complemento

Cuadro 1. Sitios seleccionados para este estudio

Finca	Municipio	Departamento	msnm	Latitud N	Longitud O
El Bambusal A	Montenegro	Quindío	1252	4.518	-75.790
La Elena B	Montenegro	Quindío	1220	4.531	-75.816
Nápoles C	Montenegro	Quindío	1250	4.555	-75.802
Nápoles D	Montenegro	Quindío	1247	4.564	-75.810
Nápoles E	Montenegro	Quindío	1223	4.557	-75.808
Nápoles F	Montenegro	Quindío	1244	4.555	-75.803
Nápoles G	Montenegro	Quindío	1239	4.551	-75.802
La Secreta H	Circasia	Quindío	1616	4.597	-75.660
El Porvenir I	Circasia	Quindío	1522	4.569	-75.667
El Ocaso J	Quimbaya	Quindío	1164	4.599	-75.816
El Ocaso K	Quimbaya	Quindío	1170	4.596	-75.814
Balsora L	Armenia	Quindío	1190	4.519	-75.771
La Mejorana M	Quimbaya	Quindío	1420	4.607	-75.755
El Ocaso N	Quimbaya	Quindío	1111	4.593	-75.811
Belén Ñ	Circasia	Quindío	1683	4.597	-75.646
Yarima O	Pereira	Risaralda	1221	4.784	-75.788
Eupen P	Pereira	Risaralda	1140	4.836	-75.825
Eupen Q	Pereira	Risaralda	1135	4.840	-75.821
Filipinas R	Pereira	Risaralda	1298	4.736	-75.754
La Esmeralda S	Pereira	Risaralda	1212	4.738	-75.774
CEBG T	Córdoba	Quindío	1176	4.402	-75.716
La Piragua U	Marsella	Risaralda	1153	4.968	-75.715
La Española V	Marsella	Risaralda	1020	4.952	-75.701
El Naranjal W	Chinchiná	Caldas	1318	4.968	-75.661
La Esperanza X	Manizales	Caldas	1776	5.000	-75.565
Lomas Y	Manizales	Caldas	1308	5.005	-75.587
El Nogal Z	Palestina	Caldas	1318	5.008	-75.657
Villa Martha Alfa	Pereira	Risaralda	1320	4.865	-75.752
Las Brisas Beta	Cartago	Valle	1201	4.674	-75.838
Corozal Gama	Cartago	Valle	979	4.678	-75.842

foliar del follaje apical del culmo y se conservaron en nitrógeno líquido hasta su procesamiento en el laboratorio. Se recolectaron como mínimo tres muestras de hojas jóvenes por culmo y tres culmos por sitio. Como grupo externo de control se incluyeron tres muestras de *G. aff. angustifolia* procedentes del Perú. Para la extracción de ADN se utilizó la metodología descrita por Dellaporta et ál. (1983).

Marcadores moleculares microsatélites

Se evaluaron nueve marcadores microsatélites descritos para *G. angustifolia* por Pérez-Galindo et ál. (2009). En el Cuadro 2 se detallan esos marcadores. La reacción de amplificación por PCR se realizó en un volumen final de 25 µl con las siguientes condiciones de reac-

ción: buffer Taq 1X, MgCl₂ 1.5 mM, DNTPs 0,2 mM, Taq Polimerasa 1 U, cebador 2 µM y 40ng de ADN. El perfil térmico se hizo a 94°C por 2 minutos, seguido de 30 ciclos de desnaturalización a 94°C por 1 minuto, hibridación de 50-55°C por 50 segundos, extensión a 72°C por 2 minutos y una extensión final a 72°C por 5 minutos. Para la amplificación se utilizó un termociclador PTC-100. Los productos amplificados se visualizaron en geles de poliacrilamida desnaturalizantes al 4% (19:1 acrilamida-bisacrilamida) corridos a 1600 voltios por una hora y teñidos con nitrato de plata (Sambrook et ál. 1989).

Análisis de la información

La información de los patrones de bandas obtenidos se registró en una matriz numérica; a cada uno de los

Cuadro 2. Marcadores microsatélites y estimadores de diversidad reportados

Locus	Secuencia (5'-3')	Motivo repetido	Tamaño (pb)	Tm	No. alelos	Ho	He
FJ444930	R: CCTTCACATGGTCTCACAAG F: CAGTCTAGCAATCAATTTGAAG	(GATA)8	225-270	55	3	0.73	0.57
FJ444929	R: CTAGATCTTCCTAATCAAAGTGG F: TACTAACCGATTGTCCCGTCTAG	(GATA)10	240-260	48	4	0.79	0.62
FJ444932	R: CGCCACGTTAATCCCAGTTAGG F: CCTATACATATATGCATTGTGTGG	(CTAT)10	450-500	54	3	0.86	0.58
FJ476075	R: GTTCCTACATGTAGACATATCC F: CTCTTGGGAGTGAGCATGGTGAC	(CTAT)13	175-195	48	2	0.45	0.36
FJ444934	R: CCCGACAGATAGATGGTCAA F: CTCATTTCTCAATTGCGCAAGAG	(GATA)16	170-190	50	3	0.54	0.61
FJ444931	R: GTCAATCACGCCAGCTCTAACA F: CTCTGACATGTATGGATCTTGCA	(GATA)16	225-275	50	4	0.87	0.72
FJ444936	R: CCCAACAAAGATGGTCAGAT F: CAGGAGATGAGCCTGTAGT	(GATA)9	180-220	55	3	0.83	0.66
FJ444935	R: CTAGGCCCACTCCTATCCCA F: AGCTTCCTCAGAATGCCTAATTA	(CTAT)8	210-260	55	2	0.1	0.15
FJ476076	R: CCTTCAATTAGTACATAGATAG F: GTACAGAACCATCTCATCCT	(GATA)8	230-255	55	5	0.93	0.63

alelos encontrados por locus se asignó un consecutivo, con un máximo de dos valores por locus para cada individuo dependiendo de su genotipo (homocigoto-heterocigoto). Para la selección de bandas polimórficas se consideró como locus polimórfico aquel en el cual la frecuencia del alelo más común es menor al 95%. A partir de esta matriz se realizaron los análisis estadísticos por medio del programa SIMQUAL del paquete NTSYpc (*Numerical Taxonomy System for Personal Computer*) versión 2.0, TFGA (*Tools for Population Genetic Analysis*) y Arlequin versión 3.11. La similitud genética se calculó mediante el coeficiente de Nei (1973).

El análisis de agrupamiento se realizó con el programa SAHN de NTSYS-pc, utilizando el método gráfico de agrupamiento por pare-

jas UPGMA. El dendrograma se construyó con el programa TREE de NTSYS-pc. Para determinar el nivel de asociación o de proximidad, se realizó un análisis de correspondencia múltiple (ACM) según la metodología de Joseph et ál. (1992). Para estimar la diversidad genética se utilizaron los parámetros de heterocigosidad promedio (H) y el porcentaje de loci polimórficos (P), de acuerdo con la fórmula no sesgada de Nei (1973). Los individuos fueron agrupados por lugar de procedencia (Cuadro 3).

Mediante un análisis discriminante se propuso un grupo geográfico de origen del sitio T. Se estimaron como parámetros poblacionales los índices de fijación (Fst, Fis y Fit) descritos por Wright (1931). Con una prueba exacta de diferenciación poblacional (Raymond y Rousset

1995) se verificó la significancia del valor de Fst obtenido y la correspondencia de los grupos formados. Se realizó un análisis de varianza molecular para evaluar la existencia de diferenciación genética entre y dentro de las poblaciones y, finalmente, se estimó el número medio de migrantes por generación (Nm) según Wright (1931).

Resultados y discusión

Diversidad genética de los materiales evaluados

Los patrones de bandas obtenidos con nueve marcadores microsatélites (Fig. 1) mostraron entre 2 y 5 alelos para los marcadores evaluados (Cuadro 2). Para esos mismos marcadores, Pérez-Galindo et ál. (2009) encontraron entre 3 y 9 alelos y Torres et ál. (2009) entre 5 y 14 alelos mediante la amplificación con ocho marcadores. Esto se debe a que en esos estudios se utilizaron materiales obtenidos del Banco de Germoplasma de Bambusoideae del Jardín Botánico Juan María Céspedes de Tulu. Dichas muestras correspondían a diversas especies del género *Guadua* provenientes de distintas zonas geográficas del país.

Cuadro 3. Grupos formados para el análisis de diversidad genética y estructura poblacional utilizando nueve marcadores moleculares microsatélites

Grupo	Sitios	Departamento de procedencia
1	H, N, O, I, Ñ.	Quindío y Risaralda
2	A, B, C, D, E, F, G, J, K, L, M, Beta, Gama	Quindío y Norte del Valle del Cauca
3	P, Q, R, S, T, Alfa	Quindío y Risaralda
4	U, V, W, X, Y, Z	Caldas
5	PE	Perú

El menor número de alelos determinado en el presente estudio se puede explicar por lo reducido de la zona geográfica estudiada y por la inclusión de una sola especie en el análisis de materiales (Muñoz 2011).

El dendrograma de los materiales evaluados (Fig. 2) mostró una clara diferenciación de los materiales de *G. angustifolia* procedentes del Perú (valor de similitud de 0,60), aunque también se observó variación al interior de cada uno de los sitios. A pesar de que la región evaluada es relativamente pequeña, la diversidad genética observada fue alta ($H_e=0,54$ y $H_o=0,68$). El valor de H_o resulta elevado debido a la presencia de individuos heterocigotos en la población evaluada, la posible naturaleza alógama de la especie y las posibles incompatibilidades asociadas a la estructura de la flor (Muñoz 2011, Posso 2011). En la mayoría de los casos hubo mayor similitud genética de uno de los culmos evaluados con otro sitio relativamente cercano (ver en Fig. 2 los casos de A, G, M, E, P, O, H, Z y K).

Con el análisis de diversidad y estructura se determinó una alta diversidad genética para los 30 materiales de *G. angustifolia* evaluados (Cuadro 4). El porcentaje de loci polimórficos para los grupos evaluados y usando los nueve marcadores también fue alto.

Los resultados del ACM (Fig. 3) confirmaron que no existe una relación entre los agrupamientos y las zonas geográficas de procedencia de los materiales; además, se evidenció una alta variación de los materiales en la población evaluada por no formar un grupo homogéneo y la ubicación en un grupo aparte de los materiales procedentes de Perú. Torres (2008) reportó un valor alto de H_e (0,75) y Marulanda et al. (2002), con muestras de la misma colección del Banco de Germoplasma y marcadores SSR descritos previamente para arroz y caña de azúcar, determinaron un nivel considerable de

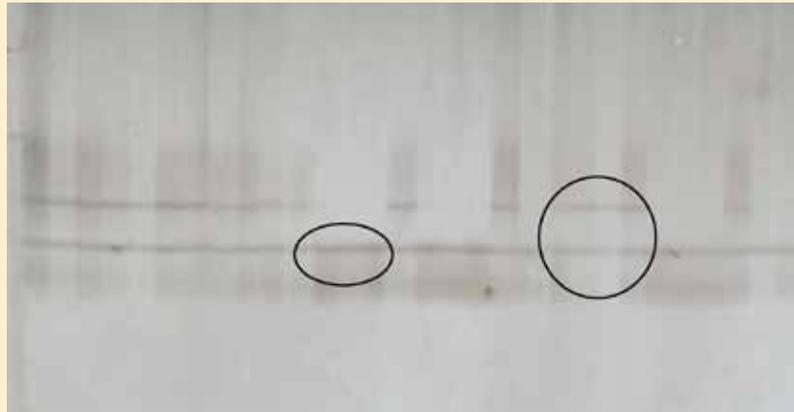


Figura 1. Patrones de bandas obtenidos con el microsatélite FJ476075. Nótese la clara diferenciación de individuos homocigotos (izquierda) de heterocigotos (derecha)

Cuadro 4. Estimación de diversidad por grupos geográficos con microsatélites

Grupo geográfico	n*	He	Ho	Porcentaje loci polimórficos
1 Quindío y Risaralda	12	0,48	0,73	88,89
2 Quindío y Norte del Valle del Cauca	44	0,51	0,65	88,89
3 Quindío y Risaralda	15	0,53	0,75	100
4 Caldas	18	0,54	0,70	100
5 Perú	3	0,33	0,52	55,5

* Número de individuos evaluados

variabilidad entre las especies de *Guadua* evaluadas y un nivel menor de diferenciación genética dentro de las accesiones de *G. angustifolia*.

La prueba exacta de diferenciación poblacional para los grupos geográficos formados para el análisis de estructura poblacional mostró altos valores de significancia ($P < 0,01$), lo que indica que los grupos geográficos son diferenciables genéticamente. Los materiales pertenecientes al grupo 5 (Perú) presentaron la mayor distancia geográfica y genética con respecto a los otros grupos (Fig. 4); esto quiere decir que estos materiales pueden ser parte de un taxón diferente y confirma lo reportado por Londoño (2010) con estudios de caracterizaciones morfológicas. Del grupo geográfico 1 (Quindío: sitios N, Ñ, H, I), los dos primeros se ubican en

el mismo grupo genético, mientras que los otros dos se ubican en grupos genéticos diferentes (Fig. 4). La mayoría de los sitios del grupo geográfico 2 pertenecen al mismo grupo genético y se ubican en el departamento del Quindío (Montenegro, Quimbaya y Armenia) y dos en el Valle del Cauca (Cartago). A este grupo pertenecen cuatro clones superiores seleccionados previamente por sus características de importancia como materiales elite (Muñoz 2011, Rugeles 2011). Estos lugares se caracterizaron por presentar características similares de pH del suelo, contenido de materia orgánica y otras características de fertilidad del suelo, aunque los sitios M y β mostraron contenidos menores de K (Muñoz 2011). El grupo geográfico 3, integrado por los sitios α , O, P, Q, R y S en el departamento

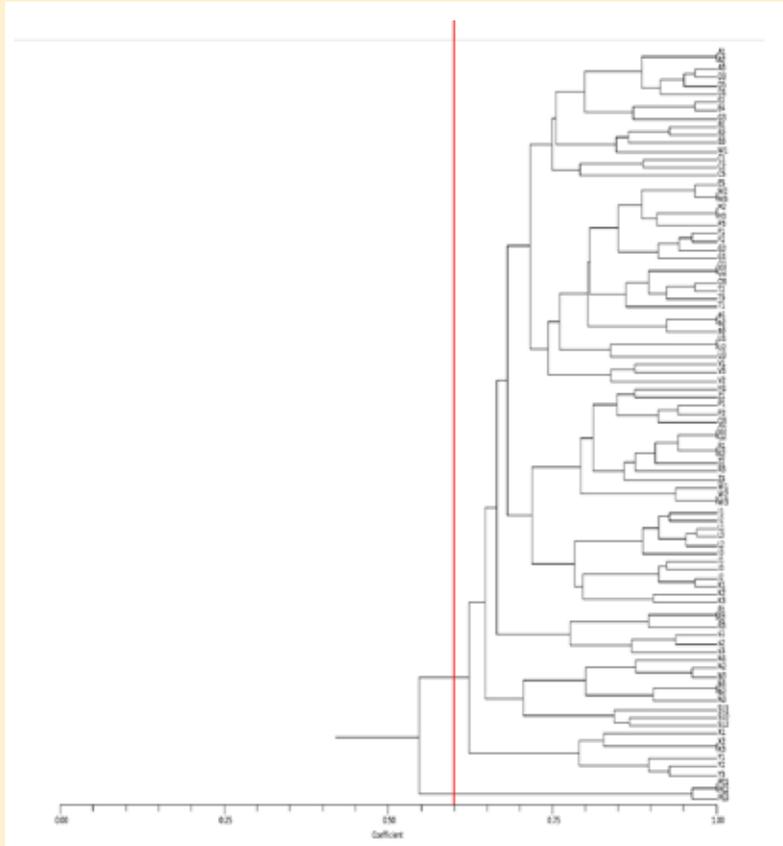


Figura 2. Dendrograma de los materiales evaluados a partir de nueve marcadores moleculares microsatélites

de Risaralda, mostró variación en altitud, materia orgánica de 5,97 a 12,40%, contenidos de Ca desde 6,9% hasta 18,9% y similitud en el pH del suelo (Muñoz 2011). Los sitios de este grupo se ubicaron en dos grupos genéticos; el sitio *S* es el más distante y se ubica en un tercer grupo genético. Para los sitios del grupo geográfico 4, provenientes de Risaralda y Caldas no se encontró una clara relación entre grupo genético y ubicación geográfica.

El dendrograma para los grupos geográficos (Fig. 4) indica la unión de los grupos 2 y 3 con un índice de consistencia de 44,44% de loci que soporta el nodo. En el dendrograma de individuos (Fig. 2), los sitios de los grupos 2 y 3 se agruparon en el mismo clúster, lo cual se

puede atribuir a la relativa cercanía geográfica entre ellos. El siguiente nodo en el dendrograma para grupos geográficos une a los grupos 2-3 con el grupo 1, con un índice de consistencia de 22,2% de loci que soportan el nodo; aquí se agrupan los sitios de Quindío, Risaralda y norte del Valle de Cauca. El tercer nodo es soportado por el 66,67% de los loci y unió los grupos 2-3-1 con el grupo 4, cuyos sitios proceden de la zona norte de la región cafetera donde predominan lugares del departamento de Caldas con altitudes relativamente más altas. El cuarto y último nodo soportado por los nueve loci evaluados unió todos los sitios de *G. angustifolia* del eje cafetero colombiano con los materiales de *Guadua* aff. *angustifolia*

procedentes del Perú y confirma lo obtenido en el dendrograma de sitios (Fig. 2), donde estos materiales se diferenciaron claramente del resto de individuos.

La correspondencia inexacta entre grupos genéticos y geográficos puede deberse al uso que los pobladores de esta región han dado al bambú desde épocas precolombinas. Probablemente, en diferentes momentos históricos los pobladores han transportado culmos de un sitio a otro; también, los frecuentes deslizamientos de suelo en esta región andina han contribuido a dispersar rizomas de *G. angustifolia* en las cuencas hídricas y, por último, el transporte de semilla sexual por las corrientes de agua, aves y otros dispersores (Muñoz 2011).

Estructura poblacional de los materiales evaluados

Los valores asociados a la estructura poblacional fueron $Fit = -0,21 (\pm 0,07)$, $F_{st} = 0,09 (\pm 0,02)$ y $F_{is} = -0,33 (\pm 0,06)$. El valor negativo para Fit se debe a que el valor de H_e es menor al valor de H_o , lo que indica un exceso de individuos heterocigotos en todos los grupos evaluados y se explica posiblemente por una restricción a los cruzamientos al azar. El valor de F_{st} denota una baja estructura poblacional en el eje cafetero, donde los grupos muestreados presentan subdivisión poblacional asociada a lugares geográficos con condiciones características que inciden en las frecuencias alélicas de cada uno de esos grupos. Los resultados obtenidos son muy similares a los de Rugeles (2011) en la misma zona y con marcadores moleculares RAM (0,1), lo cual indica que ambos marcadores moleculares permiten la detección de la estructura poblacional. Estos resultados demuestran que hay un indiscutible flujo genético entre las poblaciones de esta zona y que no existen barreras ni una marcada diferencia entre las poblaciones estudiadas.

El análisis de varianza molecular indica que la variación entre grupos fue de 7,15%, en tanto que la variación entre individuos dentro del grupo fue negativa (0%). El 92,85% de la variación se debe a la varianza dentro de los individuos, lo que se corrobora con los resultados obtenidos mediante los análisis de agrupamiento y ACM que mostraron una alta variación individual de los materiales evaluados. Estos resultados sugieren la presencia de una moderada estructura genética en el eje cafetero y la posible subdivisión poblacional en otras regiones de Colombia. Estudios adicionales que involucren a otras regiones geográficas del país son necesarios para corroborar estos resultados.

El número de migrantes por generación (N_m) se estimó en 2,51, lo cual respalda la hipótesis de intercambio de alelos entre los grupos. Como norma se establece que valores de N_m mayores de 1 son típicos de especies con elevado flujo génico y, por lo tanto, a mayor valor de N_m , mayor es el nivel de flujo génico. Los resultados indican que las poblaciones del eje cafetero presentan un elevado flujo genético que explica los resultados obtenidos con los análisis ya mencionados, como el valor bajo de F_{st} (0,09).

Una hipótesis para explicar el exceso de heterocigotos

En los cinco grupos geográficos, la H_o supera los valores de H_e -desde 13,89% en el grupo geográfico 2 hasta 25,27% en el 1-; el promedio ponderado de H_o superó en 16,8% la H_e promedio. Los valores de H_o indican que es muy posible que las plantas ancestrales de los guaduales provengan de semilla sexual y que algunas de las guaduas actuales son de origen no clonal. El exceso de heterocigotos en los grupos geográficos y en siete de los nueve loci microsatélites evaluados (Cuadro 5) demuestra que hay factores que favorecen la polinización cruzada.

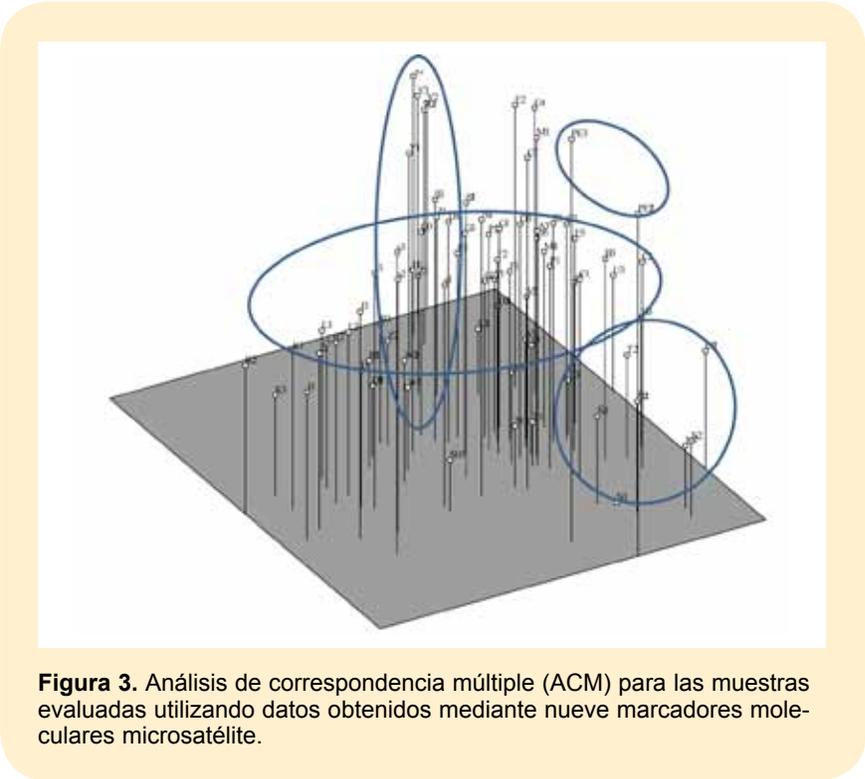


Figura 3. Análisis de correspondencia múltiple (ACM) para las muestras evaluadas utilizando datos obtenidos mediante nueve marcadores moleculares microsatélite.

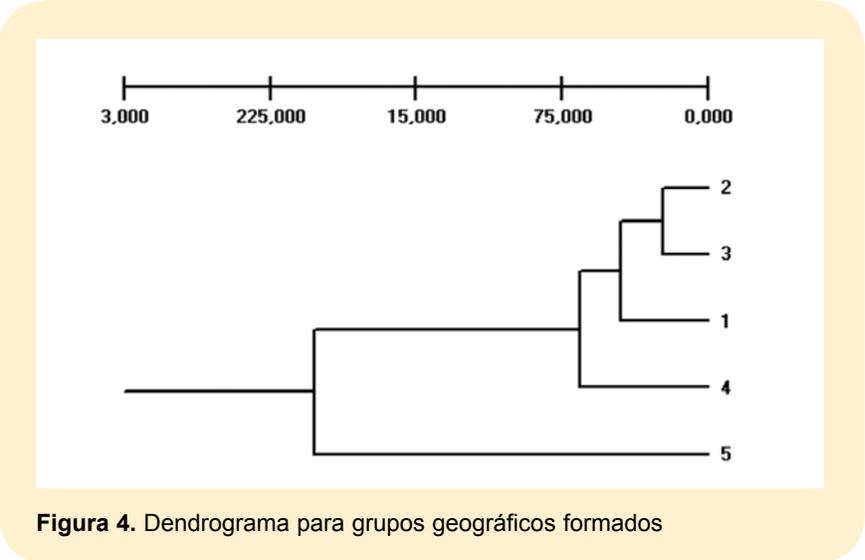


Figura 4. Dendrograma para grupos geográficos formados

La inflorescencia de *G. angustifolia* está formada por pseudoespiguillas multifloras con el androceo y gineceo dentro de un mismo flósculo (Londoño y Clark 2004). Sin embargo, cuando maduran, las anteras se salen del flósculo y se ubican por debajo de los estigmas. El exceso de heterocigotos parece indicar que existe auto-incompatibilidad en esta

especie; deben realizarse estudios más detallados para conocer con exactitud la causa o causas genéticas que la originan.

Conclusiones

G. angustifolia presentó alta diversidad genética en la región cafetera de Colombia lo que indica que la población tiene alta posibilidad de

Cuadro 5. Prueba de equilibrio por locus para marcadores microsatélites incluyendo los 30 sitios

Locus	Heterocigosidad observada	Heterocigosidad esperada	χ^2_e
1	53	43,60	4,273*
2	70	45,80	25,671**
3	41	32,95	5,489*
4	65	45,95	15,81**
5	9	13,00	11,061** μ
6	47	45,86	0,056 NS
07	79	45,56	49,564**
8	71	45,08	30,410**
9	78	45,91	44,934**

* $P(0,05 \leq \alpha \leq 0,001)$, ** $P(\alpha < 0,01)$, NS: $P(\alpha > 0,05)$, μ Desequilibrio a favor de los homocigotos.

tolerar cambios ambientales por su gran número de genotipos y cuenta con una base genética amplia para iniciar programas de mejoramiento.

La baja estructura poblacional indica que hay flujo genético entre grupos lo que podría explicarse por la producción de semillas, su disper-

sión y por el transporte de material vegetal por corrientes de agua.

La variación al interior de los guaduales y el exceso de heterocigotos pueden explicarse por la naturaleza alógama de la especie y la estructura de la flor que favorece la polinización cruzada, lo cual garantiza la heterocigosidad y explica en parte la supervivencia de la especie.

Agradecimientos

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por la financiación de esta investigación mediante el proyecto MADR2008M6336-3616 de la convocatoria Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación del 2008. A las doctoras Ana Cruz y Yacenia Morillo por sus valiosas contribuciones en la fase de laboratorio.

Literatura citada

- Camargo, JC. 2006. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth in the coffee region of Colombia. Tesis Doctorado. Gottingen, Alemania, Universidad de Gottingen. 205 p.
- Castaño, F; Moreno, RD. 2004. Guadua para todos: cultivo y aprovechamiento. Bogotá, DC. Colombia. 190 p.
- Dellaporta, SL; Wood, J; Hicks, JB. 1983. A plant DNA minipreparation: Versión II. Plan. Molec Biol Rep 14:19-21.
- Held, C.; Manzano, ID. 2004. El sector productivo y el mercado regional de la guadua en el eje cafetero colombiano. Beijing, China. 61 p. (Working Paper No. 51, International Network for Bamboo and Rattan).
- Joseph, JD; Anderson, R; Tatham, R; Black, W. 1992. Multivariate data analysis with readings. 3 ed. New York, USA, Prentice-Hall. 554 p.
- Londoño, X. 1991. Estudio botánico, ecológico, silvicultural y económico-industrial de las Bambusoideae de Colombia. Céspedesia 16-17 (59):51-78.
- Londoño, X. 2010. Identificación taxonómica de los bambúes de la región noroccidental del Perú. Lima, Perú, PerúBambú, Proyecto PD428/06 Rev.2 (F): Informe Final.
- Londoño, X; Clark, LG. 2004. Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del Nuevo Mundo. [III Congreso Colombiano de Botánica, Popayán, 7 al 12 de Noviembre de 2004]. Disponible en www.bambuaguadua.org
- Marulanda, ML; Márquez, P; Londoño, X. 2002. AFLP's analysis of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) in Colombia with emphasis in the Coffee Region. Bamboo, Science & Culture. J. Amer. Bamboo Sc.16 (1): 32-42.
- Marulanda, ML; López, AM; Claroz, JL. 2007. Analyzing the genetic diversity of *Guadua* spp. in Colombia using rice and sugarcane microsatellites. Crop Breeding and Applied Biotechnology. 7: 43 – 51
- Morales, D; Kleinn, C. 2004. Inventario de las existencias de *Guadua angustifolia* en el Eje Cafetero de Colombia. In Universidad Tecnológica de Pereira. Memorias Simposio Internacional Guadua, Septiembre 27-Octubre 2, 2004. Pereira, Colombia. p. 85-105.
- Moreno, RD. 2006. Lineamientos generales para la conformación y operación de núcleos forestales productivos para la guadua. Pereira, Colombia Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia, Programa Ambiental GTZ. 64 p.
- Muñoz, JE. 2011. Diversidad genética, estructura poblacional y selección de clones superiores de *Guadua angustifolia* Kunth en la ecoregión cafetera de Colombia. Tesis para optar al título de Doctor en Ciencias Agropecuarias. Palmira, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 151 p.
- Muñoz, JE; Morillo, CA; Morillo, CY. 2008. Microsatélites amplificados al azar (RAM) en estudios de diversidad genética vegetal. Acta Agron (Palmira) 57(4): 219-226.
- Nei, M. 1973. Analysis of genetic diversity in subdivided populations. Proc Nat Acad Sci USA 70: 3321-3326.
- Pérez-Galindo, P; Carlos-Andrés, C; González, G; Iván-Andrés, I; Cárdenas, H. 2009. Cloning and isolation of tetra nucleotide microsatellite clones from *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae). Molecular Ecology Resources 9(5):1375-1379.
- Raymond, M; Rousset, F. 1995. GenePop (version 1.2) population genetic software for exact tests and ecumenicism. Journal of Heredity 86: 248-249.
- Rugeles, PA. 2011. Genotipificación mediante marcadores moleculares RAMs (microsatélites amplificados al azar) y multiplicación de materiales superiores de *Guadua angustifolia* Kunth. Tesis para optar al título de Magister en Ciencias con énfasis en Recursos Filogenéticos. Palmira, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 140 p.
- Sambrook, J; Fritsch, EF; Maniatis, T. 1989. Molecular cloning: a laboratory manual. 2 ed. New York, USA, Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Torres, MK. 2008. Evaluación del polimorfismo de marcadores microsatélites en *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) para la caracterización molecular de las accesiones del Banco de Germoplasma de Bambusoideae del Jardín Botánico Juan María Céspedes de Tuluá. Trabajo de grado. Valle del Cauca, Colombia, Universidad del Valle. 63 p.
- Torres, L; López, DC; Palacio, JD; Duque, MC; Pérez-Galindo, CA; González-Vargas, A; Cárdenas-Henao, H. 2009. Evaluation of the polymorphic of microsatellites markers in *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae). [VIII World Bamboo Congress held in Bangkok, Tailandia del 16 al 18 de Septiembre de 2009. Proceedings]. p. 64 – 79
- Wright, S. 1931. Evolution in Mendelian populations. Genetics 16: 97-159.

Beneficios de los corredores ribereños de *Guadua angustifolia* en la protección de ambientes acuáticos en la Ecorregión Cafetera de Colombia.

1. Efectos sobre las propiedades del suelo

Juan Carlos Camargo¹;
Julián Chará²;
Lina Paola Giraldo Sánchez²;
Ana Marcela Chará-Serna²;
Gloria Ximena Pedraza²

Los bosques ribereños dominados por *Guadua angustifolia* en la cuenca baja del río La Vieja contribuyen de manera importante a la conservación de las propiedades hidrológicas de los suelos. Las funciones ecológicas asociadas a estos bosques y relacionadas con el movimiento, regulación y/o almacenamiento de agua se cumplen de manera apropiada y contribuyen a la funcionalidad de los guaduales a nivel del paisaje.



Foto: Julián Chará

¹ Profesor Universidad Tecnológica de Pereira. jupipe@utp.edu.co

² Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria. Carrera 25 6-62 Cali – Colombia. Julian.Chara@cipav.org.co

Resumen

En la Ecorregión Cafetera de Colombia es común que los cultivos y pasturas ocupen el área ribereña que debiera dedicarse a la protección de los ambientes acuáticos. No obstante, en muchos predios ganaderos se han conservado o recuperado bosques de *Guadua angustifolia* a lo largo de ríos y quebradas. Este trabajo evaluó el efecto de los bosques ribereños de *G. angustifolia* de la cuenca del río La Vieja sobre las propiedades físicas de los suelos, con el fin de determinar de qué manera estas propiedades podrían contribuir a la regulación del ciclo hidrológico y a mejorar la calidad del agua en los riachuelos o quebradas asociadas a estos bosques. Para ello, se hicieron comparaciones con zonas ribereñas sin protección dedicadas a la ganadería en las mismas cuencas. Los suelos bajo cubierta de *G. angustifolia* presentaron cifras significativamente más bajas en cuanto a compactación y densidad aparente, y mayores valores en porosidad y conductividad hidráulica que sus contrapartes en pasturas. En las zonas ribereñas con cobertura de guadua también es mejor la retención de agua en el suelo y la infiltración hacia capas profundas, lo que contribuye a la regulación y estabilidad del caudal de agua. Los suelos en zonas ribereñas dedicadas a la ganadería presentan características que tienden a afectar negativamente la regulación hídrica y tienen efectos negativos sobre los ambientes acuáticos adyacentes.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; pastizales; conservación de suelos; propiedades físico-químicas suelo; compactación del suelo; densidad del suelo; porosidad; propiedades hidráulicas del suelo; riberas; zona cafetera; Colombia.

Summary

Benefits of riparian corridors dominated by *Guadua angustifolia* on the protection of aquatic environments in the Coffee Region of Colombia. 1. Effects on soil properties.

In the coffee region of Colombia crops and pastures frequently occupy the riparian area that should be devoted to the protection of aquatic environments. However, due to cultural or biophysical factors, in many cattle farms, *Guadua angustifolia* forests have been preserved or recovered along creeks and rivers with benefits for these environments. In order to determine the mechanisms by which these beneficial effects take place locally, we compared physical properties of soils under guadua and pastures located in the riparian areas. Soils under guadua showed significantly lower compactness and apparent density values, and higher porosity and hydraulic conductivity. Soil properties under guadua promote an increased water retention and infiltration which contribute to the regulation and stability of aquatic environments. The characteristics of soils in pastures negatively affect water regulation and adjacent aquatic environments. In the Colombian coffee eco-region, pastures and crops are usually established along water bodies, seriously affecting both water quality and hydrological cycle regulation. Several cattle ranches have conserved or recovered *Guadua angustifolia* forests along rivers and creeks. This research was centered on the evaluation of *G. angustifolia* riparian forests in La Vieja watershed, Colombia. The soil physical properties were evaluated both under *G. angustifolia* and pasture covers, to determine how they influence water quality and the regulation of the hydrological cycle. Soils under guadua showed significantly lower compactness and apparent density values, and higher porosity and hydraulic conductivity values. Water retention and infiltration were also higher under guadua than under pastures, contributing to water flow regulation and stability. The characteristics of soils under pastures negatively affected water regulation and adjacent aquatic environments.

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; pastures; soil conservation; soil chemico-physical properties; soil compactation; soil density; porosity; soil hydraulic properties; riverbanks; coffee zone; Colombia.

Introducción

Desde la segunda mitad del siglo pasado, en Colombia se han dado grandes cambios en el uso y cobertura del suelo como parte de una política que promovió la deforestación al considerar que la tierra con bosques era improductiva (Lafaurie 2008). Como resultado de este proceso, grandes áreas boscosas fueron transformadas en potreros para la ganadería o la agricultura. En la zona cafetera de Colombia, buena parte de los bosques originales ubicados entre 1200 y 1800 msnm fueron reemplazados por cultivos de café. No obstante, diversos problemas asociados especialmente con el bajo precio del grano en el mercado internacional y a la aparición de plagas, hicieron que se abandonara el café y se pasara a otras actividades productivas. En la cuenca del río La Vieja, afluente del río Cauca, la mayor parte de las áreas de café fueron reemplazadas por pasturas para cría o engorde de ganado. Lamentablemente el manejo dado a estos sistemas ha generado problemas como la degradación de suelos y la pérdida de biodiversidad, así como el deterioro de los ambientes acuáticos de la zona (Pedraza et ál. 2008).

En la zona cafetera de Colombia, entre 900 y 2000 msnm predominan bosques altamente fragmentados (Camargo y Cardona 2005, Koim 2009) que, a pesar de su condición, cumplen funciones ecológicas importantes porque sirven de hábitat para una gran cantidad de especies vegetales (Calle y Piedrahita 2008, Ospina 2002) y de aves (Fajardo et ál. 2009). Estos fragmentos de bosque se ubican por lo general en áreas ribereñas (zona terrestre que rodea y protege ambientes acuáticos). Los bosques ribereños sirven como filtro de sedimentos, nutrientes o contaminantes provenientes de los ambientes terrestres intervenidos (Sparovek et ál. 2002, Coleman 2007); además, contribuyen a la

interacción entre los ambientes acuáticos (ríos y quebradas) y los terrestres. *Guadua angustifolia* Kunth es una de las especies predominantes en estos bosques (Méndez y Calle 2010).

Con este trabajo se pretende evaluar el efecto de los bosques ribereños de *Guadua angustifolia* en la cuenca del río La Vieja sobre las propiedades físicas de los suelos y determinar de qué manera estas propiedades podrían contribuir a la regulación del ciclo hidrológico y a mejorar la calidad del agua en los riachuelos o quebradas asociadas a estos bosques.

Área de estudio

El estudio se realizó en tres zonas ribereñas con condiciones ecológicas similares, localizadas en la cuenca baja del río La Vieja. Dos de las quebradas pertenecen al departamento del Quindío (municipio de Quimbaya, fincas La Ramada y La Floresta) y la otra, aunque cercana, está en jurisdicción del departamento del Valle del Cauca (municipio de Alcalá, finca La Rivera). Las quebradas se encuentran entre 1160 y 1200 m de altitud. La cobertura predominante en las fincas son las pasturas, aunque en todas ellas se han conservado fragmentos importantes de corredores ribereños dominados por guadua y se ha iniciado un proceso de reconversión ganadera mediante sistemas silvopastoriles y cercas vivas.

Métodos

Para el propósito de este trabajo, en cada una de las fincas se eligió un área con pasturas sin árboles contigua a un cauce y otra con bosque ribereño en el que predomina la especie de bambú *Guadua angustifolia*. Para evaluar las propiedades hidrológicas de los suelos se establecieron aleatoriamente cuatro parcelas de 10 m x 10 m dentro de cada cobertura.

Las propiedades hidrológicas se asociaron con las propiedades físicas de los suelos. Para el muestreo, cada parcela se dividió en cuatro cuadrantes, de los cuales se eligieron tres de forma aleatoria para tomar muestras de suelo. En la selección de las muestras (tres repeticiones por parcela y cuatro por cobertura) se trató de reducir la variabilidad normalmente asociada con cada una de las características evaluadas.

En tres puntos de cada cuadrante elegido para el muestreo se evaluó la compactación cada 5 cm hasta los 45 cm de profundidad, por medio de un penetrómetro Eijkelkemp SP1000. Además, en cada cuadrante se tomaron muestras con cilindros de 5 cm de longitud a distintas profundidades. Para la evaluación de la distribución de agregados y su estabilidad al agua se tomaron muestras disturbadas en bolsa.

Análisis estadístico

Debido a que la mayoría de las variables no siguen una distribución normal, se usó la prueba de Kruskal Wallis con el fin de determinar diferencias entre los suelos bajo las dos coberturas. Para el análisis de los datos se usó el *software* Statistica 8.

Resultados y discusión

Con el fin de facilitar la comparación entre las dos coberturas evaluadas (guadua y pasturas), los resultados se han agrupado según las fases del suelo: porosa, sólida y líquida o acuosa.

Propiedades asociadas con el espacio poroso

Dentro de esta categoría se incluyeron propiedades que representan la disponibilidad de espacio poroso en el suelo: densidad aparente, porosidad total y tamaño de los poros. La compactación y la susceptibilidad a la compactación fueron usadas como indicadores de la fase gaseosa del suelo.

La compactación, la densidad aparente y la porosidad total fueron significativamente distintas bajo las dos coberturas evaluadas ($p < 0,05$). La compactación del suelo entre 0-30 cm fue menor bajo la cobertura de bosque de guadua, lo cual se asocia con una menor densidad aparente y valores más altos de porosidad total bajo la misma cobertura ($p < 0,05$). Los valores de las variables muestran una tendencia coherente bajo ambas coberturas que varía con la profundidad (Fig. 1 y Fig. 2). Esto permite inferir que, bajo la cobertura de guaduales, exis-

ten mejores condiciones de espacio aéreo y de movilidad del agua y gases en el suelo, las cuales se ven afectadas negativamente en pasturas e implican una disminución promedio del 13% de la porosidad total en los primeros 30 cm.

Bajo la cobertura de guaduales, las condiciones se ven favorecidas también por una proporción significativamente mayor de macroporos ($p < 0,05$) que facilita la movilidad del agua. La susceptibilidad a la compactación -pérdida de capacidad porosa del suelo- fue mayor en los terrenos bajo pasturas. Los suelos

bajo cobertura de guaduales mostraron condiciones significativamente mejores y con mayor porosidad residual ($p < 0,05$) (Fig. 3). La cobertura boscosa en las áreas de pasto evaluadas había sido eliminada desde hace varias décadas, lo que seguramente tiene que ver con el deterioro de las condiciones del suelo, a pesar de que los suelos en esta zona de Colombia presentan excelentes condiciones y tienden a conservar ciertas características favorables aunque hayan sido sometidos a un uso intenso (Dossman 2009). De acuerdo con Martínez y Zinck (2004), los cam-

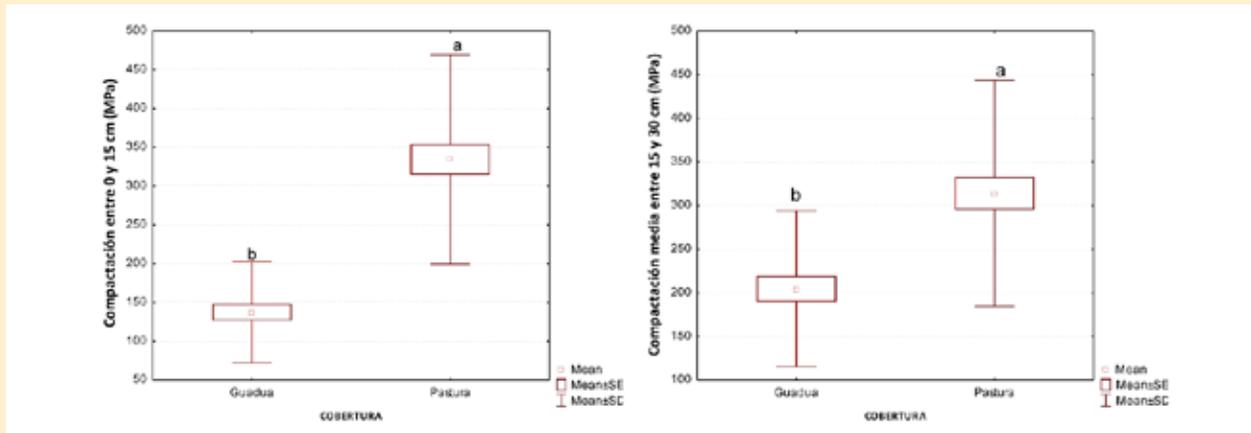


Figura 1. Compactación promedio (MPa) entre 0 y 15 cm y entre 15 y 30 cm de profundidad bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas. Las líneas verticales sobre las barras son el error estándar. Letras distintas son diferencias significativas ($p < 0,05$).

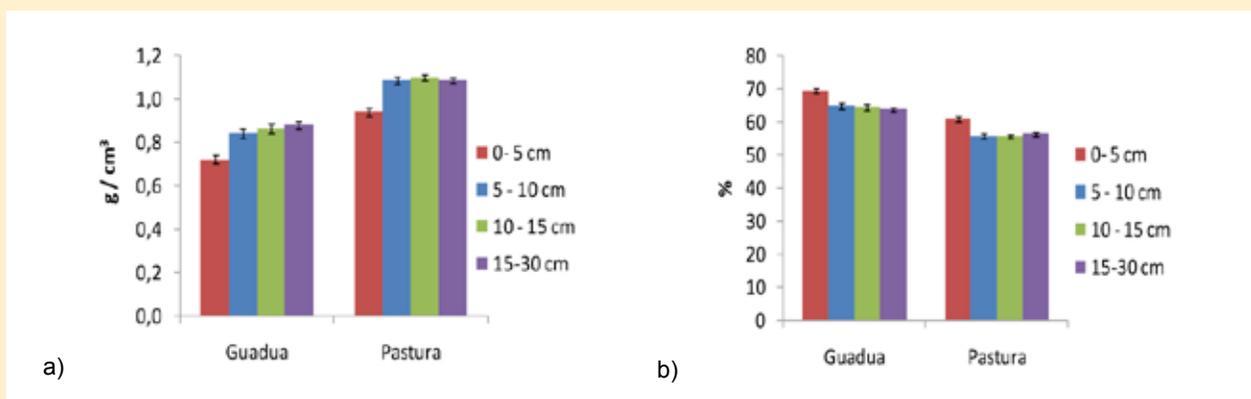


Figura 2. a) Densidad aparente (g/cm^3); b) Porosidad total (%) entre 0 y 30 cm bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas. Líneas verticales sobre las barras son el error estándar.

bios en las propiedades físicas de los suelos después del establecimiento de pasturas son evidentes, tienden a ser más drásticos con el tiempo y contrastan con las características presentadas bajo coberturas boscosas originales.

Propiedades asociadas a la fase sólida del suelo

La evaluación de las partículas por tamaño mostró una predominancia de arena (alrededor del 50%) y, en consecuencia, de texturas arenosas (Fig. 4) consistentes con la ubicación de los suelos muestreados en el área ribereña. Entre coberturas, la proporción de arena en los primeros 5 cm fue significativamente mayor bajo los bosques de guadua, mientras que la arcilla y el limo fueron significativamente más altos en las pasturas ($p < 0,05$).

En suelos con alto contenido de humedad (p.e. humedales), el proceso de compactación es menos intenso debido a que se requiere de mayor fuerza para comprimir el agua contenida entre los poros (Taboada 2003). Por esta razón es probable que el deterioro de la estructura del suelo bajo las pasturas no sea muy grande y que prevalearan agregados grandes y condiciones estables. No obstante, en este estudio se encontró una reducción significativa de la estabilidad estructural, lo cual es consistente con otros estudios que han evaluado suelos afectados por pisoteo del ganado (Usman 1993). De hecho, en los sitios donde los animales acceden a beber hay un deterioro mayor de propiedades hidráulicas, incluso con pastoreo de baja intensidad (Pietola et ál. 2005). De acuerdo con Mulholland y Fullen (1991), en suelos con texturas franco-arenosas (como las encontradas en los suelos evaluados aquí), se observa una alta susceptibilidad a la compactación y al deterioro de otras propiedades, como la estabilidad estructural.

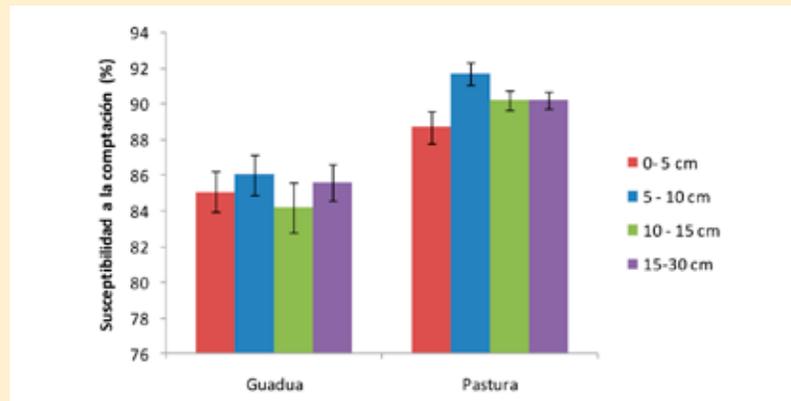


Figura 3. Susceptibilidad a la compactación del suelo entre 0 y 30 cm de profundidad bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas. Líneas verticales sobre las barras son el error estándar.

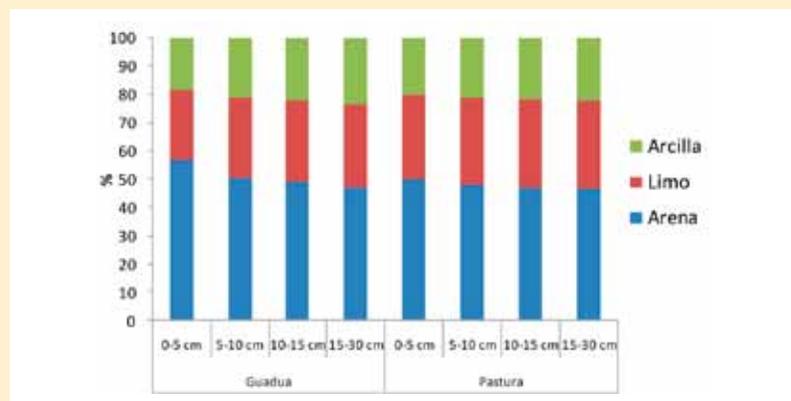


Figura 4. Distribución de partículas de acuerdo al tamaño (textura) en el suelo de 0 a 30 cm de profundidad bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas.

Propiedades asociadas a la fase acuosa del suelo

En esta fase se destacan las propiedades asociadas con la movilidad y el contenido de agua en el suelo, como la permeabilidad al aire, la conductividad hidráulica saturada y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Los valores de permeabilidad al aire -expresados para cada profundidad y diferentes valores de potencial hídrico del suelo (pF)-, así como los de conductividad hidráulica, muestran valores significativamente mayores en la cobertura de guadua ($p < 0,05$) (Fig.

5 y Fig. 6). Esto es consecuente con las variables descritas previamente, cuyos valores en términos de espacio poroso, textura y grado de agregación contribuyen con valores más altos de infiltración y permeabilidad del suelo. Ambas variables muestran una tendencia decreciente con la profundidad, aunque entre 10 y 15 cm, se presenta un leve incremento en la permeabilidad medida al pF más bajo. El decrecimiento de la conductividad hidráulica con la profundidad sigue un patrón de disminución suave, mientras que bajo pasturas decrece

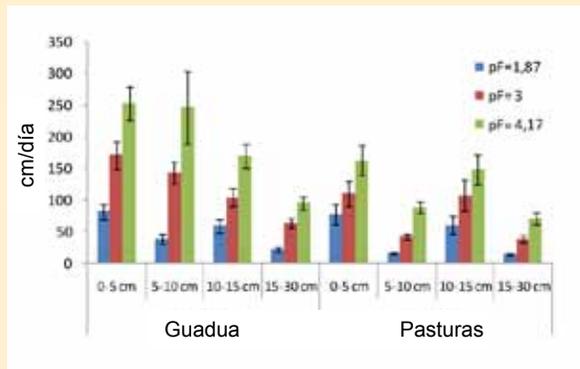


Figura 5. Permeabilidad del suelo (cm/día) de 0 a 30 cm de profundidad bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas. Las líneas verticales sobre las barras son el error estándar.

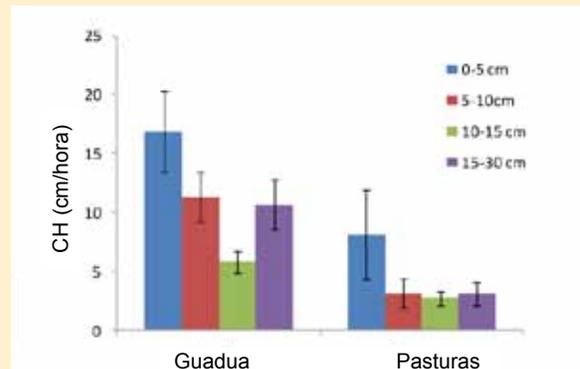


Figura 6. Conductividad hidráulica (cm/hora) de 0 a 30 cm de profundidad bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas. Las líneas verticales sobre las barras son el error estándar.

abruptamente después de los primeros 5 cm, lo cual evidencia un cierto grado de alteración en el suelo. Aunque los valores estimados de capacidad de almacenamiento del suelo no difieren considerablemente en proporción (Fig. 7), cuando se hacen comparaciones entre profundidades, el total estimado por hectárea a 0-30 cm es significativamente mayor bajo la cobertura de guadua ($p < 0,05$) (Fig. 8).

Estos resultados evidencian que bajo pasturas tanto el movimiento como el almacenamiento de agua en

el suelo se ven afectados negativamente debido al deterioro causado por el pisoteo del ganado, cuyo efecto sobre propiedades hidrológicas de los suelos ha sido bien documentado (p.e. Greenwood et ál. 1998). En este proceso de alteración, la porosidad total se reduce y, en consecuencia, se reduce también la tasa de infiltración (Chaichi et ál. 2005), aun con la existencia de macroporos (Usman 1993) y se acelera la degradación de varias propiedades del suelo (Warren et ál. 1986).

La porosidad total y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo bajo pasturas fueron menores en promedio: 13% y 5,4% respectivamente, pero la conductividad hidráulica fue 70% menor, a pesar de que bajo pasturas existe un porcentaje de macroporos de 10% en promedio.

Conclusiones

- Los bosques ribereños dominados por *Guadua angustifolia* en la cuenca baja del río La Vieja contribuyen de manera importante

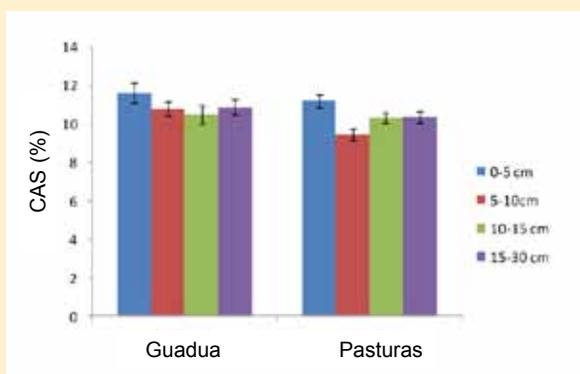


Figura 7. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (%) de 0 a 30 cm de profundidad bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas. Las líneas verticales sobre las barras son el error estándar.

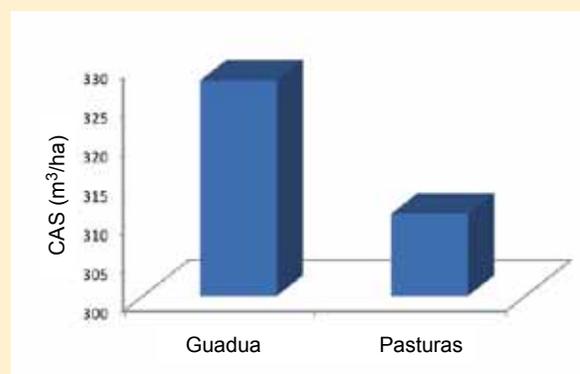


Figura 8. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (m³/ha) de 0 a 30 cm de profundidad bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas. Las líneas verticales sobre las barras son el error estándar.

a la conservación de las propiedades hidrológicas de los suelos. Las funciones ecológicas asociadas a estos bosques y relacionadas con el movimiento, regulación y/o almacenamiento de agua se cumplen de manera apropiada y contribuyen a la funcionalidad de los guaduales a nivel del paisaje.

- Cuando los bosques ribereños son sustituidos por pasturas para ganadería de tipo convencional (sin árboles y con agroquímicos), se dan cambios en las propiedades de los suelos, exacerbados por la concentración de animales en estas áreas donde los pastos son más suculentos y cercanos a las fuentes de agua.

En esta parte del país, los suelos presentan muy buenas características físicas que hacen que, en ocasiones, los cambios asociados a la ganadería pasen inadvertidos (especialmente por la unidad de medida que se emplea). No obstante, en las características físicas relacionadas con el movimiento de

agua en el suelo, las diferencias son considerables entre la cobertura boscosa y las pasturas. De igual manera, los cambios negativos en el suelo implican un deterioro importante de algunas funciones ecológicas, las cuales se van perdiendo a medida que los bosques ribereños van desapareciendo. ▶

Agradecimientos

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto “Determinación de la efectividad de corredores ribereños en la captura de contaminantes de la escorrentía en la zona cafetera colombiana” financiado por COLCIENCIAS y ejecutado por el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV). Agradecemos a los propietarios y trabajadores de las fincas La Ramada, La Floresta y La Rivera por el acceso a los predios y su colaboración durante el trabajo.

Literatura citada

- Calle, Z; Piedrahita, L. 2008. Conservación de flora amenazada en fincas ganaderas de la cuenca media del río La Vieja. *In* Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, JF. (Eds.). Ganadería del futuro; investigación para el desarrollo. Cali, Colombia, Fundación CIPAV. p. 148-169.
- Camargo, JC; Cardona, G. 2005. Análisis de fragmentos de bosque y guaduales. Pereira, Colombia, CIPAV-CATIE-BANCO MUNDIAL-GEF-LEAD. Proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas. 38 p.
- Chaichi, M; Saravi, M; Malekian, A. 2005. Effects of livestock trampling on soil physical properties and vegetation cover (Case study: Lar Rangeland, Iran). *International Journal of Agriculture and Biology* (6): 904-908.
- Coleman, J. 2007. Riparian buffers: the very best protection. *Habitat Herald Vol. XII: Issue 3*. http://www.loudounwildlife.org/PDF_Files/Vol_12_Issue_3.pdf
- Dossman, MA. 2009. Valoración de los servicios ecológicos prestados por el suelo bajo distintas coberturas naturales: Caso de estudio ecorregión del eje cafetero. Bogotá, Colombia, Pontificia Universidad Javeriana. 90 p.
- Fajardo, D; Johnston-González, R; Neira, L; Chará, J; Murgueitio, R. 2009. Influencia de los sistemas silvopastoriles en la diversidad de aves en la cuenca del río La Vieja, Colombia. *Revista Recursos Naturales y Ambiente* No. 58: 9-16.
- Greenwood, KL; MacLeod, DA; Scott, JM; Hutchinson, KJ. 1998. Changes to soil physical properties after grazing exclusion. *Soil Use and Management* 14(1): 19-24.
- Koim, N. 2009. Urban sprawl, land cover change and forest fragmentation: A case study of Pereira, Colombia. Master thesis. Berlin, Germany, Humboldt-Universität Zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät. 102 p.
- Lafaurie, JF. 2008. Ganadería del futuro: responsabilidad social y ambiental. *In* Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, JF. (Eds.). Ganadería del futuro; investigación para el desarrollo. Cali, Colombia, Fundación CIPAV. p. 13-17.
- Martínez, LJ; Zinck, JA. 2004. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil and Tillage Research* 75(1): 3-18.
- Méndez, LE; Calle, Z. 2010. Plantas de la cuenca media del río La Vieja. Cali, Colombia, CIPAV/CIEBREG. 236 p.
- Mulholland, B; Fullen, MA. 1991. Cattle trampling and soil compaction on loamy sands. *Soil Use and Management* 7(4): 189-193.
- Ospina, R. 2002. Factores que determinan las características florísticas estructurales de los fragmentos dominados por *Guadua angustifolia* Kunth en el eje cafetero colombiano y su relación con los aprovechamientos de Guadua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE.
- Pedraza, G; Giraldo, L; Chará, JD. 2008. Efecto de la restauración de corredores ribereños sobre las características bióticas y abióticas de quebradas en zonas ganaderas de la cuenca del río La Vieja, Colombia. *Zootecnia Tropical* 26: 1-4.
- Pietola, L; Horn, R; Yli-Halla, M. 2005. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil and Tillage Research* 82(1): 99-108.
- Sparovek, G; Lima, RS; Gassner, A; Clerice De Maria, I; Schnug, E; Ferreira Dos Santos, R; Joubert, A. 2002. A conceptual framework for the definition of the optimal width of riparian forest. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90: 169-175.
- Taboada, MA. 2003. Soil structural behaviour of flooded soils. Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires. http://users.ictp.it/~pub_off/lectures/lms018/40Taboada2.pdf.
- Usman, H. 1993. Cattle trampling and soil compaction effects on soil properties of a northeastern Nigerian sandy loam. *Arid Land Research and Management* 8(1): 69-75.
- Warren, SD; Thurow, TL; Blackburn, WH; Garza, NE. 1986. The influence of livestock trampling under intensive rotation grazing on soil hydrologic characteristics. *Journal of Range Management* 39(6): 491-495.

Beneficios de los corredores ribereños de *Guadua angustifolia* en la protección de ambientes acuáticos en la Ecorregión Cafetera de Colombia.

2. Efectos sobre la escorrentía y captura de nutrientes

Julián Chará¹;
Lina Paola Giraldo Sánchez¹;
Ana Marcela Chará-Serna¹;
Gloria Ximena Pedraza¹

Los corredores ribereños de guadua presentan características que contribuyen a disminuir de manera notable la escorrentía superficial con respecto a los sistemas sin corredor ribereño. Por consiguiente, cuando no existe protección ribereña se generan mayores crecientes durante los eventos lluviosos con el consecuente efecto sobre la calidad de agua, ya que a mayor escorrentía, mayor arrastre de sedimentos, materia orgánica y otros elementos.



Foto: Julián Chará.

¹ Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria. Carrera 25 6-62 Cali – Colombia. Julian.Chara@cipav.org.co

Resumen

En la región cafetera colombiana los remanentes boscosos dominados por *Guadua angustifolia* generalmente persisten en zonas ribereñas donde cumplen importantes funciones de protección. Con el fin de determinar los mecanismos que producen estos beneficios, se comparó la escorrentía superficial y la retención de nutrientes en guaduales y pasturas ubicadas en la ribera de una quebrada. La escorrentía superficial se midió como porcentaje de la precipitación en parcelas de escorrentía ubicadas en cada cobertura. La retención de nutrientes se evaluó comparando la concentración de nitratos en la escorrentía proveniente de microparcelas en eventos lluviosos antes y después de la aplicación de urea. La escorrentía superficial fue significativamente menor en guadua (2%) que en pasturas (30%) ($p=0,02$), mientras que la concentración de nitratos tuvo un incremento fuerte después de la fertilización en las pasturas para volver a niveles normales al final del experimento. Los resultados permiten concluir que los corredores de guadua son más efectivos que las pasturas en la retención de escorrentía y disminuyen el impacto de los fertilizantes nitrogenados. Es evidente, entonces, que los bosques ribereños reducen la entrada de nutrientes procedentes de las áreas agrícolas aledañas a los cuerpos de agua.

Palabras claves: Precipitación; parcelas de escorrentía; nitratos; vegetación ribereña; pasturas.

Summary

Benefits of riparian corridors dominated by *Guadua angustifolia* on the protection of aquatic environments in the Coffee Region of Colombia. 2. Effects on runoff and nutrient retention. In the Colombian coffee region, guadua (*Guadua angustifolia*) dominates riparian forest patches that perform important protection functions. In order to determine the mechanisms generating beneficial effects, superficial runoff and nutrient retention in both guadua patches and pastures located in the riparian area were analyzed. Superficial runoff was measured as a percentage of precipitation in runoff plots, while nutrient retention was determined by comparison of nitrate concentration in small runoff plots during rain events before and after fertilization with urea. Superficial runoff was significantly lower in guadua (2%) than pastures (30%) ($p=0.02$), and nitrate concentration highly increased after fertilization, but rapidly recovered pre-fertilization levels. Results demonstrated that guadua riparian corridors were more effective than pastures in retaining superficial runoff and reducing the impact of nitrogen fertilization.

Keywords: Rainfall; runoff plots; nitrates; riparian forest; pastures.

Introducción

En la región andina de Colombia, la ganadería es una de las actividades agropecuarias que mayores problemas ambientales causa debido a su forma de producción, que implica la desaparición de bosques naturales y la existencia de extensas áreas de pasturas degradadas. La elevada

tasa de deforestación tiene efectos locales, como la degradación de los suelos y la pérdida de productividad, y regionales, como la disminución de la capacidad de regulación hídrica y la contaminación de los ríos (Murgueitio e Ibrahim 2008). Estos cambios en el uso del suelo son considerados como una de las principales amenazas a la biodiver-

sidad (Hansen et ál. 2004, Calle y Piedrahita 2008). La intervención antrópica transforma el paisaje básicamente por medio de la agricultura, la deforestación y el pastoreo, actividades que rompen las relaciones estructurales y funcionales entre los elementos del paisaje y la estabilidad del ambiente acuático (Schlosser 1991). Las principales

influencias de la modificación del paisaje sobre las fuentes de agua son el incremento de la descarga de sedimentos y nutrientes a las quebradas (Allan y Johnson 1997) y la desregulación de las microcuencas (Etter y Wyngaarden 2000) debido a la pérdida de bosques.

En la región cafetera de Colombia es común encontrar relictos de bosques ribereños de *Guadua angustifolia*, los cuales han sido conservados o plantados para la protección de fuentes de agua y de terrenos con pendientes muy pronunciadas poco aptos para el uso agropecuario. Si bien es poco factible que áreas extensas de pasturas sean remplazadas por bosques, la conservación de los relictos de bosque ribereño y la inclusión de árboles en sistemas productivos son opciones que permiten un mejoramiento de las condiciones ambientales de los sistemas productivos (Chará y Murgueitio 2005). Los bosques ribereños son fundamentales para la protección de los riachuelos o quebradas pues contribuyen a la protección y estabilidad de los cauces (Chará et ál. 2007, 2008) y ayudan a la infiltración de la escorrentía y la retención de nutrientes, sedimentos y materia orgánica proveniente del área de captación de las microcuencas (Kondolf et ál. 2007; Richardson et ál. 2007). Por otra parte, los bosques de guadua tienen potencial para propiciar la conectividad entre parches de bosques (Arias et ál. 2008).

En términos hidrológicos, los bosques ribereños contribuyen a la regulación de caudales ya que la vegetación amortigua la caída de lluvias y absorbe parte de la precipitación en sus tallos y hojas (Van Dam 2003). La hojarasca aportada por los árboles y acumulada en el piso del bosque favorece la infiltración a capas más profundas del suelo y lo enriquece al aportarle materia orgánica y nutrientes (Chará 2004). Estos factores contribuyen a reducir

la escorrentía y la erosión (Rose et ál. 2002). Por el contrario, en los sistemas agrícolas y la ganadería tradicional se presenta mayor compactación del suelo, principalmente por el tránsito del ganado, con la consecuente disminución de las tasas de infiltración (Villanueva 2001). Cuando llueve se genera mayor escorrentía y erosión; en consecuencia, los sedimentos, nutrientes y otras partículas son arrastradas hasta las fuentes de agua más cercanas, lo que contribuye al deterioro de la calidad del agua y del ambiente acuático (Borin et ál. 2005).

La presente investigación se llevó a cabo con el fin de cuantificar el efecto de los bosques ribereños de *Guadua angustifolia* en la retención de escorrentía y nutrientes en un paisaje ganadero de la región cafetera colombiana. Con esto se busca comprender mejor su incidencia en la conservación de ambientes acuáticos en las condiciones locales y determinar los mecanismos a través de los cuales se genera dicha incidencia.

Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en una quebrada afluente del río La Vieja, la cual sirve de lindero entre las fincas La Ramada y El Ocaso, ubicadas en el municipio de Quimbaya, departamento del Quindío, a una altitud de 1200 msnm. Las fincas poseen pasturas mejoradas y sistemas silvopastoriles y en la mayoría de los predios se conservan los corredores ribereños. Dentro de cada finca se seleccionó un bosque ribereño de aproximadamente 20 metros de ancho, con pendiente entre 45 y 50%. La vegetación estaba dominada por la especie de bambú *Guadua angustifolia* y en menor proporción por árboles y arbustos nativos. El bosque presenta un grado mínimo de intervención: aprovechamiento cada dos o tres años de los culmos de guadua más maduros para usarlos en los sistemas productivos de

los predios. Esta área ribereña se comparó con otra inmediatamente aledaña, con pendiente de aproximadamente 50%, cubierta por pasturas mejoradas con predominio de pasto guinea (*Panicum maximum*) y en menor proporción de pasto estrella (*Cynodon* sp.), sometida a un sistema de rotación de 45 días para pastoreo de vacas de cría.

Variables evaluadas

Escorrentía superficial: para la medición de la escorrentía superficial, se establecieron tres parcelas de 5 x 10 m en sitios con pendiente similar en cada cobertura, según metodología adaptada por Ríos et ál. (2007) (Foto 1). Las parcelas se delimitaron con láminas de hierro galvanizado de 15 cm de alto reforzadas con estacas. En cada parcela se instaló un conducto de drenaje conectado por una manguera a dos recipientes colectores de 50 y 250 litros de capacidad. En medio de las parcelas se instaló una estación meteorológica para medir la cantidad e intensidad de las lluvias. Las mediciones de escorrentía y precipitación se realizaron para cada evento de lluvia entre los meses de marzo y octubre de 2010. Se utilizó un registro de campo y una regleta debidamente graduada para medir el nivel del agua dentro de los recipientes colectores. Después de cada medición, se evacuó el agua de los recipientes y se verificó que quedarán bien nivelados para la siguiente toma de datos.

Retención de nutrientes: para cuantificar la retención de nutrientes en cada tipo de cobertura, se instalaron tres transectos diagonales de pequeñas parcelas de escorrentía. Cada transecto incluyó cuatro microparcelas de 1 x 1 m, construidas con hierro galvanizado y abiertas en la parte superior. Cada parcela contó con un tubo de drenaje de 2" conectado a un recipiente colector de 20 litros debidamente protegido para evitar la entrada de agua distinta a la proveniente de la escorrentía. En

los transectos, las microparcels se instalaron en forma diagonal a una distancia de 2, 6, 10 y 15 m del cauce (fotos 2 y 3). En total se analizaron cinco muestras de agua de escorrentía por microparcelsa.

Para determinar la captura de nutrientes se hizo una aplicación de urea (equivalente a 200 kg/ha) en la parte alta de las parcelas y por fuera de los corredores ribereños, en un cuadrante de 15 m de ancho por 30 m de largo. La aplicación del fertilizante se realizó entre los muestreos uno y dos. La fertilización se hizo respetando un margen de 20 metros fuera de la quebrada, y sólo cubrió un área relativamente pequeña aledaña a los sitios en donde se instalaron las parcelas. En condiciones normales la fertilización se realiza en todo el potrero y prácticamente hasta la orilla del curso de agua con lo que se tiene un impacto más severo sobre el ambiente acuático (Davies y Parkyn 2001, Chará et ál. 2007). Para determinar la concentración de nitratos, en cada microparcelsa se tomó una muestra de agua de escorrentía antes de la aplicación de la urea y cuatro muestras posteriormente, después de eventos de lluvia ocurridos en la zona durante dos meses. Para la colecta de las muestras, se instalaron botellas limpias dentro de cada caneca antes de los eventos lluviosos. En cada evento lluvioso posterior a la aplicación de la urea se tomaron muestras que fueron rotuladas y enviadas debidamente refrigeradas al laboratorio para el análisis respectivo.

Análisis estadístico

Para determinar si hubo diferencias estadísticas entre las variables estudiadas en el corredor ribereño de guadua y en el potrero se aplicó la prueba de Mann Whitney debido a que los datos no se distribuyeron normalmente. Para el procesamiento de los datos se usó el programa InfoStat.



Foto 1. Parcela de escorrentía ubicada en pastura mejorada de la finca La Ramada, Quimbaya, Colombia

Foto: Grupo de Investigación GATA.



Foto 2. Microparcelsa para la retención de nutrientes en bosque ribereño de *G. angustifolia* en finca El Ocaso, Quimbaya, Colombia

Foto: Grupo de Investigación GATA.



Foto 3. Sección de microparcelas para la retención de nutrientes en finca La Ramada, Quimbaya, Colombia

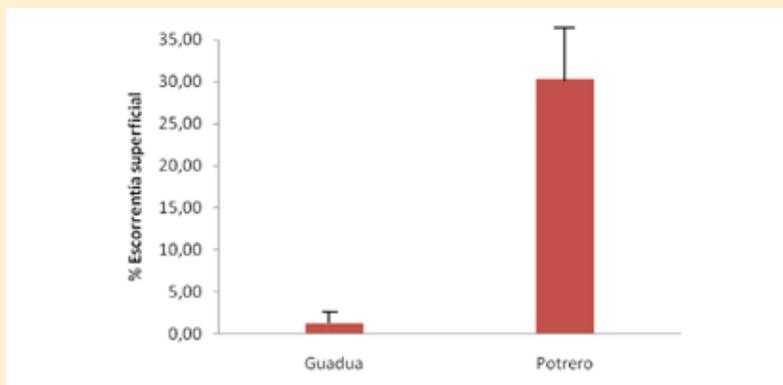


Figura 1. Escorrentía superficial promedio bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas. Las líneas sobre las barras corresponden al error estándar.

Resultados y discusión

Escorrentía superficial

Durante los siete meses del estudio se registró un total de 1278 mm de precipitación distribuidos en 26

eventos lluviosos. La máxima precipitación registrada fue de 104 mm y la mínima de 3,3 mm. En total, la cantidad de escorrentía colectada en las pasturas equivalió al 30% de la precipitación medida, en tanto

que bajo la cobertura de guadua fue de tan sólo el 2% ($p=0,02$) (Fig. 1). La Fig. 2 muestra la tendencia de la escorrentía registrada en los 26 eventos de lluvia bajo las dos coberturas evaluadas. Vale la pena anotar que en ocho eventos lluviosos leves (alrededor de 10 mm), la escorrentía en la zona de guadua fue nula, mientras en el potrero solo en dos de estos eventos no se presentó escorrentía. En un estudio en Costa Rica y Nicaragua, Ríos et ál. (2007) encontraron una tendencia similar con valores de escorrentía de 28-48% de la precipitación en pasturas, mientras que en sistemas con arbustos osciló entre 7-10%.

Los datos obtenidos confirman que en los suelos bajo guadua la infiltración del agua es mayor debido a que son suelos más porosos y con mejor conductividad hidráulica gracias a la acción de la vegetación, las raíces y la capa de hojarasca acumulada (Camargo et ál. en este mismo número de RRNA). Además, en los bosques de guadua el impacto de la lluvia y la cantidad que efectivamente cae al suelo son menores pues los tallos, hojas y ramas actúan como una barrera física importante (Chará et ál. 2008). En las pasturas, por el contrario, los suelos presentan mayor compactación y menor porosidad y conductividad hidráulica, lo cual hace que una menor porción de la precipitación se infiltre y una mayor porción fluya sobre la superficie en forma de escorrentía (Amézquita y Pinzón 1991, Sadeghian et ál. 1999).

Retención de nutrientes

No se encontraron diferencias significativas entre los dos usos del suelo evaluados en cuanto a la concentración de nitratos. En la Fig. 3 se muestra la tendencia en la concentración de nitratos a lo largo del experimento. En general, hubo mayor concentración bajo guadua (0,95 mg/L) que en el potrero (0,83 mg/L), aunque esta última cobertu-

ra presentó mayor variación en las concentraciones a lo largo del experimento. Bajo ambas coberturas se registró una disminución en la concentración promedio a lo largo del ensayo; sin embargo, en el muestreo 3 se pudo observar un mayor incremento de los nitratos en las pasturas, mientras que en las parcelas de guadua este incremento fue mucho más moderado. Posiblemente esto se debe a una mayor capacidad del complejo suelo-guadua para retener o procesar estos nutrientes. En los dos casos se encontró una concentración relativamente alta de nitratos, aún sin la aplicación de la urea (en promedio 0,86 mg/L en potrero y 1 mg/L en guadua).

Para los dos usos se evidenció una disminución en las concentraciones de nitratos en la parcela 4 (a dos metros de la quebrada) con respecto a las concentraciones encontradas cerca del sitio de fertilización, aunque hubo un leve incremento en la parcela 3 ubicada a seis metros de la quebrada (Fig. 4). Al parecer la vegetación más cercana al sitio de aplicación de la urea aprovechó rápidamente los nutrientes, por lo que la cantidad transportada por escorrentía fue poca.

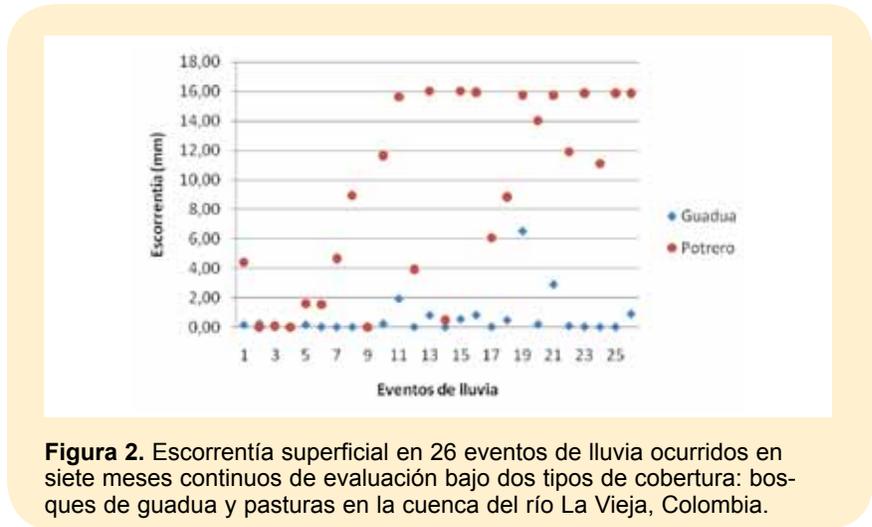


Figura 2. Escorrentía superficial en 26 eventos de lluvia ocurridos en siete meses continuos de evaluación bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas en la cuenca del río La Vieja, Colombia.

Aunque hubo una gran variabilidad en la concentración de nitratos entre parcelas después de aplicada la urea; en promedio, tal concentración disminuyó de 0,94 a 0,65 mg/L en los 15 m de ancho del corredor ribereño de guadua y de 1,03 a 0,7 mg/L en el corredor con pasturas en el mismo tramo (Fig. 4). En estudios realizados en otros países, se encontró una efectividad de remoción del 50 al 80% de nitratos en franjas de vegetación de 3 a 5 m de ancho (Simmons et ál. 1992), y de 60 a 80% de reducción del sedimento y de los

nutrientes en corredores de 7,7 m de ancho (Schmitt et ál. 1999). Estos ensayos, sin embargo, usaron dosis más altas y/o aplicadas en áreas más grandes que las del presente estudio. Por el contrario, Borin et ál. (2005) encontraron que la concentración de N (total, nitratos, amoniacal) aumentó al pasar por franjas de protección.

Conclusiones

Los corredores ribereños de guadua presentan características que contribuyen a disminuir de mane-

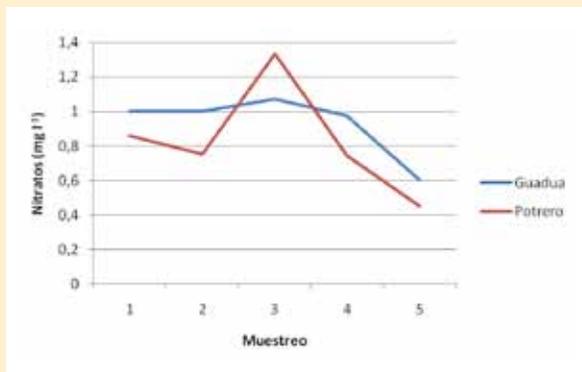


Figura 3. Dinámica de los nitratos en cinco fechas de muestreo en microparcels de escorrentía instaladas bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas en la cuenca del río La Vieja, Colombia (promedio de 4 microparcels por muestreo).

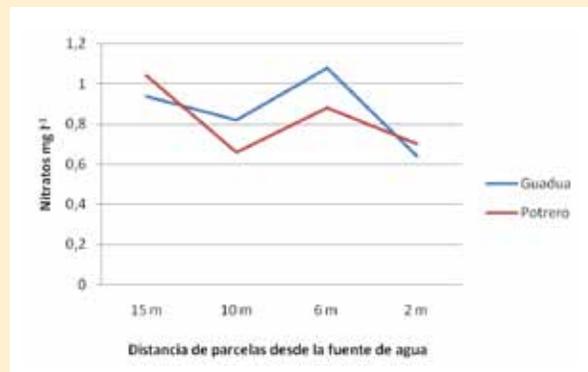


Figura 4. Nitratos en microparcels de escorrentía instaladas bajo dos tipos de cobertura: bosques de guadua y pasturas en la cuenca del río La Vieja, Colombia (promedio de cuatro muestreos).

ra notable la escorrentía superficial con respecto a los sistemas sin corredor ribereño. La cantidad de escorrentía en las áreas ribereñas sin pasturas puede ser hasta 15 veces más alta que en los corredores con guadua y, por consiguiente, cuando no existe protección ribereña se generan mayores crecientes durante los eventos lluviosos con el consecuente efecto sobre la calidad de agua, ya que a mayor escorrentía, mayor arrastre de sedimentos, materia orgánica y otros elementos.

Aunque no se presentaron diferencias significativas en la concentración de nitratos después de

la aplicación de la urea en las dos coberturas, el hecho de que la escorrentía sea menor en los corredores de guadua hace que la cantidad total de nutrientes que llegan a los riachuelos y ríos sea también menor, con lo que se beneficia el ambiente acuático y la calidad del agua. Es evidente, entonces, la necesidad de mantener la vegetación en la zona ribereña de los cuerpos de agua que surcan las fincas ganaderas o agrícolas y de restringir el acceso del ganado a los cursos de agua para la protección y recuperación de las funciones de estos importantes ambientes. 

Agradecimientos

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto "Determinación de la efectividad de corredores ribereños en la captura de contaminantes de la escorrentía en la zona cafetera Colombiana" financiado por COLCIENCIAS y ejecutado por el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria-CIPAV. Agradecemos a los propietarios y trabajadores de las fincas La Ramada y El Ocaso por el acceso a los predios y su colaboración durante el trabajo.

Literatura citada

- Allan, JD; Johnson, L. 1997. Catchment-scale analysis of aquatic ecosystems. *Freshwater Biology* 37: 107-111.
- Amézquita, E; Pinzón, A. 1991. Compactación de suelos por pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. *Pasturas Tropicales* 13: 21-26.
- Arias, L; Camargo J; Cardona, H. 2008. Carbono orgánico edáfico en rodales de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth, Poaceae) y en pasturas arborizadas en la zona cafetera de Colombia. In Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, JF. (Eds.). *Ganadería del futuro: investigación para el desarrollo*. Cali, Colombia, Fundación CIPAV. p. 245-261.
- Borin, M; Vianello, M; Morari, F; Zanin, G. 2005. Effectiveness of buffer strips in removing pollutants in runoff from a cultivated field in North-East Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105: 101-114.
- Calle, Z; Piedrahita, L. 2008. Conservación de la flora amenazada en fincas ganaderas de la cuenca media del río La Vieja. In Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, JF. (Eds.). *Ganadería del futuro: investigación para el desarrollo*. Cali, Colombia, Fundación CIPAV. p 147-169.
- Camargo, JC; Chará, J; Giraldo, L; Chará-Serna, A; Pedraza, G. 2011. Beneficios de los corredores ribereños de *Guadua angustifolia* en la protección de ambientes acuáticos en la Ecorregión Cafetera de Colombia. 1. Efecto sobre propiedades del suelo. *Recursos Naturales y Ambiente*. 61: 47-53.
- Chará, J. 2004. Manual de evaluación biológica de ambientes acuáticos en microcuencas ganaderas. 2 ed. Cali, Colombia, Fundación CIPAV.
- Chará, J; Murgueitio, E. 2005. The role of silvopastoral systems in the rehabilitation of Andean stream habitats. *Livestock Research for Rural Development* Vol. 17. <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd17/2/char17020.htm>
- Chará, J; Pedraza, G; Giraldo, L; Hincapié, D. 2007. Efecto de corredores ribereños sobre el estado de quebradas en la zona ganadera del río La Vieja, Colombia. *Revista Agroforestería de las Américas* 45: 72-78
- Chará, J; Pedraza, G; Giraldo, L. 2008. Corredores ribereños como herramienta de protección de ambientes acuáticos en zonas ganaderas. In Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, JF. (Eds.). *Ganadería del futuro: investigación para el desarrollo*. Cali, Colombia, Fundación CIPAV. p. 111-129.
- Davies-Colley, R; Parkyn, S. 2001. Effects of livestock on streams and potential benefits of riparian management: issues and options in the Auckland Region. Prepared by NIWA for Auckland Regional Council. 38 p. (ARC Technical Publication no. 351).
- Etter, A; van Wyngaarden, W. 2000. Patterns of landscape transformation in Colombia with emphasis in the Andean region. *Ambio* 29: 412-439.
- Hansen, A; Defries, R; Turner, W. 2004. Land use change and biodiversity: a synthesis of rates and consequences during the period of satellite imagery. *Land Change Science*. In Gutman, G; Justice, C. (Eds.) *Land Change Science: Observing, monitoring and understanding trajectories of change on the Earth's surface*. New York, EU, Springer Verlag. p. 277-299.
- Kondolf, G; Pie'gay, W; Landon, N. 2007. Changes in the riparian zone of the lower Eygues River, France, since 1830. *Landscape Ecology* 22: 367-384.
- Murgueitio, E; Ibrahim, M. 2008. Ganadería y medio ambiente en América Latina. In Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, JF. (Eds.). *Ganadería del futuro: investigación para el desarrollo*. Cali, Colombia, Fundación CIPAV. p. 19-39.
- Richardson, D; Holmes, P; Esler, K; Galatowitsch, S; Stromberg, J; Kirkman, P; Pysek, S; Hobbs, R. 2007. Riparian vegetation: degradation, alien plant invasions, and restoration prospects. *Diversity and Distributions* 13: 126-139.
- Ríos, N; Cárdenas, A; Andrade, H; Ibrahim, M; Jiménez, M; Sancho, F; Ramírez, E; Reyes, B; Woo, A. 2007. Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 45: 66-71.
- Rose, CW; Hogarth, W; Ghadiri, H; Parlange J; Okom, A. 2002. Overland flow to and through a segment of uniform resistance. *J. Hydrology* 255: 134-150.
- Sadeghian, S; Rivera, J; Gómez, M. 1999. Impacto de la ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. In Sánchez, M; Rosales, M. (Eds.). *Agroforestería para la producción animal en América Latina*. Roma, FAO. *Estudios de Producción y Sanidad Animal*.
- Schlosser, I. 1991. Stream fish ecology: a landscape perspective. *BioScience* 41: 704-712.
- Schmitt, TJ; Dosskey, M; Hoagland, K. 1999. Filter strip performance and processes for different vegetation, widths, and contaminants. *J. Environ. Qual.* 28: 1479-1489.
- Simmons, R; Gold, A; Groffman, A. 1992. Nitrate dynamics in riparian forest: groundwater studies. *J. Environ. Qual.* 21: 659-665.
- Van Dam, O. 2003. Eco-hydrological functions and threats of tropical rain forests at different spatial scale. In Zuidema, PA. (Ed.). *Tropical forests in multi-functional landscape*. Utrecht, The Netherlands, Prince Bernhard Centre for International Nature Conservation. p. 53-63.
- Villanueva, C. 2001. Ganadería y beneficios de los sistemas silvopastoriles en la cuenca alta del Río Virilla, San José, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 108 p.

Condiciones de calidad de *Guadua angustifolia* para satisfacer las necesidades del mercado en el Eje Cafetero de Colombia

Jorge Hugo García Sierra¹,
Juan Carlos Camargo García²

La producción de guadua en el Eje Cafetero y en Valle del Cauca puede abastecer de manera satisfactoria los requerimientos y exigencias de los diferentes segmentos del mercado evaluados en este estudio. Las variables de crecimiento evaluadas (diámetro a la altura pecho, volumen neto, volumen aparente, espesor de pared, longitud de canutos y longitud total y comercial) deben ser analizadas independientemente de las variables de calidad (dureza, humedad, densidad, curvatura y resistencia al corte y a la compresión), ya que los factores edafoclimáticos afectan positiva y negativamente sus características de tamaño y calidad.



Foto: Grupo de Investigación GATA.

¹ Director Jardín Botánico, Universidad Tecnológica de Pereira. Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. Facultad de Ciencias Ambientales. Administrador del Medio Ambiente. MSc. Investigación Operativa y Estadística

² Profesor Auxiliar, Universidad Tecnológica de Pereira. Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. Facultad de Ciencias Ambientales

Resumen

Guadua angustifolia es un recurso natural abundante en el Eje Cafetero colombiano y se encuentra presente en la gran mayoría de unidades de producción agropecuaria. La calidad de los productos derivados de la guadua depende directamente de la calidad de la pieza o tallo, la cual se relaciona a su vez con las condiciones del sitio en donde se encuentra el rodal. Por esta razón, es importante conocer las diferentes calidades de guadua existentes en el Eje Cafetero, así como las condiciones ambientales en que se desarrolla la especie y los segmentos de mercado que la emplean (constructores, artesanos, muebleros y laminadores). Con este estudio se caracterizaron las diferentes calidades de los guaduales presentes en el Eje Cafetero y en el norte del Valle del Cauca. Además, por medio de métodos estadísticos multivariados se definieron las condiciones óptimas para el desarrollo de las diferentes calidades de guadua y los segmentos de mercado que cada calidad puede servir.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; calidad de sitio; métodos estadísticos; mercados; Zona Cafetera; Colombia.

Summary

***Guadua angustifolia* quality conditions to cope with the market requirements in the Colombian coffee eco-region.** *Guadua angustifolia* is an abundant natural resource in the Colombian coffee eco-region; in fact, it can be found in most of the agricultural units. As raw material, guadua's quality directly relates to culm quality, which depends on site conditions. The different quality levels found within the coffee eco-region were analyzed, as well as the environmental conditions in sites where the species grows. Also, the market segments which employ guadua as raw material were examined; those segments are: building, plywood, crafts and furniture. The different quality levels of guadua in the coffee eco-region and North Valle del Cauca were assessed. Also, the optimal site conditions for quality level were determined by means of multivariate statistical methods, and finally, the quality level that best meets the needs of each market segment was determined.

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; site quality; statistical methods; markets; coffee zone; Colombia.

Introducción

Guadua angustifolia es la especie de bambú con mayores posibilidades económicas en el Eje Cafetero colombiano, ya que su utilización como materia prima para la industria y la construcción ayuda a disminuir costos. Por sus excelentes propiedades físico-mecánicas, resistencia al ataque de insectos, belleza escénica y, tal vez lo más importante, la diversidad de aplicaciones no igualadas por ninguna otra especie forestal, la guadua representa una valiosa alternativa económica que ha contribuido a mitigar la problemática social del área rural en el Eje Cafetero (Giraldo y Sabogal 1999).

Esta especie es un recurso natural abundante en la región (28.000 ha, según Kleinn y Morales 2006), presente en la mayoría de unidades de producción agropecuaria y conocida por los productores debido a los diversos usos tradicionales. Ante la crisis que el mercado cafetero enfrenta y los malos resultados con otros productos, la guadua se perfila como una importante opción económica para la zona, especialmente como elemento estructural en la construcción, la fabricación de muebles, las artesanías decorativas y objetos utilitarios y la fabricación de láminas y paneles para la elab-

boración de artículos con acabados similares a los obtenidos con maderas tradicionales. Sin embargo, este recurso no ha alcanzado la importancia que merece pese a los esfuerzos de diferentes entidades, tanto del sector público como privado. Aparte de la actividad artesanal, la comercialización de la guadua no ha tenido el impacto que se esperaba, sobre todo en el campo de la construcción, pues a pesar de sus excelentes cualidades físico-mecánicas, no se percibe un crecimiento vigoroso ni sostenido en la demanda por el recurso dentro de este sector económico (Ramírez 2010).

La calidad de los productos derivados de la guadua depende directamente de la calidad de la pieza. Según Camargo et ál. (2003), la calidad del producto se relaciona directamente con las condiciones del sitio en donde se encuentra el rodal. Sin embargo, tradicionalmente, la evaluación de la calidad se ha realizado por medios visuales, mediante criterios como color, diámetro, longitud, rectitud, tratamiento posterior, momento de corte (idealmente, se debe cortar en luna menguante), madurez y variedad (Held y Manzano 2002). Tales criterios no dan una idea precisa ni confiable de la calidad de la pieza. Según otros autores como Londoño (1989), Giraldo y Sabogal (1999), Hidalgo (2003) y Camargo et ál. (2007), las propiedades físicas, mecánicas y morfológicas de la especie se relacionan estrechamente con el sitio de procedencia. Tales propiedades determinan la capacidad de uso y transformación del producto en los mercados de la guadua.

En esta investigación se definieron diferentes calidades de guadua proveniente del Eje Cafetero, a partir de las condiciones ambientales en que se desarrolla la especie; además se determinaron los mercados para los que cada procedencia de guadua es adecuada. La zona de estudio se definió a partir de rodales de guadua ubicados en los departamentos de Risaralda, Quindío, Caldas y zona norte del Valle del Cauca, entre 900 y 2150 msnm, que es el rango altitudinal en el que se desarrolla la especie. El área total aproximada fue de 1.100.000 ha.

Diseño muestral

El diseño muestral fue sistemático en dos etapas. En la primera se establecieron de manera sistemática unidades primarias (con un área de 900 ha); luego, sobre fotografías aéreas se definieron las áreas con cobertura de guadua y se seleccionaron unidades de muestreo de manera aleato-

ria; finalmente, también de manera aleatoria se eligieron sitios para el establecimiento de parcelas temporales dentro de guaduales naturales y plantados. En la segunda etapa en 20 unidades se establecieron y evaluaron cinco parcelas de 10x10 m para un total de 100 parcelas.

Variables evaluadas por parcela

Como variables independientes se tomaron la precipitación media anual, temperatura media anual y brillo solar, obtenidas por medio de isoyectas, isotermas e isohelias respectivamente. La información se colectó con Arcview 3.2 en 18 estaciones climatológicas del Centro Nacional para la Investigación del Café (Cenicafé) ubicadas en la zona de estudio; se consideraron datos históricos de 15 años.

De cada parcela se obtuvieron datos de pendiente, posición en el relieve o geoforma (valle, ladera o cima), altitud y coordenadas. Además, se evaluaron las propiedades físicas de los suelos mediante dos

muestras a tres profundidades: 0-5 cm, 5-10 cm y 10-25 cm, recolectadas en tres puntos de la parcela (parte alta, media y baja). Para las muestras tomadas en cada punto se evaluaron los parámetros que se detallan en el Cuadro 1. Todas las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en Palmira. En nueve puntos de cada parcela se tomaron, además, muestras compuestas a dos profundidades (0-25 cm y 25-50 cm) para evaluar las propiedades químicas de los suelos (Cuadro 2). Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de Cenicafé.

Como variables dependientes se evaluó el dap medio (diámetro a la altura del pecho), el cual se obtuvo midiendo a 1,30 m de altura todos los tallos presentes en cada parcela; además se registró el estado de madurez y el estado fitosanitario de cada tallo. De entre todos los tallos maduros en la parcela se eligieron tres de forma aleatoria

Cuadro 1. Parámetros físicos evaluados en guaduales del eje cafetero colombiano

Parametro	Unidad	Método utilizado
Densidad aparente	g/cm ³	Método de cilindros
Densidad real	g/cm ³	Método de picnómetro
Porosidad total	%	(1-Da / Dr)*100
Conductividad hidráulica	Cm/hr	Permeámetro
Estabilidad estructural	%	Método de Yoder
Distribución de agregados	%	Tamices y mov. Shaker
Resistencia a penetración	k/m ²	Penetrómetro
Textura		Bouyoucos

Cuadro 2. Parámetros químicos evaluados en guaduales del eje cafetero colombiano

Parametro	Unidad	Método utilizado
Materia orgánica	me/100g	Colorimetría Walkley-Black
Potasio (K)	me/100g	Acetato de amonio
Calcio (Ca)	me/100g	Acetato de amonio
Magnesio (Mg)	me/100g	Acetato de amonio
Sodio (Na)	me/100g	Acetato de amonio
Aluminio (Al)	me/100g	KCl- IM EAA
Cap. intercambio catiónico (CIC)	Cmol/L	Acetato de Amonio 1N Ph 7,0
Fósforo (P)	ppm	Bray II
CIC efectiva	Cmol/L	(Ca+Mg+Na+K+Al)

para medir la resistencia al corte y a la compresión. Para ello, de cada culmo seleccionado se extrajeron muestras de los seis entrenudos de la mitad del tallo. Con tres muestras se estimó la resistencia al corte y con las otras tres, la compresión; en total, se evaluaron 303 muestras.

De los mismos tres tallos maduros por parcela se midieron la variables longitud total, longitud comercial, grosor de pared, longitud media de canutos y volumen de madera. Las tres primeras variables se midieron directamente en campo; el grosor de pared se midió en la parte inferior del culmo, en el primero y segundo corte realizado para obtener las muestras enviadas al laboratorio; en esas mismas secciones se midió también el diámetro. La longitud media de canutos se obtuvo en laboratorio, junto con los datos de resistencia a la compresión.

Una vez cortado cada tallo, se midió su longitud total y la distancia lineal (Z) desde la parte inferior hasta la punta de la guadua para hallar la curvatura de la longitud total y comercial, por medio de las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned} \text{Rectitud} &= \text{distancia } (Z) / \text{longitud} \\ \text{Curvatura} &= 1 - (Z / \text{longitud}); \\ \% \text{ curvatura} &= \text{curvatura} * 100 \end{aligned}$$

El volumen de madera se calculó a partir de los datos de longitud, grosor de pared y diámetros. Para ello se aplicaron las fórmulas del volumen total del cilindro, para obtener el volumen aparente, y volumen del cilindro externo e interno, para hallar el volumen neto. Puesto que los tallos de guadua no son completamente sólidos, también se estimó la densidad de la madera por medio de una muestra de un entrenudo tomado de la parte media de cada uno de los tallos cortados en las parcelas. Se extrajo un aro con un área $3,1 \text{ cm}^2$, al cual se le midió el volumen, el peso húmedo y el peso seco para obtener la densidad en g/cm^3 .

La dureza y la humedad de la madera se estimaron en campo en diez tallos maduros de la parcela elegidos al azar; las mediciones se tomaron a 1,30 m con tres repeticiones por culmo. Para medir la dureza se usó un durómetro marca Mitutoyo, que mide la dureza en unidades *short*. La humedad se midió con un higrómetro electrónico para maderas, marca Gann. Aunque para el análisis de la humedad no se tuvieron en cuenta covariables importantes, como la hora de la medición y edad de la guadua, este valor es siempre relevante y práctico ya que se analiza junto con un gran número de variables y por medio de métodos estadísticos multivariados, que aportan a la información general de cada sitio.

Definición de grupos homogéneos de calidad

Partiendo de la información obtenida de las parcelas temporales establecidas, se describieron en forma univariada los valores medios, máximos y mínimos por sitio de procedencia. Después de verificar la linealidad, colinealidad, aleatoriedad y homocedasticidad de los datos, se analizó la información de cada variable mediante métodos estadísticos multivariados.

Mediante un análisis de componentes principales (ACP), se buscó reducir la dimensionalidad de los datos y, a la vez, examinar la conveniencia del modelo factorial por medio de las pruebas de Bartlett, Kaiser-Meyer-Olkin, matriz anti-imagen, determinante de la matriz de correlaciones y la matriz reproducida. Los componentes seleccionados fueron insumo para crear, por medio de un análisis de conglomerados (AC), conjuntos homogéneos de diferentes calidades de guadua según los sitios muestreados.

A partir de esta clasificación, por medio de un análisis discriminante (AD) explicativo, se identificaron las variables clasificatorias o discrimi-

nantes (variables que diferencian las agrupaciones de calidad). Por medio de un AD predictivo se obtuvo un algoritmo o función discriminante por agrupamiento, el cual permite ubicar con cierto grado de certeza (con la información de las variables discriminantes), cualquier sitio en alguno de los grupos de calidad.

Para determinar los factores asociados a la variabilidad por sitio, se hicieron comparaciones con estadística descriptiva entre los grupos encontrados en el AC. Se compararon las variables climáticas (precipitación, temperatura, brillo solar), así como la altura, pendiente y posición en el relieve (valle, ladera, cima). Para las variables de suelo, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis que permite encontrar diferencias significativas entre grupos; no se empleó análisis de varianza ya que algunas de las variables de suelo no cumplían con los supuestos para realizarla.

Determinación de la calidad de guadua según segmento del mercado

Se realizó un muestreo estratificado, considerando las categorías típicas diferentes y homogéneas en cuanto a proceso y producto final. Los segmentos definidos fueron: construcción, artesanía, muebles, laminados. En cada segmento se efectuó una prueba piloto para determinar el tamaño ideal de muestra; en los segmentos de artesanos y constructores se hizo un muestreo aleatorio simple para elegir los elementos concretos que formaran parte de la muestra; en los segmentos de muebleros y laminados –por lo reducido de su tamaño– se optó por censar todas las empresas que se dedican a tales actividades en la zona de estudio. Todas las empresas incluidas en la muestra fueron entrevistadas para identificar sus necesidades en relación con la guadua y en cuanto a la calidad de las piezas utilizadas.

A partir de los grupos homogéneos de calidad, se realizó un análisis discriminante predictivo, tomando en cuenta las variables evaluadas en la entrevista personal (dureza de la guadua, diámetros, longitud de los canutos, humedad, espesor de pared, rectitud, longitud, compresión, resistencia al corte y volumen óptimo). A partir de los parámetros óptimos definidos por cada subsector, se determinaron las probabilidades de pertenencia a cada uno de los grupos de calidad previamente establecidos.

Los análisis estadísticos propuestos en esta metodología se realizaron con el *software* SPSS; la información se manejó por medio de las herramientas de Microsoft Office y la espacialización a través del *software* Arcview GIS 3.2.

Resultados y discusión

Calidad de la guadua en la zona de estudio

Los resultados de las variables morfométricas y físicas evaluadas (Cuadro 3) coinciden con lo reportado por otros autores para la región (Giraldo y Sabogal 1999, Stamm 2003); asimismo, las variables de resistencia están dentro de los rangos reportados por Silva y López (2000), la Universidad Nacional de Colombia (Takeuchi y González 2007) y el departamento de Ingeniería Agrícola Martín Mateus (Martín y Mateus 1981), para ensayos con probetas de *Guadua angustifolia*. Sin embargo, se encontró que el volumen neto promedio (volumen macizo de fibra o madera) en las parcelas fue de 0,05 m³ por culmo de guadua (10 guadas equivaldrían a 0,5 m³) y el volumen aparente medio (volumen cilíndrico) fue de 0,13 m³ (10 guadas equivaldrían a 1,3 m³). La Norma Unificada de Guadua (Proyecto Manejo... 2002) establece una equivalencia de 10 guadas por 1 m³. Como se ve, el valor hallado con el volumen cilíndrico se acer-

ca más al valor de referencia que el volumen total de madera. Esta información ha permitido corregir los términos de referencia para la formulación de planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guadales (Camargo et ál. 2008).

Definición de grupos homogéneos de calidad

Según el análisis de correlación, las variables diámetro, longitud total, longitud comercial, volumen neto, volumen aparente y espesor de pared mostraron correlación positiva, con coeficiente de Pearson superior a 0,57 y estadísticamente significativas ($P>0,01$). Igualmente, la longitud de canutos se correla-

cionó positivamente con la longitud total y comercial y con el volumen neto y aparente. En los demás casos, la significancia fue de $P>0,01$ y el coeficiente de Pearson inferior a 0,4. Entre estas correlaciones se destacan la resistencia al corte negativa con dap, longitud total, longitud comercial, volumen neto y espesor de pared; las relaciones fueron positivas entre dureza y resistencia a la compresión, resistencia a la compresión y densidad, y las curvaturas entre ellas (total y comercial).

Del análisis de componentes principales se seleccionaron tres que expresan el 67% de la variabilidad de los datos (Cuadro 4). El primero explica el 43% de la variabilidad

Cuadro 3. Valores de las variables evaluadas en guadales del eje cafetero colombiano

Variable	Media	Mínimo	Máximo
Dap (cm)	10,52	6,37	15,76
Longitud total (m)	20,38	12,68	26,8
Longitud comercial (m)	14,39	7,64	21,07
Curvatura total (%)	4	2	9
Curvatura comercial (%)	2	0	9
Volumen neto (m ³)	0,05	0,02	0,13
Volumen aparente (m ³)	0,13	0,05	0,3
Pared (cm)	1,58	1,1	2,34
Dureza (unid. short)	67,52	72,2	60,93
Humedad (%)	65,68	87,9	47
Resistencia a la compresión (mpa)	31,18	73,14	21,15
Resistencia al corte (mpa)	7,5	13,27	4,1
Densidad (g/cm ³)	0,67	0,81	0,36
Entrenudos (cm)	36,65	52,83	26,47

Cuadro 4. Varianza total explicada

Componentes	Autovalores iniciales		
	Total	% de varianza	Acumulado %
1	5,604	43,111	43,111
2	1,912	14,708	57,818
3	1,193	9,174	66,992
4	1,039	7,991	74,984
5	0,848	6,520	81,503
6	0,760	5,844	87,347
7	0,566	4,356	91,703
8	0,393	3,020	94,723
9	0,309	2,375	97,098
10	0,251	1,934	99,032

Método de extracción: ACP

y está definido por las variables: volumen neto y aparente, longitud total y comercial, diámetro, espesor de pared y longitud de entrenudos. El segundo componente explica el 14% de la variabilidad y lo definen las variables de dureza, resistencia a la compresión y densidad. El tercer componente expresa el 9,7% de la variabilidad y lo definen las variables humedad, curvatura total y resistencia al corte (Cuadro 5).

En el análisis de conglomerados (AC), los métodos que presentaron mejores resultados fueron la vinculación intergrupos y el método de Ward, así como las distancias de similitud del coseno y disimilitud de la distancia euclidiana al cuadrado. El método de vinculación intergrupos fue elegido por su ajuste gráfico, expresado en forma de dendrograma y agrupaciones en el espacio (Fig. 1). Se obtuvieron tres agrupa-

ciones bien diferenciadas, con 26, 36 y 39 sitios respectivamente (Fig. 2).

A partir del análisis discriminante se lograron dos funciones discriminantes que, según el estadístico Lambda de Wilks, aportarán información estadísticamente significativa al nivel 0,05 a la hora de clasificar los casos. La primera función explica un 59,7% de la varianza y es representada por variables de humedad, longitud de canutos y longitud total y comercial; la segunda explica un 40,3% de la variabilidad y es expresada por las variables de volumen (Cuadro 6). Sin embargo, se puede concluir que todas las variables utilizadas en el análisis fueron importantes a la hora de suministrar información para la obtención de las funciones. Con estas funciones se puede contar con un 93,1% de confiabilidad en la clasificación de nuevos sitios. El comportamiento de los grupos respecto a las variables canónicas se muestra en la Fig. 3.

Cuadro 5. Componentes principales (coeficientes)

Variables	Componentes		
	1	2	3
Dureza	-0,015	0,641	-0,464
Humedad	0,059	0,05	0,910
Compresión	0,017	0,840	0,252
Corte	-0,419	-0,466	0,017
Densidad	-0,169	0,531	-0,057
Entrenudos	0,688	0,122	0,093
Dap	0,859	-0,188	0,032
Longitud total	0,918	-0,051	-0,054
Longitud comercial	0,922	0,0094	-0,118
Curvatura total	-0,168	-0,358	0,337
Volumen neto	0,977	0,015	-0,031
Volumen aparente	0,950	-0,091	0,023
Pared	0,774	0,223	-0,033

Método de rotación: Normalización Varimax

Descripción de las agrupaciones
Con base en las agrupaciones logradas por medio del ACP, AC y AD, se obtuvo una descripción de las características de calidad para cada grupo

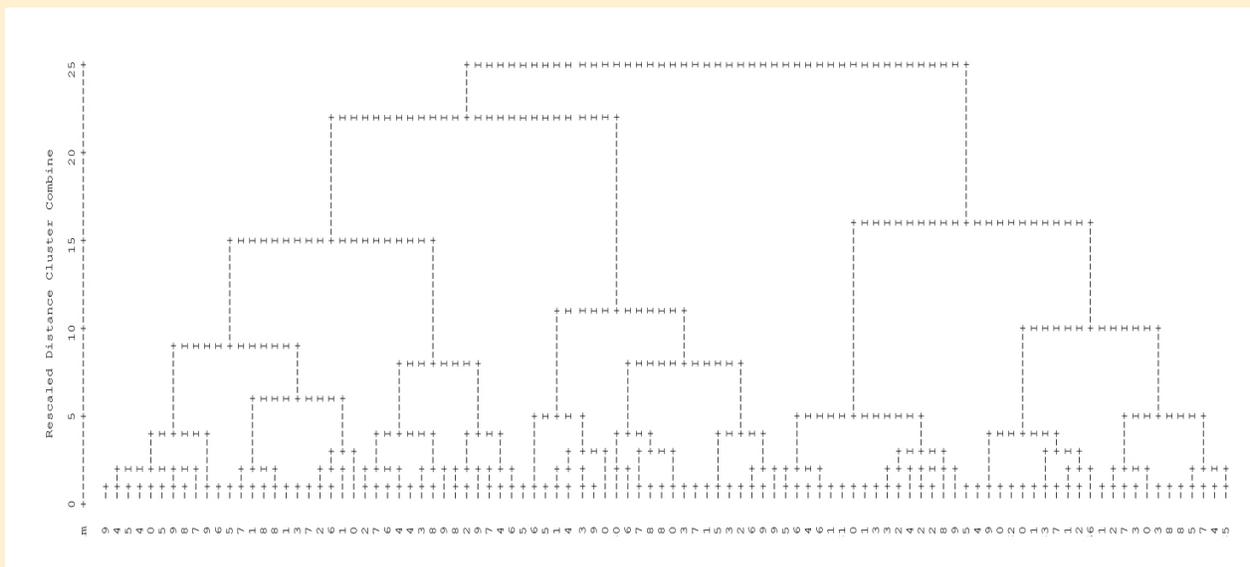


Figura 1. Dendrograma: método de vinculación intergrupos

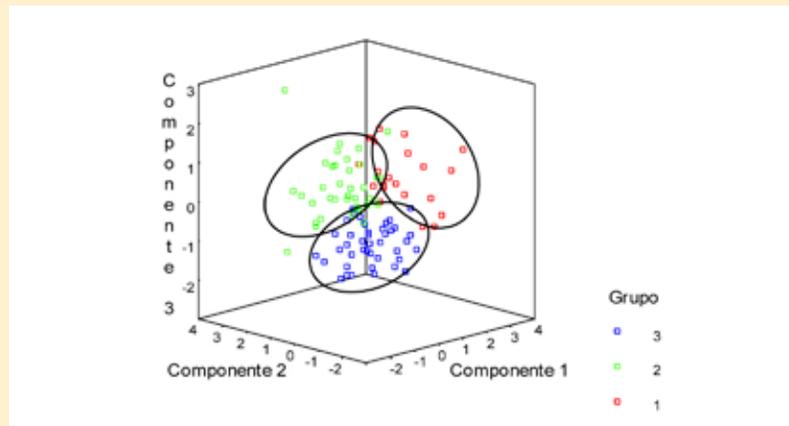


Figura 2. Agrupaciones obtenidas mediante el análisis de conglomerados.

Cuadro 6. Coeficientes estandarizados de las funciones discriminantes

Variable	Función	
	1	2
Dureza	0,004	0,010
Humedad	0,961	0,051
Compresión	0,154	-0,237
Corte	-0,127	-0,035
Densidad	0,160	-0,203
Entrenudos	0,366	0,255
Dap	-0,178	-0,107
Longitud total	-0,426	0,107
Longitud comercial	-0,601	0,342
Curvatura total	0,298	0,218
Volumen neto	0,369	-0,535
Volumen aparente	0,669	0,875
Pared	-0,412	0,394

de sitios (Cuadro 7). Las variables de suelo se analizaron según los resultados de la prueba de Kruskal Wallis (K-W). Las variables físicas densidad aparente, conductividad hidráulica, resistencia a la penetración y distribución de agregados, así como las variables químicas pH, potasio, sodio y aluminio mostraron diferencias significativas entre los cluster ($P < 0,05$). La adecuada diferenciación de los grupos permitió describir fácilmente las características ambientales para cada grupo.

Grupo 1.- Corresponde a sitios localizados a alturas mayores a los 1800 msnm. Es el de mejores características en cuanto a todas las variables que influyen en el tamaño de la guadua. Aquí se obtuvieron los mejores promedios en cuanto a dap (12,47 cm), longitud total (23,64 m), longitud comercial (17,26 m), volumen neto (0,08 m³), volumen aparente (0,21 m³), longitud de canutos (415,5 mm) y espesor de pared (1,75 cm). Las variables compresión (30,62 mpa), dureza (66,67 unid. short), humedad (73,37%), resistencia al corte (6,7 mpa) y densidad (0,64 g/cm³) tuvieron valores intermedios, en tanto que las demás variables mostraron los promedios más bajos. Estas características estuvieron presentes en el 59% de los

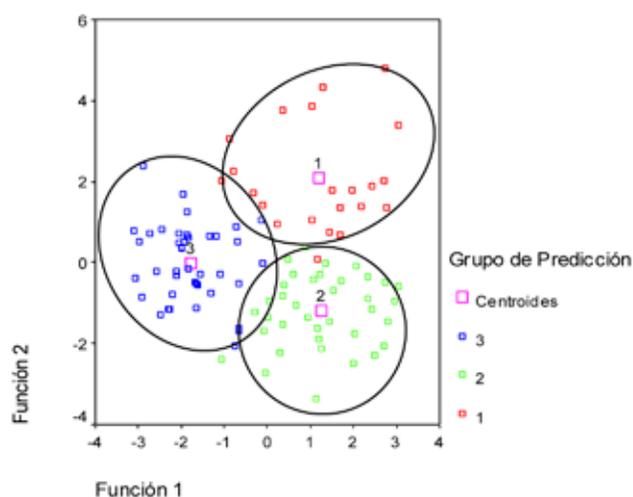


Figura 3. Comportamiento de los grupos respecto a las variables canónicas.

Cuadro 7. Características medias generales de las agrupaciones.

Variable	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Dureza (Unid.short)	66,67	67,26	68,22
Humedad (%)	73,37	71,53	56,14
Compresión (mpa)	30,62	33,18	29,63
Corte (mpa)	6,70	7,91	7,55
Densidad (g/cm ³)	0,64	0,68	0,67
Entrenudos (mm)	415,55	344,81	360,46
Dap (cm)	12,47	9,38	10,54
Longitud total (m)	23,64	18,01	20,84
Longitud comercial (m)	17,26	12,09	14,99
Curvatura total (%)	4,500	4,400	4,00
Volumen neto (m ³)	0,08	0,04	0,06
Volumen aparente (m ³)	0,21	0,10	0,14
Pared (cm)	1,75	1,46	1,60

rodiales de guadua localizados entre los 1200 y 1500 msnm, por lo general en valles con temperaturas entre 19,6 y 21,3°C.

Los suelos en este grupo arrojaron promedios bajos de densidad aparente a 5-10 cm de profundidad (0,87 vs. 0,98 g/cc), un alto porcentaje de distribución de agregados de 2,0-4,0 mm a una profundidad de 0-5cm (21,41 vs. 17,6 %) y un bajo porcentaje para los agregados menores a 0,125 mm a 0-10 cm de profundidad (1,81 vs. 2,21%). El pH tuvo un valor bajo (5,86 vs. 6,14 unid. pH), así como el contenido de potasio (0,078 vs. 0,130 me/100g); el contenido de aluminio fue mayor (0,16-0,072 vs. 0,04-0,009 me/10g). En todos los casos hubo diferencias significativas ($P>0,05$, K-W) con alguno de los otros dos grupos.

Grupo 2.- Corresponde a sitios localizados a alturas entre los 1200 y 1800 msnm. De los tres grupos evaluados, los guaduales presentes de este grupo tuvieron el mejor comportamiento en cuanto a las variables de resistencia mecánica (resistencia al corte 7,91 mpa y resistencia a la compresión 33,18 mpa) y densidad (0,68 g/cm³). Sin embargo, en relación con todas las variables que generan tamaño: dap (9,38 cm), longitud de canutos (344,81 mm), longitud total (18,01 m), longitud comercial (12,09 m), volumen neto (0,04 m³), volumen aparente (0,1 m³) y espesor de pared (1,46 cm), sus resultados fueron menos favorables. Las variables de dureza (67,26 mpa), humedad (71,53%) y curvatura total (4,4%) mostraron valores intermedios. Dichas particularidades son propias de guaduales ubicados en las zonas más bajas (900-1200 msnm) o más altas (1500-2150 msnm) de la zona de estudio; sobre todo en laderas (63%) y con temperaturas entre 17,5 y 21,6°C.

Los suelos en donde se ubican los guaduales de este grupo mostraron promedios altos de densidad

aparente en los primeros 10 cm de profundidad (0,94-0,98 vs. 0,81-0,87 g/cc), un bajo porcentaje de distribución de agregados de 2,0- 4,0 mm a 0-5 cm de profundidad (17,6 vs. 21,4%) y para los menores a 0,125 mm a los 10-15 cm de profundidad (2,28 vs. 3,96%). Estos suelos presentaron promedios bajos de aluminio (0,04-0,009 vs. 0,16-0,072 me/100g). En todos los casos hubo diferencias significativas ($P>0,05$, K-W) con alguno de los otros dos grupos.

Grupo 3.- Corresponde a sitios localizados a alturas entre 900 y 1200 msnm. De los tres grupos, este fue el que mostró mayor regularidad en los valores medios de las variables analizadas. Los mejores promedios se obtuvieron con las variables de dureza (68,22), humedad (56,14%) y curvatura total (4%); la resistencia al corte (7,55 mpa), densidad (0,67 g/cm³), longitud de canutos (360,46 mm), dap (10,54 cm), longitud total (20,84 m), longitud comercial (14,99 m), volumen neto (0,06 m³), volumen aparente (0,14 m³) y espesor de pared (1,60 cm) mostraron valores intermedios. La compresión tuvo el promedio más bajo de los tres grupos (29,63 mpa). Estas cualidades se evidenciaron en guaduales ubicados entre los 900 y 1500 msnm, en zonas con temperaturas entre 19,7 y 22 °C, con pendientes fuertes (58%).

Los suelos en este grupo mostraron una baja densidad aparente a 5-10 cm de profundidad (0,81 vs. 0,94 g/cc), con altos porcentajes de distribución de agregados menores a 0,125mm a 0-15cm de profundidad (3,66-4,03-3,96 %), un pH promedio alto (6,14 vs. 5,86 unid.pH) y un alto contenido de potasio (0,130 me/100g). En todos los casos hubo diferencias significativas ($P>0,05$, K-W) con alguno de los otros dos grupos.

Este agrupamiento permite afirmar que las características óptimas para el desarrollo de guaduales de primera calidad se dan en rodales

localizados entre los 1200 y 1500 msnm, en valles con temperaturas medias anuales entre 19,6 y 21,3°C y pendientes de hasta 10°. Una densidad aparente baja y un alto contenido de aluminio son las condiciones de suelo ideales.

Comúnmente, la guadua se ha manejado en rangos altitudinales mucho más amplios que los definidos con este estudio. Por ejemplo, Hidalgo (2003) menciona un intervalo de 1000-1600 msnm; Cruz (1994), Castaño (1981) y Giraldo y Sabogal (1999) hablan de 900-1600 msnm. Según Agudelo y Toro (1994), el mejor desarrollo de *Guadua angustifolia* se logra en sitios con altitudes comprendidas entre 1300 y 1500 msnm. Nuestros resultados permitieron confirmar que fuera del rango 1200-1500 msnm, las condiciones para el desarrollo de la especie son menos favorables.

En cuanto a las variables climáticas, los resultados obtenidos coinciden con los de Hidalgo (2003), Castaño (1981), Giraldo y Sabogal (1999), Agudelo y Toro (1994) y Cruz (1994). Igualmente, las variables de suelo evaluadas mostraron resultados similares a lo encontrado por Siavosh et ál. (1999), Giraldo y Sabogal (1999), Agudelo y Toro (1994) y Cruz (1994).

Determinación de la calidad de guadua según segmentos del mercado

La calidad de las piezas de guadua requeridas por los estratos de mercado definidos en esta investigación responde a una clara diferenciación, según las exigencias y necesidades de cada sector (Cuadro 8). Variables como dureza y curvatura o rectitud de la pieza son fundamentales para los constructores y la industria de laminados, quienes requieren mayor dureza y mayor rectitud en las piezas para un resultado óptimo. El diámetro y la longitud de canutos son básicos para los artesanos; la

longitud y el volumen de “madera” para los laminadores; el espesor de pared para los muebleros y laminadores; el contenido de humedad para los constructores y los artesanos. Los únicos que se preocupan por las características físico-mecánicas de las piezas de guadua son los constructores.

En general, se puede decir que el sector muebles es el menos exigente en cuanto a las características de las piezas; los artesanos son flexibles pero prefieren los tamaños mayores, y los constructores buscan características específicas en cada una de las variables, en especial en las variables físico-mecánicas y rectitud, en donde son muy rigurosos. El sector de laminados es estricto en cuanto a todas las variables relacionadas con el tamaño de la pieza; según Stamm (2003), la calidad de la guadua es vital para maximizar el aprovechamiento industrial y disminuir los costos de producción de láminas de guadua.

Mediante un análisis discriminante predictivo se obtuvieron dos funciones discriminantes que permitieron definir los grupos de calidades de guadua procedente del Eje Cafetero y norte del Valle del Cauca, con el fin de determinar las características ambientales ideales para cada grupo. Según los parámetros óptimos de cada subsector y las variables indagadas durante la entrevista personal, se hallaron las probabilidades de pertenencia a cada uno de los grupos previamente establecidos (Cuadro 9, Fig. 4). De esta manera se puede saber en cuál sitio se encuentra la materia prima que satisface en mayor medida las necesidades de cada subsector del mercado de la guadua y, lo más importante, conocer bajo qué condiciones ambientales crecen los rodales que reúnen esas características.

Cuadro 8. Datos promedio de las respuestas en cada subsector.

Variable	Artesanía	Muebles	Construcción	Laminados
Dureza (unid. short)	68,21	68,23	71,79	71,93
Diámetros (cm)	12,40	11,40	11,69	17,08
Entrenudos (cm)	39,10	31,22	31,43	42,57
Humedad (%)	70	76	47	80
Pared (cm)	1,55	1,71	1,65	1,79
Rectitud (%)	0,04	0,04	0,02	0,02
Volumen (m ³)	9	11	11	13
Corte (mpa)	*	*	Alta**	*
Compresión (mpa)	*	*	Alta**	*

* No toman en cuenta estas variables.

** Se asumen los valores más altos registrados en la zona de estudio: 13,27 mpa y 73,14 mpa respectivamente.

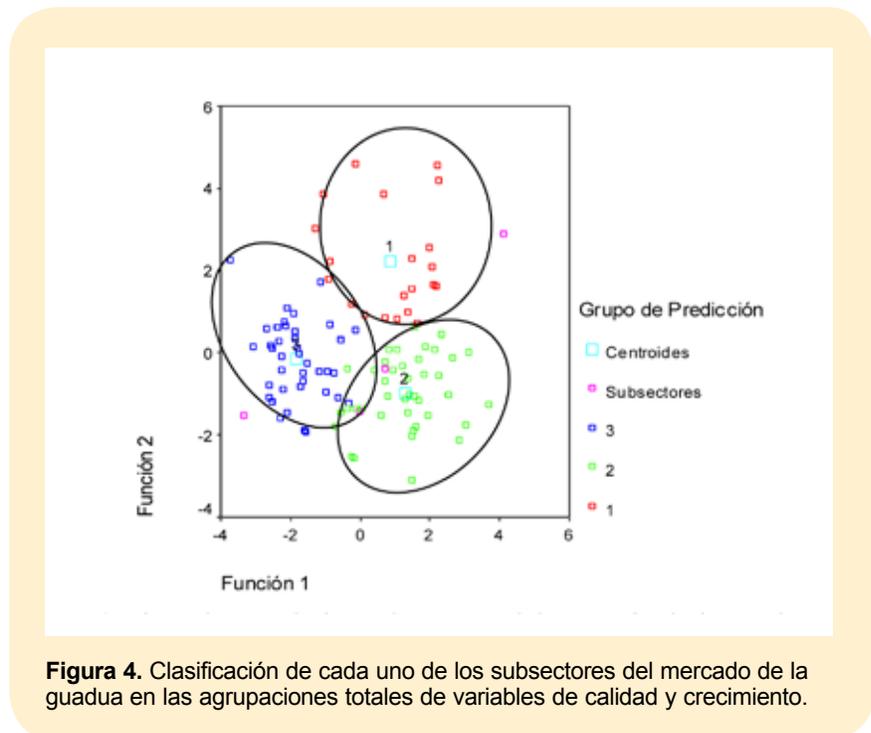


Figura 4. Clasificación de cada uno de los subsectores del mercado de la guadua en las agrupaciones totales de variables de calidad y crecimiento.

Cuadro 9. Probabilidad de pertenencia a cada uno de los grupo

Mercado	Probabilidad de pertenencia		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
	0,002	0,798	0,20
Artesanía	0,045	0,903	0,052
Muebles	0	0,001	0,999
Construcción	0,997	0,003	0

Conclusiones

La producción de guadua en el Eje Cafetero y en Valle del Cauca puede abastecer de manera satisfactoria los requerimientos y exigencias de los diferentes segmentos del mercado evaluados en este estudio. El mercado de muebles, por ser el menos exigente, puede utilizar cualquier tipo de piezas provenientes de cualquier zona productora. El sector artesanal, por su parte, si bien es bastante flexible en cuanto a sus preferencias, se inclina por tamaños mayores. En consecuencia, este sector se verá mejor abastecido con la producción de los Grupos 1 y 2. El sector construcción tiene exigencias claras en cuanto a la mayor parte de las variables evaluadas, pero sus requisitos

principales se relacionan con las variables físico-mecánicas y rectitud (Grupo 2). El mercado de laminados es muy estricto en cuanto a todas las variables que generen tamaño a la pieza de guadua; por ello, la materia prima proveniente de sitios con las características climáticas y edáficas identificadas como positivas para las variables de crecimiento es la preferida (Grupo 1).

Las variables de crecimiento evaluadas en rodales de *Guadua angustifolia* (diámetro a la altura pecho, volumen neto, volumen aparente, espesor de pared, longitud de canutos y longitud total y comercial) deben ser analizadas independientemente de las variables de calidad (dureza, humedad, densidad, cur-

vatura y resistencia al corte y a la compresión), ya que los factores edafoclimáticos afectan positiva y negativamente sus características de tamaño y calidad. 

Agradecimientos

Agradecemos al proyecto Manejo Sostenible de la Guadua en Colombia y Costa Rica, apoyado económicamente por la Unión Europea, la Universidad Tecnológica de Pereira y COLCIENCIAS. Al Grupo de Investigación en Agroecosistemas Tropicales Andinos de la Facultad de Ciencias Ambientales de la misma universidad y a la Agencia Alemana al Desarrollo GTZ por su apoyo logístico. Al Jardín Botánico UTP y su Grupo de Investigación.

Literatura citada

- Agudelo, B; Toro, I. 1994. Evaluación del desarrollo de los bosques de *Guadua angustifolia* en la zona de jurisdicción de la C.V.C, bajo diferentes condiciones de sitio, con fines de reforestación. Tesis Ing. For. Ibagué, Colombia, Universidad de Tolima. 168 p.
- Camargo, JC; García, JH; Dossman, M; Arias, L. 2007. Zonificación detallada del recurso guadua en el Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca. Pereira, Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, CARDER - CVC - CORTOLIMA - CRQ - UTP.
- Camargo, JC; Morales, T; García, JH. 2003. Sistemas agroforestales con Guadua (*Guadua angustifolia* Kunth): Una alternativa para promover la reforestación con Guadua en el Eje Cafetero de Colombia. VI Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Sic Editorial Ltda. p. 236 – 242.
- Camargo, JC; Morales, T; García, JH. 2008. Términos de referencia para la formulación de planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guaduales. Proyecto Bosques FLEGT/Colombia. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. 70 p.
- Castaño, F. 1981. Aspectos sobre el cultivo y el manejo de la bambusa guadua en Colombia. Primer simposio latinoamericano del bambú realizado en Manizales, Colombia, 2-8 de agosto 1981. 53 p.
- Cruz, H. 1994. La guadua nuestro bambú. Armenia, Quindío, Colombia. Corporación Autónoma Regional del Quindío y Centro Nacional para el Estudio del Bambú y la Guadua. 293 p.
- Giraldo, E; Sabogal, A. 1999. Una alternativa sostenible: la guadua. Armenia, Quindío, Corporación Autónoma Regional del Quindío. 192 p.
- Held, C; Manzano, I. 2002. Investigaciones sobre el manejo y mercadeo sostenible de bambú en Colombia y Costa Rica. Informe preliminar sobre los resultados del análisis de la cadena productiva de la guadua. Pereira, Colombia. Universidad de Freiburg -Universidad Tecnológica de Pereira.
- Hidalgo, O. 2003. Bamboo, the gift of the gods. Minnesota, EU, University of Minnesota. 553 p.
- Kleinn, C; Morales, D. 2006. An inventory of guadua (*Guadua angustifolia*) bamboo in the coffee region of Colombia. European Journal of Forest Research 125(4): 361-368.
- Londoño, X. 1989. Una nueva variedad de *Guadua angustifolia* Kunth de Colombia. Revista Academia Colombiana de Ciencias 17(65): 379-381.
- Martín J; Mateus, L. 1981. Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la Guadua castilla. Tesis Ing. Agrícola. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia.
- Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia. 2002. Norma Unificada en Guadua: reglamentación para el manejo, aprovechamiento y establecimiento de guadua, caña brava y bambúes. Convenio 021-2001 entre la Universidad Tecnológica de Pereira y CARDER. 16 p.
- Ramírez, JC. 2010. Caracterización del mercado de la sabana de Bogotá y Costa Atlántica para el acceso de productos de guadua de la región del eje cafetero. Corporación Autónoma Regional de Risaralda – Carder.
- Siyavosh, S; Rivera, J; Gómez, M. 1999. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de los suelos de los Andes de Colombia. Conferencia electrónica de la FAO sobre “Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica”. Disponible en <http://www.fao.org/ag/aga/agap/FRG/AGROFOR1/Siyavosh6.htm>
- Silva, M; López, L. 2000. Comportamiento sismorresistente de estructuras en bahareque. Manizales, Colombia, Universidad Nacional de Manizales.
- Stamm, J. 2003. Proyecto latas y laminados de guadua. Pereira, Colombia, Proyecto Universidad Tecnológica de Pereira – Agencia Alemana al Desarrollo GTZ. 33 p.
- Takeuchi, TCP; González, C. 2007. Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua Angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. Ingeniería y Universidad 11(1):89 – 103.

Bosques de guadua del Eje Cafetero de Colombia: oportunidades para su inclusión en el mercado voluntario de carbono y en el Programa REDD+

Ángela María Arango Arango¹;
Juan Carlos Camargo²

Los bosques naturales de guadua bien pudieran ser considerados dentro de una iniciativa REDD+. No obstante, la justificación para un tal proyecto no parte de la fuerte deforestación que sufren, sino de la presión causada por la expansión urbana, los altos índices de fragmentación y las malas prácticas que conllevan a su degradación.

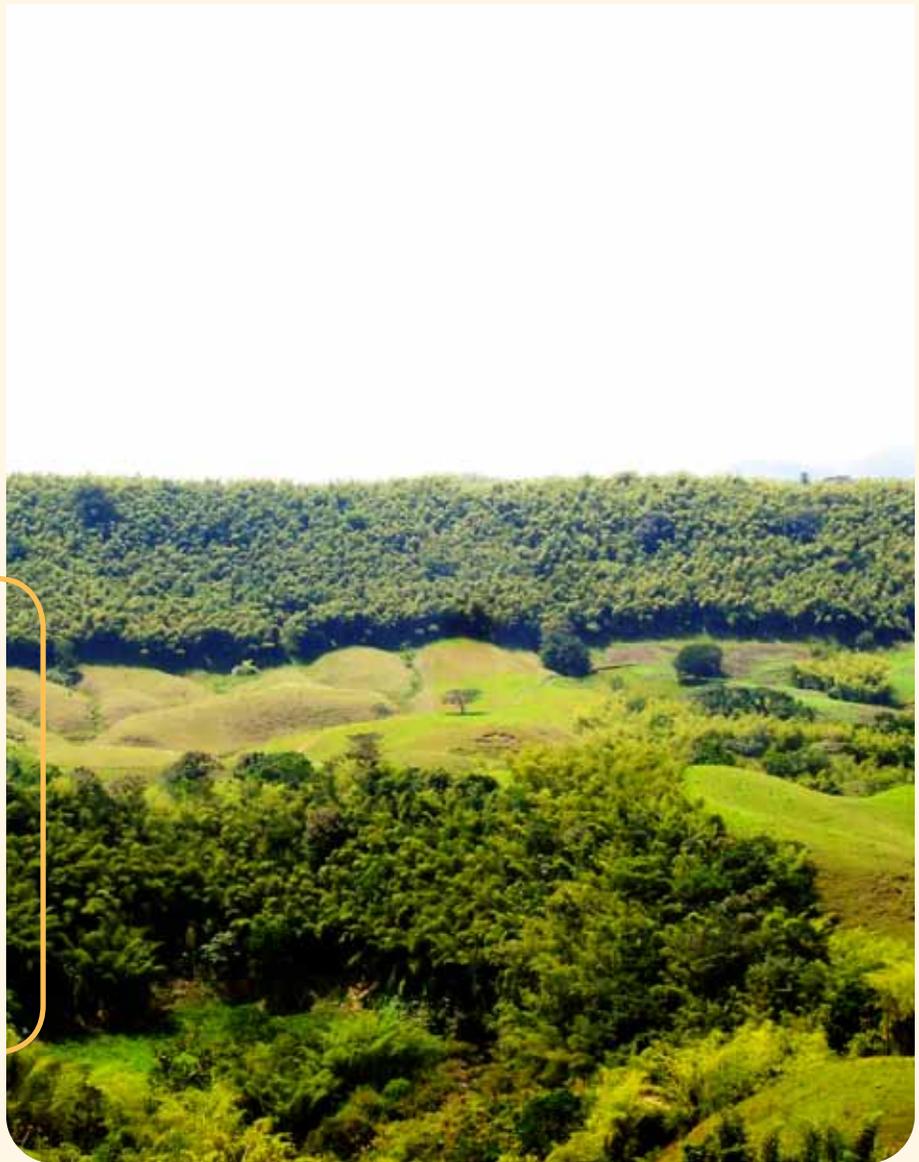


Foto: Grupo de Investigación GATA.

¹ Administradora Ambiental. Investigadora. Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos, Universidad Tecnológica de Pereira. amarango@utp.edu.co

² Profesor, Universidad Tecnológica de Pereira. jupipe@utp.edu.co

Resumen

Los bosques de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) localizados en la región del Eje Cafetero de Colombia, entre los 900 y los 2000 msnm, cumplen funciones ecológicas importantes como la protección del suelo, refugio para la biodiversidad y secuestro de carbono. Tradicionalmente, estos bosques han significado una fuente de ingresos monetarios para los productores rurales por la venta de culmos en el mercado local e internacional, así como una fuente de materia prima para uso doméstico. Con el propósito de definir oportunidades para acceder a incentivos relacionados con la mitigación del cambio climático, con este estudio se ha tratado de estimar el potencial de los bosques de guadua para el almacenamiento de carbono, así como la factibilidad de incluir las plantaciones en esquemas de mercado voluntario y los bosques naturales en la iniciativa REDD+. Se encontró que, en promedio, los bosques de guadua almacenan hasta 126±4 t/ha, lo que significa una buena posibilidad de aplicación de la iniciativa REDD+. No obstante, para algunos de los requerimientos evaluados se debe generar información más precisa que permita ajustarse a la iniciativa. En cuanto a los mercados voluntarios de carbono se encontró que, a pesar de que los criterios de elegibilidad pueden alcanzarse en las plantaciones evaluadas, es necesario profundizar en algunos aspectos específicos como dinámica, monitoreo y posibilidades en comparación con otros tipos de coberturas boscosas, ya que si bien los guaduales son ecosistemas boscosos, las especies de bambú no son árboles y, por lo tanto, se comportan de manera distinta.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; bosques; zonificación; mitigación; cambio climático; mecanismos de desarrollo limpio; mercados; zona cafetalera; Colombia.

Summary

Guadua forests in the Colombian coffee region: capabilities for voluntary carbon markets and the REDD+ initiative. *Guadua angustifolia* is a woody bamboo that represents an important natural resource in Colombia and particularly in the coffee region where it can be found between 900 and 2000 masl. These forests play an important role in terms of ecological functions such as soil protection, refuge of biodiversity and carbon sequestration. Additionally, these forests have provided rural communities with incomes for the sale of culms in the national and international markets, as well as raw material for domestic use. In order to elucidate opportunities for including guadua bamboo forests within carbon market or climate change mitigation programs, the potential of carbon storing was estimated, and assessed the feasibility for guadua plantations to apply to carbon voluntary market schemes and for natural guadua forests to apply to REDD+ initiatives. It was found that bamboo forests store 126±4 t/ha in average; this means that good conditions are met for REDD+ initiatives. However, some specific requirements should be well supported with proper and credible information. Regarding carbon voluntary markets, it was found that although the criteria of eligibility can be fulfilled, it is still required to improve information on bamboo forests, their dynamics and monitoring. Also, a comparison with other forest covers should be established considering some additional criteria, as bamboos are real forest ecosystems but they are not trees.

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; forests; zoning; mitigation; climate change; clean development mechanism; markets; coffee zone; Colombia.

Introducción

A rededor del mundo existen aproximadamente 20 millones de hectáreas cubiertas por bambú (Zhou et ál. 1994). Cerca de 1200 especies han sido registradas en todo el mundo (Londoño 1990), 440 de ellas en América (Hidalgo 2003) y 95 en Colombia (Londoño 1990). *Guadua angustifolia* Kunth es la especie de bambú más utilizada en la región del Eje Cafetero Colombiano, tanto para aplicaciones domésticas desde hace ya varias décadas como industriales en los últimos años. A pesar de su alto grado de fragmentación, los guaduales colombianos proveen servicios ecosistémicos como hábitat para distintos organismos y protección del suelo (Camargo y Cardona 2005, CIEBREG 2008, Calle y Piedrahita 2008, Fajardo et ál. 2008, Ospina 2002, Rodríguez 2011, Camargo et ál. 2011), los cuales realizan mucho más su valor.

El papel de los bosques en la mitigación del cambio climático ya ha sido ampliamente documentado (IPCC 2007, Angelsen et ál. 2009, CIFOR 2010). De la misma manera, se han definido iniciativas con las cuales se pretende generar incentivos para los propietarios de los bosques por la fijación o el secuestro de carbono, así como por otros servicios ecosistémicos (IPCC 2007, VCS 2011, Ehrhart et ál. 2008). En la actualidad, se evalúa la posibilidad de aplicar esquemas de pago de incentivos por los servicios ecosistémicos que proveen los bosques de bambú (Yiping et ál. 2010, Natha y Ashesh 2009). Por ello, para escoger las opciones más apropiadas, es necesario conocer el contexto en el cual se desarrollan las especies y determinar las particularidades de cada una.

En este trabajo se evaluaron las posibilidades de incluir plantaciones y bosques naturales de *G. angustifolia* en mercados voluntarios de carbono bajo el marco de REDD+ (reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal; el símbolo “+”

hace referencia a la conservación, gestión sostenible de los bosques y mejoramiento de las reservas de carbono en bosques). Para ello se tomaron en cuenta los requerimientos y las características particulares de estos bosques en la región del Eje Cafetero de Colombia, donde la especie crece de manera natural. El área de estudio abarcó fragmentos de bosques de guadua en los departamentos del Valle de Cauca, Quindío, Risaralda, norte del Tolima y Caldas, en elevaciones que van de los 900 a los 2000 msnm.

Determinación de la biomasa y el carbono

Para la estimación del carbono almacenado en la biomasa y en el suelo de bosques naturales de guadua (Fotografía 1) se usaron parcelas y sitios evaluados en inventarios anteriores (Kleinn y Morales 2006, Camargo 2006). En el caso de las plantaciones, se consideraron tres sitios con edades de 8 y 7 años. Tanto en guaduales naturales como plantaciones, se evaluaron parcelas localiza-

das en los municipios de Montenegro (altura de 1100 msnm, temperatura media anual de 24°C y precipitación media anual de 1600 mm) y Pereira (altura de 1430 msnm, temperatura media anual de 21°C y precipitación promedio anual de 2500 mm).

Para determinar la biomasa seca de guadua se realizaron muestreos destructivos de culmos con diferente estado de madurez, siguiendo las secuencias que estos forman al conectarse a través de sus rizomas. En cada caso, se tomaron muestras de hojas, ramas, culmo (tallo) y rizoma (Fotografías 2 y 3). Para determinar, la biomasa, su equivalente en carbono y CO₂ se utilizaron las fórmulas descritas por Márquez (2000) que se detallan a continuación:

Contenido de humedad:
$$CH = \frac{Pi(g) - Ps(g)}{Pi(g)}$$

CH: Contenido de humedad

Pi: Peso inicial de la muestra en gramos

Ps: Peso seco de la submuestra en gramos



Fotografía 1. Levantamiento de parcelas para la determinación de biomasa en guaduales naturales

Foto: Grupo de Investigación GATA.

Biomasa: $B = Pf - (Pf * CH)$

B: Biomasa

Pf: Peso fresco encontrado en campo

Contenido de carbono: $C = B * 0,5$

C: Contenido de carbono
0,5 factor de conversión general según Mac Dicken (1997)

Contenido de CO₂: $CO_2 = C * 3,67$

CO₂: Contenido de CO₂
3,67: Factor de conversión (peso molecular respecto al peso de carbono)

A partir de la propuesta de núcleos forestales productivos (Camargo et ál. 2007a) y la información de los inventarios en que se sustenta este estudio (densidad de culmos por hectárea), se hizo una estimación del carbono almacenado en estas áreas. Tales estimaciones se compararon con cálculos anteriores obtenidos a partir del volumen neto y la gravedad específica media de los culmos.

Evaluación de esquemas de mercado voluntario de carbono y REDD+

Teniendo en cuenta los esquemas de mercado voluntario y los requeri-

mientos de REDD+ se hizo una evaluación de los requerimientos que se cumplen con el proceso seguido y las posibilidades de emplear cada esquema de mercado voluntario. Como referentes, se usaron los estándares para el diseño de proyectos de clima, biodiversidad y comunidad (CBC) y CarbonFix, ya que son los esquemas cuyos criterios de aplicación se ajustan fácilmente a los proyectos forestales y permiten una descripción detallada de los beneficios que dichos proyectos ofrecen. Los criterios de elegibilidad de los dos estándares (CBC y CarbonFix) se evaluaron en las plantaciones de guadua; para ello se hizo una lista de chequeo y se definieron posibles alternativas para cumplir con cada uno de los requerimientos de los esquemas. La estrategia REDD+ se evaluó en los bosques naturales de guadua a partir del esquema propuesto por Parker et ál. (2008), el cual se basa en los alcances, un nivel de referencia, la distribución de recursos y el financiamiento.

Resultados y discusión

Contenido de carbono almacenado

El carbono total almacenado por los bosques naturales de guadua (con una densidad aproximada de 4050

culmos por hectárea) fue en promedio de 126±4 t/ha. El 85% del carbono se almacena en la parte aérea (ramas, culmos y hojas) y 15% en la biomasa subterránea (rizoma) (Fig. 1). Para las plantaciones de 7-8 años de edad, con una densidad promedio de 7700 culmos por hectárea, el carbono total almacenado fue de 24,6±5 t/ha. La biomasa aérea alberga el 86% y el 14% restante corresponde a la biomasa subterránea (Fig. 2). El carbono contenido en el suelo a 25 cm de profundidad bajo guaduales, tanto naturales como plantados, fue en promedio de 544±125 t/ha.

Si bien la distribución de la biomasa -y por lo tanto del carbono- en las diferentes secciones de la planta es similar entre plantaciones y guaduales naturales, la biomasa de ramas y hojas es más alta en las plantaciones. Probablemente esto se deba a la función fotosintética optimizada en la etapa de crecimiento y a la mayor disponibilidad de espacio lateral en las plantaciones, lo que permite un mejor y mayor desarrollo de ramas laterales. Según Anten y Hirose (1998) y King (2003), los cambios en la distribución de la biomasa dependen de la disponibilidad de luz y de la edad de las especies. Para las especies de bambú, la distribución de la biomasa también puede variar con el nivel de perturbación y la densidad



Fotografía 2. Determinación de biomasa en muestras de hojas.



Fotografía 3. Determinación de biomasa en muestras de ramas.

Fotos: Grupo de Investigación GATA.

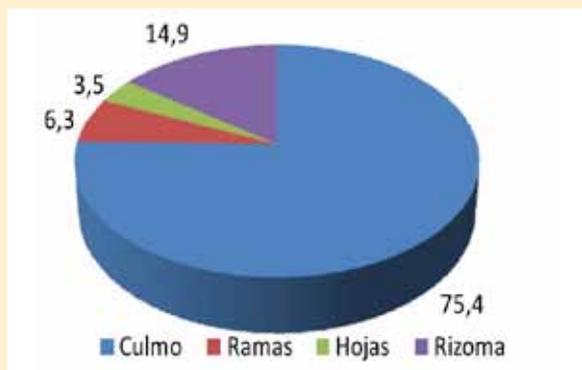


Figura 1. Distribución del carbono almacenado en guaduales naturales

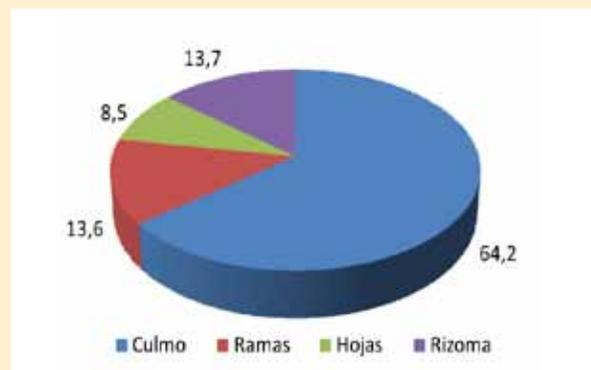


Figura 2. Distribución del carbono almacenado en guaduales plantados

de culmos (Kleinhenz y Midmore 2001), aunque Cruz (2009) determinó que la biomasa varía con las condiciones de regeneración del guadual.

De acuerdo con Camargo (2006), el área foliar en plantaciones de guadua se incrementa durante el primer año y luego tiende a disminuir cuando las ramas alcanzan a las de otros culmos. El incremento del área foliar también se asocia con la aparición de nuevos culmos, los cuales representan un incremento en el área total ocupada por cada planta (Camargo 2006). En los guaduales naturales, el carbono total por culmo muestra un incremento durante los

dos primeros años, luego permanece constante hasta los cinco años y posteriormente tiende a disminuir. En las plantaciones, aunque los culmos más maduros muestreados no superaron los cuatro años, la tendencia es similar (Figs. 3 y 4).

Las dimensiones finales de los culmos de guadua están definidas desde edades muy tempranas, ya que el diámetro no cambia con el tiempo debido a la ausencia de cambium vascular. Asimismo, la longitud total se alcanza luego de la elongación del culmo en seis meses aproximadamente (Judziewicz et ál. 1999). Por lo tanto, el incremento de biomasa

se da durante el primer año por las razones mencionadas y luego por el desarrollo de ramas y hojas hasta el segundo año, cuando se empieza a estabilizar. Es probable que la disminución de la biomasa después de los cinco años esté relacionada con la pérdida de hojas y ramas de los culmos más viejos y dañados. Después de 10 o 12 años, los culmos no cosechados mueren y se descomponen, lo que representa una emisión de CO₂. Un manejo adecuado del guadual en términos de fijación de CO₂ implica la cosecha de los culmos cuando alcancen las características exigidas por el mercado.

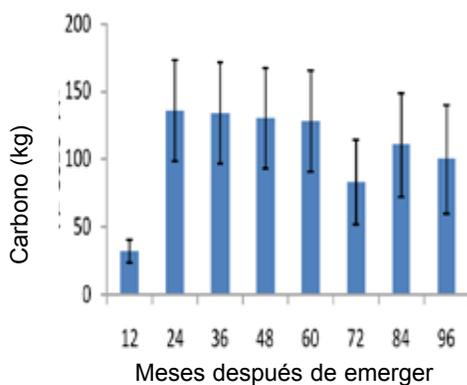


Figura 3. Carbono almacenado en guaduales naturales según edad del culmo en meses

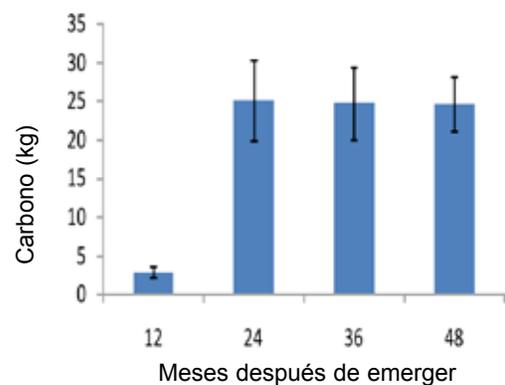


Figura 4. Carbono almacenado en plantaciones según edad del culmo en meses

Líneas verticales sobre las barras representan la desviación estándar

De acuerdo con Liese (2009), para garantizar la estabilidad del carbono almacenado en los culmos de bambú es necesario garantizar una cierta durabilidad de los productos obtenidos. Además, es necesario tomar en cuenta la especie de bambú, ya que algunas especies de origen asiático comienzan un lento proceso de muerte después de la floración (Liese 2009) y, en consecuencia, la fuga de CO₂. Aunque no se tienen estudios detallados sobre estas fugas, al tomar decisiones sobre un posible esquema de mercado de carbono sí se debería tener en cuenta tal comportamiento.

Contenido aproximado de carbono a nivel de núcleos forestales

La situación actual de los bosques de guadua y su contribución al desarrollo sostenible de la región cafetera han sido consideradas bajo diferentes estrategias promovidas por distintas instituciones -principalmente las corporaciones autónomas regionales. Fruto de este proceso han surgido importantes herramientas que proporcionan el marco legal para el manejo del recurso (CAR 2002), proveen elementos para su inventario y manejo (Camargo et ál. 2007b y 2007c, Camargo et ál. 2008), contri-

buyen a la planificación del recurso mediante la zonificación según criterios biofísicos y socioeconómicos (Camargo et ál. 2007a) y promueven el trabajo a partir de núcleos forestales productivos (Moreno 2006, Camargo et ál. 2010a).

De la zonificación detallada de los guaduales surgió una propuesta para la consolidación de núcleos forestales (Camargo et ál. 2007a). Se estima que alrededor de 124.000 ha en el Eje Cafetero tienen aptitud alta para el establecimiento de plantaciones de guadua con fines comerciales. Asimismo, cerca de 87.000 ha cumplen con condiciones de oferta del recurso, tradición de manejo, infraestructura y desarrollo industrial; esta área corresponde a la categoría de núcleo forestal de alta productividad.

En el Cuadro 1 se presenta información sobre el contenido de carbono en núcleos con diferente nivel de productividad (alta, media y baja) en guaduales de los departamentos de Quindío y Risaralda. Se incluyen los datos obtenidos con este estudio y los de Camargo et ál. (2007a). Con el fin de obtener una visión más completa del contenido de carbono, se ha extrapolado la información al área total de bosques de guadua en los núcleos forestales evaluados.

Mercados voluntarios de carbono y plantaciones de guadua

En el Cuadro 2 se detallan las posibilidades de cumplir con los criterios exigidos por los estándares CBC y CarbonFix en las plantaciones de guadua evaluadas. En general, en todos los casos existen buenas posibilidades de cumplimiento; se cuenta incluso con estudios que hacen referencia o pueden ser utilizados para alentar el cumplimiento de los criterios en cuestión. El precio de la tierra podría ser el factor de mayor incidencia en la adopción de los estándares, aunque podría ser manejable pues la mayoría de los productores de la región tienen y/o han manejado bosques de guadua.

Es evidente que existen elementos que facilitarían la adopción de los estándares; no obstante, es importante mencionar que en cada caso, el desarrollo de cada criterio implica mucho trabajo y la generación de nueva información, la cual depende de las características de la especie y de las condiciones particulares del sitio en donde se establecería el proyecto.

Bosques naturales de guadua y REDD+

La iniciativa REDD+ fue reconocida como un mecanismo válido para la mitigación del cambio climático durante la conferencia de Bali 2007.

Cuadro 1. Estimación de carbono almacenado en guaduales de dos departamentos del Eje Cafetero

Departamento de Risaralda							
Productividad/ núcleo forestal	Área (ha)	Culmos/ha	CO ₂ t/ha Estudio a		CO ₂ total t/ha* Estudio b	CO ₂ t Total área Estudio a	CO ₂ t Total área* Estudio b
			Biomasa	Total*			
Alta	1354	8233	943	1461	929	1.978.600	1.257.866
Media	836	8883	1018	1536	907	1.283.845	758.252
Baja	45	5500	630	1148	760	51.669	34.200
Total	2235	7539	864	1382	865	3.088.100	1.934.020
Departamento del Quindío							
Productividad/ núcleo forestal	Área (ha)	Culmos/ha	CO ₂ t/ha Estudio a		CO ₂ total t/ha Estudio b	CO ₂ Total área Estudio a	CO ₂ Total área Estudio b
			Biomasa	Total			
Alta	2806	5090	583	1101	727	3.089.938	2.041.084
Media	1061	5133	588	1106	646	1.173.579	685.512
Baja	10	9416	1079	1597	788	15.970	7.880
Total	3867	6546	750	1268	2162	4.903.463	8.360.067

Estudio a: Este trabajo Estudio b: Camargo et ál. 2007a *Carbono en suelo y biomasa

Esta iniciativa podría convertirse en una buena opción para el manejo de los bosques de guadua en la región cafetera colombiana. Como se ha mostrado previamente, los bosques de guadua son un sumidero de carbono importante, aunque también, ya se ha constatado su papel en la regulación hídrica (Camargo et ál. 2011, Rodríguez 2011), la protección del suelo (Camargo et ál. 2011, Rodríguez 2011; Rodríguez 2004), la provisión de hábitat para la biodiversidad vegetal (Ospina 2002, Calle y Piedrahita 2008) y animal (Fajardo et ál. 2008, Pérez et ál. 2009). Todos estos factores indudablemente pueden contribuir a la definición del nivel de referencia.

Los problemas de degradación de los bosques de guadua en el Eje Cafetero son el resultado de la explotación del recurso sin apego

a los protocolos establecidos por las corporaciones autónomas regionales; en especial, la corta ilegal (Camargo et ál. 2010b). Si bien el área de cobertura se mantiene desde hace años, los niveles de fragmentación son cada vez mayores. Asimismo, la expansión urbana ejerce un alto grado de presión que amenaza los relictos de guaduales a medida que las construcciones se acercan cada vez más a los mismos (Koim 2009, Arango et ál. 2011). Por una parte, el precio de la tierra juega un papel importante en este proceso. Por ejemplo, el precio de la tierra está alrededor de 60 USD/m² en los alrededores de la ciudad de Pereira³; al sur de la ciudad se encuentra la mayor área de bosques de guadua; en consecuencia, algunos propietarios de fincas han empezado a vender parte de sus predios

para la construcción de condominios campestres. Por otra parte, el plan de ordenamiento del municipio define el sector sur como área de expansión de la ciudad, lo cual amenaza seriamente la existencia de los guaduales.

La implementación de proyectos REDD+ requiere un marco de políticas gubernamentales que provean una adecuada legislación para el desarrollo de los proyectos y de un marco de financiación para proyectos individuales o por medio de una estrategia nacional. En este sentido, Colombia ya cuenta con una estrategia promovida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT 2011), la cual ha elegido 16 ecosistemas boscosos susceptibles de ser incorporados a REDD+. Los bosques de guadua, hasta ahora, no figuran como elegibles pero se avanza en las gestiones.

Cuadro 2. Criterios de los estándares CBC y CarbonFix evaluados en plantaciones de guadua en el Eje Cafetero colombiano

Estándares CBC (Alianza para el Clima, Comunidad y Biodiversidad)		
Criterios	Aplicación en plantaciones de guadua	Referencias
Sección general Se definen los parámetros más generales de los proyectos; entre ellos, la proyección de la línea base, el área del proyecto, las metas y objetivos, el manejo de las coberturas y los derechos de propiedad.	Las condiciones generales están definidas de manera clara: se cuenta con inventario, zonificación y propuesta de consolidación de núcleos forestales. Además, hay áreas definidas para establecer plantaciones de guadua a partir de criterios biofísicos y socioeconómicos.	Camargo et ál. (2006) Camargo et ál. (2007a, b, c) Camargo et ál. (2008) Kleinn y Morales (2006)
Sección climática Impactos que el proyecto tiene o espera tener en el ambiente.	El guadal ofrece hábitat a diferentes especies de aves, mamíferos y especies maderables y otros beneficios al ecosistema. Además, ayuda en la recuperación de áreas degradadas y control de la erosión.	Arias y Hoyos (2004) Ospina (2002) Arango et ál. (2011) Camargo y Cardona (2005) Fajardo et ál. (2008) Rodríguez (2009)
Sección comunitaria Impactos que el proyecto tiene o deberá tener sobre las comunidades aledañas.	El aprovechamiento, comercialización y transformación de la guadua podría ayudar a controlar los problemas causados por el cambio del uso del suelo en la región. El cultivo y mantenimiento de los bosques y rodales de guadua podrían significar un incentivo adicional para los productores. Una desventaja podría ser el precio de la tierra.	Moreno (2006) Botero (2004) Held (2005) García (2004)
Sección biodiversidad Impactos que el proyecto tiene o deberá tener sobre la biodiversidad <i>in situ</i> y <i>ex situ</i> .	Los bosques de guadua son un importante refugio para especies de aves y mamíferos (murciélagos) que cumplen funciones ecológicas vitales; la conectividad entre los fragmentos de bosques de guadua es un factor clave en la distribución de las poblaciones de flora y fauna.	Rodríguez et ál. (2009) CIEBREG (2008) Calle y Piedrahita (2008) Fajardo et ál. (2008) Ospina (2002)
Sección nivel de oro Beneficios excepcionales para la adaptación al cambio climático, la comunidad y/o la biodiversidad.	Importancia de la guadua como recurso natural local, ya que no solo provee servicios ecosistémicos sino que forma parte de la cultura cafetera. La explotación del recurso promueve la asociatividad y cooperación entre las poblaciones. Ya se tienen propuestas de núcleos forestales productivos.	Ospina y Rodríguez (2002)

Fuentes: Ehrhart (2008), CarbonFix (2010).

³ Delgado, J. Gerente Lonja de Propiedad Raíz en Pereira. Entrevista concedida al diario La Tarde. Noviembre de 2011. Disponible en: <http://www.latarde.com/pereira/local>

El marco legal y político ya definido a nivel regional para los bosques de guadua, junto con algunas de las herramientas antes mencionadas, es un avance considerable que facilita la gestión hacia REDD+. Desde hace cerca de cinco años se viene ejecutando un proyecto de gobernanza forestal que ha logrado consolidar varias de estas herramientas y los núcleos forestales productivos y ha impulsado la certificación forestal voluntaria (Camargo et ál. 2010a). Este trabajo se viene haciendo con un grupo de productores que han adaptado de manera eficiente el uso de las herramientas para el manejo adecuado de los bosques de guadua. Así, han accedido al proceso de certificación voluntaria y algunos forman parte de los núcleos forestales productivos. El nivel de organización alcanzado y el compromiso de los productores facilitarían el proceso de implementación de un proyecto REDD+.

Conclusiones

- Como sumideros de carbono que son, los bosques naturales y plan-

taciones de guadua son importantes para la mitigación del cambio climático. No obstante, debido a sus características particulares que implican un ciclo de vida relativamente corto, su contribución a la mitigación a largo plazo dependerá del uso y durabilidad de los productos obtenidos con los culmos cosechados.

- El alto costo de la tierra en el Eje Cafetero pudiera incidir de manera negativa en la conservación y manejo de los guaduales y, en consecuencia, frustrar el acceso a mercados voluntarios de carbono. No obstante, la información existente sobre aptitud de la tierra podría dar indicios de los sitios más apropiados para el establecimiento de plantaciones de guadua que calificaran para proyectos REDD+ en la región.
- Los criterios evaluados fueron muy generales. Tanto el esquema CBC como CarbonFix exigen información detallada sobre especies, sitio y tipo de proyecto. En la eventual definición de proyectos para el acceso a mercados volun-

tarios de carbono se debe considerar con antelación la información que se requerirá.

- Los bosques naturales de guadua bien pudieran ser considerados dentro de una iniciativa REDD+. No obstante, la justificación para un tal proyecto no parte de la fuerte deforestación que sufren, sino de la presión causada por la expansión urbana, los altos índices de fragmentación y las malas prácticas que conllevan a su degradación. Afortunadamente, ya existe un marco político y legal que facilita cualquier acción que se quiera realizar en este sentido. 🌱

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a Colciencias (Proyecto Código 1110452-21121; Contrato 442-1-2008) y a la Universidad Tecnológica de Pereira por el financiamiento parcial del proyecto. Agradecemos también a los propietarios de las fincas Nápoles y La Esmeralda por conceder el permiso de recolección de las muestras.

Literatura citada

- Angelsen, A; Con Brockhaus, M; Kanninen, M; Sills, E; Sunderlin, WD; Wertz-Kanounnikoff, S. 2009. La implementación de REDD+: estrategia nacional y opciones de política. Bogor, Indonesia CIFOR.
- Anten, NP; Hirose, T. 1998. Biomass allocation and light partitioning among dominant and subordinate individuals in *Xanthium canadense* stands. *Annals of Botany* 82: 665-673.
- Arango, AM. 2010. Posibilidades de la guadua para la mitigación del cambio climático; caso: Eje Cafetero Colombiano. Trabajo de Pregrado. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales. 113 p.
- Arango, AM; Bueno, L; Amézquita, MA; Camargo, JC. 2011. Possibilities of guadua bamboo forests in the context of REDD+: A case study in the coffee region of Colombia. In Klein, C; Fehrmann, L. (eds.). *Proceedings of the workshop "Forest in Climate Change research and policy: The role of forest management and conservation in a complex international setting"* [2-9 diciembre, Cancún, México].
- Arias, LM; Hoyos, DP. 2004. Cuantificación de carbono en suelos bajo rodales de *Guadua angustifolia* Kunth en el Eje Cafetero de Colombia y estrategias de manejo para su conservación como beneficio ambiental. Trabajo de Grado. Universidad Tecnológica de Pereira. 100 p.
- Botero, LF. 2004. Manual de industrialización del bambú. Buenos Aires, Argentina, Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca / Unión Europea. 117 p.
- Calle, Z; Piedrahita, L. 2008. Conservación de flora amenazada en fincas ganaderas de la cuenca media del río La Vieja. In Fundación CIPAV (Ed.). *Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo*. Cali, Colombia. p. 148-169.
- Camargo, JC; Cardona, G. 2005. Análisis de fragmentos de bosque y guaduales; enfoques silvopastoriles integrados para el manejo de ecosistemas. Pereira, Colombia, CIPAV-CATIE-Banco Mundial-GEF-LEAD. 38 p.
- Camargo, JC. 2006. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth in the Coffee Region of Colombia. Ph.D. Thesis. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 205 p.
- Camargo, JC; Dossman, MA; Cardona, G; García, JH; Arias, LM. 2007a. Zonificación detallada del recurso guadua en el Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca, municipios piloto del Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia (Guía metodológica y resultados). Pereira, Colombia, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Universidad Tecnológica de Pereira, y Corporaciones Autónomas Regionales del Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca.
- Camargo, JC; García, JH; Morales, T. 2007b. Bases para la planificación y manejo silvicultural de bosques de guadua: una aplicación a nivel de finca en la zona cafetera de Colombia. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Colciencias, Grupo en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. 86 p.

- Camargo, JC; Morales, T; García, JH. 2007c. Mensura e inventario forestal para la planificación y manejo sostenible de bosques de guadua. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Colciencias, Grupo en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. 125 p.
- Camargo, JC; Morales, T; García, JH. 2008. Términos de referencia para la formulación de planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guaduales. Pereira, Colombia, Proyecto Bosques FLEGT/Colombia. 70 p.
- Camargo, JC; García, JH; Cardona, G; Charry, AM. 2010a. Núcleos forestales productivos de guadua en los departamentos de Quindío, Risaralda y Tolima en el marco del proyecto Bosques FLEGT/Colombia. Pereira, Colombia, Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos, Universidad Tecnológica de Pereira, Corporaciones Autónomas Regionales de Quindío, Tolima, Risaralda.
- Camargo, JC; Moreno, RD; Villota, N. 2010b. Sustainable management of guadua bamboo forest in Colombia. In Witt, M; Van Dam, J. (Eds.). Chainsaw milling: supplier to local markets. Wageningen, The Netherlands, Tropenbos International. 226 p.
- Camargo, JC; Chará, J; Giraldo, L; Chará-Serna, A; Pedraza, G. 2011. Beneficios de los corredores ribereños de *Guadua angustifolia* en la protección de ambientes acuáticos en la Ecorregión Cafetera de Colombia. 1. Efectos sobre propiedades del suelo. Recursos Naturales y Ambiente 61: 47-53.
- CAR (Corporaciones Autónomas Regionales del Eje Cafetero). 2002. Norma unificada en guadua: reglamentación para el manejo, aprovechamiento y establecimiento de guadua, caña brava y bambúes. Bogotá, Colombia, Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia (Convenio 021 del 2001).
- CarbonFix Standard. 2010. CarbonFix Standard Versión 3. Proyectos Globales de Forestaciones Climáticas (en línea). Disponible en <http://www.carbonfix.info/chameleon/outbox/public/189/CarbonFix-Standard-v30-ES.pdf>.
- CIEBREG (Centro de Investigaciones y Estudios en Biodiversidad y Recursos Genéticos). 2008. Informe anual proyecto "Valoración de los bienes y servicios de la biodiversidad para el desarrollo sostenible de paisajes rurales colombianos: Complejo Ecorregional Andes del Norte". Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Pontificia Universidad Javeriana, Fundación CIPAV, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- CIFOR (Center for International Forestry Research). 2010. Simply REDD: CIFOR'S guide to forests climate change and REDD. Bogor, Indonesia.
- Cruz, H. 2009. *Guadua angustifolia* Kunth: bosques naturales en Colombia y plantaciones comerciales en México. Pereira, Colombia. 690 p.
- Ehrhart, Ch; Pedroni, L; Salinas, C; Durbin, J; Panfin, S; Verchot, L; Locatelli, B; Janson-Smith, T; Fehse, J; Sell, J; Suarez, D; Sena, K; Hayward, J; Henman, J; Parson, M; Petlin, G; Krueger, L; Walker, S; Ruddell, S. 2008. Estándares para el diseño de proyectos de clima, comunidad y biodiversidad. 2 ed. Comité de Estándares CBC. Disponible en www.climate-standards.org
- Fajardo, ND; González, RJ; Neira, LA. 2008. Sistemas ganaderos amigos de las aves. In Fundación CIPAV (Ed.). Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo. Cali, Colombia. p. 171-203.
- García, JH. 2004. Definición de áreas óptimas de calidad de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) orientada a satisfacer las necesidades del mercado. Tesis Mag. Sc. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. 110 p.
- Held, C. 2005. Promotion of innovations in forest based small and medium size enterprises of developing countries: An actor-oriented analysis of the Colombian bamboo sector. Ph.D. dissertation. Freiburg University, Deutschland. 223 p.
- Hidalgo, O. 2003. Bamboo, the gift of the gods. Bogotá, Colombia. 553 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis (Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación). Ginebra, Suiza, IPCC. 104 p.
- Judziewicz, EJ; Clark, LG; Londoño, X; Stern, M. 1999. American bamboos. Washington D.C., Smithsonian Institution press. 392 p.
- King, DA. 2003. Allocation of above-ground growth is related to light in temperate deciduous saplings. Functional Ecology 17: 482-488.
- Kleinhenz, V; Midmore, DJ. 2001. Aspects of bamboo agronomy. Advances in agronomy 74: 79-145.
- Kleinn, C; Morales, D. 2006. An inventory of *Guadua* (*Guadua angustifolia*) bamboo in the Coffee Region of Colombia. European Journal of Forest Research 125(4):361-368.
- Koim, N. 2009. Urban sprawl, land cover change and forest fragmentation: A case study of Pereira, Colombia. Berlin, Alemania, Humboldt-Universität Zu Berlin Landwirtschaftlich - Kenyon Fakultät.
- Liese, W. 2009. Bamboo as a Carbon – Skin - Fact or Fiction? 8th World Bamboo Congress Proceedings; Volumen 3 Bamboo and Environmental. [Bangkok, Thailand, 16 – 19 sept, 2009].
- Londoño de la Pava, X. 1990. Aspectos sobre la distribución y la ecología de los bambúes de Colombia. Caldasia 16(77):139 – 153.
- Márquez, L. (Ed.). 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Guatemala, Fundación Solar.
- MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia). 2011. Propuesta de Preparación para REDD+ (Versión 5 del 11 de abril, 2011).
- Moreno, RD. 2006. Lineamientos generales para la conformación y operación de núcleos forestales productivos para la guadua. Pereira, Colombia, Programa Ambiental GTZ, Proyecto Manejo Sostenible de Bosques para Colombia.
- Natha, G; Ashesh, K. 2009. Above ground standing biomass and carbon storage in village bamboos in North East India. Revista Science Direct Biomass and Bioenergy 33:1188-1196. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953409000907>
- Ospina, R. 2002. Factores que determinan las características florísticas estructurales de los fragmentos dominados por *Guadua angustifolia* en el Eje Cafetero Colombiano y su relación con los aprovechamientos de Guadua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 71 p.
- Ospina, R; Rodríguez, JM. 2002. Biodiversidad en guaduales: importancia e implicaciones de un buen manejo. Memorias. Seminario-Taller Avances en la Investigación sobre Guadua [Pereira, Colombia, 16,17 y 18 de mayo, 2002].
- Parker, C; Mitchell, A; Trivedi, M; Mardas, N. 2008. The Little REDD+ Book: A guide to governmental and non-governmental proposals for reducing emissions from deforestation and degradation. Oxford, United Kingdom, Global Canopy Foundation, John Krebs Field Station. 60 p.
- Pérez Rojas, J; Sánchez Lalinde, C; Cortes Delgado, N. 2009. Murciélagos asociados a sistemas naturales y transformados en la Ecorregión Eje Cafetero. In Rodríguez, JM; Camargo, JC; Niño, J; Pineda, AM; Arias, LM. (Eds). Valoración de la biodiversidad del Eje Cafetero. Pereira, Colombia, CIEBREG. p. 157-167.
- Rodríguez, JA. 2004. Beneficios ambientales en la disminución de la erosión y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo bajo rodales de guadua en el eje cafetero colombiano. Trabajo de Grado para optar al título de Administrador del Medio Ambiente. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. 125 p.
- Rodríguez, JA. 2011. Desarrollo de un sistema de monitoreo de calidad del suelo para agroecosistemas en la Zona Cafetera de Colombia. Tesis Maestría en Ecotecnología. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales. 110 p.
- Rodríguez, JM; Camargo, JC; Niño, J; Pineda, AM; Echeverry, MA; Miranda, CL. 2009. Valoración de la biodiversidad en la Ecorregión del Eje Cafetero. Pereira, Colombia, CIEBREG. 238 p.
- VCS (Voluntary Carbon Standard). 2011. Methodology for carbon accounting in project activities that reduce emissions from mosaic deforestation and degradation. Approved Methodology VM007 Version 1.0: Sectoral Scope 14. Disponible en: <http://www.v-c-s.org/methodologies/what-methodology>
- Yiping, L; Yanxia, L; Buckingham, K; Henley, G; Guomo, Z. 2010. Bamboo and climate change mitigation. Red Internacional del Bambú y el Ratán (INBAR). Disponible en: www.INBAR.int
- Zhou, SL; Ma, NX; FU, MY. 1994. A compendium of Chinese bamboo. Beijing, Forestry Publishing House.

Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia

Juan Carlos Camargo¹;
José Alexander Rodríguez²,
Angela María Arango³

Las plantaciones de guadua pueden funcionar como sumideros de CO₂. Los cambios en la capacidad de fijación dependen de la edad de la plantación, del crecimiento y de la madurez de los culmos. A mayor edad de la plantación, se tienen ramets con culmos de mayores dimensiones y, por lo tanto, con más biomasa.



Foto: Grupo de Investigación GATA.

¹ Profesor Titular, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. jupipe@utp.edu.co

² Profesor e Investigador, Facultad de Ciencias Ambientales, Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. pauloalejo@utp.edu.co

³ Investigador, Facultad de Ciencias Ambientales, Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. angie86ar@hotmail.com

Resumen

Una plantación de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) establecida en Pereira, Colombia en el año 2003 fue evaluada para determinar su patrón de crecimiento y su contribución al secuestro de carbono. La plantación fue establecida con una densidad de 625 plántulas por hectárea, en un área anteriormente utilizada para ganadería. El crecimiento fue evaluado anualmente durante siete años, teniendo en cuenta la emisión de nuevos culmos, la longitud de los mismos y su diámetro basal. La densidad promedio alcanzada a los siete años fue de 11.827 culmos/ha. Para las variables diámetro basal y longitud total de los culmos, el promedio fue 5,1 cm y 10,1 m, respectivamente. Para las tres variables fue posible ajustar modelos que las describen de forma adecuada en función del tiempo. Asimismo, se ajustó un modelo lineal que explica la variabilidad de la longitud total del culmo en función de su diámetro basal. Para la estimación del carbono fijado, se midió la biomasa por medio de muestreo destructivo de culmos y sus compartimentos (rizoma, hojas, ramas). La plantación mostró una capacidad de fijación de 76 t CO₂/ha, de las cuales el 83% se alberga en la parte aérea. Por su rápido crecimiento, la capacidad de fijar carbono y la posibilidad del uso comercial de los culmos, las plantaciones de guadua constituyen una importante opción productiva para regiones con condiciones biofísicas similares.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; culmo; madurez; carbono; crecimiento; fijación de carbono; servicios ecosistémicos; modelos de regresión; zona cafetera; Colombia.

Summary

Growth and carbon stock estimation on a guadua plantation from the Colombian coffee region. The growth pattern and the carbon sequestration potential of a guadua bamboo plantation (*Guadua angustifolia* Kunth) were assessed in a farm located in Pereira, Colombia. The guadua plantation was established in 2003 with a density of 625 clumps per hectare in areas previously used by cattle systems. In order to evaluate the growth pattern, new culms, its basal diameter and its length were measured yearly during 7 years. The number of culms at year 7 was 11,827/ha. Culm basal diameter and total length were, in average, 5.1 cm and 10.1 m, respectively. Regression models which properly described growth as a function of time were fitted for the three variables. Additionally, a linear model which explained the variability of length as a function of basal diameter was also fitted. For estimating carbon stored in biomass, a destructive sampling of culms and their compartments (rhizome, leaves and branches) was carried out. The guadua plantation showed a fixing capacity of 76 t CO₂/ha, from which 83% was stored in aboveground biomass. Because of its fast growth, capability of carbon sequestration and commercial culms production, guadua plantations might be an important productive alternative in regions with similar biophysical conditions.

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; culms; maturity; carbon; growth; carbon stock; ecosystem services; regression models; coffee zone; Colombia.

Introducción

En la zona cafetera de Colombia es donde se ha dado el mayor desarrollo asociado al manejo de bosques de guadua. Allí existen aproximadamente 28.000 ha bajo esta cobertura (Kleinn y Morales 2006), tanto en plantaciones como en bosques naturales. Según CARDER (2000), las plantaciones equivalen a aproximadamente el 10% del área total de guaduales existentes en el país. En la mayoría de los casos, estas plantaciones han sido establecidas en áreas pequeñas (menos de 5 ha), por lo general no son manejadas y algunos de ellas se encuentran en mal estado debido, precisamente, a la ausencia de prácticas silviculturales (Camargo 2006). Sin embargo, una extensión significativa de terreno podría ser utilizada para el establecimiento de plantaciones de guadua en la zona cafetera (Camargo et ál. 2007).

Las experiencias que se han registrado con plantaciones de guadua en otros países de Latinoamérica muestran resultados exitosos y un potencial ecológico y comercial bastante importante (Cruz 2009). Este autor define diferentes aspectos de manejo y describe variables de crecimiento en plantaciones comerciales de guadua en México. En Colombia no existe mucha información publicada sobre el manejo silvicultural de plantaciones de bambú guadua; sin embargo, ya se tienen sugerencias generales en cuanto al espaciamiento, crecimiento y manejo (ver Giraldo y Sabogal 1999, Cruz 1994, Venegas 1993). Judziewicz et ál. (1999) ofrecen algunas recomendaciones sobre control de malezas y asociaciones, en tanto que Riaño et ál. (2002) estudiaron variables de crecimiento y la fijación de carbono en plantaciones de guadua hasta los seis años de edad. Camargo (2006) describió la dinámica de plantaciones de guadua durante los primeros años de establecimiento; para ello definió variables de crecimiento

y evaluó el efecto de prácticas de manejo, como la fertilización y el control de malezas.

El potencial de los bosques de guadua para la mitigación del cambio climático se refleja en su capacidad como ecosistema para fijar y/o almacenar dióxido de carbono (Cruz 2009, Camargo et ál. 2007, Arias et ál. 2008, Riaño et ál. 2002). Camargo y Kleinn (2010) han diseñado funciones que permiten hacer estimaciones de este potencial; asimismo, Arango (2011) y Arango y Camargo (en este mismo número de RRNA) han evaluado la posibilidad de aplicar esquemas como REDD+ (reducciones de emisiones por deforestación y degradación).

Con esta investigación pretendemos contribuir con información más detallada sobre el crecimiento de la guadua en plantaciones y de sus beneficios ecosistémicos relacionados con la fijación de carbono. Por ello, hemos evaluado el crecimiento durante los siete primeros años y hemos estimado la capacidad para fijar dióxido de carbono en una plantación de la zona cafetera de Colombia.

El sitio de estudio

La plantación se ubica en la finca San Jorge, municipio de Pereira, Colombia. El sitio se encuentra a 1200 msnm, en suelos del orden de los andisoles, con pH neutro, alto contenido de materia orgánica y ligeramente limitados debido a altos contenidos de arcilla. La precipitación promedio anual es de 1900 mm con distribución bimodal y la temperatura media es de 24°C. La plantación se estableció en abril del año 2003, usando plántulas de tres meses que fueron propagadas vegetativamente. En promedio, al momento del establecimiento cada plántula tenía diez culmos y una longitud media de 50 cm en el culmo más alto. Se utilizó un espaciamiento de 4 x 4 m para una densidad total de 625 plántulas por hectárea (Fig. 1).

El sitio donde se estableció la plantación se usó antes para ganadería, por lo que tenía una cobertura de pasto de la especie *Panicum maximum*. Debido a la rapidez del crecimiento de la pastura fue necesario guadañar en promedio cuatro veces al año durante los dos primeros años de la plantación. Posteriormente, con el crecimiento de la guadua, esta labor fue menos frecuente hasta que en el año cuatro ya no fue necesario hacerla.

Evaluación del crecimiento y ajuste de los modelos de regresión

Para la evaluación del crecimiento, se establecieron 18 parcelas de 256 m² (25 plántulas) cada una. En cada parcela se seleccionaron tres plántulas en el centro de la parcela para hacer las mediciones a lo largo del tiempo (parcela útil). Las variables medidas cada año fueron: número de culmos por plántula (N_{CP}), diámetro basal (d_b) y longitud total (l_t). Las mediciones de estas dos últimas variables se realizaron cada vez sobre el culmo más joven encontrado por plántula, teniendo en cuenta que la elongación total de los culmos se alcanza en promedio a los seis meses (Camargo 2006) y que, debido a la ausencia de cambium vascular en las especies de bambú, el diámetro está definido desde el momento en que emergen (Judziewicz et ál. 1999). Por esta razón, para determinar los incrementos en diámetro y longitud solo hay que medir los culmos más jóvenes y diferentes de los medidos el año anterior.

Con el propósito de establecer patrones de crecimiento a partir de las variables evaluadas, se ajustaron modelos de regresión para cada variable en función del tiempo. De esta manera, se evaluaron ocho modelos para N_{CP} , nueve para d_b y siete para l_t . Las funciones de crecimiento utilizadas se tomaron de estudios previos en plantaciones de guadua (Camargo 2006, Riaño et ál.

2002), más otras usualmente utilizadas en mensura forestal (Prodan et ál. 1997). Teniendo en cuenta que los modelos evaluados no fueron lineales, el criterio para su selección fue el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), la raíz del cuadrado medio del error ($RCME$) y el análisis de residuos. De igual manera, se utilizaron técnicas de regresión para evaluar las relaciones entre las variables dendrométricas medidas (d_b) y la longitud total (L_t). Los análisis fueron realizados con el software estadístico Statistica 7 (Hill y Lewicki 2007).

Evaluación de la fijación de carbono y del contenido de minerales en la biomasa

Para la evaluación de la biomasa en el año siete, se identificaron secuencias de culmos interconectados o pertenecientes a la misma planta y con diferente estado de madurez. Para medir la biomasa total, la evaluación se realizó sobre “ramets”, los cuales se definen como el culmo con sus respectivas ramas, hojas y rizoma (McClure 1966). Cada ramet, por lo tanto, tenía un grado de madurez diferente. La biomasa se midió con muestras destructivas de 12 ramets tomados de tres parcelas elegidas aleatoriamente. En cada parcela muestreada se eligió una secuencia de ramets previamente marcados con 12, 24, 36 y 48 meses después de haber emergido.

De cada compartimiento de los ramets (rizoma, culmo, rama y hojas) se tomaron los pesos húmedos en campo. Para el mantillo se realizó el muestreo con un marco de 0,25 m² en tres puntos al azar dentro de cada parcela elegida. De cada una de las muestras de compartimientos de los ramets y del mantillo se tomaron submuestras de 250 g, las cuales fueron llevadas a laboratorio y secadas en horno a 60°C durante 48 horas en promedio. A partir de los pesos iniciales y los pesos secos hallados, se estimó la biomasa y el carbono (50%



Figura 1. Plántulas de *Guadua angustifolia* de un año de establecidas a 4 x 4 m, en la finca San Jorge, Pereira, Colombia

de la biomasa) y, usando un factor de conversión de 3,67 (Márquez et ál. 2000) se calculó el contenido de dióxido de carbono (CO₂) total por ramet, por cada compartimiento y en el mantillo. Posteriormente, de acuerdo con la densidad de culmos por hectárea se extrapolaron valores de CO₂. Igualmente, para estimar la cantidad de carbono almacenado en el suelo, en cada parcela se realizó un muestreo de suelo a 50 cm de profundidad, tomando muestras disturbadas en cada sitio para medir el contenido de materia orgánica y muestras no disturbadas en cilindros de volumen conocido para determinar su densidad aparente. La materia orgánica fue medida en el laboratorio de suelos mediante el método Walkley–Black (MacDicken y Brewbaker 1988).

Las muestras de biomasa fueron usadas también para determinar el contenido de nitrógeno por el método de Semimicro-Kjeldhal; las bases (K, Ca, Mg) se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica; el fósforo por el método fotométrico y el sílice mediante la digestión de cenizas.

Resultados y discusión

Crecimiento de las plántulas de guadua

El número promedio de culmos por plántula siete años después del establecimiento fue de 19 (±6), equivalentes a 11.828 (±3884) culmos/ha. Durante los dos primeros años se dio un fuerte incremento de culmos hasta casi cuadruplicar la cantidad a los tres años, cuando empezó una tendencia decreciente que se mantiene hasta los siete años (Fig. 2). Este comportamiento tiene que ver probablemente con una regulación que hace la planta en el incremento de los culmos, ya que con el tiempo estos son más grandes y ocupan mayor espacio. Un comportamiento similar fue registrado por Riaño et ál. (2002), aunque con una densidad de 8640 culmos/ha a los seis años y con un punto de inflexión a los cuatro años.

El diámetro basal y la longitud total se incrementaron de forma exponencial en función del tiempo; a los siete años alcanzaron valores promedio de 5,1cm (±1,7) y 10,1 m (±3,3), respectivamente (Figs. 3 y 4).

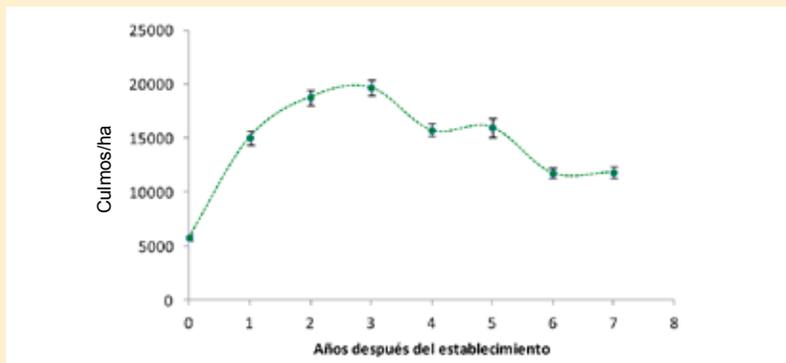


Figura 2. Número de culmos/ha en una plantación de siete años de *Guadua angustifolia* en la finca San Jorge, Pereira Colombia. Densidad inicial de 625 plántulas/ha. Líneas verticales representan el error estándar.



Figura 3. Diámetro basal promedio del culmo en una plantación de siete años de *Guadua angustifolia* en la finca San Jorge, Pereira Colombia. Líneas verticales representan el error estándar.

Este comportamiento es consistente con el reportado para ambas variables por Camargo (2006) y Riaño et ál. 2002. Sin embargo, las dimensiones en diámetro y longitud fueron menores que las registradas en bosques naturales de guadua (Camargo 2006, García 2004, Rijal 2006). Para ambas variables, la diferencia con respecto a los valores medios registrados por los autores citados fue cercana al 50%, lo que indica que las plantas aún no han alcanzado su crecimiento máximo. Cruz (2009) presenta valores de crecimiento en diámetro y longitud para plantaciones en Colombia que siguen aumentando hasta los nueve años.

Para la plantación analizada, los valores máximos de diámetro basal estuvieron entre 8,3 y 8,4 cm y representan solamente el 4,6% del total (equivalentes a 544 culmos/ha). Estos culmos alcanzarán una madurez adecuada aproximadamente cinco años después, lo que coincide con los resultados de Rodríguez y Camargo (en este mismo número de RRNA). Los resultados del presente estudio difieren ligeramente de lo reportado por Cruz (2009), quien encontró que partir del año 7 en plantaciones de guadua de la zona cafetera de Colombia se empiezan a encontrar culmos con diámetros entre 9,05 cm y 10,58 cm, equivalentes al 4,38% del total o 1590 culmos/ha. Según

el autor, siete años es el momento a partir del cual empiezan a emerger culmos con diámetro comercial. El mismo autor reporta para plantaciones en Colombia, la aparición de culmos con diámetros entre los 8,55 y 10,78 cm a los 7 años, equivalentes a 4,3% ó 818 culmos/ha y toma como referente esta edad para el inicio de la emisión de culmos con diámetros comerciales que requerirán madurar para estar aptos para la cosecha.

García y Camargo (en este mismo número de RRNA) investigaron los requerimientos de diámetros para diferentes subsectores productivos que usan guadua como materia prima. Estos fueron: 12,4 cm para artesanías, 11,4 cm para muebles, 11,7 para construcción y 17,1 para laminados. Tales valores distan de los encontrados en la plantación evaluada; si bien el incremento medio anual en el diámetro basal de los nuevos culmos fue de 0,5 cm por año. Entonces, si se mantiene la tasa promedio actual, se requerirían cerca de 12 años para tener culmos con diámetros comerciales. No obstante, después del año cuatro, se observa que la tasa de incremento tiende a aumentar (Fig. 5), lo cual se relaciona seguramente con la disminución del número total de culmos por plántula que se empieza a dar después de los cuatro años (Fig. 2). Lo anterior es consistente con los valores de diámetro más bajos encontrados por Camargo (2006) en bosques de guadua con menor densidad de culmos.

Ajuste de los modelos de regresión

Los modelos de regresión evaluados son funciones de crecimiento (Prodan et ál. 1997) que nunca han sido usadas para las variables evaluadas en este trabajo, y en plantaciones de guadua específicamente. El ajuste mostrado por los modelos no fue el adecuado para todos los modelos; sin embargo, se seleccionó uno para cada variable de acuerdo con los criterios de selección utiliza-

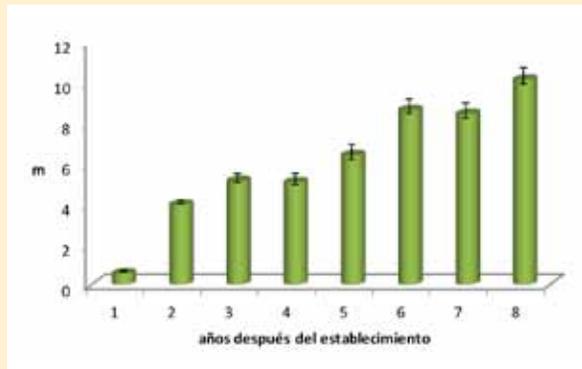


Figura 4. Longitud total del culmo en una plantación de siete años de *Guadua angustifolia* en la finca San Jorge, Pereira Colombia. Líneas verticales representan el error estándar.

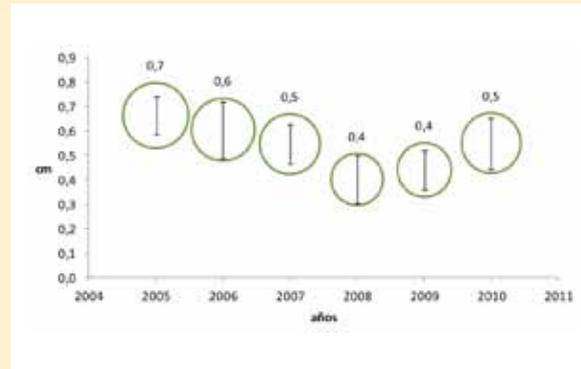


Figura 5. Incremento medio anual del diámetro de culmos nuevos en una plantación de siete años de *Guadua angustifolia* en finca San Jorge, Pereira Colombia. Líneas verticales representan el error estándar.

dos (R^2_{adj} , $RCME$, comportamiento de los residuos y número de parámetros en la ecuación).

A pesar del ajuste que mostraron los modelos para las variables evaluadas, el hecho de que el crecimiento no haya culminado hace que no sea recomendable su aplicación para la predicción de la variable dependiente. En el caso de NCP , el $RCME$ es de ± 10 culmos por planta, para el db es de $\pm 1,45$ cm y para la lt de $\pm 2,4$ m (Cuadro 1). Asimismo, la complejidad observada en el comportamiento de la densidad de culmos implica que la mayoría de funciones que se tratan de ajustar generen valores predichos para un rango reducido de los valores de la variable.

Por otro lado, fue posible ajustar un modelo lineal que describe la relación entre lt y db , con el cual fue posible explicar la variabilidad de la lt en un 90% ($R^2 = 0,90$), con un error de $\pm 1,1m$ ($RCME$). Dicha función se define como $l_t = 1,9061 d_b - 0,3669$. Este tipo de relación ha sido evaluada con modelos de regresión también (pe. Camargo 2006); no obstante, en dicho estudio el ajuste del modelo lineal probado fue más bajo. En la Fig. 6, se puede observar la relación entre l_t y d_b .

Cuadro 1. Modelos de regresión ajustados para las variables de crecimiento

Variable	Modelo	Expresión	R^2_{adj}	$RCME$	p	Referencia
Número de culmos por plántula (N_{CP})	Exponencial	$N_{CP} = b_0 t^{b_1} e^{b_2 t}$	0,83	10	<0,0001	Prodan et ál. (1997)
$b_0 = 32,50465, b_1 = 0,70724, b_2 = -0,28657, t =$ tiempo después del establecimiento en años						
Diámetro basal del culmo (d_b)	Exponencial	$d_b = b_0 t^{b_1} e^{b_2 t}$	0,86	1,45	<0,0001	Prodan et ál. (1997)
$b_0 = 1,646042, b_1 = 0,542607, b_2 = 0,009441, t =$ tiempo después del establecimiento en años						
Longitud total del culmo (l_t)	Hossfeld	$l_t = \frac{t^{b_0}}{(b_1 + (\frac{t}{b_2}))}$	0,88	2,4	<0,0001	Prodan et ál. (1997)
$b_0 = 1,659903, b_1 = 0,142465, b_2 = 2,934162, t =$ tiempo después del establecimiento en años						

Fijación de carbono y contenido de nutrientes en la biomasa

La biomasa total promedio de un ramet en la plantación de guadua evaluada siete años después del establecimiento es de 4,5 kg ($\pm 2,6$). Esta biomasa está localizada principalmente en la parte aérea (74,6%), que incluye las hojas, las ramas y el culmo. Esta proporción se mantiene a través de todos los estados de madurez evaluados, aunque se presentan ciertos cambios en la distribución de la misma entre los componentes aéreos (Fig. 7). En los ramets más jóvenes, la proporción

de la biomasa del culmo es mayor que en las hojas y ramas. Estos ramets tienen mayores dimensiones en el culmo y, por lo tanto, mayor biomasa. A los 12 meses después de haber emergido, un ramet tiene en promedio 4,7 kg ($\pm 1,4$), en tanto que a los 48 meses el contenido de biomasa es de 1,7 kg ($\pm 0,5$). Es evidente, entonces, la relación entre la edad de la plantación y la cantidad de biomasa. Estos resultados coinciden con lo encontrado por Riaño et ál. (2002) para la planta completa.

El contenido de CO_2 que puede fijar la plantación evaluada siete

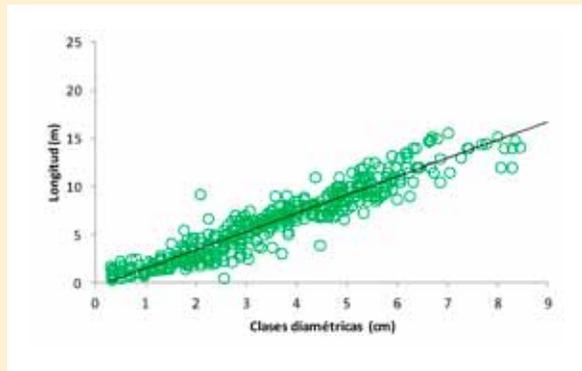


Figura 6. Relación entre la longitud total del culmo (l) y el diámetro basal (d^b), en una plantación de siete años de *Guadua angustifolia* en finca San Jorge, Pereira Colombia.

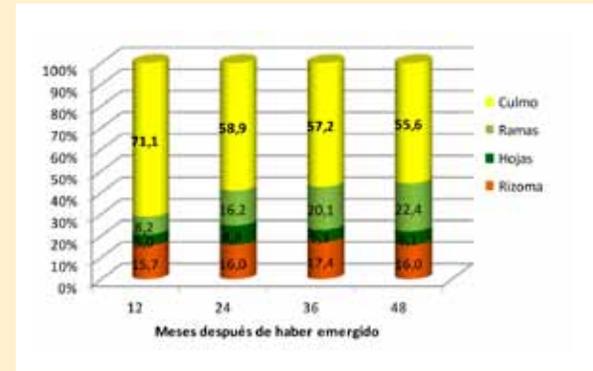


Figura 7. Distribución de la biomasa por compartimento y estado de madurez en ramets provenientes de una plantación de *Guadua angustifolia* de siete años en finca San Jorge, Pereira Colombia.

años después de establecida es de 76,6 t/ha ($\pm 39,6$), de las cuales el 83% está alojado en la biomasa aérea. Esta estimación se hace teniendo en cuenta la proporción de culmos en diferente estado de madurez y su biomasa asociada, como base para el cálculo de la densidad total de culmos por hectárea. Cuando se usa un valor de densidad total de culmos sin tener en cuenta el estado de madurez, se puede incurrir en una sobreestimación cercana al 27% en la plantación evaluada; o sea, 21 t/ha más de CO_2 debido a que se contabiliza el mismo número de culmos para todos los estados de madurez (Fig. 8). Por lo anterior si se quieren hacer mejores estimaciones de biomasa, es necesario que en el inventario se tenga en cuenta el grado de madurez de los culmos en los ramets evaluados y que la extrapolación a la hectárea se haga según la proporción de culmos en cada grado de madurez. Los valores de carbono en el mantillo y en el suelo a 0,5 m de profundidad, fueron de 10,7 t/ha y 524,2 t/ha respectivamente; o sea que el total de CO_2 almacenado por el sistema es de 611,45 t CO_2 /ha. Este valor de CO_2 total es cercano al estimado por Camargo et ál. (2007) para bosques naturales de guadua (812,2 t CO_2 /ha, aunque en dicho

estudio no se midió el mantillo y las estimaciones en la biomasa aérea se hicieron de forma indirecta a partir de valores de densidad de la madera y el volumen.

En una plantación de guadua de seis años con 8640 culmos/ha, Riaño et ál. (2002) estimaron un contenido total de CO_2 de 54 t/ha, donde el 80,1% correspondió a biomasa aérea. En el Cuadro 2 se ofrecen valores de fijación de carbono de algunas especies de bambú y de árboles. Como se ve, los valores encontrados en este estudio se encuentran dentro del rango de los estudios referenciados, aunque los resultados no son comparables ya que se trata de especies distintas, en condiciones diferentes y de diferentes edades.

El análisis de nutrientes en la biomasa contribuye a generar información que oriente las prácticas de fertilización. Puesto que este análisis permite conocer la cantidad y proporción de elementos que se almacenan en la biomasa, se podrían dar mejores orientaciones respecto a las necesidades nutricionales de la planta. El análisis de los nutrientes en los distintos compartimentos de la biomasa permitió determinar que, de los minerales en la biomasa, el silicio es el más abundante seguido

del potasio y el fósforo. En estudios sobre guadua realizados por Sanabria y De Wilde (1995), el silicio también mostró ser el elemento más abundante. Aunque el contenido de este elemento aumenta con el tiempo en cada compartimento, su proporción tiende a ser mayor en los culmos. No obstante, como las dimensiones son mayores en los nuevos ramets, los valores más altos se encontraron en los ramets más jóvenes (Fig. 9). En el caso de las hojas, las ramas y el rizoma, el contenido de silicio fue menor en los ramets más jóvenes, lo que seguramente tiene que ver con la cantidad y/o el tamaño.

Conclusiones

■ A pesar de los altos valores de densidad total de culmos por hectárea durante los dos primeros años, con el tiempo esta variable tiende hacia valores más cercanos a los encontrados en bosques naturales de guadua. Este incremento, sin embargo, puede tener incidencia en las dimensiones de los culmos, ya que debido a la congestión se alarga el momento de tener culmos con dimensiones comerciales y con un adecuado nivel de madurez. En este sentido, el tiempo para empezar a cose-

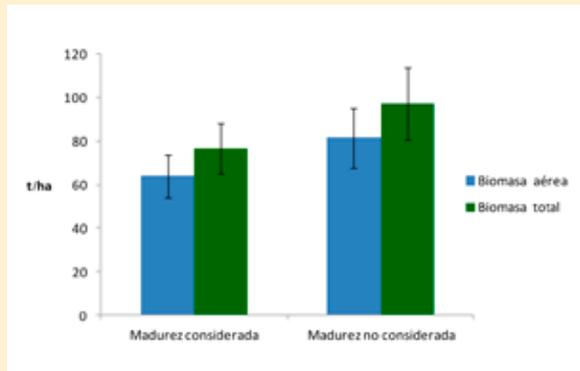


Figura 8. Dióxido de carbono (CO₂) fijado por la biomasa en una plantación de *Guadua angustifolia* de siete años en Finca San Jorge, Pereira Colombia.

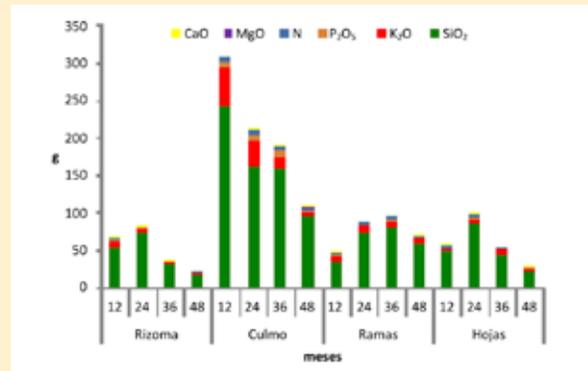


Figura 9. Contenido de calcio (CaO), magnesio (MgO), nitrógeno (N), fósforo (P₂O₅), potasio (K₂O) y silicio (SiO₂) en la biomasa por compartimentos y estado de madurez de una plantación de *Guadua angustifolia* de siete años en finca San Jorge, Pereira Colombia.

char los culmos (turno) depende del momento en que los culmos alcancen dimensiones comerciales, más cinco años que tardan en promedio para alcanzar una adecuada madurez. Por lo anterior, se deben adoptar estrategias que ayuden a mejorar el desarrollo de los culmos –por ejemplo, un espaciamiento adecuado; en el caso que nos ocupa no fue el más acertado-. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el crecimiento siempre dependerá de las condiciones de sitio, por lo que es importante ser prudentes a la hora de decidir que una plantación de guadua es apta para la cosecha de culmos comerciales.

- Factores como el comportamiento de las variables y la juventud de la plantación –por lo que el crecimiento aún no ha culminado- reducen la posibilidad de usar modelos de regresión para la predicción del crecimiento. Las funciones de tipo exponencial fueron las más adecuadas; sin embargo, es probable que otro tipo de funciones con el tiempo sean más eficientes para mejorar la aproximación a la predicción de estas variables.

Cuadro 2. Valores de fijación de carbono por algunas especies de bambú y árboles en plantaciones

Especie	Culmos /ha	t C/ha (Edad)	Referencia
Bambú			
<i>Guadua angustifolia</i>	11.827	20,9 (7 años)	Este estudio
<i>Bambusa oldhammi</i>	10.101	51,98* (7 años)	Castañeda-Mendoza et ál. (2005)
<i>Phyllostachys heterocycla</i>		40,6*	Tian-Ming y Joou-Shian (2011)
<i>Phyllostachys heterocycla</i>		9,9 – 34,16*	Xiaojun et ál. (2011)
<i>Phyllostachys heterocycla</i> var. pubescens)		37,1	Huaqiang et ál. (2011)
<i>Phyllostachys pubescens</i>	3300	3,1** (10 años)	Yiping et ál. (2010)
<i>Phyllostachys pubescens</i>		91*(5-8 años)	Isagi et ál. (1997)
<i>Bambusa bambos</i>		149* (6 años)	Shanmughavel y Francis (2002)
Árboles			
<i>Cunninghamia lanceolata</i>		99,5*(5 años)	Tian-Ming y Joou-Shian (2011)
<i>Eucalyptus grandis</i>		40,35*(5 años)	Gutiérrez et ál. (2006)
<i>Cordia alliodora</i>		41,85*(5 años)	Gutiérrez et ál. (2006)
<i>Pinus patula</i>		49,65**(5 años)	Gutiérrez et ál. (2006)

*carbono aéreo

**promedio de carbono neto anual

- Las plantaciones de guadua pueden funcionar como sumideros de CO₂. Los cambios en la capacidad de fijación dependen de la edad de la plantación, del crecimiento y de la madurez de los culmos. A mayor edad de la plantación, se tienen ramets con culmos de mayores dimensiones y, por lo tanto, con más biomasa. En este sentido, un espaciamiento inadecuado puede

ir en detrimento de la capacidad de la plantación para fijar carbono. Las estimaciones de biomasa pueden variar considerablemente en función de la edad, el sitio y el manejo. Con el propósito de contribuir a reducir esta variabilidad y dar mejores estimaciones se recomienda considerar en el inventario el estado de madurez de los culmos.

- El análisis de nutrientes en la biomasa permite conocer la cantidad y proporción de elementos que se almacenan en la biomasa; en este caso se tuvo en cuenta, además, el estado de madurez y la edad de la plantación, lo que permitiría dar mejores orientaciones en cuanto a las necesidades nutricionales de la planta. 

Agradecimientos

Queremos agradecer especialmente a nuestro amigo Gabriel German Londoño Q.E.P.D., propietario de la finca San Jorge, por su apoyo incondicional a las labores de investigación y sus valiosos consejos. Este trabajo se realizó en el marco del proyecto “Tecnología para definir la madurez del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth: una contribución al desarrollo forestal del eje cafetero colombiano”, con el código 1110-452-21121 financiado por Colciencias y ejecutado por la Universidad Tecnológica de Pereira. Agradecemos también a Giovanni Grajales y todos aquellos que han contribuido al manejo y cuidado de la plantación.

Literatura citada

- Arango, AM. 2011. Posibilidades de la guadua para la mitigación del cambio climático; caso: Eje Cafetero Colombiano. Trabajo de Pregrado. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales. 113 p.
- Arango, AM; Camargo, JC. 2012. Bosques de guadua del Eje Cafetero de Colombia: oportunidades para su inclusión en el mercado voluntario de carbono y en el Programa REDD+. Recursos Naturales y Ambiente. 61: 71-79.
- Arias, L; Camargo, J; Cardona, H. 2008. Carbono orgánico edáfico en rodales de *Guadua angustifolia* Kunth y en pasturas arborizadas en la zona cafetera de Colombia. In Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, JF. (Eds.). Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo. Cali, Colombia, Fundación CIPAV. p. 245-261.
- Camargo, JC. 2006. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth in the Coffee Region of Colombia. Ph.D. Thesis. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 205 p.
- Camargo, JC; Kleinn, C. 2010. Length curves and volume functions for Guadua bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) for the coffee region of Colombia. European Journal of Forest Research 129(6): 1231-1222.
- Camargo, JC; Dossman, MA; Cardona, G; García, JH; Arias, LM. 2007. Zonificación detallada del recurso guadua en el Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca, municipios piloto del Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia (Guía metodológica y resultados). Pereira, Colombia, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Universidad Tecnológica de Pereira, y Corporaciones Autónomas Regionales del Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca. 144 p.
- CARDER (Corporación Autónoma Regional de Risaralda). 2000. Perspectivas regionales del cultivo de la guadua. In Memorias, Seminario: La guadua como alternativa económica. Pereira, Colombia, Gobernación de Risaralda, Comité de Cafeteros.
- Castañeda-Mendoza, A; Vargas-Hernández, J; Gómez-Guerrero, A; Valdéz-Hernández, JI; Vaquero-Huerta, H. 2005. Acumulación de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. Agrociencia 39(1):1405-3195.
- Cruz, H. 1994. La guadua nuestro bambú. Armenia, Quindío, Colombia, CRQ y Centro Nacional para el Estudio del Bambú y la Guadua. 293 p.
- Cruz, H. 2009. Bambú-Guadua *Guadua angustifolia* Kunth: bosques naturales en Colombia; plantaciones comerciales en México. Pereira, Colombia. 690 p.
- García, JH. 2004. Definición de áreas óptimas de calidad de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) orientada a satisfacer las necesidades del mercado. Tesis Mag. Sc. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. 110 p.
- García, JH; Camargo, JC. 2012. Condiciones de calidad de *Guadua angustifolia* para satisfacer las necesidades del mercado en el Eje Cafetero de Colombia. Recursos Naturales y Ambiente. 61: 61-70.
- Giraldo, E; Sabogal, A. 1999. Una alternativa sostenible: la guadua, técnicas de cultivo y manejo. Armenia, Quindío, Colombia, Corporación Autónoma Regional del Quindío. 192 p.
- Gutiérrez, VH; Zapata, M; Sierra, C; Laguado, W; Santacruz, A. 2006. Maximizing the profitability of forestry projects under the clean development mechanism using a forest management optimization model. Forest Ecology and Management 226: 341-350.
- Hill, T; Lewicki, P. 2007. Statistics: Methods and applications. Statsoft, Tulsa.
- Huaqiang, D; Guomo, Z; Hongli, G; Wenyi, F; Xiaojun, X; Weiliang, F; Yongjun, S. 2011. Satellite-based carbon stock estimation for bamboo forest with a non-linear partial least square regression technique. International Journal of Remote Sensing (33)6: 1917-1933.
- Isagi, Y; Kawahara, T; Kamo, K; Ito, H. 1997. Net production and carbon cycling in a bamboo *Phyllostachys pubescens* stand. Plant-Ecology 130(1): 41-52.
- Judziewicz, EJ; Clark, LG; Londoño, X; Stern, M. 1999. American bamboos. Washington D.C., Smithsonian Institution Press. 392 p.
- Kleinn, C; Morales, D. 2006. An inventory of Guadua (*Guadua angustifolia*) bamboo in the Coffee Region of Colombia. European Journal of Forest Research 125(4):361-368.
- MacDicken, KG; Brewbaker, JL. 1988. Growth rates of five tropical leguminous fuel wood species. Journal of Tropical Forest Science 1(1): 85-93.
- Márquez, L; Roy, A; Castellanos, E. (Eds.). 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Guatemala, Guatemala, Fundación Solar; Hivos, UVG, Winrock International, PROARCAS/CAPAS. 31 p. Disponible en <https://www.winrock.org/fnrm/files/fundacionsolar.pdf>
- McClure, FA. 1966. The bamboos. Washington D.C., Smithsonian Institution Press.
- Prodan, M; Peters, R; Cox, F; Real, P. 1997. Mensura forestal. San José, Costa Rica, GTZ-IICA. 560 p. (Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible).
- Riaño, NM; Londoño, X; López, Y; Gómez, JH. 2002. Plant growth and biomass distribution on *Guadua angustifolia* Kunth in relation to ageing in Valle del Cauca-Colombia. Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society 16(1): 43-51.
- Rijal, B. 2006. Methodological assessment of sample based bamboo management inventory in Colombia. A partial requirement for M.Sc. in Forestry. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 79 p.
- Rodríguez, JA; Camargo, JC; Suárez Franco, TD. 2012. Determinación en campo de la madurez de culmos de *Guadua angustifolia* en el Eje Cafetero de Colombia. Recursos Naturales y Ambiente, 61: 94-100.
- Sanabria, J; De Wilde, A. 1995. Informe final de las investigaciones en la granja experimental de guadua La Pedrera. Risaralda, Colombia, CARDER. 17 p.
- Shanmughavel, P; Francis, K. 2002. The dynamics of biomass and nutrients in bamboo (*Bambusa bambos*) plantations. Journal of Bamboo and Rattan 1(2):157-170.
- Tian-Ming, Y; Joou-Shian, L. 2011. Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. Forest Ecology and Management 261: 995-1002.
- Xiaojun, X; Huaqiang, D; Guomo, Z; Hongli, G; Yongjun, S; Yufeng, Z; Weiliang, F; Wenyi, F. 2011. Estimation of aboveground carbon stock of Moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*) forest with a Landsat Thematic Mapper Image. Journal of Remote Sensing 32(5): 1431-1448.
- Yiping, L; Yanxia, L; Buckingham, K; Henley, G; Guomo, Z. 2010. Bamboo and climate change mitigation. Red Internacional del Bambú y el Ratán (INBAR). Technical Report No. 32. Disponible en: www.INBAR.int
- Venegas, A. 1993. La silvicultura de la guadua en Colombia (reforestación y aprovechamiento). Memorias I Congreso Mundial de Bambú/Guadua. [1993, Pereira, Colombia]. p. 69-72.

Instrumentos de gestión para el manejo de bosques de guadua en el Eje Cafetero colombiano

Juan David Suárez Franco¹;
José Alexander Rodríguez¹

En los bosques de guadua de Colombia se realizan esfuerzos novedosos que no se han hecho con ningún otro tipo de ecosistema boscoso del país. Estos esfuerzos han generado diferentes instrumentos de gestión que pueden ser aplicados por productores y técnicos para su manejo adecuado.



Foto: Grupo de Investigación GATA.

¹ Investigador, Universidad Tecnológica de Pereira. Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. Facultad de Ciencias Ambientales. jdsuarez@utp.edu.co; pauloalejo@uto.edu.co

Resumen

En torno a los bosques de guadua ya se han dado diferentes procesos de manejo desde lo político, lo legal y lo organizacional. Tales procesos han permitido generar instrumentos para el mejoramiento de las condiciones de manejo, su orientación hacia la sostenibilidad y la búsqueda de beneficios para los productores. Con el propósito de contribuir a la generación de estrategias para la gestión integrada del recurso guadua, estos instrumentos fueron analizados en términos de su contribución a un mejor funcionamiento de las organizaciones que realizan actividades económicas a partir del recurso. Se evidencia que la incorrecta aplicación de los instrumentos de manejo silvicultural tiene que ver, en parte, con el desconocimiento de las herramientas existentes y una designación equivocada de las actividades de manejo. De otro lado, iniciativas como los núcleos forestales productivos están bien enfocadas pero su implementación requiere ajustes estructurales internos y el apoyo decidido de las instituciones regionales. En el caso de la certificación forestal voluntaria, es evidente su contribución al mejoramiento de las condiciones locales, pero la ausencia de precios diferenciados para productos certificados ha ido en detrimento de la motivación e interés de los productores por mantenerse dentro del esquema de certificación. No obstante, los productores consideran que estas condiciones cambiarán en un futuro cercano y podrán acceder a los beneficios que la certificación forestal representa.

Palabras claves: *Guadua*; bambúes; bosques; manejo de recursos; gestión; planificación; certificación; zona cafetera; Colombia.

Summary

Tools for managing bamboo forests in the Colombian coffee eco-region. In order to improve the management conditions of guadua bamboo forest in the Colombian coffee eco-region, different political, legal and organisational processes have been carried out. As a result, some tools have been developed for the sustainable management of these forests and for improving livelihood conditions of farmers. This work was aimed at analysing the contributions of these tools to improving guadua-based rural organisations. It was found that the inadequate application of silvicultural practices is a consequence of the unawareness of available tools and a wrong assignation of managing activities. Also, initiatives such as the forest production units are well oriented, but its implementation requires an internal restructuring, as well as real support from regional institutions. The voluntary forest certification has considerably contributed to improve the organisational conditions, although some farmers involved in this initiative have declined due to the fact that better prices for certified guadua products are not available yet. Nevertheless, a group of enthusiastic farmers is seriously involved with this process and struggling for getting the benefits that certification implies.

Keywords: *Guadua*; bamboos; forests; resource management; management; planning; certification; coffee zone; Colombia.

Introducción

En la región cafetera de Colombia, los bosques de guadua han proveído tradicionalmente de materia prima para diferentes aplicaciones domésticas

en el área rural. En años recientes, la guadua ha empezado a generar ingresos por la venta de materia prima para la fabricación de muebles y artesanías, la construcción y la elaboración de productos indus-

triales. Han surgido, así, empresas dedicadas a la elaboración y venta de artesanías, muebles y laminados (Becker et ál. 2004, Held 2005). La mayor cantidad de fincas proveedoras de la materia prima la venden

como guadua rolliza, por lo que no perciben ingresos adicionales por valor agregado; solo en pocos casos dan tratamientos de preservación y secado. El éxito de estas empresas rurales depende en gran parte del grado de organización, de los procesos que integran el manejo, cosecha y venta de productos y de que exista un marco político e institucional apropiado.

En el Eje Cafetero han surgido propuestas de planificación forestal para la ordenación de los bosques (Camargo et ál. 2007), la consolidación de núcleos forestales (Camargo et ál. 2010) y el mejoramiento de la gobernanza forestal (Bosques FLEGT/Colombia 2010), las cuales han permitido impulsar procesos de certificación forestal voluntaria (FSC 2002) y estudios de mercado (Held 2005, Becker et ál. 2004). Estos estudios ofrecen elementos importantes para el desarrollo y fortalecimiento de empresas rurales a partir de la guadua; no obstante, su aplicación aún es incipiente y en algunos casos, desarticulada. Por ello, en este trabajo se analizó el estado actual de los procesos de planificación forestal y certificación voluntaria de guaduales, así como los niveles de organización y otros instrumentos de gestión empleados en el Eje Cafetero colombiano. Se resaltan las debilidades y fortalezas

y, a partir de allí, se generan algunas recomendaciones que conducen a una mejor aplicación, articulación y apropiación de los mismos.

Área de estudio

El área de estudio para este trabajo corresponde a la región del Eje Cafetero en los departamentos de Valle del Cauca, Tolima, Risaralda, Caldas y Quindío, entre los 900 y los 2000 msnm. Adicionalmente, para la definición con mayor detalle de algunos aspectos se consideró el Núcleo Forestal Productivo de Guadua La Esmeralda, localizado en el municipio de Montenegro, Quindío.

Evaluación de los procesos de planificación forestal

La evaluación de los procesos de planificación se basó en el estudio de zonificación detallada de guaduales (Camargo et ál. 2007), el cual permitió definir los núcleos forestales productivos de guadua (Moreno 2006, Camargo et ál. 2010); además se consideraron los términos de referencia para la formulación de planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guaduales (TRMSBG) (Camargo et ál. 2008). En los departamentos de Quindío, Tolima y Risaralda se realizaron procesos de acercamiento y recolección de información a través de las propuestas de núcleos forestales productivos de

guadua (NFPG) ya existentes en La Esmeralda, El Líbano y Colombia.

La definición de los puntos críticos en la formulación de los planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guaduales se realizó mediante la aplicación de encuestas a cada uno de los actores principales (propietarios, asistentes técnicos y técnicos de las Corporaciones Autónomas Regionales). Esta evaluación se hizo en fincas individuales y en iniciativas de NFPG. Para el caso de los NFPG, se establecieron de manera participativa las ventajas y desventajas de los diferentes esquemas de operación disponibles. Además, se hizo una revisión de instrumentos o mecanismos que permitieran la articulación de los planes de manejo y el aprovechamiento en los diferentes niveles de organización de los NFPG. Finalmente, se generaron recomendaciones para facilitar la implementación de los planes de manejo bajo la figura de NFPG.

Estado actual de la certificación forestal

Para evaluar el estado actual de la certificación forestal voluntaria bajo el esquema del FSC (*Forest Stewardship Council*) se analizaron las fincas y organizaciones que han logrado la certificación, así como la percepción de los productores y consumidores de guadua al respecto.



Consulta de las iniciativas de NFPG con expertos, técnicos y propietarios



Manejo inadecuado de guaduales por alta intensidad de cosecha

Fotos: Grupo de Investigación GATA

Posteriormente, se analizó el contexto global y local para determinar las ventajas y oportunidades que los productores tienen al acogerse a este esquema. Para lograr un mayor grado de detalle, se hizo énfasis en un caso específico: el NFPG La Esmeralda.

Resultados y discusión

Determinación de puntos críticos en la aplicación de los TRMSBG

De la evaluación de los TRMSBG se logró concertar los puntos más críticos para su aplicación en los distintos departamentos donde fueron evaluados. En la fase de inventario, la definición del tamaño de la muestra es el punto más crítico, no por la dificultad de cálculo sino por los costos en términos de esfuerzo y dinero que el muestreo de las parcelas implica.

En la fase de elaboración de un plan de manejo de guaduales, los beneficios económicos que perciben los asistentes técnicos están lejos de ser una buena alternativa económica. Esto es consecuencia de lo incipiente de las empresas y/o negocios, que todavía no generan muchos excedentes. Como resultado, los asistentes técnicos buscan reducir costos y esfuerzos de muestreo. Además, estos trabajadores no han logrado un buen nivel de apropiación de las herramientas existentes para optimizar el proceso de inventarios; en consecuencia, tal proceso puede resultar más complejo de la cuenta.

En la fase de aplicación del plan de manejo se evidenció un punto crítico vital: por lo general, la ejecución de las prácticas silviculturales antes y después de la cosecha es responsabilidad de los mismos encargados del aprovechamiento (guadueros). Esto no garantiza la correcta aplicación de las prácticas silviculturales pues hay un interés particular en la cosecha, que es la que les genera ingresos ya que los guadueros son pagados por el número de culmos cosechados. Este esquema no solamente genera problemas en la ejecución de

las prácticas silviculturales, sino que puede conducir incluso a un proceso de sobre-aprovechamiento o corta de culmos que no cumplen con los requisitos de calidad adecuados.

Para los asistentes técnicos y operadores, otro aspecto crítico es la falta de homogeneidad en la aplicación de controles durante la ejecución del plan de manejo. En algunas de las CAR se han establecido exigencias que van más allá de lo definido en los TRMSBG. Esto hace que, dependiendo del departamento en donde se encuentre el bosque a ser manejado, el proceso de aplicación del plan y la obtención de permisos varíe con las particularidades de cada CAR.

Esquemas de operación de NFPG

Los esquemas de operación definidos en la propuesta de NFPG son: suministro de materia prima, participación, contrato y compra de materia prima (Moreno 2006). En estos esquemas se define claramente la figura y el papel que cumple cada uno de los actores involucrados en el proceso (operador, guadiero, propietario y asistente técnico). Hay que hacer notar, sin embargo, que no en todos los casos están presentes todos los actores y que alguno puede cumplir más de uno de los roles.

Estos esquemas no han sido bien acogidos por las iniciativas de NFPG, ya sea porque los consideran muy complejos o porque los mismos núcleos son aún muy incipientes. El NFPG La Esmeralda, por ejemplo, ha adoptado un esquema más simple, similar al de cuentas por participación donde el operador asume el manejo, la asistencia técnica y la comercialización a cambio de una participación en las ganancias.

El trabajo de los NFPG es aún muy incipiente por lo que todavía no es conveniente evaluar la forma como son operados. A esta situación contribuye el hecho de que en las CAR que promovieron la iniciativa,

la figura aún no ha sido bien acogida y, por lo tanto, no es posible simplificar partes del proceso de aprobación del plan, lo cual es uno de los propósitos de la conformación de los NFPG (Suárez 2011).

En el NFPG La Esmeralda se ha alcanzado un cierto nivel de consolidación; de hecho, esta es la primera propuesta que funciona como núcleo. La Esmeralda cumple con los requisitos para conformar un núcleo a pesar de ser un área relativamente pequeña conformada por siete fincas que en total suman 10,2 ha de guaduales. Se destacan entre sus atributos el tamaño de las fincas (pequeñas), la presencia de guaduales y la cercanía entre los mismos. Bajo estas circunstancias, la vía más práctica para lograr la comercialización de los productos es el núcleo, porque de manera individual sería poco viable. Aunque el NFPG La Esmeralda funciona, su estructura organizacional es poco sólida, lo que acarrea problemas administrativos asociados especialmente con la definición de los roles de los actores participantes. Su consolidación dependerá de ajustes internos que implican la reestructuración de su modelo organizacional, así como del marco legal en el que se sustenta.

Estado actual de la certificación forestal

El proceso de certificación forestal voluntaria en el Eje Cafetero ha sido el primero en bosques de bambú del país. Hasta ahora, 51 ha de bosques naturales de guadua han sido certificadas en tres departamentos de la región: 36,2 ha en Risaralda, 11,3 ha en Quindío y 3,5 ha en Tolima. Este ha sido un proceso de certificación grupal bajo los auspicios de Corguadua (Corporación para el Manejo Sostenible de Guaduales). Este organismo es el que recibe la certificación grupal y se encarga de coordinar con las unidades forestales todas las actividades para dar cumplimiento al proceso de certifi-

cación. De esta manera, se pretende reducir los costos que la certificación forestal voluntaria implica, al haber una sola instancia encargada de las labores de administración. No obstante, al recibirse un solo sello para todas las unidades forestales involucradas, cualquier cosa que suceda en una de las fincas afecta a todas las demás (Galvis y Gañán 2011); o sea que si una no cumple, todas pierden.

Además de la reducción de costos, esta iniciativa tiene otras ventajas como el trabajo en grupo y la cooperación entre los miembros. No obstante, los productos de guadua certificada no han logrado precios preferenciales en el mercado; asimismo, algunos productores que se involucraron inicialmente no pudieron mantener los niveles de cumplimiento de los requisitos que la certificación exige y optaron por retirarse. A pesar de estos traspiés, las entrevistas con los diferentes actores evidenciaron una percepción positiva hacia la certificación. Los productores sienten que la certificación contribuye considerablemente a la organización empresarial porque los procesos administrativos

y contables se ordenan y se ajustan. De la misma manera, mejora el nivel de compromiso de los trabajadores por las condiciones favorables para la mano de obra que la certificación exige. A pesar de que el sello de la certificación no genera un precio especial, hay confianza de que en el futuro las condiciones de mercado cambien de manera favorable y se generen beneficios que alienten la incursión definitiva en el mercado de productos certificados.

Conclusiones

■ Los esfuerzos realizados hasta el momento con los bosques de guadua en Colombia son novedosos y no se han hecho con ningún otro tipo de ecosistema boscoso del país. Estos esfuerzos han permitido generar diferentes instrumentos de gestión que pueden ser aplicados por productores, técnicos e instituciones para el manejo adecuado de guaduales. La buena aplicación de los mismos dependerá de un buen nivel de conocimientos y una adecuada promoción entre quienes se encargan de esta labor.

- Entre las propuestas desarrolladas para orientar el manejo de los bosques de guadua están los núcleos forestales productivos; no obstante, tales instrumentos deben ser flexibilizados y adaptados a las condiciones particulares de cada sitio.
- Es urgente buscar nuevas y mejores opciones de mercado para los productores de guadua, especialmente para aquellos que han hecho esfuerzos por mantenerse dentro del esquema de certificación forestal voluntaria. Este grupo de productores está altamente motivado, pero tal motivación debe ser alimentada con opciones reales que permitan mejorar sus condiciones de vida.

Agradecimientos

Este estudio se realizó en el marco del proyecto 1110452-21121 "Tecnologías para definir la madurez del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth: una contribución al desarrollo forestal del eje cafetero colombiano", Contrato 442-1-2008, financiado por Colciencias y la Universidad Tecnológica de Pereira. Agradecemos el apoyo recibido.

Literatura citada

- Becker, M; Held, C; Stratz, J. 2004. Bamboo markets in Western Europe: Perspectives for guadua products. Proceedings of International Symposium on Guadua. (Pereira, Colombia, 2004).
- Bosques FLEGT/Colombia. 2010. Informe final Proyecto Bosques FLEGT/Colombia. Corporación Autónoma Regional de Risaralda, Corporación Autónoma Regional del Quindío, Corporación Autónoma Regional del Tolima, Corporación Autónoma Regional de Norte de Santander / Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Camargo, JC; Dossman, MA; Cardona, G; García, JH; Arias, LM. 2007. Zonificación detallada del recurso guadua en el Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca, municipios piloto del Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia (Guía metodológica y resultados). Pereira, Colombia, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Universidad Tecnológica de Pereira, y Corporaciones Autónomas Regionales del Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca.
- Camargo, JC; Morales, T; García, JH. 2008. Términos de referencia para la formulación de planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guaduales. Pereira, Colombia, Proyecto Bosques FLEGT/Colombia. 70 p.
- Camargo, JC; García, JH; Cardona, G; Charry, AM. 2010. Núcleos forestales productivos de guadua en los departamentos de Quindío, Risaralda y Tolima en el marco del proyecto Bosques FLEGT/Colombia. Pereira, Colombia, Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos, Universidad Tecnológica de Pereira, Corporaciones Autónomas Regionales de Quindío, Tolima, Risaralda.
- FSC (Forest Stewardship Council). 2002. Estándar Internacional FSC: Principios y Criterios del FSC para el Manejo Forestal (versión 4-0). Consultado 3 ago 2010. http://www.fsc.org/fileadmin/webdata/public/document_center/Current_consultations/FSC-STD-01-001_V4-0_ES_FSC_Principles_and_Criteria.pdf. pp. 4-10.
- Galvis, F; Gañán, M. 2011. Estado actual de la certificación forestal voluntaria bajo el esquema del FSC en bosques de guadua del Eje Cafetero: caso de estudio Núcleo Forestal de Guadua La Esmeralda (NFGLE). Trabajo de Grado para optar al título de Administradora Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. 89 p.
- Held, C. 2005. Promotion of innovations in forest based small and medium size enterprises of developing countries: An actor-oriented analysis of the Colombian bamboo sector. Ph.D. dissertation. Freiburg University, Deutschland. 223 p.
- Moreno, RD. 2006. Lineamientos generales para la conformación y operación de núcleos forestales productivos para la guadua. Pereira, Colombia, Programa Ambiental GTZ, Proyecto Manejo Sostenible de Bosques para Colombia.
- Suárez, JD. 2011. Estrategias para el manejo y aprovechamiento de guaduales bajo el esquema de núcleos forestales productivos de guadua. Trabajo de Grado para optar al título de Administrador Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. 71 p.

Determinación en campo de la madurez de culmos de *Guadua angustifolia* en el Eje Cafetero de Colombia

José Alexander Rodríguez¹;
Juan Carlos Camargo García²;
Juan David Suárez Franco¹

Estrategias como la marcación de los culmos en su estado juvenil (6 meses después de haber emergido) permiten garantizar que el aprovechamiento se haga en el momento más adecuado y que el material cosechado sea de la mejor calidad. La selección del método de marcado debe formar parte del manejo silvicultural de los guaduales; por lo tanto, se recomienda que las personas que realicen el aprovechamiento sean quienes lo escojan, según su conveniencia y las posibilidades de implementación.



Foto: Grupo de Investigación GATA.

¹ Investigador, Universidad Tecnológica de Pereira. Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. Facultad de Ciencias Ambientales. pauloalejo@uto.edu.co; jdsuarez@utp.edu.co

² Profesor Titular, Universidad Tecnológica de Pereira. Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. Facultad de Ciencias Ambientales. jupipe@utp.edu.co

Resumen

Con el propósito de contribuir a la determinación de la madurez de los culmos de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth), se evaluaron tres formas de marcado (pintura, marcador y láminas de aluminio) en bosques naturales de guadua localizados en dos sitios del Eje Cafetero de Colombia. Se identificaron y marcaron 574 culmos recientemente emergidos. La mejor opción en términos de tiempo empleado y costos requeridos resultó ser el uso de pintura (2 minutos y US\$0,08 por culmo). Esta opción no requiere un punto específico de marcado en el culmo y es fácilmente identificable desde la distancia, lo que facilita las labores de monitoreo y planificación de la cosecha. La práctica de marcado de culmos debe incorporarse a las prácticas de manejo silvicultural como una forma de garantizar no sólo el nivel idóneo de madurez para la cosecha, sino además la información requerida en el inventario de variables, como el diámetro y los culmos nuevos. Adicionalmente, la marcación de culmos ofrece a los productores mejores posibilidades de cosechar culmos de calidad apropiada, teniendo en cuenta la asociación que existe entre madurez, propiedades físico-mecánicas y contenido de lignina.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; bosques; culmo; métodos; identificación; zona cafetera; Colombia.

Summary

On-field determination of *Guadua angustifolia* maturity in the Colombian coffee eco-region.

In order to contribute to on-field determination of *Guadua angustifolia* Kunth culms maturity, three different approaches of labelling were assessed (painting, fel-pen marking and aluminium tags). The study was carried out within natural guadua stands located in two sites of the coffee region in Colombia. A total of 574 culms were identified and labelled. In terms of time and costs, the best option was the labelling with paint (2 minutes and US\$0.08/culm). This option does not require a specific point for labelling and it can be easily identified in the distance, therefore monitoring and harvest planning might be also simplified. Culm labelling should be part of the silvicultural management practices to guarantee not only the ideal maturity level for cropping, but also the necessary information on variables such as diameter or culm dynamics. Culm labelling provides farmers with an excellent tool for harvesting mature culms because of the association among culm maturity, physical and mechanics properties and lignin content.

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; forests; culms; methods; identification; coffee zone; Colombia.

Introducción

La calidad de la materia prima del recurso guadua depende en gran parte del estado de madurez de los culmos, ya que las propiedades físico-mecánicas y las características químicas de los mismos cambian con el tiempo (Correal y Arbeláez 2010, Duque y Lara 2010, Moreno 2006a). Por esta razón, es necesario definir el tiempo en el cual un culmo alcanza

las condiciones óptimas de madurez para la cosecha. Por la forma de crecimiento de la guadua, no es factible asociar la madurez con sus dimensiones (diámetro y longitud del culmo), ya que los valores máximos de estas variables se alcanzan en promedio seis meses después de que el culmo haya emergido (Camargo 2006, Judziewicz et ál. 1999, Moreno 2006b). El proceso de maduración se expresa inicialmente

con el cambio de los meristemos dentro de los internudos (Liese y Weiner 1996) hasta lograr el desarrollo de las fibras y la lignificación (Liese y Weiner 1997, Liese y Weiner 1996, Liese 1995). En consecuencia, la resistencia de los culmos cambia con el estado de madurez (Gritsch et ál. 2004, Ortega y Zuluaga 2006, Correal y Arbeláez 2010, Duque y Lara 2010, Camargo et ál. 2011).

Para los procesos de industrialización de la guadua se requiere información precisa en varios campos como el inventario (Camargo et ál. 2007a, b), el buen manejo forestal (Camargo 2006) y la calidad de los culmos (Camargo 2006, García 2004). Dicha información permite obtener materia prima con mejores posibilidades para la elaboración de productos de calidad. Por lo anterior, es factible definir el tiempo que tarda el culmo en desarrollar las mejores condiciones para ser cosechado. Estas condiciones -o el proceso de madurez- pueden variar con las características de sitio (García 2004, Camargo et ál. 2011). En guaduales naturales de la zona cafetera de Colombia, la madurez se alcanza entre los 4 y 5 años después de que los culmos han emergido (Correal y Arbeláez 2010, Duque y Lara 2010, Camargo et ál. 2011). No obstante, en la región la madurez se define por características externas como el color del culmo o la presencia de líquenes u hongos sobre la superficie de mismo (Londoño 1998, Camargo et ál. 2006, Camargo et ál. 2008, Morales 2004, Moreno 2006b). Por lo general estas características son, efectivamente, signos de madurez debido al tiempo de

exposición de los culmos a las condiciones ambientales. Sin embargo, se dan variaciones importantes debido a las condiciones de humedad del sitio, por lo que en ocasiones resulta complicada la unificación de criterios para hacer una determinación precisa de la madurez de los culmos.

Una forma práctica de aproximarse a la definición de la madurez de los culmos es marcarlos cuando recién emergen para llevar el control de su período de vida y planear la cosecha de los mismos cuando alcancen la edad apropiada. Esta práctica, sin embargo, aun no ha sido incorporada por los productores debido a que no se tiene un método estandarizado para hacerla. Por esta razón, en este trabajo evaluamos tres posibilidades de marcación de culmos, teniendo en cuenta los costos, el tiempo de ejecución y la posibilidad de generar información adicional útil para la toma de decisiones de manejo de los guaduales.

Área de estudio

El estudio se realizó en dos sitios del Eje Cafetero de Colombia, uno en el municipio de Pereira (Risaralda), en los bosques de guadua del Jardín Botánico de la

Universidad Tecnológica de Pereira. Este sitio tiene una extensión de 5 ha, se encuentra a 1430 msnm, tiene una precipitación promedio de 2500 mm al año y temperatura media de 21°C. Los suelos se originaron a partir de cenizas volcánicas y están en pendientes fuertes que oscilan entre 50% y 75%. Para el estudio se evaluó un área aproximada de 1,4 ha (Fig. 1). El segundo sitio se ubica en el municipio de Montenegro (Quindío), en los guaduales del Núcleo Forestal de Guadua La Esmeralda, a una altura de 1100 msnm, temperatura media anual de 24°C y una precipitación media anual de 1600 mm. La evaluación se hizo en un área aproximada de 1 ha dentro de guaduales naturales que en total ocupan 11,3 ha (Fig. 2).

Aplicación de las opciones de marcado

Los tratamientos (opciones de marcado) se aplicaron en enero del año 2011 en el área seleccionada de los dos sitios evaluados. El área correspondió a una porción completa del guadual, con el fin de tener las condiciones más cercanas a la realidad, tanto de forma del guadual como de topografía (Fig. 3). Se identificaron

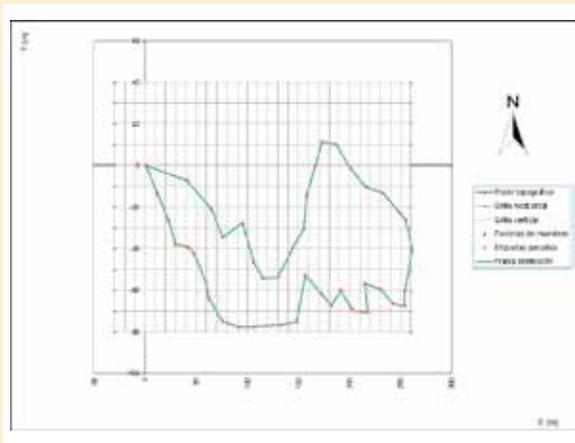


Figura 1. Delimitación del área de estudio 1: Jardín Botánico Universidad Tecnológica de Pereira

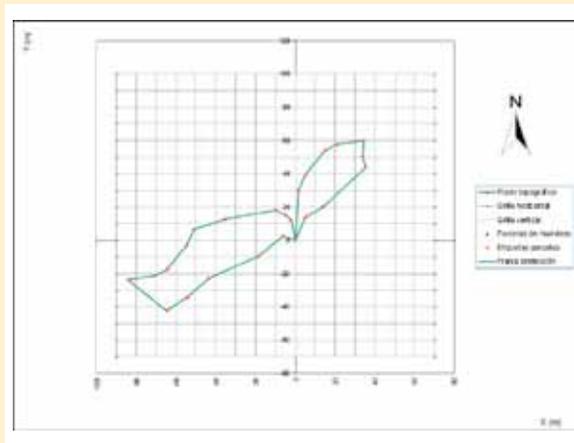


Figura 2. Delimitación del área de estudio 2: Núcleo Forestal de Guadua La Esmeralda

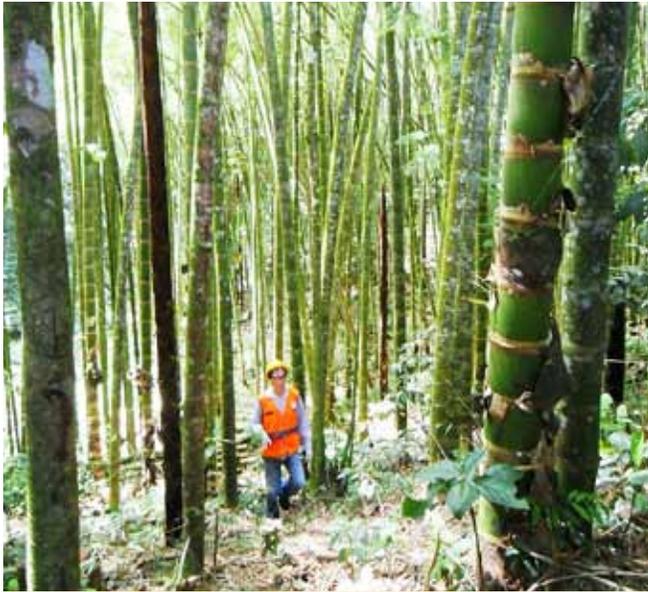


Figura 3. Condiciones de desplazamiento en el área de estudio



Figura 4. Identificación de renuevos con longitud mayor a 3 metros

Fotos: Grupo de Investigación GATA.

350 y 224 culmos emergido en los últimos seis meses en las áreas 1 y 2, respectivamente. Estos culmos tenían aún sus hojas caulinares y más de 3 m de longitud para no tener que quitar estas hojas al momento de hacer el marcado (Fig. 4).

Definición de las opciones de marcado de culmos

Marcación con pintura a la altura del pecho (1,3 m). Alrededor de un

internudo, con una brocha se marca una franja de aproximadamente 8 cm de ancho para facilitar su observación en la distancia. Como medida adicional de seguimiento, se registra la fecha de marcado y el color de la pintura usada. Se sugiere asignar un color diferente para cada semestre, para un total de 8 colores. Luego del octavo color, los culmos marcados con el primer color ya deben haber sido cosechados (Fig. 5).

Uso de un marcador de punta ancha. La marca también se hace sobre el culmo a 1,3 m dap, sobre el lado de más fácil observación. Se usa un marcador de color negro con punta de aproximadamente 2 cm de ancho (Fig. 6). La marca consiste en escribir sobre el culmo, en un área limpia, la fecha del día en que se marca (Fig. 7).

Uso de una lámina de aluminio. En una placa de aluminio se anota la



Figura 5. Marcación con pintura sobre el renuevo a la altura del pecho (1,3 m)



Figura 6. Marcador industrial negro de punta ancha (aproximadamente 2 cm)

Fotos: Grupo de Investigación GATA.

fecha de marcación y luego se amarra con cuerda de nylon al culmo a 1,3 m dap. En este caso, también se busca ubicar la lámina hacia el costado de mayor visibilidad del culmo (Fig. 8).

Mediciones y análisis de la información

El tiempo y el costo de marcado fueron las variables de respuesta usadas para comparar los tratamientos de marcado. Para la medición del tiempo, se tuvo en cuenta el desplazamiento que hace un operario a través del guadual para identificar los culmos nuevos y marcarlos. Para tal fin, se utilizó un cronometro de precisión de marca Casio.

Los costos incluyeron las actividades (su equivalente en mano de obra) y los materiales requeridos para realizar el proceso de marcado. En el costo de la mano de obra se consideró el tiempo de desplazamiento por el guadual para ubicar los culmos nuevos que tengan una longitud aproximada de 3 metros. Para el proceso específico de mar-

cado (cada método evaluado) se consideraron las tareas de registro de la fecha y medición del diámetro del culmo a la altura del pecho. El valor de los materiales para realizar el marcado depende del método (pintura, marcador negro industrial de punta ancha o lámina de aluminio y cuerda de nylon). Teniendo en cuenta que el número de culmos varía entre guaduales, los costos y el tiempo fueron llevados a un valor de referencia por culmo.

Resultados

Para el tiempo de marcación, se presentaron diferencias entre los tratamientos. El menor tiempo promedio de ejecución fue para la marcación con pintura: 1,8 minutos por culmo. Con el marcador, el tiempo promedio se incrementó en 19% y con la lámina de aluminio grabada, en un 43% (Fig. 9). Las diferencias con la lámina se explican debido al tiempo requerido para hacer la marca sobre lámina y luego sujetarla al culmo. Con el marcador, la mayor parte del tiempo se emplea en la limpieza del culmo.

En el Cuadro 1 se detallan los costos de cada tratamiento. Los costos de medición, desplazamiento e identificación son constantes para las tres opciones de marcado pues tales tareas son independientes del método de marcado. Teniendo en cuenta los materiales y el tiempo específico empleado con cada tratamiento, la marcación con pintura tuvo el menor costo de marcado: US\$0,032 por culmo, seguido del marcador con un incremento de US\$0,017 y la lámina de aluminio con un incremento de US\$0,030. El marcado con el método de lámina de aluminio presentó el costo total más bajo: US\$0,14/culmo, seguido por la pintura que se incrementa en US\$0,03 y el marcado con marcador, con un incremento de US\$0,14 respecto del costo total más bajo.

El incremento de los costos tiene que ver con el costo de materiales, especialmente. Un marcador industrial cuesta US\$19,66 y alcanza para marcar 100 culmos, un litro de pintura de aceite cuesta US\$44,94 y alcanza para 500 culmos y una lámina



Figura 7. Marcación con marcador en un renuevo a la altura del pecho (1,3 m)



Figura 8. Instalación de una placa de aluminio sobre un renuevo a la altura del pecho (1,3 m)

Fotos: Grupo de Investigación GATA.

Cuadro 1. Costos de las diferentes opciones de marcado evaluadas en culmos nuevos de *Guadua angustifolia*

Opciones de marcado	Costos US\$					
	Materiales	Marcado	Medición	Desplazamiento	Identificación	Total
Pintura	0,09	0,032	0,035	0,01	0,01	0,17
Marcador	0,19	0,049	0,035	0,01	0,01	0,28
Lámina	0,04	0,062	0,035	0,01	0,01	0,14

de aluminio completa y un rollo de *nylon* cuestan US\$2,8 y US\$14 respectivamente y alcanzan para 100 culmos. Debido al peso de los materiales dentro de la estructura de costos, estos se incrementan en más del 100% para el uso de marcador y de pintura, en donde representan el 65% y 51%, respectivamente (Fig. 10). La mayor variación en los costos se asocia con la mano de obra considerada como el tiempo que tarda un operario en realizar la marcación. Este costo representa el 17% para el uso marcador, 18% para la pintura y 40% para la lámina de aluminio (Fig. 10).

El marcado de culmos permite conocer la edad de los mismos después de haber emergido. Debido a la asociación entre madurez del culmo y calidad expresada por las propiedades físico-mecánicas, el marcado significa una importante contribución a la definición de la calidad de la materia prima que sale de los guaduales (Correal y Arbeláez 2010, Duque y Lara 2010, Camargo et ál. 2011). Si en la información colectada se incluye además el diámetro, se tendría una base de información de gran utilidad para los diferentes sectores del mercado que requieren materia prima de diversas calidades y dimensiones (García 2004). Por lo tanto, al realizar el marcado de los culmos, se puede recolectar información adicional para la planificación y el manejo del guadual y para la toma decisiones. Esta práctica puede ser incorporada por los productores junto con las que ya se realizan convencionalmente para el manejo de los bosques de guadua.

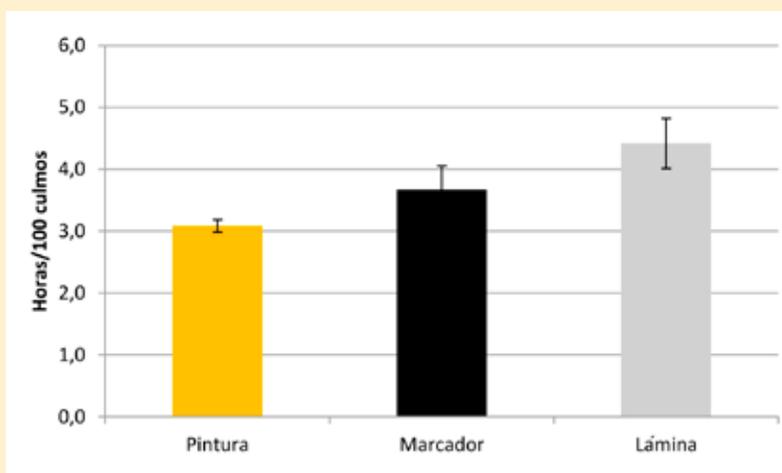


Figura 9. Tiempo de marcación empleado con cada una de las opciones evaluadas en culmos nuevos de *Guadua angustifolia*. Líneas verticales sobre las barras indican la desviación estándar.

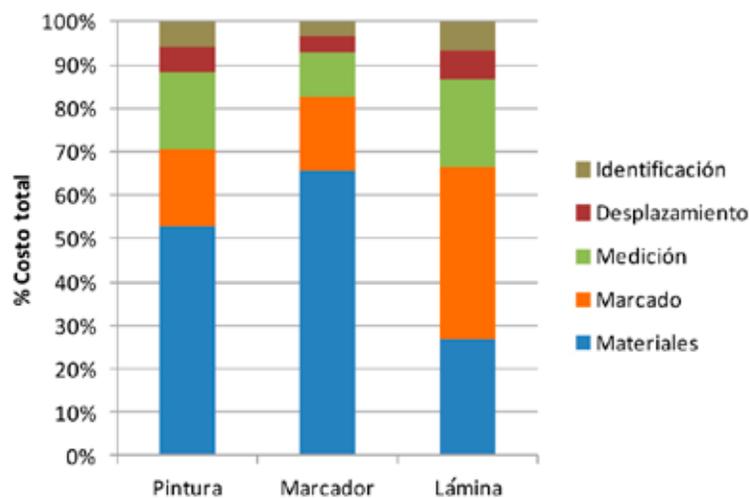


Figura 10. Estructura de costos de las opciones de marcado evaluadas en culmos nuevos de *Guadua angustifolia*

Conclusiones y recomendaciones

- Estrategias como la marcación de los culmos en su estado juvenil (6 meses después de haber emergido) permiten garantizar que el aprovechamiento se haga en el momento más adecuado y que el material cosechado sea de la mejor calidad.
- La marcación con pintura se evidenció como el método más ade-

cuado, ya que el costo es más bajo que el de los otros métodos evaluados; además, ofrece una ventaja importante: la marca se puede observar fácilmente desde distintos puntos, al estar dispuesta sobre toda la circunferencia del culmo. Puesto que el color de la pintura indica la fecha de la medición, no es necesario acercarse al culmo para conocer su estado o definir si ya podría ser cosechado.

- La selección del método de marcado debe formar parte del manejo silvicultural de los guaduales; por lo tanto, se recomienda que las personas que realizarán el aprovechamiento sean quienes lo escojan, según su conveniencia y las posibilidades de implementación.



Literatura citada

- Camargo, JC. 2006. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth in the Coffee Region of Colombia. Ph.D. Thesis. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 205 p.
- Camargo, JC; García, JH; Morales, T. 2007a. Bases para la planificación y manejo silvicultural de bosques de guadua: una aplicación a nivel de finca en la zona cafetera de Colombia. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Colciencias, Grupo en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. 86 p.
- Camargo, JC; Morales, T; García, JH. 2007b. Mensura e inventario forestal para la planificación y manejo sostenible de bosques de guadua. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Colciencias, Grupo en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. 125 p.
- Camargo, JC; Morales, T; García, JH. 2008. Términos de referencia para la formulación de planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guaduales. Pereira, Colombia, Proyecto Bosques FLEGT/Colombia. 70 p.
- Camargo, JC; Rodríguez, JA; Henao, E; Quintero, H; Mosquera, OM; Niño, J. 2011. Proyecto Tecnología para definir la madurez del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth: una contribución al desarrollo forestal del Eje Cafetero Colombiano [Cuarto Informe Técnico]. Proyecto Código 1110452-21121; Contrato 442-1-2008. Pereira. Colombia, Colciencias. 34 p.
- Correal, JFD; Arbeláez, JC. 2010. Influence of age and height position on Colombian *Guadua angustifolia* bamboo mechanical properties. *Maderas Ciencia y Tecnología* 12 (2): 105-113.
- Duque, AFH; Lara, IAC. 2010. Diseño y construcción de un dispositivo económico para medir indirectamente la madurez del culmo de guadua basado en un análisis de vibraciones. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. 89 p.
- García, JH. 2004. Definición de áreas óptimas de calidad de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth), orientada a satisfacer las necesidades del mercado. Tesis Mag. Sc. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. 110 p.
- Gritsch, C; Abranson, K; Camayo, G; Rashid, M; Murphy, R; Londoño, X; Camargo, JC. 2004. Anatomical culm analysis of *Guadua angustifolia* in relation to age, site, and physico-mechanical properties. In *Memorias Simposio internacional de Guadua [2004, Pereira, Colombia]*. p. 188-197.
- Judziewicz, EJ; Clark, LG; Londoño, X; Stern, M. 1999. *American bamboos*. Washington D.C., Smithsonian Institution Press. 392 p.
- Liese, W; Weiner, G. 1996. Ageing of bamboo culms: A review. *Wood Science and Technology* 30:77-89.
- Liese, W; Weiner, G. 1997. Modifications of bamboo culm structures due to ageing and wounding. In Chapman, G. (Ed.). *The bamboos*. London, United Kingdom, The Linnean Society. p. 313-322.
- Liese, W. 1995. Anatomy and utilization of bamboos. *European Bamboo Society Journal*: 6:5-12.
- Londoño, X. 1998. A decade of observations of *Guadua angustifolia* plantations in Colombia. *Journal of American Bamboo Society* 12: 37-43.
- Morales, T. 2004. Modelos de tratamientos silvicultural para la optimización de la rentabilidad financiera en el manejo y aprovechamiento sostenible de la guadua, Región del Eje Cafetero, Colombia. Tesis Mag. Sc. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. 114 p.
- Moreno, LE. 2006a. Estudio de las propiedades mecánicas de los haces de fibra de *Guadua angustifolia*. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira/ Ingeniería y Desarrollo.
- Moreno, RDO. 2006b. Respuesta de los guaduales naturales al manejo silvicultural tradicional. Pereira, Colombia, Proyecto manejo sostenible de bosques en Colombia (área piloto Eje Cafetero, Norte del Tolima, Norte del Valle)/ Programa Ambiental GTZ. 70 p.
- Ortega, JA; Zuluaga, CA. 2006. Comprobación y comparación de las propiedades fisicomecánicas de *Guadua angustifolia* por región y por edad. Tesis de grado. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. 127 p.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela, España y el Estado de Acre en Brasil.



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

Sede Central 7170 CATIE, Turrialba, Costa Rica
Tel. (506) 2558-2312 • Fax: (506) 2558-2051

www.catie.ac.cr