



Siete Conceptos para hacer un Puente en Bambú *

Jörg Stamm

Thailand, 29 de Abril de 2009

El trabajo analiza sistemas tradicionales, modernos y contemporáneos y los ordena en 7 conceptos constructivos. El artículo quiere comparar la eficiencia en el consumo de bambú como materia prima, su facilidad de trabajarla y sus problemas estructurales. Este artículo sucede a la conferencia "Evolución de Sistemas constructivos en Guadua" presentada en Puebla, México, en marzo 2008, y profundiza el tema en la parte conceptual sobre estructuras en Bambú. Aquí se busca la aplicación de estos conceptos al tema de puentes, que son la máxima expresión de la capacidad portante del bambú. Estos ejemplos pueden ser utilizados para todo tipo de techos y deberían ser parte de la formación de arquitectos y de maestros de obra.

Resumen

Luego de dos décadas de construcciones modernas en guadua, buenas y malas, se esta evaluando y elaborando las bases normativas para una futura industria de la construcción. Para garantizar la uniformidad de la materia prima, se está avanzando en temas importantes como la cosecha sostenible, la preservación, secado y uniones. Para definir las características deseadas e uniformes, se esta elaborando las "Normas ICONTEC" en los temas arriba mencionadas. Aunque la realidad diaria en la obra todavía esta lejos de esta meta, la normatividad da un norte importante, para que el sector forestal orienta su producción hacia un mercado seguro y con valor agregado, en vez del uso tradicional principal como formaleta desechable. Pero la normalización también invoca el peligro de limitar la creatividad por favorecer a los sistemas comunes. Independientemente de las diversas técnicas de unir elementos estructurales hay también una gama de lógicas conceptuales en la composición de un sistema portante. Igual de importante a la norma sobre uniones o la calidad de los elementos, es la claridad sobre el ordenamiento de los esfuerzos. En Colombia se construye básicamente con sistemas tradicionales de poste y viga. Tanto al nivel técnico como profesional, se nota un déficit de conocimiento de sistemas constructivos alternos. Este artículo muestra otros conceptos constructivos que se prestan para hacer uso óptimo del bambú gigante.

Después de una evolución metódica el autor muestra en siete diferentes conceptos, que la estructura de guadua pueda competir técnica y económicamente con construcciones "en material". Este artículo presenta:

- *Un sistema constructivo autóctono del bambú, usando la esencia estructural de las varas curvas y esbeltas, o será necesario cortar el tallo en tramos cortos y rectos?*
- *Como se integran lo importantes principios de protección por diseño a un sistema constructivo con guadua.*
- *Varios diseños nuevos que aplican la lógica inherente de la gramínea gigante,*
- *Estructuras sencillas que cubren grandes luces y responden a las cargas exigidas.*
- *Facetas nuevas de la arquitectura contemporánea, elaborada en fibras naturales.*

Introducción

La academia ha investigado como los sistemas de cerchas modernas de la ingeniería metálica son aplicados a los palos huecos del bambú. Otros arquitectos y constructores se basan en sus experiencias personales con la construcción de armazones tradicionales de madera, que les sirven de guía para la

concepción de cerchas similares en bambú. Esto resulta viable para las exigencias de construir casas y colegios, pero muchas veces se quedan cortos para coliseos y puentes. Las fuerzas internas de las cerchas crecen al cuadrado del ancho a cubrir: un puente de 40 metros carga y cuesta el doble de un puente de 30 metros, a pesar que solo cubre un 30 % más luz libre. En los ojos del ingeniero interventor, la estructura en guadua siempre queda inferior a la comparación con los materiales tradicionales y comprobados, que son ejemplos perfectos y resultados de una larga evolución estructural. Muy pocas veces se logra la aprobación de un puente en guadua por los expertos estructurales y por ende se dificulta el compromiso financiero por parte del cliente, ya que no puede recibir el respaldo por aseguradoras y bancos.

Sin embargo estamos acercándonos técnicamente a la meta. Por un lado se han investigado detalladamente la confiabilidad de las uniones y la técnica del "grouting". Este truco permite transferir confiablemente las fuerzas inducidas de un bambú al otro, mediante pernos embebidos en un cilindro de cemento, que distribuye la carga puntual desde la pared delgada del bambú hacia el anillo nodal. Por el otro lado se necesita unos conceptos estructurales para cubrir luces superiores a los típicos 3 a 5 metros de la construcción tradicional. Algunos de estos sistemas aquí presentados son de usos tradicionales del bambú, pero se cambiaron de escala (cestería = micro > puente Da Vinci = macro). Otros conceptos son ultramodernos, como la construcción espacial con sus cerchas tridimensionales. Ya que la palabra "moderno" ha sido reclamada en las décadas pasadas, se utiliza aquí el término "contemporáneo", para las estructuras de cerchas no planas.

Basado en el artículo de Evolución de Estructuras en Guadua, publicado en Puebla, marzo 2008, se sistematiza los conceptos estructurales según su el desarrollo de su complejidad:

A) Estructuras
tradicionales

B) Estructuras
modernas

C) Estructuras
contemporáneas

A) - Reduce las estructuras tradicionales a sistemas de tejidos o simples marcos de poste y viga, usando uniones como la boca de pescado, amarradas por fibras naturales como bejucos o cuero. La herramienta básica es el machete.

B) - Las estructuras modernas tienden a basarse en lo tradicional, pero lo elevan a un nivel técnico más sofisticado. Se copiaron las cerchas básicas de la ingeniería civil, pero sin salir de las dos dimensiones. Los elementos son generalmente rectos, por esto solo se puede usar tramos relativamente cortos de guadua. Las uniones son pernadas y rellenadas con cemento. Aunque las herramientas son solo simples taladros, sierra y formón, se requiere alto grado de conocimiento técnico. La materia prima requiere uniformidad y rectitud.

C) - Las estructuras contemporáneas deben respetar los principios como protección por diseño, pero su geometría es tridimensional y de forma libre. Se juega con curvas, conchas, paraboloides, las uniones son extremadamente simples o también muy ingeniosas. El tamaño de estas obras puede ser muy grande, debido al uso de la dimensión de la vara natural total. La materia prima puede ser curva, cónica o torcida, corta o larga, según objetivo.

Metodología

Los sistemas constructivos dependen de la disponibilidad de su materia prima y la sofisticación de la herramienta. Estas condiciones y la situación geográfica del río y sus riberas, junto con la formación y del ingenio del "Pontifex" (palabra latina para: "el que hace puentes") determinan el sistema constructivo más oportuno. El artículo nombra siete conceptos, desde sencillo hasta complejo, para luego discutir las ventajas y desventajas para su elaboración en bambú.

No se entra mucho a los detalles técnicos de uniones, ya que este tema merita su propio tratado. El tema tampoco pretende entrar a los detalles estructurales de la ingeniería civil, sino dar una herramienta conceptual para que el arquitecto y el maestro constructor puedan pasar por una serie de posibilidades y analizar como pueden empatar con los factores externos del sitio en mira. Una clara distinción de los conceptos estructurales facilita ver y determinar la dirección, las fuerzas, y las reacciones de los vectores en juego. La cuantificación y determinación exacta de estos momentos debe ser obviamente sujeto al análisis profesional del ingeniero estructural.

1. La Viga
2. El Arco
3. El Puente colgante
4. El puente atirantado y Cantilever
5. Las superficies activas
6. La Cercha
7. Las Estructuras espaciales

Este artículo pretende dar una herramienta para la planificación de puentes. Pero su enfoque es más en los conceptos constructivos del ingeniero, no tanto en conceptos arquitectónicos que incluyen contexto local, funcionalidad y estética. Conceptos no están limitados a puentes pequeños o grandes, a puentes peatonales o vehiculares. Un rebaño de ganado en un puente peatonal rural supera fácilmente el peso de una caravana de automóviles. Peatones en un puente elevado sobre vías tienden a recostarse hacia el barandal de un costado para ver una manifestación o un desfile, creando cargas imprescindibles que pueden hacer voltear el puente por su eje longitudinal. Las altas cargas vivas de 500 kg por metro cuadrado asumidas en la norma se basan en estas prevenciones. Esto genera costos que el sector público debe asumir, ya que el mismo género esta exigencia. Pero un cliente que necesita un acceso vehicular privado para llegar a su finca puede buscar diseños más económicos. El costo adicional de un techo como protección por diseño siempre es punto de discusión. Teniendo en cuenta que la altura estática de una cercha prácticamente ofrece el soporte del techo de forma gratuita, así que la inversión adicional paga en poco tiempo comparado con una expectativa de vida útil mínima de 30 años.

Pero una advertencia para los urbanistas: Puentes no deberían tener escalones. A pesar de la creciente necesidad de puentes peatonales en zonas urbanas se ve repentinamente que peatones cruzan por debajo de puentes elevados, porque el uso de escaleras no es cómodo. Puentes con rampas son más caras, pero mucho más funcionales.

Descripción

1. La Viga
 - a. El bambú, un tubo con anillos de refuerzo

El tubo de bambú es de por si mismo un sistema portante excelente. No solo soporta en su dirección axial el peso de aproximadamente 700 kg/cm² y a tensión unos 2 toneladas. También tiene muy buena capacidad de flexión, aunque la literatura científica lo contrario. Este paradigma esta radicado en la definición de las pruebas de laboratorio, donde se deforma el tubo justo en su cavidad. En su mundo natural vemos un tallo alto y delgado (en términos técnicos: esbelto) y nos sorprendemos como se dobla en el viento, pero no se quiebra. Por evolución se desarrolló un tubo que presenta una formación cónica y varía de consistencia a lo largo del tallo. Esta propiedad tiene mucha incidencia en el diseño de estructuras, ya que podemos elegir entre la parte gruesa y fuerte o la parte liviana y elástica.

En la base cuenta con una pared gruesa, con agujas de fibras gruesas (fibre bundles) embebidas en células de corcho (parénquima) que sirven de amortiguador contra el apalancamiento. Hacia arriba se cambia el promedio desde un tercio de fibra versus dos tercios de parénquima hacia dos tercios de fibra en medio de un tercio de parénquima. Esta composición permite una elasticidad mayor, pero es menos tolerante cuando se acerca al punto de quiebra. La parte alta tiene fama por su resistencia contra la fatiga y ha superado en varios tests al acero templado. Pero la parte alta también es intolerante a las deformaciones durante el secado y tiende a rajarse, especialmente cuando se trata

de un bambú viejo y muy maduro, con células llenas de sílice (Prof. Liese, Anatomy of bamboo).

La parte basal del tubo es relativamente pesada, por su diámetro, su pared gruesa y el contenido de agua en ella. Pero por su forma tubular es más liviana que una madera maciza del similar diámetro, aunque en cuanto a una madera rectangular de similar densidad específica (guadua 750 kg/m^3) gana solo en dirección axial. En la construcción civil todavía no se ha introducido la viga laminada de bambú por el costo del pegante (de 3 a 10% del peso específico), a pesar que en su forma rectangular la viga de bambú compite también a flexión.

Pero en su forma tubular es ligeramente débil, más que todo contra cargas puntuales. El Bambú tiene una debilidad en cuanto al *Kriechen*, por ejemplo en vigas horizontales, que deforman el canuto lentamente, similar al envejecimiento de la madera, que por expandir y contraerse según la humedad de ambiente ajusta su composición celular. Por esto se recomienda de trabajar el bambú principalmente de punta. También se puede rellenar los canutos en compresión lateral. Sin embargo, podemos aplicar vigas horizontales, por ejemplo como elemento atirantado en la cercha REY. También se puede usar esta viga como camino, ya que el peso para la deformación perpendicular a la fibra se puede calcular y distribuir.

La interconexión de varios bambues en vigas compuestas no es suficiente para lograr el efecto *Euler*, porque los pernos tienen un área de contacto muy limitado.



Foto 1: Cuatro guaduas compuestas sirven como columna espaciada o como viga.



Foto 2,3,4 : Esta escultura en Mallorca (arriba) fue inspirada por el Puente del Arco Iris (Rainbow bridge, China).

Varias vigas entre tejidas conforman un arco de 16 m. Estos sistemas fueron recomendados por Leonardo Da Vinci como Puentes militares por su rápida instalación. Se usaban también en la extracción de madera para pasar quebradas en los bosques de Alemania. El arco es muy débil, debido a la baja altura estática de la cinta. Pero su desempeño mejora considerablemente si las puntas se extienden y forman un barandal con triangulación de mayor altura.

b. La viga curvada

Cuando la viga gana altura estática, su capacidad portante aumenta. La formula básica para calcular los momentos de una viga es:

Carga x luz al cuadrado dividido por 8.

La altura de una viga influye proporcionalmente la curva de los momentos. La parte baja de una viga trabaja a tensión, la parte superior a compresión. Estas fuerzas se pueden dividir y obtener un arco a compresión o la catenaria a tensión. Divididos ya no se neutralizan los momentos y se generan reacciones laterales, sea compresión o tracción, que deben ser absorbidos por contrapesos llamados *estribos* o *muertos*. Cuanto mas bajo y largo el arco, mas fuerte las reacciones en los estribos y mas grandes los esfuerzos internos que tienden a salir de la línea ideal. Arcos son sistemas muy poderosos para cargas bien distribuidas. Su principal debilidad son las cargas puntuales, ya que inducen que la línea de momentos sale de la sección de la viga y genera deformaciones peligrosas (*buckling*). Por esto se puede crear paquetes de bambúes, aprovechando su curvatura natural, conectándolos mediante pernos y chazos.

La viga compuesta en la foto 5 es ligeramente arqueada según la curvatura natural del bambú. Este proyecto de un puente sobre un canal en Ámsterdam requiere 5 vigas con *contra flecha* de 60 cm en 12 metros. La protección por diseño consiste en una losa impermeable, que también sirve de vía. El concreto de la losa de 4,5 x 12 metros se funde sobre una *formaleta perdida* con tableros PinBoo.

Foto 5: Seis guaduas curvadas de un total de 12 metros, interconectadas con chazos. Los 60 cm de contra flecha causan una reacción fuerte en los estribos. La desviación lateral se confina mediante una placa en concreto reforzado. La conexión de la viga prevé una articulación en hierro galvanizado con los estribos.

2. El Arco

La misma lógica de los momentos de la viga aplica para puentes, que son una viga en escala macro. En pequeñas luces se trabaja con cerchas. La altura estática de una cercha metálica suele tener un 5% de la luz, en madera o bambú un 10%. Puentes tienden a voltearse lateralmente, por ejemplo cuando los transeúntes se recuestan todos hacia un lado. Por esto, se necesita también una cierta relación entre ancho y largo. Para luces mas grandes se combina las cerchas con arcos o cables atirantados, para que la altura estática requerida de las cerchas no exceda en manejabilidad y costos.

a. El arco romano y la catenaria invertida

Como arriba mencionado, hay una relación entre la altura de la contra flecha y el largo. La línea de los momentos no es precisamente igual a un arco, pero a la parábola de una catenaria invertida. Sin embargo, por razones prácticas se diseña generalmente un arco con cierta anchura, para que la línea de los momentos se encuentre dentro de la cinta, aun cuando la carga está pasando de una ribera a la otra. Un puente grande permite la división del arco en un cordón superior y uno inferior, estabilizándose mutuamente mediante crucetas o diagonales. La altura estática de 2,5 metros ya permite caminar sobre el cordón del piso, mientras el superior soporta el techo necesario para la protección por diseño. No hay gastos extras por la elevación del techo. El peso del techo

es un factor calculable y puede ser incorporado para generar un pre-tensionamiento de la estructura, así mermando oscilaciones y vibraciones causadas por la carga viva. Puentes pesados son mas agradables que puentes livianos, ya que un peso muerto de 500 kg/m^2 esta igual a los 500 kg/m^2 peso vivo exigido por norma en puentes peatonales.

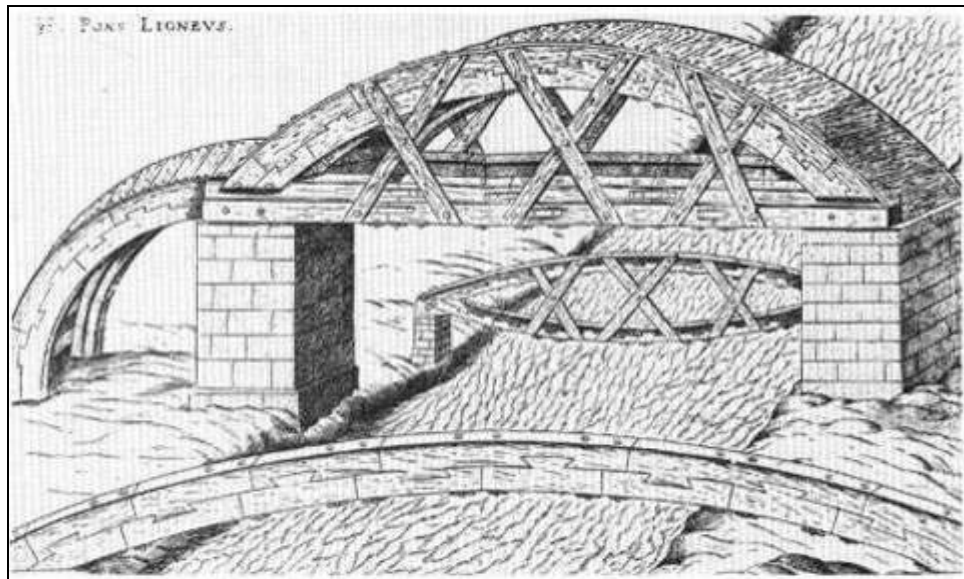


Foto 6: El arco romano compuesto por tramos cortos de madera. La dentadura es un factor importante para evitar el deslizamiento de las láminas bajo carga. Los puentes de bambú también combinan tramos cortos de 4 a 8 m, para garantizar una uniformidad en diámetros y espesor de paredes.



Foto 7: Puente UTP, Pereira, curso de construcción en el año 2000. El arco de guadua cuenta con una cercha con diagonales atirantados contra cargas asimétricas. El puente abraza 40 metros, el piso debe garantizar un galibo de 5 metros. La prueba de carga moderada, con 250 kg/m^2 , bajo el arco por solo un máximo de 4 cm y se recupero 3,8 cm. Esta deformación permanente esta causado por el apretón de las fibras en contacto con la rosca de los pernos. El puente también sobrevivió un impacto lateral con una volqueta, sin consecuencias.

La cercha plana es una buena opción para rigidizar el arco mediante tensores y compresores. Pero esto requiere adicionalmente una estabilización lateral con crucetas en la parte del techo y una placa de concreto reforzado en el piso. También hay otros sistemas de defensa para el desplazamiento lateral de los arcos, como se puede ver en el puente diseñado por el Arquitecto Simon Vélez. Aquí se usa un techo ancho de 14 metros que mantiene los arcos en su línea ideal mediante un armazón espacial.



Foto 8: Puente “Jenny Garzón”, Bogota 2003, diseñado por Simon Vélez. El puente de 46 metros luz muestra los dos arcos con mucha claridad, la estabilización se ejerce mediante una estructura espacial, incorporado al techo amplio de 14 metros de anchura.

3. El Puente colgante

Los problemas de la desviación lateral no se presentan en puentes colgantes, aunque vientos y el tráfico pueden generar fuertes oscilaciones que se transmiten no solo a la torres, también pueden incomodar al usuario (Millenium Bridge).

a. El cable de bambú

La capa del tercio externo del bambú tiene excelentes propiedades a la tensión y también es suficientemente tolerante a la torsión, por lo cual se usaba mucho para crear cables. Especialmente la parte alta del tallo se presta para hilar delgadas capas de la pared en cuerdas. Mediante un tratamiento con calor se aprovechaba en China del aceite natural existente en la capa exterior para incrementar su duración en la intemperie. Bambúes tropicales no tienen este aceite, tampoco se encuentran la misma facilidad de ahilamiento en todas especies.

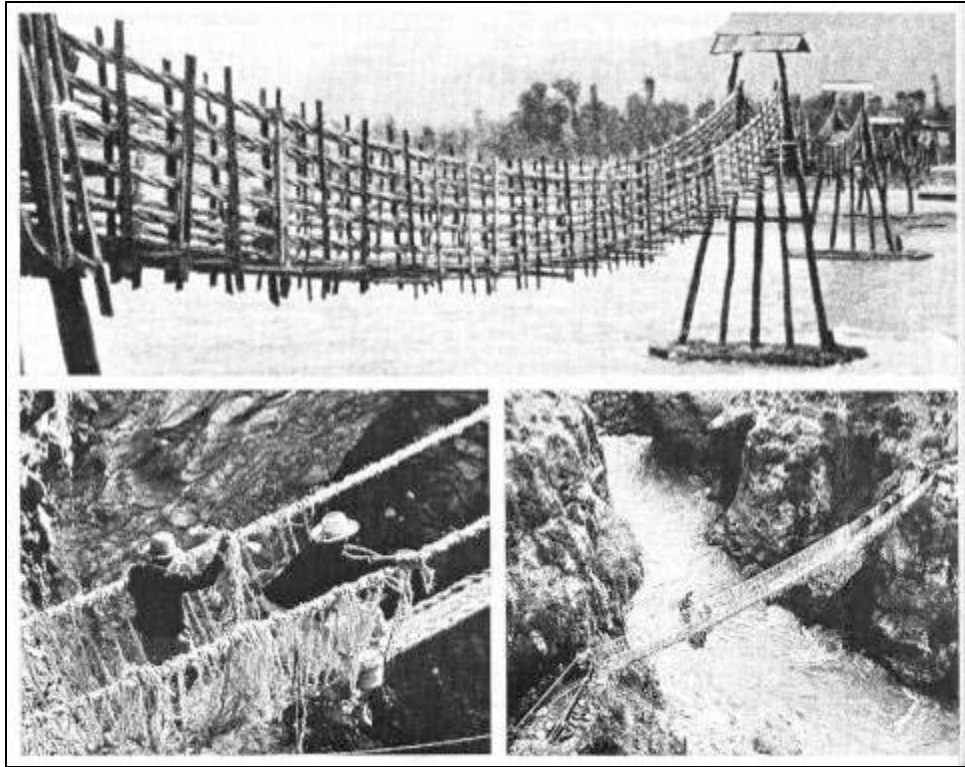


Foto 9: Puente de Xian, China. Cables de bambú trenzado. El bambú es una gramínea lignificada. También hay cables de pasto trenzado en puentes de Perú.

b. La cinta sin fin

Algunas tienen debilidad en la zona nodal, así que se debe intercalar los nudos para generar una calidad uniforme. Lo mismo se puede aplicar para hacer cordones de tallos enteros. La interconexión puede hacerse mediante varillas de acero embebido en cemento, sea de forma axial o perpendicular al canuto. Las pruebas de Jenny Garzón, 1999, aplicaron tracción a ruptura con guadua angustifolia de 12 cm diámetro y se revelaron aproximadamente 2 a 3,5 toneladas por canuto con grouting. Contando con un factor de seguridad de 3 se concluyó 700 kg/canuto varilla axial y 900 kg par varilla perpendicular.

La creación de una cinta larga es posible pero debe tener en cuenta el peligro de volcamiento y oscilaciones. Con la ayuda de pegantes se pueden crear vigas laminadas con propiedades homogéneas y sin limitación por el largo del tallo natural (Paralam /LamBoo). Hay ejemplos en la arquitectura con madera, pero en bambú se puede mermar las secciones de los cordones considerablemente. El problema consiste en el transporte de estas vigas largas hacia el sitio de obra.



Foto 10: Puente para la ciclo vía a lo largo del Canal del Rhin al Danubio, valle del río Altmühl, Alemania, 190 metros de cinta sin fin en madera laminada siguen la curva de los momentos sobre dos apoyos. La vía es el techo para dar protección por diseño a la madera no tratada químicamente. La sección de los 6 cordones es de 20 x 60 cm. Las tres secciones se unieron in situ con *fingerjoint*.

4. El Puente atirantado

Mientras un puente colgante se suspende en una larga cuerda principal, los puentes atirantados distribuyen la carga de la plataforma con varias tirantas similar al *cantilever*. Esto facilita el cambio y permite usar la capacidad natural de un culmo entero.

a. El Puente Páez y la guadua como tensor



Foto 11: El viejo puente de Avirama, Paez, Tierradentro, Colombia, tenía 40 metros. Similares puentes todavía se encuentran, pero requieren renovación cada 2 a tres años, por ende se siembra una mata cerca al ponteadero. La guadua trabaja de forma atirantada y con tallos de arco natural desde cada orilla.

b. El puente de Cúcuta

Inspirado por el sistema tradicional de usar la guadua de forma atirantada y combinarla con un arco se diseñó el Puente de Cúcuta, una ciudad moderna y lleno de obras en concreto, cerca de la frontera con Venezuela. En medio de una rotonda vehicular de abundante concreto, se decidió de hacer un puente peatonal en guadua con carácter de escultura moderna. La combinación del material natural y tradicional con una membrana industrial resultó un reto. Las torres conformadas por paquetes de 5 y 6 guaduas se elevan de forma piramidal sobre 4 puntos de apoyo. Encima se colocaba una *Campana* de acero que recibe los cables que templan la lona. Las tirantas son de dos varas, unidas por pernos axiales y perpendiculares, los canutos bajo carga tienen *grouting* en cemento.



Foto 12: El arco esta compuesto por 6 guaduas, estabilizadas por tirantas. Las primeras “tirantas” son en verdad compresores de una torre, que adicionalmente se retiene con el cable que tensiona la membrana.

Las construcciones con membranas necesitan tener en cuenta la fuerza del viento. Estas enormes carpas pueden convertirse en velas con fuerzas amenazadoras. Para evitar este peligro se templa la superficie en dos curvas opuestas, o *anticlasticas*. La membrana de PVC reforzado con fibra de vidrio cuenta con una capa de teflón contra la suciedad y el hollín de los motores. Esta tecnología es nueva, muy contemporánea, pero también muy exclusiva: Este techo costo más que la estructura del puente.



Foto 13: La membrana de 400 m² permite la protección contra sol y agua. Su cableado esta activamente incorporado a fijar la estructura de las torres y usa se el piso cerca del centro como contrapeso. A pesar que el

sol de la mañana golpea la campana, las guadua en la punta son protegidas por la sombra de la carpa a medio día. La guadua cuenta con una pintura de poro abierto, a base de linaza, con ingredientes antifungal y anti-UV.

5. Las Superficies activas

La membrana *anticlástica* también puede ser incorporada a una estructura y no solo los cables de los Bordes son tomados en cuenta, también la membrana ejerce activamente fuerzas a tensión. Placas rígidas o superficies activas son muy pesadas pero muy estables, tanto a compresión como a tensión. Normalmente se conoce este sistema en la arquitectura de aeropuertos y coliseos, iglesias modernas y centros de Convenciones. En el caso del bambú, esta opción se presta para trabajos con paneles Plyboo o Woven Strand Boards (La RWTH Aachen, Ing. Evelin Rottke, desarrolló una cúpula basado en el libro: Tragwerksysteme).

a. El Puente de Bali

El puente del Greenschool in Bali cubre un espacio de solo 22 metros libres y tenía inicialmente un concepto claro a base de un arco compuesto. La estabilización del arco contra cargas asimétricas se pensaba con tirantas al estilo arriba mencionado. Por cuestión de estilo se decidió de exagerar la inclinación y la longitud de estas tirantas, que hizo necesario de soportar las mediante un segundo *layer* de bambúes (negros). Estos rombos todavía no son placas determinadas, pero amarrando un tercer *layer* de miles de listones envueltos en paja, se crea un conjunto parecido a una placa. Este fenómeno genera por un lado un contrapeso visual, por el otro se evita la deformación del arco en la parte vulnerable. Tampoco se necesita cables en las dos puntas.



Foto 14: Las dos direcciones opuestas del bambú amarillo y del negro crean rombos (entonces todavía no están determinadas), pero la capa final de listones envueltos en paja, amarrados en la estructura, lo conjura como una sola superficie con forma activa.



Foto 15: Puente de 22 metros del “Greenschool” in Sibang, Bali, Indonesia. Los dos “cuernos” son típicos de la cultura Minang Kerbau en Sumatra y generan una circulación natural de aire fresco. Aquí sirven algo de contrapeso y generan 4 grandes escudos que se soportan en el centro.



Foto 16: Los dos Arcos esta compuesto de 3 bambúes de *Dendrocalamus asper*, interconectados por pernos y chazos. El Piso se hizo con listones de bambú que han sido desechados por ser rajado.

6. Las Cerchas Planas

Los armazones tradicionales de madera son planos. Un sistema de coordenadas X & Y es suficiente para planificar la distribución de los esfuerzos. Un método fácil para visualizar la carga sobre los elementos es la cuantificación mediante vectores. Los diseños dependen también de la esbeltez y la longitud de los elementos disponibles. La ingeniería civil se desarrolló en el siglo 18 y 19, cuando ya no había troncos gruesos, así que el ingenio del hombre necesitaba solucionar los problemas de cubiertas y puentes con palos de secciones similares a nuestra guadua. La principal fuente de inspiración para las construcciones de guadua ha sido unos libros antiguos para maestros carpinteros y el Libro IL 31 sobre Bambú, del Instituto para Estructuras Livianas, guiado por Frei Otto en Stuttgart. Este último también ha sido un trabajo que resultó de la investigación sobre trabajar con la madera barata y abundante de las reforestaciones en pino en los años 60. Luego se veía que los bambúes del mundo tropical son de dimensiones parecidas, fuertes, pero más livianos: ideal para estructuras livianas!

Cerchas planas han evolucionado en gran variedad y aplicaciones durante la industrialización y son base elemental de formaciones de ingenieros civiles. La fuerte inclinación hacia la ingeniería metálica hace preferir el WARREN truss, aunque a la madera y el bambú se pueden trabajar mejor con cercha REY y cercha HOWE. La razón es la dificultad haciendo las uniones a tensión en madera, mientras la unión de carga a compresión se elabora más fácilmente.

a. KING Truss

La cercha Rey debe su nombre al poste central, en unas estructuras medievales como la cercha de 18 metros documentado en dibujos de la catedral de San Pedro en Roma (Siglo 8). No se sabe si el que bautizó quería decir que este rey se encuentra muy apretado en el cuello, o que estaba colgando. Ambas interpretaciones describen de su función: el recibe las cargas del piso y lo transfiere mediante diagonales a los apoyos. Allí se neutraliza el empuje lateral, que es un múltiple más grande que la suma de su carga vertical, mediante unos *cortes de pecho* hacia la *viga atirantada*. Lo importante es el área del *antepecho*, que debe responder frente al peligro del desplazamiento paralelo a la fibra. Roble es una madera excelente para esto, por su gran número de fibras radiales. Todo el contrario con el bambú, que no tiene fibras radiales, ni área significativa en la pared del canuto. Bambú se raja fácil porque solo cuenta con un entretejido mínimo en la zona nodal, por esto requiere refuerzo con acero e inyecciones de cemento en los canutos.

En la mayoría de las cerchas de puentes se transfiere la carga de las diagonales directamente a los estribos. La reacción causada es casi igual al momento de la cercha, ya que muy poca carga lateral puede ser absorbida por la unión del cordón del piso. La cercha tiene más funciones de rigidizar las deformaciones internas del puente causadas por cargas asimétricas o móviles.



Foto 17: Puente de “cajón”, 12 metros, Guadua *chacoensis* en Maceio, Brasil. Sistema de Cerchas planas. Estilo medieval y muy usado en tiempos coloniales. El triangulo distribuye la carga hacia los estribos o hacia una tiranta que conforma el piso.

Una recomendación es la ubicación de las transversas por debajo de la cercha, así se gana altura interior y el cordón inferior ayuda confinar la fundición del concreto.

Notas

Uniones de maderas atornilladas, como pasadores aceradas perpendiculares a los dos ejes, generan un problema por el peligro de romper al acero por doblamiento. Por esto se debe usar *Bulldog dübel/dowels/chazos*, o secciones cortos de tubos metálicos que ayudan a distribuir la carga cortante. Este sistema no se puede aplicar para bambú aunque el peligro es parecido, porque se raja la capa externa del tubo. Por el otro lado justo es la capa dura que aplica una carga a cizalladura y reduce el peligro de doblar el pasador, se parece mas a un tubo metálico, mientras la madera rolliza es duro en el corazón y blando en la periferia. En consecuencia se recomienda usar pasadores de 12mm, preferiblemente grado 2, que tienen una resistencia a cizallamiento mayor de 2 toneladas, justo lo correspondiente a la resistencia de un canuto con cemento.

Muchos clientes quieren ahorrar dinero en la tornillería y compran dos o tres espesores de pernos. Esto solo confunde al obrero, que no siempre entiende la carga exigida en cada unión. Este ahorro solo se convierte en dolor de cabeza porque también requiere un suministro constante de tres tipos de tuercas, llaves en tres tamaños etc. Recomendando además tornillería galvanizada en caliente para obras en cercanías del mar.

Puentes pequeños hasta 8 metros necesitan una cercha con una altura de 90 cm, así que se pueden prefabricar cerchas Rey como barandales. Los sistemas preensamblados son livianos y cuentan con un ancho hasta 2,4 metros.



Foto 18: Puente de 6 metros con cercha REY, Jardín Botánico de Medellín, 2000. Pre-ensamblado, caben varias cerchas en un camión. El techo puede ser de teja o de paja, sobre unas estacas que se introducen en medio de los barandales.

b. HOWE Truss

Los puentes ferroviarios en America llevaron a muchas innovaciones en la rapidez de ensamble y una concepción, que se basaba en la preparación de elementos normalizados. Los señores Town y Howe inventaron dos sistemas que se dejan fácilmente aplicar a estructuras con bambú. Mientras la Cercha Rey es una cercha plana de un solo nivel, en Town y Howe tenemos varias capas, que se estabilizan mutuamente para poder trabajar con diámetros reducidos sin fallar por esbeltez.

La Cercha HOWE ha resultado muy práctica para puentes de 20 a 30 metros, con segmentos de 5 x 3 metros de altura. Esta modulación permite el uso de guaduas estándar de 6 metros para los diagonales, permitiendo una optimización del uso de los palos previamente inmunizados. Los pocos bambúes rectos que se encuentran en un envío, se usan para las diagonales a compresión y tracción, ya que estos esfuerzos son lineares. Los bambúes generalmente son levemente curvados, un regalo de la naturaleza para el espíritu creativo, que permite dar una ligera contra flecha a toda la cercha. Esto no sirve solo de estética visual, más bien es un pre-tensionamiento de la estructura que al entrar en servicio siempre cede unos milímetros, mientras se ajustan las fibras en los cortes y en los pernos.

La contra flecha de un puente puede ser alrededor de un 5 % del largo a cubrir y coincide con la curvatura natural promedio. Algunos arcos requieren un galibo mayor, pero es casi imposible pasar de un 10 % sin medidas artificiales de doblamiento. Guaduas maduras con diámetros de 10 cm o más son extremadamente difíciles de doblar, aun con la aplicación de calor. De pronto falta técnica...?



Foto 19: Puente de 30 metros de Santa Fe de Antioquia. La estructura pesa solo 8 toneladas y fue llevado integro por una grúa móvil del sitio de ensamble a los estribos. La operación duro solo 2 horas, el puente entero se hizo en un mes.



Foto 20: El concepto de la Cercha HOWE se ofrece para armazones en “sandwich”, porque los tensores estabilizan los compresores en su punto más débil. Los tensores (en el nivel central) se pueden fijar con pernos dobles en ambas cintas. Los compresores entran con *corte de pecho* tanto en el cordón del piso (*carrera*) como a la parte superior (*solera*), así transfiriendo mucho mas carga, que seria posible solo por pernos. Observase como las traversas están colgados por de bajo de la cercha, soportando los *rieles* y la *esterilla* que sirve de *formaleta perdida*.

7. La Estructura espacial

Las estructuras con vectores en las tres dimensiones de X, Y y Z se pueden denominar espacial o reticulada y abarcan domos geodésicos. Sus elementos trabajan tanto a tracción como a compresión, cargas solo deben inducirse através de los nudos. Las Cerchas ideales se basan en los cuerpos platónicos como el tetraedro o la pirámide y pueden necesitar varios niveles para generar estructuras definidas.

El tetraedro con 4 tubos de bambú requiere una unión confiable, que concentra el esfuerzo desde la corteza del tubo hacia un solo punto axial. Mediante una inyección de cemento especialmente recetado se transfiere la carga a un tornillo, que conecta el eje con el punto de enlace. Este punto puede ser simplemente soldado o puede ser un elemento de múltiple uso, como la bola MERO.

En el Instituto para Estructuras de madera, RWTH Aachen, año 2000, Christoph Tönges y el seminario de bambú con Dr. Ing. Evelin Rottke desarrollaron un cono de una capacidad de más de 18 toneladas de tracción, pues en la prueba de carga se rompió el perno, pero no el bambú. Este camino invita a seguir en la utilización de estas uniones para su aplicación en puentes con estructura espacial.



Foto 21, 22: Fijación axial de pernos en uniones cónicas de bambú y bola MERO.

Similares ejemplos en la ingeniería de madera son el puente sobre el río Isar en Thalkirchen, Alemania. Una carretera es llevada por 6 arcos en madera, la vía es al mismo tiempo el techo impermeable y protege así la estructura de sol y agua.

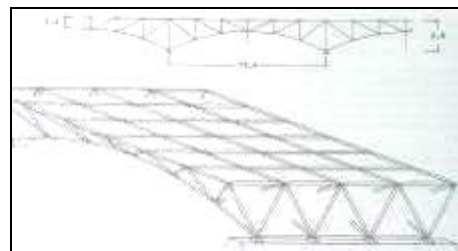


Foto 23, 24: Esquema del puente espacial en madera sobre el Río Isar, Alemania.

a. El proyecto del puente sobre el Río Cauca en Popayán

Este Puente de 30 metros en estructura espacial combina 5 arcos con paquetes de 3 guaduas para asegurar la capacidad de carga requerida de 500 kg/m^2 . Las guaduas seleccionadas tienen 12 cm de diámetro y espesores de pared mayor de 12 mm. Los elementos más largos son de 2,4 metros, los pernos de 18mm, grado 4, para transferir la carga uniformemente a las esferas de acero. Cada cono será previamente examinado en una prueba de carga, numerado y monitoreado digitalmente, para respaldar eventuales reclamos futuros.

Este sistema constructivo es muy exigente y muy costoso en su desarrollo, pero abre el camino hacia un mercado masivo. Los mismos procesos de fabricación se repiten muchas veces, solo cambian las medidas del tubo, del cual el tamaño casi no incide

sobre el valor del elemento entero. La guadua debe tener una preservación garantizada y recibir tratamiento ignífugo. Arquitectos pueden solicitar centenares de unidades, con decenas de medidas, todos al mismo costo unitario. La planificación se hace con los programas que ya existen para las estructuras espaciales, aunque se necesita todavía homologar este elemento. En cuanto a la eficiencia en cantidad de bambú versus capacidad portante se estima que este sistema es el mas eficiente, aunque el mas tecnificado.

El mantenimiento o el cambio de un elemento son relativamente fáciles, ya que cada tubo cuenta con su propia rosca de ajuste. El costo del sistema es por encima del padrino metálico, ya que procesar recursos naturales requiere más cuidado y conocimiento que con materiales de procesos industriales como tubos de acero.

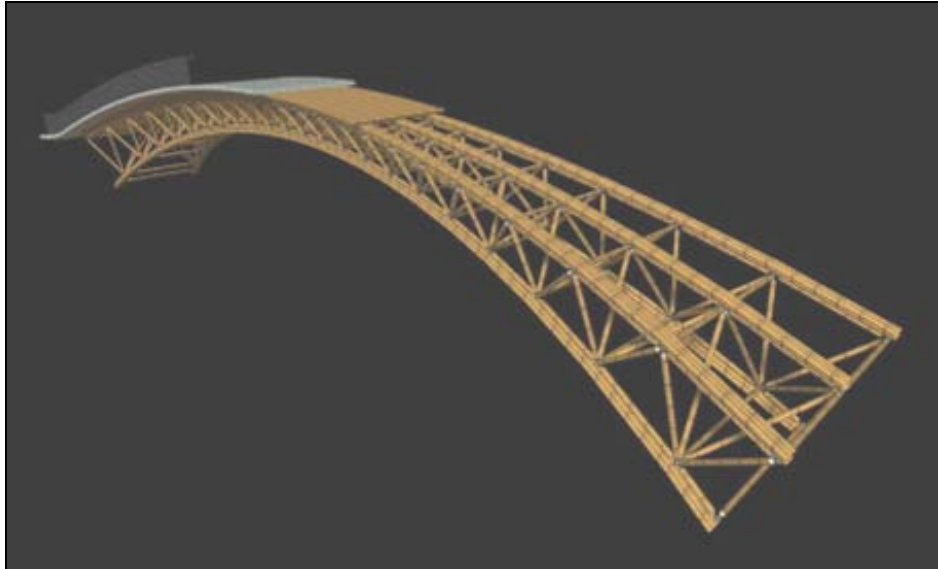


Foto 25: Render de un puente espacial y arqueado, de 30 metros, diseñado por Arq. Valdenebro para el parque del Río Cauca en Popayán. Se combina la estructura espacial con cinco cintas adicionales (paquetes de tres guaduas). La protección por diseño es aportado por la vía, que sirve como techo de la estructura.

Discusión

Para comparar los conceptos constructivos se necesita un norte, una escala de valores. Esto son a primera vista los costos y el tiempo de construcción necesaria. Desde ahí no es lejos a mirar el nivel de complicación técnica y la disponibilidad inminente de mano de obra calificada y herramienta especial. Ya que el bambú, en el trópico, por naturaleza es un material economico, pero se generan otros costos por transporte, preservación, mano de obra durante preparación y el tiempo de la instalación. El incremento del costo va directamente proporcional a la complejidad técnica, la garantía y las expectativas hacia el tiempo en servicio. Así que costos influyen, pero no deciden cual conceptos constructivos se escoge.

Por esto no se trata tanto de compararlos en cuanto a ventajas y desventajas. Cada sitio que necesita un puente ya predetermina muchos factores, como la consistencia del suelo en las riberas, el nivel máximo del agua en las décadas pasadas, la cercanía a la próxima carretera para accesibilidad de camiones se suministro o grúas. Si no hay acceso a un valle cerrado, puede haber puntos altos, que permiten templar un cable auxiliar, para luego colgar desde ahí las poleas de levantar las cerchas. Otros sitios requieren andamios o una plataforma como *punte falso*, para evitar que cosas caen al río o a un carro que pasa por debajo en la carretera.

También el tamaño y la especie de bambú influyen el diseño. El cliente tiene exigencias en cuanto a las funciones del puente y impone ciertos gustos, - o mal gustos. Algunos puentes requieren un permiso de construcción por parte de plantación municipal y dejan poco margen a improvisaciones o cambios.

Pero todos se identifican con su puente en bambú, así que siempre hay un campo para negociaciones y creatividad.



Foto 26: Durante la prueba de carga se verifica la deformación causada por barriles de 200 kg. Después se cruza los datos del análisis estructural con los ensayos de carga.

Conclusiones

- Es inútil hacer una evaluación de los conceptos presentados. Casi siempre hay combinaciones de sistemas. Esto es necesario por un lado por la debilidad de los arcos contra deformaciones por cargas asimétricas o puntuales. Por el otro lado son líneas adicionales de defensa, por si acaso un sistema empieza fallar, sea por accidente o descuidado en el mantenimiento.
- Bambúes rectos casi no se encuentran y es una pérdida de tiempo pedir un camión con guadúa rectas e diámetros uniformes. Pero si se puede pedir una gama de especificaciones rangos de curvatura, sobre madurez, rangos de diámetros y varias longitudes. La calidad de la selección depende del proveedor. En Colombia e Indonesia ya se puede escoger entre una media docena de empresas con buena capacidad y calidad de producción instalada.
- La naturaleza no se limita tanto como el diseñador con regla. Líneas curvadas son bellas y algunos arquitectos se molestan por los triángulos. Pero las diagonales se dejan integrar también como confinamiento lateral, además son elementos ornamentales: mucha gente común, desconociendo la ingeniería, piensa que las crucetas de un barandal son solo decorativos. Para que nadie caiga accidentalmente al abismo se puede añadir barandales o incorporar una malla a las capas de la cercha.
- Algunos sistemas constructivos de bambú arriba presentados ya son maduros y han sido perfeccionados en técnica y tiempo, otros están todavía en fase de proyectos. Sin embargo hay una base de experiencias que permiten realizarlos como planeados. Lo que no se sabe son los costos, pero que importa trabajar y luchar mientras descubrimos nuevos horizontes.

El Autor

El autor ha diseñado y construido docenas de obras entre casas, salones comunales, colegios y puentes en Guadua. Los sistemas constructivos elaborados durante estos 15 años desde llegar a Colombia van desde simples obra con vigas apoyadas sobre postes, pasando por pórticos con columnas espaciadas, hasta armazones complejas con tensores y compresores confinados por tornillos en "sándwiches" de varios niveles. El desarrolló varios sistemas constructivos con guaduas seleccionadas y previamente preservadas, para componer las estructuras según planificación

milimétrica en AutoCad. Por esta precisión los armazones son calculables y bastante confiables, así que permiten la construcción de puentes peatonales hasta 40 metros con todas las exigencias oficiales.

También se sistematizó el proceso constructivo, con preservación previa por inmersión, secado controlado y prefabricación en fábrica. Esto permite controlar gastos y presupuestar la obra a base de los metros lineales a instalar, como cualquier obra en materiales modernos. El tiempo de construcción promedio entre contratación y entrega se redujo de cinco meses a un promedio de dos. La prefabricación metódica convirtió la construcción con guadua en una alternativa técnica y económicamente competitiva con los sistemas parecidos de ingeniería metálica.

Debido a este logro, el realiza obras en Europa, África, Asia con bambúes de diversas especies. Este aprendizaje se refleja por un lado en obras con técnicas oportunas que responden a los diversos diámetros, tamaños y consistencias. Por otro lado el amplió su horizonte con la arquitectura étnica de Indonesia, en su gran variedad de estilos y formas propias.

De especial impacto fue la invitación por el artista John Hardy a participar, diseñar y construir el "Green School" en Bali, Indonesia. Inspirado por este potencial se construyó casi exclusivamente en materiales naturales locales como la tierra, el bambú y la paja. Los materiales naturales como la paja permiten la elaboración de techos ondulados y ofrecen efectos de luz interesantes. Los techos altos y cónicos no solo amortiguan el impacto de la radiación solar, también generan un "efecto chimenea" que mueve el aire naturalmente hacia arriba. La construcción de un nuevo edificio para una fabrica con 2000 m² de techo, fue inspirado por la silueta de tres volcanes auténticos, visibles en el horizonte. La montaña artificial tiene tres conos altos para generar el ascenso de aire, que puede salir por el "skylight", una idea que ha sido inspirado por el lago de cráter.

Contando con una docena de especies locales, con diferentes tamaños y propiedades, se buscó el uso pleno de sus opciones innatas, experimentando diferentes sistemas constructivos con armazones tridimensionales y usando a veces el tamaño natural del tallo entero (Para poder evitar cortes innecesarios de las varas de 20 metros, se construyó unos tanques de preservación muy largas). Esta vara larga, curva y liviana, pero fuerte y elástica ofreció por si misma una cantidad de inesperadas aplicaciones, que posteriormente se refinaron y sistematizaron.

El autor acompañó como tutor algunos trabajos de investigación en la Universidad Tecnológica de Pereira, sobre cosecha, preservación y secado. El escribió, entre otros, un manual técnico sobre la construcción de puentes en Guadua editado por el Proyecto GTZ-UTP.

Otra importante fuente de inspiración ha sido por un lado el libro "Bambus - Bamboo ", Serie IL 31, de Klaus Dunkelberg y Eda Schauer del Instituto "Frei Otto" (Instituto de Estructuras Livianas, de la Universidad de Stuttgart en Alemania, un trabajo sistemático de estructuras con varas redondas y curvas). Por el otro lado esta Oscar Hidalgo con su libro "Gift of the Gods", una Biblia en cuanto a la amplia investigación sobre aplicaciones de bambú en todo el mundo. Otras bases importantes han sido los trabajos de Prof. Walter Liese, Instituto para la Investigación de la Madera, Hamburgo, sobre la "Anatomía del bambú", que permitió una profunda mirada a la composición estructural al nivel celular.

Referencias de fotos

Fotos: 3, 6, 10, 11, 23, 24 scanned from: Informationsdienst Holz, Germany, citado abajo

Foto 9: scanned form : IL31 , Stuttgart, citado en bibliografía

Foto 11: scanned from : Guadua, Marcelo Villegas citado abajo

Foto 14: John Hardy, Bali, cortesía

Render: Arq. Eladio Valdenebro, Popayan, cortesía

Las otras fotos todas son del autor.

Bibliografía

Dunkelberg, Klaus: Bambus als Baustoff, Reportes del Instituto para las estructuras portantes livianas de superficie. (IL) Nr. 31, Stuttgart 1985.

Engel Heino: Tragsysteme - Structure Systems, ISBN 978-3-7757-1876-9, Germany 1997.

Frühwald, A.: Holz-Rohstoff der Zukunft, Informationsdienst Holz, Alemania, 1997.

Hidalgo, L., Oscar: Bamboo - The Gift of the gods. ISBN 958-33-4298-x, Bogotá, 2003.

Liese, W.: Anatomy of Bamboo. Inbar, 1999.

Londoño, X.: Characterización of the anatomy of *guadua angustifolia* culms, Bamboo Science and Culture, Vol. 16. American Bamboo Society, 2002.

Riaño, Londoño: Plant growth and biomass distribution on *Guadua angustifolia*. Bamboo Science and Culture, Vol. 16. ABS, 2002.

Vélez, S.: Grow Your own House, ZERI-VITRA, 2000.

Villegas, M.: Bambusa guadua, Villegas editores, 1996.

Wegener, G.: Ökobilanzen, Informationsdienst Holz, Alemania, 1997.

* Trabajo presentado por el autor en el 8° World Bamboo Congress, Tailand (16-19 Sep-2009)

Versión en Español, publicada por www.bambumex.org con permiso de Jörg Stamm (Dic.-2010)