

## Prototipo de invernadero con estructura de bambú: selección de materiales, diseño e impacto ambiental\*

### Greenhouse prototype with bamboo frame: materials selection, design and environmental impact

Mauricio Jesús Romero Méndez<sup>1</sup>, Juan Carlos Rodríguez Ortiz<sup>1§</sup>, Isidoro Lara Compeán<sup>1</sup>, Mario Alberto Betancourt Urbina<sup>2</sup>, Jorge Alonso Alcalá Jáuregui<sup>1</sup>, Federico Villarreal Guerrero<sup>1</sup> y Ángel Ismael Cárdenas Martínez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de San Luis Potosí-Facultad de Agronomía y Veterinaria. Carretera San Luis-Matehuala km 14.5. Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México. (mauricio.romero@uaslp.mx; lio34@hotmail.com; federico.villarreal@uaslp.mx; jorge.alcala@uaslp.mx). <sup>2</sup>Universidad Autónoma de San Luis Potosí-Facultad de Ingeniería. Dr. Manuel Nava núm. 8. Zona Universitaria Poniente, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. CP. 78290. (angel.cardenas@uaslp.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: jrodort@uaslp.mx.

#### Resumen

El presente trabajo pretende desarrollar una alternativa de producción en cultivos protegidos a productores de escasos recursos de México. Los objetivos fueron: i) determinar la capacidad de resistencia de culmos de bambú de cuatro especies: *Bambusa oldhamii* Munro, *Bambusa vulgaris* var. *vulgaris* Schrad, *Bambusa vulgaris* ‘*Striata*’ y *Gigantochloa verticillata* Willd.; ii) diseñar un prototipo de invernadero para zonas áridas con culmos de bambú; y iii) estimar el impacto ambiental en relación al CO<sub>2</sub> involucrado. Los resultados de resistencia a la compresión muestran que las especies fueron estadística iguales, así como entre las secciones inferior, media y superior de los culmos; los valores promedios oscilaron de 645 kg cm<sup>-2</sup> a 952.31 kg cm<sup>-2</sup>. En flexión no se encontró diferencia significativa entre especies, solo en las secciones; se observa que la flexión disminuye hacia la parte superior de los culmos en las cuatro especies; los valores promedios encontrados oscilaron de 850.17 kg cm<sup>-2</sup> a 1 927.63 kg cm<sup>-2</sup>. En tensión la diferencia fue solo entre las secciones de los tallos en *B. vulgaris* var. *vulgaris*, en esta especie la sección inferior promedió 1 023 kg cm<sup>-2</sup> y la superior 727 kg cm<sup>-2</sup>. Con los datos de resistencia y características agronómicas

#### Abstract

This paper aims to develop a production alternative in protected crops for resource-poor farmers in México. The objectives were: i) determining the resilience of bamboo culms of four species: *Bambusa oldhamii* Munro, *Bambusa vulgaris* var. *vulgaris* Schrad, *Bambusa vulgaris* ‘*Striata*’ and *Gigantochloa verticillata* Willd.; ii) design a greenhouse prototype for arid zones with bamboo culms; and iii) to estimate the environmental impact in relation to involved CO<sub>2</sub>. The results of compressive strength show that species were statistically equal, as well as between the lower, middle and upper sections of the culms; the average values ranged from 645 kg cm<sup>-2</sup> to 952.31 kg cm<sup>-2</sup>. Regarding to bending, no significant difference was found between species, only in sections; it is observed that bending decreases towards the top of the culms in the four species; the found average values ranged from 850.17 kg cm<sup>-2</sup> to 1 927.63 kg cm<sup>-2</sup>. Regarding the tension the difference was only between sections of the stems in *B. vulgaris* var. *vulgaris*, in this species the lower section averaged 1023 kg cm<sup>-2</sup> and the top 727 kg cm<sup>-2</sup>. Using resistance data and agronomic characteristics desirable for greenhouses in arid zones, the structural

\* Recibido: junio de 2017  
Aceptado: agosto de 2017

deseables para invernaderos de zonas áridas se determinó el diseño estructural con el uso del software STAAD.Pro®V8i. Las especificaciones de construcción del prototipo se exponen a detalle a manera de que pueda reproducirse sin complicaciones por parte de los productores. Finalmente se estima un beneficio ambiental en emisiones de CO<sub>2</sub> de 2 847 kg en la construcción del invernadero de 135 m<sup>2</sup> en relación a uno de misma área construido de acero.

**Palabras clave:** *Bambusa* spp., culmos, cultivos protegidos, resistencia de materiales, zonas áridas.

## Introducción

La demanda actual de alimentos en el mundo y la necesidad de conservar los recursos naturales orienta a la comunidad científica y tecnológica a buscar estrategias de producción agrícola sustentable, esto es: económicamente redituable, socialmente justa y ambientalmente respetuosa.

La producción en invernadero es una sólida estrategia que ha comprobado ser productiva en el mundo, con rendimientos muy por encima de lo logrado en campo abierto y reduciendo siniestros por el clima. Sin embargo, el adquirir un invernadero de tecnología media es poco probable para productores de bajos insumos (82% de los productores en México de acuerdo a Villa, 2011). Los precios varían de 30 a 50 dólares por metro cuadrado, inversión inicial que no es posible cubrir por este núcleo de productores ya sea con recursos propios o por apoyo gubernamental. Ellos se resignan a continuar con sus sistemas de producción tradicionales, expuestos a los impredecibles eventos meteorológicos.

El principal material estructural utilizado en invernaderos, el acero, tiene dos inconvenientes serios para poder ser usado por los productores señalados, estos son: 1) su precio, el cual ha alcanzado máximos históricos en los últimos años y representa 80% de la inversión total de un invernadero (Moreno *et al.*, 2011); y 2) ambiental, se estima que por cada tonelada de acero producido se emite a la atmósfera en promedio 1.7 toneladas de CO<sub>2</sub>, el cual es uno de los principales gases de invernadero. Además, a la industria del hierro y del acero se le atribuye ser responsable de 4 a 5% del total de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> (World Steel Association, 2008).

design was determined using STAAD.Pro®V8i software. The prototype's construction specifications are exposed to detail so that it can be reproduced without complications by producers. Finally an environmental benefit is estimated in emissions of CO<sub>2</sub> of 2847 kg in greenhouse construction of 135 m<sup>2</sup> compared to one of the same area made out of steel.

**Keywords:** *Bambusa* spp., arid zones, culms, materials resistance, protected crops.

## Introduction

The current demand for food in the world and the need to conserve natural resources guided the science and technology community to seek strategies for sustainable farming, that is: economically profitable, socially just and environmentally friendly.

Greenhouse production is a sound strategy that has proven productive in the world, with yields far above from what has been achieved in the open and reducing weather damage. However, acquiring a medium technology greenhouse is unlikely to low-input producers (82% of producers in México according to Villa, 2011). Prices vary from 30 to 50 dollars per square meter, initial investment that can not be covered by this group of producers either with their own resources or through government support. They resign themselves to continue their traditional production systems, exposed to unpredictable meteorological events.

The main structural material used in greenhouses, steel, has two serious drawbacks to be used by the indicated producers, these are: 1) its price, which has reached historical highs in recent years and represents 80% of the total investment of a greenhouse (Moreno *et al.*, 2011); and 2) environmental, it is estimated that for every ton of steel produced, 1.7 t of CO<sub>2</sub> on average are emitted into the atmosphere, which is one of the main greenhouse gases. Besides, the iron and steel industry is attributed to being responsible for 4 to 5% of the total world CO<sub>2</sub> emissions (World Steel Association, 2008).

As an alternative to steel, as structural material in greenhouses, there are bamboo plants culms. These have shown qualities for these purposes worldwide, such as: high strength combined with low density and high elasticity

Como una alternativa al uso del acero, como material estructural en invernaderos, se tiene a los culmos de las plantas de bambú. Estos han demostrado en el mundo cualidades para estos fines, como son: alta resistencia aunada a una baja densidad y alta elasticidad (Xiaobo, 2004; Ubolsook y Thepa, 2011; Gutu, 2013). Además, su cultivo propicia beneficios ambientales como la conservación del suelo, control de la erosión, regulación del caudal hídrico, aportación de materia orgánica y contribuye a la biodiversidad. También es considerada la planta maderable de más rápido crecimiento en el mundo, así como ser una de las especies vegetales con mayor tasa de secuestro de CO<sub>2</sub> en el mundo (Cárdenas, 2011; Sharma *et al.*, 2014). Castañeda *et al.* (2005) estimaron la acumulación media anual de carbono en una plantación de bambú en 12.98 t ha<sup>-1</sup>, con 50% de concentración de carbono en tejido vegetal.

Otra ventaja importante de los culmos es su disponibilidad permanente a través de su cultivo que se puede establecer en la parcela del productor. En el estado de San Luis Potosí, México, se cultivan diversas especies de bambú en la zona tropical conocida como Huasteca Potosina. En este lugar el bambú ha presentado una excelente adaptación, las plantas llegan a alcanzar más de 16 m de altura y 10 cm de grosor. El bambú fue introducido hace más de 10 años, pero aún no se reporta información de sus propiedades mecánicas, las cuales son necesarias para el diseño estructural de un invernadero.

Los materiales naturales para uso estructural en invernaderos no es nada nuevo. Al respecto podemos recordar, como ejemplo, la comarca hortícola de Almería, España, que en la década de los 60's se diseñaron invernaderos tipo Almería. Las estructuras fueron hechas de postes de madera, que han dado gradualmente el paso a invernaderos con estructuras de acero, contando a la fecha con poco más de 37 000 ha (Valera *et al.*, 2014).

En base a lo expuesto anteriormente, y como propuesta de un modelo de producción rural sustentable para productores de bajos recursos económicos en México, se realizó la presente investigación con los siguientes objetivos: i) determinar la capacidad de resistencia de culmos de bambú de cuatro especies a la compresión, flexión y tensión; ii) diseñar un prototipo de invernadero para zonas áridas; y iii) estimar el impacto ambiental en relación al CO<sub>2</sub> involucrado.

(Xiaobo, 2004; Ubolsook and Thepa, 2011; Gutu, 2013). Moreover, its cultivation leads to environmental benefits such as soil conservation, erosion control, water regulation, contribution of organic matter and to biodiversity. It is also considered as the timber plant with the fastest growing in the world and one of the plant species with the highest rate of CO<sub>2</sub> sequestration in the world (Cárdenas, 2011; Sharma *et al.*, 2014). Castaneda *et al.* (2005) estimated the annual average carbon accumulation on a bamboo plantation in 12.98 t ha<sup>-1</sup> with 50% of carbon concentration in plant tissue.

Another important advantage of bamboo culms is its permanent availability through cultivation which can be set on the producer's plot. In the state of San Luis Potosí, México, several species of bamboo are grown in the tropical region known as Huasteca. Where bamboo has shown an excellent adaptation, the plants reach up to more than 16 m high and 10 cm thick. Bamboo was introduced more than 10 years ago, but still no information has been reported about its mechanical properties, which are necessary for the structural design of a greenhouse.

Natural materials for structural use in greenhouses is nothing new. In this regard we can recall, as an example, the horticultural region of Almería, Spain, which in the early 60's designed Almería type greenhouses. The structures were made of wooden posts, which have gradually stepped to greenhouses with steel structures, counting till the date with over than 37 000 ha (Valera *et al.*, 2014).

Based on the above, and as a proposal for a model of sustainable rural production for low-income producers in México, this paper was made with the following objectives: i) determining the compressive strength, bending and tension of bamboo culms of four species; ii) design a greenhouse prototype for arid areas; and iii) estimate the environmental impact in relation to CO<sub>2</sub> involved.

## Material and methods

### Resistance tests

Evaluated culms belong to four species of bamboo plants grown in the Huasteca region of the state of San Luis Potosi, Mexico: *Bambusa oldhamii* Munro, *Bambusa vulgaris* var. *vulgaris* Schrad, *Bambusa vulgaris* 'Striata' and

## Materiales y métodos

### Pruebas de resistencia

Los culmos en evaluación pertenecen a cuatro especies de plantas de bambú cultivados en la zona huasteca del estado de San Luis Potosí, México: *Bambusa oldhamii* Munro, *Bambusa vulgaris* var. *vulgaris* Schrad, *Bambusa vulgaris* 'Striata' y *Gigantochloa verticillata* Willd. El lugar de la colecta pertenece al campo agrícola experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en el municipio de Huehuetlán, San Luis Potosí, México, ubicado a 21° 28' 43" de latitud norte y 98° 58' 30" de longitud oeste con una altitud de 92 m. En la clasificación de Köppen el clima es denominado Cfga (clima templado húmedo sin estación seca, temperatura media anual de 23 °C y precipitación anual de 1 800 mm) (Pineda, 2005). Los materiales vegetales fueron establecidos hace 10 años provenientes del estado de Veracruz, México.

Tres culmos por planta de tres años de edad se colectaron, con alturas de más de 12 m y grosores entre 8-9 cm. Estos se cortaron a los primeros seis metros a partir de la base para facilitar su transporte, la parte apical fue desechada y se dejaron orear a la sombra y temperatura ambiente.

A los 160 días después de la colecta de los culmos se determinaron las propiedades de resistencia. Para ello los culmos fueron previamente divididos en tres secciones de igual tamaño: basal, media y superior (2 m cada uno).

Las pruebas de resistencia se realizaron para compresión, flexión y tensión. Estas propiedades son necesarias para el diseño de estructuras, como los invernaderos. Por carecer de una norma específica de construcción con bambú en México, se tomó como referencia la norma técnica colombiana, NTC-5525 2007 métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth., del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, que se basa en la norma ISO 22157 (2004) Bamboo: determination of physical and mechanical properties.

Las probetas para la prueba se prepararon acorde a la mencionada norma NTC 5525 2007 colombiana, sin nudos, con una longitud igual al diámetro externo y sus extremos con superficies planas y en ángulo recto respecto a la longitud. Se colocaron en forma que el centro del cabezal de la prensa se ubicó en el centro de la sección transversal de la probeta.

*Gigantochloa verticillata* Willd. The collection site belongs to the experimental agricultural field of the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock Research (INIFAP), located in the municipality of Huehuetlán, San Luis Potosí, México, located at 21° 28' 43" north latitude and 98° 58' 30" west longitude with an altitude of 92 m. In the Köppen's classification the climate is called Cfga (humid temperate climate without dry season, average annual temperature of 23 °C and annual precipitation of 1 800 mm) (Pineda, 2005). Plant materials were established 10 years ago from the state of Veracruz, México.

Three culms per plant of three years of age were collected, with heights of more than 12 m and thicknesses between 8-9 cm. These were cut to the first six meters from the base to facilitate transportation, the apical part was discarded and allowed to air in the shade and room temperature.

The resistance properties were determined 160 days after collection of the culms. For this, the culms were previously divided into three sections of equal size: basal, median and superior (2 m each).

Resistance tests were performed for compression flexion and tension. These properties are required for the design of structures such as greenhouses. Due to the lack of a specific construction standard with bamboo in Mexico, it was taken as reference the Colombian technical standard NTC-5525 2007, test methods to determine the physical and mechanical properties of *Guadua angustifolia* Kunth., of the Colombian Institute of Technical and Certification Standards, based on norm ISO 22157 (2004) Bamboo: determination of physical and mechanical properties.

The test specimens for the compressive strength test were prepared according to the aforementioned Colombian standard NTC 5525, without knots, with a length equal to the external diameter and its ends with flat surfaces and at right angles to the length. The probe was positioned in such a way that the center of the press head was located in the center of the cross section of the specimen.

The specimens for the flexural strength tests were mounted with a length between the supports centers of 30 times the outside diameter, with a variable number of knots per specimen. Mounting culms for bending had four points, applying the load of the centers of the frames of the charging device at two points in the middle third of the distance between the supports. Stubbing culms was avoided using a plate and metal support of 15 cm long.

Las probetas para las pruebas de resistencia a la flexión se montaron con una longitud entre los centros de los apoyos de 30 veces el diámetro exterior, con un número variable de nudos por probeta. El montaje de los culmos fue en cuatro puntos, aplicando la carga de los centros de las monturas del dispositivo de carga en dos puntos en el tercio medio de la distancia entre los apoyos. El aplastamiento se evitó utilizando una placa y soporte metálico de 15 cm de largo.

Las probetas para las pruebas de resistencia a la tensión paralela a las fibras se prepararon con una longitud total de 60 cm, en cuya parte media, se dejó una porción de ensayo de una sección transversal rectangular con dimensiones de 2.5 cm de ancho y 10 cm de longitud independiente del espesor de la pared. Para el montaje de las probetas en la máquina de ensayo se estableció una distancia entre los sujetadores de los extremos de 30 cm.

Cada una de las pruebas se repitió en tres ocasiones para cada sección de culmo (baja, media y alta) en cada especie, dando un total de 36 mediciones. Las pruebas mecánicas se practicaron en el laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Los ensayos de compresión se llevaron a cabo en una la prensa marca AUTOMAX 5 y los de flexión y de tensión en una máquina de ensayo universal marca Forney.

Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente por medio de un análisis de varianza y comparación de medias para ver si existen diferencias entre las secciones de los culmos (baja, media y superior), así como entre las cuatro especies evaluadas, para ello se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de confianza de 5%. Ambas se realizaron con el software FAUANL Versión 1.1 (Olivares, 2012).

### **Diseño agronómico y estructural de invernadero**

El prototipo fue pensado en construirse en el centro de agricultura protegida de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. La ubicación es 320 km al este del lugar de colecta (municipio de Huehuetlán, SLP), siendo sus coordenadas geográficas 22° 09' 00" latitud norte y 100° 59' 00" longitud oeste con una altura de 1 874 msnm. Debido al clima semiárido del lugar, se procedió a diseñar el invernadero en base a este clima. Para ello se consultó la literatura especializada para determinar las características deseables de un invernadero para zonas semiáridas en México: Matallana y Montero (1995); Castellanos (2004); Sánchez del Castillo (2007); Muñoz (2009). Las características a definir en el diseño agronómico

The test specimens for tensile strength tests parallel to the fibers were prepared with a total length of 60 cm, in the middle of which was left a test portion of a rectangular cross-section measuring 2.5 cm wide and 10 cm length independently of wall thickness. For mounting the specimen in the testing machine a distance of 30 cm between the end catchers was established.

Each test was repeated three times for each section of the culm (low, medium and high) for each species, giving a total of 36 measurements. The mechanical tests were performed in the mechanics laboratory of soils and materials of the Faculty of Engineering of the Autonomous University of San Luis Potosí. The compression tests were carried out on an AUTOMAX 5 press and the bending and tensioning tests on a Forney universal test machine.

The obtained data were statistically analyzed by analysis of variance and comparison of means to see if there are differences between sections of the culms (low, medium and high), as well as among the four tested species, the Tukey's test with a confidence level of 5% was used. Both were conducted with the experimental designs software FAUANL package Version 1.1 (Olivares, 2012).

### **Greenhouse agronomic and structural design**

The prototype was thought to be built in the center of protected agriculture from the Faculty of Agriculture of the Autonomous University of San Luis Potosí, México. The location is 320 km east of the collection site (Huehuetlán, SLP), with geographic coordinates 22° 09' 00" north latitude and 100° 59' 00" west longitude with a height of 1 874 masl. Due to the semiarid climate of the place, the greenhouse design was based on this climate. For this purpose the literature was consulted to determine the desirable characteristics of a greenhouse for semiarid areas in México: Matallana and Montero (1995); Castellanos (2004); Sánchez del Castillo (2007); Muñoz (2009). The characteristics to define for the agronomic greenhouse design were: shape, height, ventilation, live and dead loads for tutoring, cover features and physical barrier to pests.

Based on the resistance values and the agronomic design defined above, and the maximum wind speed (110 km h<sup>-1</sup>), ideas of basic structural frameworks were proposed in order to favor such conditions. These models were captured using the STAAD.Pro®V8i software, which is widely used in three-dimensional structural analysis designed with an open architecture for static and dynamic

del invernadero fueron: forma, altura, ventilación, cargas vivas y muertas por tutoreo, características de la cubierta y barrera física para plagas.

Con base en los valores de resistencia y en el diseño agronómico definidos, así como la velocidad máxima de viento ( $110 \text{ km h}^{-1}$ ), se plantearon propuestas de marcos estructurales básicos que favorecieran dichas condiciones. Estos modelos se capturaron en el software STAAD.Pro<sup>®</sup>V8i, el cual es utilizado en el análisis estructural en tres dimensiones diseñado con una arquitectura abierta para el análisis estático y dinámico de estructuras de concreto, acero, aluminio, madera, en puentes, edificios, torres, estadios, etc. (Zertuche y Hernández, 2014). Con el software se simuló el comportamiento de las estructuras ante condiciones extremas y se calcularon los esfuerzos máximos en diferentes puntos críticos de la estructura para verificar que estos se encontraran en los márgenes de seguridad. Finalmente se eligió el mejor modelo por su simplicidad y estabilidad estructural.

El diseño de cimentación se basó en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (GODF, 2004), el cual especifica la resistencia de diseño ante estados límite de falla y factores de resistencia especificados, para que la estructura como la cimentación resistan las fuerzas cortantes, momentos torsionantes de entrepiso y de volteo inducidos por sismo combinados con los que correspondan a otras solicitaciones, y afectados del correspondiente factor de carga.

### Estimación de CO<sub>2</sub> involucrado

La emisión de CO<sub>2</sub> que se genera por la producción de acero para la construcción de un invernadero con dimensiones equivalentes a las del prototipo de bambú fue estimada. Para ello se recurrió a la recomendación de la norma mexicana para el diseño y construcción de invernaderos NMX-E-255-CNCP (DOF, 2008), que menciona el cumplimiento de 5 a 6 kg de acero por m<sup>2</sup> de invernadero. Además se consideró las emisiones de CO<sub>2</sub> al fabricar el acero, que es de 1 700 kg CO<sub>2</sub> por 1 000 kg de acero (WSA, 2008).

Así mismo, el CO<sub>2</sub> secuestrado en la biomasa de los culmos de bambú fue estimado al calcular el peso seco total de la estructura una vez construida. Tres muestras representativas de cada especie fueron previamente secadas en estufa con aire forzado a 65 °C hasta peso constante. Lo obtenido se multiplicó por el factor de 0.5 considerando que 50% de la biomasa vegetal está compuesta por carbono (Brown, 2002; Castañeda *et al.*, 2005).

analysis of concrete, steel, aluminum, and wood structures, in bridges, buildings, towers, stadiums, etc. (Zertuche and Hernández, 2014). Using this software the behavior of structures under extreme conditions were simulated and maximum efforts were calculated at different critical points of the structure to verify that they were within safety margins. Finally the best model was chosen for its simplicity and structural stability.

The design of the foundation was based on the Building Regulations for the Distrito Federal (GODF, 2004), which specifies the design strength to limit state failure and specified resistance factors to both the structure and its foundation resist shear forces, twisting moments of mezzanine and earthquake-induced turning moments combined with those corresponding to other stresses and affected by the corresponding load factor.

### Estimation of involved CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub> emission of that would be generated by steel production for the construction of a greenhouse with dimensions and characteristics equivalent to those of the bamboo prototype was estimated. Based on the recommendation of the Mexican standard for the design and construction of greenhouses NMX-E-255-CNCP (DOF, 2008), which mentions the compliance of 5 to 6 kg of steel per m<sup>2</sup> of the greenhouse. Furthermore CO<sub>2</sub> emissions of steel manufacture were considered, which is 1 700 kg CO<sub>2</sub> for 1 000 kg Steel (WSA, 2008).

Likewise, CO<sub>2</sub> sequestered in biomass of bamboo culms was estimated by calculating the total of the structure once built dry weight. Three representative samples of each species were previously oven dried with forced air at 65°C to constant weight. The weight obtained was multiplied by the factor of 0.5 whereas 50% of the plant biomass is composed of carbón (Brown, 2002; Castañeda *et al.*, 2005).

## Results and discussion

### Resistance tests

Compression. The information is important in the structural design of the greenhouse because of the constant effort that the columns are subjected to due to the weight of the structure, the dead and live loads. Dead loads are represented

## Resultados y discusión

### Pruebas de resistencia

**Compresión.** La información es importante en el diseño estructural del invernadero debido al esfuerzo constante en que están sujetos las columnas por efecto del peso de la propia estructura, de las cargas muertas, y las cargas vivas. Las cargas muertas están representadas por los elementos que permanecen colgados de la estructura por un periodo mayor a 30 días (ej. el cultivo). Las cargas vivas corresponden a elementos que permanecen colgados de la estructura del invernadero por periodos menores a 30 días.

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con la prensa Automax 5 indican que no existe diferencia estadística en la resistencia a la compresión entre secciones como entre especies, los valores promedios encontrados oscilaron de  $645 \text{ kg cm}^{-2}$  a  $952.31 \text{ kg cm}^{-2}$  (Figura 1a y 1b). Xiaobo (2004) reporta resultados similares en pruebas de resistencia practicadas en bambú (*Phyllostachys pubescens*), el análisis de varianza mostró que no hubo diferencia significativa entre diferentes alturas de bambú en tensión máxima de compresión paralela a la dirección longitudinal con promedio de  $865.73 \text{ kg cm}^{-2}$  en culmos de tres años.

**Flexión.** La información es útil en el diseño estructural del invernadero debido a que la fuerza más significativa que ejerce un esfuerzo sobre la estructura del invernadero es la debida al viento. Este tipo de presión ejerce un esfuerzo de flexión sobre las columnas. Las columnas de las paredes, especialmente las que están de frente a la dirección dominante del viento, deben ser capaces de soportar la presión máxima, que bajo el escenario más adverso sea producida. El distanciamiento entre columnas debe ser tal que la presión ejercida por el viento no sobrepase los esfuerzos permisibles del material utilizado como estructura del invernadero, esta opción puede ser utilizada para compensar las diferencias de resistencia encontradas entre secciones.

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con máquina de ensayo universal marca Forney indican diferencia significativa entre secciones, donde la flexión disminuye hacia la parte superior de los culmos en las cuatro especies. En el caso de *B. vulgaris* 'Striata', la diferencia de la sección inferior es de casi el doble en comparación con la sección superior:  $1\ 878 \text{ kg cm}^{-2}$  y  $978 \text{ kg cm}^{-2}$ , respectivamente (Figura 1c). Entre especies se observa

by the elements that remain hanging from the structure for a period longer than 30 days (eg. the crop). The live loads correspond to elements that remain hanging from the structure of the greenhouse for periods of less than 30 days.

The results obtained in tests conducted with the Automax 5 brand press indicate that there is no statistical difference in terms of compressive strength between sections and between species, found average values ranged from  $645 \text{ kg cm}^{-2}$  a  $952.31 \text{ kg cm}^{-2}$  (Figure 1a and 1b). Xiaobo (2004) reported similar results in stress tests performed in bamboo of *Phyllostachys pubescens* species, analysis of variance revealed no significant difference between different bamboo heights in maximum compressive stress to the longitudinal direction with  $865.73 \text{ kg cm}^{-2}$  average in culm of three years old.

**Flexure.** The information is useful in the structural design of the greenhouse because the most significant force exerting an effort on the structure of the greenhouse is due to the wind. This type of pressure exerts a bending stress on the columns. The columns of the walls, especially those facing the dominant direction of the wind, must be able to withstand the maximum pressure that can exist under the most adverse scenario. The spacing between columns must be such that the pressure exerted by the wind does not exceed the permissible stresses of the material used as the structure of the greenhouse, this option can be used to compensate for the differences in strength encountered between sections.

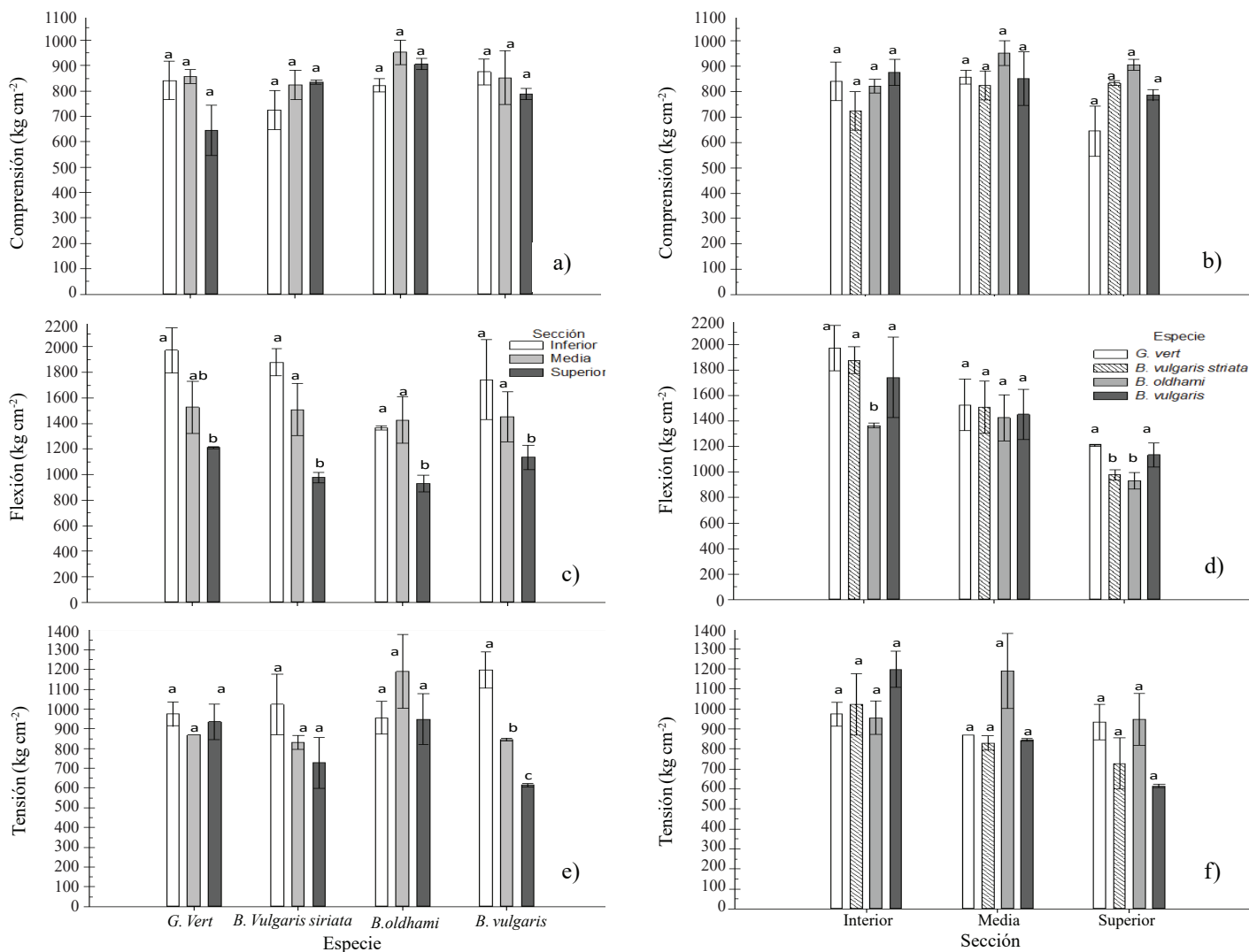
The results obtained in tests with universal testing machine Forney brand indicate significant difference between sections where the bending decreases toward the top of the culms in the four species. In the case of *B. vulgaris* 'Striata', the difference of the lower section is almost double compared to the upper section:  $1\ 878 \text{ kg cm}^{-2}$  and  $978 \text{ kg cm}^{-2}$ , respectively (Figure 1c). Between species a difference is observed in the lower section with the smaller value shown by *B. oldhami*. In the upper section also differences are observed, where *B. oldhami* and *Bambusa vulgaris* 'Striata' were the species that showed lower resistance (Figure 1d). Xiaobo (2004) reported similar results on the effect of the location of the vertical sample along the bamboo culm, which was not significant on flexural strength, with an average of  $1\ 574.4 \text{ kg cm}^{-2}$  in three years culms of the *Phyllostachys pubescens* species.

**Tension.** The information will be useful in the greenhouse design because the wind, in addition to exerting a pressure effort on the columns of the greenhouse, also produces

diferencia en la sección inferior con el valor menor mostrado por *B. oldhami*. En la sección superior también se observa diferencias, donde *B. oldhami* y *Bambusa vulgaris* ‘Striata’ fueron las especies que mostraron menor resistencia (Figura 1d). Xiaobo (2004) refiere resultados similares en el efecto de la ubicación de la muestra vertical a lo largo del culmo de bambú, que en su caso no fue significativa, sobre la resistencia a la flexión, con un promedio de 1 574.4 kg cm<sup>-2</sup> en culmos de tres años de la especie *Phyllostachys pubescens*.

significant suction forces. It is very common for walls and ceilings that are not facing the prevailing wind directions to be subjected to suction efforts.

The results obtained in tests with universal testing machine Forney brand indicate significant differences between the three sections of the stems in the species *B. vulgaris* var. *vulgaris*, the ratio is that at higher stem height the lower the flexural strength, lower section averaged 1 023 kg cm<sup>-2</sup> and the top 727 kg cm<sup>-2</sup> (Figure 1e).



**Figura 1. Resultados de pruebas de resistencias, a) compresión entre secciones de culmo por especie; b) compresión entre especies por sección; c) flexión entre secciones de culmo por especie; d) flexión entre especies por sección; e) tensión entre secciones de culmo por especie; y f) tensión entre especies por sección.** Las barras representan los promedios y error estándar obtenidos de tres repeticiones, letras diferentes indican diferencia significativa entre secciones y especies ( $p \leq 0.05$ , prueba de Tukey).

**Figure 1. Resistance test results, a) compression between culm sections by species; b) compression between species by section; c) bending between culm sections by species; d) bending between species by section; e) tension between culm sections by species; and f) tension between species by section.** Bars represent averages and standard error obtained from three replicates, different letters indicate significant difference between sections and species ( $p \leq 0.05$ , Tukey test).



Tensión. La información será útil en el diseño del invernadero debido a que el viento, además de ejercer un esfuerzo de presión sobre las columnas del invernadero, también produce fuerzas de succión significativas. Es muy común que las paredes y los techos, que no están frente a la dirección del viento predominante, estén sujetas a esfuerzos de succión.

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con máquina de ensayo universal marca Forney indican diferencias significativas entre las tres secciones de los tallos en la especie *B. vulgaris* var. *vulgaris*, la relación es que a mayor altura de tallo menor resistencia a la flexión, la sección inferior promedió 1 023 kg cm<sup>-2</sup> y la superior 727 kg cm<sup>-2</sup> (Figura 1e).

En base a los datos, se eligió para continuar con el diseño y construcción del invernadero a la especie *B. oldhami*, ya que presentó valores de resistencia similares al resto de las especies y por ser la de mayor disponibilidad en la zona de colecta. Además, esta ha mostrado una gran adaptación incluso en otras zonas geográficas de menor lluvia y temperaturas del estado de San Luis Potosí.

### Diseño agronómico de invernadero

Los criterios para el diseño agronómico se hicieron tomando en cuenta las recomendaciones de Matallana y Montero (1995); Castellanos (2004); Sánchez del Castillo (2007); Muñoz (2009). El Cuadro 1 muestra los criterios aplicados.

### Cuadro 1. Criterios de diseño agronómico para el prototipo de invernadero de bambú.

Table 1. Criteria of agronomic design for the prototype of bamboo greenhouse.

Característica	Criterio de diseño	Justificación
Forma del invernadero	Capilla a dos aguas con inclinación de techos de 18.5°	Facilitar la construcción al evitar curvar los culmos, la iluminación es adecuada y propicia un buen drenaje de agua por lluvias. La inclinación de los techos permite la entrada de luz directa y difusa eficientemente.
Altura	Canaleta de 3 m y 4.5 máxima altura, con un volumen de 3.75 m <sup>3</sup> aire interior por cada m <sup>2</sup> de invernadero	Permitir una adecuada estabilidad, buen régimen térmico y circulación del aire interior. Permite el crecimiento de los cultivos hortícolas de mayor altura.
Ventilación	Cortinas laterales que representa 25% de la cubierta del invernadero	Renovación constante de aire, facilitando la fertilización por CO <sub>2</sub> .
Cargas	Resistencia de carga es de 25 kg m <sup>-2</sup>	Permitir el tutoreo de tomate, pepino, pimiento, que son los cultivos de mayor interés económico en la zona.
Cubierta plástica	Polietileno flexible transparente de calibre 720	Presenta alta transmisividad de luz con adecuada radiación fotosintéticamente activa.
Protección contra insectos	Malla antiáfidos de 26*40 filamentos pulgada <sup>-2</sup> calibre 12	Control eficiente de insectos y plagas.

Based on the above data and in order to continue with the design and construction of the greenhouse the *B. oldhami* species was chosen, since it showed resistance values similar to other species and for being the most widely available in the collection area. In addition, this species has shown great adaptation even in other geographical areas of lower rainfall and temperatures in the state of San Luis Potosí.

### Agronomic greenhouse design

The criteria for agronomic design were made taking into account the recommendations of Matallana and Montero (1995); Castellanos (2004); Sánchez del Castillo (2007); Muñoz (2009). Table 1 shows the criteria.

### Greenhouse structural design

The design proposed for the basic structural framework is shown in Figure 2, which arises from STAAD. Pro®V8i software. The design integrates the features and specifications resulting from the resistance of culms of *B. oldhami* and agronomic design. Each frame is supported on four columns with a 3 m gap between them, each consisting of two bamboo culms. The geometric shape is two-water with an inclination angle of 18.5°. The three sections were structured, at its top (3 to 4.5 m) in a triangular shape in order to increase the resistance and stability of the greenhouse.

### Diseño estructural de invernadero

El diseño propuesto para el marco estructural básico se presenta en la Figura 2, el cual surge del software STAAD.Pro®V8i. El diseño integra las características y especificaciones que resultaron de las resistencias de los culmos de *B. oldhami* y diseño agronómico. Cada marco está apoyado en cuatro columnas separadas a 3 m de distancia, cada una formada por dos culmos de bambú. La forma geométrica es de dos aguas con ángulo de inclinación de 18.5°. Las tres secciones fueron estructuradas, en su parte superior (3 a 4.5 m) en forma triangular con el fin de aumentar la resistencia y estabilidad al invernadero.

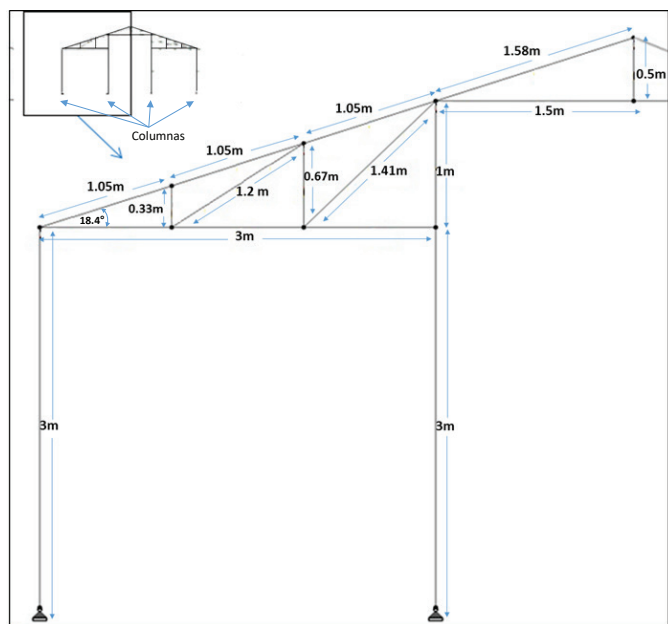


Figura 2. Detalle del marco estructural básico surgido del software STAAD.Pro®V8i.

Figure 2. Detail of the basic structural framework emerged from STAAD.Pro®V8i software.

Las uniones y elementos de ensamble del marco estructural básico se ilustran en la Figura 3. La pieza principal de conexión entre culmos es la varilla roscada de acero galvanizado de 3/8 con rondanas de 3/8 soldada en un extremo y sujetado con tornillo (arreglo en “T”), o en algunos casos con solo tornillos en ambos extremos. Para las uniones de 90° se realizó corte de tipo “boca de pescado”. Para las uniones menores de 90° se realizó corte tipo “pico de flauta”. Los toques son piezas de bambú de 8 cm de grosor que sirven para conectar piezas de bambú con ángulo de inclinación de 45°.

Joints and joint elements of the structural frame are illustrated in Figure 3. The main connection piece between culms is the threaded rod of galvanized steel 3/8 with 3/8 washers welded at one end and fastened with a screw (under “T”), or in some cases only with screws at both ends. For 90° joints a “fish mouth” type cut was held. For joints smaller than 90° a “slant” type cut was made. The stops are bamboo pieces of 8 cm thick that are used to connect bamboo pieces with 45° angle. Figure 3 also shows in a perspective of 90° rotation the detail of the joints of the columns carrying two culms, there is a transverse connection at the height of the channel in the first column, and two in the second column to join a crossbar and a spar.

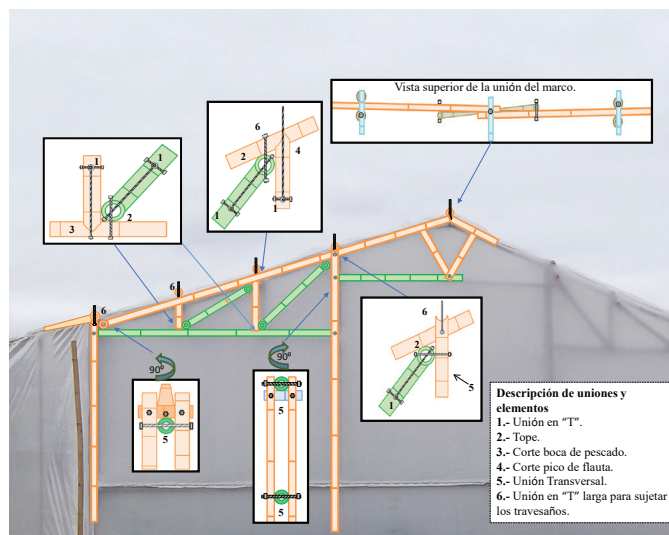


Figura 3. Modelo completo del prototipo de invernadero de bambú mostrando detalles de las conexiones.

Figure 3. Complete prototype model of bamboo greenhouse showing details of the connections.

The basic structural framework can be repeated indefinitely to extend the greenhouse (if desired), longitudinally, transversely or both. In this paper, for experimental purposes, the prototype was defined in longitudinal shape at 15 m. For this, seven structural frames were required, which were joined at the top by nine 15-meter stiles. The total area of greenhouse prototype is 135 m<sup>2</sup> with a 3 m height at the channel and 4.5 m total height (Figure 4). For the placement of the plastic of the greenhouse, a profile and fastener wire were placed in zig-zag form in the outer contours that joined to the culms by “butterfly” type screws.

La Figura 3 también muestra en una perspectiva en rotación de 90° el detalle de las uniones de las columnas que llevan dos culmos, se observa una unión transversal a la altura de la canaleta en la primer columna, y dos en la segunda columna para unir un travesaño y un larguero.

El marco estructural básico se podrá repetir indefinidamente para extender en invernadero (si así se deseara) en sentido longitudinal, transversal o ambos. En este trabajo, con fines experimentales, el prototipo se definió en forma longitudinal a 15 m. Para ello se requirió de siete marcos estructurales, los cuales fueron unidos en la parte superior por nueve largueros de 15 m. La superficie total del prototipo de invernadero es de 135 m<sup>2</sup> con una altura a la canaleta de 3 m y 4.5 m de altura total (Figura 4). Para la colocación del plástico del invernadero, se colocó perfil y alambre sujetador en forma de zig-zag en los contornos exteriores que se unieron a los culmos por medio de tornillo tipo “mariposa”.

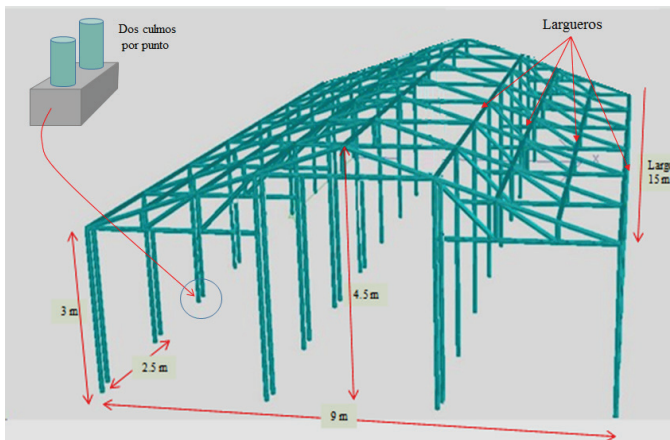


Figura 4. Perspectiva general del prototipo de invernadero de bambú surgido del software STAAD.Pro®V8i.

Figure 4. Overview of bamboo greenhouse prototype emerged from STAAD.Pro®V8i software.

La disposición de las zapatas para la cimentación del invernadero se muestra en la Figura 5, con un total de 28 elementos. El modelo de cimentación tiene una profundidad de la cimentación de 55 cm, la cual está calculada de acuerdo a la profundidad en la que se encontró material sólido del subsuelo en el que se planea la construcción del invernadero. En cada zapata, se proyecta colocar dos postes de bambú montados sobre una varilla del número 4 con un relleno de concreto para su fijación y sujeción.

The arrangement of the pads for the greenhouse foundation is shown in Figure 5, with a total of 28 elements. The foundation model has a depth of 55 cm, which is calculated according to the depth where the solid subsoil was found where the greenhouse construction is planned. In each pad, it is projected to place two bamboo poles mounted on a number 4 rod with a concrete filling for fixing and clamping.

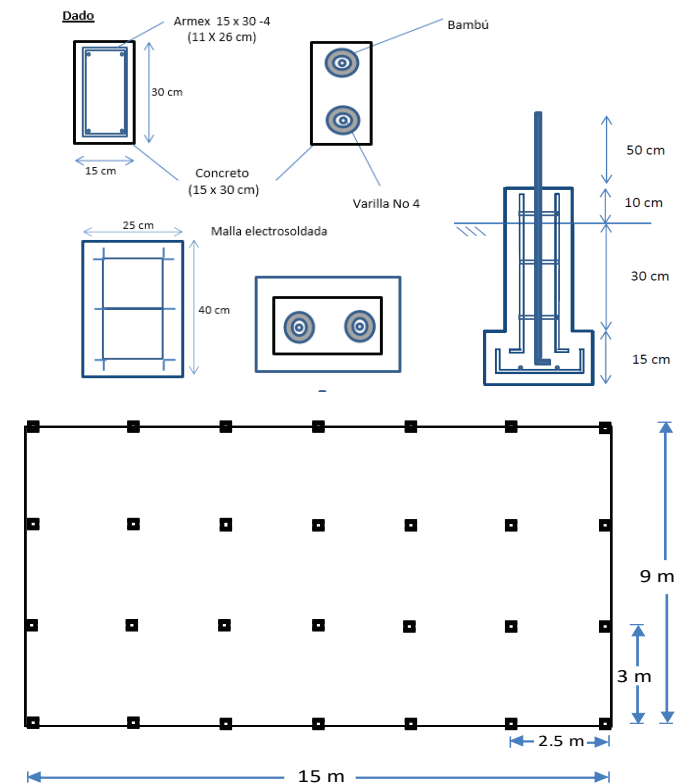


Figura 5. Detalle del diseño y ubicación de las zapatas.  
Figure 5. Detail of the design and location of the pads.

### Environmental benefit of using bamboo

The procedure used to calculate the carbon released in steelmaking is shown in Table 2, where the use of 5 to 6 kg of steel per m<sup>2</sup> of greenhouse is considered, according to the norm NMX-E-255-CNCP (DOF, 2008). In this case it is estimated a total of 1 147.5 kg of CO<sub>2</sub> emissions by the steel used in a greenhouse with the dimensions of the bamboo prototype. On the other hand, the procedure used to calculate the carbon sequestered in the bamboo biomass is shown in Table 3.

### Beneficio ambiental del uso de bambú

El procedimiento empleado para el cálculo del carbono liberado en la producción de acero se muestra el Cuadro 2, donde se considera el uso de 5 a 6 kg de acero por m<sup>2</sup> de invernadero de acuerdo a la norma NMX-E-255-CNCP (DOF, 2008). En este caso se estima en un total de 1 147.5 kg las emisiones de CO<sub>2</sub> por el acero utilizado en un invernadero con las dimensiones del prototipo de bambú. Por otra parte, El procedimiento empleado para el cálculo del carbono secuestrado en la biomasa de bambú se muestra el Cuadro 3.

#### Cuadro 2. Memoria de cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> liberado a la atmósfera durante la producción de acero.

Table 2. Calculation memory of CO<sub>2</sub> emissions released into the atmosphere during the production of steel.

Concepto de cálculo	Resultado
Cantidad mínima de acero por m <sup>2</sup> de invernadero	5 kg·m <sup>-2</sup>
Dimensiones del invernadero	135 m <sup>2</sup>
Cantidad de acero en un invernadero convencional de las mismas dimensiones (5 kg m <sup>-2</sup> )(135 m <sup>2</sup> )	675 kg
Emisiones de CO <sub>2</sub> por cada tonelada de acero producido	1 700 kg CO <sub>2</sub> /1 000 kg de acero
Emisiones de CO <sub>2</sub> para producir el acero de un invernadero convencional de las mismas dimensiones (675 kg)(1 700 kg CO <sub>2</sub> /1 000 kg)	1 147.5 kg CO <sub>2</sub>

El valor estimado es de 463.8 Kg de C y 1 699.5 Kg de CO<sub>2</sub>. Sumando la cantidad de CO<sub>2</sub> que se mantendría fijado en la biomasa de bambú estructural más la que se dejaría de arrojar a la atmósfera durante la producción de acero para una estructura equivalente, se puede estimar el beneficio ambiental de utilizar una estructura de bambú en sustitución de una de acero en 2 847 kg de CO<sub>2</sub>.

Lo anterior, sin considerar otros beneficios ambientales no evaluados en este trabajo, tales como el CO<sub>2</sub> que queda fijado en el terreno en el que crece el bambú, cantidad que según la FAO (2002), podría ser significativa. Los bambúes no solo almacenan carbono en su biomasa foliar, sino que contribuyen a la biomasa existente bajo el suelo por sus raíces y el aporte de residuos y de esta manera, los suelos se constituyen en el mayor reservorio de carbono del ciclo terrestre de este elemento.

### Cuadro 3. Memoria de cálculo de CO<sub>2</sub> secuestrado en la biomasa de bambú estructural.

Table 3. Calculation memory of CO<sub>2</sub> sequestered in structural bamboo biomass.

Concepto de cálculo	Resultado
Promedio de diámetro exterior de los culmos (d)	6.5 cm
Promedio de espesor de la pared (t)	1.3 cm
Longitud total de culmos (L)	520 m
Área de sección transversal de los culmos (A) $A = (\pi/4)[d^2 - (d - 2t)^2]$ $A = (\pi/4)[(0.065 \text{ m})^2 - (0.065 \text{ m} - (2 \cdot 0.013 \text{ m}))^2]$	0.002124 m <sup>2</sup>
Volumen de bambú (V) $V = L A = (520 \text{ m})(0.0021 \text{ m}^2)$	1.1 m <sup>3</sup>
Densidad media de muestras del tejido de bambú (D)	840 kg m <sup>-3</sup>
Biomasa de bambú (B) $B = V D = (1.1 \text{ m}^3)(840 \text{ kg m}^{-3})$	927.6 kg
Contenido de carbono en la biomasa de bambú (% C)	50%
El carbono secuestrado en la biomasa de bambú $C = (50)(927.64 \text{ kg})/100$	463.8 kg
El CO <sub>2</sub> secuestrado en la biomasa de bambú $\text{CO}_2 = 463 \text{ kg de C} (3.67)$	1 699.5 kg

The estimated value is 463.8 kg of C and 1 699.5 kg of CO<sub>2</sub>. Summing up the amount of CO<sub>2</sub> that would remain fixed in the structural bamboo biomass plus that which would stop being dumped into the atmosphere during steel production for an equivalent structure, the environmental benefit of using a bamboo structure instead of a steel one can be estimated in 2 847 kg of CO<sub>2</sub>.

The foregoing without considering other environmental benefits not evaluated in this work, such as CO<sub>2</sub> which remain fixed in the ground where bamboo grows, amount that according to FAO (2002), might be significant. The bamboos not only store carbon in foliar biomass, but also contribute to the existing ground biomass through their root systems and the contribution of waste to the soil (branches and leaves) and thus, soils are the largest carbon reservoir of the terrestrial cycle of this element.

A 45 meses de haber realizado el diseño y construcción del prototipo de invernadero con estructura de bambú, este se ha mantenido estable y firme. Las labores de mantenimiento se han reducido a ajustes de tornillos de sujeción y barnizado con aceite de ricino. Se considera que la cubierta plástica ha contribuido a reducir el desgaste de los culmos al evitar el contacto con el agua de lluvia y reducir la incidencia de rayos UV, ambos considerados agentes con poder de degradación de materiales naturales.

## Conclusiones

La resistencia a la compresión de los culmos de bambú de las cuatro especies son estadísticamente iguales, los mismo resultó entre las secciones inferior, media y superior; los valores promedios oscilaron de  $645 \text{ kg cm}^{-2}$  a  $952.31 \text{ kg cm}^{-2}$ . En flexión no se encontró diferencia significativa entre las especies, solo en las secciones, se observa que la flexión disminuye hacia la parte superior de los culmos en las cuatro especies; los valores promedios encontrados oscilaron de  $850.17 \text{ kg cm}^{-2}$  a  $1\,927.63 \text{ kg cm}^{-2}$ . En tensión se muestra diferencias significativas solo entre las secciones de los tallos en *B. vulgaris* var. *vulgaris*, en esta especie la sección inferior promedió  $1\,023 \text{ kg cm}^{-2}$  y la superior  $727 \text{ kg cm}^{-2}$ . Con los datos de resistencia y características agronómicas deseables para invernaderos de zonas áridas se determinó un diseño estructural con el uso del software STAAD.Pro<sup>®</sup>V8i. Las especificaciones de construcción del prototipo se exponen a detalle a manera de que pueda reproducirse sin complicaciones por parte de los productores. Finalmente se estima un beneficio ambiental en emisiones de  $\text{CO}_2$  de  $2\,847 \text{ kg}$  en la construcción del invernadero de  $135 \text{ m}^2$  en relación a uno de misma área construido de acero.

## Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), delegación San Luis Potosí, México, por las facilidades otorgados para la adquisición de los culmos de bambú. A PROMEP-SEP por su apoyo económico a través de la red de agricultura sostenible del centro y norte de México (ASOCEN), número de convenio PROMEP/103.5/12/2110, UASLP-CA-209. Al Ing. Ángel Estrada Martínez por su apoyo en el diseño de gráficos.

45 months after the design and construction of the greenhouse prototype with bamboo structure, this has remained stable and firm. The maintenance work has been reduced to adjustments of fastening screws and varnishing with castor oil. It is considered that the plastic cover has contributed to reduce the wear of the culms by avoiding contact with rainwater and reduce the incidence of UV rays, both considered agents with degradation power of natural materials.

## Conclusions

The compressive strength of bamboo culms of the four species are statistically equal, the same happened between the lower, middle and upper sections; the average values ranged from  $645 \text{ kg cm}^{-2}$  to  $952.31 \text{ kg cm}^{-2}$ . In bending, no significant difference was found between species, only in the sections, it is observed that bending decreases towards the top of the culms in the four species; the found average values ranged from  $850.17 \text{ kg cm}^{-2}$  to  $1\,927.63 \text{ kg cm}^{-2}$ . Tension showed significant differences only between stems sections in *B. vulgaris* var. *vulgaris*, in this species the lower section averaged  $1\,023 \text{ kg cm}^{-2}$  and the top  $727 \text{ kg cm}^{-2}$ . Using resistance data and agronomic characteristics desirable for greenhouses in arid areas a structural design was determined using STAAD.Pro<sup>®</sup>V8i software. Construction specifications of the prototype are exposed to detail so that they can be reproduced without complications by producers. Finally an environmental benefit is estimated in  $\text{CO}_2$  emissions of  $2\,847 \text{ kg}$  in greenhouse construction of  $135 \text{ m}^2$  compared to one of the same area constructed out of steel.

*End of the English version*



## Literatura citada

- Brown, S. 2002. Measuring, monitoring and verification of carbon benefits for forest-based projects. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* 360: 1669-1683.
- Cárdenas, L. M. 2011. Bambú. *In* Bambú. Sánchez-Vidiella, A. Editorial FKG. 383 p.
- Castellanos, J. Z. 2004. Manual de producción hortícola en invernadero. 2<sup>da</sup>. Edición. INTAGRI, S. C. México. 469 p.

- Castañeda, M. A. J.; Vargas, H. A.; Gómez, G. J.; Valdez, H. H. y Vaquera, H. H. 2005. Acumulación de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Agrociencia*. 39:107-116.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2008. Norma Mexicana NMX-E-255-CNCP-2008, invernaderos de cubiertas plásticas. Diseño y construcción - especificaciones. México.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos No 96. Roma, Italia. 70 p.
- GODF (Gaceta Oficial del Distrito Federal). 2004. Reglamento de construcciones para el Distrito Federal. 29 de enero del 2004, ciudad de México. México. 43 p.
- Gutu, T. 2013. A study on the mechanical strength properties of bamboo to enhance its diversification on its utilization. *Int. J. Inno. Technol. Exp. Eng.* 2(5):2278-3075.
- ISO (International Organization for Standardization). 2004. International Standard ISO 22157-1:2004 (E). Bamboo determination of physical and mechanical properties. 314-319 pp.
- Matalana, G. A. y Montero, J. I. 1995. Invernaderos: diseño, construcción y ambientación. 2a Edición. Mundi-Prensa. España. 209 p.
- Moreno, R. A.; Aguilar, J. y Luévano, G. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*. 15(29):763-774.
- Muñoz, R. J. J. 2009. Estructuras de invernaderos y cubiertas de protección. J. Z. Castellanos (Ed.). *In: manual de producción hortícola en invernadero*. INTAGRI, México. 21-41 pp.
- Olivares, S. E. 2012. Paquete de diseños experimentales. FAUANL, Versión 1.1. Facultad de Agronomía Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N. L., México.
- Pineda, M. L. F. 2005. Descripción del clima y modelación numérica de fenómenos meteorológicos en San Luis Potosí. Tesis de Posgrado en Ciencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. San Luis Potosí. 55 p.
- Sánchez, del C. F. 2007. Diseño agronómico de invernaderos. *In: Memorias V Simposio internacional de producción de cultivos en invernaderos*. Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de las Garza, Nuevo León, México. 31 p.
- Sharma, P.; Dhanwantri, K. and Mehta, S. 2014. Bamboo as building material. *International Journal of Civil Engineering Research*. 5(3):249-254.
- Ubolsook, P. and Thepa, S. 2011. Structural analysis of bamboo trusses structure in greenhouse. Second international conference on environmental science and technology IPCBEE. IACSIT Press, Singapore. 6:228-232.
- Valera, M. D. L.; Belmonte, U. L. J.; Molina, A. F. D. y López, M. A. 2014. Los invernaderos de Almería, análisis de su tecnología y rentabilidad. *In: memorias I seminario técnico agronómico*. Universidad de Almería. CAJAMAR. Almería, España. 504 p.
- Villa, I. M. R. 2011. ¿Qué hacemos con el campo mexicano? Segunda edición, Editor Colegio de Postgraduados. 434 p.
- Xiaobo, L. 2004. Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. Thesis submitted to the graduate faculty of the Louisiana State University and Agriculture and Mechanical College The School of Renewable Natural Resources. 68 p.
- WSA (World Steel Association). 2008. Informe de sustentabilidad de la industria siderúrgica mundial 2008. Editado por World Steel Association, Bruselas, Bélgica. 9-10 pp.
- Zertuche, H. A. y Hernández, S. R. 2014. Manual Staad.Prov8i. Primera edición, Tomo I. Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo. México. 725 p.