

Láminas, pliegues y estructuras. Relaciones biomecánicas en la lámina de la hoja de la palma *Bismarckia nobilis*.

Simón Chinchilla Quiroz, Juan Carlos Henao Celada, Andrés Herrera Arcila
Grupo de investigación de estudios en diseño (GED), Universidad Pontificia Bolivariana, Circular 1 N° 70 – 01,
Medellín, Colombia.

* E-Mail Autor de correspondencia.

Resumen

La biomimética es una ciencia que estudia a la naturaleza como fuente de inspiración para el desarrollo de nuevos conocimientos. En esta se identifica la biomecánica estructural de las plantas como unas de las principales herramientas para obtener ideas de optimización en el diseño de sistemas artificiales. Dentro de las especies vegetales, se identifican las palmas como unos excelentes exponentes de los principios de optimización de las superficies planas, como, por ejemplo, en la *Bismarckia nobilis*, el uso de sistemas plegados da cuenta de la resistencia estructural y formal presente en la hoja de la planta. A partir de esto se plantea como pregunta de investigación, ¿Cuál es la relación existente entre la morfología y la capacidad portante presente en la lámina de la *Bismarckia nobilis*?, con la finalidad de obtener resultados relevantes para el proceso de investigación y desarrollar aplicaciones eficientes dentro del diseño estructural.

Metodológicamente, el proyecto incluyó la toma de muestras, la caracterización estructural, el análisis digital y su posterior relación estadística. Las pruebas que se determinaron para el desarrollo del proyecto fueron compresión y flexión, en las que se encontró como principal resultado el hecho de que en las gráficas obtenidas se evidencia una linealidad, por ende, en las líneas de regresión se obtuvo la pendiente como un indicador de rigidez de la lámina. A modo de conclusión, se puede decir que la relación que se encontró entre la morfología y la capacidad portante no es constante, para unas variables es inversamente proporcional y para otras es directamente proporcional.

Abstract

Biomimetics is a science that studies nature as a source of inspiration for the development of new knowledge. In this the structural biomechanics of plants is identified as one of the main tools to get ideas of optimization in the design of artificial systems. Within the plant species, the palms are identified as excellent exponents of the principles of optimization of flat surfaces, as for example, in the *Bismarckia nobilis*, the use of folded systems gives account of the structural and formal resistance present in the leaf of the plant. From this, it is proposed as a research question, Which is the relationship between morphology and bearing capacity present in the leaf of

Bismarckia nobilis? with the purpose of obtaining relevant results for the investigation process and develop of efficient applications within structural design.

Methodologically, the project included sampling, structural characterization, digital analysis and its subsequent statistical relationship. The tests that were determined for the development of the project were compression and flexion, in which the main result was the fact that in the obtained graphs a linearity is evidenced, therefore, in the regression lines the slope was obtained as an indicator of stiffness of the leaf. By way of conclusion, it can be said that relationship between morphology and bearing capacity is not constant, for some variables it is inversely proportional and for others it is directly proportional.

Palabras Clave: Biomecánica de plantas, *Bismarckia nobilis*, capacidad portante, morfología, lámina, pliegues.

1 INTRODUCCIÓN

El diseño industrial como disciplina creativa ha utilizado la biomimética como una herramienta para mejorar el desarrollo proyectual, la cual es entendida como la abstracción de las características de las soluciones naturales como insumo para el desarrollo de nuevos sistemas. Dentro de la biomimética, el campo de la biomecánica estructural de plantas se presenta como uno de los principales campos de estudio, debido a que las plantas han desarrollado un conjunto de estrategias eficientes desde el punto de vista estructural. Entre las especies vegetales más relevantes, se identifican las palmas como unos excelentes exponentes de los principios de optimización de las superficies planas.

En cuanto a la capacidad portante, esta es entendida como la carga que puede soportar una estructura. En el caso de la lámina, experimenta diferentes comportamientos físico-mecánicos para resistir las cargas provenientes de su entorno, este comportamiento está ligado directamente con la conformación de placas plegadas, las cuales tienen unos puntos con mayor resistencia y soporte. El concepto de Niklas (1999), llamado *Cord-web model*, justifica que la delgada lámina de las hojas es un tipo de malla donde se entrelazan un número de pequeños hilos, que la hacen más fuerte. La lamina presenta una estructura de placas en ángulo equivalentes a una viga de sección rectangular con altura igual al ancho de ambas placas (Figura 1). Una franja que está a través de la losa se comporta como una viga continúa apoyada en los pliegues, la cual muestra la carga a la que es sometida. (Figura 2) (Salvadori, 1986). Se define estructura a todo el conjunto de partes que se mantienen entre sí para conformar un todo. Así, se tendrá en cuenta a ese todo como la lámina y los patrones que están conformados por una serie de pliegues, los cuales se encargan de dar estructura. Uno de los principios más importantes es que en todos los puntos de una estructura, cualquier fuerza debe ser equilibrada y contrarrestada por otra igual y opuesta.

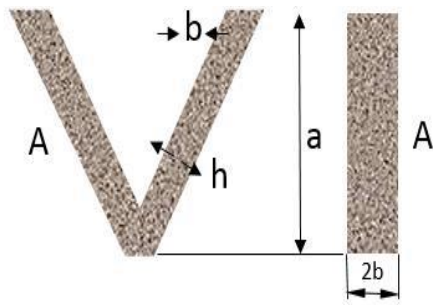


Figura 1. Viga rectangular equivalente a una placa plegada.

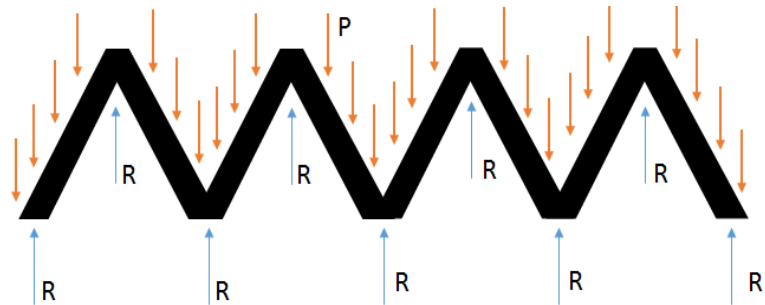


Figura 2. La (R) resistencia el punto de unión frente a la (P) presión que se hace sobre los pliegues.

Por su parte, la palmera *Bismarckia nobilis* responde a fuerzas mecánicas, estáticas y dinámicas. Esta palmera se diferencia desde su morfología por tener un tipo de pliegue que se observa en la mayoría de las palmas hojeadas, donde están plegadas en forma de canalón en V (Henderson, 2009) (Figura 3). Las láminas de estas especies funcionan como paneles de tejidos que distribuyen las cargas de manera equitativa en diferentes puntos a lo largo de toda la superficie. Si se observa desde una sección transversal en medio del pliegue, hay zonas que reciben mayor presión y soportan más carga que el resto de la estructura. Esta configuración estructural se extiende por toda la sección de la lámina, que en esta especie se presenta en forma de abanico (Figura 4).



Figura 3. Guía estructural a partir de la cual se genera el panel tejidos.

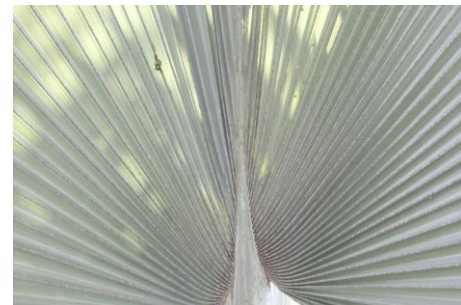


Figura 4. A partir del peciolo se despliega la lámina en forma de abanico.

Para el desarrollo de la investigación se definió como pregunta científica ¿Cuál es la relación entre la morfología y la capacidad portante presente en la lámina de la *Bismarckia nobilis*?, la justificación de la pregunta está dada por el estudio que se realizará de la lámina de la planta, el cual está enfocado en el desarrollo de nuevos conocimientos y complementar el existente frente a las relaciones entre las estructuras y las cargas que soportan las láminas de las plantas herbáceas. Esto permitirá que la investigación se desarrolle con el propósito de identificar una característica relevante entre la morfología y la capacidad portante, hecho que dará lugar a una posterior aplicación de la misma. Con base en la información obtenida previamente, se pretende optimizar al máximo un material a transformar, con la intención de generar aplicaciones óptimas y eficientes en el campo del diseño estructural.

Hay que tener presente que la biomecánica de plantas es un tema estudiado ampliamente desde tiempo atrás, en 1638, *Galileo Galilei* hace un estudio sobre los tallos huecos de hierba utilizándolos como material de construcción para superficies periféricas, al soportar en mayor magnitud fuerzas de flexión. En 1874, *Simon Schwendener* afirma que la biomecánica de plantas se convirtió en un campo de estudio claro, al publicarse una manera de responder las incógnitas anatómicas de las plantas desde una perspectiva ingenieril. En 1926, *Wladimir Radorsky* concluye que las plantas están hechas de materiales compuestos, deben ser rígidas y flexibles para aguantar la fuerza de arrastre de sus fluidos y éstas se adaptan respondiendo a fuerzas dinámicas y estáticas presentes en su entorno. En 1999, *Karl Niklas* hace una síntesis sobre la función y la forma de la hoja para el soporte de cargas dinámicas dadas por el contexto de la planta, también habla sobre patrones de distribución de la tensión y el estrés generado en el conjunto pecíolo lámina. En 2008, *Windsor-Collins* determina que los pecíolos son más rígidos cerca a la lámina, luego de realizar un proceso de medición, modelos digitales y pruebas de flexión y torsión en los pecíolos de la palma *Trachycarpus fortunei*.

2 METODOLOGÍA

Se empezó por definir unas variables morfológicas acordes al análisis estructural de materiales, que permitieran caracterizar la capacidad portante y el desempeño mecánico en la lámina de la *Bismarckia nobilis*. Para el desarrollo de este proyecto se hizo una caracterización morfológica de la lámina, posteriormente se caracterizó su capacidad portante, luego se realizó un análisis estadístico de los datos y por último se realizó una síntesis de toda la información.

2.1 Caracterización morfológica presente en la *Bismarckia nobilis*.

Para la definición de las características morfológicas presentes en la lámina de la *Bismarckia nobilis* (Figura 5), se comenzó por tomar sus medidas generales, es decir, largo, ancho y calibre de la hoja, luego se tomaron medidas específicas: largo, ancho y distancia entre pliegues, de secciones elegidas al azar. Se llevó un registro fotográfico del proceso con una cámara semi profesional y por último se digitalizó con ayuda del software Rhinoceros y SolidWorks.



Figura 5. Imagen de la lámina de la *Bismarckia nobilis* en comparación con una regla de 1 m de largo.

Las variables morfológicas específicas se establecieron con base en la mecánica de materiales tradicional para el análisis de estructuras, y con ayuda del registro fotográfico, con medidas guía y la digitalización con el software Rhinoceros sobre los ejemplares destinados para las pruebas de flexión y compresión.

En la prueba de flexión fue necesario realizar un corte transversal al pliegue del bloque de parafina, con el fin de obtener el perfil del mismo, luego se trazó digitalmente la sección resultante del corte, que permitiera calcular las medidas generales y el área real de la sección en la planta, para construir una figura geométrica que mantuviera las proporciones y permitiera identificar el ángulo entre ellas y, así determinar las siguientes variables: ángulo de pliegue, momento de inercia y área transversal. Para el proceso de digitalización de la prueba de compresión fue necesario tomar la secuencia de los pliegues y definir qué factores intervenían a la hora de aplicar la carga. Para este análisis se utilizaron las siguientes variables: ángulos superiores (beta), ángulos inferiores (alfa), longitud de secciones A, longitud de secciones B y longitud total transversal (sumatoria de secciones A y B). La nomenclatura utilizada es simbólica, con la finalidad de diferenciar las variables a trabajar.

2.1.2. Caracterizar la capacidad portante presente en la *Bismarckia nobilis*.

Para realizar la caracterización de la capacidad portante se fabricaron dos prototipos de equipos de pruebas mecánicas, uno de ellos para las pruebas de flexión y otro para las pruebas de compresión. Para la prueba de flexión se utilizó un tablero aglomerado de 12 mm, una prensa de sujeción, un perfil metálico en forma de V, un vaso plástico, un flexómetro y una aguja. Para la prueba de compresión se utilizó un tablero aglomerado de 36 mm, tubos de PVC, un contenedor plástico, una regla milimetrada y una aguja. Una vez contruidos los equipos, se hizo una toma de muestras en dos ejemplares de una misma palma madura ubicada en el Jardín Botánico de Medellín. Para obtener las diferentes muestras se preparó la hoja retirando el peciolo y se cortó la lámina en 10 secciones, 5 de ellas fueron cercanas al peciolo y las otras 5 fueron en la zona distal, con la finalidad de desarrollar las pruebas de compresión y flexión, respectivamente (Figura 6).

En las pruebas de compresión, las muestras fueron dispuestas horizontalmente sobre una placa plana que ya contenía los elementos mencionados anteriormente. Para las pruebas de flexión, las secciones seleccionadas se embebieron en parafina, sobre una placa plana que ya contenía los elementos mencionados. En la ejecución de las pruebas de flexión y compresión se realizaron 3 repeticiones para cada una de las muestras.

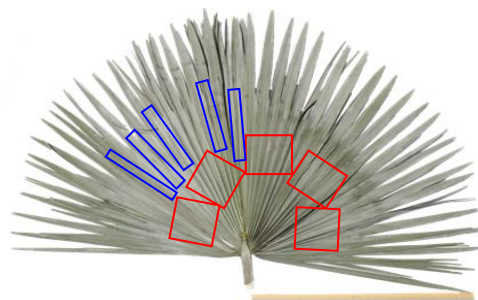


Figura 6. Lámina de la *Bismarckia nobilis*, en rojo se señalan los ejemplares destinados para la prueba de compresión, y en azul los ejemplares destinados para la prueba de flexión.

Debido a la deshidratación rápida que presenta la lámina, y lo que esto conlleva en las variaciones en el color, tamaño y rigidez estructural, se debe hacer un buen manejo del tiempo para no alterar significativamente los resultados de las pruebas, de esta manera se distribuyeron las tareas para que se realizaran en simultánea y lo mas ágil posible, así, un integrante se encargaba de cortar y preparar las muestras, otro del registro fotográfico, y el último de la preparación de los prototipos. Por medio de la ejecución de estas pruebas, los prototipos permitieron establecer la deformación de los ejemplares con relación a las cargas que se le fueran aplicando. Para estas pruebas se trabajó con una deformación equivalente al 10% de la longitud de cada muestra, además se repitió el ensayo 3 veces para cada una, con la finalidad de evidenciar una recuperación en su morfología y en su capacidad portante.

Para la prueba de compresión se utilizaron las secciones más cercanas al peciolo, ya que estas presentaban una densidad mayor de pliegues. Los 5 ejemplares utilizados tenían una medida aproximada de 20 cm por 20 cm y fueron ubicados debajo de una superficie que distribuyera el peso uniformemente sobre la sección de la lámina, y que al mismo tiempo permitiera observar su comportamiento y llevar un registro fotográfico con respecto a cada carga aplicada. (Figura. 7).

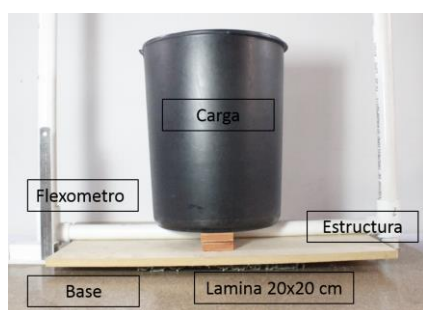


Figura 7. Se fabricó una estructura en H que permitiera estudiar el comportamiento de cada muestra al aplicarse una carga y realizar un registro fotográfico para el desarrollo de cada prueba.

En esta prueba se aplicaron 2500g en total a cada uno de los ejemplares, distribuidos en 5 cargas equivalentes a 500g, con el propósito de apreciar una deformación significativa en la morfología y en la resistencia a la compresión de dicha sección de la lámina. Para el desarrollo de los

estudios se realizó una medición inicial y una serie de mediciones con respecto a la aplicación de cada carga, con la finalidad de evidenciar la deformación de las muestras. (Figura 8).

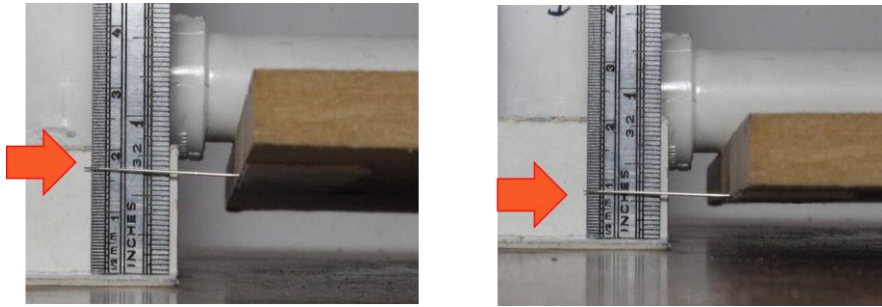


Figura 8. En la prueba de compresión se inició con la capacidad que tiene el ejemplar de soportar el peso de la estructura, y se continúa con la medición de la deformación al aplicársele cada carga.

La prueba de compresión se desarrollo de manera que se pudiera tener registro de cada aplicación de cargas sobre las muestras. Por consiguiente, se aplicaba la totalidad de la carga a una muestra y se tenía un orden secuencial, con el objetivo de realizar la prueba sobre cada sección y realizar las 2 repeticiones posteriores en el mismo orden, dejando un margen de tiempo que permitiera la recuperación de las muestras. Los ejemplares destinados para la prueba de flexión se cortaron de 25 cm por el ancho de cada pliegue, esta longitud se debe a que cada muestra necesita un punto de apoyo, el cual hace referencia a una sección del ejemplar que se embebió 5 cm en un bloque de parafina. Este soporte permite que sobre el extremo opuesto se puedan aplicar las cargas que permiten evidenciar la deformación para cada una de las muestras (Figura 9).

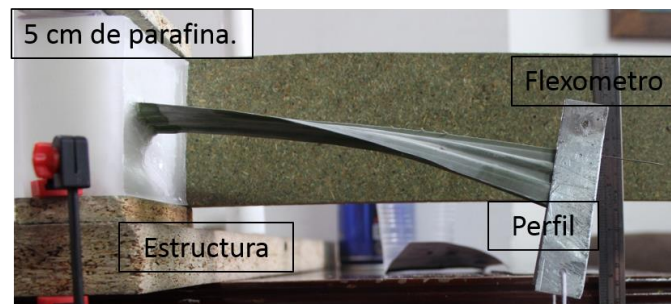


Figura 9. Prototipo fabricado para la realización de la prueba de flexión.

Esta prueba presentaba una preparación mucho más rigurosa y minuciosa, pues se requiere de un soporte en parafina que sirva de apoyo a la muestra, el cual necesita un proceso de calentamiento previo y un tiempo de enfriamiento después de la incrustación del ejemplar. Por otra parte, se necesita un perfil en V que se adaptara a la morfología de la sección y que permitiera la aplicación de las cargas sobre el extremo opuesto de la base de parafina.

Para el desarrollo de la prueba se tuvo presente que la deformación era equivalente al 10% de la longitud de las secciones (20mm). Previo al depósito de cargas, se estableció el peso que

equivalía a la deformación planteada para la deformación, que presentaba cargas diferentes debido a la capacidad portante de cada ejemplar. Luego de definir la carga total correspondiente a cada ejemplar, la prueba se desarrolló de la misma manera que la prueba presentada anteriormente. Se dividió dicha carga en 5 secciones iguales, las cuales se fueron aplicando incrementalmente hasta completar la carga total correspondiente al 10% de la deformación (Figura 10). Se continuaba con otra muestra en orden secuencial, y por último se repetía 2 veces en el mismo orden, permitiendo el mismo tiempo de recuperación para cada ejemplar.



Figura 10. Para cada muestra se toma la medida inicial y las medidas con respecto a la aplicación de cada carga.

Luego de realizar la caracterización morfológica de la capacidad portante se pasó a comparar las variables (variable morfológica / capacidad portante), con el propósito de obtener la información y los datos pertinentes para el desarrollo del proyecto. Para esto fue necesario el uso del software Microsoft Excel, que permitiera registrar y comparar la información obtenida, y adicionalmente realizar una síntesis de comparación entre cada grupo de muestras.

2.1.3. *Análisis y síntesis de la información.*

Las variables geométricas fueron analizadas dimensionalmente a través del software Excel, estas fueron representadas a través de gráficas. Para los datos resultantes de las pruebas mecánicas se utilizaron gráficas de dispersión, y para las relaciones entre las características morfológicas, las propiedades estructurales y la capacidad portante se utilizaron gráficos de barras.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización morfológica

De la caracterización morfológica se obtuvieron los datos generales de la lámina (Tabla 1) y las medidas de cada uno de los pliegues de la misma (Tabla 2).

LARGO (cm)	2.10
ANCHO (cm)	1.50
ESPESOR (cm)	0.10

Tabla 1. Medidas generales, en las que se tiene en cuenta el largo, ancho y espesor de la lámina.

PLIEGUE	LARGO (cm)	ANCHO (cm)
1	110	6,0
2	140	6,0
3	150	6,2
4	150	6,2
5	130	6,1
6	135	6,0
7	109	6,1

Tabla 2. Información de distintos pliegues de la lámina seleccionados al azar.

Las secciones cercanas al peciolo presentaban una concentración mayor de pliegues, lo que permitía soportar una carga mayor, mientras las secciones que estaban más alejadas presentaban un perfil en V más definido y adecuado para ubicar un peso sobre su extremo para evaluar la resistencia a la flexión de cada sección. La figura 11 muestra los perfiles reales de las secciones de la lámina, acompañados de una abstracción geométrica de cada uno, en ambos casos se muestran las variables dimensionales: ángulo del pliegue, momento de inercia y área transversal.

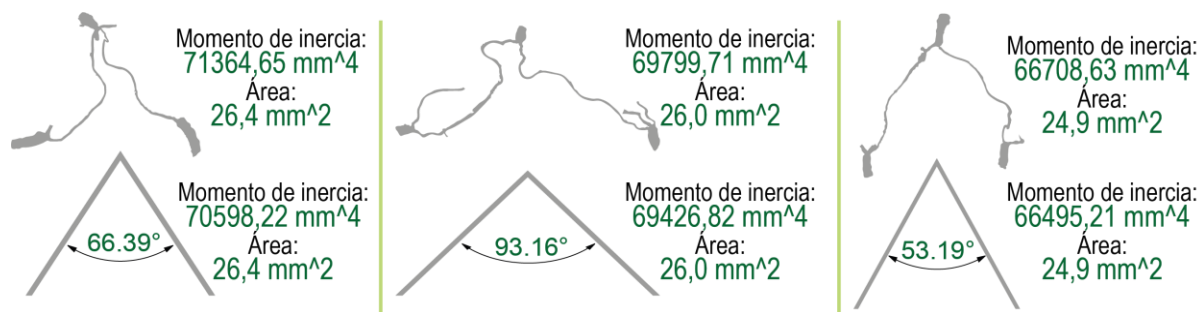


Figura 11. La tabla muestra la sección transversal real y la sección transversal abstraída.

Aunque las muestras fueron tomadas de la misma hoja y aparentemente el sistema demostraba tener una regularidad geométrica, al tomar los datos reales se encontró que el sistema es muy irregular. Por medio del registro fotográfico y la digitalización se pudo identificar que, en los extremos superiores e inferiores, la lámina tiene una costilla de refuerzo, pues se observa un espesor y área mayor, que puede ayudar a la planta a mejorar su rigidez a la flexión.

En las pruebas de compresión se puede decir que, en las líneas de tendencia se identifica un comportamiento lineal, sustentado en el valor del promedio de $R^2 = 0,9001$. Además, el promedio de la pendiente = 0,0013, es un indicador de la rigidez que presenta la lámina ante la prueba de compresión. Las líneas de comportamiento se pueden observar en las líneas de dispersión que muestra la figura 12.

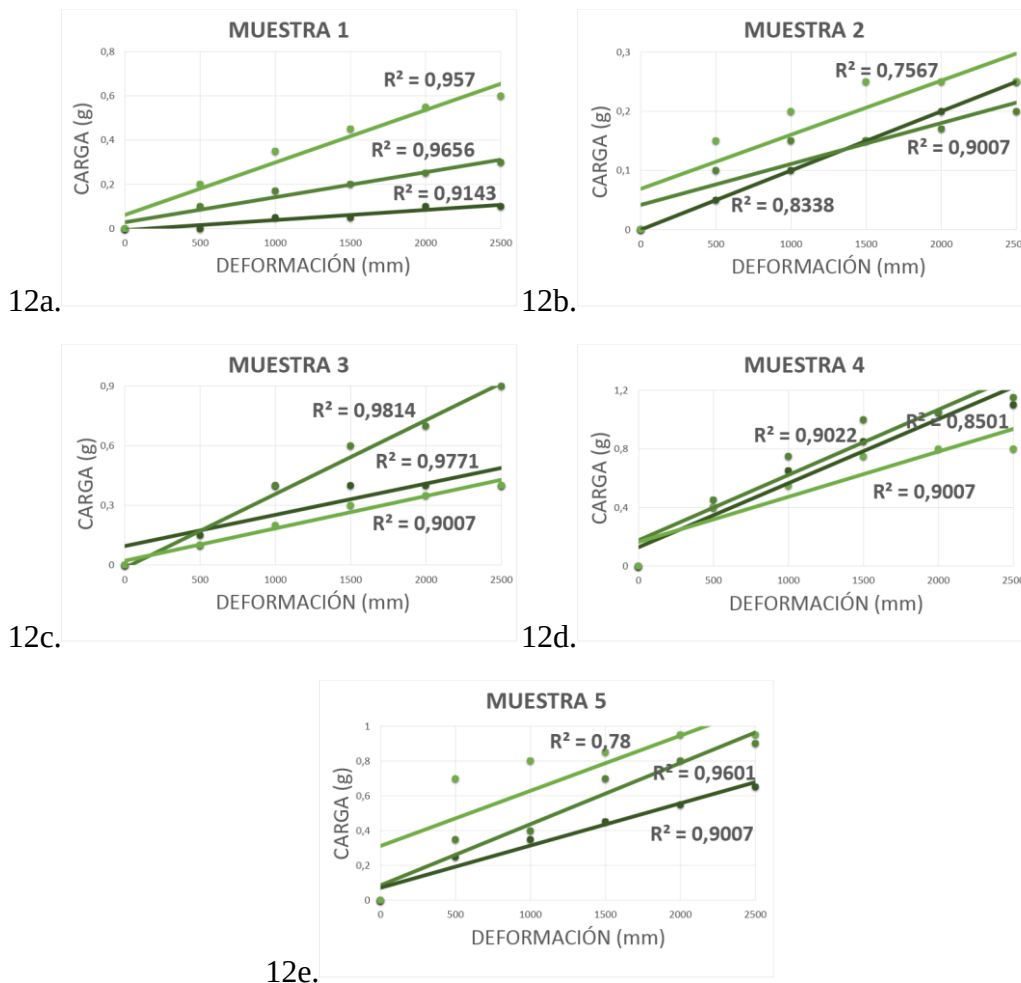
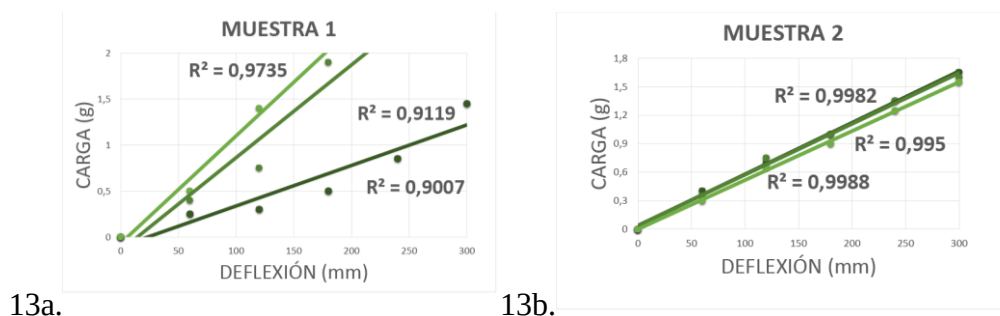


Figura 12. Gráficas obtenidas de cada uno de los ensayos de compresión.

En las pruebas de flexión se puede decir que, en las líneas de tendencia se identifica un comportamiento lineal, sustentado en el valor del promedio de $R^2 = 0,9681$. Además, el promedio de la pendiente = 0,0073, es un indicador de la rigidez que presenta la lámina ante la prueba de flexión. Las líneas de comportamiento se pueden observar en las líneas de dispersión que muestra la figura 13.



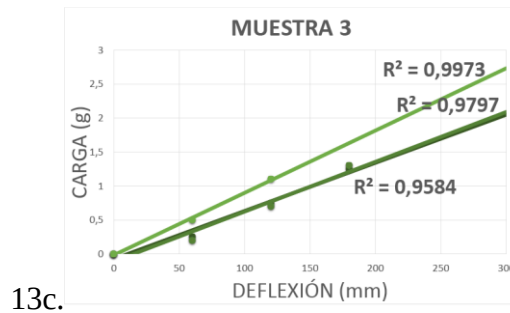


Figura 13. Gráficas obtenidas de cada uno de los ensayos de flexión.

Al relacionar los valores de las variables geométricas observadas y los valores de los resultados de las pruebas mecánicas se establecieron las siguientes relaciones: carga vs ángulo, carga-área transversal y relación carga-momento de inercia ver Figura 14.

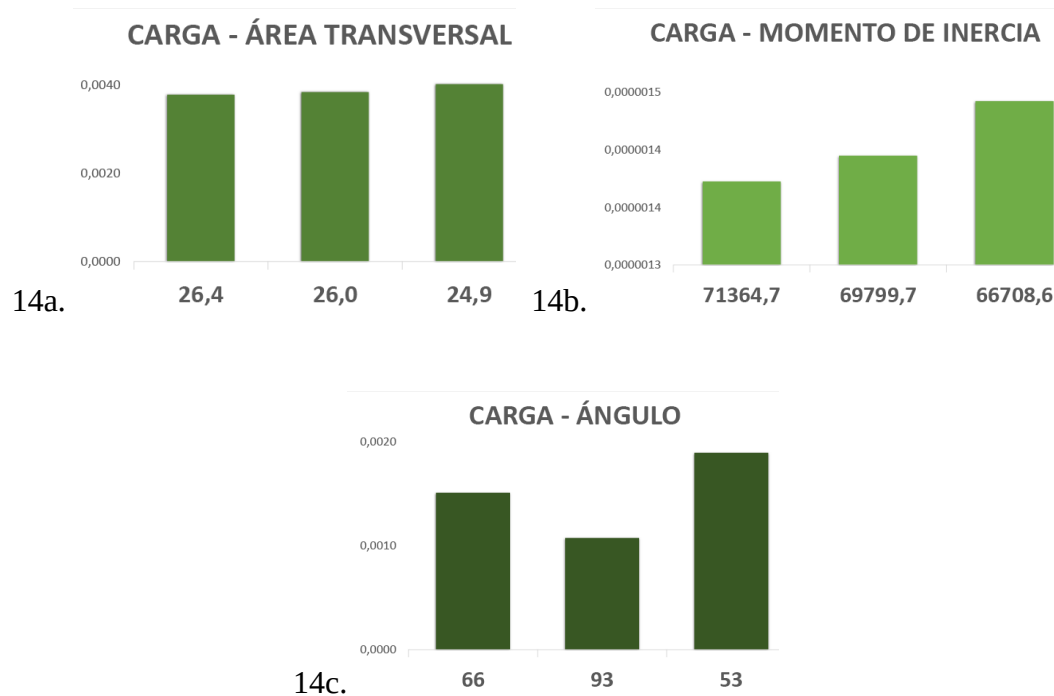


Figura 14. Graficas de las relaciones entre carga y variables morfológicas.

Observando las tres figuras es posible decir que la relación entre la carga - área transversal y carga - momento de inercia presentan un comportamiento constante, mientras que la relación carga -ángulo, es directamente proporcional, y es evidente que un ángulo 53 o menor presenta mayor capacidad portante.

El resultado de la digitalización de la sección transversal obtenida en la prueba de compresión se evidencia en la figura 15.

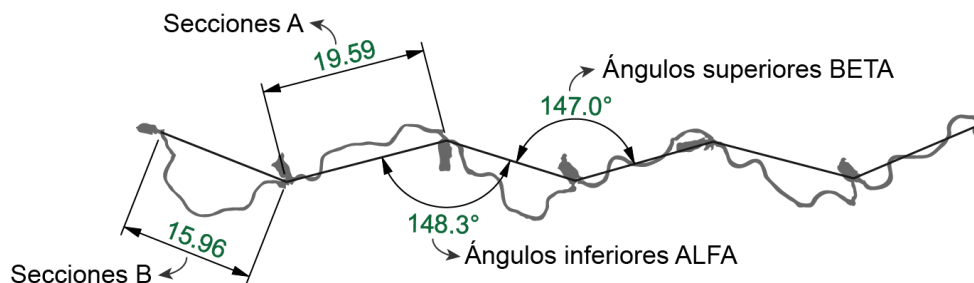


Figura 15. Características morfológicas de la prueba de compresión.

Luego de definir las características morfológicas a trabajar y teniendo en cuenta la carga de deformación aplicada en la prueba de compresión, se pasó a realizar los cruces de relación entre las secciones A vs deformación, la cual evidencia una tendencia a la proporción y una relación inversamente proporcional; secciones B vs deformación, la relación tiende a ser directamente proporcional; ángulos ALFA vs deformación, donde es evidente un comportamiento inversamente proporcional; y ángulos BETA vs deformación, en la cual debido a la dispersión de los datos no se puede sacar ninguna conclusión. (Figura 16)

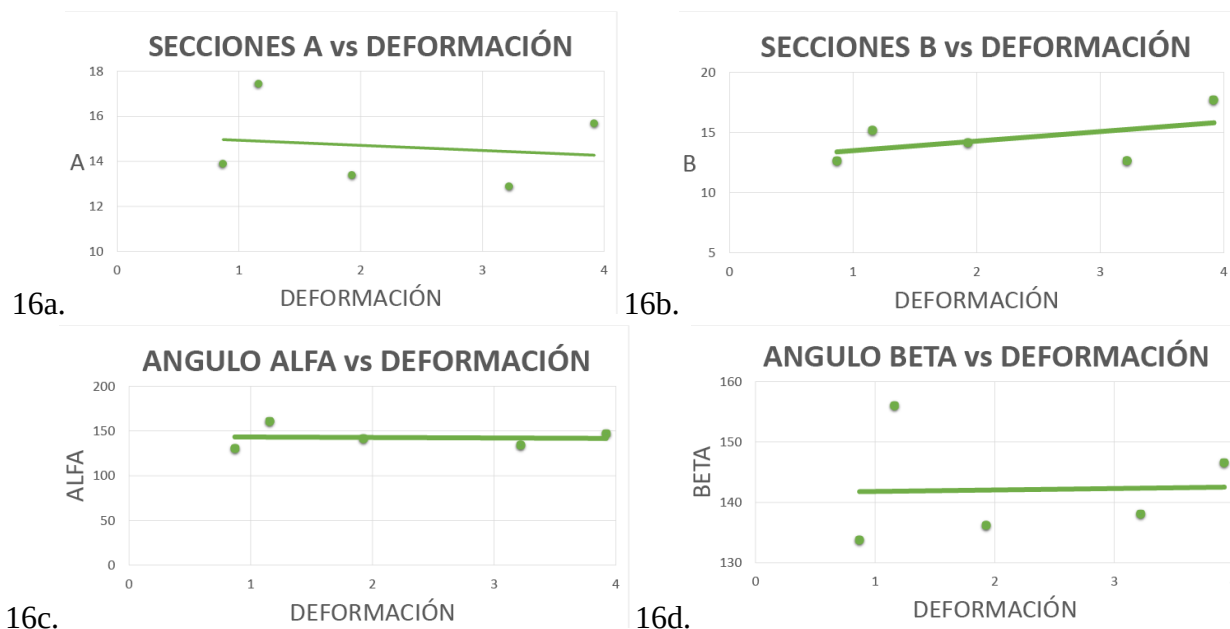


Figura 16. Gráficas de las relaciones entre deformación y variables morfológicas.

4 AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las ayudas facilitadas por el jardín botánico de Medellín, especialmente a Yádis Álvarez quien proporcionó el permiso para obtener las muestras y a Juan David, director de vida

del jardín botánico, por la aprobación y disposición de las mismas. Queremos agradecer también a nuestros asesores en la investigación, Andrés Valencia y Diana Urdinola.

5 CONCLUSIONES

El desarrollo de este proyecto permite concluir que la relación entre la capacidad portante y las características morfológicas de la lámina de la *Bismarckia nobilis* no es constante, debido que para unas variables es inversamente proporcional y para otras es directamente proporcional, en algunas de las variables estudiadas no fue posible definir dicha relación.

Luego de las pruebas de flexión y compresión realizadas sobre varios ejemplares de la lámina de la *Bismarckia nobilis*, y la posterior definición de las variables morfológicas a utilizar, se encontró que el comportamiento de la relación entre la carga y la deformación de la lámina es lineal debido a que en las líneas de regresión se obtuvo un r^2 cercano a 1 y en la pendiente se obtuvo como resultado que, a mayor pendiente, mayor rigidez de la lámina.

6 REFERENCIAS

1. **Gordon, J.E.** *Estructuras o por qué las cosas no se caen*. España : Calamar ediciones, 2004.
2. **Henderson, Andrew.** *Palms of southern asia*. s.l. : Princeton University Press., 2009.
3. **Niklas, Karl J.** Research review A mechanical perspective on foliage leaf. *Section of Plant Biology*. 1999.
4. **Salvadori, Mario.** *Estructuras para arquitectos*. España : s.n., 1986.
5. **Schwendener, Simon.** *Das mechanische Princip im anatomischen Bau der Monocotylen*. suiza : s.n., 1874.
6. **Windsor-Collins.** *Section properties of palm petioles*. 2008.