

**Tesis de pregrado**  
**Biofotónica y arcnología**

**Efectos de la radiación solar y ultravioleta tipo C sobre las propiedades mecánicas de la seda de captura de *Nephila clavipes* (Linnaeus, 1767)**

Juan Pablo Cardozo-De La Hoz<sup>1</sup>, Sebastian Viveros Zapata<sup>1</sup> & Anderson Arenas Clavijo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Programa de Biología, Departamento de Ciencias Naturales y Matemáticas, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana Cali*

**Resumen:** La luz ultravioleta (UV) ocupa un espectro de longitudes de onda más corto del que pueden ver los seres humanos. Este tipo de luz es altamente energética y puede ocasionar daños en compuestos biológicos, como lo es la seda de araña. Entre los estudios que tratan la interacción entre la seda y los rayos UV, el género *Nephila* ha sido objeto de estudio por las propiedades inherentes a sus telarañas, mismas que presentan una alta resistencia a la radiación solar y UV. El presente estudio evaluó si la elongación pre ruptura de la seda de captura de *Nephila clavipes* se ve reducida por la exposición a luz solar y UVC para conocer cómo los efectos del cambio climático y subsecuente degradación de la capa de ozono pueden afectar su ecología. Se observó que la exposición de la seda a los rayos UVC no afecta significativamente su elongación máxima, sugiriendo posibles adaptaciones que promueven la resistencia y durabilidad de las telarañas de la especie. Además, es posible que factores externos no tenidos en cuenta influyen en el efecto de la irradiación de las telas.

**Palabras clave:** UVC; *Nephila clavipes*; seda de captura; elongación pre ruptura

**Abstract:** Ultraviolet (UV) light occupies a shorter wavelength spectrum than humans can see. This type of light is highly energetic and can cause damage to biological compounds, such as spider silk. Among the studies that deal with the interaction between silk and UV rays, the genus *Nephila* has been the subject of study due to the inherent properties of its webs, which have a high resistance to solar and UV radiation. The present study evaluated whether the pre-breakage elongation of the capture silk of *Nephila clavipes* is reduced by exposure to sunlight and UVC to learn how the effects of climate change and subsequent ozone layer degradation may affect its ecology. It was observed that exposure of silk to UVC does not significantly affect its maximum elongation, suggesting possible adaptations that promote the species' web strength and durability. In addition, it is possible that external factors not taken into account influence the effect of irradiation of the webs.

**Keywords:** UV-C; *Nephila clavipes*; capture silk; pre breakage elongation

## Introducción

La radiación solar que llega a la Tierra ocupa una amplia franja del espectro electromagnético, donde una gran parte es ocupada por la luz visible para el ser humano, con longitudes de onda de 400 a 700 nm. El resto del espectro está ocupado por la luz ultravioleta, la luz infrarroja y los rayos gamma (Azcón-Bieto & Talón, 2013; Cronin & Bok, 2016). La luz ultravioleta (UV) es aquella cuya longitud de onda varía entre 100 y 400 nm, y la mayoría de este rango no está naturalmente presente en la Tierra (Cronin & Bok, 2016). La luz UV se divide en tres regiones: UVA, que abarca desde 315 nm hasta 400 nm; UVB, que abarca entre 280 y 315 nm; y UVC, que abarca desde 100 nm hasta 280 nm. Los rayos UVC son completamente absorbidos por la atmósfera, mientras que los UVA y UVB llegan hasta la superficie de la Tierra; los UVA son más comunes porque pueden atravesar la capa de ozono en mayor proporción (Cronin & Bok, 2016). La disminución de la capa de ozono conlleva un aumento de la entrada de rayos UV (Herman et al., 1996), lo que altera la temperatura de ciertas regiones del planeta y afecta a la ecología de especies animales y vegetales. Los rayos UVC, al presentar una mayor carga energética que los otros dos mencionados, se emplean para labores de desinfección debido a su capacidad para degradar las proteínas y los ácidos nucleicos de agentes biológicos (Tarrán, 2002).

La degradación de la capa de ozono se debe a la presencia de compuestos clorofluorocarbonados, gases que se han emitido a la atmósfera durante décadas (Newman et al., 2009), además de otros gases de efecto invernadero (GEI), como el CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>, que son gases muy comunes desde la Revolución Industrial y cuyo impacto se debe a sus altísimas concentraciones en la atmósfera (Tuckett, 2018). Por su parte, la deforestación—concepto definido por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) como la conversión permanente de una zona de bosque a una zona no forestada debido a un uso del suelo distinto, como la agricultura, la ganadería o la expansión de la frontera humana—es un factor que contribuye al cambio climático, ya que los organismos autótrofos contribuyen a la absorción de GEI, lo que permite mantener las condiciones óptimas en los ecosistemas que los albergan (Campbell et al. 2009; Salgado, 2014). La interacción entre los GEI y la deforestación contribuye al aumento de la entrada de rayos UV, alterando la ecología de especies animales y vegetales.

La biofotónica es el campo de la biología en el que se emplean técnicas que involucran el uso de luz para detectar o controlar fenómenos biológicos desde el nivel molecular hasta el organismo (Luo, 2020), algunas técnicas derivadas de la biofotónica permiten estudiar el comportamiento animal, puesto que la exposición a ciertas longitudes de onda puede alterar la respuesta a estímulos y también las interacciones entre los individuos y su medio, apoyándose en diversas subdisciplinas, entre otras, la óptica y la ecología. Por un lado, la óptica se ocupa de manipular sistemas biológicos mediante la interacción del organismo con la luz, mientras que la ecología se encarga de investigar y comprender las interacciones de los organismos con su entorno, en este caso, el comportamiento que estos muestran al ser expuestos a la luz.

Las arañas son depredadores que habitan una gran diversidad de ecosistemas gracias a la adaptación que les confiere la seda. Kaston (1964) identificó tres usos principales que las arañas le dan a la seda: la construcción de estructuras lineales (líneas de arrastre y paracaídas), estructuras planas (anclajes, red espermática, redes del amor, entre otras) y estructuras tridimensionales (telaraña, saco de huevos y madrigueras, principalmente). Hasta la fecha, se han identificado siete tipos de seda producida por arañas que contribuyen a la supervivencia de dichos organismos (Vollrath, 2000); sin embargo, no todas las especies pueden producir todos los tipos de seda.

Entre los estudios de biofotónica con seda de araña, destaca el realizado por Osaki (2004), que midió los efectos que los rayos UVA, UVB y UVC tienen sobre la seda de araña de *Nephila clavata* (L. Koch, 1878). El resultado fue que la exposición a los rayos UVA y UVB aumentaba la tensión de

rotura, pero disminuía la tensión mecánica, lo que facilitaba la ruptura de la red, mientras que los UVC destruían la estructura proteica de la seda. Por otro lado, Stellwagen, Opell & Clouse (2016) llevaron a cabo un experimento para constatar los efectos de los rayos UVA sobre el pegamento glicoproteico de la seda de *Argiope trifasciata* (Forsskål, 1775) (especie diurna) y *Neoscana crucifera* (Lucas, 1838) (especie nocturna). Estos autores concluyeron que las gotas pegajosas no se degradaban significativamente al ser sometidas a los rayos UVA y mencionaron que la función de captura de presas no se veía afectada. Por su parte, Lai & Goh (2015) evaluaron sedas de *Araneus diadematus* Clerck, 1757 y *N. clavata*, y concluyeron que las propiedades mecánicas, de fuerza, extensibilidad y resistencia a la ruptura de la seda disminuyen, y que esta última adquiere una resistencia similar a la de los ligamentos y tendones humanos. En ese sentido, el estudio de las afectaciones de los rayos UV sobre la seda de araña abre la oportunidad de evaluar cómo las variaciones en las propiedades de la seda modifican las interacciones entre las arañas y su entorno.

La familia Araneidae es objeto de estudio por contener géneros con características únicas entre el orden Araneae, entre ellos destaca *Nephila* Leach, 1815, grupo que ha sido ubicado en múltiples familias diferentes a lo largo del tiempo (Dimitrov et al., 2016; Scharff et al., 2019): Tetragnathidae (Levi, 1986) por caracteres morfológicos presentes en machos; Nephilidae (Kuntner, 2006; Kuntner, Coddington & Hormiga, 2008), por presentar comportamientos distintos a los miembros de Tetragnathidae; o Araneidae (subfamilia Nephilinae Simon, 1894), tras realizarse estudios genéticos, morfológicos y de comportamiento (Álvarez-Padilla et al., 2009; Blackledge et al., 2009; Dimitrov & Hormiga, 2011; Dimitrov et al., 2012; Kuntner et al., 2013). Los miembros del género poseen la capacidad de producir seda dorada y son los integrantes más grandes de su respectiva familia (Kuntner & Coddington, 2009), específicamente las hembras, que pueden alcanzar una masa entre 125 y 500 veces mayor que la de los machos, lo que constituye un caso único de gigantismo en hembras. Además, producen telarañas orbitales aéreas de hasta un metro y medio de diámetro (Kuntner & Coddington, 2009; Kuntner et al., 2013). A las tejedoras de seda dorada, como se las conoce comúnmente, se les atribuye una importante función ecológica en los ecosistemas tropicales y subtropicales, y son un modelo biológico relevante para diversos estudios, entre los que destaca la biología de la seda.

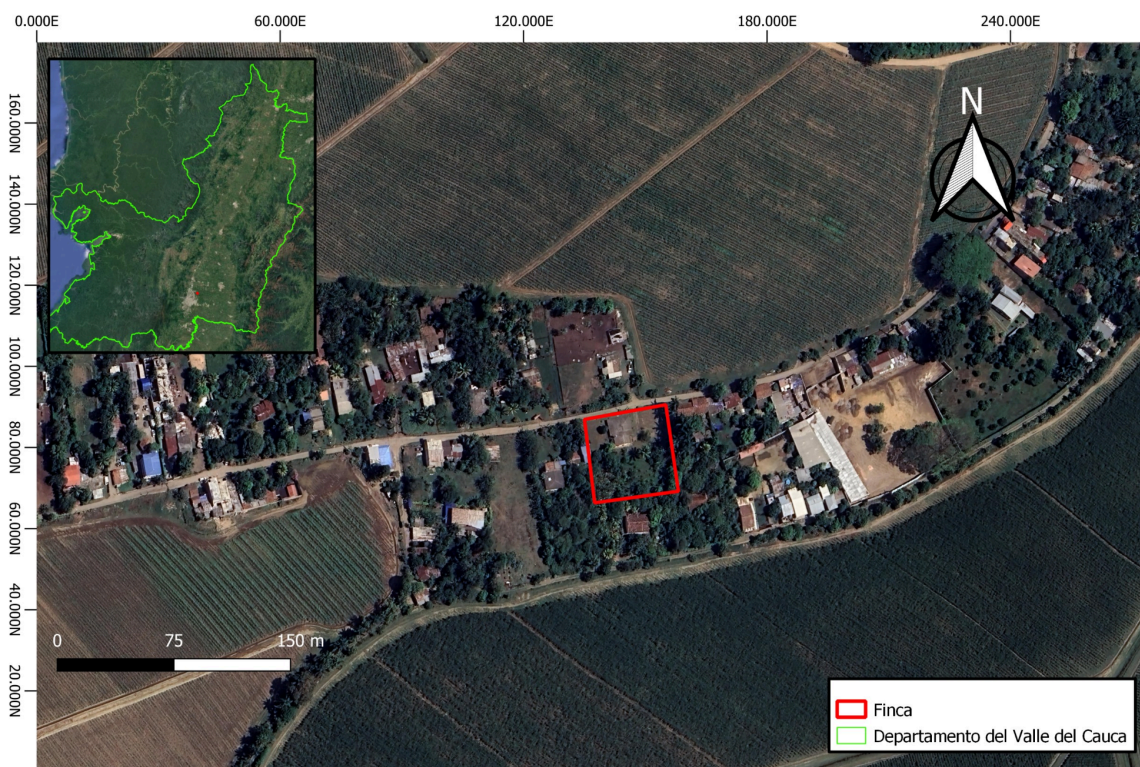
La araña de seda dorada, *Nephila clavipes* (Linnaeus, 1767), es un neofilido que se encuentra en ambientes tropicales y prefiere los ecotonos, especialmente aquellos con vegetación moderada y microclimas altamente húmedos (>80 %), donde los especímenes juveniles suelen estar directamente bajo la luz solar, mientras que los adultos no tanto debido a la relación negativa entre la temperatura letal y el peso corporal (Moore, 1977). A su vez, es objeto de estudio por producir siete tipos diferentes de seda que utiliza para diversos fines ecológicos y cada uno de ellos está asociado a una glándula de seda: Envolver presas (glándulas aciniformes), la seda de fijación (glándulas piriformes), las líneas de arrastre de seguridad (glándulas ampulares mayores), la seda espiral de captura temporal (glándulas ampulares menores), el filamento espiral de captura (glándulas flageliformes), el pegamento pegajoso (glándulas agregadas) y las cubiertas de los huevos (glándulas tubuliformes) (Correa-Garhwal et al., 2020).

Los estudios con la seda de araña son relevantes porque permiten conocer mejor la ecología de la especie, específicamente cómo afectan a las propiedades de la seda las alteraciones en la concentración de rayos UV y cómo se desarrollan las interacciones depredador-presa. También se han planteado usos en los campos de la medicina, la industria textil y otros sectores para este material (Huby et al., 2013; Lai y Goh, 2015). Sabiendo que los rayos UV pueden alterar las propiedades de la seda y que su producción es importante, se planteó la siguiente pregunta: ¿cómo afecta la exposición a la luz ultravioleta al punto de ruptura de la seda espiral de captura en las telarañas de *Nephila clavipes*? Al conocer algunas de las alteraciones que ocurren en la seda por efecto de la exposición a los rayos UV, se puede inferir que la seda tratada tendrá una disminución en la capacidad de

estiramiento, lo que puede afectar al éxito de captura de presas y, por ende, a la supervivencia y la ecología de la especie.

## Materiales y métodos

**Área de estudio.** La fase de campo se llevó a cabo en la finca Miramonte ( $3^{\circ} 29' 0.841''$  N,  $76^{\circ} 27' 33.328''$  W), ubicada en el corregimiento de Caucaseco, en el municipio de Palmira-Valle del Cauca (Figura 1). La selección del lugar se llevó a cabo tras analizar la zona, visitando múltiples fincas aledañas para registrar la presencia de individuos de *Nephila clavipes*. Se examinaron detalladamente los árboles de más de 2 m de altura y con separaciones de entre 3 y 5 m entre tallos (principalmente de árboles frutales, que son frecuentes en la zona), para observar la presencia de telarañas que pudieran pertenecer a *N. clavipes*, tanto de manera individual (presencia de telarañas en un solo árbol) como de manera grupal (presencia de telarañas extendidas de un árbol a otro).

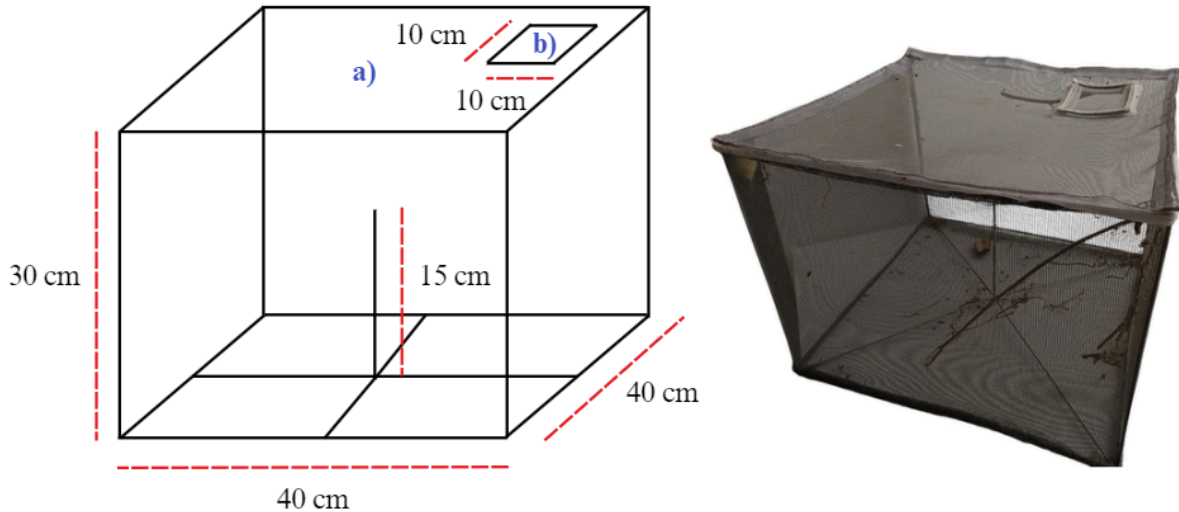


**Figura 1.** Mapa de la zona de estudio. En rojo se marca la finca Miramonte.

**Recolección de especímenes.** Los especímenes se recolectaron durante mayo de 2024. Para la recolección se utilizó una vara de madera de aproximadamente 2 m de longitud para alcanzar las telarañas que se encontraban en las zonas altas (mayores de 3 m) de los árboles frutales de *Psidium acutangulum*. Los individuos situados a menos de 2 m de altura fueron recolectados con un recipiente de plástico de 40 x 50 x 30 cm. La abertura del recipiente se ubicó debajo de la araña suspendida en su red y la cubierta se situó por encima del espécimen, de manera que al sellarlo quedara dentro del

recipiente. Para las arañas encontradas a más de 3 m de altura, se recogieron ramas de entre 5 y 10 cm de largo y con un diámetro menor de 5 mm para colocarlas en el extremo superior de la vara de madera, de modo que entrasen en contacto directo con la telaraña y se obtuviera su atención mediante vibraciones muy bajas, haciéndolas pensar que se trataba de una presa potencial. Posteriormente, se despojó a la araña de su red de agarre haciendo uso de la vara, obligándola a posarse sobre esta para ser trasladada al contenedor de plástico. En total se capturaron doce hembras adultas, de las cuales se emplearon diez para el estudio, porque las dos restantes carecían de una de sus patas frontales, por lo que se devolvieron a su telaraña.

**Prueba piloto.** Inicialmente, se produjo un contenedor prototipo adaptado del diseñado por Wolff et al. (2018) (Figura 2), que albergó a múltiples individuos. El objetivo de este análisis preliminar era conocer los requerimientos espaciales mínimos de los especímenes para producir telarañas y establecer una dieta apropiada. Basándose en los hallazgos de Nentwig (1985), Hénaut et al. (2010) y Collantes et al. (2021), las presas más comúnmente atrapadas por el género *Nephila* consisten en dípteros, por lo que las especies empleadas para la alimentación de las arañas fueron especímenes de *Musca domestica* Linnaeus, 1758 y *Sarcophaga carnaria* (Linnaeus, 1758), pero también se alimentaron con otros grupos, como *Grammedessa* (Hemiptera: Pentatomidae) Correia & Fernandes, 2016, *Bladina vexans* Kramer, 1976 (Hemiptera: Nogodinidae) y *Blattella germanica* (Linnaeus, 1767). Se suministraron dos presas por día: un individuo a las 10:00 y otro a las 18:00. La cría duró un mes y medio y, en función de los resultados, se decidieron modificaciones en las dimensiones de los contenedores y la dieta.



**Figura 2.** Contenedor prototipo. a) Lado removible para introducir arañas. b) Compuerta removible para ingreso de alimentos. Todos los lados del recipiente fueron forrados con malla de fibra de vidrio. En el centro se instaló una protrusión de metal para simular una rama o tallo delgado, para permitir a las arañas anclar sus telas sin tener que moverse de un extremo a otro del contenedor.

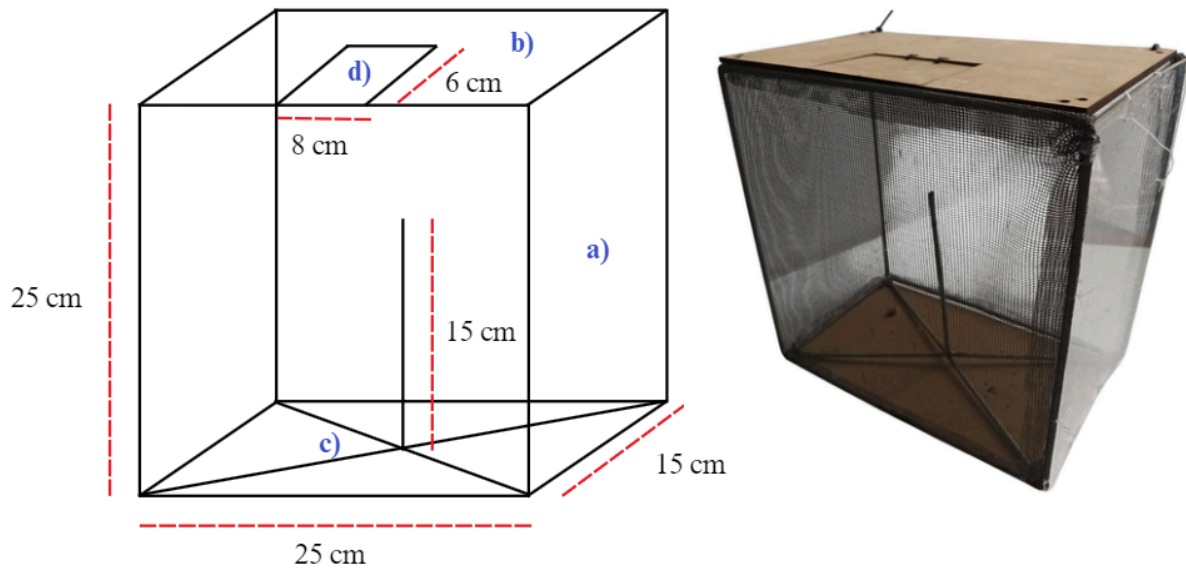
El espacio requerido por la especie objetivo para crear sus redes no tiene por qué ser muy amplio, de manera que en espacios más reducidos sea más fácil capturar las presas, ya que estas cuentan con una menor capacidad de moverse por los recipientes sin chocar contra una de las redes. Por otro lado, de

las especies utilizadas para alimentar a las arañas, *M. domestica*, *S. carnaria* y *B. vexans* fueron las más eficientes, donde los individuos de *B. vexans* se obtuvieron en mayores proporciones, y opusieron menor resistencia ante las telarañas, de manera que su captura por parte de los especímenes de *N. clavipes* fue más eficiente (Figura 3). El uso de individuos de *Grammedessa* sp. no fue apto para el consumo de las arañas, debido a su capacidad de producción de sustancias repugnantes, lo que disuadió a *N. clavipes* de acercarse a estos chinches. Por otro lado, *B. germanica* fue un buen sustrato alimenticio, ya que opuso poca resistencia a las redes, pero su mantenimiento y reproducción en cautiverio resultaron inviables debido a condiciones alimentarias difíciles de satisfacer. Por último, no hubo cambios en los intervalos de alimentación, pero se aumentó la dosis de alimento de dos individuos a cuatro (dos por cada intervalo establecido).



**Figura 3.** Especies utilizadas para alimentar a *N. clavipes*. a) Foto tomada por Trond-Arvid Isaksen de *S. carnaria* (The Norwegian Biodiversity Information Centre, 2024). b) Fotos de *M. domestica* y c) *Bladina vexans* tomadas por Cardozo-De La Hoz, 2024.

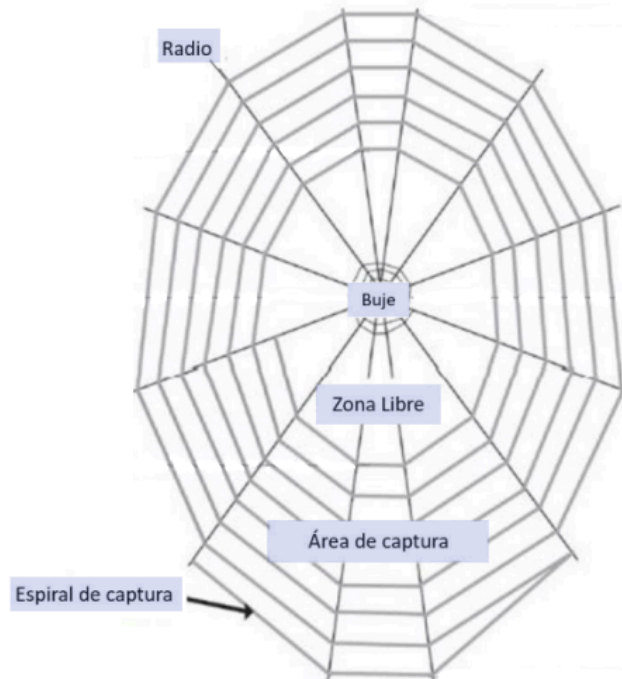
**Alojamiento.** A partir de la prueba piloto, se decidió modificar las dimensiones y los materiales de los contenedores de alojamiento de las arañas, como se muestra en la Figura 4. Para facilitar la movilidad de los individuos, se optó por utilizar madera y mallas de fibra de vidrio, materiales que permiten el escalado y el anclaje de las redes por parte de los especímenes, y que brindan condiciones óptimas para la construcción de telarañas. Además, se colocó una varilla metálica en la mitad del recipiente para ayudar al anclaje de las redes. Además, las mallas permiten el intercambio de aire y humedad en el recinto. Una de las caras se cubrió con acrílico para poder observar a los individuos.



**Figura 4.** Contenedor de alojamiento. a) Lado de acrílico. b) Lado removible de madera para introducir un individuo de *N. clavipes*. c) Lado de madera. d) Compuerta de madera para ingresar alimento. Los contenedores fueron construidos en acero y los lados restantes forrados en malla de fibra de vidrio.

**Alimentación.** Después del ensayo piloto, se determinó la alimentación de *N. clavipes* con dos especímenes de *M. domestica* o *S. carnaria* a las 10:00 y con dos individuos de *B. vexans* a las 18:00. Para la captura de las moscas se utilizó una trampa atrapamoscas eléctrica de marca Mv Marcas, usando una mezcla de mango triturado y vinagre blanco como carnada, además de trozos de carne que habían sido previamente ubicados en cajas con un recubrimiento de malla para permitir la entrada de aire y humedad, de manera que se facilitara su pudrición sin permitir su interacción temprana con otros animales. Por otro lado, los individuos de *B. vexans* fueron atraídos con bombillas led de luz blanca de 40 W y 3300 lm hasta una pared, donde eran atrapados en recipientes plásticos circulares con tapa.

**Recolección y tratamiento de muestras.** La toma de muestras se realizó al retirar temporalmente a los especímenes de *N. clavipes* (alimentados con dos horas de antelación) para colocarlos en recipientes con mallas de fibra de vidrio que les permitieran escalar y reducir el estrés por ser retirados de sus redes y colocados en otro lugar. Las muestras se recolectaron cortando fragmentos de la telaraña, específicamente de la seda de la espiral y del área de captura (Figura 5), que posteriormente se seccionaron en hilos de 5 cm de longitud, adaptando la medida sugerida por Osaki (2004) para cada individuo cada siete días. Una vez terminado el proceso de recolección, se ubicó a los individuos en sus respectivos alojamientos para que volvieran a asentarse y tejer nuevamente.



**Figura 5.** Estructura y caracterización de telarañas tomada y modificada de Blackledge, Kuntner & Agnarsson, 2011.

Para las pruebas con luz UV, se dispusieron dos tratamientos: Luz solar y luz UV artificial. Las pruebas para el tratamiento de luz solar consistieron en irradiar el fragmento de seda de las redes tejidas por los individuos durante tres horas, mientras que el tratamiento de luz UV consistió en hacer el mismo proceso, pero con luz artificial durante ese mismo tiempo. Como control, se tomaron fragmentos de seda, se envolvieron en aluminio y se guardaron en cajas recubiertas del mismo material para que las muestras no se expusieran a la luz.

**Ensayo de tensión.** Para las pruebas de tensión, se elaboró una tensadora casera (TC) mediante un sistema de poleas con la que se pudo halar la seda hasta quebrarla, de manera que se conoció cuánto se podía estirar la tela hasta romperse. Para la elaboración del mecanismo, se utilizó un Arduino Uno R3 (AUR3) conectado a una *protoboard* en la que se ubicó un potenciómetro para modificar las revoluciones del motor (Figura 6), que a su vez dio potencia al tren de poleas (Figura 7). Este sistema disminuyó aún más las revoluciones por minuto (RPM), para apreciar con mayor detalle el momento de ruptura de la seda, que estaba asegurada en uno de sus extremos con cinta a un pilar de madera y por el otro, a un gancho que sería tirado por una cuerda enrollada a la varilla de la última polea (Figura 8). El motor empleado fue de 5600 RPM, y disminuidas a 1080 RPM por medio del potenciómetro y, finalmente, a 270 RPM gracias al tren de poleas. El sistema operó a una velocidad de 0,57 m/s, como se estimó al multiplicar el perímetro de la última polea, cuyo radio era de 2 cm, por el número de revoluciones por segundo (4,5 RPM, aproximadamente).

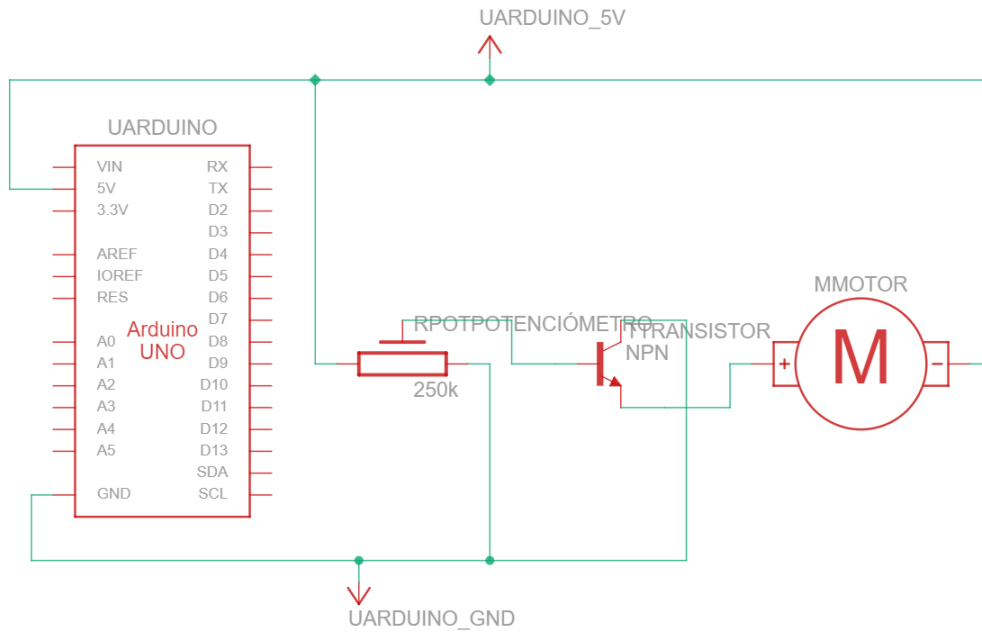


Figura 6. Esquema de sistema de circuitos.

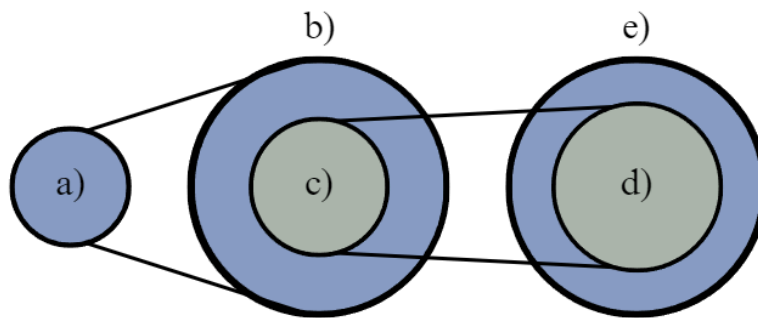
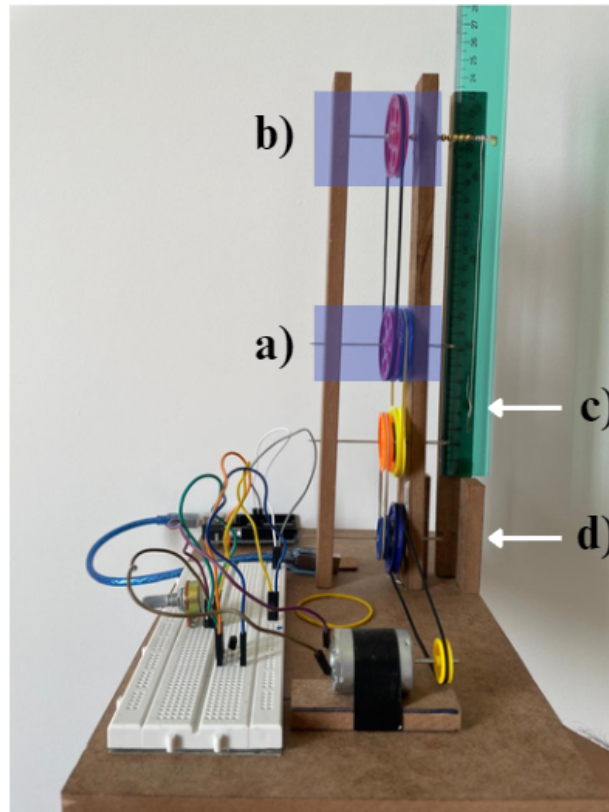


Figura 7. Tren de poleas. Los radios de cada polea son a) 0,75 cm. b) 2,0 cm. c) 1,0 cm. d) 1,5 cm. e) 2,0 cm. Se usaron bandas elásticas de caucho entre las poleas.

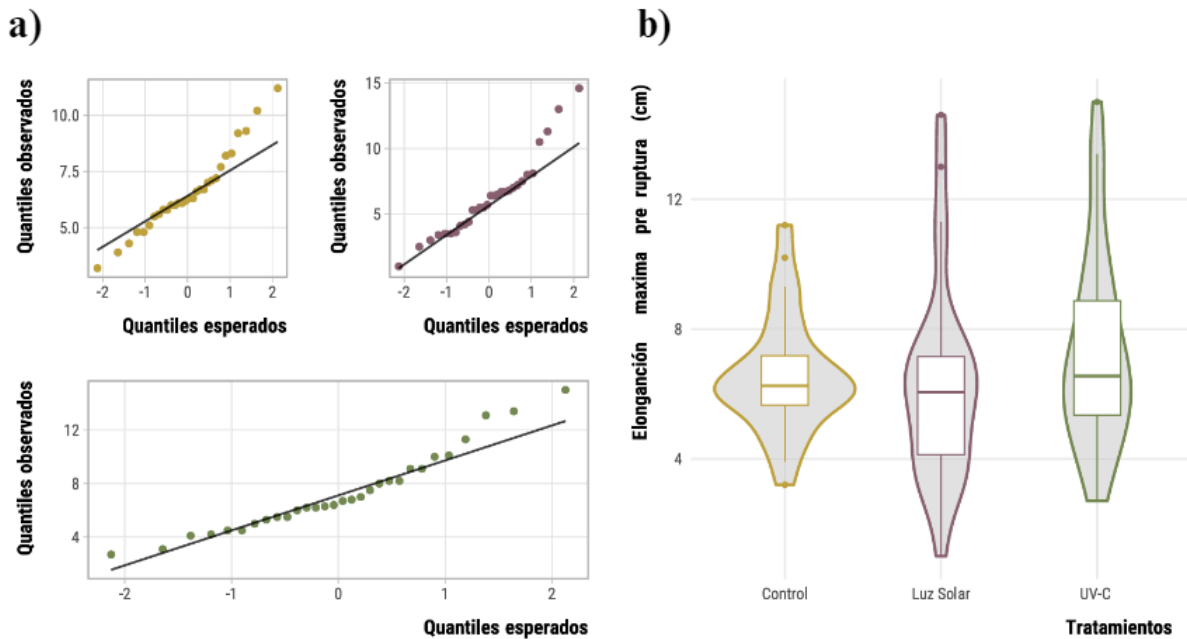


**Figura 8.** Tensadora casera (TC). Las poleas marcadas en a) y b) no disminuyeron RPM al ser todas del mismo radio, solo se usaron para brindar altura a la TC. c) Gancho para anclar las muestras. d) Pilar de madera para fijar las muestras en su extremo superior.

**Análisis de datos.** Los análisis se realizaron mediante el uso del programa informático de procesamiento y análisis de datos R v4.4.2 (R Core Team, 2024). Se realizaron análisis exploratorios mediante diagramas de cajas y bigotes, y regresiones lineales para facilitar la interpretación visual de los datos obtenidos del estudio. Para evaluar las diferencias entre los tratamientos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) unifactorial, técnica estadística que permite comparar las medias de una variable dependiente entre los grupos de una variable independiente y que se usa para conocer las diferencias significativas entre las medias de tres o más grupos.

### Resultados y discusión

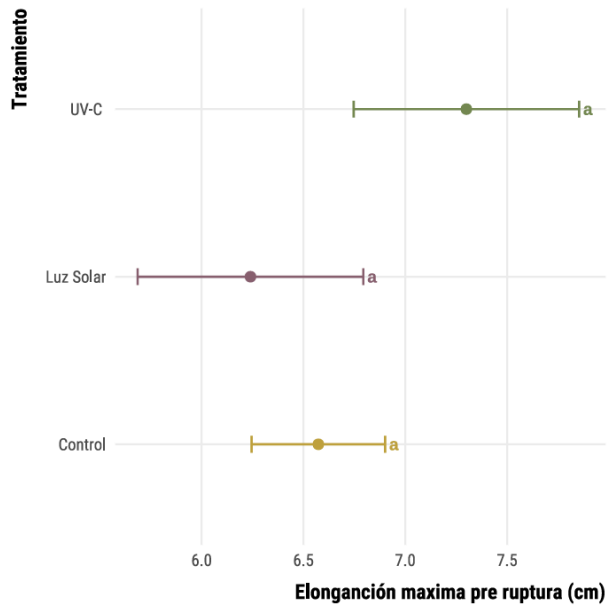
Después de aplicar los tratamientos, se midió la elongación a la ruptura de cada una de las muestras obtenidas. En total, se obtuvieron 30 datos por tratamiento, que se sometieron a un análisis exploratorio inicial (Figura 9a). A partir de los gráficos Q-Q, se puede inferir el comportamiento de los datos, observando que algunos presentan una clara distribución normal, lo que es un supuesto necesario para poder utilizar pruebas paramétricas. En cambio, en otros datos la distribución no tuvo un comportamiento normal evidente, por lo que se realizó una prueba de Shapiro-Wilk para determinar si el conjunto de datos seguía una distribución normal o se desviaba significativamente de ella.



**Figura 9.** Análisis exploratorio. a) Regresión lineal de los tratamientos. b) Gráfico de caja y bigotes para los tratamientos.

La dispersión de los datos fue más o menos simétrica alrededor de la mediana en el grupo de control, con una variabilidad moderada (Figura 9b). El tratamiento con luz solar mostró una mediana ligeramente menor que la del grupo de control, pero con una mayor variabilidad en los datos, entre los que se aprecian valores atípicos con elongaciones máximas muy por encima de la mediana del tratamiento. El tratamiento con luz UV presentó menor variabilidad y una distribución de los datos más uniforme que el tratamiento con luz solar. Además, su mediana fue ligeramente mayor a la del grupo de control, pero con valores muy elevados de elongación. Según el comportamiento observado en el gráfico de cajas, se interpreta que los tratamientos de luz solar y luz UV causan cierta reducción en la elongación máxima antes de la ruptura; sin embargo, tanto el tratamiento con luz solar como el de luz UV mostraron mucha variabilidad en los datos.

El análisis de varianza mostró que los tratamientos no presentaban diferencias significativas ( $F_{2,87} = 1,22$ ,  $P = 0,3$ ), al igual que la Prueba de Tukey (Figura 10). Esto sugiere que, contrariamente a lo que se pensaba, la exposición a la luz solar y luz UV no deteriora la capacidad de elongación de las sedas que *N. clavipes* usa para cazar.



**Figura 10.** Representación gráfica de la Prueba de significancia honesta de Tukey para conocer las diferencias significativas entre grupos (tratamientos).

Al analizar individualmente las telarañas que se utilizaron en el estudio (10 individuos) (Figura 11). Los datos presentaron una alta variabilidad en los individuos 1, 5, 6 y 8, de los cuales los dos primeros proceden de arañas que habían depositado huevos durante la prueba piloto (Figura 12), pero se desconoce si esto pudiese tener impacto en la producción de la seda de captura, mientras que los otros dos no. En general, la elongación media pre-ruptura para los tratamientos no difirieron mucho entre el resto de los especímenes, pero podría deberse al bajo número de datos por individuo. Respecto a las telas con mayor elongación, llama la atención que las que tuvieron altos valores fueron aquellas que habían pasado por algún tratamiento (luz UV en la araña 6 y luz solar en la araña 1), y no las del grupo de control como se esperaba en un principio. Este comportamiento anterior podría deberse a que las gotas de pegamento glicoproteico que se distribuyen a lo largo de la seda de captura de *Nephila clavata* facilitan el plegamiento de ésta, por lo que, al estirla, su longitud podría ser superior a la esperada al cortarla inicialmente (Kitagawa & Kitayama, 1997; Figura 13). Por tanto, surge la posibilidad de que las muestras de cada tratamiento pudieran tener una longitud superior a 5 cm, pues durante el proceso de toma de muestras, el corte de las telas produjo un compactamiento casi inmediato, ocasionando la toma accidental de más material del esperado, sobre todo si se tiene en cuenta que no se utilizó equipamiento especializado necesario para observar la tela en un mayor aumento.

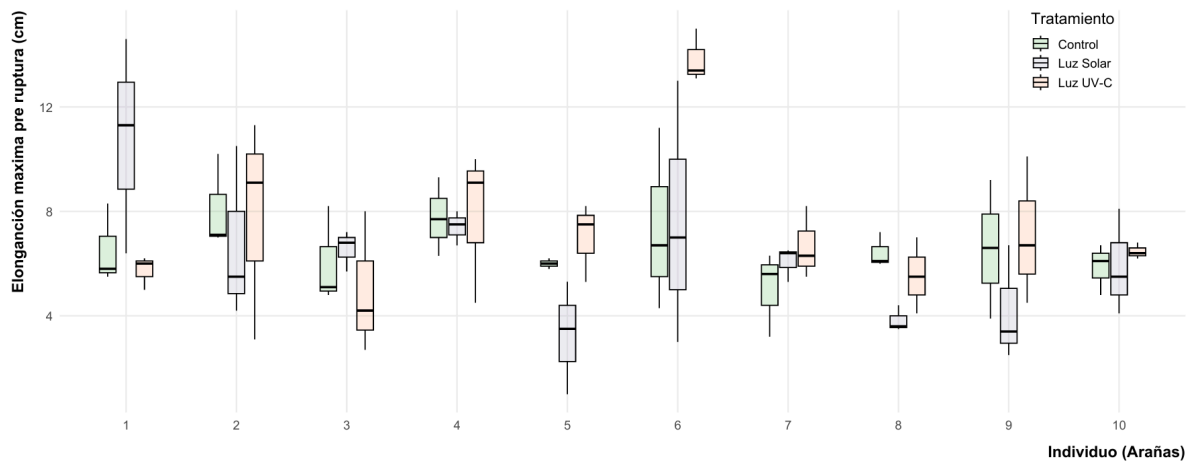


Figura 11. Gráfico de cajas y bigotes de los resultados de cada tratamiento para cada espécimen de *N. clavipes*.

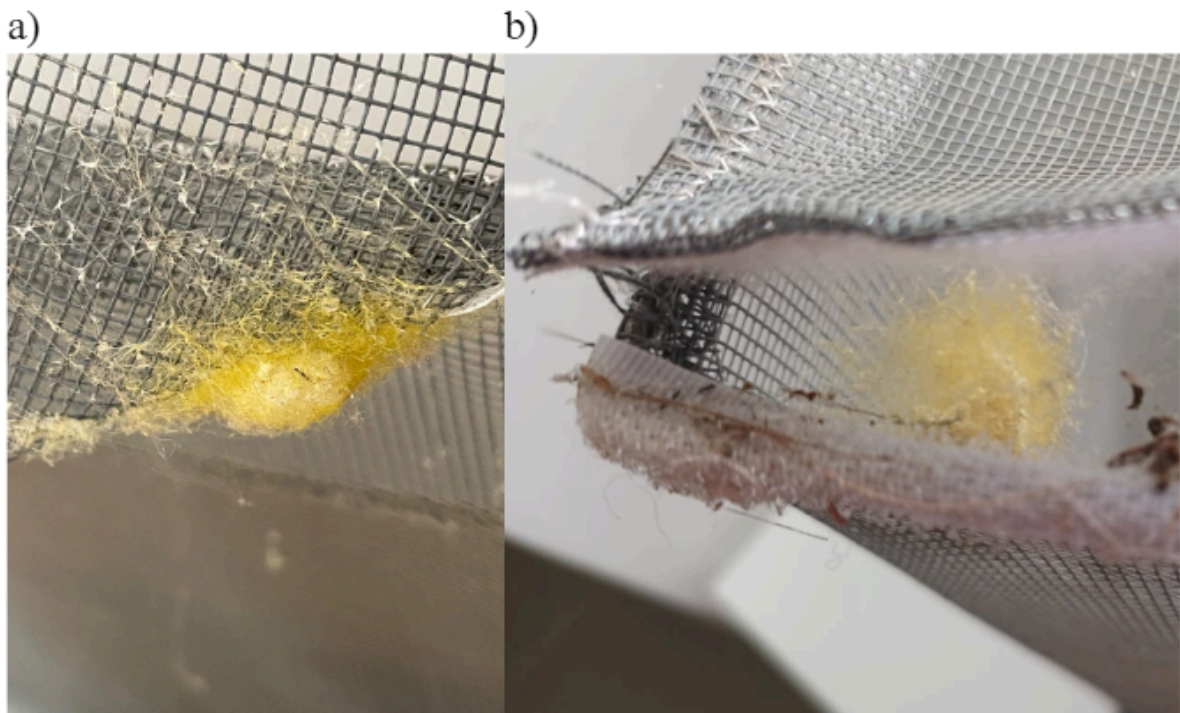
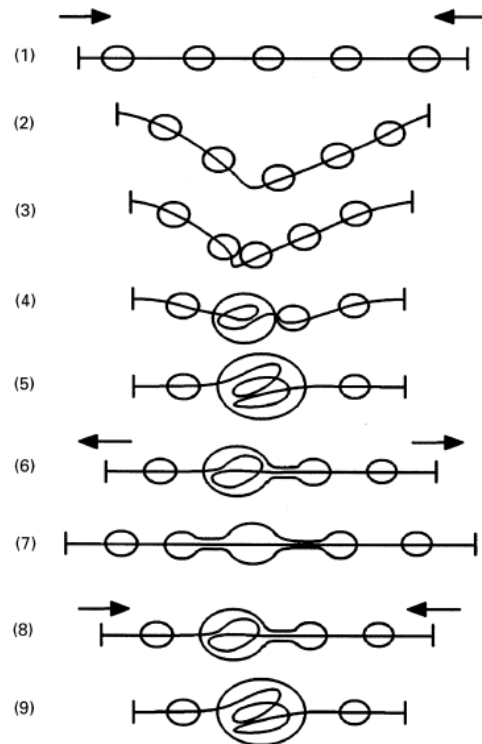


Figura 12. Sacos de huevos de *N. clavipes* para la a) araña 1 y b) araña 5.



**Figura 13.** Contracción de la seda de captura e interacción con las gotas de pegamento glicoproteico. Tomada de Kitagawa & Kitayama (1997).

Otros factores que pudieron influir en los resultados son las propiedades fisicoquímicas de las gotas glicoproteicas de la seda y las adaptaciones propias de las telas de la especie a los rayos UV. Por un lado, las propiedades ópticas de las superficies, como su capacidad de reflejar o absorber luz, pueden reducir la efectividad de la radiación UVC. La transmisión de la luz también depende del material, siendo algunos más efectivos a la hora de permitir el paso de la radiación UVC (Müller et al., 2015). A su vez, la eficacia de absorción de la UVC depende de varios factores, como la dosis de UVC (fluencia de UVC), la uniformidad de la distribución de la dosis de UVC y las propiedades fisicoquímicas del producto tratado (por ejemplo, viscosidad, densidad, sólidos solubles y en suspensión) (Tchonkouang, 2023). Los estudios realizados por Stellwagen, Opel & Clouse (2016) aportan conocimientos sobre el pegamento glicoproteico de la seda, ya que en su investigación sobre los efectos de los rayos UVA sobre dicha sustancia en especies diurnas (*A. trifasciata*) y nocturnas (*N. crucifera*) concluyeron que las gotas pegajosas no se degradaban significativamente al ser sometidas a los rayos UVA, y que los enlaces químicos cruzados entre los componentes del pegamento se reforzaban con los rayos UV, por lo que es necesario comprobar si dosis mayores de rayos UV a las que las telas están comúnmente expuestas podrían ocasionar cambios significativos en los compuestos de las glicoproteínas. Por otro lado, las adaptaciones inherentes a las especies diurnas pueden ser un factor relevante en la forma en que la telaraña responde a los rayos UV y solares. Osaki & Osaki (2010) realizaron un experimento con especies diurnas (*N. clavata*; *Leucauge blanda* (L. Koch, 1878); *Argiope bruennichii* (Scopoli, 1772)) y nocturnas (*Yaginumia sia* (Strand, 1906); *Neosona nautica* (L. Koch, 1875)). Observaron que la tensión de ruptura de las especies diurnas era mayor que la de las nocturnas, lo que sugiere que las telas podían fortalecerse o, al menos, no verse afectadas significativamente por los rayos UV. En el caso de *N. clavata*, concluyeron que los rayos UV no afectaban a la tensión de ruptura de las telas de la especie, de hecho los rayos UVA contribuyen a

producir entrecruzamientos entre las moléculas proteínicas de las sedas para reforzar mecánicamente las telarañas orbitales o alargar el periodo entre reconstrucciones para capturar insectos.

## Conclusiones

Los resultados de este estudio indican que la radiación solar y la radiación UVC afectan las propiedades mecánicas de la seda de *Nephila clavipes*, aunque no disminuyen significativamente su capacidad de elongación hasta el punto de ruptura. Esto sugiere una posible adaptación evolutiva de la especie, la cual podría ayudar a preservar la integridad de su seda en ambientes con alta exposición a la luz, como los entornos tropicales. Además, se observó una variabilidad en la respuesta entre individuos, especialmente en aquellos en estado reproductivo, lo que resalta la importancia de considerar factores individuales en futuras investigaciones sobre la calidad de la seda. Las diferencias entre estos hallazgos y los de estudios previos sugieren que otros factores, como la estructura de las gotas glicoproteicas y la contracción natural de la seda, podrían influir en sus propiedades de resistencia, subrayando la necesidad de controlarlos en futuros análisis. Para futuros estudios la metodología podría ser mejorada teniendo en cuenta los siguientes puntos:

### 1. Alimentación

Respecto a la alimentación de la especie objetivo, recomendamos que se tengan fuentes de alimento constante y bien constituidas para evitar tener que capturarlas, ya que, al no tener conocimientos previos sobre las condiciones, la alimentación o incluso las enfermedades que puedan acarrear los especímenes en cuestión, existe el riesgo de dañar a las arañas. Se considera que lo más óptimo es tener «granjas» de especies que sirvan de alimento para *N. clavipes*, consiguiendo así condiciones controladas, ya que se puede mantener a las especies que sirven de alimento bajo parámetros controlados (dieta, temperatura, humedad, etc.). Esta recomendación también surge porque hubo cierta escasez de cicadélidos en la zona de estudio durante el mes de septiembre e inicios de octubre, siendo estos la fuente de alimento que se capturaba por las tardes. Al casi carecer de estos, se tuvo que detener el estudio para evitar la muerte de las arañas.

### 2. Dimensiones de los contenedores

En cuanto al alojamiento para los individuos de la especie objetivo, tras la prueba piloto, se observó que no era necesario un espacio muy amplio, aunque los autores consideran que la altura y el largo son óptimos, se recomienda aumentar el ancho de quince a veinte centímetros para permitir mayor movilidad a las arañas en el diseño final (Figura 3), pero sin dejar demasiado espacio para que las presas puedan evitar las telarañas.

### 3. Herramientas

El sistema de poleas, a pesar de demostrar su eficacia, requiere más poleas para reducir aún más las RPM, ya que al estirar la tela, esta se deslizaba a mucha velocidad (0,57 m/s), lo que pudo ocasionar la rotura precoz de las telas y dificultar el análisis del estiramiento de la seda al arrojar resultados que no sean del todo correctos. Por otro lado, se recomienda emplear cámaras con alta resolución para tomar evidencias fotográficas que cuenten con un alto nivel de detalle, de manera que se facilite la observación de la seda al ser ubicada en la TC.

### 4. Tratamientos

En cuanto al alojamiento de las arañas y la toma de muestras, se recomienda ubicar a los especímenes en una habitación oscura con buena circulación de aire y emplear atomizadores para mantener la humedad alta. Para la toma de muestras, se debe tener mucho cuidado con la forma de cortar los hilos de seda de la telaraña para evitar que se peguen unos con otros o se compacten sobre sí mismos, ya

que esto puede ocasionar que, a la hora de disponer de las muestras, algunas sean más largas de lo planeado, aunque no sea visible a simple vista. Por último, se sugiere que el tratamiento con luz UV se prolongue durante más de tres horas, para que la luz pueda ser absorbida por la seda y reaccionar con sus componentes en mayor medida.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a nuestro director de tesis, Anderson Arenas Clavijo, por brindar gran apoyo en el trabajo, y sobre todo por su paciencia y amabilidad, también a la Doctora Charlotte Hopfe por hacer una revisión inicial del proyecto, brindando retroalimentación e ideas para la metodología (alojamiento y alimentación de las arañas), igualmente al colega Juan Manuel Arango por proporcionar materiales, información y ayuda en la creación de la tensadora casera.

Agradecimientos personales del primer autor: Quiero agradecer sobre todas las cosas a mi madre, quien desde el inicio me dijo que siguiera mis sueños y la pasión que desde pequeño tuve por las arañas, por lo que este trabajo va muy dedicado a ella, quien siempre me ayudó en todo lo que pudiera y me brindó mucho cariño y comprensión durante mis momentos de frustración. También agradezco a mis tías y tío por siempre preocuparse por mí y brindarme una mano cuando lo necesito, igualmente a mi adorado “Grandote”, mi queridísimo abuelo, quien ha sido como un padre para mí y me ha apoyado enormemente desde antes de siquiera iniciar mi carrera universitaria. Asimismo, doy las gracias a mi padre, mi hermanito y mi madrastra por dar un gran apoyo no solo al permitirnos visitar su finca para obtener los especímenes de *N. clavipes*, sino por ayudar en todo momento en la captura y el mantenimiento de los individuos atrapados, además de ayudar en la creación del tren de poleas. De igual modo agradezco a mis amigos de la universidad quienes supieron darme una cálida bienvenida cuando ingrese a ese “nuevo mundo” y me hicieron sentir muy cómodo y feliz, teniendo grandes momentos juntos a lo largo de la carrera, entre quienes se encuentra mi compañero de tesis. Doy infinitas gracias a mis amigos de toda la vida, aquellos que desde el colegio y hasta hoy han estado junto a mí en buenos y malos momentos, siendo un pilar en el que apoyarme, además de haberme agraciado con tantísimos buenos momentos que simplemente no podré olvidar, decir que los adoro de todo corazón no sería suficiente, muchachos. Finalmente, quiero dedicar este trabajo a mi abuelita Edith Toribia Gómez, quien fue como otra madre para mí y que desde donde quiera que esté, espero esté orgullosa de lo que he hecho hasta hoy y de quien soy, esto va para ti mi Gorgo.

Agradecimientos personales del segundo autor: Quisiera iniciar agradeciendo a mis padres, ya que han sido una parte fundamental en mi formación no solo profesional, sino que también me han formado como persona, y me han brindado un montón de oportunidades que actualmente me han vuelto la persona que soy, y ni hablar del amor incondicional que siempre me brindaron. Agradezco también a todos los docentes por los que pase, ya que son los que me han formado académicamente e incluso en muchos casos me han dado consejos para la vida misma y siempre estuvieron dispuestos a ayudar cuando era necesario. Agradezco a mi compañero en esta tesis, ya que no solo ahora si no que en muchos momentos de la carrera ha sido un apoyo importante para mí y hemos salido adelante en muchos trabajos que parecían eternos. Agradezco a mis reales, con los que viví muchas cosas tanto buenas como malas a lo largo de estos años de carrera. Gracias a los muchachos del equipo de Bachué, porque muchos se han vuelto como una familia para mí. Y por último a mis amigos cercanos de la universidad, todos saben que los quiero mucho y agradezco que hayan estado ahí siempre.

## Referencias

- Álvarez-Padilla, F., Dimitrov, D., Giribet, G., & Hormiga, G. (2009). Phylogenetic relationships of the spider family Tetragnathidae (Araneae, Araneoidea) based on morphological and DNA sequence data. *Cladistics*, 25(2), 109–146. doi:10.1111/j.1096-0031.2008.00242.x
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2013). Fundamentos de fisiología vegetal. En J. de las Rivas (Ed.), Capítulo 9: La luz y el aparato fotosintético (2nd Ed., pp. 165-189). Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona.
- Blackledge, T. A., Scharff, N., Coddington, J. A., Szuts, T., Wenzel, J. W., Hayashi, C. Y., & Agnarsson, I. (2009). Reconstructing web evolution and spider diversification in the molecular era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(13), 5229–5234. doi:10.1073/pnas.0901377106
- Blackledge, T. A., Kuntner, M., & Agnarsson, I. (2011). The Form and Function of Spider Orb Webs. *Spider Physiology and Behaviour - Behaviour*, 175–262. doi:10.1016/b978-0-12-415919-8.00004-5
- Campbell, P. K., Beer, T., Batten, D., & Stream, T. B. (2009). Greenhouse gas sequestration by algae: energy and greenhouse gas life cycle studies. CSIRO Energy Transformed Flagship.
- Cronin, T. W., & Bok, M. J. (2016). Photoreception and vision in the ultraviolet. *The Journal of Experimental Biology*, 219(18), 2790–2801. doi:10.1242/jeb.128769
- Correa-Garhwal, S. M., Babb, P. L., Voight, B. F., & Hayashi, C. Y. (2020). Golden orb-weaving spider (*Trichonephila clavipes*) silk genes with sex-biased expression and atypical architectures. *G3 Genes|Genomes|Genetics*, 11(1), 1–10. doi:10.1093/g3journal/jkaa039
- Collantes, R., Pittí Caballero, J., Santos Murgas, A., & Jerkovic, M. (2021). El género *Argiope* (Araneae: Araneidae) en la Provincia de Chiriquí, Panamá. *Aporte Santiaguino*, 14(2), pág. 190-200. DOI:10.32911/as.2021.v14.n2.799
- Dimitrov, D., & Hormiga, G. (2011). An extraordinary new genus of spiders from Western Australia with an expanded hypothesis on the phylogeny of Tetragnathidae (Araneae). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 161(4), 735–768. doi:10.1111/j.1096-3642.2010.00662.x
- Dimitrov, D., Lopardo, L., Giribet, G., Arnedo, M. A., Álvarez-Padilla, F., & Hormiga, G. (2012). Tangled in a sparse spider web: single origin of orb weavers and their spinning work unravelled by denser taxonomic sampling. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1732), 1341–1350. doi:10.1098/rspb.2011.2011
- Dimitrov, D., Benavides, L. R., Arnedo, M. A., Giribet, G., Griswold, C. E., Scharff, N., & Hormiga, G. (2016). Rounding up the usual suspects: a standard target-gene approach for resolving the interfamilial phylogenetic relationships of cribellate orb-weaving spiders with a new family-rank classification (Araneae, Araneoidea). *Cladistics*, 33(3), 221–250. doi:10.1111/cla.12165
- Herman, J. R., Bhartia, P. K., Ziemke, J., Ahmad, Z., & Larko, D. (1996). UV-B increases (1979-1992) from decreases in total ozone. *Geophysical Research Letters*, 23, 2117–2120. doi:10.1029/96gl01958
- Hénaut, Y., Machkour-M'Rabet, S., Winterton, P., & Calmé, S. (2010). Insect attraction by webs of *Nephila clavipes* (Araneae: Nephilidae). *Journal of Arachnology*, 38(1), 135–138. doi:10.1636/t08-72.1

- Huby, N., Vié, V., Renault, A., Beaufiles, S., Lefèvre, T., Paquet-Mercier, F., ... Bêche, B. (2013). Native spider silk as a biological optical fiber. *Applied Physics Letters*, 102, 123702. doi:10.1063/1.4798552
- Kaston, B. J. (1964). The Evolution of Spider Webs. *American Zoologist*, 4, 191–207. <http://www.jstor.org/stable/3881292>
- Kuntner, M. (2006). Phylogenetic systematics of the Gondwanan nephilid spider lineage Clitaetrinae (Araneae, Nephilidae). *Zoologica Scripta*, 35(1), 19–62. doi:10.1111/j.1463-6409.2006.00220.x
- Kuntner, M., Coddington, J. A., & Hormiga, G. (2008). Phylogeny of extant nephilid orb-weaving spiders (Araneae, Nephilidae): testing morphological and ethological homologies. *Cladistics*, 24(2), 147–217. doi:10.1111/j.1096-0031.2007.00176.x
- Kuntner, M., & Coddington, J. A. (2009). Discovery of the Largest Orbweaving Spider Species: The Evolution of Gigantism in *Nephila*. PLoS ONE, 4(10), e7516. doi:10.1371/journal.pone.0007516
- Kuntner, M., Arnedo, M. A., Trontelj, P., Lokovšek, T., & Agnarsson, I. (2013). A molecular phylogeny of nephilid spiders: Evolutionary history of a model lineage. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 69(3), 961–979. doi:10.1016/j.ympev.2013.06.008
- Levi, H. W. (1986). The neotropical orb-weaver genera *Chrysometa* and *Homalometa* (Araneae: Tetragnathidae). *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology*, 151(3).
- Lai, W., & Goh, K. (2015). Consequences of Ultra-Violet Irradiation on the Mechanical Properties of Spider Silk. *Journal of Functional Biomaterials*, 6(3), 901–916. doi:10.3390/jfb6030901
- Luo, Q. (2020). A brief introduction to biophotonic techniques and methods. *Sci China Life Sci* 63, 1771–1775. <https://doi.org/10.1007/s11427-020-1858-1>
- Moore, C. W. (1977). The Life Cycle, Habitat and Variation in Selected Web Parameters in the Spider, *Nephila clavipes* Koch (Araneidae). *American Midland Naturalist*, 98(1), 95. doi:10.2307/2424717
- Nentwig, W. (1985). Prey analysis of four species of tropical orb-weaving spiders (Araneae: Araneidae) and a comparison with araneids of the temperate zone. *Oecologia*, 66(4), 580–594. doi:10.1007/bf00379353
- Newman, P. A., Oman, L. D., Douglass, A. R., Fleming, E. L., Frith, S. M., Hurwitz, M. M., Kawa, S. R., Jackman, C. H., Krotkov, N. A., Nash, E. R., Nielsen, J. E., Pawson, S., Stolarski, R. S., and Velders, G. J. M. (2009). What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 2113–2128.
- Osaki, S. (2004). Ultraviolet Rays Mechanically Strengthen Spider's Silks. *Polymer Journal*, 36(8), 657–660. doi:10.1295/polymj.36.657
- Osaki, S., & Osaki, M. (2010). Evolution of spiders from nocturnal to diurnal gave spider silks mechanical resistance against UV irradiation. *Polymer Journal*, 43(2), 200–204. doi:10.1038/pj.2010.119
- R Core Team (2024). *\_R: A Language and Environment for Statistical Computing\_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- Salgado, R. (2014): Saber Más: Revista de divulgación de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Deforestación (Nº. 14, pp. 31-32)

- Stellwagen, S. D., Opell, B. D., & Clouse, M. E. (2016). The impact of UVA on the glycoprotein glue of orb-weaving spider capture thread from a diurnal and a nocturnal species (Araneae: Araneidae). *Journal of Arachnology*, 44, 401–404. doi:10.1636/m15-78.1
- Scharff, N., Coddington, J. A., Blackledge, T. A., Agnarsson, I., Framenau, V. W., Szűts, T., ... Dimitrov, D. (2019). Phylogeny of the orb-weaving spider family Araneidae (Araneae: Araneoidea). *Cladistics*. doi:10.1111/cla.12382
- Tarrán, E. P. (2002). Desinfección por luz ultravioleta. São Paulo-Brasil: Tech Filter.
- Tuckett, R. (2018). Greenhouse Gases. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. doi:10.1016/b978-0-12-409547-2.14031-4
- The Norwegian Biodiversity Information Centre ., Hoem S (2024). Norwegian Species Observation Service. Version 1.287. The Norwegian Biodiversity Information Centre (NBIC). Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/zjbzel> accessed via GBIF.org on 2024-11-11. <https://www.gbif.org/occurrence/4899336428>
- Vollrath, F. (2000). Strength and structure of spiders' silks. *Reviews in Molecular Biotechnology*, 74, 67–83. doi:10.1016/s1389-0352(00)00006-4
- Wolff, J. O., Jones, B., & Herberstein, M. E. (2018). Plastic material investment in load-bearing silk attachments in spiders. *Zoology*. doi:10.1016/j.zool.2018.05.002

### **Origen y financiación**

El presente trabajo fue financiado con fondos propios de los autores, además de aportes no monetarios (materiales) por parte de familiares y colegas.

### **Contribución de los autores**

El primer autor planteó los objetivos de la investigación, contribuyó con la mitad de la financiación, aportó información para la elaboración del anteproyecto, realizó la fase experimental y final para el alojamiento y alimentación de los objetos de estudio, planteó la fase de campo, hizo la toma de muestras, construyó la tensadora casera y apoyó a la escritura del artículo.

El segundo autor contribuyó con la otra mitad de la financiación, elaboró los análisis de datos y halló los resultados para los tratamientos, colaboró en la fase de campo, creó el mapa para el área de estudio, consiguió información para discutir los resultados del estudio, obtuvo permisos para la utilización de la cámara de flujo laminar en la que se irradiaron las muestras con UV y apoyó en la escritura del artículo.

El tercer autor colaboró con la conceptualización del trabajo, aportó ideas para el diseño de las fases experimentales, la construcción de los primeros prototipos de la tensadora casera; contactó con la colega especializada en el estudio de las telas de araña: Charlotte Hopfe; revisó el anteproyecto y sugirió diversas mejoras junto con la colega especializada.