

Seda de araña: Propiedades, técnicas de síntesis y procesamiento - Aplicaciones en Ingeniería y Biomedicina

Spider Silk: Properties, synthesis and processing techniques – Applications in Engineering and Biomedicine

Luis Enrique Amaya Grande¹
Marilyn Rocío Amaya Menéndez²
Rodrigo Andrés Castillo Martínez²

Christian Enrique Mejía Ascencio²
Karen Elizabeth Ortiz Portilla²
Jocelyn Yanira Rivera Zeledón²

Universidad Católica de El Salvador, El Salvador

Fecha de recepción: 11/08/2023

Fecha de aceptación: 22/03/2024

Resumen

La seda de araña es un material que muestra propiedades únicas que la vuelven de interés para la ciencia, entre las que destacan su combinación de alta resistencia a la rotura y elasticidad. Este trabajo describe las propiedades fisicoquímicas de la seda de araña en relación con sus constituyentes y su estructura, compuesta por dominios tanto cristalinos como amorfos. Asimismo, revisa bibliografía reciente acerca de las diferentes técnicas de síntesis y procesamiento de seda de araña, que involucran la modificación de proteínas, manipulación genética de organismos y un control exhaustivo de los parámetros de hilado de modo que se replique (o incluso supere) las propiedades de la seda de araña en situaciones específicas. Se discuten algunas de las aplicaciones actuales y potenciales de la seda de araña en ingeniería y biomédica con un enfoque de búsqueda de soluciones y alternativas para algunas problemáticas sociales en específico.

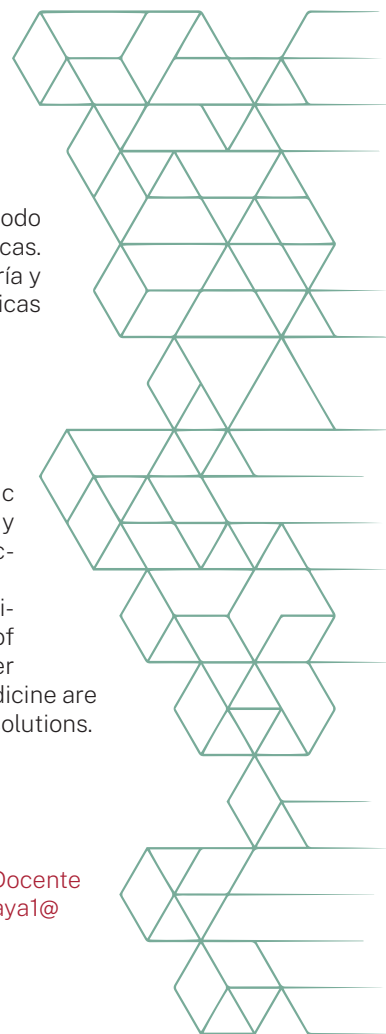
Palabras clave: Seda de araña, propiedades, estructura cristalina, síntesis, aplicaciones

Abstract

Spider silk is a material with unique properties that make it of great interest to the scientific community, particularly due to its combination of high tensile strength and elasticity. This study explores the physicochemical properties of spider silk in relation to its constituents and structure, which consists of both crystalline and amorphous domains. Additionally, it reviews recent literature on various spider silk synthesis and processing techniques, including protein modification, genetic engineering of organisms, and precise control of spinning parameters to replicate — or even surpass — the properties of natural spider silk under specific conditions. Current and potential applications of spider silk in engineering and biomedicine are discussed, focusing on its role in addressing specific societal challenges through innovative solutions.

Keywords: Spider Silk, Properties, Crystalline Structure, Synthesis, Applications.

1. Magister en Ambiente y Desarrollo Sustentable con énfasis en gestión ambiental, Docente hora clase, Facultad de Ingeniería y Arquitectura; email para comunicación: luis.amaya1@catolica.edu.sv; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8519-5418>
2. Estudiantes de Ingeniería Química.



1. Introducción

La seda de araña es un material complejo que ha capturado la atención de los científicos y del público en general debido a sus propiedades únicas. En realidad, es más preciso hablar de «sedas de araña», en plural, pues las arañas son capaces de segregar distintos tipos de seda gracias a que poseen hasta siete glándulas diferenciadas (Salehi, *et al.*, 2020). La seda segregada por la glándula ampulácea mayor es la que ha sido estudiada con más detalle, pues goza de la mayor resistencia a la rotura sin dejar de ser excepcionalmente elástica como las demás. Las especies tejedoras la usan como seda estructural en los radios y marcos de sus telarañas, mientras que aquellas del género *Salticidae* la aprovechan como “cable de seguridad” al abalanzarse rápidamente sobre sus presas.

Asimismo, la seda de araña también se caracteriza por su biocompatibilidad y biodegradabilidad, lo cual aumenta incluso más sus potenciales aplicaciones no sólo como un material que satisfaga la necesidad de resistencia y flexibilidad en áreas meramente ingenieriles, sino también en medicina, donde puede servir como “andamio” en la regeneración e ingeniería de tejidos (Salehi, *et al.*, 2020).

Dadas las posibilidades, numerosos estudios se han dedicado a buscar maneras viables de sintetizar y procesar la seda de araña, siendo algunos de los mayores obstáculos la impracticabilidad de su obtención en granjas de arañas o lograr un método eficiente para la producción industrial en masa. Los estudios que se revisan en este trabajo proponen diferentes soluciones, siendo las más importantes la síntesis recombinante de proteínas para

su expresión heteróloga o el uso de dispositivos de hilado biomimético. (Arndt, T., *et al.*, 2022)

2. Metodología

Debido a que este trabajo es un artículo de revisión bibliográfica, para su fundamentación y redacción se recurrió a documentos que exponen los resultados de diferentes investigaciones en la materia. Este proceso se puede estructurar así:

- **Primera etapa.** A manera de acercamiento al tema, se buscó información en fuentes de distintos tipos: primarias (basadas directamente en los resultados de una investigación, con conocimiento especializado), secundarias (basadas en las fuentes primarias, a manera de retroalimentación) y terciarias (basadas en las fuentes secundarias con fines principalmente de divulgación al público general y de manera resumida).
- **Segunda etapa.** Se depuró la información. Se identificaron los aportes principales de los documentos para conocer cuáles temas podrían ser fundamentados con ellos y definir así el alcance de la investigación. Se decidió que el trabajo abordaría las propiedades de la seda de araña, el desarrollo actual de los métodos de síntesis y procesamiento y una discusión sobre las aplicaciones de la seda de araña enfocándose en las oportunidades y desarrollos potenciales del material.

Simultáneamente, se creó un sistema de etiquetas para clasificar las fuentes de información:

Tabla 1
Etiquetas de clasificación

Nombre de la etiqueta	Características
Naranja	La información es analizada y discutida partiendo directamente de datos experimentales propios y de antecedentes de investigación.
Azul	Discuten los resultados de antecedentes investigativos. Contienen información útil para retroalimentar la información en las fuentes naranjas y/o proponer aplicaciones de la seda de araña. No obstante, deben contrastarse con las fuentes naranjas para no omitir información clave al desarrollar y discutir un tema.
Blanca	Cumplieron la función de obtener referencias bibliográficas en la primera etapa, aunque, por sí solas, la profundidad con que abordan la información es insuficiente para fundamentar el trabajo

Un ejemplo de esta clasificación por etiquetas es el siguiente: Si una fuente presenta y desarrolla los mecanismos celulares (respaldados en el análisis de datos experimentales) que hacen viable el uso de seda de araña en la medicina regenerativa e ingeniería de tejidos, la fuente se considera de etiqueta naranja. Si otra fuente aborda tales usos de la seda de araña, resumiendo los resultados de la anterior y enfocándose, más bien, en las aplicaciones en sí mismas y su potencial, ya sea recurriendo o no a la valoración personal de especialistas en la materia, se considera de etiqueta azul. Una fuente que no aporte información nueva de manera rigurosa se cataloga como “blanca”. Este sistema de etiquetas permite evaluar la calidad de las fuentes utilizadas y garantizar la congruencia del trabajo con respecto al consenso científico actual.

Seda de araña

La seda de araña es una fibra proteica natural, extremadamente fuerte, flexible y antimicrobiana (Wright & Goodacre, 2012). Es producida por las arañas a través de un complejo proceso de hilado para realizar diversas acciones, como cazar, proteger sus huevos y aparearse.

De las poco más de 50,000 especies de arañas documentadas (World Spider Catalog, 2023), la mayoría no producen redes, pero todas ellas producen al menos un tipo de seda en función de las glándulas secretoras que posean.

Tipos de seda de araña

Cada uno de los tipos de seda de araña desempeña funciones específicas en el contexto de cierta especie. Por ejemplo, la seda más rígida y resistente presen-

te en los marcos y radios de la telaraña de Araneidae se compone de proteínas segregadas por la glándula ampulácea mayor (Römer & Scheibel, 2008). Sus características permiten que la estructura de las telarañas soporte no solo el peso de la araña, sino también los impactos de sus presas u objetos como hojas o ramas pequeñas. También desempeña la función de línea de vida, lo que les permite a las arañas transportarse fácilmente en superficies donde la altura puede variar (lo cual es más notorio en las arañas Salticidae, que cazan activamente sus presas saltando sobre ellas) o escapar de depredadores.

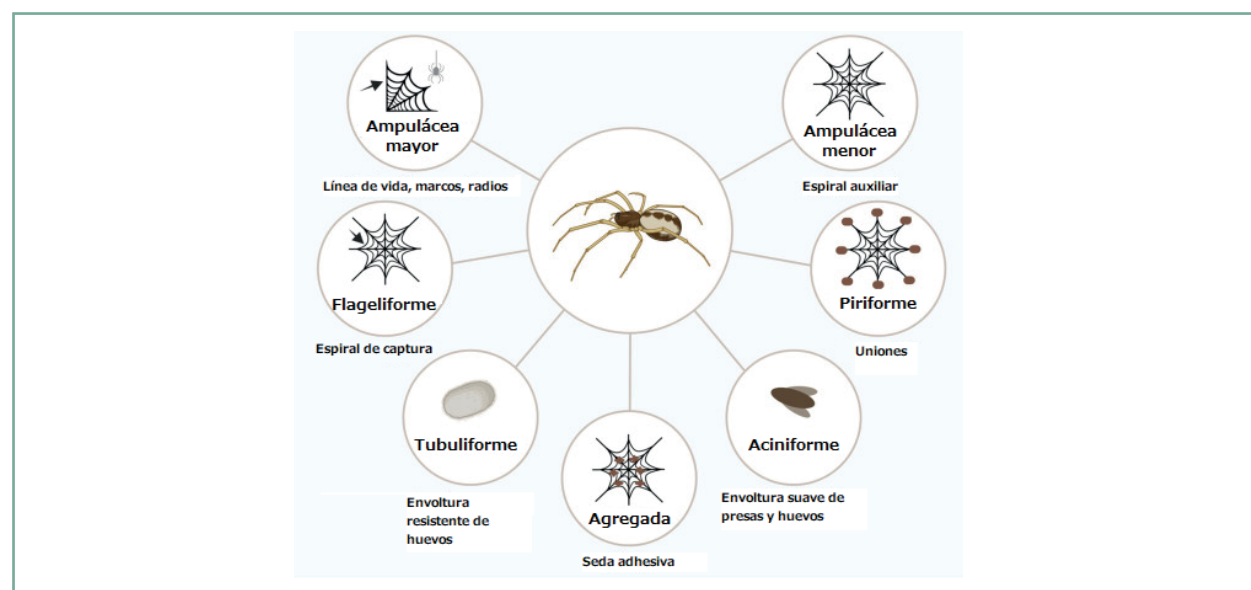
La seda de la espiral de captura se compone de una proteína producida en la

glándula flageliforme. Es más elástica y permite disipar eficientemente la energía de impacto de las presas (Römer, L. & Scheibel, T. 2008).

Las arañas tejedoras también emplean otros tipos de sedas en la construcción de sus telarañas, aunque las dos mencionadas son las más estudiadas por sus características, siendo de hecho la seda de la glándula ampulácea mayor la que más interés ha generado por la alta gama de aplicaciones que su rigidez y resistencia aumentada permiten. Por tal razón, a partir de este punto, el trabajo se concentra principalmente en los aspectos concernientes a la seda de la glándula ampulácea mayor.

Figura 1

Diagrama sobre las glándulas secretoras y sus respectivas sedas (Bittencourt, et al., 2022).



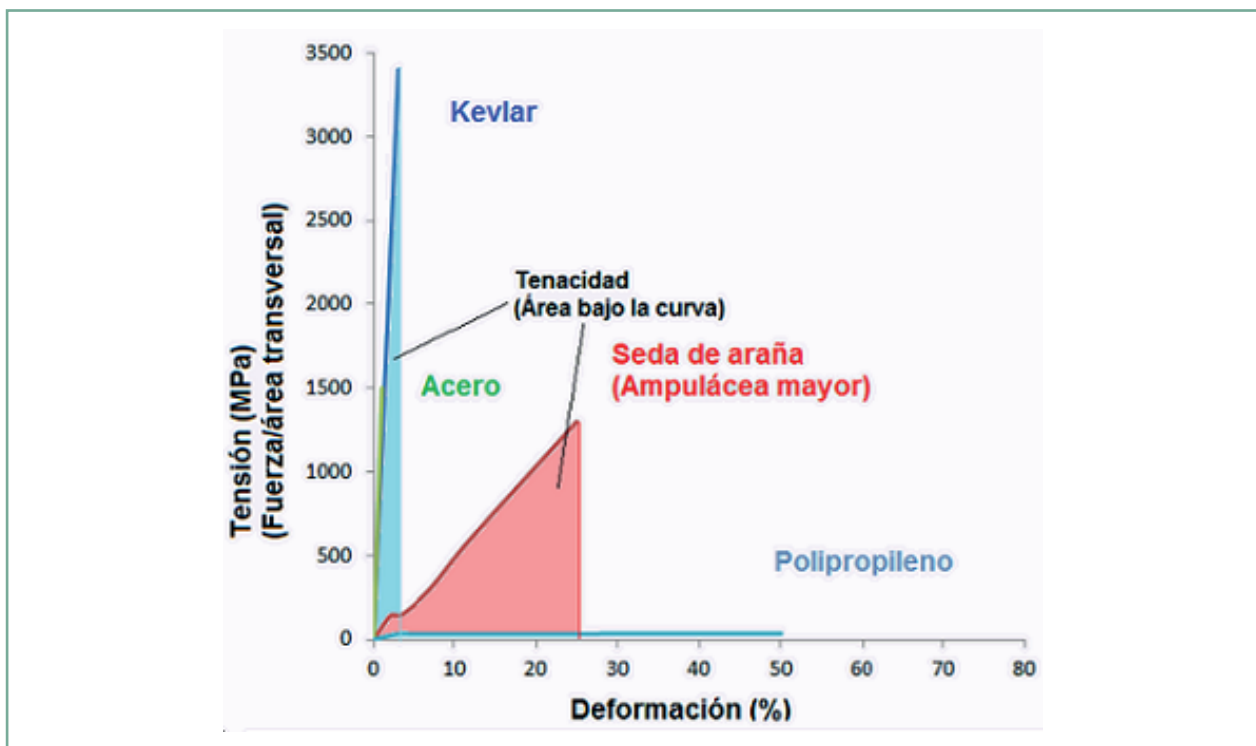
Composición, estructura y propiedades de la seda de araña

La seda de araña es un material que presenta una combinación única de propiedades mecánicas, lo que la convierte en un material de gran interés para la investigación científica y la ingeniería. Aunque cada tipo de seda presenta propiedades mecánicas distintas, en general, se puede afirmar que la mayoría de las sedas de araña son extremadamente resistentes a la rotura y muy extensibles, lo que resulta en una alta tenacidad. A pesar de que a menudo se compara con el acero, la seda

de araña presenta una resistencia similar a la del acero, pero es cinco veces más resistente por unidad de masa, debido a su menor densidad ($1,3 \text{ g cm}^{-3}$ frente a $7,8 \text{ g cm}^{-3}$ del acero). El Kevlar es más resistente que la seda de araña y el acero, sin embargo, la seda de araña es capaz de soportar deformaciones alrededor de 10 veces superiores (30%), lo que requiere grandes cantidades de energía mecánica (Colaboradores de Wikipedia, 12 de enero de 2023). La seda de araña se caracteriza por su tenacidad, medida por el área bajo la curva tensión-deformación, lo que la convierte en un material de referencia en este aspecto.

Figura 2

Comparación entre la curva de Tensión-Deformación de la seda de araña (*Ampulácea Mayor*) con otros materiales ingenieriles (Colaboradores de Wikipedia, 12 de enero de 2023)



La seda de araña tiene una estructura jerárquica, por lo cual se pueden distinguir varias estructuras que explican el porqué de sus propiedades: primarias, secundarias, terciarias y cuaternarias (Römer, L. & Scheibel, T., 2008).

La **estructura primaria** se refiere a las secuencias de aminoácidos que componen a las proteínas de la seda de araña, conocidas como espidroínas. Principalmente, estos aminoácidos son hidrofóbicos y no polares.

Asimismo, gracias al análisis de ADN, se ha demostrado que todas las proteínas de la seda de araña son cadenas de motivos péptidos iterados, lo que significa que son unidades repetitivas. Por ejemplo, las dragalinas, que son el tipo de seda más fuerte, son segregadas por la glándula ampulácea mayor y se componen de dos espidroínas principales, ambas conteniendo regiones cristalinas de polialanina con masas moleculares aparentes entre 180 kDa y 720 kDa. Las espidroínas también tienen un dominio N-terminal (NT) y un dominio C-terminal (CT) que influyen en la solubilidad durante el almacenamiento y regulan el ensamblaje de una fibra sólida (Arndt, T., et al., 2022; Scheibel, T. 2004). Entonces, cuando se segregan las proteínas en las glándulas de las arañas, la cadena de aminoácidos alterna entre partes hidrofóbicas e hidrofílicas, lo cual permite que las proteínas disueltas se conviertan en fibras en el ducto de hilado de las arañas. Así, las interacciones intramoleculares e intermoleculares son las responsables de la formación de las otras estructuras jerárquicas únicas.

La **estructura secundaria** es la forma en la que la cadena de aminoácidos se dobla en patrones estructurales locales, como hélices alfa o láminas beta, siendo estas últimas las principales y una de las razones por las que la seda de araña es un material resistente.

Una de las estructuras secundarias más importantes de la seda de araña, de la cual se tiene poco conocimiento, son las nanofibrillas que la componen (Wang, Q., et al., 2022). Experimentos realizados en fibras enteras han demostrado que estas fibras están conectadas entre sí y al estirarse forman nanogrietas en lugar de grietas grandes, lo que les otorga propiedades de tenacidad y resistencia. Además, se ha demostrado que estas fibras son cristales semicristalinos. La falta de información se debe en gran parte a que la única fuente de estudio son las arañas reclusas, en las cuales se encuentra una cinta de seda fuerte y resistente que consiste solo en nanofibrillas. La ausencia de otros elementos estructurales ha permitido demostrar que las propiedades mecánicas de la seda de araña se implementan a nivel de una nanofibrilla individual.

La **estructura terciaria** de la seda de araña se refiere a cómo las espidroínas se doblan en el espacio. Las regiones lámina beta antiparalelas, altamente orientadas, se ordenan en dominios nanocristalinos que están embebidos en regiones amorfas, que son desordenadas y menos compactas, lo cual explica que la seda de araña sea elástica además de resistente, traducándose en su tan apreciada tenacidad.

La **estructura cuaternaria** se refiere a cómo las distintas moléculas se ensamblan para formar estructuras más grandes. En el caso de la seda de araña, las espidroínas forman estructuras llamadas micelas, que a su vez se ensamblan para formar las fibras como tal.

Se han realizado más estudios que han permitido comprender más acerca de la seda de araña y sus proteínas constituyentes. Estos se han centrado en arañas como la *Nephila Clavipes* y la araña de cruz de jardín (*Araneus Diadematus*), que se consideran las más estudiadas.

Gracias a estos estudios, se ha asignado una función estructural a las principales características de los motivos peptídicos de la seda de araña. Las espidroínas son sintetizadas por las células epiteliales de las arañas. Sin embargo, también se han identificado otras espidroínas adicionales de las que aún no se sabe si tienen un papel importante en la estructura final de la seda de araña.

3. Desarrollo

Las dificultades de la obtención de seda natural

La obtención de seda de araña a gran escala a través de la cría de arañas es poco viable debido a varios factores, como lo son su naturaleza (generalmente) solitaria y canibalismo. Además, la recolección de seda de araña a través de métodos tradicionales es laboriosa y produce una cantidad muy limitada de seda como para satisfacer la demanda industrial.

Síntesis recombinante de proteínas

La síntesis recombinante consiste en la creación de moléculas de ADN artificiales mediante técnicas de laboratorio que permiten la combinación de material genético proveniente de distintos medios, creando secuencias de ADN que no se encuentran naturalmente en el genoma (Colaboradores de Wikipedia, 16 de marzo, 2023). El proceso necesita de un vector génico, que es la molécula de ADN que se replica en una célula viva junto a los segmentos de ADN externo previamente aislados que le fueron insertados. Este vector suele ser un plásmido (un segmen-

to de ADN circular en bacterias, distinto del ADN cromosómico) o un virus, y debe ser escogido tomando en consideración el organismo huésped, el tamaño del segmento a clonar y la forma en cómo este debe expresarse.

La expresión de un gen ocurre cuando la célula sintetiza proteínas (conocidas como proteínas recombinantes) y ARN a partir de la información codificada en el gen, lo cual conlleva la manifestación de un fenotipo. La expresión homóloga ocurre cuando el gen pertenece al mismo sistema (o individuo, en otras palabras). Por otro lado, la expresión heteróloga es la expresión de un gen en un organismo diferente del original, que puede incluso ser de una especie distinta. Asimismo, la expresión heteróloga puede o no ser permanente dependiendo de si el gen insertado se integra o no.

Como ya se mencionó, los científicos buscan con esta técnica la producción de las proteínas asociadas a determinados genes en un organismo vivo más fácil de controlar. En el caso de la síntesis de seda de araña, se busca la expresión de los genes que codifican a las espidroínas, siendo las más utilizadas las que se basan en secuencias de *Nephila clavipes* o *Araneus diadematus*. Ya se han utilizado distintos huéspedes para producir proteínas de seda de araña (Salehi, *et al.*, 2020), como bacterias (p. ej., *Escherichia coli*), levaduras (p. ej., *Pichia pastoris*), células de mamíferos (p. ej., células de riñón de hámster) o células de insectos (células Sf9 del gusano cogollero). El huésped de producción más utilizado para las proteínas de seda recombinantes es *E. coli* debido a la cinética de crecimiento rápido, alta densidad celular y fácil transformación.

Enfoques para la síntesis de seda de araña

Un enfoque ampliamente investigado consiste en la expresión heteróloga de espidroínas insolubles en distintos sistemas procariotas y eucariotas, para luego solubilizarlas mediante solventes orgánicos y producir fibras a partir de ello. Existe también un enfoque biomimético, es decir, que busca imitar las condiciones en que se producen las proteínas y los mecanismos moleculares de la formación de la fibra. Para ello, se utilizan solamente soluciones acuosas durante la purificación e hilado (Arndt, T., *et al.*, 2022).

El primer enfoque presenta dos problemas fundamentales: si bien las proteínas producidas son largas y permiten el hilado de fibras con alta resistencia a la rotura, el rendimiento de la proteína es bajo para fines industriales y, además, es dañada por los solventes orgánicos agresivos.

Por otro lado, el enfoque biomimético emplea espidroínas miniatura (Arndt, T., *et al.*, 2022). En la naturaleza, las arañas son capaces de mantener las espidroínas solubles en sus glándulas a una concentración de 30 a 50 % w/v, para luego convertirlas a fibras disminuyendo el pH y con esfuerzos cortantes (Arndt, T., *et al.*, 2020; Hijirida, D. H., 1996). Entonces, este enfoque replica este proceso manteniendo las mini espidroínas en una solución búfer con un pH de 8.0 y luego pasarlas a un medio más ácido. Luego, se procede a crear las fibras por un método de extrusión. Se encontró que el período de tiempo en el que esto se realiza influye en las propiedades de la seda de araña, como su solubilidad en agua o resistencia. Un estudio (Arndt, T., *et al.*, 2020) encontró que un tiempo muy corto (menor a 3 horas) provoca que la fibra sea poco resistente y se disuelva de inmediato en el agua, mientras

que un tiempo mayor (12 a 48 horas) provoca que se encoja ligeramente, aunque no es disuelta fácilmente. Como resultado, el tiempo óptimo en el medio ácido es de 6 horas, pues en las pruebas de solubilidad se mantiene intacta y tampoco se encoge.

Aun así, las fibras de mini espidroínas creadas mediante el enfoque biomimético solo alcanzan alrededor del 15% de la resistencia a la tracción de la seda nativa (Arndt, T., *et al.*, 2022).

Este último estudio, para resolver ese problema, logró producir fibras artificiales con una tenacidad similar a la seda de araña nativa al diseñar mediante ingeniería de proteínas nuevas mini espidroínas que forman vínculos más fuertes, las cuales luego se implementaron genéticamente en la bacteria *Escherichia coli* que es el huésped más utilizado. Esto abre las puertas a la producción en masa viable de seda de araña artificial en biorreactores.

Modificación genética de gusanos de seda

Un grupo de investigadores (Teulé, F., *et al.*, 2012) observó un progreso limitado en la producción de seda de araña artificial, por lo que utilizaron un elemento genético conocido como *piggyBac vectors* para modificar la estructura genética de los gusanos de seda y que dichos gusanos transgénicos expresaran el gen de araña A2S8 sintético (secuencia similar de ADN que codifica una proteína de seda de araña única) para poder producir fibras compuestas de seda, dando como resultado una codificación de proteínas quiméricas de gusano de seda y seda de araña que pueden hilar fibras compuestas con propiedades mecánicas mejoradas en comparación con las propiedades mecánicas de la seda de araña normal.

Esta resultó ser una opción viable ya que las fibras de seda producidas por estos gusanos son tan duras como las fibras de seda de araña nativas, además que los gusanos de seda se pueden cultivar en masa.

Aplicaciones biomédicas

La seda de araña ha encontrado un importante campo de aplicación en la medicina. Una de las aplicaciones biomédicas más relevantes es en la implantación de células madre, en donde la seda de araña cumple el papel de soporte para evitar que se dispersen en el organismo. Además, se mencionan varias aplicaciones prometedoras de la seda de araña en dispositivos médicos, sistemas de cierre de heridas, tiritas y suturas para neurocirugía, así como en ligamentos y tendones artificiales para implantes duraderos (Bittencourt, *et al.*, 2022). Sin embargo, debido al elevado costo de la seda natural, esta ha sido reemplazada por plásticos en algunas aplicaciones biomédicas. Cabe destacar que la seda de araña contiene vitamina K, la cual estimula el sistema de coagulación de la sangre y el sistema inmunitario.

Otras aplicaciones biomédicas potenciales de la seda de araña producida mediante ingeniería genética son implantes, dispositivos de liberación de fármacos y materiales de regeneración de tejidos (Bittencourt, *et al.*, 2022). Estos materiales se han diseñado para imitar la estructura y las propiedades mecánicas de la seda de araña natural, mientras que se modifican para mejorar su resistencia y flexibilidad, así como para ajustar su degradación y liberación de fármacos.

Además, la seda de araña producida por ingeniería genética se ha investigado en la medicina regenerativa para la regeneración de tejidos como nervios, cartílago y huesos, debido a sus propiedades biocompatibles y biodegradables. También

se ha investigado su uso en la ingeniería de tejidos para la producción de estructuras tridimensionales para la regeneración de órganos.

En general, las aplicaciones biomédicas de la seda de araña producida mediante ingeniería genética son amplias y prometedoras, y su uso en la medicina regenerativa y otras áreas de la biotecnología sigue siendo objeto de investigación activa.

Otras aplicaciones

Gracias al progreso reciente en la producción de seda de araña recombinante, en un futuro cercano esta podría ser un buen reemplazo del nylon o el Kevlar en la fabricación de cuerdas especiales, redes de pesca, paracaídas, artículos deportivos, textiles, chalecos antibalas, etc., gracias a que puede absorber más energía sin romperse (Woody, 2018). Asimismo, se sabe que Airbus, junto a la empresa de biotecnología AM Silk, busca desarrollar nuevos materiales basados en la seda de araña capaces de revolucionar la aeronáutica (Fernández, 2022). También es biocompatible y se puede utilizar en la producción de hilo quirúrgico y ligamentos artificiales (Arndt, T., *et al.*, 2022). A medida que la producción de seda de araña a escala industrial avanza, es posible que esta fibra supere a las fibras artificiales en términos de rendimiento y sostenibilidad en el futuro.

4. Conclusiones

El carácter de la seda de araña completamente biodegradable e inócua para la salud y los ecosistemas puede representar un gran avance incluso para países en vías de desarrollo, donde en ocasiones hacen falta las instalaciones adecuadas para el procesamiento de residuos y evi-

tar daños al medioambiente. Con ello, al reemplazar productos que sí pueden ser dañinos (como algunos plásticos), ya sea por riesgo químico o físico para los seres vivos, puede entonces hablarse de un paso hacia un mejor futuro.

El progreso de los científicos en cuanto al estudio de las propiedades y las formas para sintetizar la seda de araña han avanzado mucho en las últimas décadas gracias a los avances en biología sintética. El estudio del ADN ha hecho posible entender el funcionamiento, composición y estructuras de las espidroínas, las pro-

teínas principales, lo cual se traduce en abrirse camino a la síntesis artificial de este material único. Puede que los métodos existentes no estén completamente desarrollados, o que secuenciar el ADN aún impone desafíos, pero el futuro con respecto a la seda de araña es brillante y vale la pena sin duda alguna. Después de todo, un material altamente tenaz, que supera por creces a otros reconocidos por tal propiedad, que además es elástico y prácticamente no deja huella medioambiental alguna, es algo que no se encuentra o descubre a menudo.

5. Referencias

Arndt, T. et al (2022). Engineered spider silk proteins for biomimetic spinning of fibers with toughness equal to dragline silks. *Advanced Functional Materials*, 32(23), 2200986. <https://doi.org/10.1002/adfm.202200986>

Bittencourt, D. M. C. et al (2022). Bioengineering of spider silks for the production of biomedical materials. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 10, 958486. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.958486>

Colaboradores de Wikipedia. (12 de enero, 2023). *Seda de araña*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Seda_de_ara%C3%B1a&oldid=148552180

Colaboradores de Wikipedia. (16 de marzo, 2023). *Recombinant DNA*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Recombinant_DNA&oldid=1144888483

Fernández, C. R. (2022, 24 junio). Airbus Will Use Recombinant Spider Silk to Build Lightweight Planes. *Labiotech.eu*. <https://www.labiotech.eu/trends-news/airbus-amsilk-spider-silk-planes/>

Greco, G. et al (2020). Properties of Biomimetic Artificial Spider Silk Fibers Tuned by PostSpin Bath Incubation. *Molecules*, 25, 32-48. <https://doi.org/10.3390/molecules25143248>

- Hijirida, D. H.; Do, K. G.; Michal, C.; Wong, S.; Zax, D. & Jelinski, L. W. (1996). ^{13}C NMR of *Nephila clavipes* major ampullate silk gland. *Biophysical journal*, 71(6), 3442–3447. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(96\)79539-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(96)79539-5)
- Li, J.; Li, S.; Huang, J.; Khan, A.; An, B.; Zhou, X.; Liu, Z. & Zhu, M. (2021). Spider Silk-Inspired Artificial Fibers, 202103965. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/advs.202103965>
- Römer, L. & Scheibel, T. (2008). The elaborate structure of spider silk: structure and function of a natural high performance fiber. *Prion*, 2(4), 154–161. <https://doi.org/10.4161/pri.2.4.7490>
- Salehi, S.; Koeck, K. & Scheibel, T. (2020). *Spider Silk for Tissue Engineering Applications*. MDPI. <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/3/737>
- Scheibel, T. (2004). Spider silks: recombinant synthesis, assembly, spinning, and engineering of synthetic proteins. *Microbial Cell Factories*, 3(1), 14. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-3-14>
- Teulé, F.; Miao, Y. G.; Sohn, B. H.; Kim, Y.S.; Hull, J. J.; Fraser, M. J. Jr.; Lewis, R. V., & Jarvis, D. L. (2012). Silkworms transformed with chimeric silkworm/spider silk genes spin composite silk fibers with improved mechanical properties. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(3), 923–928. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109420109>
- Wang, Q.; McArdle, P.; Wang, S. L.; Wilmington, R. L.; Xing, Z.; Greenwood, A.; Cotten, M. L.; Qazilbash, M. M., & Schniepp, H. C. (2022). Protein secondary structure in spider silk nanofibrils. *Nature Communications*, 13(1), 4329. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31883-3>
- Woody, C. (2018, 8 agosto). *Military researchers think spider silk may keep US troops lighter and cooler in combat*. Business Insider. <https://www.businessinsider.com/military-scientists-want-to-use-spider-silk-for-body-armor-parachutes-2018-8>
- Wright, S. W., & Goodacre, S. L. (2012). Evidence for antimicrobial activity associated with common house spider silk. *BMC Research Notes*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/1756-0500-5-326>