

Plantas del semidesierto mexicano: una solución basada en la naturaleza como barreras vivas cortafuego

Mexican semidesert plants: a nature-based solution for living fire barriers

Lorena Vargas Rodríguez¹, Michelle Farfán Gutiérrez²

[Recibido: 12 de febrero de 2026; Aceptado: 18 de mayo de 2026; Corregido: 11 de junio de 2026; Publicado: 30 de junio de 2026]

Resumen

[Introducción]: El cambio climático está intensificando el régimen de los incendios forestales, esto lleva a buscar alternativas preventivas, como soluciones basadas en la naturaleza (SBN), tales como la creación de barreras vivas de plantas de baja inflamabilidad. No obstante, existe un vacío de información cuantitativa sobre la respuesta térmica de las estructuras epidérmicas de la flora nativa del semidesierto ante el calor. **[Objetivo]:** Evaluar en laboratorio la resistencia térmica y el comportamiento de combustión del tejido epidérmico aislado de *Myrtillocactus geometrizans*, *Agave salmiana*, *Opuntia spinulifera* y *Aloe vera* para estimar su potencial aptitud como barreras vivas. **[Metodología]:** Se determinó el grosor, densidad, dureza y estructura celular (microscopía óptica LABO-MED-CxL) de secciones epidérmicas manuales, sometiénolas, posteriormente, a ensayos de combustión y estrés térmico controlado. **[Resultados]:** La epidermis de *M. geometrizans* registró las mayores propiedades físicas: grosor (0.65 ± 0.035 mm), densidad (694.34 ± 0.002 g/m²) y dureza ($74.00 \pm 2.944^\circ$), superando a *A. vera* por 20.66x, 13.57x y 5.88x, respectivamente. Además, presentó estomas tridimensionales (3D). En los ensayos, mientras *A. salmiana* y *O. spinulifera* alcanzaron temperaturas máximas ($\sim 270^\circ\text{C}$) antes de los 28 minutos, la epidermis de *M. geometrizans* extendió su resistencia térmica estable hasta los 42 minutos ($292.27 \pm 18.25^\circ\text{C}$). **[Conclusiones]:** Las propiedades morfológicas de la epidermis de *M. geometrizans*, seguida por la de *A. salmiana*, otorgan una notable estabilidad celular y retardo calórico en laboratorio. Aunque estos datos tisulares no son extrapolables directamente a escala de paisaje, constituyen una línea base científica esencial para el diseño y futura validación en campo de paletas vegetales para el diseño e implementación de barreras vivas cortafuego como una SBN en el manejo preventivo de combustibles de la región.

Palabras clave: barrera natural, epidermis, fuego, paisaje, prevención.

Abstract

[Introduction]: Climate change is intensifying wildfires, leading to a search for preventative alternatives, such as nature-based solutions (NBS), like creating living barriers of low-flammability plants. However, there is a lack of quantitative information on the thermal response of the epidermal structures of native semi-desert flora to heat. **[Objective]:** To evaluate under laboratory conditions the thermal resistance and combustion behavior of isolated epidermal tissue from *Myrtillocactus geometrizans*, *Agave salmiana*, *Opuntia spinulifera*, and *Aloe vera* to estimate their potential suitability as green firebreaks. **[Methodology]:** Thickness, density, hardness, and cellular

- 1 Profesora del Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, Universidad de Guanajuato, Celaya-Salvatierra, México. lvargas@ugto.mx; <https://orcid.org/0000-0001-7940-8516>
- 2 Profesora del Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México. michelle.farfán@ugto.mx; <https://orcid.org/0000-0002-4948-1453>



structure (LABOMED-CxL optical microscopy) of manually sampled epidermal sections were determined, subsequently subjecting them to combustion and controlled thermal stress assays. [Results]: The epidermis of *M. geometrizans* recorded the highest physical properties: thickness (0.65 ± 0.035 mm), density (694.34 ± 0.002 g/m²), and hardness ($74.00 \pm 2.944^\circ$), outperforming *A. vera* by 20.66x, 13.57x, and 5.88x, respectively. Furthermore, it exhibited three-dimensional (3D) stomatal structures. During the assays, while *A. salmiana* and *O. spinulifera* reached maximum temperatures ($\sim 270^\circ\text{C}$) before 28 minutes, the epidermis of *M. geometrizans* extended its stable thermal resistance up to 42 minutes ($292.27 \pm 18.25^\circ\text{C}$). [Conclusions]: The morphological properties of the *M. geometrizans* epidermis, followed by that of *A. salmiana*, provide notable cellular stability and thermal retardation under laboratory conditions. Although these tissue-level data cannot be directly extrapolated to a landscape scale, they establish an essential scientific baseline for the design and future field validation of plant palettes aimed at the implementation of green firebreaks as an NbS for preventive fuel management in the region.

Keywords: epidermis, fire, living barrier, landscape, prevention.

1. Introducción

—Específicamente el incremento térmico y la reducción de la humedad atmosférica— han transformado los regímenes de incendios forestales, prolongando las ventanas de peligro en gran parte de la superficie terrestre (Jolly *et al.*, 2015). Esta dinámica se manifiesta en una mayor frecuencia de días con condiciones críticas de propagación, lo que extiende las temporadas de fuego más allá de sus umbrales históricos (IPCC, 2023). Si bien el fuego es un proceso natural fundamental en ecosistemas adaptados, su alteración antropogénica está reconfigurando paisajes altamente vulnerables y exacerbando el riesgo en las zonas de interfaz urbano-forestal (Calviño-Cancela *et al.*, 2016; Ayala-Carrillo *et al.*, 2022).

En América Latina, esta problemática ha adquirido dimensiones críticas durante la última década, periodo en el que se han registrado las anomalías térmicas más severas y los 10 años más cálidos desde que se tiene registro (WRI, 2024). La combinación de sequías prolongadas, intensificadas por eventos climáticos como El Niño, y el avance de las fronteras agropecuarias ha duplicado la pérdida de cobertura forestal asociada a incendios en regiones estratégicas de la región, en comparación con los umbrales de principios de siglo (Armenteras *et al.*, 2021; WRI, 2024). Esa tendencia alcanzó hitos históricos entre 2023 y 2024, con incendios forestales que quemaron millones de hectáreas de bosques y humedales en países como Brasil, Bolivia, Perú y México, consolidando a los incendios forestales no solo como un vector primario de deforestación y degradación de ecosistemas de alta biodiversidad, sino también como una amenaza creciente para la resiliencia socioecológica regional (AIDA, 2023; WRI, 2024).

Ante este escenario de vulnerabilidad regional, el paradigma tradicional, centrado de forma reactiva en la supresión y el combate de los incendios forestales, ha demostrado ser estructural y económicamente insuficiente, lo que subraya la urgencia de transitar hacia esquemas de gestión integral enfocados en la prevención. Dentro de esta dimensión preventiva, el manejo de combustibles forestales juega un papel crítico para mitigar el comportamiento del fuego antes de la ignición. Entre las tácticas más consolidadas para este fin destaca la creación y mantenimiento



de brechas cortafuego, una de las técnicas de modificación de la continuidad del combustible más utilizadas a nivel global debido a su viabilidad operativa para segmentar el paisaje y facilitar el control de los frentes de llama (Thapa *et al.*, 2023). Sin embargo, la limpieza de la vegetación para su construcción ha demostrado tener efectos adversos, incluyendo la pérdida de biodiversidad, la alteración de la estructura del suelo y el aumento de la erosión hídrica (Saco *et al.*, 2021). En este contexto, las soluciones basadas en la naturaleza (SBN) emergen como una alternativa mitigadora y costo-efectiva (UICN y PNUMA, 2020). Una aplicación prometedora es la implementación de barreras vivas cortafuego (*green firebreaks*) a lo largo de las brechas tradicionales, utilizando especies vegetales con propiedades piroretardantes que alteran la inflamabilidad del paisaje (Smith *et al.*, 2025). Si bien este enfoque de gestión del territorio ha sido adoptado y evaluado rigurosamente en países como Estados Unidos, Australia, Portugal y China, su transferencia tecnológica hacia América Latina es aún incipiente, siendo Brasil el único país con estudios de caso documentados. Este escenario evidencia un vacío de conocimiento crítico respecto a la caracterización ecofisiológica y térmica de la flora nativa o adaptada de Latinoamérica que posea potencial piroretardante.

En particular, las especies vegetales del semidesierto mexicano presentan adaptaciones edafoclimáticas que las posicionan como candidatas idóneas para el establecimiento de barreras vivas cortafuego. A nivel histológico, la epidermis, que es el tejido más externo que recubre los órganos aéreos, desempeña un papel crítico en la interfaz planta-ambiente (Kunst *et al.*, 2006). La capa más externa de esta estructura es la cutícula, la cual actúa como la primera barrera de contacto con los factores abióticos. Químicamente, la cutícula está conformada por una matriz de polímeros lipídicos denominada cutina, en la cual se embeben ceras intracuticulares y se recubre externamente por una capa de ceras epicuticulares (Taiz y Zeiger, 2006; Suh *et al.*, 2005). En este sentido, Tafolla-Arellano *et al.* (2013) han documentado que la composición lipídica de esta biopelícula confiere funciones esenciales para la supervivencia celular, las cuales adquieren una relevancia crítica en escenarios de estrés térmico e incendios forestales a través de 2 mecanismos principales:

- *Mitigación del estrés hídrico extremo y retención celular:* La capa lipídica actúa como una barrera hidrofóbica altamente eficiente, que minimiza la transpiración cuticular no estomática. Ante la proximidad de un frente de fuego, esta propiedad reduce drásticamente la tasa de deshidratación tisular, permitiendo a la planta mantener la turgencia y retrasar el punto de ignición de sus tejidos.
- *Termorregulación microambiental y protección radiativa:* Esta estructura funciona como una interfase termorreguladora crucial en las interacciones de los órganos aéreos con el ambiente. Al optimizar el albedo vegetal y ofrecer una protección robusta contra la radiación ultravioleta (UV), la biopelícula previene el daño fotoquímico y el sobrecalentamiento celular, previo al impacto térmico directo del incendio.



Estos atributos, sugieren que la epidermis, con su cutícula, podría ser un factor clave que les confiere una importante resistencia térmica en esas plantas durante los eventos de incendios forestales, haciéndolas candidatas ideales para fines piroretardantes. Por lo tanto, este estudio plantea la siguiente pregunta científica: ¿De qué manera la exposición a un estrés térmico controlado altera la integridad estructural de la epidermis en especies suculentas crasas y cómo difiere esta respuesta entre taxones con distintas características morfológicas? Para resolver esta interrogante, el objetivo del estudio fue evaluar, bajo condiciones de laboratorio, la resistencia térmica de la epidermis de tres especies nativas del semidesierto guanajuatense: la cactácea candelabroforme de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*), el nopal (*Opuntia spinulifera*) y el agave (*Agave salmiana*). Asimismo, se incluyó en la selección a la sábila (*Aloe vera*), especie de origen sudafricano, perteneciente a la familia Asphodelaceae. A pesar de su carácter exótico, esta planta crasa ha sido incorporada, de manera integral en la cultura de los hogares mexicanos debido a sus ampliamente reconocidos beneficios medicinales.

Este análisis, permitirá validar a esas especies como candidatas viables para la implementación de barreras vivas cortafuego, contribuyendo así, a la formulación de una paleta vegetal que pueda ser integrada como una solución basada en la naturaleza (SBN) más eficiente para el manejo de combustibles en la prevención de incendios forestales para la región. Esta investigación se posiciona como un estudio pionero en México, al integrar el análisis de especies piroretardantes a escala de paisaje.

2. Metodología

2.1 Limpieza, selección del material vegetal y extracción de la epidermis conteniendo la cutícula

En plantas vigorosas del garambullo (G., *Myrtillocactus geometrizans*), agave (A.; *Agave salmiana*), nopal (N.; *Opuntia spinulifera*) y sábila (S; *Aloe vera*), fue seleccionado un segmento en su parte vegetativa adulta, con edad aproximada entre 2 y 3 años para las pencas, excepto para S que fue más joven (aprox. 1 año). Sobre los segmentos recolectados se hizo correr agua con una piseta de laboratorio simulando una llovizna para eliminar la suciedad ambiental. Después de que los materiales vegetales se secaron durante 24 h en espacio abierto, se procedió a la extracción de la epidermis, que conlleva la cutícula adherida, eligiendo para ello la región media de la rama/penca/hoja, proveniente de la cara más expuesta al sol en todos individuos. De forma manual, y con auxilio de un sacabocados con un diámetro de 1.452 cm, se obtuvieron las muestras de epidermis de cada especie. Solo en el caso de A, la operación se facilitó rasgando con un cúter de oficina para, posteriormente, pellizcar con la uña desprendiendo secciones de superficies variadas, según la habilidad. De las muestras circulares de G, N y S fueron eliminados los tejidos verdes y blandos (clorénquima y parénquima), mediante el raspado con un cuchillo, espátula metálica o bien, sobre superficie áspera, como la de un cedazo metálico o plásticos, hasta conseguir una apariencia y color similar a la cara externa.



2.2 Análisis del porcentaje de pérdida de masa en cutículas vegetales

Para evaluar la estabilidad estructural, la capacidad de retención de humedad y el grado de degradación material de las cutículas de las especies bajo estudio (*agave*, *nopal*, *sábila* y *garambullo*) al ser sometidas a estrés térmico, se determinó el porcentaje de pérdida de masa celular (% Δm) en cada una de las réplicas experimentales.

2.2.1 Determinación de la pérdida de masa

Antes de iniciar los ensayos de inducción térmica, se registró la masa inicial (m_i) en gramos (g) de cada muestra, utilizando una balanza analítica de precisión. Posteriormente, las muestras fueron expuestas al gradiente térmico temporal planificado. Una vez concluidos los ensayos y tras permitir que el material biológico se estabilizara a temperatura ambiente, se registró, de forma inmediata, la masa final resultante (m_f).

El porcentaje de pérdida de masa relativo para cada réplica se calculó mediante la siguiente ecuación estándar de balance de masa:

$$\% \Delta m = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100$$

Donde:

- % Δm es el porcentaje de pérdida de masa estructural.
- m_i es la masa inicial de la muestra (g).
- m_f es la masa final de la muestra post-ensayo (g).

2.2.2 Análisis estadístico

Con el objetivo de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en la retención de masa entre las distintas especies evaluadas, los valores porcentuales obtenidos de las 3 réplicas por grupo fueron sometidos a un Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor, previa verificación de los supuestos normales de homogeneidad de varianza y distribución. Debido al tamaño muestral y la naturaleza exploratoria del indicador como métrica de resistencia al fuego, se fijó un umbral de significancia estricto de $\alpha = 0.05$, considerando valores de $p < 0.10$ como tendencias marginalmente significativas con relevancia biológica y de manejo. Todos los procedimientos de cálculo computacional, estructuración de bases de datos y la representación gráfica, mediante diagramas de barras con intervalos de dispersión basados en la desviación estándar (SD) y superposición de réplicas individuales (stripplots), se ejecutaron empleando el lenguaje de programación Python (versión 3.x) y las librerías científicas *pandas*, *scipy.stats* y *seaborn*.

2.3 Caracterización de la calidad física de la epidermis

Las determinaciones para referir la calidad de la epidermis de G, A, N y S fueron en términos de grosor, densidad másica, dureza y microscopía óptica. La estimación del grosor se realizó mediante un calibrador vernier electrónico digital (marca Control Company, Traceable) sobre los recortes



circulares extraídos en quintuplicado. Para la determinación de la densidad másica o el peso específico $\rho=m/A$, se utilizó una balanza analítica (marca Pionner Ohaus), con ella se pesaron los recortes circulares de la piel con un área establecida (1.452 cm^2). La medición de la dureza se realizó a través de un durómetro digital (Dureza shore escala A) para materiales medianamente blandos como el cuero y el plástico. Este instrumento presenta una punta metálica en la parte inferior que hará contacto directo con el recorte de la epidermis y ejerce una presión mostrando en pantalla el valor de la dureza expresado en grados. Para cada material fueron ejecutadas 6 réplicas, con la finalidad de obtener un promedio. Con el fin de compensar las diferencias en grosor de las epidermis de G, A, N y S se estableció sobreponer varias capas de epidermis de aquellos materiales delgados que G, para luego proceder a aplicar la fuerza con el durómetro. Ese ajuste fue considerado en los resultados, dividiendo entre el total de capas superpuestas en la medición. Respecto a la microscopia óptica y densidad estomática ($p_{\text{est}} = \# \text{ estomas}/A$), las examinaciones de las epidermis vegetales en su cara externa fueron realizadas con un microscopio óptico (LABOMED CxL) a diferentes magnificaciones (40x, 100x y 400x), pero la cuantificación de estomas fue resuelta con mayor precisión en 100x para todos los materiales.

2.4 Análisis de combustión o resistencia térmica

El ensayo de combustión o resistencia térmica de las epidermis vegetales fue atendido con una placa de calentamiento análoga nivel laboratorio (marca Felisa, mod. FE-313), colocando sobre su superficie la cara externa de cada material vegetal a combustionar. A continuación, se encendió el equipo y por intervalos de un minuto se registró la temperatura por medio de una termo pistola (marca Fluke mod.64 Max) con señalador láser. El ensayo transcurrió hasta la obtención de las cenizas.

3. Resultados y discusión

3.1 Extracción de la epidermis conteniendo la cutícula

El aspecto y la epidermis ya limpia, se muestran en la **Figura 1**, la fotografía fue tomada desde su cara externa para exhibir la cutícula. Un fenómeno físico y opuesto entre las epidermis se presenció después de la limpieza (posterior al retiro de la pulpa). Los recortes tienden a enrollarse hacia adentro por la cara interna formando un cilindro a manera de pergamino, más pronunciado para la especie A que para N y S, en tanto G hizo tendencia ligera a flexionarse, pero en forma inversa.

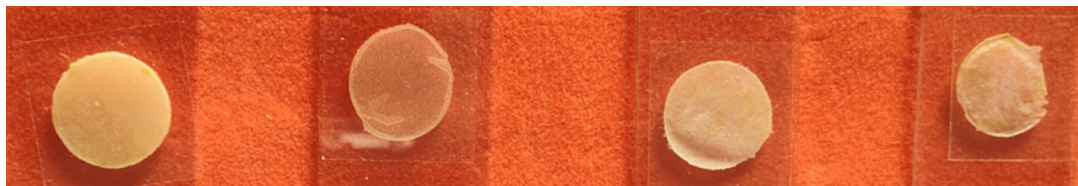


Figura 1. Cara externa de recortes de epidermis; de izquierda a derecha: garambullo, agave, nopal y sábila.
Figure 1. External surface of epidermis clippings; from left to right: garambullo, agave, nopal and sábila.



3.2 Determinación de la pérdida de masa

El análisis del porcentaje de pérdida de masa (% Δm), posterior al estrés térmico, evidenció variaciones numéricas notables en la capacidad de retención estructural entre las especies evaluadas, ordenándose de menor a mayor afectación de la siguiente manera: *agave* (28.3 % $\pm$ 4.4 %), *nopal* (35.9 % $\pm$ 1.8 %), *sábila* (40.0 % $\pm$ 8.8 %) y *garambullo* (40.7 % $\pm$ 4.1 %). El Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor aplicado a estos porcentajes arrojó un valor de $F = 3.3294$ y un valor $p = 0.0772$ (**Figura 2**). Bajo el criterio estándar de significancia ($\alpha = 0.05$), este resultado se traduce en una tendencia marginalmente significativa ($p < 0.10$), lo que indica que, si bien el comportamiento global ante la transferencia de calor tiende a la homogeneidad, la cutícula de *Agave* exhibe una clara propensión biológica a una menor degradación física y una mayor resistencia macroestructural frente a la desecación extrema, en comparación con el resto de las cactáceas y suculentas analizadas.

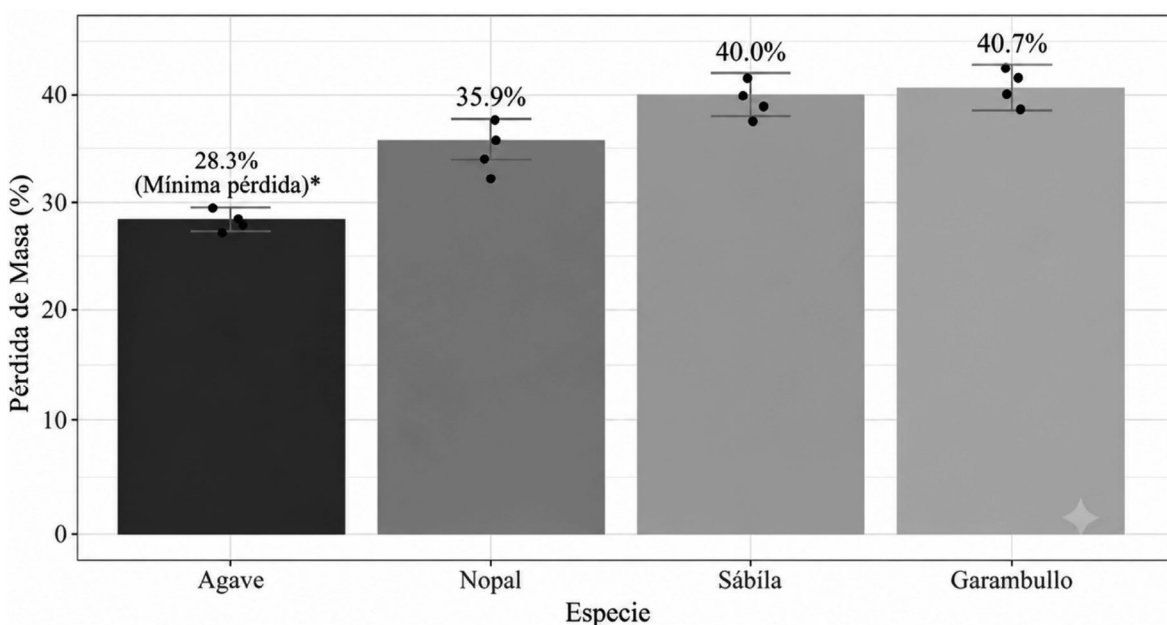


Figura 2. Valores en porcentaje de pérdida de masa posterior al estrés térmico en el agave, nopal, sábila y garambullo.
Figure 2. Percentage values of mass loss following thermal stress in agave, nopal, sábila and garambullo.

Esta menor pérdida de masa en el agave podría estar asociada a una mayor densidad estomática, al grosor de los depósitos de ceras epicuticulares o a la composición polimérica de la cutina, atributos que optimizan la protección del tejido interno bajo escenarios de incendios forestales o estrés por calor severo.



3.3 Caracterización de la calidad física de la epidermis

En el Cuadro 1 aparecen los valores promedio del grosor, densidad y dureza de la epidermis de G, A, N y S. Referente al grosor, G se perfiló con 0.65 ± 0.035 mm que lo colocó 20.66x más que el material más delgado, S (0.03 ± 0.003 mm), A y N mostraron valor bajo e idéntico de 0.08 (desviaciones estándares ± 0.010 y ± 0.006 mm respectivamente). Existen escasos reportes para el grosor de epidermis de las especies aquí investigadas, se encontró que Pérez España *et al.* (2022) menciona que para la “cutícula” de hoja de Agave salmiana, se obtuvo un valor de 8.67 micras que resulta 10x menor que el aquí reportado para la “epidermis” de la hoja de A (siendo mismo agave). La importancia de la medición del grosor radica, desde las investigaciones generales, que refieren como al gran éxito de las plantas para adaptarse a las condiciones terrestres en el curso de la evolución con la creación de gruesas cutículas para evitar la deshidratación de sus cuerpos. Otra característica física asociada y poco documentada, es la densidad o peso específico, que para la epidermis fue referida a la superficie (quedando como g/m^2). G congruente a su mayor grosor nuevamente se posicionó con 13.57x más densa que S (47.67 ± 0.001 g/m^2), siendo la más ligera. En las epidermis de A y N se determinó 82.75 y 75.70 ± 0.0003 g/m^2 respectivamente. Vargas Rodríguez *et al.* (2017) obtuvieron en la cutícula de cladodios (edad 2 años) de nopal especie Opuntia spinulifera un grosor destacado de 0.15 y 0.28 mm y una densidad másica de 11 mg/cm^2 (110 g/m^2).

En el presente trabajo de investigación, se consideró la dureza de los materiales epidérmicos, la cual refleja el nivel de protección que otorga a las estructuras internas de la planta. Los resultados indican que, G obtuvo el máximo valor de dureza de $74.00 \pm 2.944^\circ$ superando en 5.88x al material más frágil, S ($10.75 \pm 1.493^\circ$), en tanto que 2.18x para A ($23.25 \pm 1.887^\circ$) y 1.49x para N ($29.75 \pm 1.109^\circ$). Ante la falta de antecedentes indexados sobre la dureza de estas cutículas, que permitieran una discusión comparativa, se optó por evaluar materiales de uso común como controles de referencia. De este modo, la dureza máxima de G puede homologarse a la de una tapa rosca de polímero comercial (72.50 ± 3.291), mientras que para S se aproxima al comportamiento de una manguera de hule para venoclisis (20.42 ± 1.455).

Cuadro 1. Valores promedios de grosor, densidad y dureza de la epidermis de garambullo, agave, nopal y sábila.*
Table 1. Thickness, density, and hardness of the epidermis of garambullo, agave, nopal, and sábila.

Especie de epidermis	Grosor (mm)	Densidad $\rho = m/A$ (g/m^2)	Dureza 0-100 HA (grados)
Garambullo (G)	0.65 ± 0.035	694.34 ± 0.002	74.00 ± 2.944
Agave (A)	0.08 ± 0.010	82.75 ± 0.001	23.25 ± 1.887
Nopal (N)	0.08 ± 0.006	75.70 ± 0.0003	29.75 ± 1.109
Sábila (S)	0.03 ± 0.003	47.67 ± 0.001	10.75 ± 1.493

*Mediciones al momento de la extracción; condiciones ambientales 28°C / 60 % HR



3.3 Caracterización microscópica

La microscopia óptica de las caras externas de epidermis de las 4 especies permitió establecer la densidad estomática de cada material ($\rho = \# \text{estomas/mm}^2$), eso se obtuvo, de forma óptima, en vistas con aumentos de 100x en todos los casos. En el **Cuadro 2** se presentan los valores correspondientes, posicionando 1° A (24.36 ± 0.556) > 2° N (22.01 ± 1.667) > 3° G (16.70 ± 0.834) > 4° S (14.34 ± 0.278).

Recordando que los estomas son los espacios en la epidermis que contienen los poros (llamados ostiolas), a través de los cuales las plantas realizan el intercambio gaseoso con el medio exterior tanto de agua, oxígeno como de dióxido de carbono. Mecanismo importante que se considera en el estudio de un proceso de deshidratación de las plantas que se enfrentan al calor, por ejemplo, la presencia del fuego. La especie G fue la de menor densidad estomática comparada con A y N (provenientes del mismo ambiente semiárido), característica que le otorga ventaja de resistencia a la deshidratación y, por consiguiente, mayor capacidad de protección de estructuras internas. [Hernández et al. \(2007\)](#), analizaron epidermis de 20 poblaciones de *Myrtillocactus metrizzans* provenientes de 6 estados de la república mexicana (San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Oaxaca, Hidalgo y Puebla), reportando densidades promedio de estomas por población con 18 para la mínima y 30 mm^2 para la máxima. Los mismos autores señalan que [Pimienta Barrios et al. \(1993\)](#) publicaron un rango de densidades de 9-38 estomas/ mm^2 para Opuntias; el valor de 22.01 ± 1.667 para N aquí determinado es congruente con ese reporte, adicionalmente en [Vargas Rodríguez et al. \(2017\)](#) citan a la cutícula de cladodios de nopal *Opuntia ficus indica* (edad 2 años) como una barrera poco porosa con 28 estomas/ mm^2 . Otra congruencia obtenida fue el resultado de 24.36 ± 0.556 estomas/ mm^2 en la especie A con el trabajo de [Pérez España et al. \(2022\)](#) que refieren un rango de 22.67 a 27.67 estomas/ mm^2 y aseveran, sus datos están acorde a los citados por diversos autores. [Vargas et al. \(2018\)](#), en su estudio de la capacidad de permeación de agua en la hoja mixiotera (“cutícula”) para hojas de *Agave salmiana* evidenciaron un material de grosor 0.114 mm y densidad másica de 7.2 mg/cm^2 (72 g/m^2).

En el caso de la densidad estomática para *Aloe vera*, solo se encontró a [Sánchez et al. \(2011\)](#) que han reportado 2.95 estomas/ mm^2 en epidermis de hoja adaxial de sábila aclimatada valor distinto al determinado en este estudio de 14.34 ± 0.278 estomas/ mm^2 . Sin duda, una densidad baja de estomas contribuye a un mejor balance en la economía del agua en estas plantas del semiárido, interpretado así por [Hernández Valencia et al. \(2003\)](#) como una respuesta de aclimatación para reducir la pérdida de agua.

Cuadro 2. Densidad estomática de las epidermis de garambullo, agave, nopal y sábila

Table 2. Stomatal density of the epidermis of garambullo, agave, nopal, and sábila

Especie de epidermis	Garambullo (G)	Agave (A)	Nopal (N)	Sábila (S)
Densidad ($\rho = \# \text{estomas/mm}^2$)	16.70 ± 0.834	24.36 ± 0.556	22.01 ± 1.667	14.34 ± 0.278



La **Figura 3**, muestra la cara externa de las epidermis para las 4 especies examinadas (**Figura 3A-3D**) con vistas a 400x para mejor detalle estructural. En la misma **Figura 3E y 3F** se muestran los aumentos a 100x para G y A respectivamente, intencionadas para presentar un número mayor de estomas por campo visual. De este análisis de microscopía óptica, se reconoció que G (**Figura 3E**) presentó formas de sus estomas en 3D, por encima del nivel de las células epidérmicas, bajo un arreglo o aspecto de distribución que lo llamamos de escurrimiento por manifestarse como gotas en camino con 3 o más estomas en hilera. En tanto que las otras especies (A, N y S) tuvieron sus estomas al mismo nivel o plano del tapizado de las células epidérmicas. Esta característica morfológica para G de 3D sugiere un factor de arquitectura de estomas adicional, que podría inducir a una reducción en la tasa de evaporación de agua de la planta (respecto a las estructuras 2D de especies relacionadas como las aquí consideradas, A y N).

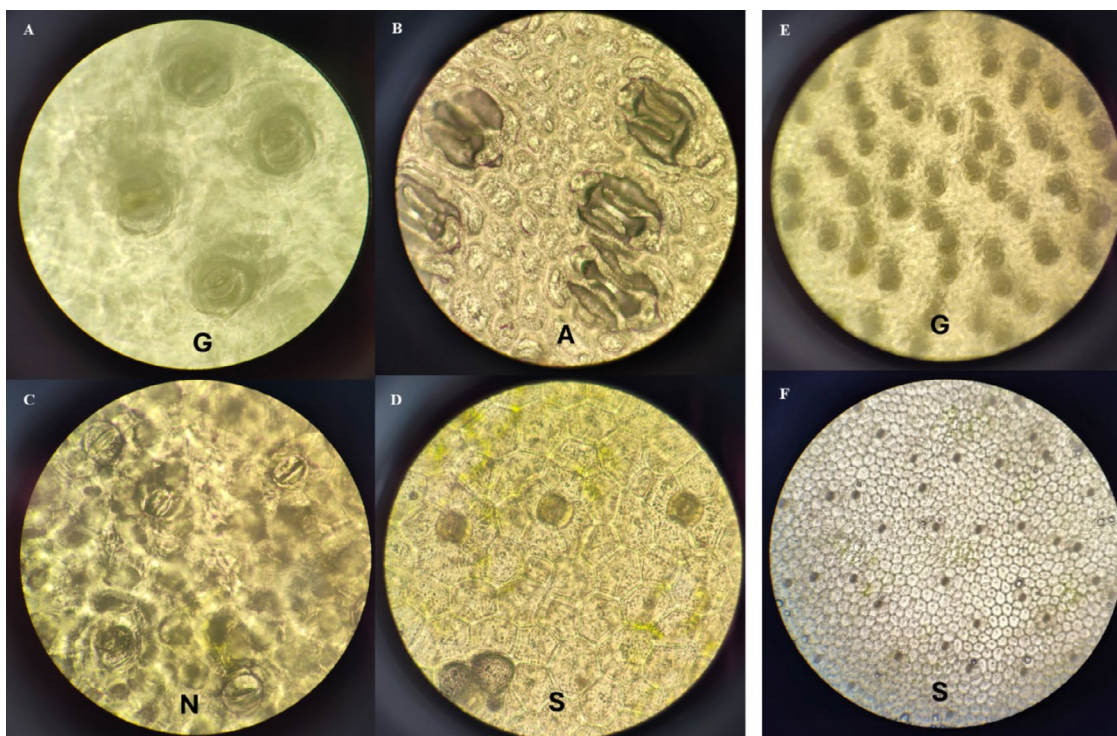


Figura 3. Microscopía óptica en campo claro para las caras externas de las epidermis de garambullo (G), agave (A), nopal y sábila a 400x (A-D) y vistas para G y S a 100x (E y F).

Figure 3. Brightfield optical microscopy for the outer faces of the epidermis of garambullo (G), agave (A), nopal, and sábila at 400x (A-D), and views for G and S at 100x (E and F).

3.4 Análisis de combustión o resistencia al calor

El ensayo para la evaluación a la resistencia térmica de las epidermis de las 4 especies desde su cara externa es presentado en su secuencia en la **Figura 4**. En ella aparece el avance en



colorimetría en relación con el incremento de temperatura hacia la combustión (A-E) para cada especie, con su anotación del tiempo transcurrido y temperatura registrada en inicio, mitad y finalización. La finalización, fue establecida con la generación de cenizas negras. Adicionalmente, la **Figura 4F** para las 4 especies presentan la vista al microscopio en 100x para cada etapa del ensayo en que se identificó como un punto de ruptura de estructura, a considerarse “daños irreparables”, ese momento fue el correspondiente con las imágenes 3-D en el ensayo hacia la combustión. También, se observó que en terminos generales, hablando de temperatura eso ocurrió en un valor ligeramente superior a una temperatura media, es decir la $T_{\text{máxima}}/2$. Comparando las imágenes de la **Figura 4F**, se puede evidenciar cualitativamente, que G destaca respecto a las otras (A, N y S) en preservar mejor su estructura celular si se recuerda la inicial u original (**Figura 4A y Figura 4E**), aunque llama la atención el color naranja intenso que manifiesta. Las epidermis observadas en la **Figura 4A** correspondientes a A, N y S confrontadas al calor

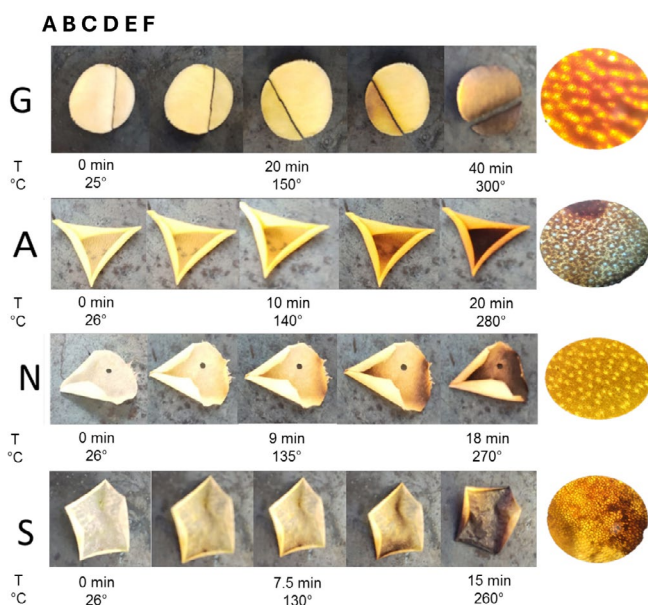


Figura 4. Secuencia fotográfica de la resistencia térmica en las caras externas de las epidermis de G, A, N y S con registros de temperaturas y tiempos en avance. Secuencia en fila de las etapas A-E para G (garambullo), A (agave), N (nopál) y S (sábila). F vista al microscopio 100x para las epidermis en etapa D de cada especie.

Figure 4. Photographic sequence of thermal resistance on the outer faces of the epidermis of G, A, N, and S with temperature and elapsed time logs. Row sequence of stages A-E for G (garambullo), A (agave), N (nopál), and S (sábila). F shows the 100x microscope view for the epidermis of each species at stage D.

durante el ensayo, indistintamente de las condiciones tendieron a enrollarse hacia la cara interna como se puede apreciar en la secuencia de esas fotografías (**Figura 4A-4E**), fenómeno que se enfatiza para A. En tanto, G tuvo por comportamiento el opuesto de curvarse ligeramente hacia la cara externa que hacía contacto con la fuente de calor (superficie de placa de calentamiento) como se presenta desde **4A-4E** para caso G. Las temperaturas máximas y los tiempos transcurridos aparecen en las **Figura 4E** debajo de cada fotografía que muestra la epidermis en el instante de culminación del experimento (denotado por las cenizas negras). G sostuvo la mayor resistencia térmica con temperatura máxima de $292.2667 \pm 18.2511^\circ\text{C}$ y tiempo de 42 minutos, por otra parte las especies A, N y S registraron $268.467 \pm 4.0770^\circ\text{C}$, $273.20 \pm 2.0075^\circ\text{C}$ y $279.2040 \pm 14.0328^\circ\text{C}$ respectivamente; sin embargo, la variable de tiempo fue la que se demostró, con mayor significancia, quedando con menos tiempo para A, de 28 minutos y tiempos aún más cortos para N y S con 26 minutos en ese ensayo.



La forma cuantitativa de presentar los resultados del ensayo por triplicado de resistencia térmica para la epidermis de las especies G, A, N y S son presentados en los gráficos de la **Figura 5A-D**.

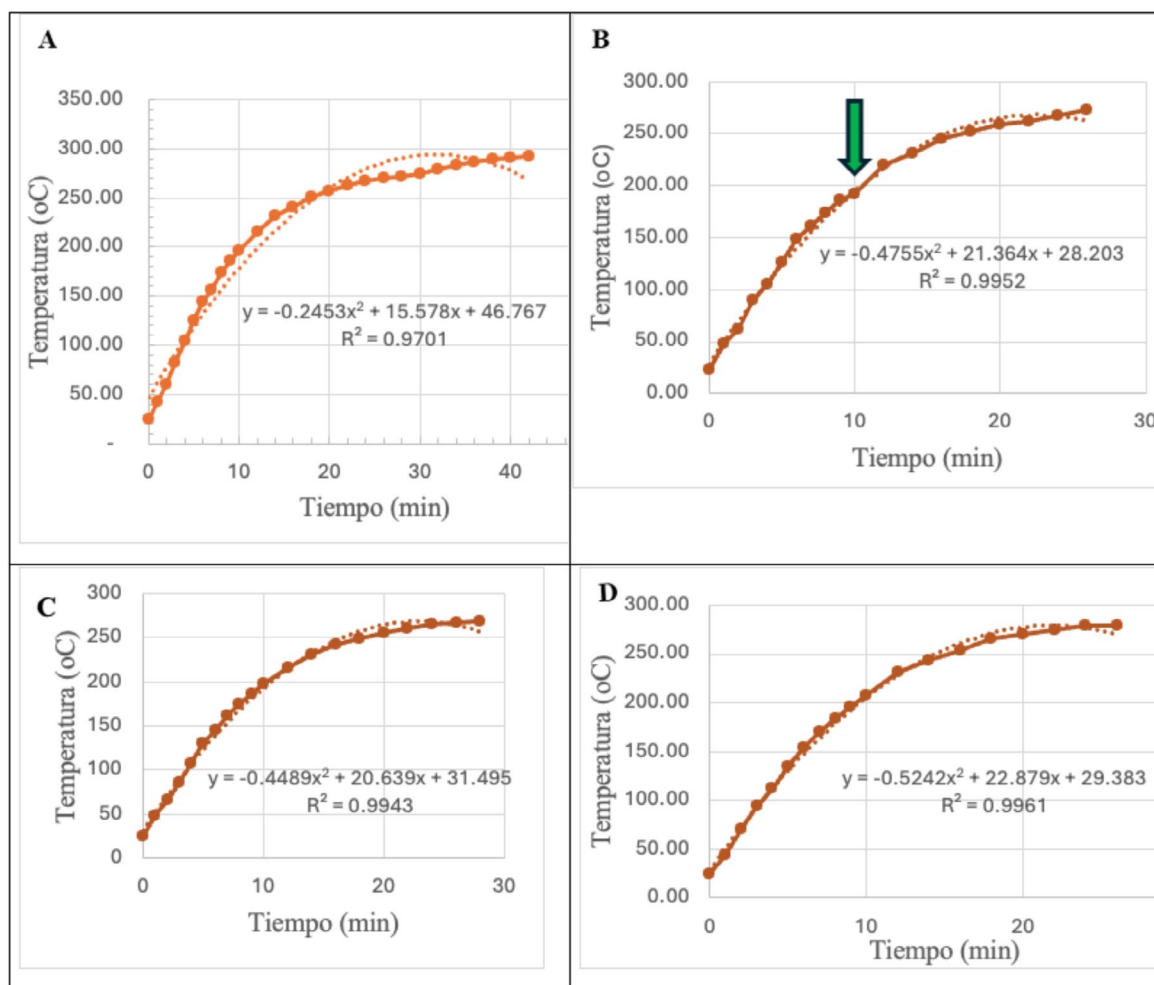


Figura 5. Gráficos de ensayos por triplicado de resistencia térmica para la epidermis de las especies. A) garmbullo, B) Nopal, C) agave y D) sábila. La flecha (à) en 3B indica el punto (coordenadas Tt) de ruptura de estructura en la epidermis siendo más marcado en N.

Figure 5. Thermal resistance plots for the epidermis of the species. A) garmbullo, B) Nopal, C) agave, and D) sábila. The arrow (→) in 3B indicates the point (Tt coordinates) of structural rupture in the epidermis, which is more pronounced in N.

Como observación para los gráficos de la **Figura 5**, se consideraron tiempos mayores para garantizar un mayor registro de datos y con ello realizar ajustes del comportamiento manifestado. Las epidermis de las especies G, A, N y S exhiben, en términos generales, un comportamiento



morfológico similar, tal como se evidencia en las micrografías obtenidas. Para el análisis de los datos, se realizó un ajuste mediante una ecuación de segundo orden. No obstante, destaca en la **Figura 5B** (correspondiente a la especie N) un punto con coordenadas de 191.33 ± 7.41 °C y 10 min; este valor, altamente reproducible en la experimentación, genera una inflexión en la línea de tendencia. Al analizar ese intervalo mediante microscopía óptica (**Figura 3F**), se observaron alteraciones estructurales que sugieren la degradación de celulosa, de acuerdo con lo reportado por Barrera-Calva *et al.* (2021), en su evaluación del calor de combustión de especies semiáridas. Si bien, las observaciones experimentales en las especies G, A y S sugieren la presencia de un fenómeno similar, este es menos pronunciado en sus respectivos gráficos, por lo que su confirmación requiere de estudios complementarios. Por lo tanto, la validación de estos umbrales térmicos y la estabilidad de la cutícula permiten proponer a estas especies como una solución basada en la naturaleza altamente efectiva. Su implementación estratégica en la interfaz urbano-forestal representa una alternativa sostenible para reducir la vulnerabilidad territorial ante los incendios forestales.

Un desafío inherente al uso de las especies nativas evaluadas (*M. geometrizzans*, *A. salmiana* y *O. spinulifera*) es su tasa de crecimiento relativamente lenta en comparación con especies arbustivas o arbóreas exóticas. Sin embargo, desde la perspectiva de las soluciones basadas en la naturaleza (SBN), este atributo biológico se traduce en una mayor persistencia temporal y un requerimiento mínimo de mantenimiento hídrico y operativo. Para mitigar la ventana de vulnerabilidad durante el periodo de establecimiento de estas plantas, se recomienda la implementación de *barreras vivas mixtas*. Este diseño contempla la combinación inicial de herbáceas o arbustivas nativas de rápido crecimiento y baja inflamabilidad que provean protección a corto plazo, mientras que las especies suculentas y cactáceas —con una capacidad superior de resistencia térmica demostrada en este estudio— consolidan la estructura de la barrera permanente a mediano y largo plazo. Asimismo, se propone que, el establecimiento en campo de estas especies se acompañe de la incorporación de abono orgánico en el sustrato de plantación; esta práctica optimiza la retención de la humedad y estimula el desarrollo radicular inicial, acelerando, significativamente, su crecimiento posterior, sin alterar las propiedades ecofisiológicas de resistencia al estrés hídrico. En definitiva, la integración de estos cinturones verdes en zonas con cultivos preexistentes de agave o nopal optimiza los esfuerzos de manejo de combustibles en la región, sin comprometer los tiempos de respuesta comunitaria.

Finalmente, es importante mencionar que para consolidar estos resultados bajo un enfoque de modelación, es imperativo avanzar hacia ensayos de inflamabilidad que impliquen el contacto directo con la llama a temperaturas superiores a los 500 °C. Futuras investigaciones deberán integrar análisis termogravimétricos, la determinación del Índice de Oxígeno Límite (LOI) y la caracterización química detallada de la cutícula. Solo mediante la comprensión de la cinética de combustión y el calor de reacción de estas estructuras, será posible generar modelos predictivos que expliquen la complejidad del proceso de ignición en estas especies.



4. Conclusiones

Los hallazgos de esta investigación evidencian que las propiedades morfofisiológicas de las epidermis aisladas de garambullo, agave, nopal y sábila les otorgan una notable estabilidad térmica bajo las condiciones de estrés calórico controlado evaluadas en laboratorio. A nivel de tejido, destaca el desempeño de la epidermis del garambullo, cuyo grosor (0.65 ± 0.035 mm), densidad (694.34 ± 0.002 g/m²) y dureza ($74.00 \pm 2.944^\circ$) se asociaron con una mayor tolerancia al choque térmico en los ensayos de laboratorio. Estas características tisulares, junto con atributos estructurales como la configuración estomática y bajas densidades de estomas, sugieren un mecanismo eficiente para retrasar la deshidratación celular, lo que fundamenta el interés de estas especies como componentes potenciales para soluciones basadas en la naturaleza (SBN).

No obstante, es imperativo reiterar que los alcances de este trabajo se circunscriben estrictamente a la caracterización microscópica, mecánica y térmica de los tejidos epidérmicos en un entorno experimental controlado. Por lo tanto, la efectividad real de estas especies como barreras vivas cortafuego (green firebreaks) a escala de paisaje no puede concluirse, de forma directa, a partir de estos datos. Este estudio preliminar no evalúa variables macroambientales críticas como la arquitectura tridimensional de la planta completa, la carga de combustible real, la dinámica del contenido de humedad de todo el individuo, ni el comportamiento y propagación del frente de llama *in situ*. A pesar de acotarse a esta primera fase experimental en laboratorio, la caracterización de estos tejidos de las familias Cactaceae, Agavaceae y Asphodelaceae aporta una línea base científica valiosa. Estos resultados justifican el desarrollo de futuras etapas de investigación que incorporen ensayos de inflamabilidad de planta completa y evaluaciones piloto en campo, indispensables para validar la viabilidad operativa y socioecológica de estas especies en la prevención de incendios forestales y la protección de la interfaz urbano-forestal.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado de la Universidad de Guanajuato por el apoyo recibido a través de la CIIC 2025. Se agradece al equipo editorial y las personas revisoras anónimas por las observaciones realizadas que permitieron mejorar el manuscrito.

6. Conflicto de interés

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo, que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos, y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.



7. Referencias

- Armenteras, D., Oliveras, I., Alencar, A., Avila-Angel, V., Meza, F. J., Lavorel, S., & Postigo, J. C. (2021). Fire regimes, Drivers and Impacts in Latin America: From the Amazon to the Andes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(8), 446-454. <https://doi.org/10.1002/fee.2384>
- Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente [AIDA]. (2023). *Incendios forestales en América Latina: Una crisis climática y de derechos humanos en escalada*. AIDA América Latina. <https://aida-americalatina.org/es/publicaciones/incendios-forestales-en-america-latina>
- Ayala-Carrillo, M., Farfán, M., Cárdenas-Nielsen, A., & Lemoine-Rodríguez, R. (2022). Are wildfires in the wildland-urban interface increasing temperatures? A land surface temperature assessment in a semi-arid Mexican city. *Land*, 11(12), 2105. <https://doi.org/10.3390/land11122105>
- Barrera-Calva, E., Martínez, G., Huerta-Arcos, L., Rosas-Cedillo, R., Rentería-Tapia, V., & Hernández-Pérez, C. D. (2021). Maderas de zonas áridas de México, poder calorífico por ATG-ATD y mediante bomba calorimétrica. *Madera y bosques*, 27(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732106>
- Calviño-Cancela, M., Chas-Amil, M. L., García-Martínez, E. D., & Touza, J. (2016). Wildfire risk associated with different vegetation types within and outside wildland-urban interfaces. *Forest Ecology and Management*, 372, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.002>
- Hernández, M., Terrazas, T., Alvarado, A. D. y Luna Cavazos, M. (2007). *Myrtillocactus geometrizans* (Mar. Ex. Pfeiff.) Console (Cactaceae) stomata: variations along its distribution range. *Revista Fitotécnica mexicana*, 30(3), 235-240.
- Hernández-Valencia, R. E. M., López-Franco, R., Benavides-Mendoza, A. (2003). Micromorfología de la epidermis foliar de *Agave tequilana* Weber. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 3(2), 387-396 https://www.researchgate.net/publication/283995003_Micromorphology_of_the_foliar_epidermis_of_Agave_tequilana_Weber
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) are Synthesis Report: Climate Change (2023) Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change), Ginebra, ipcc, 2023. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Jolly, W. M., Cochrane, M. A., Freeborn, P. H., Holden, Z. A., Brown, T. J., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature communications*, 6(1), 7537. <https://www.nature.com/articles/ncomms8537>



- Kunst, L., Jetter, R., y Samuels, L. (2006). Biosynthesis and transport of plants cuticular waxes. En *Biology of the Plant Cuticle*. M. Riederer, C. Müller (eds). Julius-von-Sachs-Institute, für Boiwissenschaften Universität Würzburg, Germany, 182-207
- Pérez España, V. H., Cuervo Parra, J. A., Aparicio Burgos, J. E., Morales Ovando, M. A., Peralta Gil, M., & Romero Cortes, T. (2022). Importancia de la capa cuticular durante la colonización del hongo causante de la negrilla en *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck ssp. *salmiana*. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 13(70), 166-176. <http://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v13i70.1265>
- Pimienta-Barrios E, M Loera, L López-Amezcu. (1993). Estudio anatómico comparativo en colectas del subgénero *Opuntia*. *Agrociencia*, 4:7-19
- Saco, P. M., McDonough, K. R., Rodriguez, J. F., Rivera-Zayas, J., & Sandi, S. G. (2021). The role of soils in the regulation of hazards and extreme events. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1834), 20200178. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0178>
- Sánchez-Urdaneta, A. B., & Suárez-Calleja, E. (2011). Morfo-anatomía de vitroplantas de zábila (*Aloe vera* L. Burm. f.). *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, 28(1), 139-149 https://www.revfacagronluz.org.ve/PDF/suplemento_diciembre_2011/v28sup1a2011pv_139.pdf
- Smith, J. D., Putz, F. E., & Van Holsbeeck, S. (2025). Green Firebreaks: Potential to Proactively Complement Wildfire Management. *Fire*, 8(9), 352. <https://doi.org/10.3390/fire8090352>
- Suh, M. C., Samuels, A. L., Jetter, R., Kunst, L., Pollard, M., Ohlrogge, J., & Beisson, F. (2005). Cuticular lipid composition, surface structure, and gene expression in *Arabidopsis* stem epidermis. *Plant physiology*, 139(4), 1649-1665. <https://doi.org/10.1104/pp.105.070805>
- Tafolla-Arellano, J. C., González-León, A., Tiznado-Hernández, M. E., Zacarías García, L., & Báez-Sañudo, R. (2013). Composition, physiology and biosynthesis of plant cuticle. *Revista fitotecnica mexicana*, 36(1), 3-12. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v36n1/v36n1a1.pdf>
- Taiz, L., y Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal Vol. I*. Castelló de la Plana: Universitat Jaume.
- Thapa, S. B., Jenkins, J. S., & Westerling, A. L. (2023). Perceptions of wildfire management practices in a California wildland-urban interface. *Environmental Advances*, 12, 100382. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100382>
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN] y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA]. (2020). *Soluciones basadas en la Naturaleza para América Latina y el Caribe: Estado de situación, tendencias y oportunidades para los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil*. UICN/PNUMA.
- Vargas-Rodríguez, L., Pérez-Nieto, A., Arroyo-Figueroa, G., Gallegos-Álvarez, M.M., & Flores-Rodríguez, E. (2017). *Cuticle of prickly pear: structure and biological function*. XXVI International Materials Research Congress, August 20-25, Cancún, Mexico.





- Vargas-Rodríguez, L., García-Vieyra, M. I., León-Bata, B. I., & Lozano-Sotomayor, P. (2018).
Propiedades físicas y estructura microscópica de la cutícula de *Agave salmiana* (mixiote).
Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, 17(2), 1-9. <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2017.12.017>
- World Resources Institute [WRI]. (2024). *New data confirms forest fires are intensifying, driven by climate change and land-use practices*. WRI Global Forest Watch. <https://www.wri.org/insights/global-trends-forest-fires>

