

Las hojas fósiles que cuentan el clima perdido de Tlaxcala

Carlos Castañeda Posadas y
Francisco Uriel Belloso Gámez

¿Puede una hoja fósil decirnos cómo era el clima?

¿Puede una hoja fósil revelar cómo era el clima hace millones de años? Aunque parezca sorprendente, la forma y estructura de las hojas conservadas en rocas contienen información clave sobre la temperatura, la humedad y las condiciones ambientales del pasado.

A lo largo de millones de años, el clima de la Tierra ha cambiado de forma recurrente, alternando periodos cálidos y fríos que transformaron los paisajes y condicionaron la evolución de los seres vivos.

A medida que nos remontamos en el tiempo, la evidencia directa sobre variables como la temperatura, la precipitación o la estacionalidad se vuelve cada vez más limitada. Ante este reto, la *paleoclimatología* se encarga de reconstruir climas antiguos a partir de las señales preservadas en rocas, sedimentos y restos biológicos.

Dado que no existen mediciones instrumentales del pasado geológico, esta disciplina se apoya en *proxies*, es decir, indicadores indirectos que conservan información ambiental del momento en que se formaron. Entre ellos se encuentran firmas químicas, estructuras sedimentarias y rasgos biológicos fosilizados. En conjunto, estos indicadores permiten aproximarse a las condiciones climáticas del pasado y comprender la dinámica ambiental de la Tierra a lo largo del tiempo geológico.

Entre todas estas evidencias, las hojas fósiles ocupan un lugar destacado.

Aunque suelen parecer elementos simples, cada hoja constituye un registro directo del ambiente en el que se desarrolló.

Debido a su papel en la fotosíntesis, la transpiración y el intercambio gaseoso, las hojas mantienen una relación estrecha con el clima. Por ello, su forma, tamaño y estructura responden a aspectos como la temperatura, la humedad y la disponibilidad de agua, dejando huellas que pueden preservarse durante millones de años.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es explicar cómo las hojas fósiles permiten reconstruir las condiciones climáticas del pasado, tomando como ejemplo la localidad de San Esteban Tizatlán, en Tlaxcala, durante el Mioceno medio.

La arquitectura foliar de las plantas

El estudio de la *arquitectura foliar* analiza la diversidad de formas que presentan las hojas y su relación con el ambiente donde se desarrollan. Este concepto, propuesto por Hickey (1973), se refiere a características visibles como la forma general de la hoja, los patrones de venación y los tipos de margen. Las hojas presentan una amplia variedad morfológica que refleja adaptaciones a condiciones ambientales específicas. Elementos como el pecíolo —que conecta la hoja con el tallo— y la lámina foliar —que incluye el haz, el envés, los márgenes y las nervaduras—

cumplen funciones esenciales en la captación de luz, el intercambio gaseoso y la regulación del agua (Figura 1).

La variación en estos rasgos no es aleatoria, sino que responde a presiones ambientales.

Por ejemplo, los márgenes dentados suelen asociarse con climas más fríos, mientras que los márgenes enteros predominan en ambientes cálidos y húmedos.

De manera similar, el tamaño de la hoja se relaciona con la disponibilidad de agua, siendo mayor en condiciones húmedas y menor en ambientes más secos. Así, las hojas reflejan su entorno actual, y también pueden utilizarse para reconstruir climas del pasado.

Reconstrucción paleoclimática

Las hojas fósiles constituyen uno de los registros más útiles para reconstruir climas del pasado, por su abundancia en el registro geológico, y porque conservan características morfológicas estrechamente vinculadas con el ambiente en el que se desarrollaron.

A diferencia de otros restos vegetales, las hojas registran de manera directa la interacción entre la planta y variables climáticas como la temperatura, la humedad y la disponibilidad de agua.

En los depósitos sedimentarios, las hojas suelen preservarse como impresiones o compresiones, lo que permite observar con detalle rasgos como la forma del limbo, el tipo de margen, la arquitectura de las nervaduras y el tamaño foliar. Estos atributos no son arbitrarios: responden a presiones ambientales específicas y reflejan estrategias adaptativas de las plantas frente a su entorno. Por esta razón, a través de su análisis se infiere la composición de la vegetación y las condiciones climáticas dominantes.

Al comparar plantas actuales con sus condiciones climáticas, los científicos han encontrado patrones claros: hojas grandes suelen crecer en ambientes húmedos, mientras que hojas pequeñas predominan en zonas más secas. De igual manera, los márgenes dentados se asocian frecuentemente con climas fríos, mientras que los márgenes enteros predominan en regiones cálidas. Estas relaciones permiten usar las hojas como indicadores del clima del pasado.

Una de las ventajas de este enfoque es que no siempre es necesario identificar las hojas a nivel taxonómico para obtener información climática confiable. En muchos casos, basta con analizar su morfología general para reconocer patrones asociados a determinadas condiciones ambientales, lo cual es especialmente útil en conjuntos fósiles donde la preservación o la fragmentación dificultan la identificación precisa.

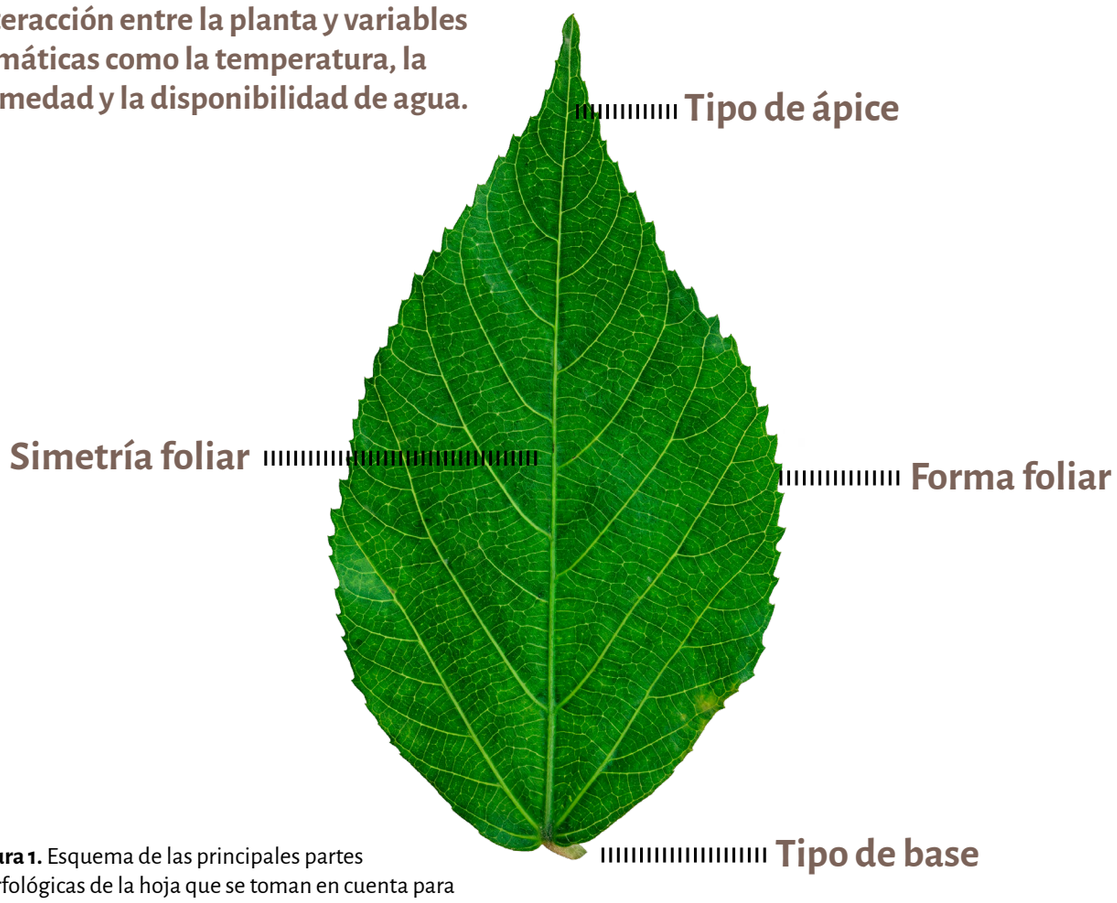


Figura 1. Esquema de las principales partes morfológicas de la hoja que se toman en cuenta para un estudio paleoclimático. Elaboración propia.

A partir de estas relaciones se han desarrollado distintos métodos para estimar parámetros climáticos.

Algunos se enfocan en características específicas, como el tipo de margen foliar, mientras que otros integran múltiples rasgos en análisis multivariados que llevan a estimaciones más completas.

Estos métodos han sido aplicados en numerosas regiones del mundo y han demostrado su capacidad para generar reconstrucciones cuantitativas de variables como la temperatura media anual y la precipitación.

Entre los enfoques más utilizados destacan el análisis del margen foliar (*Leaf Margin Analysis, LMA*) y el método CLAMP *(Climate Leaf Analysis Multivariate Program)*. El LMA se basa en la proporción de hojas con márgenes dentados frente a aquellas con márgenes enteros dentro de un conjunto fósil, aprovechando la relación entre este rasgo y la temperatura. Por su parte, CLAMP considera múltiples características morfológicas —como el tamaño de la hoja, la forma, el tipo de base y ápice, y la relación largo-ancho— para estimar diferentes variables climáticas mediante técnicas estadísticas.

En conjunto, estos enfoques permiten transformar la morfología de las hojas fósiles en información climática cuantificable. Gracias a ello, es posible reconstruir con un alto grado de detalle las condiciones ambientales del pasado y comprender cómo los ecosistemas respondieron a los cambios climáticos a lo largo del tiempo geológico.

¿Cómo se aplica este enfoque?

Para reconstruir el clima del pasado a partir de hojas fósiles es fundamental contar con un conjunto suficientemente representativo de ejemplares bien preservados. En general, se requiere un número mínimo de morfotipos —formas distintas de hojas— para realizar análisis estadísticos confiables.

En este estudio, se utilizó como caso de análisis la localidad de San Esteban Tizatlán, en Tlaxcala, donde el registro fósil ofrece una diversidad adecuada para este tipo de aproximaciones.

El primer paso consiste en describir las hojas fósiles, identificando características como su forma, el tipo de margen, la base, el ápice y los patrones de venación. A partir de estas similitudes, las hojas se agrupan en distintos tipos morfológicos, lo que permite reconocer la diversidad vegetal presente en el conjunto fósil. Posteriormente, se analizan múltiples características de las hojas de manera conjunta.

Esta información se compara con bases de datos de vegetación moderna, en las que se conocen las condiciones climáticas actuales. Con ello, es posible estimar variables como la temperatura media, la precipitación y la estacionalidad. Así, las características visibles de las hojas fósiles se transforman en información cuantitativa sobre el clima del pasado, que lleva a reconstrucciones cada vez más precisas de los antiguos ambientes.



San Esteban Tizatlán: un registro del Mioceno

La localidad fosilífera de San Esteban Tizatlán, en Tlaxcala, constituye un sitio clave para comprender la historia ambiental del centro de México durante el Mioceno medio. Los sedimentos del sitio muestran una alternancia de arenas, limos, arcillas y paleosuelos, posteriormente cubiertos por materiales volcánicos, lo que refleja una historia ambiental compleja (Figura 2).

En estos estratos se han preservado hojas fósiles, peces y vertebrados terrestres, distribuidos a lo largo de una secuencia de más de 12 metros de espesor.

Este registro permite reconstruir episodios sucesivos de inundación, actividad volcánica y estabilidad lacustre.

Mientras que, los estudios paleobotánicos han revelado una flora diversa, con elementos tropicales y subtropicales —como *Guarea*, *Lonchocarpus y Petiveria*— junto con componentes templados como *Quercus y Chamaecrista*. Esta combinación sugiere que la región funcionó como un corredor ecológico donde convergían distintas comunidades vegetales.

¿Cómo era el clima durante el Mioceno?

El análisis de las hojas fósiles indica que durante el Mioceno medio esta región presentaba un clima cálido y húmedo. La predominancia de hojas con márgenes enteros, junto con formas elípticas y ovadas, es consistente con ambientes sin estaciones frías marcadas y con alta disponibilidad de agua.

Las estimaciones sugieren temperaturas cercanas a los 21 °C y precipitaciones abundantes a lo largo del año, lo que corresponde a un régimen templado húmedo.

Este escenario es compatible con la presencia de bosques densos, probablemente de tipo mesófilo, con una estructura compleja y alta diversidad vegetal (Figura 3).

La evidencia sedimentaria también apunta a un sistema lacustre-fluvial, donde el material vegetal era transportado y depositado en ambientes de baja energía, favoreciendo su preservación. La presencia de hojas completas y fragmentadas sugiere tanto aporte local como transporte desde zonas cercanas. En conjunto, estos datos permiten reconstruir un ambiente estable, húmedo y con condiciones favorables para el desarrollo de ecosistemas altamente diversos. Conjuntamente, la información morfológica, climática y sedimentaria apunta a un ambiente estable y húmedo, con alta diversidad vegetal.

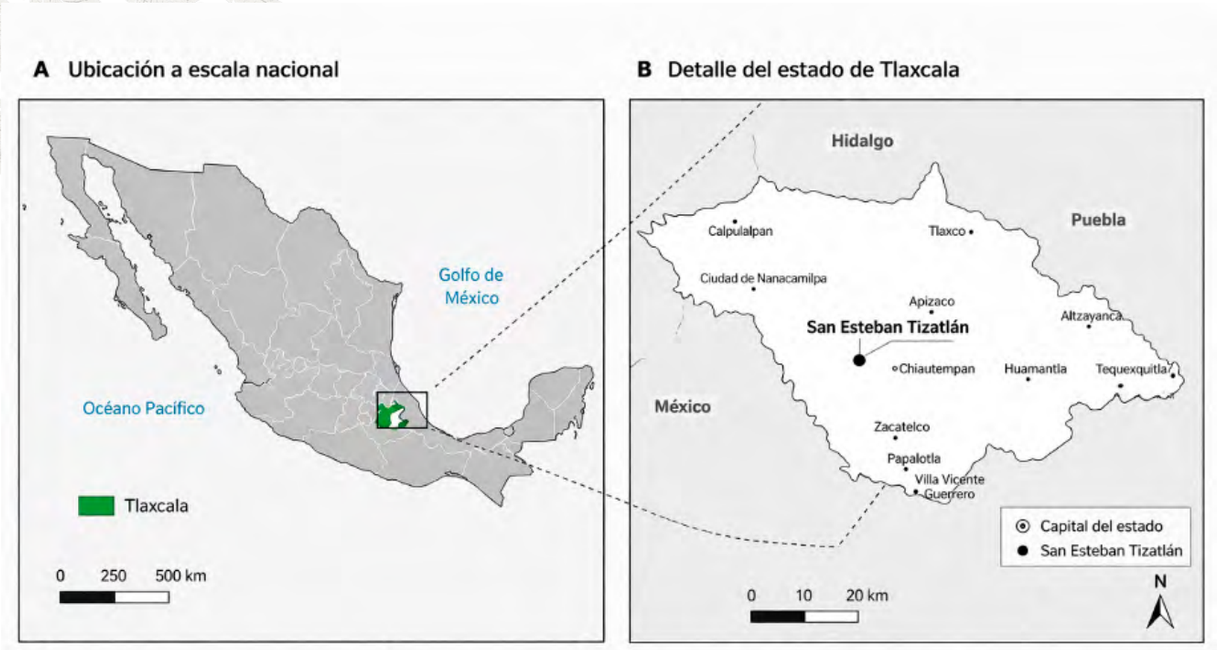


Figura 2. Ubicación geográfica de la localidad de San Esteban Tizatlán, en Tlaxcala, México. (A) Posición del estado de Tlaxcala a escala nacional. (B) Detalle del estado mostrando la ubicación del sitio de estudio.

Conclusiones

Las evidencias obtenidas a partir de las hojas fósiles de San Esteban Tizatlán muestran que, durante el Mioceno medio, el centro de México estuvo caracterizado por un clima cálido y húmedo, con precipitaciones abundantes y sin una estacionalidad marcada. Estas condiciones favorecieron el desarrollo de bosques densos con una composición florística mixta, en la que coexistían elementos tropicales y templados. De esta manera, se demuestra que el análisis de hojas fósiles constituye una herramienta confiable para reconstruir el clima del pasado, tal como se observa en el caso de San Esteban Tizatlán durante el Mioceno medio.

Este escenario también sugiere que la región funcionó como una zona de transición ecológica, reflejando una alta complejidad ambiental y una dinámica vegetal similar a la de algunos ecosistemas actuales. Comprender cómo respondieron los ecosistemas del pasado ante cambios climáticos permite reconstruir la historia ambiental de regiones como Tlaxcala y aporta claves para entender los cambios actuales.

En este sentido, las hojas fósiles se convierten en una herramienta fundamental para interpretar el presente a partir del pasado

Agradecimientos: los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado VIEP-BUAP, por el apoyo para el desarrollo de sus investigaciones.

Lecturas recomendadas

Castañeda Posadas, C., Pérez Lara, D. K. & Cruz, A. (2022). *El registro paleontológico del estado de Tlaxcala*. Editorial BUAP. http://repositorio.buap.mx/rdgp/public/inf_public/2023/1/Registro_Paleontologico_Tlaxcala.pdf

CLAMP Online. (2016). *Climate Leaf Analysis Multivariate Program*. http://clamp.ibcas.ac.cn/clamp_home.html

Guerin, G. R., Wang, H. X. & Lowe, A. J. (2012). Leaf morphology shift linked to climate change. *Biology Letters*, *8*(5), 882-886. https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.0458

Hickey, L. J. (1973). Classification of the architecture of dicotyledonous leaves. *American Journal of Botany*, *60*(1), 17-33. https://doi.org/10.2307/2441319

Yang, J., Spicer, R. A., Spicer, T. E. V. & Li, C. (2011). "CLAMP Online": A new web-based palaeoclimate tool and its application to the terrestrial Paleogene and Neogene of North America. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, *91*(3), 163-183.

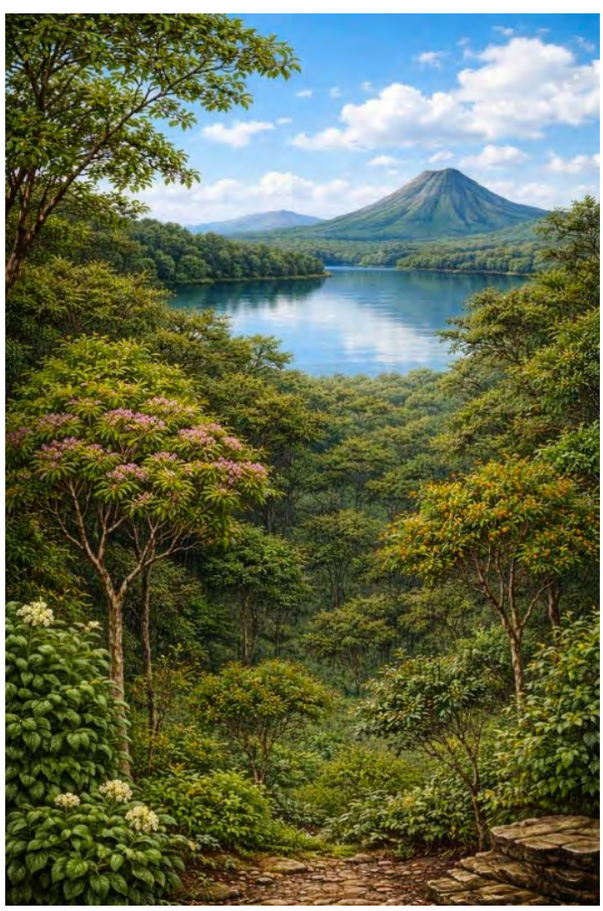


Figura 3. Reconstrucción del paisaje de Tlaxcala durante el Mioceno, dominado por un bosque denso y húmedo asociado a un sistema lacustre.