

## PARTÍCULAS DE CARBÓN COMO INDICADORAS DEL FUEGO EN EL PASADO

Chloe Brynie Ulanie Rosas<sup>1</sup>, Alicia Carrillo-Bastos<sup>2</sup>,  
Claudia González-Salvatierra<sup>3</sup>

### ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

Recibido: 15/10/2024 Aceptado: 20/11/2024

<https://doi.org/10.69823/avacient.v4n2a20>

**Resumen.-** El fuego es una de las principales formas de disturbio que influye en la composición, estructura y distribución de la vegetación. Así mismo, un incendio tiene afectaciones a múltiples niveles de organización biológica, influyendo en las poblaciones, comunidades y ecosistemas. En los últimos años se ha hecho un esfuerzo significativo para entender la dinámica de los incendios en el pasado e identificar los factores clave que juegan un papel importante en un evento de incendio. Durante un incendio se producen partículas de carbón; estas partículas contienen información anatómica de las especies, así como atributos químicos y físicos representativos del ambiente al momento de su depositación. Se han desarrollado técnicas y metodologías para entender el comportamiento del fuego en el pasado para ayudar a establecer mejores prácticas de manejo del fuego en la actualidad. El presente artículo discute sobre los incendios y las partículas de carbón como el principal proxy para entender la historia de los incendios en escalas de tiempo amplias. Adicionalmente, se presentan ejemplos de estudios particularmente para las Américas y el Caribe donde se ha utilizado el análisis de partículas de carbón para reconstruir la historia de los incendios en el pasado.

**Palabras Clave:** fuego, ecosistemas, vegetación, macrocarbones, microcarbones.

## CHARCOAL PARTICLES AS INDICATORS OF PAST FIRES

**Abstract.-** Fire is an important form of disturbance that influences the composition, structure, and distribution of vegetation. Additionally, fire has effects at multiple biological levels, influencing populations, communities, and ecosystems. In the last years, significant efforts have been made to understand past fire dynamics and to identify key factors that play an important role in forest fires. During a fire, charcoal particles are produced, and these contain anatomic information of species as well as chemical and physical attributes of the environment at the time of deposition. New techniques and methods have been developed to understand past fire behavior to aid in establishing better fire management practices. This paper reviews fire and charcoal particles, the latter being the most important existing proxy for reconstructing fire history at large time scales. Additionally, we briefly present case studies, particularly for the Americas and Caribbean region, that have used charcoal analysis for past fire reconstruction.

**Keywords:** Fire, ecosystems, vegetation, macrocharcoal, microcharcoal.

### Introducción

El fuego es un componente natural en la mayoría de los ecosistemas y tiene repercusiones a largo plazo e influencia en la dinámica de incendios, biodiversidad, ciclos biogeoquímicos y balance de energía (Marlon et al., 2016; Blarquez et al, 2018; McLauchlan et al, 2020; Wu et al., 2021). Así mismo, un incendio tiene afectaciones a múltiples niveles de organización biológica influyendo en la población, comunidad y ecosistemas. En la actualidad los avances en el estudio de los incendios reflejan un cambio en el paradigma del fuego como una fuerza destructiva a un proceso fundamental que influye la mayoría de los ecosistemas terrestres con consecuencias evolutivas (McLauchlan et al. 2020). El fuego es una parte integral del sistema terrestre, cada día, en algún lugar del planeta ocurre un incendio forestal con consecuencias ecológicas, económicas y pérdidas de vidas humanas (Scott 2000; Jolly et al. 2015).

Mientras algunos de estos incendios son provocados por el hombre, varios son verdaderamente naturales provocados por un relámpago (Scott 2000). De acuerdo con Pausas y Keeley (2021) la ocurrencia de los incendios forestales en los ecosistemas requiere de la confluencia de al menos cuatro factores: fuente de ignición, la presencia de combustible

---

<sup>1</sup>Estudiante del Doctorado en Ciencias Ambientales, Tecnológico Nacional de México / I.T. de Chetumal. <https://orcid.org/0000-0002-0688-3778> chloerosas01@gmail.com.

<sup>2</sup>Profesor de Tiempo Completo. Tecnológico Nacional de México / I.T. de Chetumal, <https://orcid.org/0000-0002-8828-5869> alicia.cb@chetumal.tecnm.mx (**Autor corresponsal**).

<sup>3</sup> Investigador por México, CONHACYT y profesora de tiempo completo, Tecnológico Nacional de México / I.T. de Chetumal. <https://orcid.org/0000-0002-1667-4320> claudia.gs@chetumal.tecnm.mx.

de manera continua, sequía y las condiciones ambientales apropiadas (viento, altas temperaturas y baja humedad). Los incendios forestales resultan del nexo de estos factores, los cuales puede ser potencialmente afectados por cambios globales. Tener el conocimiento de la historia del fuego en el pasado nos proporciona una visión de las condiciones ambientales pasadas, tales como periodos de variabilidad y cambio climático (Graves et al 2019).

El carbón ocurre predominantemente como un producto de los incendios forestales (Scott 2010). El carbón contiene información anatómica de la especie y sobre atributos químicos y físicos representativo del ambiente al momento de su formación. El hallazgo más temprano de carbón pueden ser trasado hace 400 millones de años atrás, después del establecimiento de las plantas en la tierra en el Silúrico (Li et al. 2022). Para desbloquear el conocimiento sobre la dinámica de incendios a largo plazo, la preservación de las partículas de carbón debe de ocurrir en un ambiente de depositación como lagunas y tuberías. Las lagunas actúan como un depósito de sedimentos al acumular y almacenar material orgánico e inorgánico, haciéndolos el sitio adecuado para los estudios paleoambientales (Conedera et al. 2009; Graves et al. 2021).

Entre el material orgánico se encuentran las partículas de carbón vegetal las cuales son producto de la combustión incompleta de la materia orgánica que normalmente ocurre a temperaturas entre 280 y 500°C (Whitlock y Larsen 2001; Scott 2010; Feurdean 2021). Al iniciarse un incendio ya sea por causas naturales o antropogénicas, la vegetación está sujeta a altas temperaturas que provocan la descomposición de la celulosa dentro del tejido vegetal. Este proceso genera gases altamente volátiles, incluyendo monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano, que una vez liberados se mezclan con el oxígeno presente en el ambiente y se quema. Esta reacción produce calor y se lleva a cabo un incendio. Dentro del tejido vegetal existe una parte superficial carbonizada, el calor del incendio penetra el tejido vegetal donde hay poco o nulo oxígeno. A esta reacción se le conoce como pirólisis. Si esta reacción se detiene antes de la combustión se producen partículas de carbón como residuo (Patterson et al. 1987; Scott 2010). Los residuos de la combustión incompleta tal como el carbón comúnmente son referidos como carbón negro (Black Carbon). El carbón negro es una mezcla heterogénea de residuos que posee una composición química contrastante y por ello es resistente a degradación biológica o química (Forbes et al. 2006). La estructura química aromática condensada del carbón permite que estas persistan en el suelo y registros sedimentarios a lo largo de una escala de tiempo milenaria (Eckmeier et al. 2007; Mooney y Tinner 2011).

La dispersión después de un incendio permite que las partículas de carbón se depositen en cuerpos de agua y tuberías, iniciando así la preservación de la información en el ensamblaje de carbón fósil que puede ser analizado para reconstruir la historia de un incendio para un sitio en específico (Conedera et al. 2009). Las partículas de carbón de igual manera flotan por un tiempo considerable (horas, días o semanas) antes de depositarse y es por ello que éste pueda ser transportado a largas distancias antes de ser depositado e incorporado al sedimento (Scott 2010). El carbón posee dos características fundamentales: la anatomía de la planta es preservada en piezas que no pasan de algunas micras en tamaño permitiendo su identificación taxonómica (Scott 2000) y es relativamente inerte (Scott 2010). Las partículas de carbón vegetal son de color negro, con una iridiscencia, opaco, frágil y angular con una apariencia alargada prismática que posiblemente podrían exhibir algunas estructuras celulares (Patterson et al. 1987; Mooney y Tinner 2011; Scott 2010). Todos los órganos de la planta pueden ser preservados como carbón incluyendo las hojas y órganos reproductivos tal como las flores. Utilizando las características mencionadas anteriormente, en la actualidad se han llevado a cabo estudios para desarrollar un sistema de clasificación de los morfotipos con el propósito de inferir incluso el tipo o especie vegetal quemada y de esta manera poder inferir el tipo de fuente de combustible (fuel type) (Jensen et al. 2007; Feurdean 2021; Torres Rodríguez et al. 2022). De acuerdo con los trabajos mencionados los autores clasifican las partículas de carbón en morfotipos. Los morfotipos propuestos por Torres Rodríguez et al. (2022) los clasifica de manera más organizada y en grandes grupos. A continuación, se presentan de manera general los grupos propuestos por Torres Rodríguez y colaboradores (2022).

#### Tipos de partículas de carbón

Tipo madera: normalmente son como pequeños bloques y cuadrulares, lignificado con foliaciones. Pueden ser identificadas por su brillo y grosor, y su estructura en capas prismática. De acuerdo con Torres Rodríguez et al (2022) describen este morfotipo como poligonal con textura lisa o estriada, con una apariencia de bloque rectangular.

Tipo graminoide: son de tipo planas, rectangulares y alargadas la superficie puede exhibir células epidérmicas, reticulares o patrón en forma de malla (Torres Rodríguez et al. 2022). De igual manera pueden aparecer sin características particulares, como largos y delgados filamentos, que al ponerles presión se quiebran paralelo a los ejes

largos. Este grupo incluye las cutículas de las poaceas, pero de igual manera pueden derivar de monocotiledóneas como las ciperáceas (Feurdean, 2022).

Tipo hoja: Presentan una forma poliédrica y la superficie es más reflectiva que los morfotipos anteriores (Umbanhowar y McGrath, 1998) que de acuerdo con Enache y Cumming (2006) posiblemente podría reflejar un incendio intenso de tipo corona. Normalmente, este tipo de morfotipo proviene de plantas herbáceas y helechos. Las hojas caducifolias presentan un patrón de malla reticular (Mustaphi, y Pisaric 2014; Torres Rodríguez et al. 2022).

Morfotipo herbáceo: se originan de plantas herbáceas excepto poaceas, este tipo son muy alargadas, con delgados filamentos parecido al cabello, pero de igual manera puede no presentar características o puede presentar huecos (Torres Rodríguez et al. 2012).

Morfotipo de múltiples orígenes: Son caracterizados por ser elongados con características complejas (segmentados, con extensiones ramificadas y ramificado) de igual manera por partículas irregulares y redondas (Torres Rodríguez et al. 2012).

A partir de los trabajos pioneros de Iversen (1941) en el cual él observó en láminas de polen micro partículas de carbón, desde entonces se ha utilizado el carbón como proxy de incendio (Patterson et al. 1987; Conedera et al. 2009; Mooney y Tinner 2011). El análisis de partículas de carbón en el sedimento es utilizado para reconstruir variaciones a largo plazo en la actividad de un incendio que complementan y extienden la reconstrucción proporcionada por los registros dendrocronológicos y registros históricos (Whitlock y Larsen, 2001). El carbón fósil almacenado en el sedimento cubre una escala espacial amplia de local a global y temporal de décadas a millones de años (Marlon et al. 2016). El análisis de partículas de carbón cuantifica la acumulación de las partículas carbonizadas en el sedimento durante y después de un evento de incendio (Whitlock y Larsen 2001).

Las partículas de carbón pueden tener un origen, local (cerca del cuerpo de agua), extra local, regional, continental o incluso global dependiendo de la dispersión (tamaño de la partícula) transporte, y condiciones de depositación (tamaño del cuerpo de agua) (Conedera et al. 2009). Las partículas de carbón pueden variar en tamaño de sub o micropartículas a macropartículas, bajo el supuesto que las micropartículas son transportadas a distancias más lejanas por el viento y agua que las macropartículas. Las partículas pequeñas llamadas micropartículas tienen un tamaño  $<100 \mu\text{m}$  y las macropartículas  $>125 \mu\text{m}$  (Whitlock y Larsen 2001). Scott (2010) menciona que, en un incendio forestal, las micro partículas de carbón son formadas durante los incendios de tipo superficie y de copa que posteriormente son transportado por la columna de humo. No obstante, las partículas son muy pequeñas para su identificación taxonómica. Por el contrario, las macro partículas de carbón son producidas durante los incendios de tipo superficial que consumen la cobertura del suelo y hojarasca.

¿Cómo se analizan las muestras de partículas carbonizadas?

Durante los últimos años se han desarrollado grandes avances en el entendimiento de la producción, dispersión y depositación de micro y macro partículas de carbón, de igual manera se han desarrollado métodos cuantitativos y técnicas para entender los registros sedimentarios de carbón.

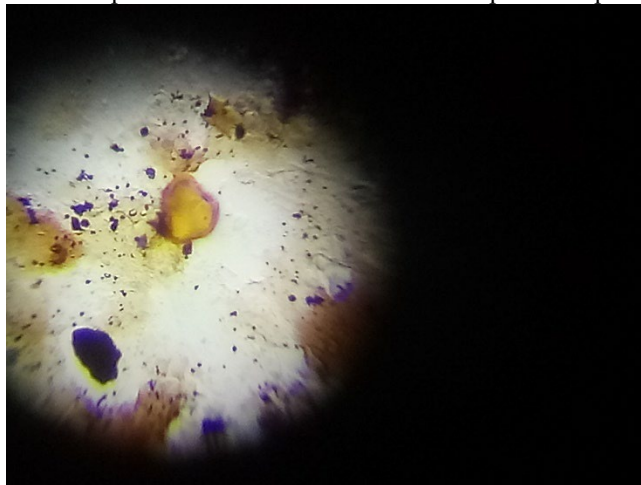
Las muestras para micropartículas de carbón son cuantificadas junto con láminas de polen fósil las cuales son preparadas de acuerdo con las técnicas estándares palinológicas (fig. 1) (para más detalles ver Faegri e Iversen 1989), las cuales incluyen varios procedimientos químicos y físicos (Conedera et al. 2009). Las muestras son tratadas con hidróxido de potasio (KOH) para remover ácidos húmicos y posteriormente con ácido clorhídrico para remover carbonatos para finalmente ser fijadas. Los datos son presentados como abundancia o área, las cuales son convertidas en tasa de acumulación al dividir la concentración de carbón por la tasa de depositación ( $\text{yr cm}^{-1}$ ) (Whitlock y Larsen, 2001).

En la actualidad, el análisis estadístico de micropartículas de carbón está basado generalmente en la inspección visual, el cual es preciso en identificar los micro carbones, pero requiere de mucho tiempo. En los últimos años se han desarrollado distintos métodos para agilizar el procesamiento de las muestras. El área puede ser calculada a partir de talla de clases, conteo de puntos o técnicas de imagen computarizadas.

Por otra parte, las macropartículas de carbón son obtenidas mediante la técnica de “tamiz” (wet sieved method) (Mooney y Tinner, 2011). Las muestras son analizadas de manera continua a lo largo del sedimento generalmente son

de 1 cm de grosor. Las muestras de sedimento son tratadas con peróxido de hidrogeno para degradar la materia orgánica, dejando expuesto el carbón. Las muestras son pasadas en una malla de 125  $\mu\text{m}$  y las fracciones  $>125 \mu\text{m}$  son guardadas, secadas y colocadas en cajas de Petri para posteriormente ser cuantificadas (fig. 2) (para una descripción detallada del procedimiento ver Stevenson y Haberle 2005; procedimiento disponible del Centro de investigación de Limnología de la universidad de Minnesota- <http://lrc.geo.umn.edu/laccore/procedures.html>). La enumeración en el caso de las macropartículas se basa en el conteo simple de las partículas con tamaño  $>125\mu\text{m}$  o área con el uso de un estereoscopio (Whitlock y Larsen 2001; Conedera et al. 2009).

Figura 1. Micropartículas de carbón observadas en placas de polen fósil.



Nota. Fotografía tomada por Rosas Chloe.

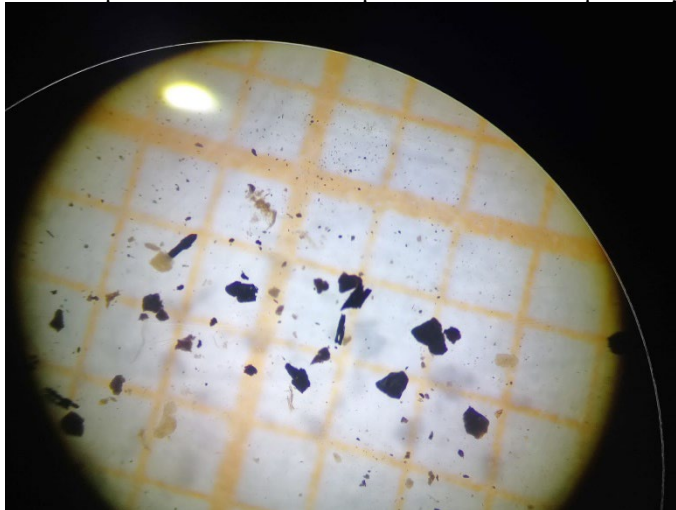
El análisis es un conjunto de diagnóstico y herramientas analíticas diseñadas para analizar los registros sedimentarios de carbón cuando el objetivo es detectar los picos para poder realizar una reconstrucción local de la historia de un incendio. El análisis se basa en un enfoque ampliamente utilizado en el cual descompone el registro de carbón en dos componentes de frecuencia alta (pico) y baja (fondo) para posteriormente aislar los picos (Higuera et al. 2007; Kelly et al. 2011). El termino fondo se refiere tanto a los procesos ecológicos como físicos que pueden causar variaciones bajas en la tasa de sedimentación del carbón. Por otro lado, se asume que las frecuencias altas o picos representan el depósito primario de un incendio local. Para separar la señal de un incendio local del ruido o fondo, un valor umbral es determinado por varios métodos matemáticos y las muestra que superan el valor umbral son interpretadas como un episodio de incendio (Kelly et al. 2011).

#### Actividad de incendios en la región del neotrópico

Entender la conexión que existe entre el cambio climático en el pasado y la dinámica de incendios en la región del Neotrópico es el mayor reto de investigación internacional debido a la importancia que tienen los ecosistemas tropicales a los cambios climáticos globales (Power et al. 2010). De acuerdo con Jolly et al. (2015) en los últimos 35 años las selvas tropicales y subtropicales de Sudamérica tales como pastizales y sabanas han experimentado un cambio tremendo en la duración de la temporada de incendios, con un incremento de 33 días. Es por ello la importancia de llevar a cabo este tipo de estudios para entender las interacciones en el pasado entre el clima, los incendios y la vegetación, la evolución de los ecosistemas, la interacción entre los humanos con el ambiente y futuros riesgos que informen y ayuden en las pólizas y en la toma de decisiones (Mustaphi y Pisaric, 2014).

A partir de los registros de partículas de carbón en el Neotrópico se ha podido detectar un aumento significativo en la actividad de incendios relacionados con la agricultura, la cual estaba asociada al desmonte de la selva durante el Holoceno tardío (Dull et al. 2010; Avnery et al. 2011; Aragón Moreno et al. 2012; Schüpbach et al. 2015). Aragón Moreno et al (2012) alrededor de 5400 a.C. registra altos niveles de carbón junto con la presencia de maíz (*Zea mays*) lo cual evidencia la presencia de actividades agrícolas en las costas norte de la Península de Yucatán. De igual manera, Anderson y Wahl (2015) registran picos de carbón y la disminución de especies de selva junto con la aparición del polen del maíz alrededor de 4600 para la región del Petén, Guatemala. Anchukaitis y Horn (2005) reportan para el Pacífico sur de Costa Rica, en un registro de 2000 años, que las alteraciones en la selva fueron relativamente pocas sino hasta alrededor de 3350 a.C. cuando se registra un aumento drástico en los porcentajes de carbón junto con el registro del polen de maíz, los cuales se mantuvieron altos hasta 2490 a.C.

Figura 2. Macropartículas de carbón después de tratamiento químico y físico.



Nota. Fotografía tomada por Rosas Chloe.

No obstante, los registros coinciden o registran una disminución significativa de los incendios después 1500 d.C para esta región. Avnery y colaboradores (2011) reportan una disminución significativa de las macropartículas de carbón después de 1400 d.C en Nicaragua, lo cual coincide con los reportados por otros autores por ejemplo Wu y Porinchi (2019), quien reporta un evento de poca o casi nula actividad de incendios entre 1200–1800 d.C para Costa Rica, mientras Rushton et al. (2012) para Belice reporta una recuperación de la selva alrededor de 1400 a.C, junto con la ausencia de cultivos y bajas concentraciones de partículas de carbón sugiriendo el cese de las actividades antropogénicas en el área. En Costa Rica Anchukaitis y Horn (2005) registra una disminución en la actividad de incendios después de 1420 d.C. cuando cesan las actividades agrícolas en la zona.

Por otra parte, uno de los principales enfoques de investigación ha sido conocer los forzamientos climáticos que desencadenan los incendios forestales. Marlon et al. (2008) reporta que el cambio climático ha sido el factor principal en la quema de biomasa. Así mismo, se han hecho revisiones y síntesis de los registros de incendios en la región neotropical para tener una perspectiva regional en los cuales han observado que la disminución en el patrón de carbón fue consistente con los patrones globales de incendios que probablemente provocado por el enfriamiento de la Pequeña Edad de Hielo (PEH) (Marlon et al. 2008; Dull 2010, Power et al. 2010). Power et al. (2010) concluye que para los últimos 21,000 años en la región de las Américas la actividad de incendios está asociado con los periodos de alta variabilidad climática, incluyendo cambios en el balance de humedad y la intensificación de las sequías estacionales.

#### Conclusiones

Los ecólogos perciben el fuego como una fuerza dinámica ecológica que tiene y ha tenido consecuencias evolutivas. El objetivo de entender la ecología de un incendio es entender las diversas maneras en las que el fuego afecta a los organismos y los ecosistemas en la tierra. Es importante establecer técnicas y métodos de muestreo, análisis e interpretación que sean uniformes y confiables para poder obtener información correcta de los incendios. El conocimiento de la historia de incendios ha cobrado importancia por el futuro cambio climático sin precedentes y sus posibles consecuencias en el régimen y dinámica de los incendios, notablemente en la frecuencia, tamaño y severidad de los incendios.

Los eventos descritos anteriormente son ejemplo de cómo se ha empleado las partículas de carbón como indicadores de cambios en la historia de incendios. Los estudios muestran que las macropartículas de carbón es el método más empleado para realizar una reconstrucción a nivel local. Mediante las partículas de carbón se ha podido inferir los periodos con mayores eventos de incendios, cambios en el régimen de incendios, la presencia de actividades agrícolas y los forzamientos climáticos asociados a los incendios. En los últimos años, ha existido un avance importante en los estudios de incendios para la región del neotrópico, no obstante, se requiere incrementar los registros que nos permitan entender el comportamiento de los incendios a escala local.



## Referencias bibliográficas

- Aragón-Moreno Alejandro A. Islebe GA, Torrescano-Valle N. (2012). A ~ 3800-yr, high-resolution record of vegetation and climate change on the north coast of the Yucatan Peninsula. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 178:35–42. doi: 10.1016/j.revpalbo.2012.04.002.
- Anchukaitis Kevin J., Sally P. Horn, (2005). A 2000-year reconstruction of forest disturbance from southern Pacific Costa Rica, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 221(1-2), 35-54, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.02.003>.
- Avnery, S., Dull, R. A., & Keitt, T. H. (2011). Human versus climatic influences on late-Holocene fire regimes in southwestern Nicaragua. *The Holocene*, 21(4), 699-706. <https://doi.org/10.1177/0959683610391314>
- Blarquez Olivier, Julie Talbot, Jordan Paillard, Lyna Lapointe-Elmrabti, Nicolas Pelletier, Christian Gates St-Pierre. (2018). Late Holocene influence of societies on the fire regime in southern Québec temperate forests, *Quaternary Science Reviews*, 180, 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.022>.
- Conedera, M., Tinner, W., Neff, C., Meurer, M., Dickens, A. F., & Krebs, P. (2009). Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quaternary Science Reviews*, 28(5-6), 555–576. doi:10.1016/j.quascirev.2008.11.005
- Dull Robert A. (2004). An 8000-year record of vegetation, climate, and human disturbance from the Sierra de Apaneca, El Salvador. , 61(2), 159–167. doi:10.1016/j.yqres.2004.01.002
- Dull, Robert A.; Nevle, Richard J.; Woods, William I.; Bird, Dennis K.; Avnery, Shiri; Denevan, William M. (2010). The Columbian Encounter and the Little Ice Age: Abrupt Land Use Change, Fire, and Greenhouse Forcing. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(4), 755–771. doi:10.1080/00045608.2010.502432
- Eckmeier, E., Gerlach, R., Skjemstad, J.O., Ehrmann, O., Schmidt, M.W.I., 2007a. Only small changes in soil organic carbon and charcoal found one year after experimental slash and-burn in a temperate deciduous forest. *Biogeosciences* 4, 377–383. doi:10.5194/bgd-4-595-2007
- Enache Mihaela D. ; Brian F. Cumming (2006). Tracking recorded fires using charcoal morphology from the sedimentary sequence of Prosser Lake, British Columbia (Canada). , 65(2), 282–292. doi:10.1016/j.yqres.2005.09.003
- Faegri, K., Iversen, J. (1989). In: Faegri, K., Kaland, P.E., Krzywinski, K. (Eds.). *Textbook of pollen analysis*. 4th ed. John Wiley, Chichester
- Feurdean, Angelica. (2021). Experimental production of charcoal morphologies to discriminate fuel source and fire type: an example from Siberian taiga. *Biogeosciences*. 18. 3805-3821. 10.5194/bg-18-3805-2021.
- Feurdean, A., (2021). Experimental Production of Charcoal Morphologies to Discriminate Fuel Source and Fire Type in the Siberian Taiga. *Biogeosciences Discussion*. <https://doi.org/10.5194/bg-2021-1>.
- Figueroa-Rangel, B. L.; Willis, K. J.; Olvera-Vargas, M. (2012). Late-Holocene successional dynamics in a transitional forest of west-central Mexico. *The Holocene*, 22(2), 143–153. doi:10.1177/0959683611414929
- Forbes, M.S., Raison, R.J., Skjemstad, J.O., 2006. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment* 370, 190–296. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.06.007
- Graves, B. P., Ralph, T. J., Hesse, P. P., Westaway, K. E., Kobayashi, T., Gadd, P. S., & Mazumder, D. (2019). Macro-charcoal accumulation in floodplain wetlands: Problems and prospects for reconstruction of fire regimes and environmental conditions. *PLOS ONE*, 14(10), e0224011. doi:10.1371/journal.pone.0224011
- Graves, Bradley P.; Ralph, Timothy J.; Hesse, Paul P.; Westaway, Kira E.; Kobayashi, Tsuyoshi; Gadd, Patricia S.; Mazumder, Debashish; Regattieri, Eleonora (2019). Macro-charcoal accumulation in floodplain wetlands: Problems and prospects for reconstruction of fire regimes and environmental conditions. *PLOS ONE*, 14(10), e0224011–. doi:10.1371/journal.pone.0224011
- Higuera Philip E.; Matthew E. Peters; Linda B. Brubaker; Daniel G. Gavin (2007). Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model., 26(13-14), 0–1809. doi:10.1016/j.quascirev.2007.03.010
- Iversen J (1941) Land occupation in Denmark's stone age. *Danm Geol Unders* II 66:1–68
- Jensen, K.; Lynch, E. A.; Calcote, R.; Hotchkiss, S. C. (2007). Interpretation of charcoal morphotypes in sediments from Ferry Lake, Wisconsin, USA: do different plant fuel sources produce distinctive charcoal morphotypes?. *The Holocene*, 17(7), 907–915. doi:10.1177/0959683607082405
- Jolly, W. Matt; Cochrane, Mark A.; Freeborn, Patrick H.; Holden, Zachary A.; Brown, Timothy J.; Williamson, Grant J.; Bowman, David M. J. S. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6(), 7537–. doi:10.1038/ncomms8537
- Kelly Ryan F.; Philip E. Higuera; Carolyn M. Barrett; Feng Sheng Hu (2011). A signal-to-noise index to quantify the potential for peak detection in sediment–charcoal records. 75(1), 11–17. doi:10.1016/j.yqres.2010.07.011

- Li Gang, Linlin Gao, Fengwen Liu, Menghan Qiu, Guanghui Dong, (2022). Quantitative studies on charcoalfication: Physical and chemical changes of charring wood, *Fundamental Research*, <https://doi.org/10.1016/j.fmr.2022.05.014>
- Marlon, J. R.; Bartlein, P. J.; Carcaillet, C.; Gavin, D. G.; Harrison, S. P.; Higuera, P. E.; Joos, F.; Power, M. J.; Prentice, I. C. (2008). Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. *Nature Geoscience*, 1(10), 697–702. doi:10.1038/ngeo313
- Marlon, J. R., Kelly, R., Daniiau, A.-L., Vanni re, B., Power, M. J., Bartlein, P., ... Zhihai, T. (2016). Reconstructions of biomass burning from sediment-charcoal records to improve data–model comparisons. *Biogeosciences*, 13(11), 3225–3244. doi:10.5194/bg-13-3225-2016
- McLauchlan, K. K., Higuera, P. E., Miesel, J., Rogers, B. M., Schweitzer, J., Shuman, J. K., ... Watts, A. C. (2020). Fire as a fundamental ecological process: research advances and frontiers. *Journal of Ecology*. doi:10.1111/1365-2745.13403
- Mooney SD, Tinner W. (2011). The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *International Mire Conservation Group and International Peat Society*. 7(9). ISSN 1819-745X
- Mustaphi, C. J. C.; Pisaric, M. F. J. (2014). A classification for macroscopic charcoal morphologies found in Holocene lacustrine sediments. *Progress in Physical Geography*, 38(6), 734–754. doi:10.1177/0309133314548886
- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2021). Wildfires and global change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(7), 387–395. doi:10.1002/fee.2359
- Patterson, W. A., Edwards, K. J., & Maguire, D. J. (1987). Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire. *Quaternary Science Reviews*, 6(1), 3–23. doi:10.1016/0277-3791(87)90012-6
- Power MJ, Bush M, Behling H, Horn S, Mayle F, Urrego D. (2010). Paleofire activity in tropical America during the last 21 ka: A regional synthesis based on sedimentary charcoal. *PAGES news*. 18(2):73–75. doi:10.22498/pages.18.2.73.
- Rushton EA, Metcalfe SE, Whitney BS. (2012). A late-Holocene vegetation history from the Maya lowlands, Lamanai, Northern Belize. *The Holocene*. 23(4):485–493. doi:10.1177/0959683612465449.
- Sch ubach S, Kirchgorg T, Colombaroli D, Beffa G, Radaelli M, Kehrwald NM, Barbante C. (2015). Combining charcoal sediment and molecular markers to infer a Holocene fire history in the Maya Lowlands of Pet n, Guatemala. *Quaternary Science Reviews*. 115:123–131. doi: 10.1016/j.quascirev.2015.03.004.
- Scott, A. . (2000). The Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164(1-4), 281–329. doi:10.1016/s0031-0182(00)00192-9
- Scott, A. (2010). Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(1-2), 11–39. doi:10.1016/j.palaeo.2009.12.012
- Torres-Rodr guez Esperanza, Blanca L. Figueroa-Rangel, Socorro Lozano-Garc a, Beatriz Ortega-Guerrero, Margarita Caballero-Miranda, Alonso Herrejon-Serrano. (2022). Charcoal morphotypes and potential fuel types from a Mexican lake during MIS 5a and MIS 3, *Journal of South American Earth Sciences*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103724>.
- Umbanhowar Jr., C.E.; McGrath, M.J. (1998). Experimental production and analysis of microscopic charcoal from wood, leaves and grasses. *The Holocene*, 8(3), 341–346. doi:10.1191/095968398666496051
- Whitlock C, Larsen C. Charcoal as a Fire Proxy.(2001). In: Smol JP, Birks HJB, Last WM, Bradley RS, Alverson K, editors. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Dordrecht: Springer Netherlands; p. 75–97.
- Wu J, Porinchu DF. (2019). A high-resolution sedimentary charcoal- and geochemistry-based reconstruction of late Holocene fire regimes in the p ramo of Chirrip  National Park, Costa Rica. *Quat res*. 93:314–329. doi:10.1017/qua.2019.64.
- Wu Chao, Sergey Venevsky, Stephen Sitch, Lina M. Mercado, Chris Huntingford, A. Carla Staver. (2021). Historical and future global burned area with changing climate and human demography. *One Earth*, 4(4), 517-530. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.03.002>.



<https://doi.org/10.69823/avacient.v4n2a20>  
<http://avacient.chetumal.tecnm.mx/index.php/revista>  
<https://www.facebook.com/avacient>