

GÉNESIS DE LOS INCENDIOS FORESTALES

ENSAYO

GENESIS OF FOREST FIRES

Dante A. Rodríguez-Trejo

División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5, Carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México.

Correo-e: dantarturo@yahoo.com

RESUMEN

Recibido: 13 de diciembre de 2011
Aceptado: 10 de julio de 2012
doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.12.091
<http://www.chapingo.mx/revistas>

Hace casi 470 millones de años, durante el periodo Silúrico, comenzaron los incendios forestales en el planeta. La actividad de los incendios ha experimentado altas y bajas en la historia de la Tierra, principalmente relacionadas con cambios en la concentración de oxígeno atmosférico y los niveles de humedad que han caracterizado la evolución del clima. La presencia de los incendios ha tenido picos en el Carbonífero, Jurásico y el Cretácico, así como en el Cuaternario, en particular luego de la aparición del hombre. Las primeras adaptaciones al fuego se remontan casi al mismo tiempo en que las plantas colonizaron la superficie terrestre. Con la separación de la Pangea, en el Triásico, el clima inicia su marcha hacia los patrones actuales y ello comienza a perfilar las temporadas de incendios anuales y la configuración de regímenes de fuego parecidos a los de la actualidad.

PALABRAS CLAVE: Origen de incendios forestales, fuego, incendios antiguos, ecología del fuego.

ABSTRACT

Forest fires began on our planet nearly 470 million years ago, during the Silurian Period. Their activity has experienced highs and lows throughout the Earth's history, mainly related to the changes in the concentration of atmospheric oxygen and humidity levels that have characterized the evolution of the climate. High levels of wildfires were present during the Carboniferous, Jurassic and Cretaceous Periods as well as in the Quaternary, with the appearance of man. The first fire adaptations took place at approximately the same time as the colonization of the earth by plants. With the separation of Pangea during the Triassic Period, the climate began to evolve toward the present patterns and thus define the annual forest fire seasons along with the configuration of fire regimes similar to those of the present.

KEYWORDS: Origin of wildfires, fire, ancient wildfires, forest fires, fire ecology.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad es ampliamente reconocido que el fuego es un factor ecológico en una gran diversidad de ecosistemas a lo largo y ancho del planeta (Agee, 1993; Waring & Running, 1998; Whelan, 1997). Incluso, el fuego se ha abordado como un proceso ecológico a nivel global y se han realizado esfuerzos para estimar los regímenes de fuego y su condición a escala mundial (Shlisky et al., 2007). No obstante, todavía son pocos los trabajos encaminados a comprender cómo se iniciaron los incendios en el planeta que, desde hace millones de años (Ma) han mantenido una gran cantidad de ecosistemas o los han remodelado. También los incendios han influido, como cualquier otro factor ecológico, en la selección y adaptación de las especies, además de contribuir a la biodiversidad. La presencia de fuego en eras remotas ha sido comprobada o analizada por paleontólogos como Wolbach et al. (2002), Falcon-Lang (2000), Scott (2000), Glasspool et al. (2004) y Glaspool y Scott

INTRODUCTION

It is now widely recognized that fire is an ecological factor in a broad diversity of ecosystems throughout the planet (Agee, 1993; Waring & Running, 1998; Whelan, 1997). In fact, fire has been considered an ecological process on the global level and efforts have been made to estimate fire regimes and their condition on a world-wide scale (Shlisky et al., 2007). However, there are still few studies focused on understanding how wildfires began on the planet, which have maintained or remodeled the amount of ecosystems throughout the world for millions of years. Like any other ecological factor, wildfires have influenced the selection and adaptation of species, and have contributed to biodiversity. The presence of fire in remote times has been proven or analyzed by paleontologists such as Wolbach et al. (2002), Falcon-Lang (2000), Scott (2000), Glasspool et al. (2004) and Glasspool and Scott (2010), among many others who have based their findings on the fossil records.

(2010), entre muchos otros que se han fundamentado en los registros fósiles.

De acuerdo con Glaspool y Scott (2010), la presencia del fuego ha sido muy variada, respondiendo en gran medida a cambios en la concentración de oxígeno atmosférico en la Tierra. Debido a la dificultad para obtener evidencia científica y a que la evidencia fósil se va hallando lentamente en este campo, han sido pocos los esfuerzos por tratar de comprender los incendios en eras remotas, bajo la óptica de su ecología. Con este último enfoque destacan los trabajos de Pyne (2001) y de Pausas y Keeley (2009).

Los incendios forestales no siempre han sido como son hoy. Hubo épocas en que fueron más intensos y severos que cualquier incendio en la historia de la humanidad, pero también hubo tiempos en los que su presencia fue mínima y en moderadas intensidades (Pyne, 2001). En la actualidad, el cambio climático global y otras acciones como la exclusión del fuego trastocan los regímenes de fuego, y se están observando alteraciones que en diversas regiones del planeta incluyen incendios de mayor extensión, duración, intensidad y severidad; los mega-incendios forestales.

Por lo anterior, resulta de interés conocer el origen de los incendios, así como las variaciones que ha tenido el comportamiento del fuego, sus regímenes a lo largo de la historia del planeta y las implicaciones ecológicas; puntos que representan el objetivo del presente trabajo.

EL ORIGEN DE LA COMBUSTIÓN

Calor. El primero de los elementos necesarios (calor, comburente y combustibles) que existió en el planeta para que el fuego se produzca, fue el calor; la energía. Nuestro planeta se formó por acreción hace unos 4,600 Ma a causa del choque de incontables aerolitos que se fueron sumando hasta que alcanzó las dimensiones actuales (Palmer, 2011). Tales impactos, así como la actividad volcánica, los rayos, la caída de rocas, y tal vez la combustión espontánea liberan energía suficiente para la combustión, pero aún no existían las plantas, y la prístina atmósfera tenía muy poco oxígeno, por lo que todavía no podía darse la combustión.

Producción de oxígeno. Después de la creación de la tierra por acreción, algunos gases fueron liberados por la colisión de los aerolitos formando una delgada atmósfera provisional, pero estos gases pronto escaparon al espacio. Luego, la actividad volcánica liberó enormes cantidades de monóxido y bióxido de carbono, metano, amoníaco e hidrógeno que conformaron la atmósfera primigenia, hace 4,300 Ma (Elsom, 1992). Con tanto CO₂,

According to Glasspool and Scott (2010), the presence of fire has been quite varied, responding in a great degree to changes in the concentration of atmospheric oxygen on the Earth. Due to the difficulty in obtaining scientific evidence and that the fossil evidence in this field is being found slowly, few efforts have been made in trying to understand wildfires in remote times, focused on their ecology. Under such a focus, the works of Pyne (2001) and Pausas and Keeley (2009) are outstanding.

Forest fires have not always been as they are now. There were periods in which they were more intense and severe than any fire in human history, but there were also times in which their presence was minimum and in moderate intensities (Pyne, 2001). At present, the global climatic change and other actions such as fire exclusion affect fire regimes, and alterations are being observed that in diverse regions of the planet include wildfires of major extension, duration, intensity and severity; the mega-forest fires.

Therefore, it is important to know the origin of wildfires, as well as the variations that have taken place in the behavior of fire, its regimes throughout the history of the planet and the ecological implications; which comprise the objective of the present study.

THE ORIGIN OF COMBUSTION

Heat. The first of the necessary elements (heat, oxidizer and fuels) that existed on the planet for production of fire was heat; energy. Our planet was formed by accretion approximately 4,600 million years ago caused by the impact of countless aerolites that accumulated until it reached its present dimensions (Palmer, 2011). Such impacts, along with volcanic activity, lightening, rock fall, and perhaps spontaneous combustion, released sufficient energy for combustion, but plants still did not exist, and the pristine atmosphere had very little oxygen, thus combustion could not yet take place.

Production of oxygen. After the creation of the earth by accretion, some gases were released by the collision of the aerolites forming a thin provisional atmosphere, but these gases soon escaped into space. Then, volcanic activity released enormous amounts of carbon monoxide and dioxide, methane, ammonia and hydrogen that comprised the primordial atmosphere, 4,300 million years ago (Elsom, 1992). With so much CO₂, the greenhouse effect was strong and the climate was very warm. Therefore, a large amount of water was in the form of vapor. The combination of the carbonic gas with the calcium oxide contributed to producing limestone and to reducing the carbon dioxide and the temperature, which implied condensation and abundant rains which

el efecto invernadero era fuerte y el clima bastante cálido. Por ello, mucha agua estaba en forma de vapor. La combinación del gas carbónico con el óxido de calcio contribuyó a producir roca caliza y a reducir el bioxido de carbono y la temperatura, lo que implicó condensación y lluvias abundantes que aumentaron los océanos donde se dio la vida (Pelt et al., 2001).

En los mares antiguos existían sustancias orgánicas simples como C, H y O, que terminaron formando proteínas y otras sustancias orgánicas que existían disueltas en el agua (Oparin, 1975). Bajo el influjo de la radiación ultravioleta, a lo largo de mil millones de años, las sustancias orgánicas terminaron formando moléculas de ácido nucleico de doble cordón que eventualmente se duplicó. Así, aparecieron genes de vida libre o virus en el mar arcaico comenzando su lenta evolución y selección (Asimov, 1988). Se han sugerido diversos escenarios para la aparición de la vida, como algún sitio en el océano (Oparin, 1975), las áreas donde las supermareas acarrearón materiales de la superficie terrestre (teoría de Harris) o las ventilas hidrotérmicas en el fondo del mar (Corliss, Baross, & Hoffmann, 1981). Independientemente del escenario de origen, lo cierto es que de estos precursores de los organismos derivaron las bacterias quimiosintéticas. Éstas a través de millones de años se diferenciaron y utilizaron clorofila para consumir bióxido de carbono y así producir azúcares y oxígeno, gas que gracias a esta naciente fotosíntesis habría de acumularse en el mar y la atmósfera (Pelt et al., 2001). Los fósiles estromatolitos, encontrados en Australia y Sudáfrica, son grupos de algas oceánicas primitivas fosilizadas, las cuales se han considerado la evidencia más antigua de vida (Figura 1A).

Pre-incendios. Cuando ya existían las bacterias quimiosintéticas (4,000 Ma), sin duda hubo rayos que cayeron en el océano y las calcinaron. En este medio acuático se comenzó a gestar el futuro triángulo del fuego con microscópicos combustibles y calor, pero faltaba el oxígeno. Además, aún no había organismos más grandes ni acumulación de combustibles, y no vivían en un ambiente seco para que pudieran arder. Por su parte, Pyne (2001) razona que las erupciones, los rayos, la caída de algún pequeño aerolito o de rocas y la combustión espontánea produjeron las primeras combustiones, cuando ya se tuvo oxígeno en la atmósfera y las tormentas llevaron mantas de algas a la superficie terrestre (aún no colonizada por las plantas) o cuando se secaron en el inicial ambiente pantanoso. El triángulo del fuego se había completado pero aún era endeble y temporal, pues estos pre-incendios carecían de función ecológica y no estaban configurados como regímenes, no había especies terrestres ni adaptaciones al fuego.

increased the volume of the oceans where life began (Pelt et al., 2001).

In the ancient seas there were simple organic substances such as C, H and O, which ended up forming proteins and other organic substances that were dissolved in the water (Oparin, 1975). Under the influence of the ultraviolet radiation, over a period of a billion years, the organic substances formed molecules of double-chained nucleic acid that eventually was duplicated. Thus, genes of free life or viruses appeared in the archaic sea beginning their slow evolution and selection (Asimov, 1988). Diverse scenarios for the appearance of life have been suggested, such as some place in the ocean (Oparin, 1975), the areas where the super tides carried materials from the terrestrial surface (theory of Harris) or the hydrothermal vents on the ocean floor (Corliss, et al., 1981). Independently of the scenario of origin, the fact is that from these precursors of organisms, the chemosynthetic bacteria derived. After millions of years these bacteria became differentiated and utilized chlorophyll to consume carbon dioxide and thus produce sugars and oxygen, gas which thanks to this rising photosynthesis began to accumulate in the sea and the atmosphere (Pelt et al., 2001). The fossil stromatolites, found in Australia and South Africa, are groups of primitive fossilized oceanic algae which have been considered the oldest evidence of life (Figure 1A).

Pre-Fires. When the chemosynthetic bacteria already existed (4,000 MYA) no doubt there was lightening that fell in the ocean and calcinated them. In this aquatic medium the future triangle of fire began to gestate with microscopic fuels and heat, but oxygen was lacking. Furthermore, there were still no larger organisms or accumulation of fuels, and they did not live in a dry environment in which they could burn. To this respect, Pyne (2001) reasons that the eruptions, lightening, the falling of a small aerolite or rocks and spontaneous combustion produced the first combustions, when there was already enough oxygen in the atmosphere and the storms brought layers of algae to the terrestrial surface (not yet colonized by plants) or when they dried in the initial swampy environment. The fire triangle had been completed but it was still weak and temporal, given that these pre-fires lacked an ecological function and were not configured as regimes, there were no terrestrial species or adaptations to fire.

Fuels are formed. All of the present terrestrial vegetation is derived from the green algae that came out of the sea millions of years ago. The terrestrial surface consisted only of rock, without soil or life. On the coasts a gradation was occurring from the sea to the shallow

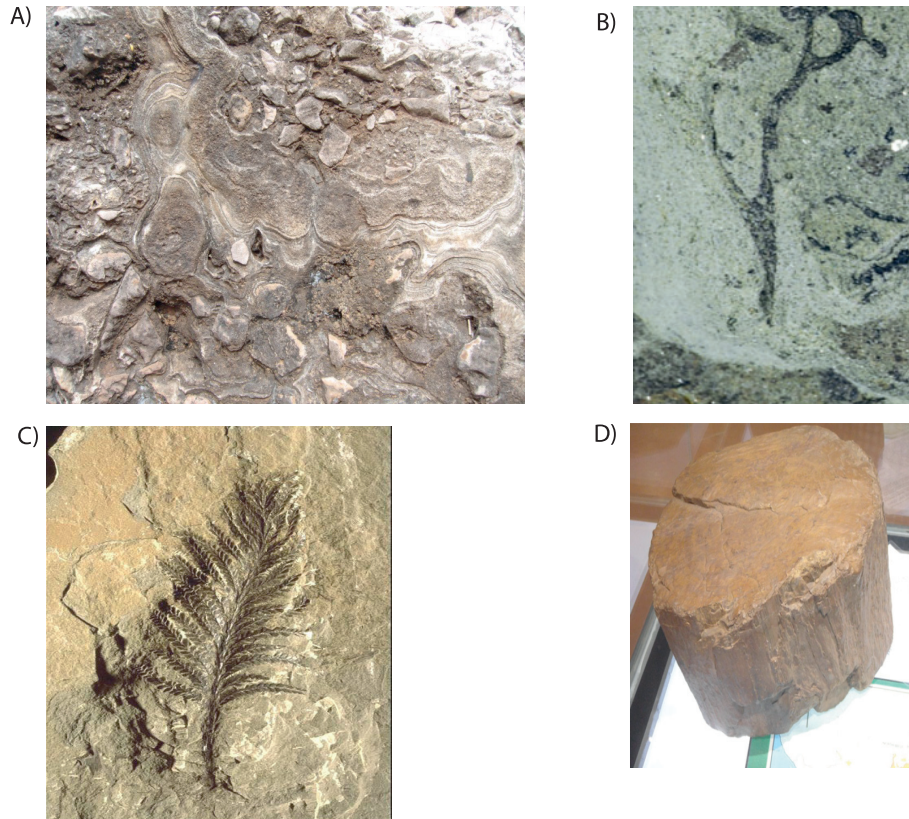


FIGURA 1. A) Estromatolitos fósiles (3,500-3,800 Ma) en Sudáfrica (Complejo Maropeng, Sudáfrica. Foto del autor, 2011). B) Fósil de *Cooksonia*. Probablemente, las plantas de este género fueron el primer combustible forestal leñoso. En la parte superior se aprecian sus esporangios y rizomas (Miguasha National Park, 2011). C) Fronda de *Archaeopteris*, uno de los primeros fósiles de árboles, de hace unos 380 Ma (Miguasha National Park, 2011). D) Madera fosilizada de *Agathoxylon africanum*, uno de los combustibles del Pérmico (250 Ma) (Museo de sitio, Maropeng, Sudáfrica. Foto del autor, 2011).

Figure 1. A) Fossil stromatolites (3,500-3,800 MY) in South Africa (Maropeng Complex, author's photo, 2011). B) Fossil of *Cooksonia*. Probably, the plants of this genus were the first woody forest fuel. In the upper portion its sporangia and rhizomes can be seen (Miguasha National Park, 2011). C) Frond of *Archaeopteris*, one of the first fossils of trees, of 380 MY (Miguasha National Park, 2011). D) Fossilized wood of *Agathoxylon africanum*, one of the fuels of the Permian Period (250 MY) (Site museum, Maropeng, South Africa. Author's photo, 2011).

Se forman los combustibles. Toda la vegetación terrestre actual se deriva de las algas verdes que hace millones de años salieron del mar. La superficie terrestre constaba sólo de roca, sin suelo ni vida. En las costas se fue dando una gradación del mar a la zona poco profunda y de mareas. En esta última zona prevalecían las algas verdes, las más adecuadas para desplazarse tierra adentro. La producción de oxígeno suficiente y su derivado, el ozono, limitó la radiación ultravioleta y permitió la colonización terrestre por las plantas. Esto ocurrió en el periodo Silúrico, hace unos 470 Ma. Las primeras plantas vasculares con tallo y madera, que ahora podrían conducir agua a partes más altas y captar mejor la radiación solar, aparecieron 10 Ma más tarde. *Cooksonia* es considerada la primera planta vascular con una altura de pocos centímetros y cuyos fósiles se han hallado en Irlanda (Pelt et al., 2001) (Figura 1B).

zone and tidal zones. In this latter zone the green algae prevailed, the most apt for moving inland. The production of sufficient oxygen and its derivative, ozone, limited the ultraviolet radiation and permitted the colonization of land by the plants. This occurred in the Silurian period, approximately 470 MYA. The first vascular plants with stem and wood, which now could conduct water to higher parts and better capture solar radiation, appeared 10 MYA later. *Cooksonia* is considered the first vascular plant with a height of a few centimeters and whose fossils are found in Ireland (Pelt et al., 2001) (Figure 1B).

Figure 2 shows a chronological diagram that synthesizes the present work. The diagram begins with the first fires and includes their transformation, parallel to that of the forest fuels. In addition, it incorporates events demonstrated with fossil findings, and the reconfiguration of the

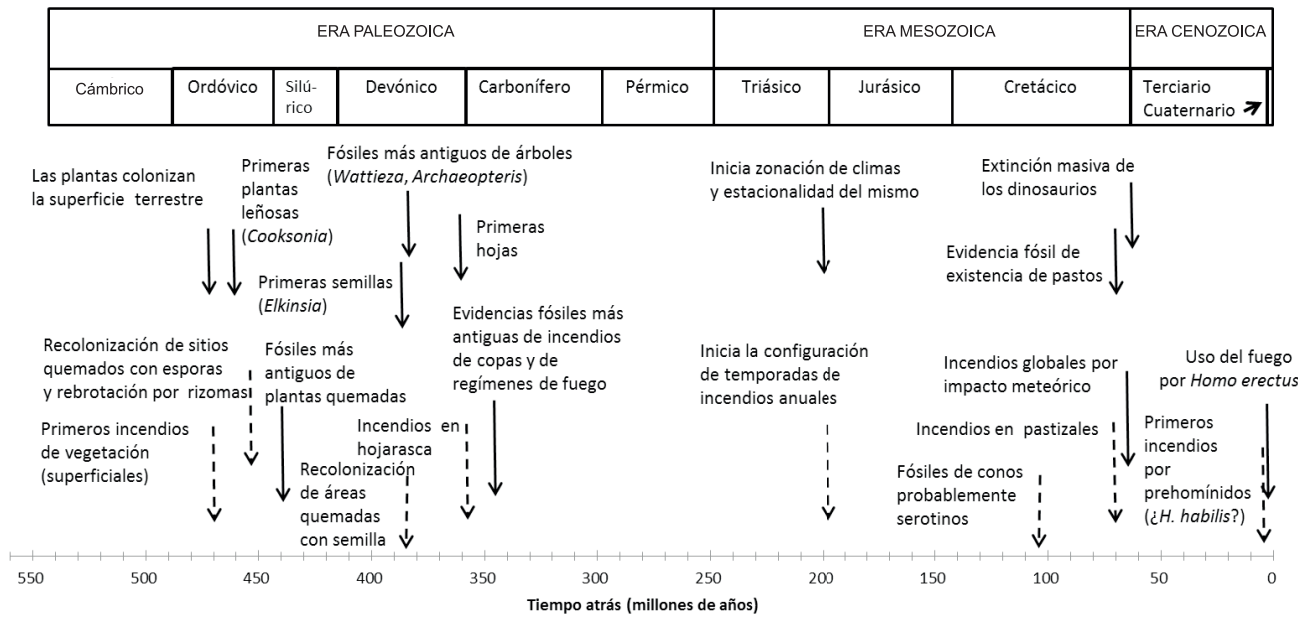


FIGURA 2. Cronología de eventos significativos en la evolución de los incendios forestales. Las flechas sólidas marcan evidencia fósil. Las flechas punteadas indican hipótesis basadas en información indirecta.

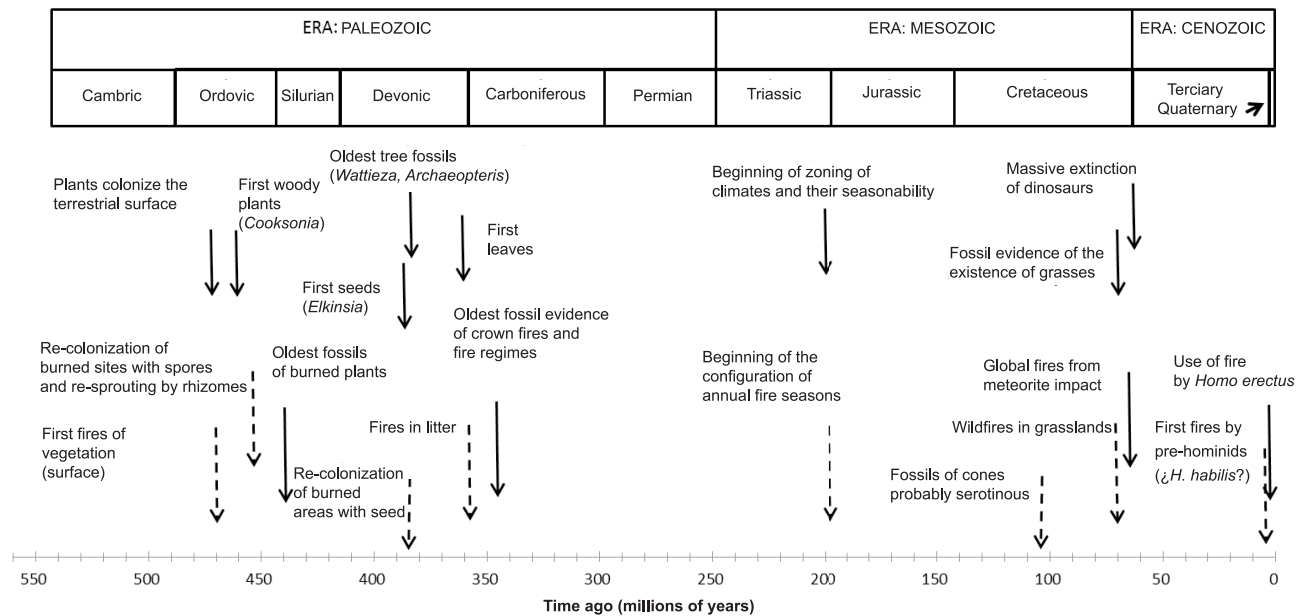


FIGURE 2. Chronology of significant events in the evolution of forest fires. The solid arrows mark fossil evidence. The dotted arrows indicate hypotheses based on indirect information.

En la Figura 2 se muestra un diagrama cronológico que sintetiza el presente trabajo. El diagrama inicia con los primeros incendios e incluye su transformación, paralela a la de los combustibles forestales. Además, incorpora eventos sustentados con hallazgos fósiles, y la reconfiguración de los regímenes de fuego debido a la zonación acorde con los climas. Todos estos eventos son discutidos a lo largo del trabajo.

SURGEN LOS PRIMEROS INCENDIOS DE VEGETACIÓN EN EL SILÚRICO

Glasspool et al. (2004) refieren que los restos fósiles quemados más antiguos corresponden a las plantas bajas datantes de hace 440 Ma, de fines del Silúrico, cuando los niveles de oxígeno eran de 19 %, superiores al mínimo requerido (13 %) para la combustión que los mismos autores reportan. También corresponden a este tiempo los vegetales quemados y fosilizados íntegramente, pues en el carbón mineral se han hallado numerosos fósiles vegetales. Esto obedece a que la combustión no afecta muchas características anatómicas de las plantas, incluso de las más finas. Además, el proceso de fosilización no las altera, pues se trata de carbón casi puro, por lo que si las plantas no son aplastadas se mantienen. Los fósiles más antiguos de este tipo datan de 419 Ma (The Field Museum, 2011). No obstante, Scott (2000) destaca que estas evidencias son escasas y que hay depósitos más abundantes del Devónico, hace 345 Ma.

Volviendo al Silúrico, en diversas regiones prevaleció un clima desértico, con el que pudo haber recesiones de algunos de los nuevos ecosistemas terrestres, aislándose hacia partes más húmedas, pero sin duda, con condiciones secas de transición que permitieron la presencia relativamente común del fuego. En esas épocas, el triángulo del fuego se había establecido y la vegetación terrestre ya ofrecía continuidad y momentos con limitaciones de humedad. Estas condiciones dieron pábulo a los primeros incendios, los cuales al principio sólo debieron afectar pequeñas superficies al ser limitados por la humedad (Pyne, 2001). Conforme la vegetación ganaba mayor superficie terrestre, el fuego ocasionado por rayos u otros agentes naturales comenzó a ser más extenso, común y, poco a poco, se constituyó como un factor ecológico que empezó a participar en la evolución de las plantas. Los primeros incendios fueron superficiales y poco intensos, dadas las bajas concentraciones de oxígeno (16 %) de la época (Glasspool & Scott, 2010). Estos ocurrieron sobre algas, psilópsidas (antecesoras de las fanerógamas) y cooksonias secas, en un ambiente pantanoso. La velocidad de propagación también debió ser baja, dada la humedad de las localidades donde la vida se acababa de instalar en su conquista por la superficie terrestre y también debido al poco oxígeno.

fire regimes due to the zoning according to the climates. All of these events are discussed throughout the work.

THE FIRST VEGETATION FIRES OCCUR IN THE SILURIAN PERIOD

Glasspool et al. (2004) refer that the oldest burned fossil remains correspond to the low plants dating from 440 MYA, at the end of the Silurian Period, when the oxygen levels were 19 %, above the minimum level required (13 %) for combustion reported by the same authors. Also corresponding to this time are the plants integrally burned and fossilized, as in the mineral carbon numerous plant fossils have been found. This is due to the fact that combustion does not affect many anatomical characteristics of the plants, even the finest. Furthermore, the fossilization process does not alter them, as it is almost pure carbon, thus if the plants are not crushed, they remain intact. The oldest fossils of this type date from 419 MYA (The Field Museum, 2011). However, Scott (2000) points out that this evidence is scarce and that there are more abundant deposits in the Devonian Period, 345 MYA

Getting back to the Silurian Period, in diverse regions there prevailed a desert climate, with which there could have been recessions of some of the new terrestrial ecosystems, isolated toward more humid parts, but undoubtedly with dry conditions of transition that allowed the relatively common presence of fire. In these periods, the fire triangle had become established and terrestrial vegetation offered continuity and moments with limitations of moisture. These conditions gave way to the first wildfires, which at first must have only affected small surfaces, as they were limited by moisture (Pyne, 2001). As vegetation gained greater terrestrial surface, fire caused by lightning or other natural agents began to be more extensive, common, and little by little, became an ecological factor that began to participate in the evolution of plants. The first fires were superficial and not very intense, given the low concentrations of oxygen (16 %) of the period (Glasspool & Scott, 2010). These occurred over dry algae, psilopsids (antecedents of the phanerogams) and cooksonias, in a swampy environment. The velocity of propagation also must have been low, given the moisture of the localities where life had just installed itself in its conquest of the terrestrial surface and also due to the low levels of oxygen. These fires probably affected populations of the aquatic plant *Dawsonites*. The superficial structures of this plant formed horizontal continuity, as occurs now in the tule and popal swamps, when the atmospheric humidity and that of the fuels was sufficiently low.

The dry areas with algae and other creeping plants, the accumulation of materials or their partial decomposi-

Tales fuegos probablemente afectaron poblaciones de la planta acuática *Dawsonites*. Las estructuras superficiales de esta planta formaban continuidad horizontal, tal como sucede hoy en día en los tulares y popales, siempre que la humedad atmosférica y la de los combustibles fuese lo suficientemente baja.

En áreas secas con algas y otras plantas rastroas, la acumulación de materiales o su parcial descomposición ofreció material para los primeros incendios subterráneos, aún más lentos en los primeros suelos pantanosos de la época que se habían secado. Al principio, a pesar de la baja intensidad de estos incendios, su severidad debió ser letal para las plantas terrestres primigenias que carecían de adaptaciones para sobrevivir al fuego. Los incendios se hicieron gradualmente más extensos e intensos, en la medida en que la vegetación ascendía sobre las montañas hacia ambientes más frescos y secos o más lejos de acumulaciones de agua, y conforme la concentración de oxígeno incrementaba en el aire. No obstante, la elevada mortalidad que los incendios debieron implicar ante la falta de adaptaciones de las primeras plantas terrestres; la localidad quemada, como hoy, ofrecía cenizas, nutrimentos y espacio de crecimiento libre, es decir, un ambiente propicio para la expansión de los vegetales. *Cooksonia* probablemente rebrotaba de sus rizomas rastroos cuando el fuego no fue lo suficientemente severo para matarlos. El rebrote se daba en la orilla del área quemada, donde las llamas fueron detenidas por la humedad acumulada, por las rocas o por la lluvia. También pudo rebrotar después de los embates de los vientos. Por consiguiente, las primeras adaptaciones al fuego pudieron ser la recolonización de áreas quemadas mediante rebrotes por rizomas y la dispersión de esporas de plantas como *Cooksonia* sobre localidades incendiadas. Aún no existían las cortezas para proteger los tejidos, ni raíces con reservas ni semillas; futuras alternativas de recolonización en dichos sitios.

DEVÓNICO: EL FUEGO ACOMPAÑA LA CREACIÓN DE LOS BOSQUES

Hasta entonces la vegetación era rala, lacustre, todavía no existían las hojas y la fotosíntesis se hacía en el tallo; es en el Devónico, hace 360 Ma, cuando aparecen las primeras hojas (Pelt et al., 2001). Esto marca otro cambio en el comportamiento del fuego. Cualquiera que fuese el tiempo de vida de las hojas, –pues su carácter caducifolio apareció después de muchos millones de años– éstas comenzaron a acumular un nuevo tipo de material combustible sobre el piso, ligero pero más compactado. Las hojas al incendiarse producirían llamas más cortas, aunque emitirían más calor al suelo, a la base de las plantas y a sus partes subterráneas, originando ma-

tion offered material for the first underground fires, even slower in the first swampy soils of the period which had dried. At first, despite the low intensity of these fires, their severity must have been lethal for the primordial terrestrial plants which lacked adaptations to survive fire. The fires gradually became more extended and intense, as the vegetation ascended over the mountains toward cooler and drier environments or farther from accumulations of water, and as the concentration of oxygen in the air increased. Despite the high mortality which the fires must have implied due to the lack of adaptations of the first terrestrial plants, the burned locality, as now, offered ash, nutrients and free growing space, that is, an environment favorable for the expansion of plants. *Cooksonia* probably re-sprouted from its creeping rhizomes when the fire was not severe enough to kill them. The re-sprouting occurred at the edge of the burned area, where the flames were detained by the accumulated moisture, by rocks or by rain. It could also re-sprout after the onslaught of the winds. Consequently, the first adaptations to fire could have been the re-colonization of the burned areas by means of re-sprouting by rhizomes and the dispersal of spores of plants such as *Cooksonia* over burned areas. Bark to protect the tissues still did not exist, nor roots with reserves or seeds; future alternatives of re-colonization in these sites.

DEVONIAN PERIOD: FIRE ACCOMPANIES THE CREATION OF THE FORESTS

Until this point the vegetation was sparse, lake, leaves did not yet exist and photosynthesis occurred in the stem. It is the Devonian Period, 360 MYA, when the first leaves appeared (Pelt et al., 2001). This marks another change in the behavior of fire. Whatever the lifetime of the leaves, -their deciduous character appeared after many millions of years- they began to accumulate as a new type of fuel material on the ground, light but more compact. When the leaves burned they would produce shorter flames, although they would emit more heat to the soil, to the base of the plants and their underground parts, causing higher mortality. The evolution to higher species, of the arboreal type, originated the start of crown fires. This evolution of the plants to reach various meters of height, from a few centimeters, was slow. The process was accompanied by forest fires. Thus, the fires tended to consume fuels that were higher and higher and became more intense, also due to the increasing availability of oxygen. In areas with low density and the vertical continuity of fuels, fires were passive. In dense areas, where the fronds intertwined, active crown fires occurred.

If the woody *Cooksonia* is considered as a first shrub, despite its low height, the burning of its communities was due to low crown fires. During the separation

yor mortalidad. La evolución a especies más altas, de tipo arbóreo, marcó el inicio de los incendios de copa. Dicha evolución de las plantas para alcanzar varios metros de altura, a partir de unos cuantos centímetros, fue lenta. El proceso estuvo acompañado por los incendios forestales. De esta forma, los incendios tendían a consumir combustibles más y más altos y a ser más intensos, debido también a la creciente disponibilidad de oxígeno. En áreas poco densas y ante la continuidad vertical de combustibles, los incendios fueron pasivos. En áreas densas, donde las frondas se entrelazaban, surgieron los incendios activos de copa.

Si se considera a la leñosa *Cooksonia* como un primer arbusto, a pesar de su pequeña altura, la quema de sus comunidades fue entonces por incendios enanos de copa. Durante la separación de lo que serían los árboles y las plantas más bajas, llegó un punto en que los incendios de baja intensidad no consumieron a las plantas más altas, pero sí al nuevo sotobosque. Habían nacido entonces los incendios superficiales bajo el dosel de los ancestros de los árboles.

Los fósiles más antiguos de árboles pertenecen al periodo Devónico y al género *Wattieza*, con altura de 12 m y con un fenotipo similar al de una palma (385 Ma). Después aparece *Archaeopteris*, progimnosperma con apariencia entre árboles y helechos arborescentes, ramificado, alcanzó 8 m de altura y diámetros de hasta 1.5 m. Hay evidencia de que mudaba frondas completas periódicamente, habitó suelos inundables y fue el árbol dominante de su tiempo (Burnie et al., 2011) (Figura 1C). En bosques densos, las frondas debieron formar camas de combustibles que alimentaron incendios de poca intensidad, ante la baja concentración de oxígeno atmosférico de ese tiempo. El árbol también existió durante periodos con más oxígeno, implicando incendios más intensos y severos.

En Pensilvania, en un corte de carretera, fueron localizadas capas de carbón intercaladas con fósiles de *Rhacophyton*, indicando que quizás hubo incendios frecuentes y de baja intensidad durante la época de sequía. Al parecer algunas gimnospermas tempranas y *Gillespiea*, seguidas por *Rhacophyton*, colonizaban áreas incendiadas (Cressler, 1999).

Las primeras semillas pertenecían a plantas de hace 385 a 365 Ma conocidas como "helechos con semillas", aunque no eran helechos y este grupo se extinguió. Las semillas más antiguas que se han encontrado estaban protegidas por una cápsula y pertenecían a *Elkinsia polymorpha* (University of California, 2001), pero también se han encontrado en *Archaeosperma*, *Lagenostoma*, *Moresnetia* y *Lyginopteris*, todas de la

of what would be the trees and the lower plants, a point was reached in which the low intensity fires did not consume the higher plants, but they did consume the new understory. Thus the superficial fires were born under the canopy of the ancestors of trees.

The oldest fossils of trees pertain to the Devonian Period and to the genus *Wattieza*, with a height of 12 m and with a phenotype similar to that of a palm (385 MYA). Next appears *Archaeopteris*, progymnosperm with an appearance between that of trees and tree-like ferns, branched, reaching 8 m in height and diameters of up to 1.5 m. There is evidence that it periodically shed complete fronds, inhabited soils that flooded and was the dominant tree of its period (Burnie et al., 2011) (Figure 1C). In dense forests, the fronds must have formed beds of fuels that fed low intensity fires, due to the low concentration of atmospheric oxygen of this time. The tree also existed during periods with more oxygen, implying fires of greater intensity and severity.

In Pennsylvania, in a highway cut, layers of carbon interspersed with fossils of *Rhacophyton* were located, indicating that perhaps there were frequent fires of low intensity during the dry period. It appears that some early gymnosperms and *Gillespiea*, followed by *Rhacophyton*, colonized burned areas (Cressler, 1999).

The first seeds belonged to plants of 385 to 365 MYA known as "ferns with seeds", although they were not ferns and this group became extinct. The oldest seeds that have been found are protected by a capsule and pertain to *Elkinsia polymorpha* (University of California, 2001), but they have also been found in *Archaeosperma*, *Lagenostoma*, *Moresnetia* and *Lyginopteris*, all from the same period (Leubner, 2009; Linkies et al., 2010). With the appearance of seeds, the re-colonization of burned areas by this means began to take place as another adaptation to fire. At first the seeds were relatively small, thus the wind helped in some measure with their dispersal. The evolution continued and in other periods there were even smaller or winged seeds, which facilitated their anemophilous dispersal and the repopulation of burned areas. The largest seeds arrived at burned areas by gravity (in nearby areas).

CLIMAX OF THE FORESTS OF THE CARBONIFEROUS PERIOD AND THEIR FOREST FIRES

Approximately 380 MYA, fires were infrequent due to the humid conditions and the low oxygen levels that reached a marginal level of 13 %. As the Carboniferous Period advanced, the oxygen levels became higher, until by the end of this period they reached 35 % (Glasspool & Scott, 2010; Scott & Glasspool, 2006).

misma época (Leubner, 2009; Linkies et al., 2010). Con la aparición de las semillas, la recolonización de áreas quemadas por este medio se comienza a erigir como una adaptación más al fuego. Las semillas al principio eran relativamente pequeñas, por lo que el viento pudo ayudar en alguna medida en su dispersión. La evolución continuó y en otros periodos hubo semillas aún más pequeñas o aladas, lo que facilitó su dispersión anemófila y la repoblación de áreas incendiadas. Las semillas más grandes arribaban a las áreas quemadas por gravedad (en áreas aledañas).

CLÍMAX DE LOS BOSQUES DEL CARBONÍFERO Y SUS INCENDIOS FORESTALES

Hace unos 380 Ma, los incendios eran escasos por las condiciones húmedas y los bajos niveles de oxígeno que alcanzaron un marginal de 13 %. Conforme el Carbonífero avanzó, los niveles de oxígeno se hicieron cada vez más altos, hasta que a finales de este periodo llegaron a 35 % (Glasspool & Scott, 2010; Scott & Glasspool, 2006)

Los grandes bosques se formaron hace 350 Ma, durante el Carbonífero, con clima templado en casi todo el mundo. La vida se diversificó, hubo licopodios con 40 m de altura, helechos de 25 m y colas de caballo que alcanzaron 15 m. También había musgos en estos bosques que, enterrados en las orillas de grandes lagos, formaron los yacimientos de carbón mineral que actualmente son explotados (Elsom, 1992; Farb, 2004). Aunque en parte de la Era Paleozoica (355-295 Ma) prevaleció un clima cálido y húmedo en el planeta, Falcon-Lang (2000) ofrece unas de las más antiguas evidencias de dos regímenes de fuego contrastantes para el periodo Carbonífero (345 Ma). Dicho autor estimó, a partir de la estratificación vertical de capas de carbón fosilizado, que los incendios en bosques de progimnospermas pudieron ocurrir cada 3-35 años, cuando prevalecía un clima estacional tropical. También considera que el ambiente de dichos bosques pudo ser similar al de las sabanas actuales. El fuego también afectó vegetación de pantanos con lepidófitos, pteridospermas y coniferópsidas, con frecuencias estimadas de 105 a 1,085 años. El autor refiere partes aéreas quemadas de esos especímenes, evidenciando incendios de copa. De acuerdo con Pausas y Keeley (2009), algunos de los regímenes antiguos de fuego fueron equiparables a los modernos. Belcher et al. (2010), simuló la inflamabilidad de combustibles modernos en ambientes con diferentes concentraciones de oxígeno y, con base en ello, estimó la inflamabilidad en diferentes épocas. Como resultado hallaron que el fuego reduce mucho su actividad con menos de 18.5 % de oxígeno y que bajo 16 % no hubo fuego, pero su

The large forests were formed 350 MYA, during the Carboniferous Period, with temperate climate in nearly all the world. Life became diversified, there were lycopods 40 m high, ferns of 25 m and horsetail that reached 15 m. There were also mosses in these forests, which buried in the shores of great lakes, formed banks of mineral carbon that are presently exploited (Elsom, 1992; Farb, 2004). Although in part of the Paleozoic Era (355-295 MYA) a warm and humid climate prevailed on the planet, Falcon-Lang (2000) offers one of the oldest pieces of evidence of two contrasting fire regimes for the Carboniferous Period (345 MYA). This author estimated, from the vertical stratification of layers of fossilized carbon, that the fires in forests of progymnosperms could have occurred every 3-35 years, when there was a seasonal tropical climate. He also considers that the environment of these forests could have been similar to that of the present day savannas. Fire also affected the vegetation of swamps with lepidodroids, pteridosperms and coniferopsods, with estimated frequencies of 105 to 1,085 years. The author refers to burned aboveground parts of these specimens, evidencing crown fires. According to Pausas and Keeley (2009), some of the ancient fire regimes were comparable to the modern ones. Belcher et al. (2010) simulated the inflammability of modern fuels in environments with different oxygen concentrations, and based on this evidence, estimated inflammability in different periods. As a result they found that fire reduces much of its activity with less than 18.5 % oxygen and that below 16 %, there was no fire, but its activity was fomented between 19-22 % oxygen, concluding that fire activity must have been high in the Carboniferous Period (350-300 MYA).

The ferns were a common surface fuel, which due to the still distant existence of grasses, represented another cornerstone for fires. If the properties of inflammability of ferns were similar to those of the present (for example, *Pteridium* spp.) and if high oxygen levels are added, moments of drought or localities with a moisture threshold that permits the production of fire, the result would be that of rapid and intense surface fires, especially if they were fed by the wind. Perhaps the fires were not very severe for the ferns, which re-sprouted after being burned, as occurs now, and thus fulfilled a cycle of self-favoring and association with fire, whose danger was reduced as the re-sprouts gained size (Figures 3A and 3B). In drought, the fern groves could have burned periodically with a destructive fire regime, and frequent or relatively frequent, depending on the moisture conditions, similar to those of modern palms. In addition to re-sprouting, the spores represented a means of re-colonizing these burned fern groves.

actividad se promovió a partir de 19-22 %, concluyendo que la actividad de los incendios debió ser alta en el Carbónífero (350-300 Ma).

Los helechos fueron un combustible superficial común, que ante la todavía lejana existencia de pastos, representaron otra piedra angular para los incendios. Si las propiedades de inflamabilidad de los helechos eran similares a las actuales (por ejemplo, *Pteridium* spp.) y si se suman los niveles altos de oxígeno, momentos de sequía o localidades con un umbral de humedad permisible para la producción de fuego, el resultado sería el de fuegos superficiales rápidos e intensos, en especial si eran alimentados por el viento. Tal vez, los fuegos no fueron muy severos para los helechos que rebrotaban después de ser quemados, como ocurre actualmente, y así cumplían un ciclo de autofavorecimiento y asociación con el fuego, cuyo peligro se reducía en tanto los rebrotes ganaban tamaño (Figuras 3A y 3B). En la sequía, los helechales pudieron quemarse periódicamente con un régimen de fuego destructivo y frecuente o relativamente frecuente, según las condiciones de humedad lo permitiesen, semejante al de los modernos palmares. Además de la rebrotación, las esporas representaron un medio para recolonizar estos helechales incendiados.

DECLINACIÓN TEMPORAL DEL FUEGO EN EL PÉRMICO Y EL TRIÁSICO

En el Pérmico aumenta el frío a escala global y las zonas de vegetación quedan atrapadas entre hielos. Los bosques de helechos, colas de caballo y licopodios desaparecen. En este periodo dominan las coníferas, que se hicieron árboles hace 280 Ma. A partir de las simulaciones a diferentes concentraciones de oxígeno en combustibles modernos, Belcher et al. (2010), coincidiendo con Pyne (2001), señalan que la actividad de los incendios debió ser intermedia en el Pérmico (299-251 Ma) y el Triásico (285-201 Ma), y muy baja o carente a mediados de esta última etapa (250-240 Ma) (Figura 1D).

FLORECEN LOS DINOSAURIOS Y RESURGE EL FUEGO

En la Era Mesozoica (Triásico, Jurásico y Cretácico) predominan condiciones cálidas y húmedas, con levantamientos generalizados de montañas que implicaron climas más fríos y secos. También hubo zonas desérticas y se presentaron glaciaciones (Pearl, 1979; Pelt et al., 2001; Rodd & Stackhouse, 2008). En el Jurásico había parientes de las magnolias, sicomoros y lauráceas. Un ancestro de la araucaria fue el árbol de mayor altura jamás hallado. Su tronco fósil incompleto tiene una longitud de 116 m y se estima que tuvo una longitud de

TEMPORAL DECLINE OF FIRE IN THE PERMIAN AND TRIASSIC PERIODS

In the Permian Period cold increased on a global scale and the vegetation zones are trapped between ice. The forests of ferns, horsetail and lycopods disappear. This period is dominated by conifers, which became trees around 280 MYA. From simulations at different concentrations of oxygen in modern fuels, Belcher et al. (2010) coinciding with Pyne (2001), indicate that fire activity must have been intermediate in the Permian Period (299-251 MYA) and the Triassic Period (285-201 MYA), and very low or lacking in the middle of this last period (250-240 MYA) (Figure 1D).

DINOSAURS FLOURISH AND FIRE RESURGES

In the Mesozoic Era (Triassic, Jurassic and Cretaceous) warm and moist conditions predominate, with generalized rising of mountains which implied colder and drier climates. There were also desert zones and glaciations (Pearl, 1979; Pelt et al., 2001; Rodd & Stackhouse, 2008). In the Jurassic Period there were relatives of the magnolias, sycamores and lauraceas. An ancestor of the araucaria was the tallest tree ever found. Its incomplete fossil trunk has a length of 116 m and it is estimated that it had a length of 140 m, higher than any known tree. Fossil sites of the epoch have been found with 60 % of the species corresponding to small plants with flowers, but their abundance was lower than 15 %, just as in other localities. In the Jurassic Period the ferns, cicadas and conifers also dominated. Remains have been found of conifer forests with an understory of ferns, all with a climate similar to that of the Triassic (Homer & Lessem, 1994; Wicander & Monroe, 1993). During the Cretaceous Period perennial trees dominated such as araucarias, sequoias, swamp cypresses with leaves or with aciculae, as well as ginkgos, cicadaceas, magnolias with flower, and oaks, over an herbaceous stratum of ferns and juncos. In the Cretaceous Period deciduous trees appeared which mix with ancestors of the sequoias (Pearl, 1979; Pelt et al., 2001; Rodd & Stackhouse, 2008).

Towards the Mesozoic Era (Jurassic and Cretaceous), the oxygen concentration and fire activity became important again, increasing from the Jurassic (201-145 MYA) to the Cretaceous (145-65 MYA) according to the estimation of the carbon deposits (Scott, 2000). This is supported with simulations of inflammability (Belcher et al., 2010). During the Jurassic and Cretaceous Period there were plants similar to those that we know now (Oparin, 1975) and the forest fires begin to resemble those of the present (Figure 3).

Fossils have been found at the poles of ferns and conifers, which shows that they were not always so cold.

140 m, mayor a cualquier árbol conocido. Se han localizado sitios fósiles de la época con 60 % de las especies correspondientes a pequeñas plantas con flores, pero su abundancia fue menor de 15 %, igual que en otras localidades. En el Jurásico dominaban también los helechos, cícadas y coníferas. Se han encontrado restos de bosques de coníferas con un sotobosque de helechos, todos con un clima similar al del Triásico (Horner & Lessem, 1994; Wicander & Monroe, 1993). Durante el Cretácico prevalecen árboles perennes como araucarias, secoyas, cipreses de los pantanos con hojas o con acículas, además de ginkgos, cicadáceas, magnolias con flor, y encinos, sobre un estrato herbáceo de helechos y juncos. En el Cretácico aparecen árboles caducifolios que se mezclan con ancestros de las secuías (Pearl, 1979; Pelt et al., 2001; Rodd & Stackhouse, 2008).

Hacia el Mesozoico (Jurásico y Cretácico), la concentración de oxígeno y la actividad del fuego volvió a ser importante, aumentando del Jurásico (201-145 Ma) al Cretácico (145-65 Ma) según la estimación de los depósitos de carbón (Scott, 2000). Esto se sustenta con simulaciones de inflamabilidad (Belcher et al., 2010). Durante el Jurásico y Cretácico aparecen hierbas semejantes a las que conocemos actualmente (Oparin, 1975) y los incendios comienzan a parecerse a los de hoy en día (Figura 3).

En los polos se han encontrado fósiles de helechos y coníferas, lo que evidencia que no siempre fueron tan fríos. Los investigadores teorizan que el cambio de clima ocurrió hace 200 Ma, cuando se comenzó a separar el supercontinente Pangea que dio lugar a los continentes contemporáneos. Un ancestral océano Pacífico estabilizaba el clima, pero tal separación implicó cambios radicales en los patrones de corrientes de aire, flujo circumpolar y corrientes marinas, comenzándose a producir el patrón actual de los climas (Ley, 2003; Wicander & Monroe, 1993).

En el Cretácico, inicia la zonación de climas de Norte a Sur, aunque todavía no de forma marcada. El clima se hace más estacional y frío a fines del periodo. Las angiospermas evolucionan y se diversifican (Wicander & Monroe, 1993). De esta manera, la temporada de incendios se comienza a gestar, determinada por la época seca del año en diversas regiones del globo terráqueo. Además, las zonaciones climáticas iniciaron su ruta hacia donde hoy se encuentran y marcaron áreas más proclives al fuego; por ejemplo, las futuras regiones templadas con climas estacionales. En estas regiones, la mayor frecuencia de incendios favorecería la selección de especies tolerantes y resistentes al fuego, y el desarrollo de más adaptaciones a este factor.

Los ancestros del orden Cycadales datan del Cretácico. La investigación de especies de tal orden, como

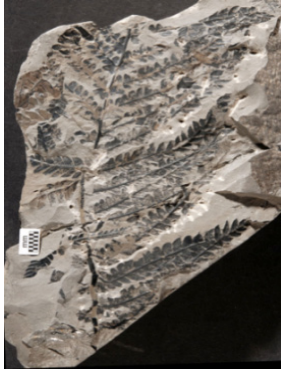
Investigators theorize that the climate change occurred around 200 MYA when the supercontinent Pangea began to separate, giving way to the contemporary continents. An ancestral Pacific Ocean stabilized the climate, but this separation implied radical changes in the patterns of air currents, circumpolar flow and marine currents, beginning to produce the present climate pattern (Ley, 2003; Wicander & Monroe, 1993).

In the Cretaceous Period, the zoning of climates from North to South began, although still not in a marked form. The climate became more seasonal and cold at the end of the period. The angiosperms evolved and became diversified (Wicander & Monroe, 1993). Thus, the fire season began to gestate, determined by the dry period of the year in diverse regions of the globe. Furthermore, the climatic zonings began their route toward where they are now found and marked areas that were more susceptible to fire; for example, the future temperate regions with seasonal climates. In these regions, the higher frequency of fires would favor the selection of species that were resistant and tolerant to fire, and the development of more adaptations to this factor.

The ancestors of the order Cycadales date from the Cretaceous Period. The investigation of species of this order, such as *Macrozamia* spp., can give clues to how those plants responded to fire. According to Asmussen (2009), in Australia the adults of *Macrozamia* spp. resist fire and in the burned areas, emit re-sprouts of leaves and can present regeneration by seed. Competition is reduced in the burned areas, radiation increases and there is higher mineralization of nitrogen (Figure 4), promoting the growth of *Macrozamia* spp.

With respect to the adaptations to fire in this period, Pausas and Keeley (2009) point out that there is fossil evidence of remains of burned cones, presumably serotinous, of the Cretaceous Period (Allen et al., 1998). It was previously believed that the grasses, which are presently a common forest fuel in the temperate, semi-arid and tropical zones of the planet, had only existed for about 40-50 MYA (Elsom, 1992). However, recent findings in India show that these monocots coexisted with the dinosaurs 70 MYA. In this place coprolites of dinosaurs containing phytoliths were found, which are microscopic crystals of silica of plant cells, with typical forms for the different species. These phytoliths are like the modern grasses, and it is thought that the dinosaurs may have had grasses as part of their diet, and that they may have been several meters in height. Due to this evidence, along with the finding of pollen of grasses of the same period, it is beginning to be considered that this type of plant already existed in the Cretaceous Period (Prasad et al., 2005). These grasses also fed fires.

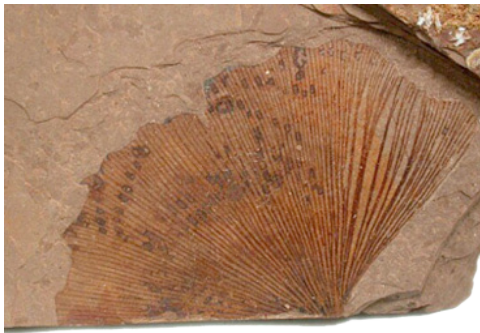
A



B



C



D



E



F



FIGURA 3. A) Fósil de helecho (Jurásico) (Miguasha National Park, 2011). B) Incendio sobre helechos (foto Alfredo Nolasco Morales). C) Fósil de ginkgo (Mesozoico) (Miguasha National Park, 2011). D) Simulación del incendio sobre hojarasca de ginkgo (foto del autor, 2011). E) Fósil de fronda de palma (Cretácico, Museo del Desierto, Coahuila, foto del autor, 2011). F) Incendio afectando palmas (foto del autor).

FIGURE 3. A) Fossil of fern (Jurassic) (Miguasha National Park, 2011). B) Fire on ferns (photo Alfredo Nolasco Morales) C) Fossil of ginkgo (Mesozoic) (Miguasha National Park, 2011). D) Simulation of fire over ginkgo litter (author's photo, 2011). E) Fossil of palm frond (Cretaceous, Museo del Desierto, Coahuila, author's photo, 2011). F) Fire affecting palms (author's photo).

Macrozamia spp., puede dar pista de cómo aquellas plantas respondían al fuego. Acorde con Asmussen (2009), en Australia los adultos de *Macrozamia* spp. resisten al fuego y, en las áreas quemadas, emiten rebrotes de hojas y pueden presentar regeneración por semilla. En las áreas quemadas se reduce la competencia, aumenta la radiación y hay mayor mineralización de nitrógeno (Figura 4), propiciando el crecimiento de *Macrozamia* spp.



FIGURA 4. Rodal de la cicadácea *Dioon merolae*, entre pinar, después de un incendio forestal superficial en la Reserva de la Biosfera “La Sepultura”, Chiapas. Foto del autor, 2007.

FIGURE 4. Stand of the cicadaceae *Dioon merolae*, among pine, after a superficial forest fire in the biosphere reserve “La Sepultura”, Chiapas. Author’s photo, 2007.

Respecto a las adaptaciones al fuego en esa época, Pausas y Keeley (2009) señalan que hay evidencia fósil de restos de conos quemados, presumiblemente serófitos, del Cretácico (Allen et al., 1998). Anteriormente se pensaba que los pastos, que hoy son un combustible forestal común en las zonas templadas, semiáridas y tropicales del planeta, sólo habían existido desde hace unos 40-50 Ma (Elsom, 1992). Sin embargo, hallazgos recientes en la India demuestran que estas monocotiledóneas convivieron con los dinosaurios hace 70 Ma. En dicho lugar se encontraron coprolitos de dinosaurios conteniendo fitolitos, los cuales son cristales microscópicos de sílice de las células vegetales, con formas típicas para las distintas especies. Estos fitolitos son como los de las gramíneas modernas, y se piensa que los dinosaurios pudieron tener a los pastos como parte de su dieta alimenticia, y que quizás tuvieron varios metros de altura. Debido a esta evidencia, junto con el hallazgo de polen de pastos de la misma época, se comienza a considerar que este tipo de plantas ya existía en el Cretácico (Prasad et al., 2005). Estos pastos también alimentaron incendios.

Approximately 64 MYA, a meteorite of 10 km width impacted the planet in what is now the Yucatan peninsula and formed a giant crater, that of Chixculub, a small fishing village in the impact zone. The meteorite generated a rain of red-hot materials, global forest fires, tsunamis, and raised dust clouds that took months to settle to earth. All of this directly killed or collapsed the dinosaur populations (Álvarez, 1998). Venkatesan and Dahl (1989) found aromatic polycyclic hydrocarbons in the K/T boundary, which evidences combustion of organic materials from the impact. In addition, Wolbach *et al.* (2002) found elemental carbon in various parts of the planet, principally in the form of soot apparently from a single global fire. The soot was found in the iridium layer, whose source was the meteorite. According to Durda and Kring (2004), the global quantity of soot derived from the phenomenon was 70,000,000 t. Along with other catastrophes generated by the impact, these global fires have been the most devastating in the history of the planet. However, despite the number of extinctions produced, life continued. The plants recovered, which shows the importance of the adaptations to fire. The re-colonization of endless extensions must have begun slowly, perhaps at the rhythm that plants moved inland when they conquered the land. This process was undergone by species adapted to fire, which occurred more quickly, and more slowly by those not adapted to this factor, as the ecological succession advanced.

FOREST FIRES AFTER THE DEBACLE OF THE DINOSAURS

After the catastrophe of Chixculub, the ecological niche was opened for mammals, which being small animals similar to shrews, became diversified and numerous species reached enormous proportions. Now the world was dominated by the mammals (Wicander & Monroe, 1993). In the Cenozoic Era (whose final stage is the Quaternary Period), abundant mountain ranges arose, with which the climate in the planet becomes varied. In many zones of these times the warm and humid climates prevail. The most significant event for the plant world of this Era occurred in the Miocene, when the grasses and cereals expand throughout the globe. These plants reduced erosion and supplied food for the mammals, such as the marsupials, primates, rodents, dwarf horses, giant rhinoceros, camels and mammoths, among many others (Pearl, 1979). According to Pausas and Keeley (2009), the diversification and dominion of the planet by C4 plants and grasses would define the new regimes of frequent superficial fires.

The massive extinction of the Permian-Triassic Period implied a reduction in atmospheric oxygen, but in

Hace 64 Ma, un aerolito con 10 km de anchura impactó el planeta en lo que hoy es la península de Yucatán y formó un gigantesco cráter, el de Chixkulub, pequeño pueblo pesquero en la zona del impacto. El bólido generó lluvia de materiales candentes, incendios forestales globales, tsunamis, y levantó nubes de polvo que tardaron meses en volver a tierra. Todo esto mató directamente o colapsó las poblaciones de los dinosaurios (Álvarez, 1998). Venkatesan y Dahl (1989) encontraron hidrocarburos policíclicos aromáticos en la frontera K/T, lo cual evidencia combustión de materiales orgánicos al impacto. A su vez, Wolbach et al. (2002) hallaron carbono elemental en varias partes del planeta, principalmente en forma de hollín aparentemente procedente de un solo incendio global. El hollín se encontró en la capa de iridio, cuya fuente fue el aerolito. Acorde con Durda y Kring (2004), la cantidad global de hollín derivada del fenómeno alcanzó 70,000,000 t. Junto con las otras catástrofes generadas por el impacto, estos incendios globales han sido los más devastadores que ha visto el planeta y, sin embargo, a pesar de las numerosas extinciones producidas, la vida continuó. Las plantas se recuperaron, lo que evidencia la valía de las adaptaciones al fuego. La recolonización de inacabables extensiones debió comenzar lentamente, quizá casi al ritmo en que las plantas se adentraron en la tierra cuando la conquistaron. Este proceso lo llevaron a cabo especies adaptadas al fuego, probablemente con mayor rapidez, como las no adaptadas a este factor, más lentamente, al avanzar la sucesión ecológica.

LOS INCENDIOS LUEGO DE LA DEBACLE DE LOS DINOSAURIOS

Después de la catástrofe de Chixculub se abrió el nicho ecológico para los mamíferos, que de ser unos pequeños animales semejantes a musarañas, se diversificaron y numerosas especies alcanzaron enormes proporciones. Ahora el mundo estaba dominado por los mamíferos (Wicander & Monroe, 1993). En la Era Cenozoica (cuya última etapa es el periodo Cuaternario), se levantan abundantes cordilleras, con lo que el clima se hace variado en el planeta. En muchas zonas de esos tiempos prevalecen los climas cálidos y húmedos. El acontecimiento más significativo para el mundo vegetal de esta Era aconteció en el Mioceno, cuando los pastos y cereales se expanden por todo el orbe. Estos redujeron la erosión y suministraron alimento a los mamíferos, como los marsupiales, primates, roedores, caballos enanos, rinocerontes gigantes, camellos y mamuts, entre muchos otros (Pearl, 1979). Acorde con Pausas y Keeley (2009), la diversificación y dominio del planeta por las plantas C4 y los pastos, definirían los nuevos regímenes de fuegos superficiales frecuentes.

the Mesozoic (Triassic and Jurassic) there were oscillations, and in the Cretaceous Period there was another maximum during approximately 100 MY. Since then, the oxygen concentration dropped and has remained stable at 21 % during the last 40 MY (Glasspool & Scott, 2010), enough to favor an ample presence of forest fires.

MAN RECONFIGURES FIRE REGIMES

Humanity has had a long lineage. In its evolutionary pilgrimage it passed through an unknown missing link between primates and the humanoid ancestors. The ancestors of man used fire; *Homo erectus*, Cromagnon man (*H. sapiens*) along with their extinct Neanderthal brothers (*H. neanderthalensis*) and the diminute *H. floresiensis* in Java. Probably, the immediate ancestor of *H. erectus*, *H. habilis*, who fashioned rudimentary stone tools, picked up a burning branch from a burned area, and out of curiosity and to his astonishment, applied it to the surrounding vegetation producing another forest fire. If they were able to work stone, they had the potential to take a burning branch and transmit fire. Perhaps the discovery of fossils of the use of fire by *H. habilis* are yet to be found. The vegetation in which these ancestors inhabited, the types of climate existing in the planet, the topography, as well as the concentration of atmospheric oxygen, in general were similar to those of our times, as the forest fires were similar to those of the present.

The ancestor *H. erectus* took fire from a forest fire in an African savanna (Figure 5), and finally was able to transport it to light a fire in his cave, over a million years ago (Hilton-Barber & Berger, 2004). The powerful element would ward off predators and its glow would illuminate the darkness. At the fireside, these ancient men could communicate the day's anecdotes by signs or with a rudimentary language. Fire gave support to the evolution of intelligence of these ancient men, which allowed them to visualize that flame applied to vegetation would produce a fire, which would advance with the wind and could help them to corner animals and hunt them. The ticks were reduced in a burned savanna, where it was easier and safer to move about, as the predators and snakes could not hide in the burned areas and the fodder of these areas attracted the hunt animals.

Little by little, anthropic fire gained ground along with man's nomadism and the increase in his population; the discovery of agriculture; the application of fire in agriculture; the establishment of villages, agricultural zones and the use of forests. Humans intercalated their own fire regimes, established intentionally (with or without a purpose); accidental or negligent; with the natural fire regimes, increasing their quantity,

La extinción masiva del Pérmico-Triásico implicó reducción en el oxígeno atmosférico, pero en el Mesozoico (Triásico y Jurásico) hubo oscilaciones, y en el Cretácico se presentó otro máximo durante unos 100 Ma. Desde entonces, la concentración de oxígeno descendió y se ha mantenido estable en 21 % durante los últimos 40 Ma (Glasspool & Scott, 2010), suficiente para favorecer una amplia presencia de incendios forestales.

EL HOMBRE RECONFIGURA LOS REGÍMENES DE FUEGO

La humanidad ha tenido un largo linaje. En su peregrinar evolutivo pasó por un desconocido eslabón perdido entre los primates y los antepasados humanoideos. Los ancestros del hombre utilizaron el fuego: *Homo erectus*, el hombre de Cromagnón (*H. sapiens*), así como sus extintos hermanos el hombre de Neanderthal (*H. neanderthalensis*) y los diminutos *H. floresiensis* en Java. Probablemente, el antepasado inmediato de *H. erectus*, el *H. habilis* que hacía herramientas de piedra rudimentarias, tomó alguna rama ardiendo de un área incendiada y, por curiosidad y con asombro, la aplicó a la vegetación aledaña produciendo otro incendio forestal. Si podían labrar piedras, tenían el potencial para tomar una rama ardiendo y transmitir el fuego. Quizá, estén pendientes los descubrimientos de fósiles del uso del fuego por *H. habilis*. La vegetación en la que habitaban estos ancestros, los tipos de clima existentes en el planeta, la topografía, así como la concentración de oxígeno atmosférico, en general, eran similares a los de nuestros tiempos, como semejantes eran los incendios forestales a los actuales.

El ancestro *H. erectus* tomó el fuego del incendio forestal en una sabana africana (Figura 5) y, finalmente, logró trasladarlo para prender una fogata en su caverna, hace más de un millón de años (Hilton-Barber & Berger, 2004). El poderoso elemento ahuyentaría a los depredadores y la lumbre también alejaría la oscuridad. Junto al fuego, estos antiguos hombres pudieron comunicar las anécdotas del día a señas o con un rudimentario lenguaje, planificar, asar sus alimentos, y gradualmente fue desarrollando actividades mentales más complejas y un lenguaje. El fuego apoyó la evolución de la inteligencia de estos antiguos hombres, la misma que les permitió visualizar que la lumbre aplicada sobre la vegetación produciría un incendio, que avanzaría con el viento y que les podía ayudar para acorralar animales y cazarlos. Las garrapatas se reducían en la sabana quemada, donde era más fácil y seguro desplazarse, pues los depredadores o las víboras no podían ocultarse en las áreas quemadas y el forraje de dichas áreas atraía a los animales de caza.

Poco a poco, el fuego antrópico ganó terreno con el nomadismo del hombre y el aumento de su población;



FIGURA 5. Quema prescrita en la Reserva Pilansberg, Sudáfrica. Estas sabanas son muy similares a aquéllas de las que *Homo erectus* tomó el fuego y lo provocó 1.5 Ma atrás (Foto del autor, 2011).

FIGURE 5. Prescribed fire in the Pilansberg Reserve, South Africa. These savannas are very similar to those in which *Homo erectus* took fire and provoked it 1.5 MYA (Author's photo, 2011).

extension and frequency; changing their period of occurrence; altering the fuels and vegetation maintained by or sensitive to fire.

More recently, man excluded fire from the ecosystems that required it with prevention or combat, and generated global climatic change with his industries and activities, giving way with the latter two changes to greater affected surfaces, and fires that were more intense and severe. Thus began the anthropic fire regimes that now dominate the planet.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the Ajusco Project of the Universidad Autónoma Chapingo, of fire ecology, integral fire management and restoration of burned areas.

el descubrimiento de la agricultura; la aplicación del fuego en la misma; el establecimiento de poblados, zonas agrícolas y el usufructo de los bosques. El ser humano intercaló sus propios regímenes de fuego, establecidos de manera intencional (con un propósito o no); accidental o negligente; con los regímenes naturales de incendios; incrementando su cantidad, extensión y frecuencia; cambiando su época de ocurrencia; alterando los combustibles y la vegetación mantenida o sensible al fuego.

Más recientemente, el hombre excluyó el fuego de ecosistemas que lo requieren con la prevención y el combate, y generó el cambio climático global con sus industrias y actividades, dando paso con estos dos últimos cambios a mayores superficies afectadas, e incendios más intensos y severos. De esta manera, comenzaron los regímenes de fuego antrópicos que en la actualidad dominan el planeta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del Proyecto Ajusco de la Universidad Autónoma Chapingo, sobre ecología del fuego, manejo integral del fuego y restauración de áreas incendiadas.

REFERENCIAS

- Agee, J. K. (1993). *Fire ecology of the Pacific Northwest*. Washington, D.C.: Island Press.
- Allen, P., Alvin, K. L., Andrews, J. E., Batten, D. J., Charlton, W. A., Cleavelly, R. J., . . . Banham, G. H. (1998). Purbeck–Wealden (early Cretaceous) climates. *Proceedings of the Geologists' Association*, 109(3), 197–236. doi: 10.1016/s0016-7878(98)80066-7
- Álvarez, W. (1998). *T. rex and the crater of doom*. New York, USA: Vintage books.
- Asimov, I. (1988). *Las fuentes de la vida*. México, D. F.: Limusa.
- Asmussen, B. (2009). Another burning question: Hunter-gatherer exploitation of *Macrozamia* spp. *Archaeology Oceanica*, 44, 142–149.
- Belcher, C. M., Yearsley, J. M., Adden, R. M., McElwain, J. C., & Rein, G. (2010). Baseline intrinsic flammability of Earth's ecosystems estimated from paleoatmospheric oxygen over the past 350 million years. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(52), 22448–22453. doi: 10.1073/pnas.1011974107
- Burnie, D., Cleal, C., Crane, P., & Thomas, B. A. (2011). Devónico. In P. G. Mendiola (Ed.), *Prehistoria* (pp. 108–139). Londres, UK: D. K.
- Corliss, J. B., Baross, J. A., & Hoffmann, S. E. (1981). A hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on Earth. *Oceanologica Acta, Special number*, 59–69. doi: citeulike-article-id:6493049
- Cressler, W. L. (1999). *Site-analysis and floristic of the late Devonian Red Hill locality, Pennsylvania, and Archaeopteris-dominated plant community and early tetrapod site*. Ph. D. Dissertation, University of Pennsylvania. Pennsylvania, United States.
- Durda, D. D., & Kring, D. (2004). El episodio de impacto de Chicxulub. *Scientific American. Latinoamérica*, 19, 24–31. Obtenido de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=786068>
- Elsom, D. (1992). *Earth*. New York, USA: MacMillan Pub. Co.
- Falcon-Lang, H. J. (2000). Fire ecology in the Carboniferous tropical zone. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164, 355–371. doi: 10.1016/s0031-0182(00)00193-0
- Farb, P. (2004). *El bosque*. México, D.F.: Time-Life.
- Glasspool, I. J., Edwards, D., & Axe, L. (2004). Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. *Geology*, 32, 381–383. doi: 10.1130/G20363.1
- Glasspool, I. J., & Scott, A. C. (2010). Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. *Nature Geoscience*, 3, 627–630. doi: 10.1038/ngeo923
- Hilton-Barber, B., & Berger, L. R. (2004). *Field guide to the cradle of humankind: Sterkfontein, Swartkrans, Kromdraai & Environs World Heritage Site*. Singapore: Struik Publishers.
- Horner, J. R., & Lessem, D. (1994). *The complete T. rex*. New York, USA: Simon and Schuster.
- Leubner, G. (2009). *The seed biology place*. Freiburg: University of Freiburg. Consultado 10-10-2011 en www.seedbiology.de/evolution.asp#fossils
- Ley, W. (2003). *Los polos* (2a ed.). México, D.F.: Time-Life.
- Linkies, A., Graeber, K., Knight, C., & Leubner-Metzger, G. (2010). The evolution of seeds. *New Phytologist*, 186, 817–831. doi: 10.1111/j.1469-8137.2010.03249.x.
- Miguasha National Park. (2011). Consultado 10-09-2011 en <http://www.miguasha.ca/mig-fr/archaeopteris.php>
- Oparin, A. I. (1975). *El origen de la vida*. México, D.F.: Grijalbo.
- Palmer, D. (2011). La tierra primitiva. In P. G. Mendiola (Ed.), *Prehistoria* (pp. 10–47). Londres, UK: D.K.
- Pausas, J., & Keeley, J. E. (2009). A burning story: The role of fire in the history of life. *BioScience*, 59(7), 593–601. doi: 10.1525/bio.2009.59.7.10.
- Pearl, R. M. (1979). *Geología*. México, D.F.: CECSA.
- Pelt, J. M., Mazoyer, M., Mond, T., & Girardon, J. (2001). *La historia más bella de las plantas*. Barcelona, España: Ed. Anagrama.
- Prasad, V., Strömberg, C. A. E., Alimohammadian, H., & Sahni, A. (2005). Dinosaur coprolites and the early evolution of grasses and grazers. *Science*, 18(5751), 1177–1180. doi: 10.1126/science.1118806
- Pyne, S. J. (2001). *Fire. A brief history*. Seattle, USA: University of Washington Press.
- Rodd, T., & Stackhouse, J. (2008). *Árboles*. Monterrey, México: Milenio.
- Scott, A. C. (2000). Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164, 297–345. doi: 10.1016/s0031-0182(00)00192-9
- Scott, A. C., & Glasspool, I. J. (2006). The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, 10861–10865. doi: 10.1073/pnas.0604090103
- Shlisky, A., Waugh, J., González, P., González, M., Manta, M., Santoso, H., . . . Fulks, W. (2007). *Fire ecosystems and people: Threats and strategies for global biodiversity conservation*. Arlington, VA, USA: The Nature Conservancy.
- The Field Museum. (2011). *Fire and atmospheric oxygen*. Consultado 14-09-2011 en <http://fieldmuseum.org/explore/fire-and-atmospheric-oxygen>
- University of California. (2011). *Seed plants: Fossil record*. Consultado 18-11-2011 en www.ucmp.berkeley.edu/seedplants/seedplantsfr.html

- Venkatessan, M. I., Dahl, J. (1989). Organical geochemical evidence for global fires at the Cretaceous/Tertiary boundary, *Nature*, 338, 57-60. doi:10.1038/338057a0
- Waring, R. H., & Running, S. W. (1998). *Forest ecosystems* (2a ed.). San Diego, USA: Academic Press.
- Whelan, R. J. (1997). *The ecology of fire*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Wicander, R., & Monroe, J. S. (1993). *Historical geology* (2a ed.). USA: West Publishing Co.
- Wolbach, W. S., Gilmour, I., Anders, E., Orth, C. J., & Brooks, R. R. (2002). Global fire at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Nature*, 334, 665-669. doi: 10.1038/334665a0