

Artículo original

Cambios en los patrones espaciales de área quemada en Colombia, ¿qué ha pasado en las dos primeras décadas del siglo XXI?

Changes in the spatial patterns of burned area in Colombia, what happened in the first two decades of the 21st century?

 Dolors Armenteras

Grupo de Investigación en Ecología del Paisaje y Modelación de Ecosistemas, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá DC, Colombia

Artículo de posesión para admisión como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

Colombia ha venido avanzando en el monitoreo anual de los incendios forestales y el área quemada y su relación con las variaciones en un mismo año y de un año a otro de las condiciones climáticas que los propician, así como de las causas antrópicas que los generan. A nivel mundial se habla de cambios en el régimen de incendios, no obstante, en Colombia todavía no se ha determinado si la tendencia en el tiempo es de aumento en la extensión, tamaño y frecuencia de los incendios. En este estudio se presenta un análisis comparativo de las dos primeras décadas del siglo XXI en términos de los patrones espaciales y temporales de las áreas quemadas, con el objetivo de analizar cambios en algunos parámetros del régimen de incendios en el país (extensión total, tamaño, configuración espacial de los parches quemados y frecuencia). Se utilizó la información del producto de área quemada mensual Fire_cci v5.1 derivado del sensor MODIS a una resolución de 250 m para mapear mensualmente todos los parches detectados como quemados o las cicatrices de quemadas desde enero del 2001 hasta marzo del 2020. El área quemada presentó una gran variabilidad anual y en el curso del año, siendo febrero y enero los meses más afectados por incendios. El área total quemada en un mes ha tendido a disminuir en la segunda década del siglo XXI, pero el tamaño promedio de los parches quemados ha aumentado de 188,75 ha en promedio en la primera década a 196,2 ha en la segunda década, durante la cual también se han detectado un mayor número de fragmentos. En términos de frecuencia, se encontró una gran variabilidad con zonas, especialmente las bajas, donde ha aumentado la frecuencia en la segunda década comparada con la primera. Se confirmó un cambio en algunas propiedades del régimen de incendios en Colombia, ya que, aunque el área total afectada disminuyó y los incendios menores se redujeron, el patrón encontrado indica una clara tendencia a más incendios de mayor tamaño y frecuencia.

Palabras clave: Área quemada; Incendios; Patrones; Régimen de fuego; MODIS.

Abstract

Colombia has been making progress in monitoring the annual occurrence of forest fires and burned areas, and their relationship with the interannual and intraannual variations of both the climatic conditions that facilitate them and their anthropic causes. At the global level, the changes in the fire regime are documented, but in Colombia, we have not yet established whether the trend over time has been toward an increase in the extension, size, and frequency of fires. The present study is a comparative analysis of the first two decades of the 21st century in terms of the spatial and temporal patterns of detected burned areas to analyze changes in some parameters of the fire regime in the country (total extension, size, spatial configuration of burned patches, and frequency). Information from the monthly burned area product Fire_cci v5.1 derived from MODIS at a resolution of 250 m was used to map monthly all the patches detected as burns (or burn scars) from January 2001 to

Citación: Armenteras D. Cambios en los patrones espaciales de área quemada en Colombia, ¿qué ha pasado en las dos primeras décadas del siglo XXI?. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):248-260, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1514>

Editor: Jhon Charles Donato

Correspondencia:

Dolors Armenteras;
darmenterasp@unal.edu.co

Recibido: 1 de julio de 2021

Aceptado: 2 de diciembre de 2021

Publicado en línea: 9 de febrero de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

March 2020. The results indicated that the burned area had high annual and intraannual variability, with February and January as the months most affected by fires. The total monthly area burned tended to decrease in the second decade of the 21st century, but the average size of the burned patches increased from 188.75 ha on average in the first decade to 196.2 ha on average in the second decade when also a greater number of fragments was detected. In terms of frequency, there was high variability, especially in lowland areas where the frequency has increased in the second decade compared to the first. Some properties of the fire regime in Colombia did change and despite a decrease in the total area, the results of the study indicated a clear trend towards more, larger, and more frequent fires.

Keywords: Burned area; Fires; Patterns; Fire regime; MODIS.

Introducción

Los incendios de la vegetación, especialmente los forestales, constituyen una perturbación que influye en los patrones y procesos de los ecosistemas: en algunos casos alteran la diversidad, influyen en la productividad y afectan el ciclo de nutrientes (**Bowman, et al., 2014**). Por otra parte, el uso del fuego ha sido una práctica extendida del hombre para el manejo del territorio, la limpieza de la tierra y los bosques o para mejorar el pastoreo (**Guido R van der Werf, et al., 2008**). Aunque el área quemada a nivel mundial disminuyó entre 1998 y 2015, los incendios que ocurren en regiones tropicales se han convertido en un problema importante dado el alto impacto que tienen en la estructura y función de estos ecosistemas tan amenazados por múltiples factores de estrés. Si bien la mencionada reducción en el área quemada se asocia principalmente con las sabanas y pastizales tropicales (**Andela, et al., 2016**), el área mundial quemada se ha desplazado a regiones con más cobertura boscosa, lo que indica un mayor uso del fuego para la tala y quema de bosques y para el manejo agrícola en los trópicos (**Andela, et al., 2016**). La interacción del cambio climático con la topografía natural y las condiciones del viento, así como con otras actividades antropogénicas, pueden resultar en incendios graves y prolongados que afectan grandes áreas forestales y reducen el almacenamiento de carbono forestal (**Brando, et al., 2019**), una degradación inducida por los incendios que en el trópico puede representar cerca del 69 % de la pérdida total de carbono (**Baccini, et al., 2015**). Además, los cambios en la frecuencia e intensidad de los incendios exigen el estudio de la variación en el tiempo del área quemada, pues es crucial para comprender la deforestación en países tropicales (**Curtis, et al., 2018**).

Las interacciones entre el clima, la vegetación y los incendios son complejas, siendo el clima uno de los factores naturales que influyen tanto en la distribución de la vegetación como en las características de los regímenes de incendios que la afectan (**van der Werf, et al., 2008**). Por otro lado, los bosques tropicales una vez perturbados son menos resistentes al cambio climático y a la actividad humana y más vulnerables a otras perturbaciones e incendios posteriores (**Aragão, et al., 2018; Buma, 2015**). En este sentido, la mayor propensión de los bosques tropicales a los incendios ha desembocado no solo en el aumento de las pérdidas en ellos sino también de la vulnerabilidad de los bosques restantes con condiciones más secas frente a los incendios (**Seymour & Harris, 2019**), contexto en que se prevé que los bosques de Suramérica tengan poca resiliencia, particularmente en áreas con un alto riesgo de futuras sequías (**Hirota, et al., 2011**).

Los estudios de incendios forestales a menudo se centran en la medición de la superficie forestal quemada (**Nogueira, et al., 2015**), o de su efecto sobre el ciclo del carbono y las emisiones atmosféricas (**van der Werf, et al., 2010**). Sin embargo, pocos estudios han analizado la vulnerabilidad de los bosques frente a una mayor frecuencia de incendios, y los disponibles se basan en gran medida en observaciones locales (**Alencar, et al., 2015**). Los análisis sistemáticos de la pérdida de bosques asociada con los incendios y el examen de las trayectorias de los bosques bajo su frecuencia cambiante pueden ayudar a desenredar los mecanismos que determinan la degradación forestal y examinar la capacidad de resiliencia de nuestros bosques (**Armenteras, et al., 2021**). Es por esto que el conocimiento

sobre los cambios en los regímenes de incendios es fundamental en el continente y en Colombia. Los regímenes de incendios hacen referencia a la descripción de cuándo, dónde y cuáles incendios ocurren utilizando diferentes parámetros, entre los cuales se encuentran: a) la estacionalidad, que describe la época del año durante la cual los eventos de fuego son más frecuentes; b) la frecuencia, definida como el intervalo de tiempo entre incendios en un determinado lugar, o la cantidad de tiempo en que se demora en quemarse por completo un área específica, y c) la extensión, es decir, el tamaño promedio de los incendios en los ecosistemas, lo que es esencial dado que los efectos ecológicos pueden ser muy diferentes dependiendo de esta magnitud (Cochrane, 2003).

Los datos derivados de los sensores remotos ofrecen la posibilidad de detectar cambios en la reflectancia de la superficie de la tierra que ocurren como resultado de la quema de la vegetación (Loepfe, *et al.*, 2012). Estas imágenes satelitales permiten una estimación objetiva de la extensión y el impacto de los incendios, y de su monitoreo en el tiempo. A diferencia de la detección de focos activos, que se basa en la emitancia en el infrarrojo medio debida a las temperaturas elevadas que ocurren en un incendio, la detección del área quemada permite discriminar parches completamente quemados, también denominados cicatrices de área quemada (Ressl, *et al.*, 2009).

En el norte de Suramérica, específicamente en Colombia y Venezuela, los incendios ocurren principalmente en la estación seca entre diciembre y principios de abril (Armenteras-Pascual, *et al.*, 2011). De hecho, los cambios climáticos han dado lugar a alteraciones que determinan un mayor número de temporadas de sequía extrema con una tendencia general al aumento del área quemada, la frecuencia e intensidad de los incendios, y la presencia de temporadas de incendios más prolongadas (van der Werf *et al.*, 2008). En Colombia existe una clara relación entre los patrones espaciales y la variabilidad interanual de los incendios con los factores climáticos (Armenteras-Pascual, *et al.*, 2011), en la cual la actividad del fuego aumenta durante la estación seca, en la que se presentan los valores más bajos de precipitación. En estudios previos se reportaba para la primera década del siglo actual un promedio anual de área quemada de alrededor de 400.000 ha, alcanzándose el millón de hectáreas quemadas en el 2003 (Armenteras-Pascual, *et al.*, 2011). No obstante, no está claro si la extensión y la frecuencia han aumentado con los años, ni si la tendencia en el tiempo sigue la de otros países como Brasil (Lizundia-Loiola, *et al.*, 2020). En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar la tendencia de los incendios en el tiempo en términos de área y frecuencia, así como el patrón espacial de las cicatrices, y comparar las tendencias de las dos primeras décadas del siglo.

Materiales y métodos

Área de estudio

Colombia se ubica en el extremo noroccidental de Suramérica entre los 12°26'46 Norte, 4°13'30 Sur, 66°50'54 Este y 79°02'33 Oeste, y es el único país suramericano con costas en el Pacífico (1.350 km de longitud) y el Caribe (más de 1.600 km.). Es el cuarto país más grande de Suramérica después de Brasil, Argentina y Perú, y tiene una superficie de 1.141.748 km². Limita con el mar Caribe al norte, con Panamá (266 km) en el noroeste, con Venezuela (2.219 km de frontera) y Brasil (1.645 km) en el este, con Perú (1.629 km) en el sur, con Ecuador en el suroeste (568 km) y con el océano Pacífico en el oeste (Ideam, *et al.*, 2007).

Colombia es un país de grandes variaciones geográficas y su parte occidental es mayoritariamente montañosa (45 % del territorio). Sin embargo, una gran parte del país está constituida por llanuras situadas por debajo de los 500 m. Por su variedad topográfica, determinada por la presencia de sistemas montañosos, hay una gran diversidad de climas y de clases de suelos. El territorio se puede dividir en seis grandes regiones naturales: la región andina, que incluye las tres cordilleras andinas y los valles interandinos; dos regiones litorales, el Caribe (Atlántico) y el Pacífico; una región que abarca las llanuras de la cuenca del río Orinoco; la región amazónica, que comprende los bosques amazónicos,

y, por último, una región Insular que no se contempla en este estudio. Siguiendo la clasificación de Olson de los principales ecosistemas del mundo (**Olson & Dinerstein, 2002**), Colombia está dominada principalmente por la selva tropical (52,2 %), seguida de sabanas (13,9 %), cultivos, pastizales y matorrales (9 %).

Métodos

Se utilizó el producto Fire_cci v5.1, el cual contiene información del área quemada (AQ) y se basa en datos del instrumento *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) de la NASA a bordo del satélite TERRA, con una resolución de 0,00224573 grados (aproximadamente 250 m) para el período 2001 a 2019 (**Chuvieco, et al., 2018**). La información del área quemada (AQ) incluye la fecha de su detección, el nivel de confianza (NC, un valor de probabilidad que estima la confianza de que un pixel esté realmente quemado) y la información del tipo de cobertura terrestre (LC). La información está disponible públicamente (actualmente, de 2001 a septiembre de 2019) en el portal de datos del CCI de la *European Space Agency* (<http://cci.esa.int/data>) y el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu>). Se completaron seis meses de datos, de octubre del 2019 a marzo del 2020, con otra base de datos de área quemada derivada de MODIS, la del producto MCD64A1, que tiene una resolución de 500 m (**Giglio, et al., 2015**).

Se analizó un conjunto de propiedades del régimen de incendios de importancia crítica en Colombia (extensión del incendio, tamaño de la cicatriz y frecuencia del evento). Para caracterizar el patrón espacial de las cicatrices de área quemada, se calcularon mensualmente las siguientes métricas: 1) área total detectada mensualmente; 2) número de parches o cicatrices de área quemada ($NP \Rightarrow 1$); 3) tamaño medio de los parches quemados o cicatrices ($MPS \Rightarrow 0$, sin límite); 4) distancia media del vecino más cercano (MNND), que corresponde a la distancia promedio hasta el fragmento vecino más cercano del mismo tipo de ecosistema (>1), y 5) índice de agregación (AI) calculado mediante el *software* Fragstats (**McGarigal, et al., 2002**). Cada una de estas se eligió a por la información que brindan y el hecho de no ser métricas redundantes (es decir, que representen la misma información de forma alterna). Cada índice indica un aspecto de la configuración del área quemada.

Para el parámetro de frecuencia, a cada pixel se le cuantificó el número de meses detectados como área quemada, entendida como el intervalo promedio, o cada cuántos meses se detecta un pixel como área quemada. La frecuencia se calculó dividiendo el número máximo de meses estudiados, es decir, 231 meses (enero 2001 - marzo 2020), en 120 meses en la primera década (enero 2001 - diciembre 2010) y 111 meses en la segunda década del siglo (enero 2011 - marzo 2020). Para verificar si había un incremento en la frecuencia de incendios entre los dos periodos, a la frecuencia de la segunda década se le restó la de la primera que, de ser positiva indicaba que el periodo se alargaba, es decir, disminuía la frecuencia, y viceversa. Por ejemplo, si en la segunda década la frecuencia era cada 10 meses y en la primera cada 5 meses, el cambio positivo indicaba que se alargaba el periodo o intervalo en 5 meses, con la consecuente disminución de la frecuencia del evento para ese pixel.

Por último, para evaluar la frecuencia con que las diferentes coberturas de la tierra se veían afectadas por incendios, se utilizó la base de datos MCD12Q1, también derivada de MODIS, que contiene información sobre el tipo de cobertura terrestre anual (**Friedl & Sulla-Menashe, 2019**) con una resolución espacial de 500 m. Usando la información del área quemada calculada anteriormente, se construyeron diferentes colecciones de imágenes desde el 2001 y se calculó la frecuencia por tipo de cobertura para todos los pixeles detectados como quemados desde ese año. Se utilizó la banda *Cover Type 1* del producto MODIS MCD12Q1, la cual se refiere a una clasificación de tipos de cobertura terrestre usando la metodología del IGBP (Programa Internacional de Geosfera-Biosfera). Este producto ha sido ampliamente utilizado como referencia para obtener datos de cobertura del suelo (**Fornacca, et al., 2017**), para estudiar las relaciones entre

el área quemada, la pérdida de bosques y los cambios de cobertura (Fanin & Van Der Werf, 2015), o para analizar la relación entre el cambio climático, los incendios y los cambios en la vegetación (Safronov, 2020) o el área quemada en relación con los tipos de cobertura del Atlas Global de Incendios (Andela, *et al.*, 2018). Se reclasificaron las categorías originales y el análisis se centró en las cinco categorías de cobertura del suelo más afectadas por los incendios (Tabla 1): a) bosques; b) sabanas leñosas; c) sabanas; d) pastizales, y e) tierras de cultivo.

Una limitación clave de esta clasificación es la incapacidad de discernir el uso humano de la vegetación dominada por pastos, ya que los pastizales naturales y los pastizales de uso antropogénico se fusionan bajo una sola cobertura de la tierra. Por último, este conjunto de datos de tipos de cobertura terrestre de MODIS tiene información anual, de la cual se extrajeron las cuadrículas anuales para Colombia. Se hizo un análisis por décadas para detectar en cuál había un incremento en la proporción de bosques y otras coberturas afectados con una mayor frecuencia.

Resultados

Variabilidad temporal del área quemada entre el 2001 y el 2020

El área quemada en Colombia tuvo una gran variabilidad entre años, con una tendencia negativa en el tiempo y con el máximo valor detectado de área quemada en febrero del 2007, con 2.521.762 ha, seguido de febrero del 2004, con 1.850.019 ha, y enero del 2003, con 1.586.056 ha (Figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1514/3191>). El área quemada detectada mensualmente en Colombia durante el período comprendido entre el 2001 y marzo del 2020 evidenció que en el mes de febrero hubo en promedio 777.300 ha quemadas (± 577.443 DE), seguido de enero, con 689.014 ha (± 402.317 DE). En la primera década del siglo (2000-2010) los promedios mensuales fueron más elevados (Figura 1) en febrero, con 999.294 ha ± 714.800 , y enero, con 822.549 ha ± 461.498 , y disminuyeron en febrero a 555.365 ha ± 288.972 y en enero a 555.479 ha ± 298.489 en la segunda década (2011-2020).

Tabla 1. Categorías de cobertura del suelo más afectadas por los incendios y correspondencia con categorías del producto MODIS MCD12Q1

Categoría	Categorías originales MCD12Q1 (número de categoría) y descripción
Bosques	<i>Evergreen Needleleaf</i> (Tipo 1) o bosques de hoja aguja de hoja perenne: dominados por coníferas de hoja perenne (dosel: >2 m). Cobertura arbórea: > 60 % <i>Evergreen Broadleaf</i> (Tipo 2) o bosques de hoja perenne de hoja ancha: dominados por árboles de hoja perenne de hoja ancha y palmeados (dosel >2 m). Cobertura arbórea: > 60 %. <i>Decidious Broadleaf</i> (Tipo 4) o bosques caducifolios de hoja ancha: dominados por árboles caducifolios de hoja ancha (dosel: > 2 m). Bosques mixtos (Tipo 5), definidos como bosques dominados por tipos de árboles que no son caducifolios ni perennes (40-60 % de cada uno) (dosel: >2m). Cobertura arbórea: > 60%.)
Sabanas leñosas	<i>Woodland Savannas</i> (Tipo 8), sabanas leñosas con cobertura de árboles de 30 a 60 % (dosel: > 2 m)
Sabanas	<i>Savannas</i> (Tipo 9) o sabanas definidas como áreas con cobertura de árboles de 10 a 30 % (dosel: > 2 m).
Pastizales	<i>Grasslands</i> (Tipo 10) o cobertura dominada por plantas anuales herbáceas (< 2 m)
Tierras de cultivo	<i>Croplands</i> (Tipo 12), áreas en que al menos el 60 % corresponde a tierras de cultivo cultivadas.

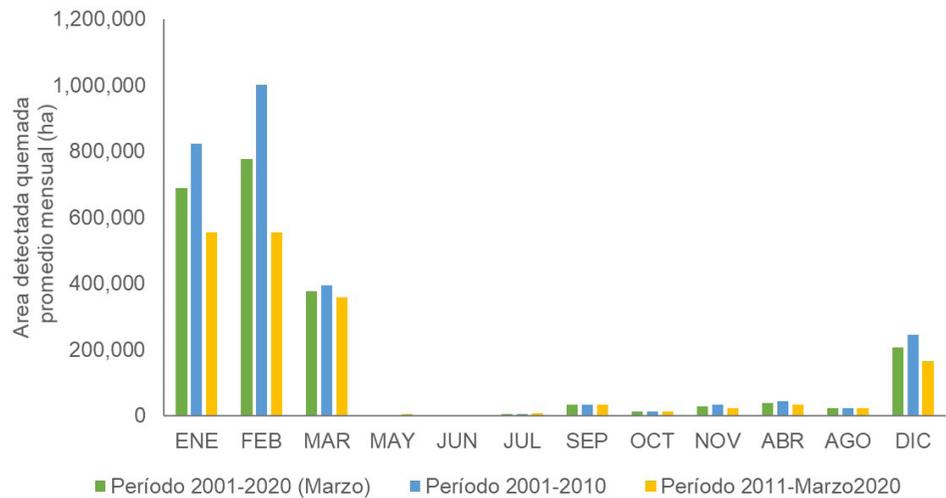


Figura 1. Promedio de área mensual quemada detectada para el período 2001-2020 y para las décadas 2001-2010 y 2011-2020

Configuración espacial de los fragmentos detectados como área quemada

Con respecto a la configuración espacial de las cicatrices o de los parches quemados detectados por el producto MODIS en términos del tamaño promedio de los fragmentos quemados o cicatrices de área quemada (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1514/3191>), para todo el periodo de 2000 a 2020 el tamaño fue de 192,3 ha ($\pm 98,9$ DE), aunque este promedio varió al considerarlo por décadas: la primera década con 188,75 ha ($\pm 95,9$ DE) Vs. 196,2 ha en promedio ($\pm 102,5$ DE) en las cicatrices de la segunda década del siglo, con una tendencia al aumento de tamaño de estas cicatrices desde el 2011 (**Figura 2a y b**). En términos del número de fragmentos (o parches), aunque anualmente se detectaron en promedio 770 fragmentos ($\pm 280,2$ DE), también se encontró variación entre la primera y la segunda décadas, con una tendencia a aumentar el número de fragmentos quemados que se detectaron en el segundo período de análisis (**Figura 3a y b**). Por último, en términos de configuración espacial, la distancia al vecino más cercano en promedio fue de 18,2 Km (± 12 Km DE), con una tendencia a disminuir para todo el período y para ambas décadas, lo que indica que los fragmentos quemados detectados están cada vez más cercanos entre ellos (**Figura 4**).

Frecuencia de detección de área quemada

La **figura 5** ilustra el patrón de la frecuencia de área quemada detectada en términos de cada cuántos meses se detectó un pixel quemado. Las frecuencias más altas correspondieron a una vez al año (11-12 meses) y cada dos años (13-24 meses), mayoritariamente en la región de la Orinoquia, pero también en la Sabanas de Yari y en la parte baja de la Sierra Nevada de Santa Marta. En términos de cómo ha cambiado la frecuencia entre las dos décadas del siglo XXI, la **figura 6** evidencia cómo para los valores positivos se alargó el periodo y, por lo tanto, la frecuencia de detección de área quemada bajó después del 2011. Para los valores negativos se acortó el periodo y, por lo tanto, aumentó la frecuencia de detección de áreas quemadas, es decir, hubo una tendencia a una mayor frecuencia en la detección de área quemada. En total, en el 51,5 % del área afectada aumentó la frecuencia después del 2011 y en el 48,5 % del área hubo una disminución en la frecuencia de incendios.

En términos generales, el 85,9 % del total de los pixeles de bosques afectados por incendios presentó una frecuencia de un incendio para el periodo, pero este porcentaje varió entre décadas, pues hasta el 2010 fue del 86,8 % y en la segunda década del siglo, en el 87,2 % de bosques quemados hubo una frecuencia de un incendio. En este mismo sentido, los bosques afectados más de dos veces aumentaron del 9,5 % al 9,9 % después

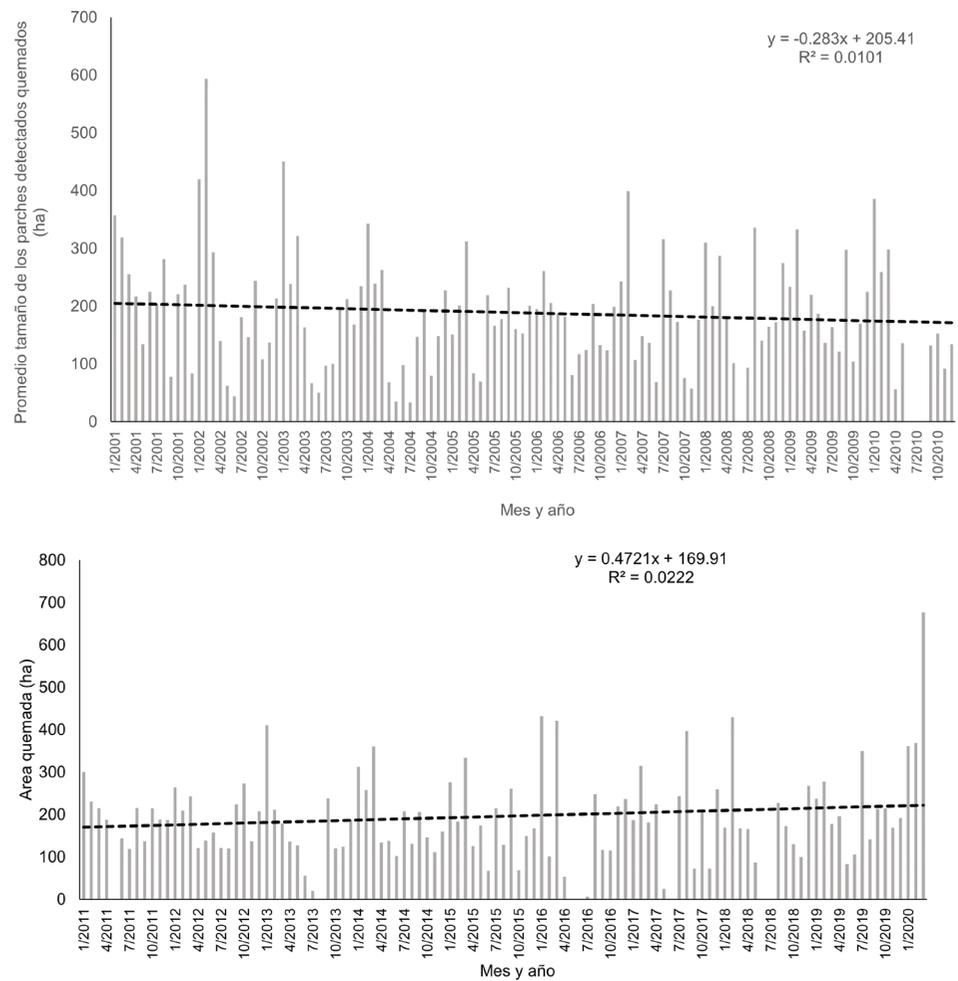


Figura 2. Promedio mensual del tamaño de los parches quemados detectados y tendencia en el tiempo para las décadas: **a)** 2001-2010 y **b)** 2011-2020

del 2010. Los bosques con más de tres incendios, en cambio, pasaron de un 3,7 % a un 2,9 %. En las dos coberturas de tipo sabana se evidenció un aumento en el porcentaje de píxeles afectados con una y dos quemaduras en sus respectivos periodos, patrón que también se detectó para los pastizales (**Figura 7**). La única cobertura en la que se apreció una disminución de la frecuencia de afectación de área quemada fue en la de cultivos, pues la frecuencia de un incendio pasó de 74,4 % antes del 2010 a 71,5 % del total después del 2010, aunque la frecuencia de dos sí tuvo un aumento sustancial del 12,6 % al 20,2 % del total del área afectada. Las sabanas y los pastizales fueron las coberturas con mayor frecuencia de incendios. El 21,6 % del área de sabanas se quemó dos veces en la primera década y un 37 %, tres veces o más, en tanto que después del 2010 el 23,6 % de los píxeles apareció quemado dos veces y un 29,2 % registró una frecuencia de tres o más. Para el caso de los pastizales, tanto en la primera como en la segunda década el mayor porcentaje de cobertura se quemó tres o más veces, el 44,3 % en la primera década y el 31,5 % después del 2010.

Discusión y conclusiones

El análisis espaciotemporal de los parámetros del régimen de incendios en Colombia confirmó la variabilidad en un mismo año asociada con la temporada seca y la presencia de incendios que ya se ha documentado. Los meses de enero y febrero fueron los de

mayor cantidad de área quemada detectada satelitalmente y los años 2003, 2004 y 2007, los de mayor incidencia en este sentido (Armenteras-Pascual, *et al.*, 2011). Uno de los parámetros que llama la atención en este estudio actualizado es la tendencia a una menor extensión detectada como área quemada en la segunda década del siglo, lo cual podría deberse a que en la primera década del siglo ocurrieron dos fuertes fenómenos de El Niño: 2002-2003 (estación seca del 2003) y 2006-2007 (estación seca del 2007), con muy pocos niveles de precipitación, lo que hizo que muchos bosques lluviosos tropicales experimentaran una mayor actividad de incendios (van der Werf, *et al.*, 2006).

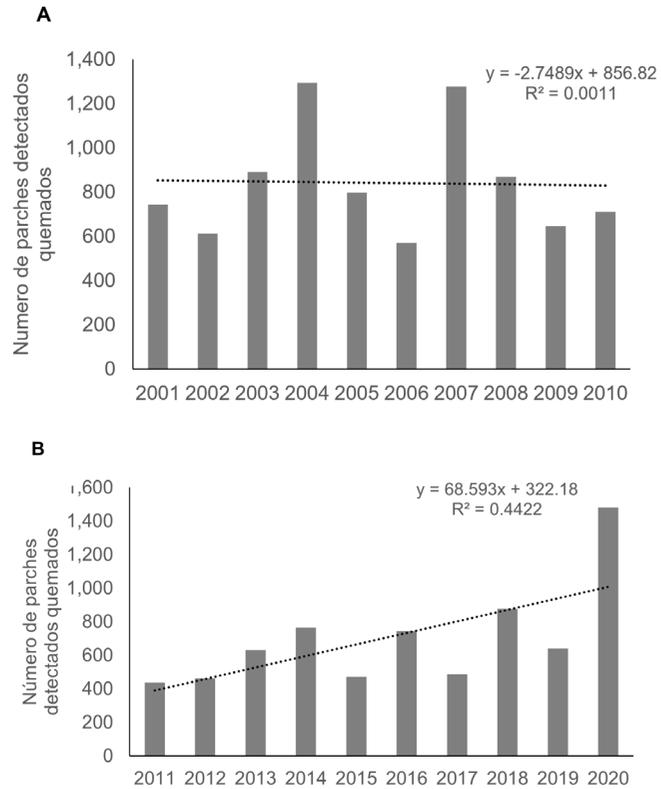


Figura 3. Promedio del número de parches quemados detectados por mes y tendencia en el tiempo para las décadas: **a)** 2001-2010 y **b)** 2011-2020

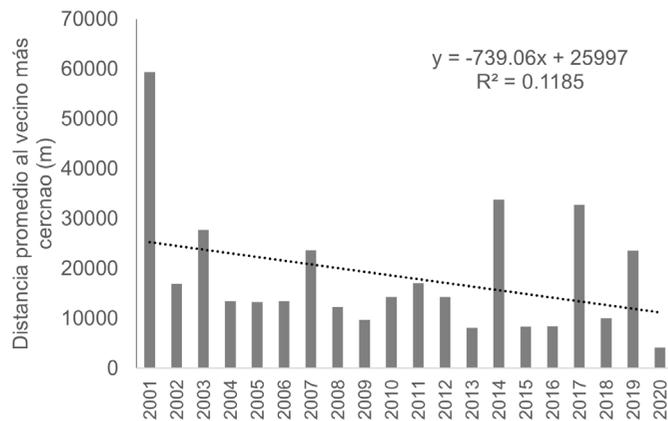


Figura 4. Distancia promedio al vecino más cercano entre los parches quemados detectados y tendencia en el tiempo para el período 2001-2020

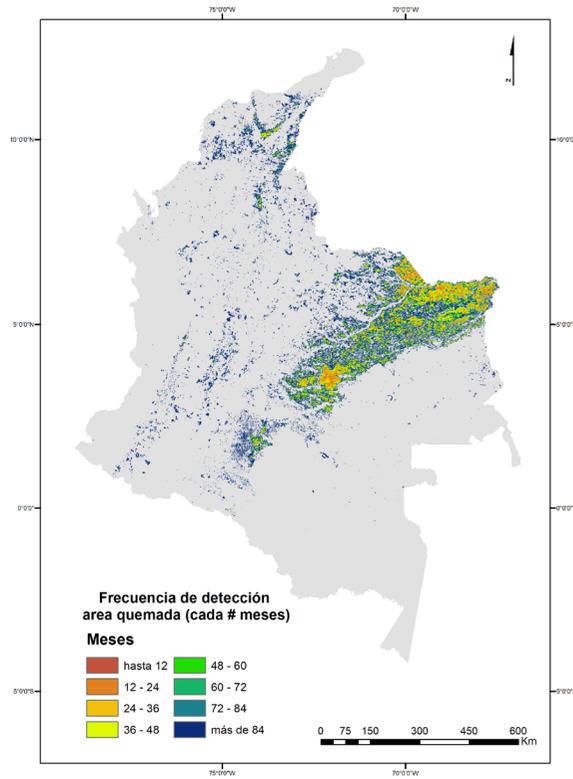


Figura 5. Mapa de frecuencia de detección de área quemada para el período 2001-2020

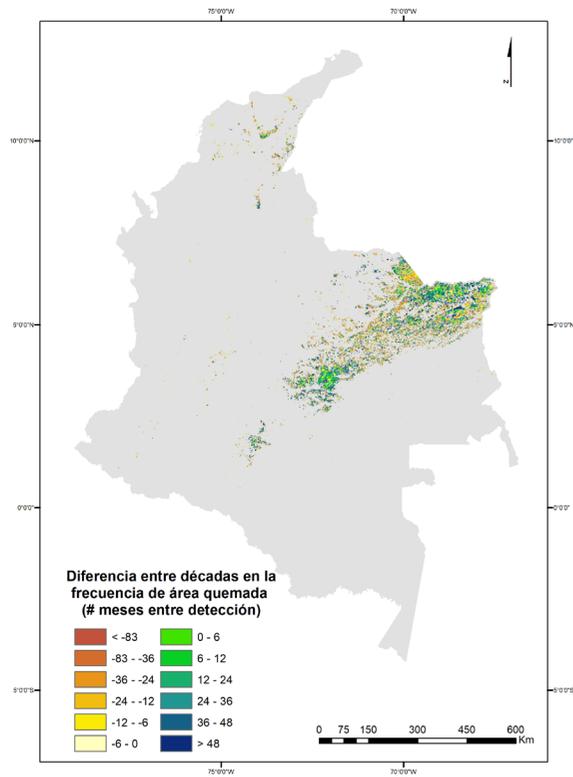


Figura 6. Mapa de cambio en la frecuencia de detección de área quemada entre las décadas 2001-2010 y 2011-2020

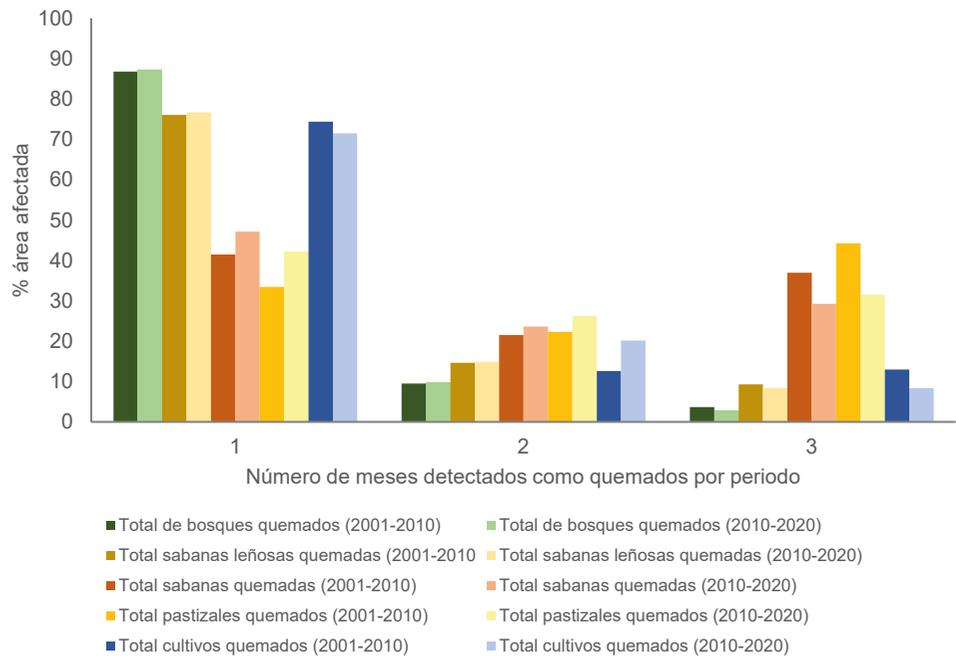


Figura 7. Porcentaje del total de píxeles por tipo de cobertura y por frecuencia de quema para el periodo correspondiente

Los resultados en términos de otros parámetros espaciales, como el tamaño y el número de incendios, indican, en cambio, una tendencia a que aumentaran los fragmentos detectados como quemados y a que fueran más grandes en la segunda década del siglo. Además, las cicatrices de área quemada estuvieron cada vez más cerca. No obstante, también se observó que han disminuido los incendios pequeños o que, a lo mejor, son mitigados más rápidamente. Generalmente esta tendencia es evidencia de que los paisajes se convierten en zonas con menos incendios, pero con mayores áreas afectadas que posiblemente se quemen de forma más intensa (Alencar, *et al.*, 2015).

En términos de frecuencia, la gran variabilidad que encontramos en el país demuestra que en la segunda década del siglo hubo zonas donde disminuyeron los incendios en comparación con la primera década del siglo, en tanto que en otras ha sucedido lo contrario. De nuevo esto indica un cambio en el patrón espacial y un aumento en la frecuencia de incendios focalizados en zonas de sabana, principalmente de la Orinoquia. Las primeras conclusiones de estos resultados preliminares es que los bosques, las sabanas leñosas y los cultivos son las coberturas con mayor proporción de una quema, en tanto que las sabanas abiertas, como los pastizales, tienden a una mayor frecuencia de quemados, independientemente de la década analizada. Se evidencia, asimismo, que un estudio detallado por región y ecosistema puede ayudar a dimensionar mejor el cambio en el régimen de fuego en cada caso. En este sentido, por ejemplo en Brasil los grandes incendios poco frecuentes son responsables de la mayoría del área quemada. Estos grandes incendios muestran tendencias positivas en muchas ecorregiones, mientras que los incendios más pequeños, aunque más frecuentes, han ido disminuyendo en número (Silva, *et al.*, 2021).

Se presenta aquí una serie de tiempo de 20 años de datos de cicatrices o parches quemados detectados a partir de datos satelitales y recolectados para verificar si se había producido un cambio en algunas propiedades del régimen de incendios en Colombia. Es necesario avanzar en la comprensión de este fenómeno, no solo en el largo plazo sino en cada ecosistema en particular. Los incendios más grandes y más frecuentes pueden ocasionar degradación de los ecosistemas e incrementar la tasa de emisión de carbono a nivel nacional, por lo que estos aspectos deben incorporarse en las comunicaciones nacionales sobre

cambio climático y, sin duda, sobre los efectos sinérgicos de un clima futuro más seco, con más fuentes de ignición, así como de la ausencia de prevención, lo que hace urgente una modificación en las prácticas de manejo del territorio que vaya más allá de la supresión de los incendios y contemple la preparación y prevención frente ellos.

Agradecimientos

A Joan Sebastián Barreto por su apoyo en la descarga de la información y la estructuración de la base de datos.

Información suplementaria

Figura 1S. Serie de tiempo de área detectada quemada mensual (ha) a partir del producto MODIS Fire_cci v5.1 (enero 2001 a marzo 2020). Ver figura 1S en <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1514/3191>

Figura 2S. Promedio mensual del tamaño de los parches quemados detectados y tendencia en el tiempo para el período 2001-2020. Ver figura 2S en <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1514/3191>

Conflicto de intereses

La autora declara que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Alencar, A. A., Brando, P. M., Asner, G. P. & Putz, F. E.** (2015). Landscape fragmentation, severe drought, and the new Amazon forest fire regime. *Ecological Applications*. **25** (6): 1493-1505. <https://doi.org/10.1890/14-1528.1>
- Andela, N., Morton, D. C., Giglio, L., Paugam, R., Chen, Y., Hantson, S., van der Werf, G. R., Randerson, J. T.** (2018). The Global Fire Atlas of individual fire size, duration, speed, and direction. *Earth System Science Data Discussions*. August 2018: 1-28. <https://doi.org/10.5194/essd-2018-89>
- Andela, N., Van Der Werf, G. R., Kaiser, J. W., Van Leeuwen, T. T., Wooster, M. J., Lehmann, C. E. R.** (2016). Biomass burning fuel consumption dynamics in the tropics and subtropics assessed from satellite. *Biogeosciences*. **13** (12): 3717-3734. <https://doi.org/10.5194/bg-13-3717-2016>
- Aragão, L. E. O. C. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., Silva, C. V. J. J., Silva Junior, C. H. L. L., Arai, E., Aguiar, A. P., Barlow, J., Berenguer, E., Deeter, M. N., Domingues, L. G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J. A., Miller, J. B., Saatchi, S.** (2018). 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*. **9** (1): 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Armenteras-Pascual, D., Retana-Alumbreros, J., Molowny-Horas, R., Roman-Cuesta, R. M., González-Alonso, F., Morales-Rivas, M.** (2011). Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*. **151** (3): 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.11.002>
- Armenteras, D., Dávalos, L. M., Barreto, J. S., Miranda, A., Hernández-Moreno, A., Zamorano-Elgueta, C., González-Delgado, T. M., Meza-Elizalde, M. C., Retana, J.** (2021). Fire-induced loss of the world's most biodiverse forests in Latin America. *Science Advances*. **7** (33): 2-10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd3357>
- Baccini A., W., Walker, L., Carvahlo, M., Farina, D., Sulla-Menashe, R., Houghton.** (2017). Tropical forests are a net carbon source based on new measurements of gain and loss. *Science*. [10.1126/science.aam5962](https://doi.org/10.1126/science.aam5962)
- Bowman, D. M. J. S., Murphy, B. P., Williamson, G. J., Cochrane, M. A.** (2014). Pyrogeographic models, feedbacks and the future of global fire regimes. *Global Ecology and Biogeography*. **23** (7): 821-824. <https://doi.org/10.1111/geb.12180>
- Brando, P. M., Silvério, D., Maracahipes-Santos, L., Oliveira-Santos, C., Levick, S. R., Coe, M. T., Migliavacca, M., Balch, J. K., Macedo, M. N., Nepstad, D. C., Maracahipes, L., Davidson, E., Asner, G., Kolle, O., Trumbore, S., Kolle, O., Brando, P. M., Maracahipes,**

- L., Coe, M. T., Davidson, E. (2019). Prolonged tropical forest degradation due to compounding disturbances: Implications for CO₂ and H₂O fluxes. *Global Change Biology*. **25** (9): 2855-2868. <https://doi.org/10.1111/gcb.14659>
- Buma, B. (2015). Disturbance interactions: Characterization, prediction, and the potential for cascading effects. *Ecosphere*. **6** (4): 1-15. <https://doi.org/10.1890/ES15-00058.1>
- Chuvieco, E., Pettinari, M. L., Lizundia-Loiola, J., Storm, T., Padilla-Parellada, M. (2018). ESA Fire Climate Change Initiative (Fire_cci): MODIS Fire_cci Burned Area Pixel product, version 5.1. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5285/58f00d8814064b79a0c49662ad3af537>
- Cochrane, M. A. (2003). Fire science for rainforests. *Nature*. **421**: 913-918.
- Curtis, P. G., Slay, C. M., Harris, N. L., Tyukavina, A., Hansen, M. C. (2018). Classifying drivers of global forest loss. *Science*. **361** (6407): 1108-1111. <https://doi.org/10.1126/science.aau3445>
- Fanin, T. & Van Der Werf, G. R. (2015). Relationships between burned area, forest cover loss, and land cover change in the Brazilian Amazon based on satellite data. *Biogeosciences*. **12** (20): 6033-6043. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6033-2015>
- Fornacca, D., Ren, G., Xiao, W. (2017). Performance of Three MODIS fire products (MCD45A1, MCD64A1, MCD14ML), and ESA Fire CCI in a mountainous area of Northwest Yunnan, China, characterized by frequent small fires. *Remote Sensing*. **9** (11): 1-20. <https://doi.org/10.3390/rs9111131>
- Friedl, M. & Sulla-Menashe, D. (2019). MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>
- Giglio, L., Justice, C., Boschetti, L., Roy, D. (2015). MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>
- Hirota, M., Holmgren, M., Van Nes, E. H., Scheffer, M., Nes, E. H. Van, Holmgren, M., Hirota, M., Scheffer, M., Ratajczak, Z., Nippert, J. B., Hirota, M., Holmgren, M., Van Nes, E. H., Scheffer, M., Ratajczak, Z., Nippert, J. B., Nes, E. H. Van, Holmgren, M., Hirota, M., Scheffer, M. (2011). Global Resilience of Tropical Forest and Savanna to Critical Transitions. *Science*. **334** (6053): 232-235. <https://doi.org/10.1126/science.1210657>
- IDEAM, IGAC, IAvH, Invemar, Sinchi, IAP. (2007). Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés, Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi e Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico Jhon von Neumann. Bogotá, DC
- Lizundia-Loiola, J., Pettinari, M. L., Chuvieco, E. (2020). Temporal Anomalies in Burned Area Trends: Satellite Estimations of the Amazonian 2019 Fire Crisis. *Remote Sensing*. **12** (1): 151. <https://doi.org/10.3390/rs12010151>
- Loepfe, L., Lloret, F., Román-Cuesta, R. M. (2012). Comparison of burnt area estimates derived from satellite products and national statistics in Europe. *International Journal of Remote Sensing*. **33** (July): 3653-3671. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.631950>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., Ene, E. (2002). FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. University of Massachusetts. www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html
- Nogueira, E. M., Yanai, A. M., Fonseca, F. O. R., Fearnside, P. M. (2015). Carbon stock loss from deforestation through 2013 in Brazilian Amazonia. *Global Change Biology*. **21** (3): 1271-1292. <https://doi.org/10.1111/gcb.12798>
- Olson, D. M. & Dinerstein, E. (2002). The Global 200: Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. **89**: 199-224. <http://www.jstor.org/stable/10.2307/3298564>
- Ressl, R., López, G., Cruz, I., Colditz, R. R., Schmidt, M., Ressler, S., Jiménez, R. (2009). Operational active fire mapping and burnt area identification applicable to Mexican Nature Protection Areas using MODIS and NOAA-AVHRR direct readout data. *Remote Sensing of Environment*. **113** (6): 1113-1126. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.016>
- Safronov, A. N. (2020). Effects of climatic warming and wildfires on recent vegetation changes in the Lake Baikal basin. *Climate*. **8** (4): 57. <https://doi.org/10.3390/cli8040057>

-
- Seymour, F. & Harris, N. L.** (2019). Reducing tropical deforestation. *Science*. **365** (6455): 756-757. <https://doi.org/10.1126/science.aax8546>
- Silva, P. S., Nogueira, J., Rodrigues, J. A., Santos, F. L. M., Pereira, J. M. C., DaCamara, C. C., Daldegan, G. A., Pereira, A. A., Peres, L. F., Schmidt, I. B., Libonati, R.** (2021). Putting fire on the map of Brazilian savanna ecoregions. *Journal of Environmental Management*. **296**: 113098. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113098>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Kasibhatla, P. S., Arellano, A. F.** (2006). Interannual variability of global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. **6** (2): 3175-3226. <https://doi.org/10.5194/acpd-6-3175-2006>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., Morton, D. C., DeFries, R. S., Jin, Y., van Leeuwen, T. T.** (2010). Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. **10** (6): 16153-16230. <https://doi.org/10.5194/acpd-10-16153-2010>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N., Dolman, A. J.** (2008). Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. *Global Biogeochemical Cycles*. **22** (3): 1-13. <https://doi.org/10.1029/2007GB003122>