



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Eficiencia de las áreas protegidas frente a incendios forestales en los bosques tropicales del planeta

CARDIL, A^{1,2,3}, DE-MIGUEL, S^{1,2}

¹ Joint Research Unit CTFC - AGROTECNIO - CERCA, Solsona, Spain.

² Department of Crop and Forest Sciences, University of Lleida, Lleida, Spain.

³ Technosylva Inc, La Jolla, CA, USA.

Resumen

El fuego ha modificado el paisaje a lo largo de la historia y es esencial para el mantenimiento de la biodiversidad y el funcionamiento de muchos ecosistemas. Si bien muchas especies son muy sensibles al fuego, algunas lo requieren para su regeneración y supervivencia. Sin embargo, cambios en el régimen de incendios pueden dificultar la respuesta adaptativa de las plantas a este tipo de perturbación, resultando en un reemplazo del ecosistema original por otro más adaptado al nuevo régimen. Los incendios, en áreas no degradadas del bosque húmedo tropical, han sido históricamente raros. Sin embargo, aquellos asociados con la deforestación y cambios de uso del suelo son frecuentes. Los bosques tropicales albergan un gran porcentaje de áreas protegidas por tener gran interés ambiental y para proteger el territorio frente a perturbaciones antrópicas, como los incendios forestales.

En este estudio, analizamos el efecto de las áreas protegidas sobre el área quemada y tamaño de los incendios en el bosque tropical húmedo a nivel global en el periodo 2000-2020. Además, analizamos los factores subyacentes que influencian los regímenes de incendios dentro de las áreas protegidas, incluyendo variables meteorológicas, de uso del suelo, topográficas o socioeconómicas. Nuestro análisis muestra que el área quemada en las áreas protegidas no ha disminuido en el período de estudio y cómo la efectividad de estas zonas sobre la actividad de incendios forestales varió entre continentes, siendo solamente este efecto significativo en las Américas. A escala global, la actividad de incendios en áreas protegidas se correlacionó significativamente de forma positiva con la pérdida de la cobertura arbórea (deforestación), la aridez, la huella humana, la amenaza de expansión agrícola, la densidad de población humana y se negativamente con la falta de accesibilidad y porcentaje de cubierta forestal.

Palabras clave

Bosque tropical húmedo, deforestación, perturbaciones, degradación, cambio global, fuego.

1. Introducción

Los bosques tropicales merecen atención mundial por su papel secuestrando alrededor del 25 % del carbono en la biosfera terrestre. Además, son puntos de alta biodiversidad y albergan al menos dos tercios de los organismos del mundo. Si bien los incendios en el pasado históricamente han dado forma a los paisajes, han mantenido la biodiversidad e impulsado la evolución de los ecosistemas (Bowman et al., 2011), los cambios en el régimen de incendios pueden dificultar la respuesta de las plantas al fuego, alterando el equilibrio de ecosistemas forestales. La mayoría de las especies vegetales en los bosques tropicales húmedos están mal adaptadas al fuego (Lovejoy y Nobre 2018; Cardil et al., 2020) y los regímenes de fuego alterados podrían impulsar un cambio hacia un estado alternativo de ecosistema de matorrales tropicales (Lovejoy y Nobre 2018). La vulnerabilidad de la selva tropical al fuego tiene implicaciones crecientes en lo que respecta al equilibrio del global con elevadas emisiones de carbono que contribuyen al calentamiento global y potencian aún más los incendios en un ciclo de retroalimentación climática positiva (Cardil et al., 2020).

Si bien estudios recientes han informado de una disminución significativa en el área quemada global (BA) en las últimas dos décadas, también se observó la tendencia opuesta en áreas con

bosque tropical húmedo (Andela et al., 2017). En el siglo pasado, los biomas tropicales sufrieron perturbaciones antropogénicas debido a la expansión agrícola, la tala, la ganadería, la urbanización, la minería, y la construcción de carreteras. Estas perturbaciones suelen contribuir a aumentar la inflamabilidad del combustible y el BA (Cardil et al., 2020). De manera alarmante, la situación antes mencionada también coincide con condiciones climáticas más propicias para incendios forestales (Abatzoglou y Kolden, 2013). Este efecto combinado ha precipitado la mortalidad de árboles a gran escala y la disminución de las reservas de carbono en las últimas décadas debido a razones que van desde el aumento de la biomasa muerta hasta la reducción de la resiliencia forestal y la sensibilidad de los bosques secundarios.

Dadas las amenazas tanto para la sociedad como para el medio ambiente de la presión humana y las perturbaciones naturales, incluidos los incendios severos y descontrolados, las áreas protegidas (PA) han sido diseñadas para salvaguardar los ecosistemas y conservar la biodiversidad y reducir las emisiones de carbono a la atmósfera. Las PA son espacios geográficos claramente definidos que abarcan bosques vulnerables y/o valiosos, y están destinados a mantener prácticas de conservación a largo plazo junto con la preservación de los servicios ecosistémicos y los valores culturales. Investigaciones previas evaluaron la eficacia de las PA como herramienta para conservar la cubierta forestal y las reservas de carbono en comparación con las áreas no protegidas de las regiones tropicales (Graham et al., 2021; Shah 2021), algunos de las cuales analizando la actividad de los incendios como variable explicativa (Adeney et al., 2009, Nelson 2011). Otros trabajos analizaron la efectividad de las PA en función de su uso estricto o múltiple (Nelson 2011) y los factores que controlan los incendios en las PA a escala regional (Biswas 2015; Adeney et al., 2009), siendo los más influyentes la distancia a las carreteras y principales ciudades, características de la vegetación, y la meteorología (Adeney et al., 2009; Nelson 2011).

2. Objetivos

En este trabajo analizamos la efectividad de las PA en la reducción de BA en bosques húmedos tropicales a escala global y, por primera vez según el conocimiento de los autores, cómo la vegetación, el clima y los factores antropogénicos afectan la actividad de incendios en las PA, considerando la frecuencia de incendios (FN), tamaño y BA total.

3. Metodología

a. Datos

Utilizamos la base de datos mundial más completa sobre áreas protegidas terrestres (WDPA), actualizada en enero de 2020, de un proyecto conjunto entre ONU y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). También la capa de Biomas de WWF que incluye el bioma del bosque tropical húmedo.

Los datos de incendios se obtuvieron de una base de datos global de perímetros de incendios delineados para el análisis de los regímenes y el comportamiento del fuego desde 2000 hasta 2020 (Artès et al., 2019). La base de datos se produce mediante un proceso que utiliza la Colección 6 de productos de área quemada de MODIS (MCD64A1) y permite caracterizar los incendios por tipologías (tamaño, propagación, comportamiento, etc.). También se proporciona información sobre el tiempo estimado de ignición y el perímetro final del incendio. Extrajimos para cada incendio individual, con base a su centroide, si el incendio se propagó en un área protegida y covariables climáticas (índices de aridez: AI), de vegetación (FC: cobertura forestal; Floss: perdida de bosque), topográficas, del suelo y antropogénicas asociadas (HF: huella humana; DTla: Amenaza de avance de la frontera agrícola; HDP: densidad de población humana; RA: ausencia de infraestructuras viarias). Las covariables utilizadas en este trabajo fueron parcialmente identificadas por estudios previos (Juárez-Orozco et al., 2017), y controlan directamente o son sustitutos de controles mecanicistas conocidos sobre el comportamiento del fuego y la ocurrencia de incendios forestales.

b. Análisis estadístico

Se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para probar diferencias en el tamaño de los incendios considerando la variable PA por continente. La prueba Chi-cuadrado para analizar diferencias entre el porcentaje de BA en áreas protegidas o no protegidas en cada continente. El test de Mann-Kendall se utilizó para analizar las tendencias temporales en el área quemada. Finalmente, agregamos los datos de incendios en píxeles de $0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$ para realizar análisis estadísticos detallados y rigurosos. En este sentido, se utilizó un análisis de redundancia (RDA), realizado con el paquete vegan de R (Oksanen et al., 2019), para investigar las posibles asociaciones entre la actividad del fuego (número de incendios, tamaño y área quemada) y los posibles factores que podrían influenciar estas variables (Floss: perdida de bosque; HF: huella humana; DTla: Amenaza agrícola; HDP: densidad de población humana; AI: Índice de aridez; FC: cobertura forestal; RA: ausencia de caminos) en áreas protegidas en el bioma bosque húmedo tropical en el período 2000-2020. El análisis de redundancia es un enfoque multivariante ampliamente utilizado para modelar la asociación de un conjunto de variables respuesta a diferentes factores explicativos. Similar al Análisis de componentes principales (PCA), RDA descompone la información en varias dimensiones que representan patrones de asociación independientes. A diferencia de PCA, RDA permite especificar múltiples variables respuesta, de modo que las nuevas dimensiones representen el grado de asociación entre los factores de entrada y las respuestas específicas. La significación del efecto de las restricciones se analizó a través de una prueba de permutación ANOVA. Se pueden encontrar más detalles sobre la técnica RDA en (Legendre y Legendre, 2012).

4. Resultados

El porcentaje global de área protegida en el bioma de bosque húmedo tropical varía según los continentes, siendo América la región con mayor área protegida (26 % aproximadamente) y Asia y Oceanía la más baja con solo el 5% del territorio protegido. África tiene protegido entorno al 15% del bosque tropical húmedo protegido. La distribución por continentes de las PA se muestra en la figura 1 junto a la actividad de incendios forestales. Nuestro análisis evidenció la falta de tendencia temporal en términos de actividad del fuego (BA, FN y tamaño) en el bosque húmedo tropical en el período 2000-2020 a escala global y continental (Prueba de Mann-Kendall; $P > 0.35$). De manera similar, el BA tampoco disminuyó solamente considerando las áreas protegidas ($P > 0.76$), evidenciando que los incendios forestales no están disminuyendo en este tipo de ecosistema tan sensible.

En la figura 1 también se muestra la distribución de área quemada en la zona de estudio para el período analizado. Es evidente que zonas con alta presión humana (por ejemplo, la zona de frontera agrícola alrededor de la Amazonía) tuvieron una actividad mayor de incendios forestales, tal y como reflejan distintos estudios realizados sobre los factores que modulan la actividad de incendios forestales (Cardil et al., 2020). Sin embargo, las zonas con protección tuvieron una actividad significativamente inferior a las zonas con menos protección en América, África y Oceanía, tal y como señala la Figura 2. No ocurrió lo mismo en Asia donde estas zonas no mitigaron la ocurrencia de incendios, probablemente por el bajo nivel de protección a escala de ecosistema (5%). Las zonas indígenas protegidas tuvieron una actividad de incendios menor en relación a otros tipos de protección.

Los incendios que se propagaron en las áreas protegidas fueron significativamente más grandes tanto en América del Sur como en América Central, mientras que en África fueron más pequeños (Fig. 1B). El resultado del análisis RDA mostró el efecto significativo de las variables antropogénicas que explican la actividad del fuego en áreas protegidas en términos de FN, BA y FS a escala global ($F = 87.929$; $P < 0.001$; Fig. 3) y continental (Américas; África; Asia y Oceanía; $P < 0.001$; Fig. 3). A escala global, la actividad de incendios se correlacionó positivamente con la pérdida de la cobertura boscosa, la huella humana, la amenaza de expansión agrícola, la densidad de población

humana y se correlacionó negativamente con la falta de carreteras, el índice de aridez (mayor cuando disminuye la aridez) y la cubierta forestal, resultados en concordancia con análisis previos (Nelson 2011). Tanto el área quemada como el tamaño de los incendios estuvieron estrechamente relacionados con la cubierta forestal y la aridez, mientras que la ocurrencia del incendio estuvo asociada con la presión humana directa sobre el paisaje. Sin embargo, los factores analizados que conducen a una alta actividad de incendios variaron entre continentes (Fig. 3). El número de incendios (FN) se correlacionó directamente con variables antrópicas en América (Floss, DTIa, HF) y negativamente con el índice de aridez y la ausencia de caminos. En África, el factor más importante fue la perdida de cobertura forestal (Floss) y Asia y Oceanía no encontramos un patrón significativo. En términos de área quemada (BA), en América estuvo correlacionada directamente con la cobertura arbórea, al igual que en el resto de continentes. La aridez y la ausencia de caminos fueron factores que amplificaron la actividad de incendios en términos de área quemada en los tres continentes. Finalmente, el tamaño de incendios estuvo muy correlacionado en Asia y Oceanía en las zonas con amenaza de expansión agrícola, huella humana, la perdida de cubierta forestal y su cobertura, señalando que la presión antrópica podría derivar incendios más grandes. En África, los incendios más grandes se vincularon a bajas coberturas arbóreas, alta aridez, zonas remotas y con alta amenaza agrícola. En América, el patrón encontrado es que el tamaño de los incendios se relaciona con el porcentaje de cobertura arbórea.

5. Discusión

Estudios previos utilizaron el área quemada como proxy para evaluar la efectividad de las PA contra la deforestación en el bosque húmedo tropical (Adenay 2009; Nelson 2011), ya que la mayoría de los incendios son provocados por deforestación reciente previa (Cardil et al., 2020). Sin embargo, el análisis de los regímenes de incendios es clave para comprender mejor la dinámica de esta perturbación natural en el tiempo, por lo que este trabajo contribuye a explicar mejor el fenómeno de los incendios en las regiones tropicales, ya que analiza el área quemada, la frecuencia y el tamaño de los incendios, así como los factores antropogénicos y climáticos que explican este fenómeno en áreas protegidas. Es bien sabido que los efectos del fuego están relacionados con su comportamiento y las adaptaciones de los ecosistemas al fuego. Mientras que algunos incendios pueden ser beneficiosos cuando ocurren en concordancia con los regímenes de incendios actuales que son fundamentales para la sostenibilidad del paisaje, otros pueden causar daños sustanciales en el ecosistema. Por lo tanto, es necesario comprender el efecto de las PA sobre los regímenes de incendios (y no solo sobre la deforestación), incluido el papel de la intensidad del fuego que también debe analizarse en futuros trabajos de investigación, ya que puede tener un papel relevante en la conservación de los bosques.

Por lo general, las AP no se designan para reducir la actividad de incendios forestales en áreas vulnerables y su declaración generalmente se justifica por problemas de deforestación o altos valores ambientales del paisaje. De hecho, ya se han discutido las causas del aumento de la actividad de incendios en las PA en algunas regiones (Pereira et al 2012), incluidas áreas en el bioma de bosque húmedo tropical (Tebbut et al., 2021), en su mayoría relacionadas con la acumulación de combustible y la degradación del hábitat debido a la exclusión de incendios y actividades socioeconómicas. Por lo tanto, los factores que influyen en la actividad de incendios forestales en las PA que se encuentran en este trabajo deben considerarse en la declaración de nuevas PA con el objetivo de apoyar a los administradores forestales en la mitigación de los efectos negativos producidos por los incendios.

6. Conclusiones

Este estudio muestra que los incendios forestales no están disminuyendo de forma significativa en el bosque tropical húmedo a escala global y prueba la eficacia de las zonas protegidas en el bosque tropical húmedo en América, Oceanía y África, con un mayor nivel de protección del territorio

(15-25%) en comparación con Asia (5%), dónde las zonas protegidas no fueron efectivas para disminuir el área quemada.

Además, mostramos cómo la actividad de incendios a escala global en este bioma se correlacionó positivamente con la pérdida de bosques, la huella humana, la amenaza de la expansión agrícola, la densidad de población humana y se correlacionó negativamente con la falta de carreteras, la aridez y la cubierta forestal. Sin embargo, las relaciones entre los factores analizados y la actividad de incendios variaron entre continentes.

7. Bibliografía

ABATZOGLOU, J., KOLDEN, C., 2013. Relationships between climate and macroscale area burned in the western United States. *Int. J. Wildl. Fire* 22, 1003–1020.

ADENY, J.M., CHRISTENSEN, N.L.J.R., PIMM, S.L., 2009. Reserves Protect against Deforestation Fires in the Amazon. *PLoS ONE* 4(4): e5014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005014>

ANDELA, N., MORTON, D.C., GIGLIO, L., CHEN, Y., VAN DER WERF, G.R., KASIBHATLA, P.S., DEFRIES, R.S., COLLATZ, G.J., HANTSON, S., KLOSTER, S., BACHELET, D., FORREST, M., LASSLOP, G., LI, F., MANGEON, S., MELTON, J.R., YUE, C., RANDERSON, J.T. 2017. A human-driven decline in global burned area. *Science* 356(6345):1356-1362

BISWAS. S., VADREVU, K.P., LWIN, Z.M., LASKO, K., JUSTICE, C.O. 2015. Factors Controlling Vegetation Fires in Protected and Non-Protected Areas of Myanmar. *PLoS ONE* 10(4): e0124346. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124346>

BOWMAN, D.M.J.S., WILLIAMSON, G.J., ABATZOGLOU, J.T., KOLDEN, C.A., COCHRANE, M.A., SMITH, A.M.S., 2017. Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. *Nat. Ecol. & Evol.* 1, 58.

CARDIL A, DE-MIGUEL S, SILVA CA, REICH PB, CALKIN D, BRANCALION PHS, VIBRANS AC, GAMARRA JGP, ZHOU M, PIJANOWSKI BC, HUI C, CROWTHER TW, HÉRAULT B, PIOTTO D, SALAS-ELJATIB C, BROADBENT EN, ALMEYDA ZAMBRANO AM, PICARD N, ARAGÃO LEOC, BASTIN JF, ROUTH D, VAN DEN HOOGEN J, PERI PL, LIANG J. 2020. Recent deforestation drove the spike in Amazonian fires. *Environ. Res. Lett* 15, 121003

GRAHAM, V., GELDMANN, J., ADAMS, V.M. ET AL. 2021. Southeast Asian protected areas are effective in conserving forest cover and forest carbon stocks compared to unprotected areas. *Sci Rep* 11, 23760. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03188-w>

JUÁREZ-OROZCO, S.M., SIEBE, C., FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, D. 2017. Causes and Effects of Forest Fires in Tropical Rainforests: A Bibliometric Approach. *Tropical conservation science* 10. <https://doi.org/10.1177/1940082917737207>

LEGENDRE, P., LEGENDRE, L., 2012. Numerical Ecology, 3rd edition. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

LOVEJOY, T.E. AND NOBRE, C. 2018. Amazon tipping point. *Sci. Adv.* 4 eaat2340

NELSON, A., CHOMITZ, K.M. 2011. Effectiveness of Strict vs. Multiple Use Protected Areas in Reducing Tropical Forest Fires: A Global Analysis Using Matching Methods. PLoS ONE 6(8): e22722. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022722>

OKSANEN, J., BLANCHET, F.G., FRIENDLY, M., KINTD, R., LEGENDRE, P., DAN MCGLINN, P., MINCHIN, R., O'HARA, R.B., SIMPSON, G.L., SOLYMOS, P., STEVENS, M.H.H., SZOECS, E., WAGNER, H., 2019. vegan: Community Ecology Package. R package version 2.5-6.

PEREIRA, P., MIERAUSKAS, P., UBEDA, X., MATAIX-SOLERA., J., 2012. Fire in Protected Areas - the Effect of Protection and Importance of Fire Management. Environmental Research Engineering and Management 59(1):52-62

SHAH, P., BAYLIS, K., BUSCH, J., ENGELMANN, J. 2021. What determines the effectiveness of national protected area networks?. Environ. Res. Lett. 16 074017

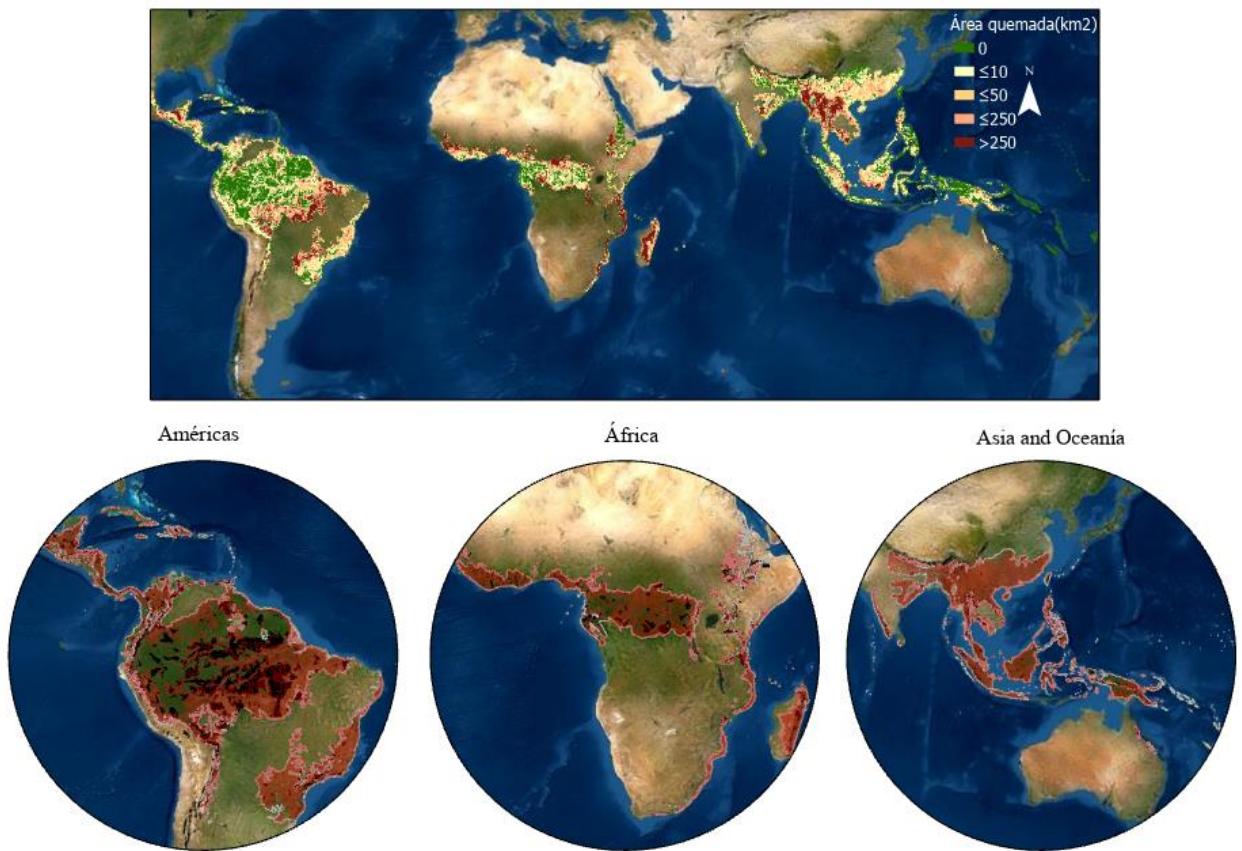


Figura 1. Área quemada en el periodo 2000-2020 en el bosque tropical húmedo (parte superior de la figura) y áreas protegidas (negro) con la incidencia de incendios forestales (rojo) (parte inferior de la figura).

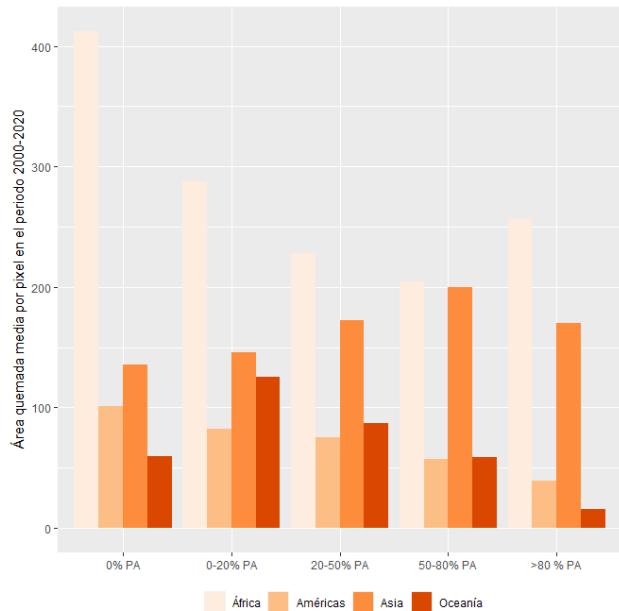


Figura 2. Área quemada en el periodo 2000-2020 en función del nivel de protección (PA) de cada píxel analizado ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$). Las zonas más protegidas son las menos propensas a quemarse.

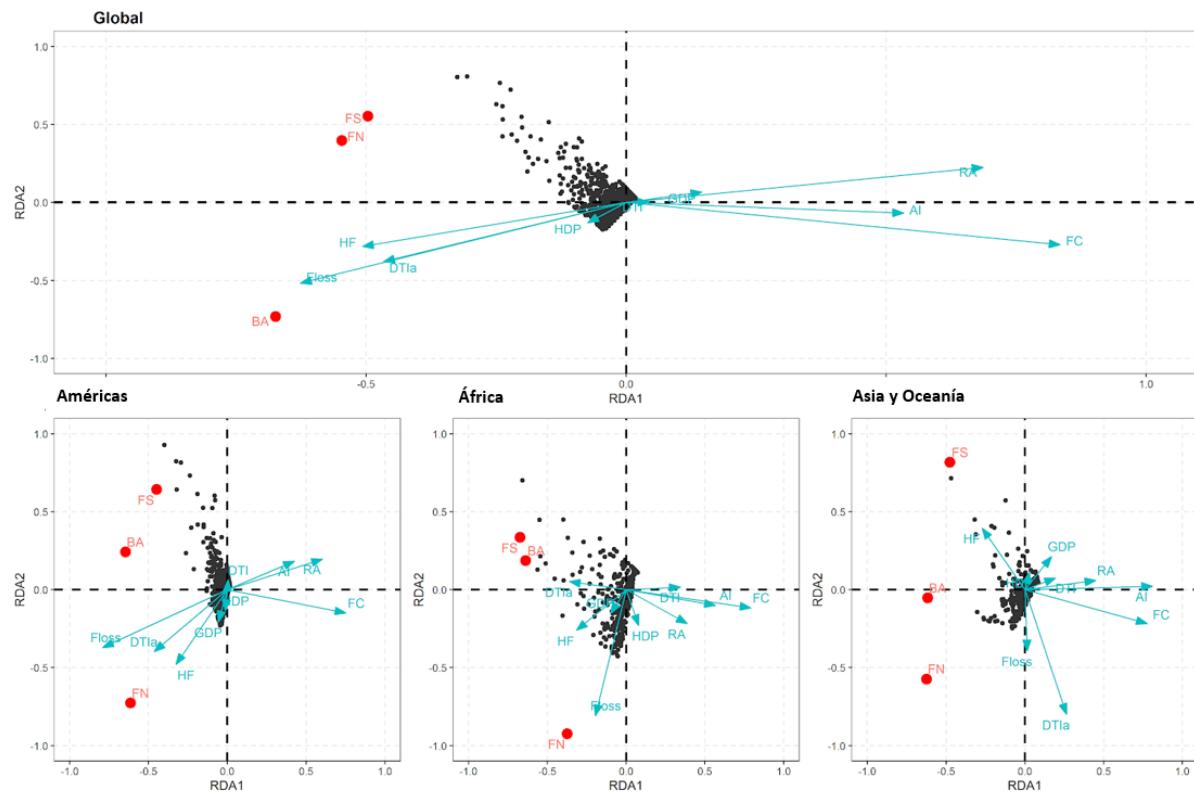


Figura 3. Análisis de redundancia relacionando la actividad de incendios (FN: número de incendios; BA: área quemada; FS: tamaño de incendio) y factores que controlan esta actividad en el bosque tropical húmedo (Floss: pérdida de bosque; HF: huella humana; DTla: Amenaza de expansión de la frontera agrícola; HDP: densidad de población humana; AI: Índice de aridez; FC: cobertura forestal; RA: ausencia de infraestructuras viales).