



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

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

Efectos sinérgicos acoplados de las teleconexiones climáticas sobre la sequía, vientos de Santa Ana e incendios forestales en el Sur de California

CARDIL, A^{1,2,3}, RODRIGUES, M^{4,5}, DE-MIGUEL, S^{2,3}, RAMIREZ, J¹, SILVA, CA^{6,7}, y ASCOLI, D.⁸

¹ Technosylva Inc, La Jolla, CA, USA

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

³ Joint Research Unit CTFC - AGROTECNIO - CERCA, Solsona, Spain.

⁴ Department of Agricultural and Forest Engineering, University of Lleida, Lleida, Spain.

⁵ Institute University of Research in Sciences Environmental (IUCA), University of Zaragoza, Spain.

⁶ School of Forest Resources and Conservation, University of Florida, Gainesville, FL, USA.

⁷ Department of Geographical Sciences, University of Maryland, College Park, MD, USA.

⁸ Department of Agricultural, Forest and Food Sciences, University of Turin, Largo Braccini 2, 10095 Grugliasco, TO, Italy.

Resumen

Las proyecciones de cambio climático sugieren un incremento de actividad de incendios forestales en el futuro, especialmente en los ecosistemas mediterráneos, como el sur de California. Esta región es un foco significativo de incendios forestales a nivel global. Los agentes de gestión de incendios están bajo una presión cada vez mayor ante la necesidad de mitigar los impactos socioeconómicos derivados. En este contexto, la predicción de periodos con un peligro alto de incendios es fundamental para una adecuada planificación. Los patrones meteorológicos a escala regional y las teleconexiones climáticas que los controlan, juegan un papel clave en la modulación de las condiciones favorables para el fuego. En esta contribución, analizamos siete décadas (1953-2018) de registros documentales de incendios para evaluar la asociación entre los patrones meteorológicos, los modos climáticos de teleconexión e incidencia de incendios. Para ello se han utilizado diversas técnicas estadísticas, como el análisis de redundancia, análisis de época superpuesta y coherencia de Wavelet.

El análisis muestra que el área quemada está significativamente asociada con eventos meteorológicos adversos como sequías severas y vientos de Santa Ana y que están a su vez modulados por el efecto conjunto de ENSO y AMO.

Palabras clave

Incendio forestal, El Niño y La Niña, meteorología aplicada, vientos de Santa Ana.

1. Introducción

La variabilidad interanual en la ocurrencia de grandes incendios forestales es normalmente alta en la mayoría de los ecosistemas en el mundo (Giglio et al., 2010). Este fenómeno puede explicarse en parte por la interacción entre el fuego y las teleconexiones climáticas (CT), que a su vez son, respuestas climáticas remotas estadísticamente significativas lejos de la región de origen, ya sean concurrentes o retrasadas en el tiempo; Kitzberger et al., 2007; Mariani et al., 2018, 2016; Schoennagel et al., 2005). Sin embargo, estas asociaciones son complejas (Keeley, 2004) y con efectos variables en los patrones climáticos que conducen a incendios. Bajo un escenario de cambio climático que proyecta un aumento en el área quemada por incendios forestales en muchas regiones de la Tierra (Moritz et al., 2012), comprender el efecto de la variabilidad climática en la ocurrencia de grandes incendios es esencial para una planificación eficiente de los recursos ambientales mediante el manejo y pronóstico del peligro y riesgo de incendios (Ramírez et al., 2019; Schoennagel et al., 2005).

La ocurrencia de sequías, olas de calor, eventos de vientos de alta velocidad y sus efectos combinados son factores bien conocidos que contribuyen a aumentar el peligro de incendios en la

mayoría de las áreas propensas al fuego en todo el mundo (Bowman et al., 2017; Cardil et al., 2019; Molina-Terrén). y Cardil, 2016; Monedero et al., 2019). Dichos eventos pueden estar mediados por CTs como El Niño (ENSO), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) o la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) (Kitzberger et al., 2006; Li et al., 2016; Molina-Terrén et al., 2016). Los CT influyen en la atmósfera induciendo efectos en cascada en los patrones climáticos locales en todo el mundo (Chiodi y Harrison, 2015; Maleski y Martinez, 2018) e indirectamente afectan la variación interanual en la producción de biomasa, los ciclos fenológicos de la vegetación y la humedad del combustible (Dannenbergh et al., 2018; Kitzberger et al., 2017; Li et al., 2016).

Hasta la fecha, muchas investigaciones han analizado los vínculos entre los CT y las condiciones climáticas estacionales, incluidos los efectos sobre la temperatura, la precipitación, la evapotranspiración, la humedad del suelo y la sequía (Abatzoglou y Kolden, 2013; Johnson y Wowchuk, 1993; O'Brien et al., 2019; Skinner et al., 2002; Turco et al., 2017; Westerling et al., 2006). La asociación entre los CT y la perturbación por incendios también ha llamado mucho la atención recientemente, especialmente en regiones propensas a incendios (p. ej., Australia, el oeste de los Estados Unidos), y hay pruebas sólidas que respaldan la existencia de un vínculo entre las CT y el área quemada en muchas regiones del mundo (Aragão et al., 2018; Kitzberger et al., 2007; Mariani et al., 2018, 2016; Schoennagel et al., 2005). Sin embargo, la interacción entre las CT y su influencia en la variabilidad del área quemada es difícil de desentrañar, ya que depende de las modulaciones subyacentes de la frecuencia, intensidad y duración de eventos meteorológicos específicos (Li et al., 2016). Además, la influencia de las CT en el área quemada no es estacionaria ya que la variabilidad de los modos de CT cambia de períodos de tiempo interanuales (ENSO) a multidecenales (AMO y PDO) (Ascoli et al., 2020; Levine et al., 2017; Zanchettin et al., 2016).

El sur de California es un punto crítico de incendios forestales en el oeste de los Estados Unidos (Bowman et al., 2017), donde los incendios más destructivos en su historia registrada ocurrieron en el siglo XXI, a pesar del aumento de la inversión en medios de extinción (Liang et al., 2008). Es bien sabido que el aumento en la actividad de incendios forestales en esta región se ha asociado con sequías y eventos con vientos de velocidad extrema en otoño (Goss et al., 2020). La conjunción de patrones a escala subcontinental de períodos de sequía y vientos de Santa Ana (SAW) que afectan la variabilidad del área quemada podría ser modulada por CT y sus interacciones. Sin embargo, se sabe poco sobre los efectos combinados de los principales modos climáticos que influyen en el área quemada en el sur de California (Chikamoto et al., 2017; Keeley, 2004), y en particular en relación con los patrones climáticos locales que promueven los incendios forestales más grandes de la región.

2. Objetivos

En este estudio, nuestro objetivo fue desentrañar los efectos combinados de los CT y las condiciones climáticas adversas que provocaron grandes incendios forestales en el sur de California durante las últimas siete décadas. Específicamente, en este estudio intentamos dar respuesta sobre los efectos simples y combinados de los CT en la modulación de la variación interanual de sequía, SAW, actividad de incendios forestales y asociaciones estacionales a lo largo del año.

3. Metodología

a. Área de estudio

El área de estudio fue la Biorregión de la Costa Sur de California, EE. UU., donde los incendios forestales han afectado dramáticamente asentamientos urbanos en las últimas décadas (Figura 1). La región se definió en base a las 9 biorregiones descritas por Sugihara y Barbour (2006) considerando patrones consistentes de vegetación y régimen de incendios para toda California.

b. Datos

i. Incendios forestales

Utilizamos la geodatabase de incendios del programa de evaluación de incendios y recursos (FRAP) de CAL FIRE, que incluye perímetros de incendios históricos desde 1878 (CAL FIRE, 2019) y representa el registro más completo de datos de incendios medianos y grandes en California (Butry y Thomas, 2017). La base de datos incluye incendios forestales de más de 0,04 km², incendios de arbustos de más de 0,20 km², incendios de pasto de más de 1,21 km² y aquellos incendios forestales que destruyeron al menos tres estructuras o causaron más de US\$ 300 000 en daños. Los incendios de más de 1,21 km² en todos los tipos de vegetación en el período 1953-2018 fueron seleccionados para un análisis más detallado en este estudio. La muestra seleccionada garantiza registros de eventos de incendio homogéneos y completos para el análisis estadístico.

ii. Teleconexiones climáticas

Los datos de los tres índices de CT (ENSO, PDO y AMO) se descargaron del Centro de Predicción del Clima y del Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, 2019). Los índices CT se calcularon promediando valores mensuales (promedio móvil de 6 meses) de diciembre a mayo. De acuerdo con la literatura, el índice ENSO puede tener las relaciones más fuertes con la actividad de incendios en los meses de invierno y primavera, ya que representa los posibles efectos retardados en la sequía de primavera y verano (Shabbar y Skinner, 2004). Esto es especialmente relevante en una región donde la ventana de tormentas es estrecha (típicamente entre noviembre y marzo), período durante el cual ocurre la mayor parte de la precipitación anual (Cayan et al., 2016). Para facilitar el análisis y la interpretación de los resultados, las CT se clasificaron según sus fases positiva y negativa. Los períodos cálido (ENSO > 0.5; El Niño), neutro (ENSO entre -0.5 y 0.5) y frío (ENSO < -0.5; La Niña) para ENSO se clasificaron con base a un umbral de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Una fase cálida o fría de PDO/AMO corresponde a valores por encima o por debajo de cero de los índices calculados, respectivamente.

iii. Datos de sequía

En relación a la sequía, utilizamos el Índice SPEI, un índice de sequía multiescala que representa un balance hídrico climático al combinar la precipitación y la evapotranspiración potencial. Los datos del SPEI se descargaron de la base de datos global del SPEI (v2.5) (Vicente-Serrano et al., 2017). La base de datos recopila datos SPEI que abarcan desde 1 hasta 48 meses con una resolución espacial de 0,5 grados. Se consideró un período de acumulación de sequía de 12 meses (SPEI12) para representar las anomalías anuales de sequía (SPEI12 < -0,85), considerando diciembre como mes de referencia. Trabajos anteriores han encontrado que SPEI12 es el mejor indicador general de peligro de sequía (Blauhut et al., 2016; Pai Mazumder et al., 2016).

iv. Datos de viento de Santa Ana

Usamos el conjunto de datos SAW compilado por (Abatzoglou et al., 2013) disponible en <http://nimbus.cos.uidaho.edu/JFSP/pages/publications.html> desde 1950 hasta el presente.

c. Análisis estadístico

Realizamos varios análisis estadísticos para (i) evaluar las relaciones entre las CT, los patrones climáticos (SPEI y SAD) y la incidencia de incendios (área quemada y tamaño del incendio), y demostrar la importancia y magnitud de las relaciones observadas, y (ii) explorar las asociaciones temporales entre las variables mencionadas a nivel estacional, interanual y decenal. Se realizó un análisis de redundancia (RDA) para analizar la asociación de las variables mencionadas a escalas estacionales e interanuales. Se usó el análisis de época superpuesta (SEA) para analizar los efectos retardados de CT en el área quemada. Se realizaron pruebas de comparación multigrupo para evaluar las diferencias en la distribución del tamaño del fuego y el área quemada anual entre las diferentes fases de las CT. Y, finalmente, un análisis de coherencia de Wavelet para identificar los efectos acoplados de las CT en las tendencias del área quemada en escalas de tiempo decenales. Todos los análisis estadísticos y las pruebas se realizaron con el software R (R core development team, 2017) con un nivel de confianza del 95 % ($P < 0,05$).

4. Resultados

a. Teleconexiones climáticas, sequía y vientos de Santa Ana

El análisis RDA reveló asociaciones significativas entre las CT y los patrones climáticos propensos a incendios (sequía y número anual de días de SAW (SAD); Figura 2). La sequía, representada por el índice SPEI12, se correlacionó positivamente con ENSO ($P < 0.01$), con mayores condiciones de sequía durante las fases de La Niña que durante los eventos de El Niño. La fase positiva de AMO tendió a estar relacionada con un mayor número anual de SAD, pero la relación no fue estadísticamente significativa ($P = 0,11$). PDO no se correlacionó significativamente con SPEI12 o SAD.

Detectamos sincronía entre las condiciones de sequía y el número anual de SAD (Figura 2), de modo que ocurrieron mayores áreas anuales quemadas en aquellos períodos con condiciones coincidentes de sequía y SAW.

b. Área quemada, tamaño del incendio y teleconexiones climáticas

Un total de 1.412 incendios de más de 1,21 km² quemaron un área total de 2.995.092 ha en el área de estudio durante el período 1953-2018, con un tamaño medio de incendio de 2.121 ± 182 ha (error estándar). El área quemada anual fue significativamente mayor en la fase positiva de AMO ($P = 0,049$; Figura 3A). Se encontró una tendencia similar con PDO-, aunque estadísticamente no significativa ($P = 0,075$; Figura 3C). El análisis SEA reveló relaciones temporales no significativas entre el área quemada anual y las fases fría (La Niña) y cálida (El Niño) de ENSO, a pesar de que el índice SPEI12 se correlacionó significativamente con ENSO como lo muestra el análisis RDA. Sin embargo, según el análisis SEA, encontramos un efecto sincrónico significativo entre AMO+ y El Niño, lo que resultó en un área quemada anual más grande (retraso de tiempo = 0 años; $P = 0.04$), como se muestra en la Figura 3A.

Los incendios fueron generalmente más grandes bajo SAW ($P < 0.001$) y condiciones de sequía ($P < 0.01$), particularmente en situaciones de sequía y SAW coincidentes ($P < 0.01$; Figura 3B y 3D), siendo sus efectos modulados por ciertos modos de CT. Una gran fracción del área (80%) se quemó bajo episodios de sequía o SAW. La porción del área quemada bajo sequía y SAW fue significativamente diferente dependiendo de las fases de CT. La fracción más grande del área quemada ocurrió bajo la conjunción de condiciones ENSO+, AMO+, sequía y SAW (Figura 3), casi sin influencia de PDO. Durante el período de El Niño, las diferencias en el área quemada bajo condiciones SAW y no SAW fueron pequeñas, mientras que durante La Niña la mayor parte del área quemada ocurrió bajo condiciones no SAW (75%). El área quemada bajo La Niña estuvo más asociada con condiciones de sequía (83.4%) en comparación con el período de El Niño (64.2%). Además, la distribución del área quemada fue asimétricamente negativa para ENSO, y la mayoría de los incendios ocurrieron cuando ENSO fue inferior a 1 (Figura 3).

Encontramos diferencias estacionales notables en el área quemada modulada por los modos CT y los patrones climáticos (Figura 2). El área quemada en otoño se relacionó significativamente con las condiciones SAW ($P < 0,01$), mientras que el área quemada en verano, y especialmente en primavera, se relacionó significativamente con la sequía ($P = 0,03$). La asociación entre AMO y el área quemada anual estuvo cerca del umbral de significación elegido en el análisis RDA ($P = 0,059$, umbral: $P < 0,05$), alcanzando valores de p similares en el análisis SEA. La mayor parte del área quemada durante el otoño ocurrió bajo AMO+, SAW y principalmente en combinación con El Niño (Figura S3). El efecto de la PDO no fue significativo ($P = 0,11$).

5. Discusión

Este estudio contribuye a comprender el efecto de las principales CT y sus relaciones con los eventos climáticos locales, como la sequía y SAW, y en la incidencia de incendios forestales (es decir, el tamaño del incendio y el área quemada anual) en el sur de California, mediante el análisis de incendios forestales históricos durante los últimos 70 años. Nuestro trabajo confirma la importancia

de las condiciones climáticas adversas (es decir, sequía y SAW) para explicar el área quemada estacionalmente en el sur de California (Goss et al., 2020), y revela que estas relaciones están mediadas por CT. El índice SPEI se correlacionó significativamente con ENSO de manera positiva, con condiciones más húmedas encontradas durante los años de El Niño (Gergis y Fowler, 2009) debido al aumento de la precipitación (Allen y Anderson, 2018). Este patrón puede explicar la variabilidad estacional del área quemada que se muestra en este documento entre las dos fases de ENSO, ya que también se identificaron áreas quemadas más grandes durante los años más secos de La Niña en el suroeste de los Estados Unidos (Mason et al., 2017). Si bien los incendios forestales tendieron a ocurrir durante los eventos de La Niña en condiciones de sequía, especialmente en primavera y verano (Kitzberger et al., (2007), durante las fases de El Niño, una cantidad sustancial de grandes incendios forestales ardieron con condiciones de SAW en otoño. Este hallazgo probablemente esté relacionado con una acumulación de combustible mayor en otoño debido a unas condiciones más húmedas en la primavera anterior (Westerling et al., 2003).

La fase cálida de AMO está asociada con la disminución de la precipitación y el aumento de la temperatura media en el oeste de los Estados Unidos. Estas condiciones probablemente impulsaron un área quemada anual más grande, como mostró el análisis SEA y RDA. Además, los patrones de variabilidad interanual de lluvia asociados con ENSO se modulan significativamente entre las fases de AMO. Enfield et al. (2001) encontraron una mayor correlación positiva entre ENSO y la lluvia en el sur de California durante la fase negativa de AMO (1965–1994) en comparación con su fase positiva (1930–1959). Este efecto puede explicar la interacción encontrada entre AMO+, El Niño y área quemada anual en el análisis SEA. Además, el análisis de coherencia wavelet mostró que el índice acoplado AMO+/ENSO- mostró una oscilación no estacionaria con el área quemada en primavera y verano en el sur de California con periodos que van de 4 a 8 años, indicativo de una amplificación de La Niña durante las fases AMO+ con efectos en cascada en el régimen de incendios.

Aunque no encontramos ninguna relación significativa entre PDO, el clima y la actividad de incendios, PDO podría tener un efecto modulador en los patrones climáticos resultantes de ENSO según la literatura reciente (Abiy et al., 2019; Margolis y Swetnam, 2013; Schoennagel et al. , 2005; Wang et al., 2014). Wang et al., 2014 encontraron que es probable que la señal climática de La Niña sea más fuerte cuando la PDO es muy negativa, lo que resulta en condiciones secas en el sur de California; y, por el contrario, valores de PDO altamente positivos conducirían a condiciones húmedas similares a las de El Niño. Margolis y Swetnam (2013) encontraron que ENSO influyó en la variabilidad de la humedad y la ocurrencia de incendios en elevaciones altas en el suroeste de los Estados Unidos, y que dicha relación podría ser potencialmente modulada por las fases de PDO.

El análisis RDA sugiere que la respuesta del área quemada a las condiciones de sequía y SAW es más fuerte en el siglo XXI en comparación con la segunda mitad del siglo XX, para incendios que ocurren en otoño bajo SAD y en verano con sequía severa. Esto podría explicarse por la mayor frecuencia de eventos de sequía y SAW en el período 2000-2018, con AMO en su fase cálida y PDO en su fase fría, junto con capacidades mejoradas de extinción de incendios (Liang et al. , 2008) donde solo unos pocos incendios en circunstancias extremas superaron el ataque inicial y se hicieron grandes.

6. Conclusiones

Nuestros resultados destacan los impactos acoplados de las CT en el clima y el área quemada en escalas de tiempo interanuales y decenales en el sur de California. Al utilizar pronósticos basados en ENSO a escala estacional, nuestros hallazgos revelan la necesidad de considerar su interacción con AMO. Se prevé que la actividad de ENSO se amplifique debido al cambio climático antropogénico (Cai et al., 2015, 2014; Power et al., 2013), lo que sería una amenaza para la interfaz rural-urbana inflamable en constante expansión (Bowman et al. , 2017). Dado que se prevé que AMO entre en una fase negativa durante las próximas décadas (Krokos et al., 2019), esto podría limitar la fuerza de las fases de La Niña que conducen a un clima propenso a incendios y áreas quemadas en primavera-verano. A la luz del inminente cambio climático, sugerimos que se realice un monitoreo adecuado de

sequías (a través de índices como SPEI) y pronósticos SAD para medir el comienzo de los períodos secos y, por extensión, la predicción de temporadas de incendios de alto riesgo.

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.

ABATZOGLOU, J.T., BARBERO, R., NAUSLAR, N.J., 2013. Diagnosing Santa Ana Winds in Southern California with Synoptic-Scale Analysis. *Weather Forecast.* 28, 704–710. doi:10.1175/waf-d-13-00002.1

ABIY, A.Z., MELESSE, A.M., ABTEW, W., 2019. Teleconnection of regional drought to ENSO, PDO, and AMO: Southern Florida and the Everglades. *Atmosphere (Basel)*. 10, 1–15. doi:10.3390/atmos10060295

ALLEN, R.J., ANDERSON, R.G., 2018. 21st century California drought risk linked to model fidelity of the El Niño teleconnection. *npj Clim. Atmos. Sci.* 1, 21. doi:10.1038/s41612-018-0032-x

ARAGÃO, L.E.O.C., ANDERSON, L.O., FONSECA, M.G., ROSAN, T.M., VEDOVATO, L.B., WAGNER, F.H., SILVA, C.V.J., SILVA JUNIOR, C.H.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., PHILLIPS, O.L., SAATCHI, S., 2018. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nat. Commun.* 9, 536. doi:10.1038/s41467-017-02771-y

ASCOLI, D., HACKET-PAIN, A., LAMONTAGNE, J.M., CARDIL, A., CONEDERA, M., MARINGER, J., MOTTA, R., PEARSE, I.S., VACCHIANO, G., 2020. Climate teleconnections synchronize *Picea glauca* masting and fire disturbance: Evidence for a fire-related form of environmental prediction. *J. Ecol.* 108, 1186–1198. doi:10.1111/1365-2745.13308

BLAUHUT, V., STAHL, K., STAGGE, J.H., TALLAKSEN, L.M., STEFANO, L. DE, VOGT, J., 2016. Estimating drought risk across Europe from reported drought impacts, drought indices, and vulnerability factors. *Hydrol. earth Syst. Sci.* 20, 2779–2800. doi:10.5194/hess-20-2779-2016

BOND, N.A., CRONIN, M.F., FREELAND, H., MANTUA, N., 2015. Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific. *Geophys. Res. Lett.* 42, 3414–3420. doi:10.1002/2015GL063306

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.

BUNN, S., KORPELA, M., BIONDI, F., CAMPELO, F., MÉRIAN, P., QEADAN, F., ZANG, C., 2019. dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.7.0.

BUTRY, D.T., THOMAS, D.S., 2017. Underreporting of wildland fires in the US Fire Reporting System NFIRS: California. *Int. J. Wildl. Fire* 26, 732–743.

CAL FIRE, 2019. FRAP mapping [WWW Document]. URL http://frap.fire.ca.gov/data/frapgisdata-sw-fireperimeters_download (accessed 5.17.19).

CARDIL, A., VEGA-GARCÍA, C., ASCOLI, D., MOLINA-TERRÉN, D.M., SILVA, C.A., RODRIGUES, M., 2019. How does drought impact burned area in Mediterranean vegetation communities ? *Sci. Total Environ.* 693, 133603. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133603

CAYAN, D., DETTINGER, M., PIERCE, D., DAS, T., KNOWLES, N., RALPH, F., SUMARGO, E., 2016. Natural variability, anthropogenic climate change, and impacts on water availability and flood extremes in the western United States, in: Miller, K., Hamlet, A., Kenney, D., Redmont, K. (Eds.), *Water Policy and Planning in a Variable and Changing Climate*. Taylor & Francis, p. 419.

CHIKAMOTO, Y., TIMMERMAN, A., WIDLANSKY, M.J., BALMASEDA, M.A., STOTT, L., 2017. Multi-year predictability of climate, drought, and wildfire in southwestern North America. *Sci. Rep.* 7, 6568. doi:10.1038/s41598-017-06869-7

CHIODI, A.M., HARRISON, D.E., 2015. Global Seasonal Precipitation Anomalies Robustly Associated with El Niño and La Niña Events—An OLR Perspective. *J. Clim.* 28, 6133–6159. doi:10.1175/JCLI-D-14-00387.1

DANNENBERG, M.P., WISE, E.K., JANKO, M., HWANG, T., SMITH, W.K., 2018. Atmospheric teleconnection influence on North American land surface phenology. *Environ. Res. Lett.* 13. doi:10.1088/1748-9326/aaa85a

DETTINGER, M.D., RALPH, F.M., DAS, T., NEIMAN, P.J., CAYAN, D.R., 2011. Atmospheric Rivers, Floods and the Water Resources of California. *Water* 3, 445–478. doi:10.3390/w3020445

DUNN, O., 1964. Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics* 6, 241–252.
Enfield, D.B., Mestas-nunez, A.M., Trimble, P.J., 2001. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U . S . The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U . S . *Geophys. Res. Lett.* 28, 2077–2080. doi:10.1029/2000GL012745

GERGIS, J., FOWLER, A., 2009. A history of ENSO events since AD 1525: implications for future climate change. *Clim. Change* 92, 343–387.

GIGLIO, L., RANDERSON, J.T., WERF, G.R. VAN DER, KASIBHATLA, P.S., COLLATZ, G.J., MORTON, D.C., DEFRIES, R.S., SPACE, G., SCIENCES, E., CAROLINA, N., BIOLOGY, E., 2010. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosciences* 7, 1171–1186.

GOSS, M., SWAIN, D.L., ABATZOGLOU, J.T., SARHADI, A., KOLDEN, C., WILLIAMS, A.P., DIFFENBAUGH, N.S., 2020. Climate change is increasing the risk of extreme autumn wildfire

conditions across California. *Environ. Res. Lett.* doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab83a7>

GOUHIER, T.C., GRINSTEAD, A., SIMKO, V., 2016. biwavelet: Conduct univariate and bivariate wavelet analyses (Version 0.20.10).

HARRIS, S., LUCAS, C., 2019. Understanding the variability of Australian fire weather between 1973 and 2017. *PLoS One* 14, e0222328.

JOHNSON, E.A., WOWCHUK, D.R., 1993. Wildfires in the southern Canadian Rocky Mountains and their relationship to mid-tropospheric anomalies. *Can. J. For. Res.* 23, 1213–1222.

KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L., IREDELL, M., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., ZHU, Y., CHELLIAH, M., EBISUZAKI, W., HIGGINS, W., JANOWIAK, J., MO, K.C., ROPELEWSKI, C., WANG, J., LEETMAA, A., REYNOLDS, R., JENNE, R., JOSEPH, D., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 77, 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

KEELEY, J.E., 2004. Impact of antecedent climate on fire regimes in coastal California *. *Int. J. Wildl. Fire* 13, 173–182.

KITZBERGER, T., BROWN, P.M., HEYERDAHL, E.K., SWETNAM, T.W., VEBLEN, T.T., 2007. Contingent Pacific – Atlantic Ocean influence on multicentury wildfire synchrony over western North America. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 543–548.

KITZBERGER, T., BROWN, P.M., HEYERDAHL, E.K., SWETNAM, T.W., VEBLEN, T.T., 2006. Contingent Pacific – Atlantic Ocean influence on multicentury wildfire synchrony over western North America.

KITZBERGER, T., FALK, D.A., WESTERLING, A.L., SWETNAM, T.W., 2017. Direct and indirect climate controls predict heterogeneous early-mid 21 st century wildfire burned area across western and boreal North America. *PLoS One* 12, e0188486. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188486>

KRUSKAL, W.H., WALLIS, W.A., 1952. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *J. Am. Stat. Assoc.* 47, 583–621. doi:10.2307/2280779

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

LEVINE, A.F.Z., MCPHADEN, M.J., FRIERSON, D.M.W., 2017. The impact of the AMO on multidecadal ENSO variability. *Geophys. Res. Lett.* 44, 3877–3886. doi:10.1002/2017GL072524

LI, A.K., PAEK, H., YU, J.Y., 2016. The changing influences of the AMO and PDO on the decadal variation of the Santa Ana winds. *Environ. Res. Lett.* 11, 064019. doi:10.1088/1748-9326/11/6/064019

LIANG, J., CALKIN, D.E., GEBERT, K.M., VENN, T.J., SILVERSTEIN, R.P., 2008. Factors influencing large wildland fire suppression expenditures. *Int. J. Wildl. Fire* 17, 650–659. doi:10.1071/WF07010

LOUGH, J., FRITTS, H., 1987. An assessment of the possible effects of volcanic eruptions on North American climate using tree-ring data, 1602 to 1900 A.D. *Clim. Change* 10, 219–239.

MALESKI, J.J., MARTINEZ, C.J., 2018. Coupled impacts of ENSO AMO and PDO on temperature and precipitation in the Alabama–Coosa–Tallapoosa and Apalachicola–Chattahoochee–Flint river basins. *Int. J. Climatol.* 38, e717–e728. doi:10.1002/joc.5401

MARGOLIS, E.Q., SWETNAM, T.W., 2013. Historical fire–climate relationships of upper elevation fire regimes in the south-western United States. *Int. J. Wildl. Fire* 22, 588–598.

MARIANI, M., FLETCHER, M., HOLZ, A., NYMAN, P., 2016. ENSO controls interannual fire activity in southeast Australia. *Geophys. Res. Lett.* 43. doi:10.1002/2016GL070572

MARIANI, M., VEBLEN, T.T., WILLIAMSON, G.J., 2018. Climate Change Amplifications of Climate-Fire Teleconnections in the Southern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.* 45. doi:10.1029/2018GL078294

MASON, S.A., HAMLINGTON, P. E. HAMLINGTON, B.D., JOLLY, M.W., HOFFMAN, C.M., 2017. Effects of climate oscillations on wildland fire potential in the continental United States. *Geophys. Res. Lett.* 44, 7002–7010.

MILES, S., GOUDEY, C., 1997. Ecological subregions of California: section and subsection descriptions. USDA For. Serv. Pacific Southwest Reg. Publ. R5-EM-TP-0.

MOLINA-TERRÉN, D.M., CARDIL, A., 2016. Temperature determining larger wildland fires in NE Spain. *Theor. Appl. Climatol.* 125, 295–302. doi:10.1007/s00704-015-1511-1

MOLINA-TERRÉN, D.M., FRY, D.L., GRILLO, F.F., CARDIL, A., STEPHENS, S.L., 2016. Fire history and management of *Pinus canariensis* forests on the western Canary Islands Archipelago, Spain. *For. Ecol. Manage.* 382, 184–192. doi:10.1016/j.foreco.2016.10.007

Monedero, S., Ramirez, J., Cardil, A., 2019. Predicting fire spread and behaviour on the fireline. *Wildfire analyst pocket: A mobile app for wildland fire prediction.* *Ecol. Modell.* 392, 103–107. doi:10.1016/j.ecolmodel.2018.11.016

MORITZ, M.A., PARISIEN, M.A., BATLLORI, E., KRAWCHUK, M.A., VAN DORN, J., GANZ, D.J., HAYHOE, K., 2012. Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere* 3, 1–22. doi:10.1890/ES11-00345.1

NOAA, 2019. National weather service. Climate prediction center. [WWW Document]. URL <https://www.noaa.gov/> (accessed 10.29.19).

O'BRIEN, J.P., O'BRIEN, T.A., PATRICOLA, C.M., WANG, S.-Y.S., 2019. Metrics for understanding large-scale controls of multivariate temperature and precipitation variability. *Clim. Dyn.* doi:10.1007/s00382-019-04749-6

OKSANEN, J., BLANCHET, F.G., FRIENDLY, M., KINDT, 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.

PAI MAZUMDER, D., JAIN, P., DONE, J., FLANNIGAN, M.D., 2016. Assessing the association of drought to wildfire in California, in: 30th Conference on Hydrology. American Meteorological Society: New Orleans, LA, US.

PYNE, S., Andrews, P., Laven, R., 1998. *Introduction to wildland fire*, 2nd ed. Wiley, New York.

R core development team, 2017. R 3.2.4.

RAMIREZ, J., MONEDERO, S., SILVA, C., CARDIL, A., 2019. Stochastic decision trigger modelling to assess the probability of wildland fire impact. *Sci. Total Environ.* 694, 133505. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.311

SCHOENNAGEL, T., VEBLEN, T.T., ROMME, W.H., SIBOLD, J.S., COOK, E.R., 2005. ENSO AND PDO VARIABILITY AFFECT DROUGHT-INDUCED FIRE OCCURRENCE IN ROCKY MOUNTAIN SUBALPINE FORESTS. *Ecol. Appl.* 15, 2000–2014. doi:10.1890/04-1579

SEAGER, R., HOERLING, M., SCHUBERT, S., WANG, H., LYON, B., KUMAR, A., NAKAMURA, J., HENDERSON, N., 2015. Causes of the 2011–14 California Drought. *J. Clim.* 28, 6997–7024. doi:10.1175/JCLI-D-14-00860.1

SHABBAR, A., SKINNER, W., 2004. Summer Drought Patterns in Canada and the Relationship to Global Sea Surface Temperatures. *J. Clim.* 17, 2866–2880.

SKINNER, W., FLANNIGAN, M., STOCKS, B., MARTELL, D., WOTTON, B., TODD, J., MASON, J., LOGAN, K., BOSCH, E., 2002. A 500 hPa synoptic wildland fire climatology for large Canadian forest fires, 1959 - 1996. *Theor. Appl. Climatol.* 71, 157–169.

SUGIHARA, N., BARBOUR, M., 2006. Fire and California vegetation, in: Sugihara, N., van Wagtendonk, J., Fites-Kaufman, J., Shaffer, K., Thode, A. (Eds.), *Fire in California's Ecosystems*. University of California Press, Berkeley, California.

TURCO, M., VON HARDENBERG, J., AGHAKOUCHAK, A., LLASAT, M.C., PROVENZALE, A., TRIGO, R.M., 2017. On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe. *Sci. Rep.* 7, 1–10. doi:10.1038/s41598-017-00116-9

VICENTE-SERRANO, S.M., TOMAS-BURGUERA, M., BEGUERÍA, S., REIG, F., LATORRE, B., PEÑA-GALLARDO, M., LUNA, M.Y., MORATA, A., GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C., 2017. A High Resolution Dataset of Drought Indices for Spain. *Data* 2, 22. doi:10.3390/data2030022

WANG, S., HUANG, J., HE, Y., GUAN, Y., 2014. Combined effects of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on Global Land Dry–Wet Changes. *Sci. Rep.* 4, 6651. doi:10.1038/srep06651

WESTERLING, A., GERSHUNOV, A., BROWN, T., CAYAN, D., DETTINGER, M., 2003. Climate and wildfire in the western United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 84, 595–604. doi:10.1175/bams-84-5-595

WESTERLING, A.L., HIDALGO, H.G., CAYAN, D.R., SWETNAM, T.W., 2006. Warming and earlier spring increase Western U.S. forest wildfire activity. *Science* (80-.). 313, 940–943. doi:10.1126/science.1128834

WILLIAMS, A.P., ABATZOGLOU, J.T., GERSHUNOV, A., GUZMAN-MORALES, J., BISHOP, D.A., BALCH, J.K., LETTENMAIER, D.P., 2019. Observed Impacts of Anthropogenic Climate Change on Wildfire in California. *Earth's Futur.* 7, 892–910. doi:10.1029/2019EF001210

YOON, J.-H., WANG, S.-Y.S., GILLIES, R.R., KRAVITZ, B., HIPPS, L., RASCH, P.J., 2015. Increasing water cycle extremes in California and in relation to ENSO cycle under global warming. *Nat. Commun.* 6, 8657. doi:10.1038/ncomms9657

ZANCHETTIN, D., BOTHE, O., GRAF, H., OMRANI, N., RUBINO, A., JUNGCLAUS, J., 2016. A decadal delayed response of the tropical Pacific to Atlantic Multidecadal Variability. *Geophys. Res. Lett.* 43, 784–792. doi:10.1002/2015GL067284

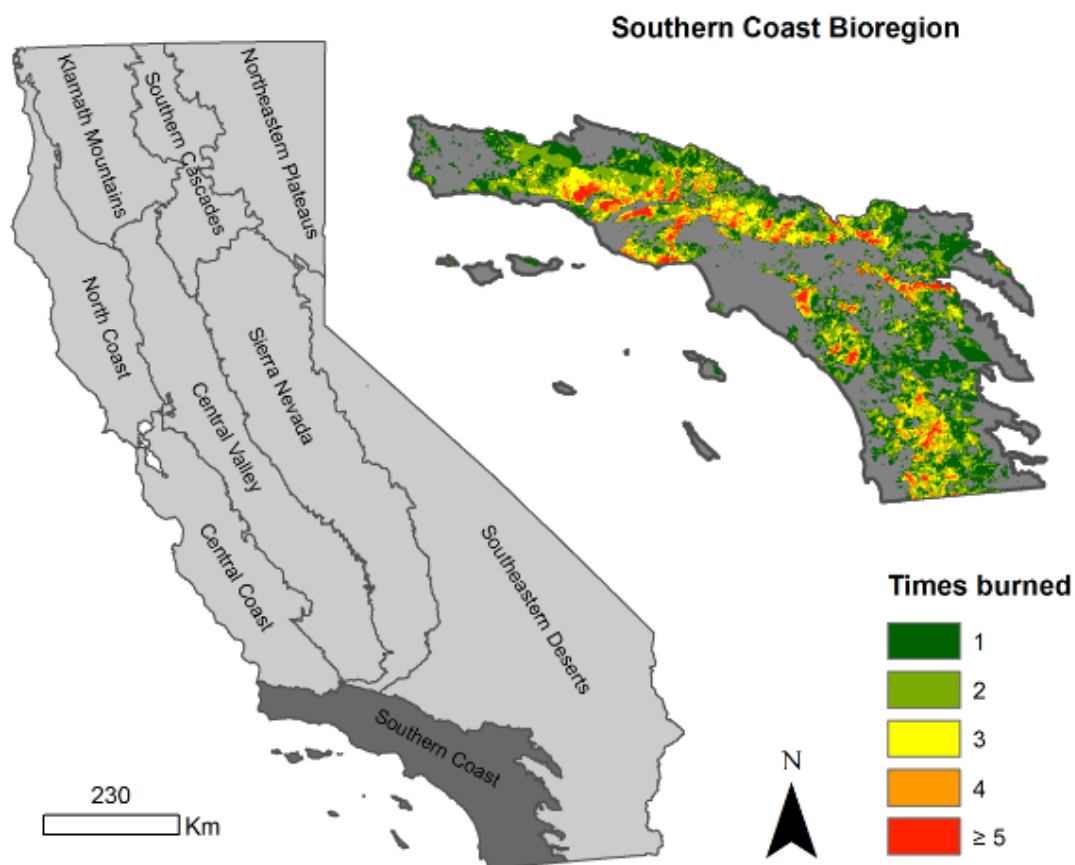


Figura 1. Ubicación geográfica de las 9 biorregiones delineadas por Sugihara y Barbour (2006), incluida la biorregión del Sur de California propensa a incendios. El mapa también representa las veces que se quemó el paisaje en el área de estudio en el período 1953-2018 después de superponer todos perímetros de incendios forestales de CAL FIRE (2019) utilizados en este análisis.

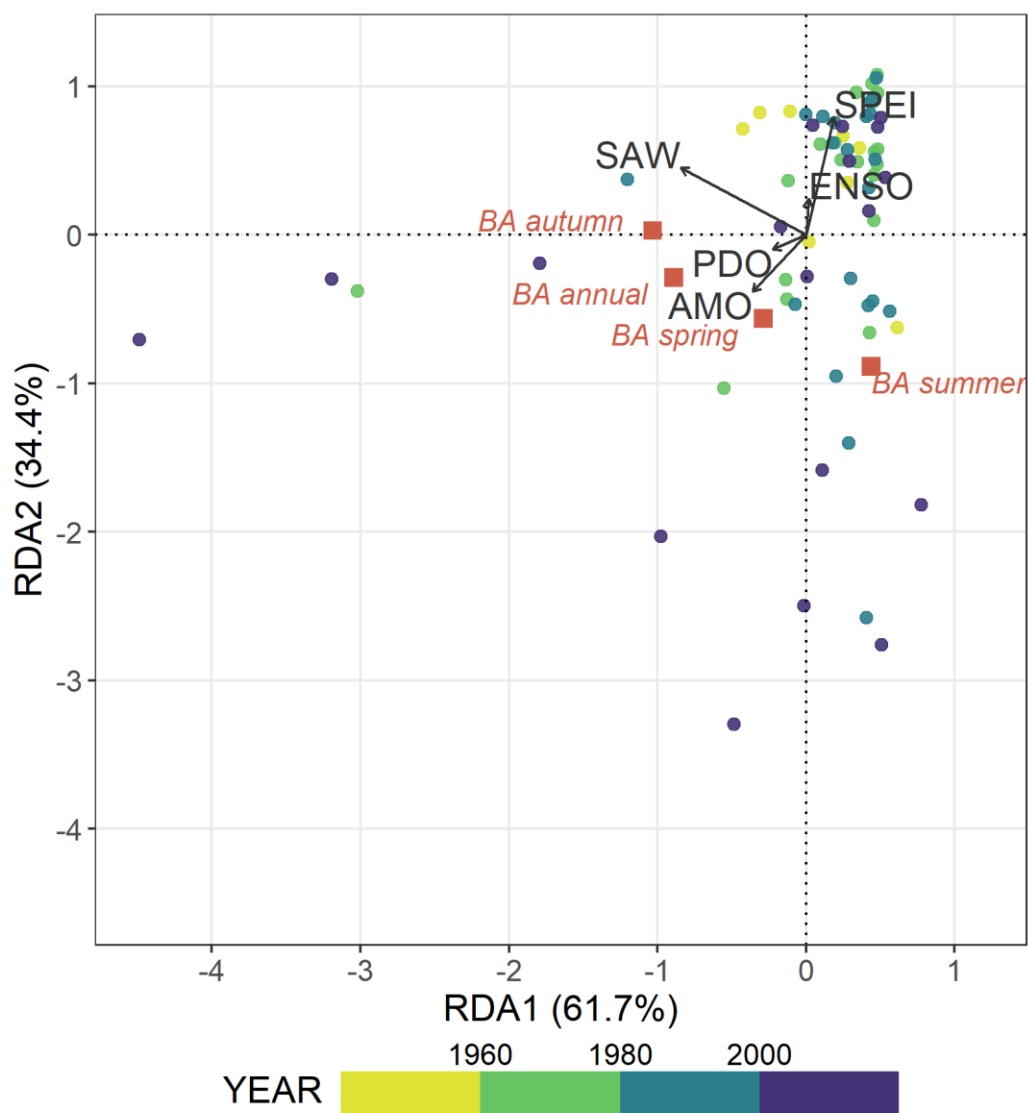


Figura 2. Gráfico del análisis de redundancia (RDA) (1953-2018). Los puntos muestran los datos anuales del RDA, los vectores muestran los parámetros de teleconexión climática (AMO, PDO y ENSO), sequía (SPEI12) y viento de Santa Ana (SAW) y las marcas rojas representan las variables respuesta: área quemada (BA) en otoño, verano, primavera y anual.

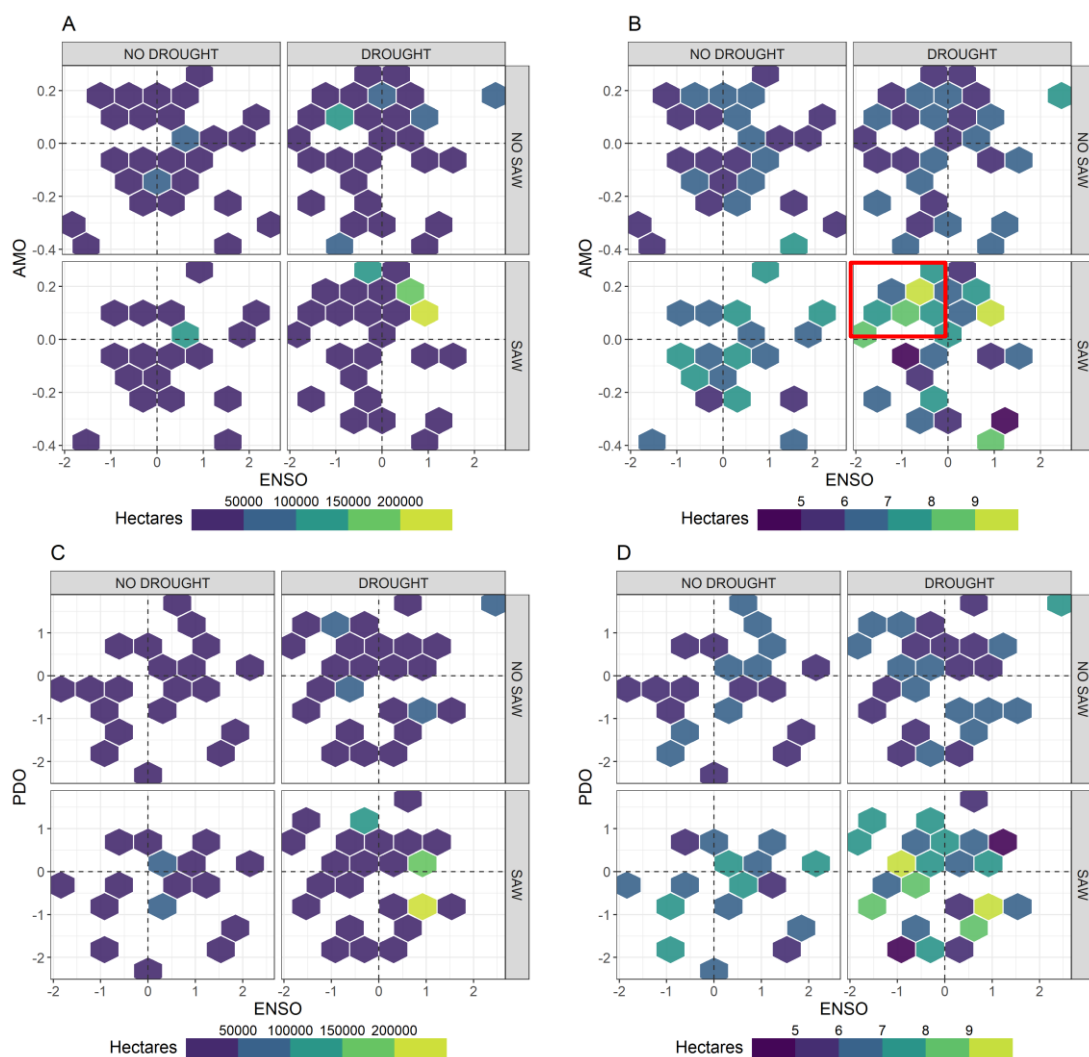


Figura 3. Suma del área quemada (paneles A y C) y tamaño mediano del incendio (transformado logarítmicamente; paneles B y D) para cada combinación de CT (AMO, PDO y ENSO), SAW y sequía (SPEI12). El panel resaltado en rojo representa un tamaño medio de incendio más grande durante La Niña, AMO+, SAW y condiciones de sequía en comparación con otras combinaciones.