

# Variabilidad climática de eventos compuestos cálidos y secos en el sur de Sudamérica

Agustina Lopez-Ramirez<sup>1</sup>, Mariana Barrucand<sup>1,2</sup>, Soledad Collazo<sup>1,3</sup>

**Resumen** En este trabajo se estudió la variabilidad espacio-temporal de eventos compuestos cálidos y secos en el sur de Sudamérica entre 1979 y 2018. Se exploró la ocurrencia simultánea y secuencial de olas de calor y sequías durante la estación cálida (octubre a marzo) utilizando la temperatura máxima y el índice de Precipitación Estandarizado (SPI) de 132 estaciones meteorológicas. Los resultados muestran que los eventos ocurren con una mayor frecuencia en el centro y noreste de Argentina. Además, en los casos secuenciales también se identificaron frecuencias máximas de olas de calor en el sur de Chile y la Patagonia oeste. Al dividir el periodo en dos subperiodos (1979-1998 y 1999-2018), se encontró que la frecuencia de eventos aumentó en más del doble en el período más reciente en algunas estaciones del norte de Argentina, Chile, Paraguay y Brasil. La comparación entre periodos también reveló un aumento en la extensión espacial de ambos tipos de eventos, especial reuniónmente en los simultáneos. Por último, el análisis de la variabilidad interanual evidenció un aumento significativo en el número de días involucrados en una ola de calor seca secuencial.

**Palabras clave** Climatología extrema, eventos extremos de temperatura, precipitación.

## INTRODUCCIÓN

Los eventos climáticos extremos son el producto de interacciones complejas entre procesos físicos a través de múltiples escalas espaciales y temporales (Zscheischler et al., 2018). Usualmente, la ocurrencia de este tipo de eventos supera la capacidad de los ecosistemas y la sociedad para afrontarlos, generando impactos significativos en la salud, en los sistemas socioeconómicos, en la agricultura y en entornos naturales.

Hasta el momento, gran parte de la literatura científica se ha basado en el estudio de eventos extremos que involucran un único proceso o variable. Sin embargo, en los últimos años ha surgido una notable motivación para el estudio de la concurrencia de dos o más eventos. La combinación de múltiples eventos, también llamado evento compuesto, conduce a una amplificación de los impactos asociados y desafía a los sectores afectados (Seneviratne et al., 2012; Leonard et al., 2014). Tomando esto como premisa, este trabajo propone estudiar la variabilidad espacio-temporal observada de extremos muy cálidos y secos en días consecutivos (olas de calor secas) durante el semestre cálido (de octubre a marzo) en el sur de Sudamérica en base a las observaciones de estaciones meteorológicas.

## DATOS Y METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron los datos diarios de temperatura máxima y precipitación de estaciones meteorológicas ubicadas en el sur de Sudamérica, de 15°S a 60°S y de 45°O a 80°O, durante el semestre cálido en el periodo 1979-2018. Luego de realizar un control de calidad con el fin de identificar posibles errores, outliers u otras inconsistencias en las series de datos, se seleccionaron un total de 132 estaciones meteorológicas.

Una vez que se recopilaron los datos, se estableció una definición de evento compuesto. En este trabajo, los eventos compuestos fueron definidos como la ocurrencia simultánea o secuencial de olas de calor y sequías. Las olas de calor fueron definidas como periodos en los que la temperatura

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, Universidad de Buenos Aires, Argentina. Email: [alopez@at.fcen.uba.ar](mailto:alopez@at.fcen.uba.ar)

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

<sup>3</sup>Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, España.

máxima supera el percentil 90 (calculado en base al periodo 1981-2010 con una ventana móvil de 15 días) durante al menos 3 días consecutivos. Las sequías se determinaron a partir del índice de Precipitación Estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés) para 1 y 3 meses. El SPI es un índice comúnmente utilizado en estudios climatológicos para evaluar y cuantificar las condiciones de sequía o excesos de precipitación en una determinada área geográfica y período de tiempo. Se calcula en varias escalas temporales, como 1, 3, 6, 12 meses, etc., y sus valores se agrupan en categorías para definir las sequías y excesos de humedad. Un  $SPI < -1$  indica condiciones de sequía severa. En este trabajo, un evento simultáneo será una ola de calor acompañada por un  $SPI1 < -1$  y un  $SPI3 < -1$ , mientras que un evento secuencial será una ola de calor con  $SPI1 > -1$  y  $SPI3 < -1$ . De esta forma, se obtuvieron las olas de calor que ocurrieron simultáneamente con condiciones de sequía (ola de calor seca simultánea) y las olas de calor que ocurrieron luego de una sequía (ola de calor seca secuencial).

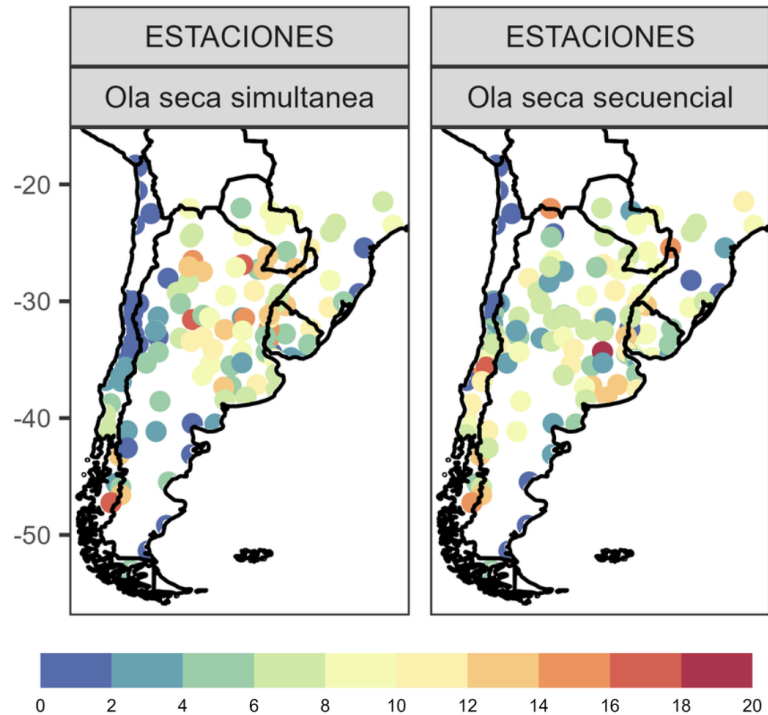
Para estudiar la variabilidad espacio-temporal de estos eventos y los cambios en la frecuencia de ocurrencia, se dividió el periodo bajo estudio en dos subperiodos: uno más antiguo (1979-1998) y otro más reciente (1999-2018). Luego se evaluaron los cambios en base a la diferencia entre las frecuencias totales de eventos que ocurrieron en el periodo más reciente y los que ocurrieron en el más antiguo. En particular, se identificaron las estaciones meteorológicas donde la frecuencia del periodo más reciente fue inferior a la mitad de la del periodo más antiguo, entre la mitad y el doble de la del periodo antiguo, y superior al doble de la del periodo antiguo. Adicionalmente, se exploraron las funciones de distribución empírica acumulada (ECDF) de la extensión espacial, definida como la proporción de estaciones que tuvieron al menos un evento por semestre cálido. La ECDF es una función que se ajusta directamente a los datos observados, proporcionando una representación visual de cómo se distribuyen en todo su rango de valores. En este trabajo, la ECDF fue utilizada para determinar diferencias en la extensión espacial de los eventos entre los dos subperiodos. A su vez, se testeó su significancia estadística con un test de Kolmogorov-Smirnov.

Por último, se analizó la variación interanual del número de días de ola de calor seca, así como la intensidad, duración y extensión espacial de estos eventos. El número de días de ola de calor seca se determinó como la suma de todos los días involucrados en un evento para cada verano; la duración se definió como la cantidad de días que perduró cada evento; y la intensidad se calculó como la diferencia entre la temperatura máxima del día de ola de calor y el percentil 90, promediada en todos los días del evento. Posteriormente, para cada semestre cálido, se calculó el promedio espacial del número de días de ola de calor seca considerando todas las estaciones meteorológicas de la región de estudio, así como también los promedios de la duración e intensidad de las mismas.

## RESULTADOS

En primer lugar, se evaluó la variabilidad espacial de las olas de calor secas, tanto simultáneas como secuenciales, mediante el cálculo de frecuencias absolutas a lo largo del periodo de estudio completo (Figura 1). Se observó que las frecuencias de eventos simultáneos y secuenciales exhiben un comportamiento similar. Las frecuencias máximas se concentran en el centro y noreste de Argentina en ambos casos. En contraste, Chile presenta bajas frecuencias en el centro y norte del país; y un incremento significativo hacia el sur. Este aumento es particularmente notable en los casos secuenciales, donde se registraron entre 10 y 18 eventos en el periodo total, al igual que en las estaciones situadas en la Patagonia oeste. Posteriormente, se dividió el periodo completo en dos subperiodos: 1979-1998 y 1999-2018, cada uno abarcando 20 años, para calcular las diferencias en la frecuencia de ocurrencia entre el periodo más reciente y el más antiguo (Figura 2). Aunque no es posible identificar un patrón generalizado de incremento o disminución de la frecuencia en todo el sur de Sudamérica, se pueden observar algunos patrones locales en las diferencias.

Específicamente, para eventos simultáneos, se destacaron diferencias positivas en algunas estaciones del centro y noreste de Argentina, así como también en el sur de Chile y norte de Brasil. En estas



**Figura 1.** Frecuencias absolutas de olas de calor secas simultáneas (izq.) y secuenciales (der.) en el periodo 1979-2018.

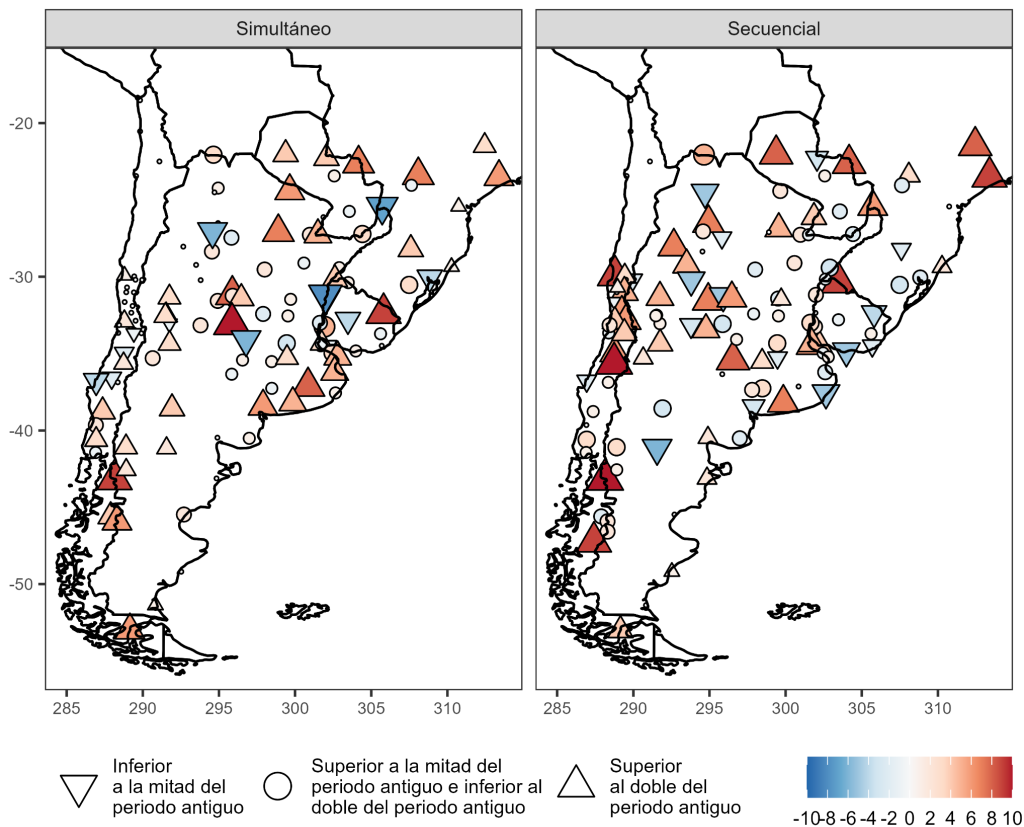
estaciones, la frecuencia del periodo más reciente superó el doble de la frecuencia del periodo más antiguo. Por otro lado, se observaron diferencias negativas en 4 estaciones del centro y norte de Argentina. En estos casos, la frecuencia del periodo más reciente fue inferior a la mitad de la del periodo más antiguo.

En cuanto a los eventos secuenciales, se observaron diferencias positivas en el centro y noroeste de Argentina, el centro de Chile, el norte de Paraguay y el este de Brasil. En estas regiones también se observa que en el período más reciente, la frecuencia de eventos fue mayor que el doble de la frecuencia de eventos en el período anterior. No obstante, también se encontró un reducido número de estaciones donde la frecuencia de eventos se redujo a más de la mitad, principalmente localizadas en el oeste de Argentina y el este de Uruguay.

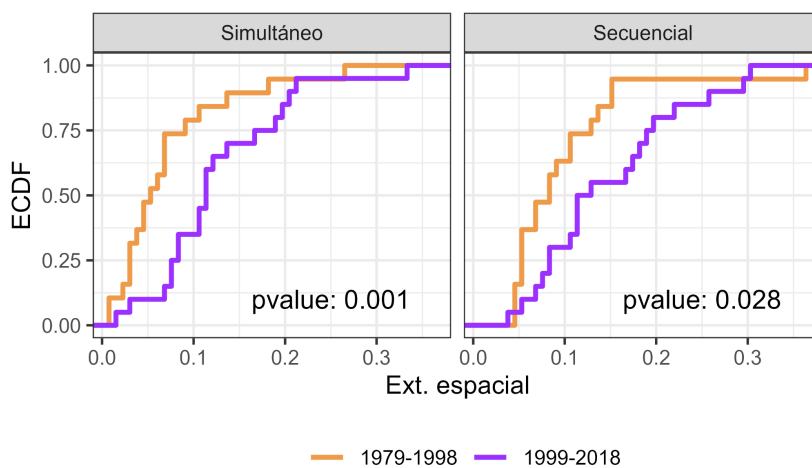
En línea con lo anterior, se analizaron las ECDF de la extensión espacial de las olas de calor secas simultáneas y secuenciales en el periodo más antiguo y el más reciente (Figura 3). Estas ECDF permitieron determinar diferencias en la extensión espacial de las olas de calor secas entre los dos periodos.

Las ECDF de las olas de calor secas del periodo más antiguo revelan un crecimiento más abrupto en comparación con la ECDF correspondiente al periodo más reciente. Esta diferencia en la pendiente de crecimiento entre ambas funciones sugiere un cambio significativo en la distribución de la extensión espacial de los eventos a lo largo del tiempo. La ECDF del periodo más reciente muestra un aumento más gradual, señalando una distribución más extensa de valores y, por ende, una mayor cobertura geográfica en comparación con el periodo más antiguo. En conclusión, la extensión espacial de las olas de calor secas, tanto simultáneas como secuenciales, fue mayor en el periodo más reciente que en el periodo más antiguo.

Por último, se exploró la variabilidad temporal de las olas de calor secas mediante un análisis detallado de los cambios interanuales en el número de días de ola de calor, duración, intensidad y extensión espacial de estos eventos (Figura 4). Se observaron tendencias positivas y significativas en los días de ola de calor seca de los casos secuenciales, indicando un aumento en la ocurrencia de estos eventos a lo largo de los años. Asimismo, la extensión espacial de las olas de calor secas simultáneas también experimentó un crecimiento significativo, indicando una expansión geográfica de estos eventos en el



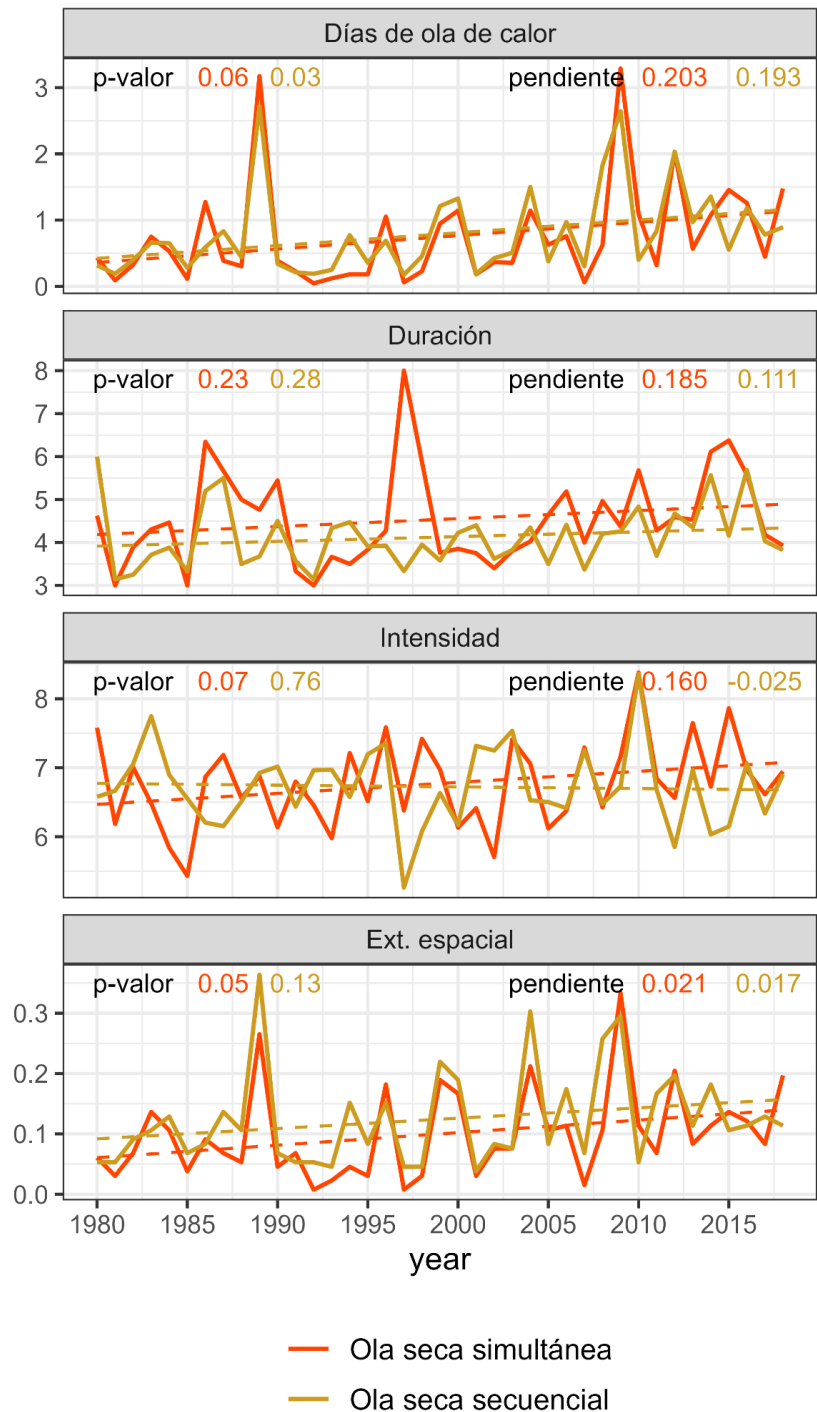
**Figura 2.** Diferencia entre las frecuencias del periodo 1999-2018 y las del periodo 1979-1998 de olas de calor secas simultáneas (izq.) y secuenciales (der.). Los triángulos hacia abajo indican las estaciones en las que la frecuencia del periodo reciente fueron inferiores a la mitad de las del periodo antiguo. Los círculos indican las estaciones en las que la frecuencia del periodo reciente fueron superiores a la mitad e inferiores al doble de las del periodo antiguo. Los triángulos hacia arriba indican las estaciones en las que la frecuencia del periodo reciente fueron superiores al doble de las del periodo antiguo.



**Figura 3.** ECDF de la extensión espacial de las olas de calor secas simultáneas (izq.) y secuenciales (der.). Pvalues del test de Kolmogorov-Smirnov entre distribuciones.

sur de Sudamérica.

En contraste con lo observado en el número de días con ola de calor seca y en la proporción de estaciones con ola de calor seca (extensión espacial), no se obtuvieron cambios significativos en su duración e intensidad. De todas formas, es importante considerar que la distribución de estaciones meteorológicas en el sur de Sudamérica es irregular. Algunas regiones poseen una mayor concentración de estaciones que otras, lo que puede influenciar el resultado del promedio regional.



**Figura 4.** Series temporales de los días de ola de calor [días], duración [días], intensidad [°C] y extensión espacial (expresado como la proporción de estaciones que registraron eventos) de las olas de calor secas simultáneas y secuenciales. Se muestran los valores del p-valor del test de Man-Kendall para la tendencia y el valor de la misma (expresada como la tasa de cambio de cada variable cada 10 años).

## SUMARIO Y CONCLUSIONES

En este trabajo, se estudiaron las olas de calor secas del semestre cálido (octubre a marzo) en el sur de Sudamérica, explorando su variabilidad espacio-temporal a lo largo del periodo 1979-2018. Se consideraron las olas de calor que ocurrieron simultáneamente con condiciones de sequía (ola de calor seca simultánea) y las olas de calor que ocurrieron luego de una sequía (ola de calor seca secuencial).

Los resultados revelaron patrones significativos en la distribución espacial de las olas de calor secas simultáneas y secuenciales. Los eventos fueron más frecuentes en el centro y noreste de Argentina, mientras que fueron más inusuales en el centro y norte de Chile. En el sur de Chile y en la Patagonia

oeste se destacó un aumento en la frecuencia de olas de calor, especial reuniónmente en los casos secuenciales.

La evaluación de la variabilidad temporal mediante la comparación de dos subperiodos (1979-1998 y 1999-2018) resaltó un incremento notable en la frecuencia de eventos en áreas específicas, como el centro y noreste de Argentina, sur de Chile y norte de Brasil para los casos simultáneos; y en el centro y noroeste de Argentina, centro de Chile, norte de Paraguay y este de Brasil para los secuenciales. En estas zonas, la frecuencia de olas de calor secas de los últimos años duplicó la frecuencia registrada en los años anteriores.

Además, se analizaron también cambios en la extensión espacial de las olas de calor secas simultáneas y secuenciales a través de funciones de distribución empírica acumulada. Los resultados evidencian un aumento significativo de las áreas afectadas por ambos eventos a lo largo del tiempo en el sur de Sudamérica.

Finalmente, se analizó la variación interanual del número de días de ola de calor seca, así como la intensidad, duración y extensión espacial de estos eventos en toda la región en su conjunto. En primer lugar, se encontró un incremento significativo en el número de días involucrados en una ola de calor seca secuencial. Con respecto a la extensión espacial, se evidencia un aumento en el número de estaciones afectadas por olas de calor seca, especial reuniónmente para los casos simultáneos, debido a que se obtuvieron resultados significativos tanto en el análisis por subperíodos como en el de variabilidad interanual. En el caso secuencial, se observó un aumento significativo en el análisis por subperíodos, mientras que en el análisis interanual se obtuvo una tendencia positiva pero no significativa. Por último, no se encontraron cambios significativos en la duración e intensidad de ninguno de los eventos.

Estos resultados resaltan la necesidad de comprender la complejidad de los eventos climáticos extremos compuestos y sus consecuencias, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones y la planificación de medidas de adaptación frente a posibles efectos adversos.

**Agradecimientos** Esta investigación fue financiada por una beca inicial de la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación y por los proyectos PICT2019-2019-02933, CONICET PIP 0333 (2021-2023), UBACyT 20020220200111BA.

## REFERENCIAS

- Leonard, M., Westra, S., Phatak, A., & et al.** (2014). A compound event framework for understanding extreme impacts. *WIREs Clim Change*, 5, 113–128. <https://doi.org/10.1002/wcc.252>
- Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D. R., & et al.** (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC*, 109–230.
- Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B. J. J. M., & et al.** (2018). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8, 469–477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>