

# UNA VISIÓN GENERAL DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL MAR RELATIVA PARA EL MONITOREO Y LA PREDICCIÓN DE EL NIÑO-OSCILACIÓN\*

Michelle L'Heureux<sup>1</sup>, Nathaniel Johnson<sup>2</sup> y Michael Tippett<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Oceanic and Atmosphere Administration, National Weather Service, Climate Prediction Center, Maryland, USA

<sup>2</sup> National Oceanic and Atmosphere Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, New Jersey, USA

<sup>3</sup> Columbia University, New York, USA



**Michelle L'Heureux** es científica física en el Centro de Predicción Climática de la NOAA de EE. UU. Se ha desempeñado como experta estadounidense en el Equipo de Trabajo en Información sobre ENOS de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Durante los últimos 17 años, ha liderado el equipo de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), el cual es responsable de emitir regularmente la información actualizada de la NOAA sobre El Niño y La Niña. Michelle también es coordinadora principal, escritora y editora del Blog sobre ENOS en climate.gov de la NOAA, el cual le permite involucrar al público interesado en la ciencia de ENOS y otros temas climáticos. Michelle también realiza investigaciones aplicadas para mejorar el conocimiento y la predicción de la variabilidad climática subestacional a estacional, y es autora o coautora de más de 50 artículos en revistas científicas.

**Palabras clave:** TSM, ENOS, Índice Oceánico Niño, ONI, temperatura superficial del mar relativa

Citar como L'Heureux, M., Johnson, N., & Tipper, M. (2024). Una visión general de la temperatura de la superficie del mar relativa para el monitoreo y la predicción de El Niño-Oscilación Sur. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.º 09, págs. 4-15.

## ¿Cuál es la **contribución** de esta investigación para los tomadores de decisiones?\*

El Índice Oceánico Niño Relativo (RONI), basado en la temperatura superficial del mar relativa, sería más efectivo para monitorear y predecir El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) a nivel global en un clima cambiante. Los tomadores de decisiones pueden adoptar este índice para diseñar estrategias de mitigación de riesgos climáticos, optimizar la gestión de recursos como agua y energía, ajustar políticas de adaptación al cambio climático y coordinar respuestas internacionales más eficaces, basándose en información más precisa y adaptada a las condiciones climáticas cambiantes asociadas al ENOS.

## Resumen

Las tendencias en las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico tropical han presentado complicaciones para el monitoreo y la predicción de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Específicamente, ENOS se mide principalmente utilizando anomalías e índices de temperatura de la superficie del mar (TSM), los cuales requieren la elección de un promedio climatológico de largo plazo ("climatología"). Sin embargo, la climatología ha cambiado con el tiempo, lo que demanda nuevos métodos para garantizar que las anomalías de la TSM reflejen con exactitud el estado acoplado océano-atmósfera de ENOS. Se ha introducido y explorado un índice de TSM "relativo" para evaluar su idoneidad en las actividades operativas asociadas a ENOS. En este artículo se presenta este índice y se explica por qué el índice relativo de ENOS puede ser físicamente más adecuado, en un clima cambiante, que los métodos tradicionales anteriores para monitorear y predecir ENOS. Mostramos evidencia que las diferencias cada vez mayores entre los índices de TSM tradicionales y relativos se están reflejando en el debilitamiento de la conexión entre la TSM tropical y las anomalías atmosféricas que constituyen el estado ENOS. Finalmente, al parecer, los errores de pronóstico que utilizan el índice de TSM tradicional son cada vez mayores en comparación con aquellos que emplean el índice de TSM relativo.

## 1. Antecedentes de la definición oficial de ENOS de la NOAA

La misión de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) de los EE. UU. es comprender y predecir los cambios en el clima, el tiempo, el océano y las costas, y compartir esa información con otros. En apoyo de la misión de la NOAA, el Centro de Predicción Climática (CPC), ubicado dentro del Servicio Meteorológico Nacional (NWS, por sus siglas en inglés) de los EE. UU., tiene la tarea de proporcionar actualizaciones periódicas sobre el estado y las predicciones de ENOS, siendo el índice Niño 3.4 una medida primaria para este propósito. El índice Niño 3.4 se calcula promediando las anomalías (diferencias con respecto a una climatología) de la temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial centro-oriental (5° N a 5° S y 170° O a 120° O). El índice oficial ENOS de la NOAA es el Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés), que corresponde

al promedio móvil de tres meses (estacional) del índice Niño 3.4. La NOAA define los eventos cálidos (El Niño) como periodos durante los cuales los valores del ONI son mayores de +0.5 °C durante al menos cinco estaciones consecutivas superpuestas, y los eventos fríos (La Niña) como periodos en los cuales los valores del ONI son menores de -0.5 °C durante la misma duración. La NOAA y otros servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales prestan atención al índice Niño 3.4 y al ONI porque estos índices están significativamente correlacionados con otros aspectos del sistema ENOS acoplado y las teleconexiones (ver Barnston et al. [1997] para más detalles).

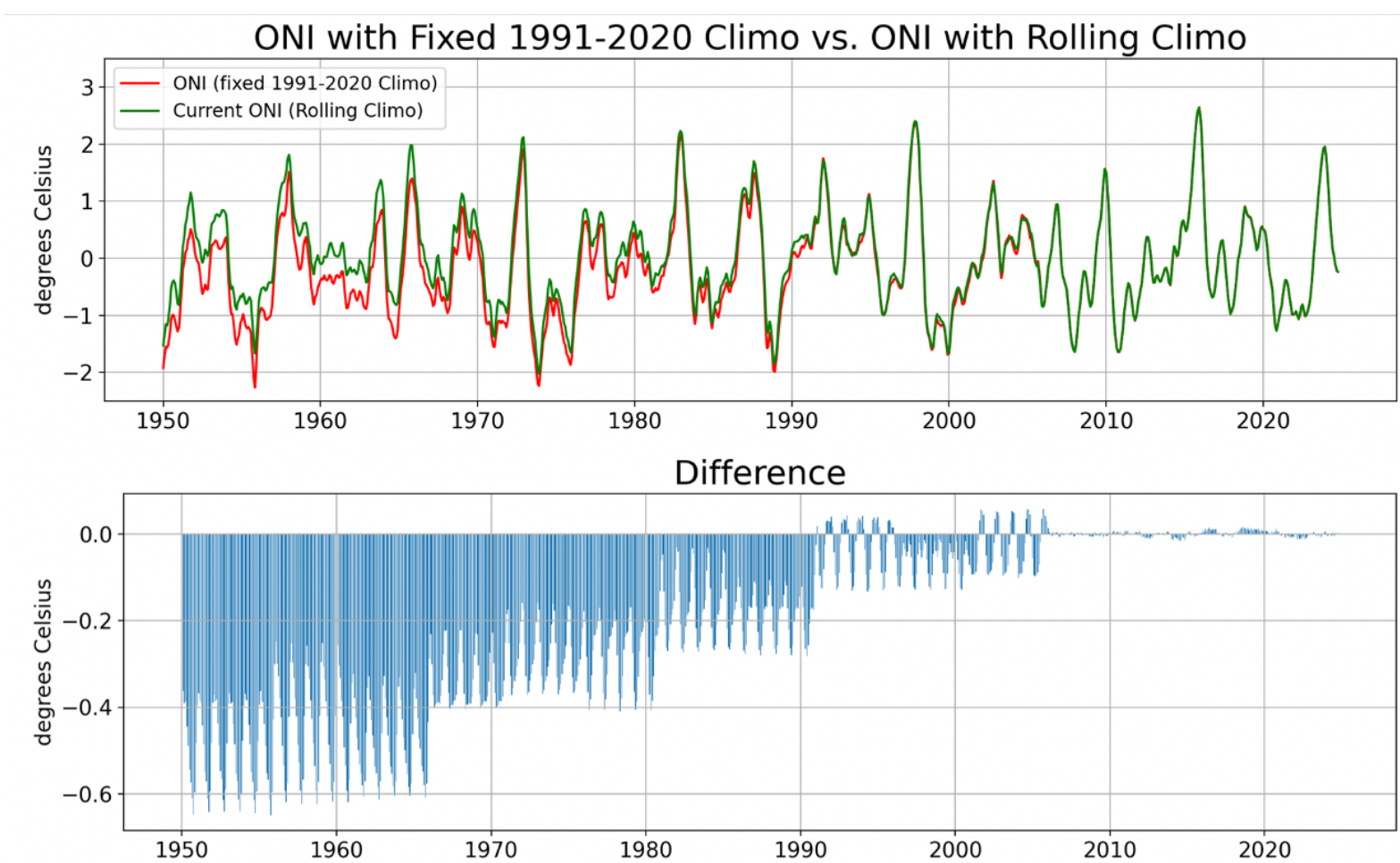
El ENOS es un fenómeno climático océano-atmósfera extenso y multifacético que surge de retroalimentaciones en todo el océano Pacífico tropical. Como resultado, el ENOS no se puede representar ni medir perfectamente utilizando un único índice o número. Por lo tanto, la definición oficial de la NOAA representa un compromiso y se creó en respuesta a los usuarios y los tomadores de decisiones que querían una forma sencilla y fácil de definir, medir y predecir el estado de ENOS. Además, debido a que el índice se basa en un largo registro de la TSM con control de calidad, los eventos de ENOS se pueden identificar de manera confiable desde, al menos, la década de 1950\*\*, lo que resulta útil para los usuarios que desean analizar relaciones históricas a largo plazo. Los índices del ENOS basados en anomalías atmosféricas tropicales tienden a ser más variables de un mes a otro ("ruidosos") y, a menudo, se limitan al registro de la era satelital que comienza alrededor de 1980.

Implícito en la definición del índice/ONI de El Niño 3.4 está el uso de una climatología (promedio de largo plazo), que es el periodo de referencia (o base) sobre el cual se calculan las anomalías. En 2005, cuando el ONI se adoptó por primera vez como índice oficial de la NOAA, se utilizó una climatología única para el periodo 1971-2000 para calcular los valores del ONI desde 1950. Es decir, las anomalías de la temperatura superficial del mar se calcularon restando los promedios de los meses calendario de 1971-2000 y luego se promediaron estacionalmente para formar el ONI. En ese momento, la Organización Meteorológica Mundial recomendó este periodo base de 30 años o "normal climática". La política del NWS de la NOAA es actualizar el periodo base climatológico cada 10 años. En 2011, cuando el NWS actualizó sus normales

climáticas a 1981-2010, se hizo evidente rápidamente que calcular el ONI usando la climatología de 1981-2010 cambiaría significativamente la definición de los eventos históricos de El Niño y La Niña debido a una tendencia de calentamiento gradual en la región de Niño 3.4 observada desde 1950. En particular, los eventos de La Niña, que habían ocurrido en la parte inicial del registro, parecerían más fuertes y más largos, mientras que los eventos de El Niño parecerían más débiles y más cortos. Usar una climatología moderna, más cálida, para definir eventos de El Niño o La Niña que ocurrieron 60 años antes es difícil de justificar físicamente.

Como resultado, en 2011 se empleó una solución *ad hoc* en la que se utiliza una climatología móvil de 30 años para definir el registro histórico de los eventos El Niño y La Niña. Idealmente, para un dato cualquiera, se utiliza la climatología cuyo periodo de 30 años esté centrado lo más cerca posible a dicho dato, lo cual es relativamente directo considerando el registro histórico, pero genera una dificultad en tiempo real para los datos más recientes ya que no se cuenta con los valores futuros necesarios para el cálculo de la climatología y se usa preliminarmente la climatología más reciente. La climatología se actualiza con un ciclo

de 5 años, en lugar de 10 años como es lo usual, y las anomalías preliminares son recalculadas usando cada nueva climatología hasta que se cuente con la definitiva correspondiente. Esta frecuencia de actualización reduce la magnitud de la discontinuidad causada por la actualización de la climatología. Un ciclo de actualización más frecuente sería problemático para los usuarios, quienes podrían confundirse con los cambios de un año a otro en los valores anteriores de ONI. Por ejemplo, en 2024, el periodo de base en tiempo real es 1991-2020 y se aplica a los valores de ONI que datan de 2006. En 2026, la climatología se actualizará al periodo 1996-2025, y el registro de ONI de 2006-2010 permanecerá sin cambios, continuando con el uso de la climatología de 1991-2020. Sin embargo, los valores de ONI a partir de 2011 se recalcularán usando la nueva climatología de 1996-2025. Si bien este método sirve como una solución provisional útil, contiene dos características indeseables: (1) hay cambios bruscos cada vez que se actualiza la climatología (Figura 1) y (2) los valores de ONI durante la década reciente cambian cuando se adopta una nueva climatología. Además, en lo que respecta a ENOS, no hay ninguna razón física inherente para utilizar una climatología de 30 años en lugar de otro periodo climatológico.



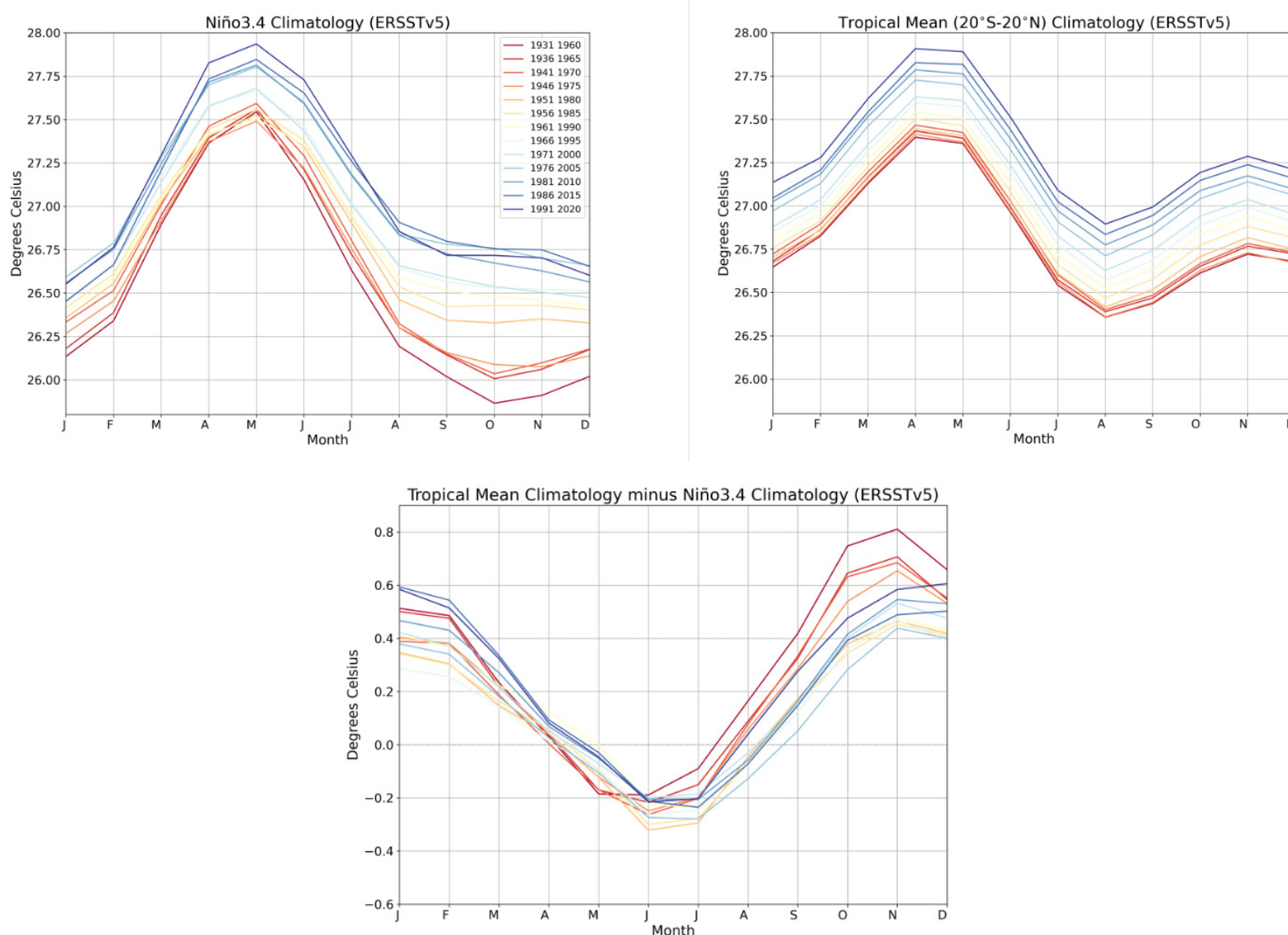
**Figura 1.** Índice Oceánico de El Niño (ONI) durante el periodo 1950-2024 basado en una única climatología de 1991-2020 (línea roja) y en climatologías móviles de 30 años actualizadas cada 5 años (línea verde). La diferencia entre los dos índices se muestra en el panel inferior. Datos: ERSSTv5.

## 2. Cálculo de un índice relativo de la TSM para ENOS

Dadas las tendencias del índice de El Niño 3.4, van Oldenbourgh et al. (2021) introdujeron un nuevo índice de El Niño basado en la TSM. Basándose en investigaciones anteriores sobre las TSM relativas en los trópicos, calcularon un índice relativo de ENOS restando el índice de anomalía de la temperatura de la superficie del mar media tropical (promedio en los trópicos globales entre 20° S y 20° N) del índice de Niño 3.4 definido tradicionalmente. Al restar la media tropical, la varianza es menor que la del índice original porque el ENOS está correlacionado con el índice del promedio tropical. Debido a que la categorización de los eventos El Niño y La Niña se basa en umbrales, esto significa que el índice que resulta de la diferencia debe reescalarme para que coincida con la varianza del índice original. L'Heureux et al. (2024) propusieron un método simple para

hacer esto calculando la razón entre la desviación estándar del índice Niño 3.4 original y la desviación estándar del índice de diferencia (Niño 3.4 menos la media tropical) durante un periodo de referencia. El factor de escala se calcula para cada mes calendario y luego se multiplica por el índice, de modo que el nuevo índice relativo retiene la varianza del índice de Niño 3.4 original. Por lo tanto, el ONI relativo (RONI) es el índice reescalado con una media móvil de tres meses. En el siguiente enlace se puede acceder a un código Python para calcular este índice ENOS relativo a partir de las observaciones de ERSSTv5: <https://github.com/michellelheureux/Relative-SST>

Los usuarios más perspicaces pueden notar que aún se requiere una climatología para calcular los índices de anomalía de la media tropical de TSM y de Niño 3.4. ¿Por qué? Como demostraron L'Heureux et al. (2024), los ciclos estacionales del índice de Niño 3.4 y de la media tropical no son los mismos (Figura 2). Por lo tanto, todavía se debe restar la climatología;



**Figura 2.** Ciclo estacional del índice Niño 3.4 (arriba a la izquierda), índice promedio de TSM tropical (arriba a la derecha) y diferencia entre los dos índices (abajo). El ciclo estacional se calcula utilizando diferentes periodos climatológicos de 30 años desde 1931-1960 hasta 1991-2020 (ver leyenda). Datos: ERSSTv5.

de lo contrario, el índice reflejará las diferencias climatológicas promedio entre estos dos índices. Sin embargo, quizás más importante aún, L'Heureux et al. (2024) también demostraron que la elección exacta de una climatología de 30 años para calcular el RONI es mucho menos trascendental que para el cálculo del ONI tradicional. El uso del RONI elude en gran medida la cuestión de qué climatología utilizar, ya que se identifican aproximadamente los mismos eventos históricos de El Niño y La Niña sin importar qué climatología se seleccione. La siguiente sección analiza la base física de un índice de TSM relativo, lo que puede ayudar a explicar por qué el índice relativo es más estable y resiliente ante la elección de la climatología.

### 3. La base física de un índice relativo de ENOS

¿Por qué puede ser útil un índice relativo de TSM para monitorear y predecir ENOS? En primer lugar, un índice relativo de TSM aísla regiones locales de anomalías de TSM que son importantes para la inestabilidad convectiva. La razón por la que las regiones locales de calentamiento y enfriamiento en los trópicos globales son importantes es porque las anomalías de convección y lluvia tienden a establecerse donde la diferencia entre la temperatura de la superficie y la de los niveles superiores es mayor (es decir, donde la estabilidad estática es menor). Las áreas con mayor estabilidad estática se asocian con convección suprimida, y las áreas con menor estabilidad estática se relacionan con convección incrementada. La fuerte relación entre las anomalías locales de TSM y las anomalías de precipitación es exclusiva de los trópicos globales debido a la debilidad de la fuerza de Coriolis cerca al ecuador. Como resultado de la fuerza de Coriolis insignificante, cualquier diferencia de temperatura a alguna altitud por encima de la capa límite (aproximadamente de 1.5 km a 15 km) se suaviza rápidamente de manera horizontal y es casi la misma en todos los trópicos.

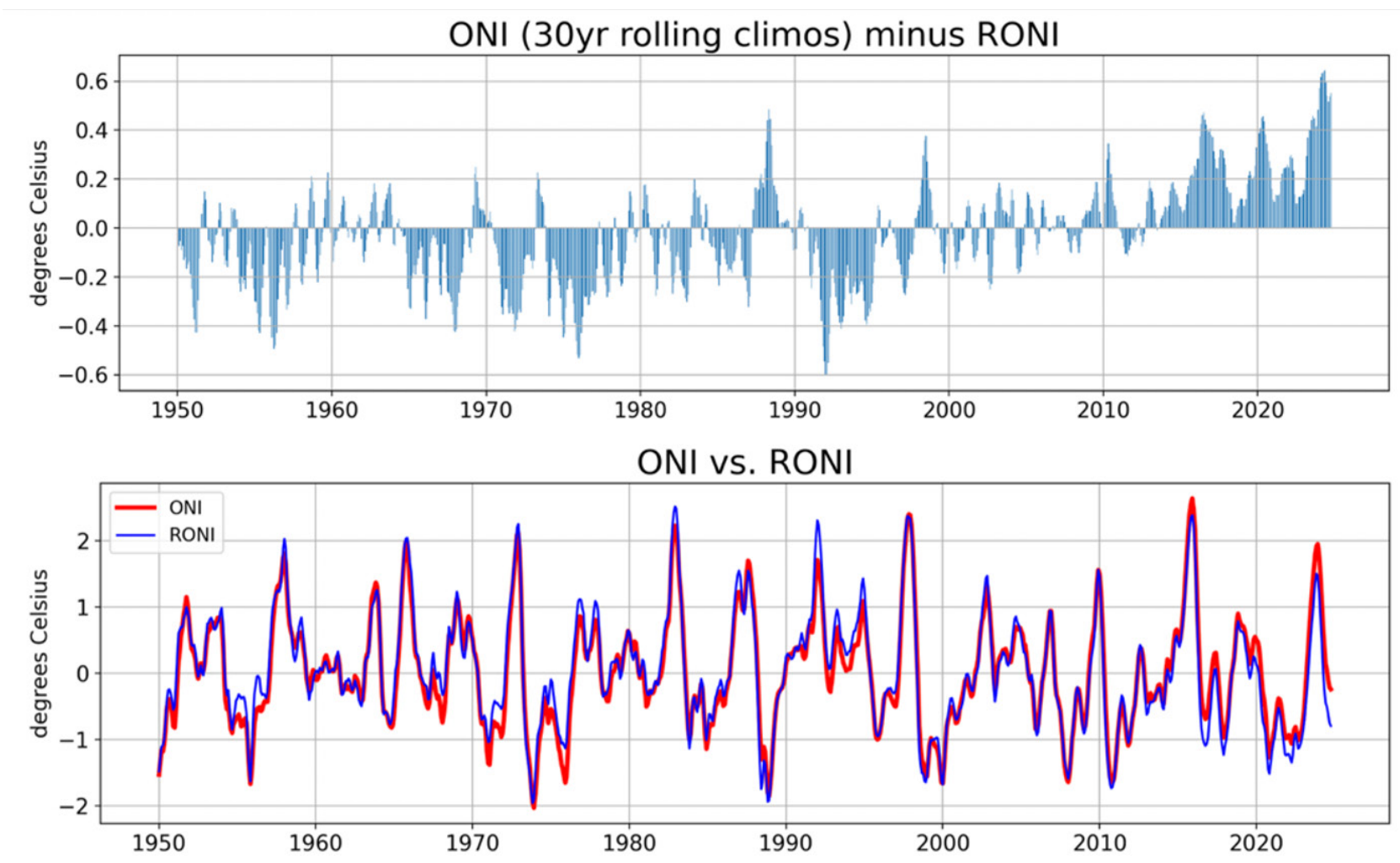
Sin embargo, en el cálculo de la TSM relativa, se utilizan las anomalías globales de la TSM tropical y no las anomalías de temperatura de la tropósfera libre. ¿Por qué? La investigación de Sobel et al. (2001, 2002) ha demostrado que las temperaturas atmosféricas en los trópicos siguen el perfil adiabático húmedo, lo que significa que la temperatura en la tropósfera

libre está determinada por la temperatura (y la humedad) de la superficie de las regiones oceánicas con la convección tropical más activa (las "regiones lluviosas" tropicales). A pesar de la existencia de muchas regiones no lluviosas de los trópicos, como la piscina fría del Pacífico oriental donde las TSM permanecen por debajo del umbral convectivo (y, por lo tanto, no influyen en la temperatura de la tropósfera libre), Sobel et al. (2002) encontraron que la variabilidad interanual de la TSM en las regiones lluviosas sigue de cerca la TSM media tropical. Debido a esta estrecha asociación, la TSM media tropical es un indicador razonable de la temperatura de la tropósfera libre tropical, la cual representa el perfil de temperatura adiabático húmedo de las regiones lluviosas tropicales.

Por lo tanto, los dos principales ingredientes de la inestabilidad convectiva tropical (temperatura superficial cálida y temperaturas troposféricas frías) pueden aproximarse mediante anomalías locales y tropicales de la TSM media, respectivamente; en tanto, su diferencia, la TSM relativa, es un indicador de la inestabilidad condicional tropical. Esta lógica también se aplica a los cambios en el umbral de convección tropical en lugares como la zona fría del Pacífico oriental, que suele ser convectivamente inactiva, ya que este umbral tiende a seguir las TSM medias tropicales (Johnson y Xie, 2010). Por lo tanto, se deduce que los cambios locales en las TSM, como los de la región de Niño 3.4, solo pueden asociarse con cambios en la precipitación local si la TSM local está por encima del umbral de convección (que está determinado por las TSM medias tropicales).

### 4. ¿Cuáles son las ventajas de utilizar un índice relativo ENOS?

Un índice relativo ENOS está justificado físicamente debido a la relación inherente entre las anomalías relativas de la TSM y las anomalías de la convección tropical. También es fácil de calcular (Sección 2) y los usuarios pueden encontrar un índice basado en la TSM más intuitivo de usar debido a su experiencia previa con los índices tradicionales de la TSM de ENOS. Además, un índice relativo de la TSM se puede calcular sobre un registro observacional de la TSM con control de calidad que se remonta a un tiempo más lejano que muchos registros atmosféricos del Pacífico tropical, como los de la radiación de onda larga saliente y



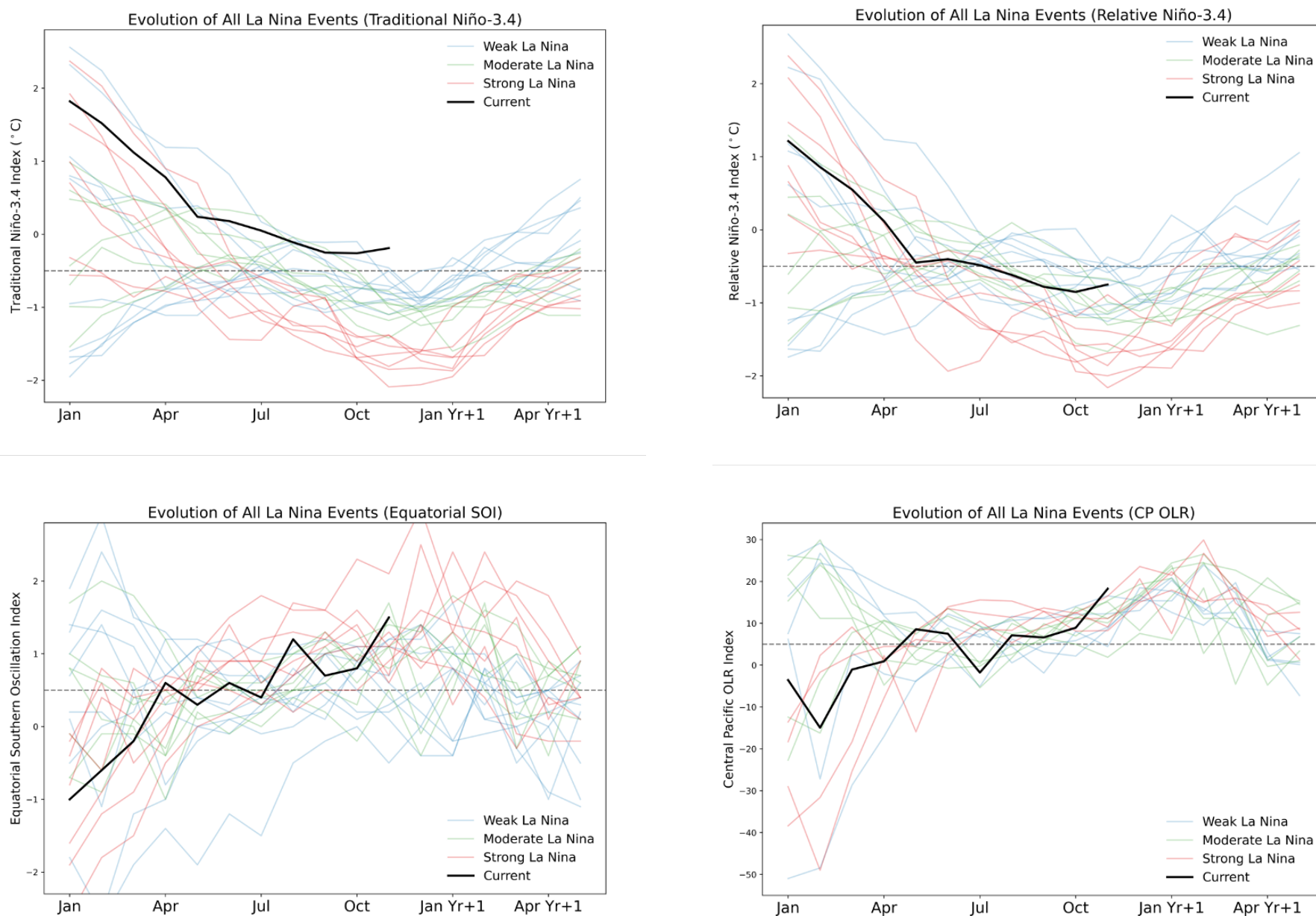
**Figura 3.** Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) utilizado actualmente en el monitoreo oficial de ENOS de la NOAA (climatología móvil de 30 años; línea roja) y el índice ONI Relativo (RONI) con una única climatología de 1991-2020 (línea azul; panel inferior). El panel superior muestra la diferencia entre los dos índices. Datos: ERSSTv5.

precipitación, que dependen de los satélites y datan aproximadamente de 1979. Sin embargo, durante muchas décadas, un índice ENOS que utiliza anomalías tradicionales de la temperatura de la superficie del mar estuvo suficientemente vinculado a las anomalías de la precipitación, por lo que el uso de anomalías de la temperatura de la superficie del mar ha sido un indicador eficaz del estado acoplado de ENOS. ¿Qué ha cambiado recientemente que ha hecho que el uso de un índice relativo de la temperatura de la superficie del mar sea más atractivo?

#### 4.1 Cambios recientes observados en RONI versus ONI

La Figura 3 muestra la diferencia entre el ONI tradicional (utilizando la climatología móvil de 30 años detallada en la Sección 1) y el ONI relativo (RONI). Durante el último año, el RONI ha estado al menos 0.5 °C más frío que el ONI tradicional. Además, se está volviendo más evidente que las diferencias tienden a aumentar, lo que implica que la estrategia de restar la climatología de 30 años, incluso si es móvil y actualizada, puede no eliminar

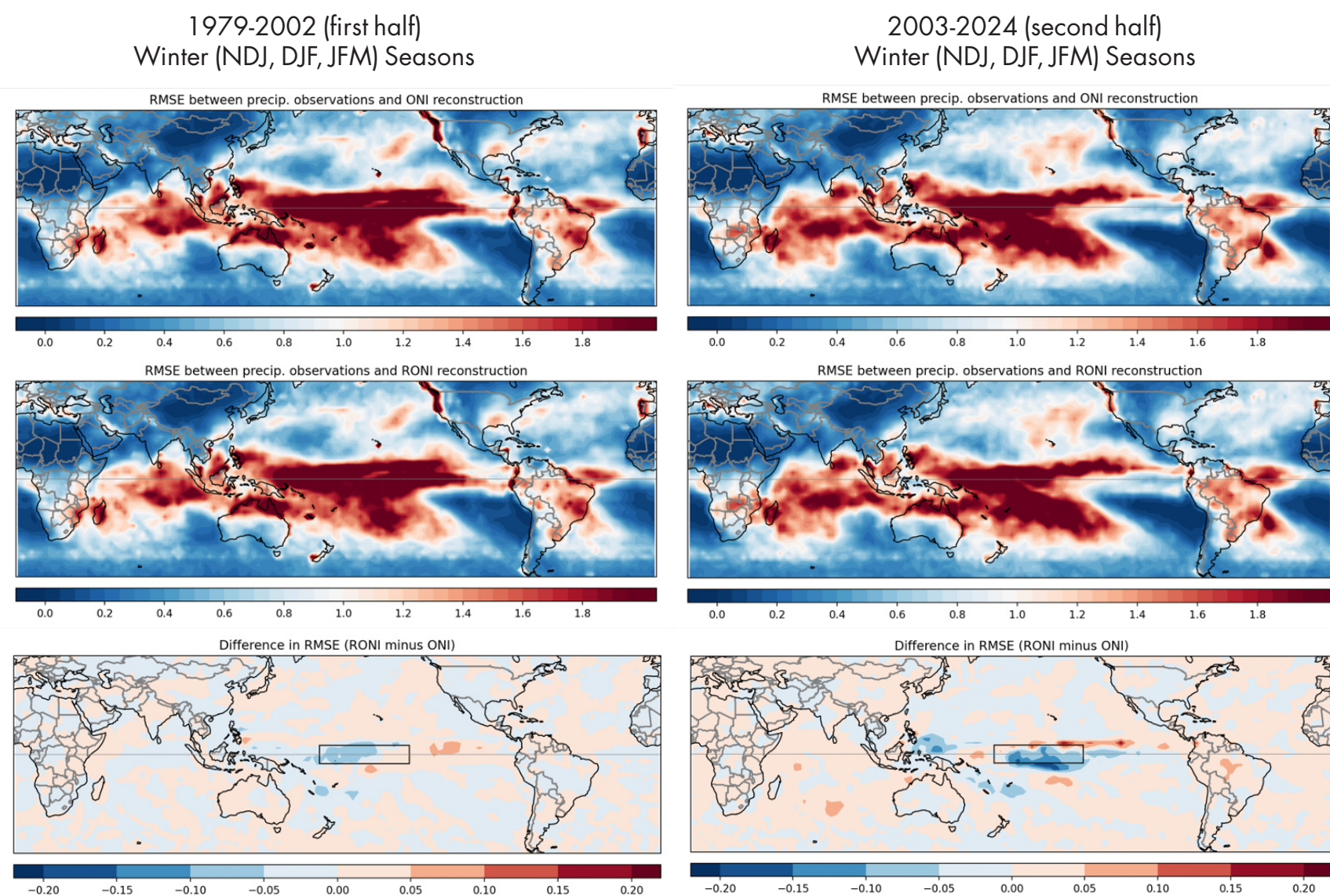
adecuadamente las tendencias de largo plazo. Estas diferencias son significativas y son comparables con los umbrales usados para identificar los eventos de El Niño y La Niña. También es preocupante que estas diferencias parezcan manifestarse en desfases entre las TSM tradicionales y otros índices atmosféricos ENOS. La Figura 4 muestra la evolución mensual más reciente (hasta noviembre de 2024) de Niño 3.4 tradicional, Niño 3.4 relativo, el índice de Oscilación Sur Ecuatorial (EQSOI, por sus siglas en inglés) y el índice de Radiación de Onda Larga saliente del Pacífico central (CP OLR, por sus siglas en inglés). La evolución actual se muestra con la línea negra y se superpone con todos los demás años de La Niña (identificados utilizando los criterios históricos del ONI en la Sección 1) desde 1950 o 1979 (en el caso de CP OLR). Asimismo, se muestra que el índice Niño 3.4 relativo está más alineado con los otros dos índices atmosféricos, y también con otras evoluciones pasadas de La Niña, que el índice tradicional de Niño 3.4. De hecho, es posible que este próximo invierno de 2024-2025 se clasifique retrospectivamente como ENOS-neutral utilizando los criterios tradicionales del ONI, pero se consideraría un episodio de La Niña si se utilizara en su lugar el RONI.



**Figura 4.** Valores mensuales del índice Niño 3.4 tradicional (arriba a la izquierda), índice Niño 3.4 relativo (arriba a la derecha), SOI ecuatorial (abajo a la izquierda) y OLR del Pacífico central (abajo a la derecha). La línea negra es la evolución actual de enero a noviembre de 2024. Años de La Niña anteriores seleccionados en función de la definición de umbrales de ONI de 5+ consecutivos del ONI actual de la NOAA (climatología móvil de 30 años).

Si se mira más atrás del año más reciente, se pueden crear reconstrucciones de anomalías climáticas para evaluar qué tan bien los índices describen las anomalías observadas. Una reconstrucción se calcula 1) haciendo una regresión lineal de las anomalías climáticas sobre los ONI tradicional y relativo, y luego 2) multiplicando los coeficientes de regresión por el valor observado del ONI tradicional o relativo, de modo que la amplitud refleje la componente del valor observado de la anomalía climática de interés explicada por dicho índice. La Figura 5 muestra los errores en la reconstrucción de las anomalías de precipitación del GPCP (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcp.html>) para la primera mitad del registro (columna izquierda) y la segunda mitad del registro (columna derecha). En estos gráficos, solo se consideran las estaciones de invierno boreal (noviembre-enero, diciembre-febrero, enero-marzo) dado que ENOS tiende a alcanzar su pico y tener sus

mayores impactos durante esas estaciones. En la fila superior, se calcula un error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) para mostrar la diferencia entre la reconstrucción usando el ONI y las anomalías observadas. La segunda fila muestra el RMSE para la reconstrucción basada en el RONI. La fila inferior muestra las diferencias del RMSE entre el RONI y el ONI, de modo que el sombreado azul indica dónde la reconstrucción, usando el RONI, proporciona un mejor ajuste a las observaciones. Cabe destacar que, en este conjunto de datos de precipitación, la región del Pacífico central antes mencionada (del CP OLR, identificada por un rectángulo negro), muestra un error menor usando RONI. Esta región está fuertemente relacionada con las anomalías de la TSM y la dinámica acoplada de ENOS (L'Heureux et al., 2015). Si bien ambas mitades del registro indican un mejor ajuste en el Pacífico central con RONI, esta diferencia se ha intensificado en la mitad más reciente.

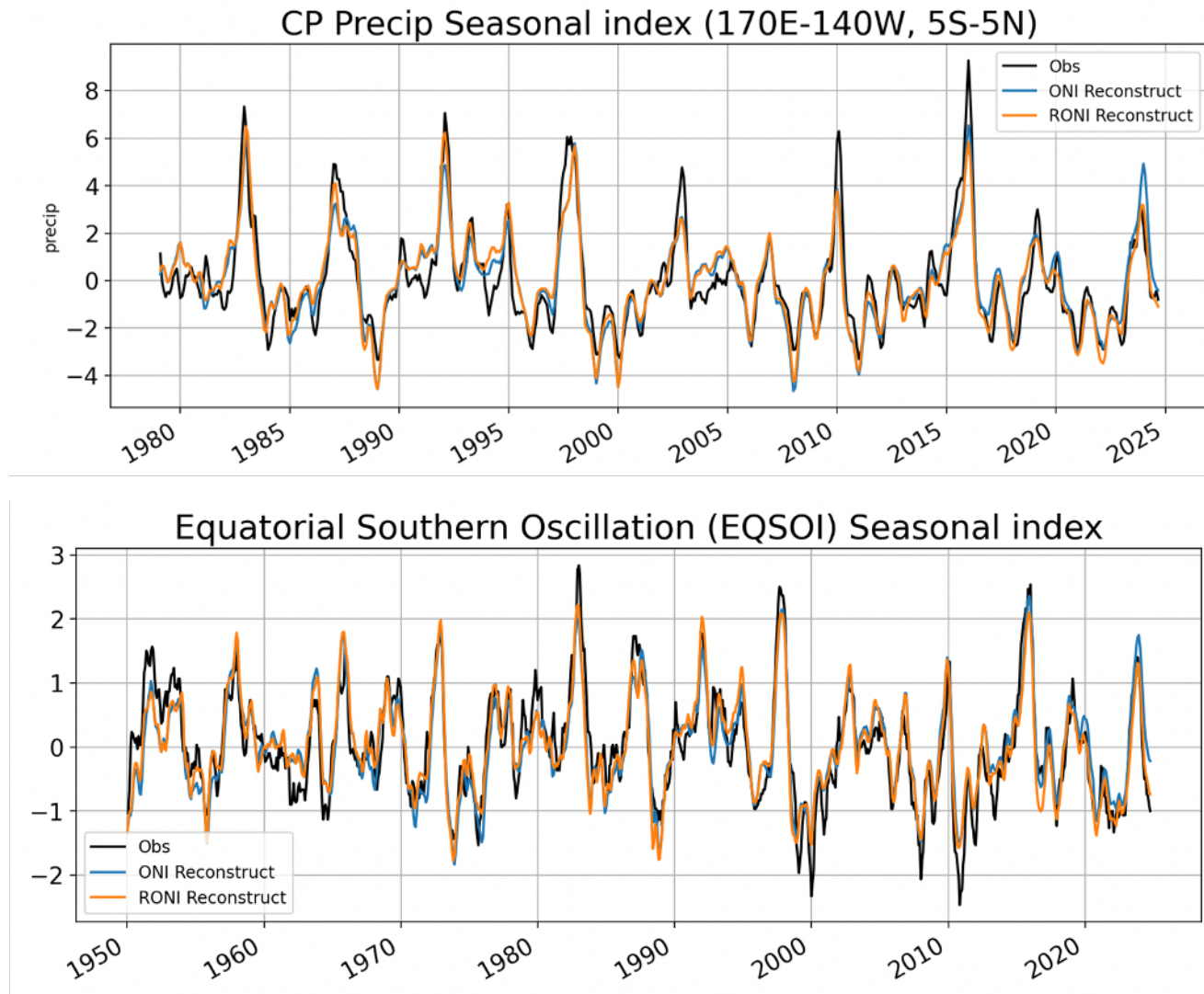


**Figura 5.** Error cuadrático medio entre anomalías de precipitación y reconstrucciones basadas en el ONI tradicional (fila superior), el ONI relativo (fila central) y la diferencia en el RMSE (fila inferior). La columna de la izquierda corresponde a las temporadas de invierno (noviembre-enero, diciembre-febrero, enero-marzo) de 1979 a 2002, mientras que la columna de la derecha a las temporadas de invierno de 2003 a 2024. Datos: GPCP.

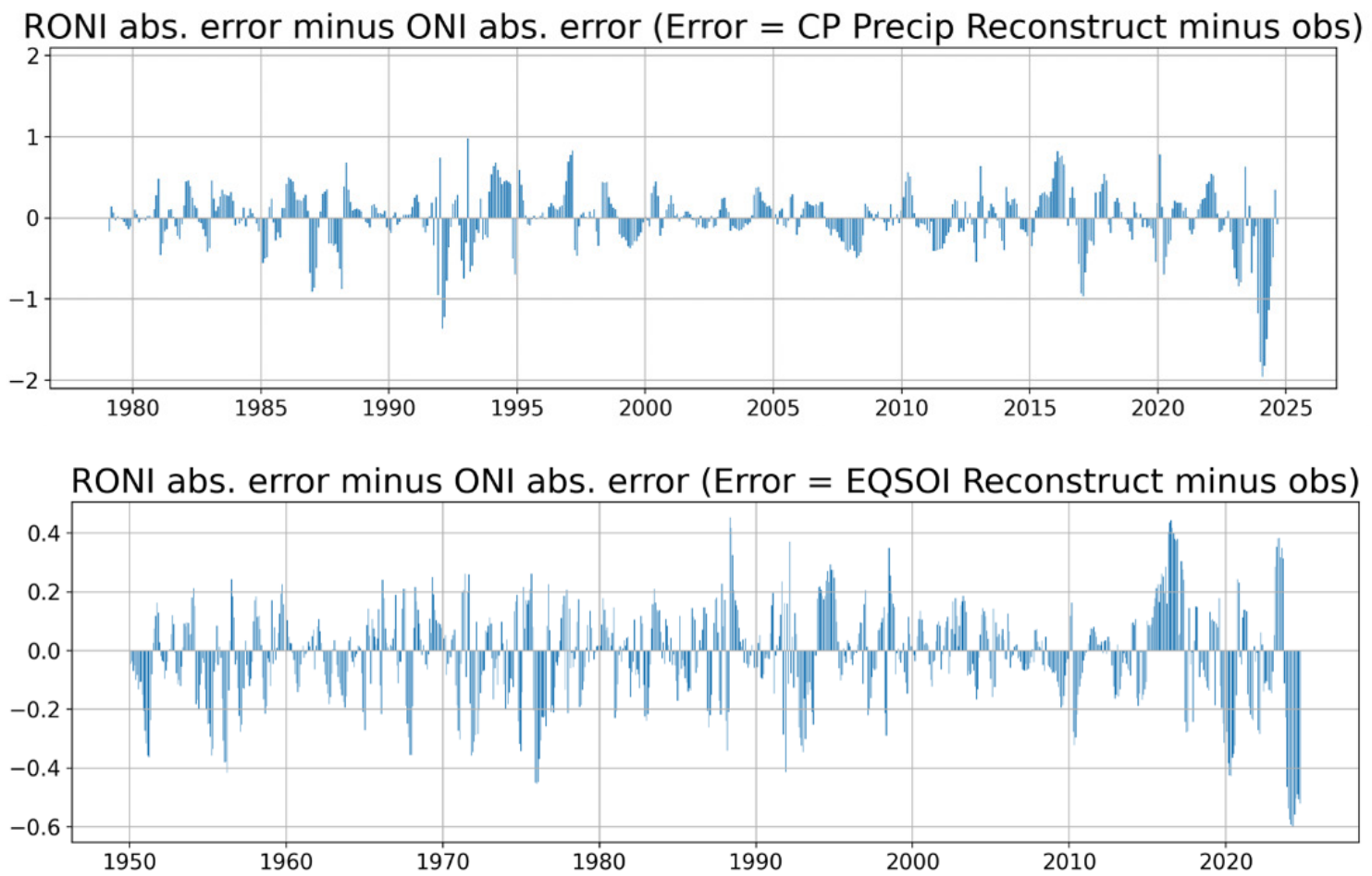
El mismo procedimiento de reconstrucción se aplica a las series temporales de precipitación en el Pacífico central (CP, por sus siglas en inglés) (utilizando los datos de GPCP que se muestran en la Figura 5) y del EQSOI para estaciones superpuestas durante sus periodos de registro. La Figura 6 muestra los índices de precipitación CP y EQSOI observados (negro), junto a la reconstrucción con el ONI tradicional (naranja) y la reconstrucción con RONI (azul). Para comparar más directamente RONI y ONI con las observaciones, la Figura 7 muestra la diferencia en el error absoluto ( $\text{error} = \text{reconstrucción} - \text{observaciones}$ ) usando RONI y ONI para la precipitación de CP (panel superior) y el EQSOI (panel inferior). En las figuras, los valores negativos indican que la reconstrucción RONI coincide mejor con la amplitud de los valores del índice observados y los valores positivos significan que la reconstrucción ONI coincide mejor. A partir de estas series temporales, queda claro que RONI describe cada vez mejor la intensidad de las anomalías observadas en el registro reciente (especialmente desde ~2015). Este periodo coincide aproximadamente con

aquel en el que la divergencia entre RONI y ONI en sí ha sido mayor (Figura 3).

En su evaluación de RONI y ONI, L'Heureux et al. (2024) también demostraron que, para ciertas estaciones y regiones (temporadas de invierno en Australia y Estados Unidos), el índice de SST relativo está más fuertemente correlacionado con las anomalías de precipitación observadas (ver su Figura 13). Sobre Indonesia y el Pacífico tropical, un mapa de regresión de anomalías de precipitación (ver su Figura 12) indica que RONI proporciona un patrón de dipolo más nítido y desfasado de anomalías de precipitación (en comparación con ONI). Un análisis similar, que analizó el coeficiente de correlación sobre el Pacífico tropical, no mostró que un índice fuera más eficaz para describir la variabilidad de temporada a temporada que el otro. Por lo tanto, la ventaja del RONI sobre el ONI parece estar principalmente en las métricas que describen la amplitud de las anomalías observadas (en contraste con la variabilidad temporal), en particular sobre el registro histórico reciente.



**Figura 6.** Error cuadrático medio entre anomalías de precipitación y reconstrucciones basadas en el ONI tradicional (fila superior), el ONI relativo (fila central) y la diferencia en el RMSE (fila inferior). La columna de la izquierda corresponde a las temporadas de invierno (noviembre-enero, diciembre-febrero, enero-marzo) de 1979 a 2002, mientras que la columna de la derecha a las temporadas de invierno de 2003 a 2024. Datos: GPCP.



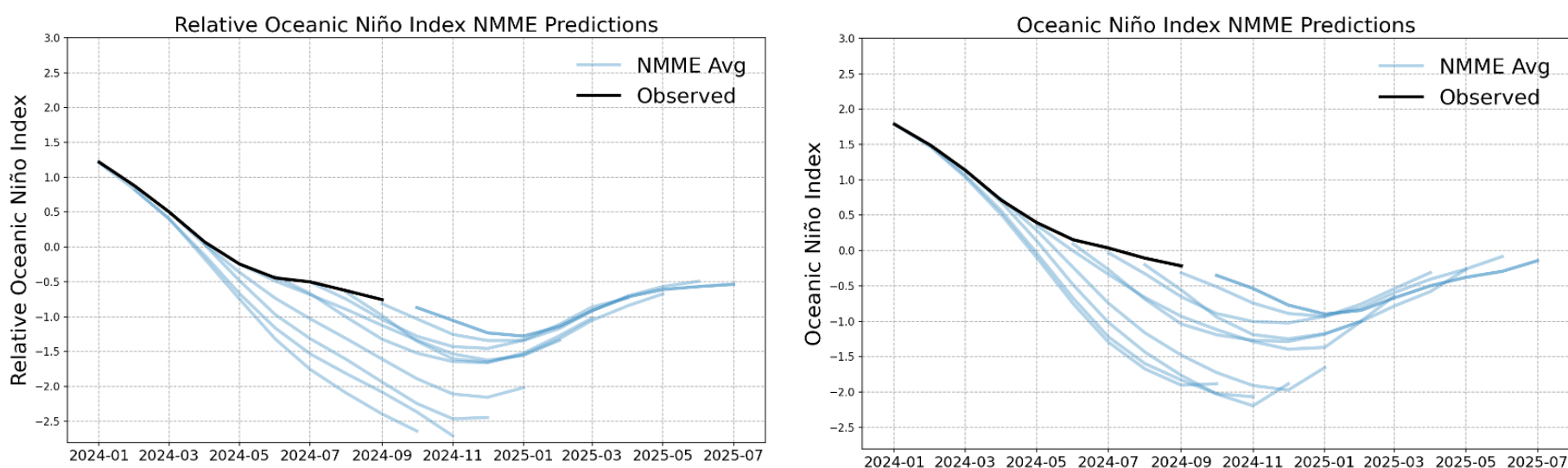
**Figura 7.** (Panel superior) Para el índice de precipitación del Pacífico central, la diferencia en el error absoluto en el RONI y el error absoluto en el ONI. El error absoluto se define como la diferencia entre la reconstrucción y las observaciones. (Panel inferior) Como en el panel superior, pero para el SOI ecuatorial.

## 4.2 Cambios recientes en el error de pronóstico

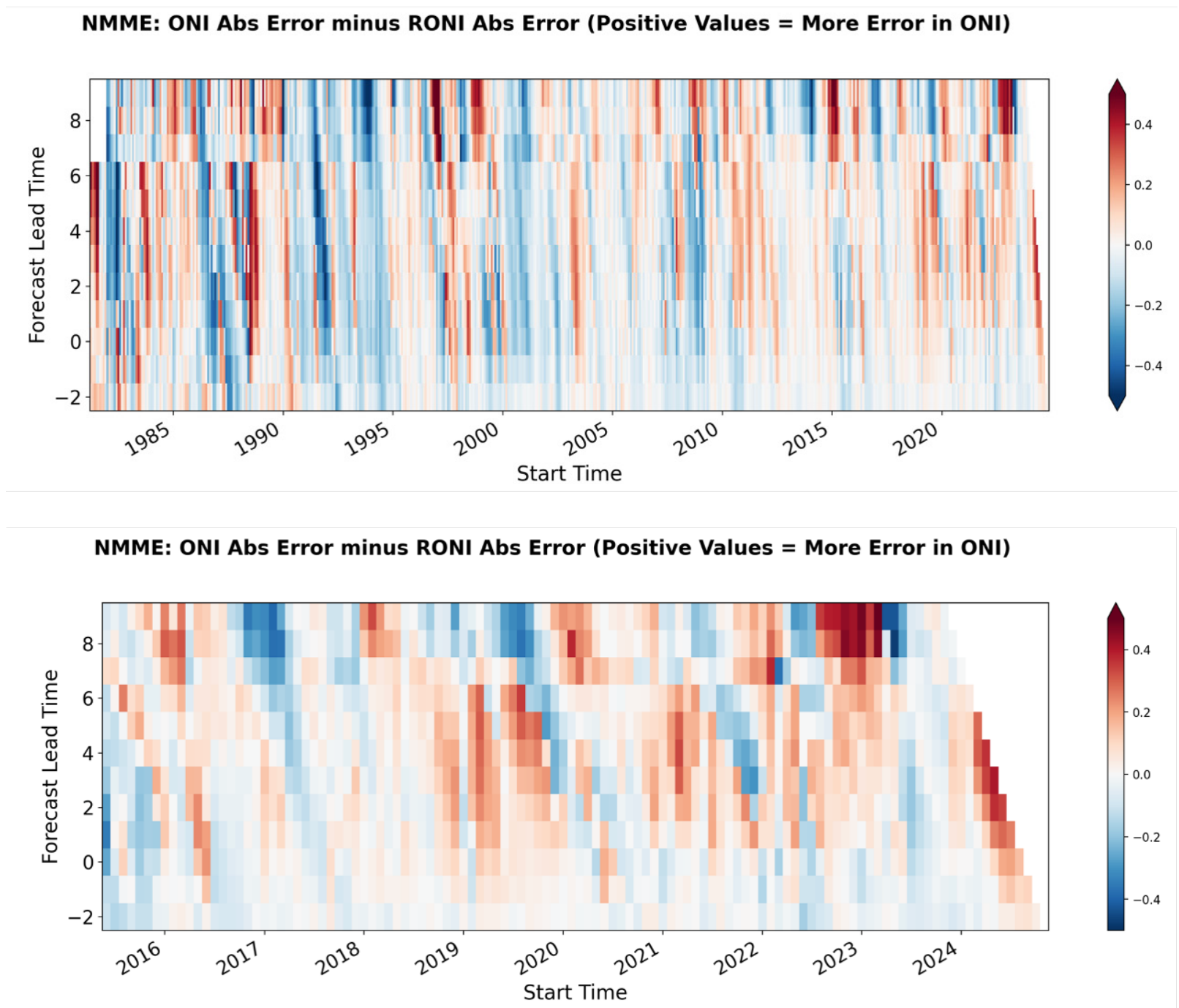
L'Heureux et al. (2024) también examinaron la habilidad de pronóstico para el periodo 1991-2022, medida por la correlación y el error cuadrático medio (RMSE), sobre los repronósticos (*reforecasts*) de los modelos del Conjunto Multimodelo de América del Norte (NMME, por sus siglas en inglés). Encontraron que la habilidad de pronóstico del índice de TSM relativo era comparable al índice tradicional, con la excepción de los tiempos de inicio en la primavera boreal que se alinean con la barrera de predictibilidad de la primavera. Durante estas estaciones, el índice tradicional parece proporcionar cierta habilidad adicional sobre el índice relativo, aunque las diferencias son a menudo pequeñas y estadísticamente insignificantes. Parece que la ligera disminución en la habilidad está vinculada a la capacidad de los modelos para predecir el índice de TSM medio tropical. El índice de TSM medio tropical está correlacionado con el índice Niño 3.4, por lo que restar la media tropical da como resultado la sustracción de una fuente de habilidad (y esta habilidad es más alta en la primavera boreal).

Desde que se publicó ese artículo, las predicciones NMME de RONI y ONI se han monitoreado y evaluado periódicamente (la Figura 8 muestra la media del conjunto de las predicciones desde enero de 2024). Después del importante evento El Niño de 2023-2024, las predicciones de RONI y ONI han sido, en general, demasiado frías, con un fuerte evento

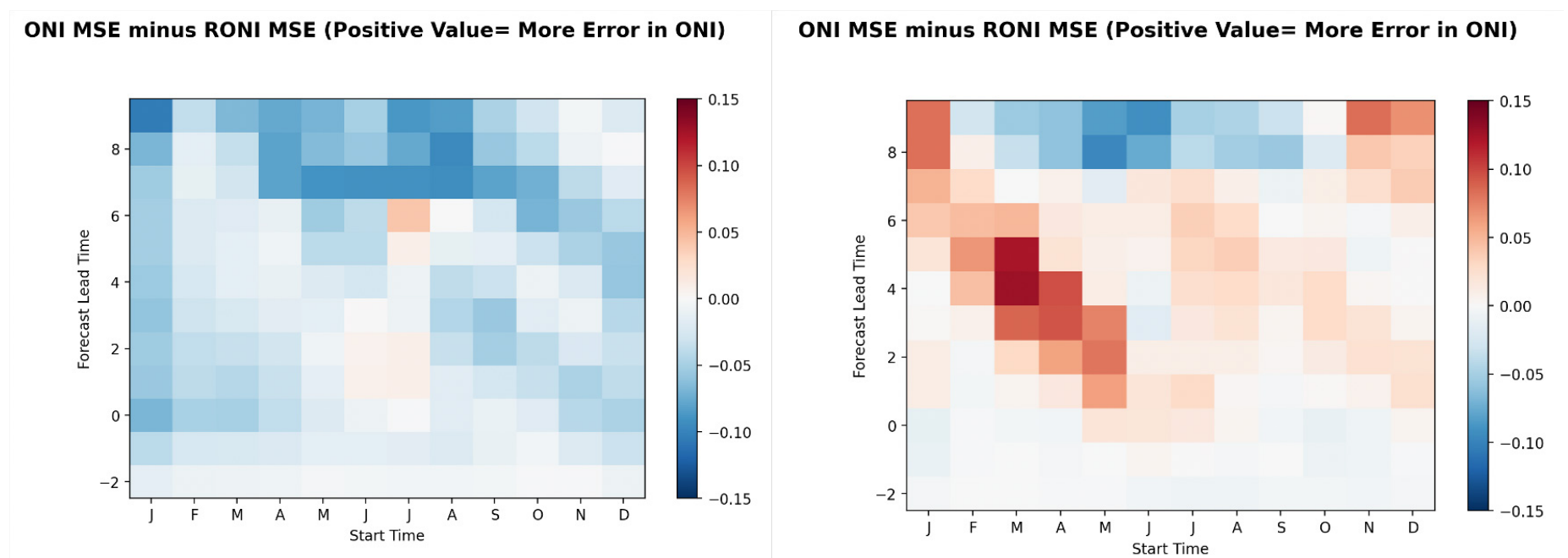
La Niña pronosticado inicialmente según ambos índices. Sin embargo, las predicciones NMME de la media del conjunto del ONI tradicional tienen mayores errores absolutos (pronósticos comparados con observaciones) que las predicciones NMME para RONI. Esto también se puede ver en la Figura 9, que muestra el error absoluto de las predicciones de ONI menos el error absoluto para RONI como una función del tiempo de inicio (eje x) y el tiempo de anticipación (eje y). El sombreado rojo muestra cuándo ha habido más error de pronóstico en el ONI y es particularmente notable para los tiempos de inicio hasta ahora en 2024. Para facilitar la lectura, el panel inferior de la Figura 9 muestra un subconjunto del panel superior, que se remonta a 1981, y se enfoca en el periodo más reciente de 2015 a 2024. Lo que es interesante sobre el registro más largo es que, visualmente, parece que la incidencia del sombreado rojo está aumentando, lo que indica que el RONI se asocia cada vez más con errores de pronóstico más pequeños que el ONI tradicional. La Figura 10 muestra una diferencia en el error cuadrático medio entre el ONI y el RONI en función del tiempo de inicio y de anticipación durante 1981-2009 (panel izquierdo) y 2010-2024 (panel derecho). Aquí se hace más evidente que el error de pronóstico NMME para el RONI es generalmente menor que el del ONI tradicional en las últimas décadas. Por lo tanto, de manera similar al análisis que utiliza observaciones en la sección anterior, los pronósticos de RONI parecen estar más alineados con las anomalías observadas, particularmente en el registro reciente.



**Figura 8.** Media del conjunto de pronósticos para RONI (panel izquierdo) y ONI (panel derecho). Las líneas azules muestran las predicciones promedio de NMME a partir de enero de 2024 hasta octubre de 2024. La línea negra es el ONI y RONI observados (ERSSTv5).



**Figura 9.** Para cada hora de inicio y tiempo de anticipación, la diferencia está en el error absoluto de los pronósticos del ONI y del RONI, donde el error es la media del conjunto de pronósticos menos las observaciones. El panel superior muestra todas las predicciones de NMME desde 1981 hasta 2024, mientras que el panel inferior muestra un subconjunto para esos pronósticos desde 2015 en adelante.



**Figura 10.** La diferencia en el error cuadrático medio de las predicciones del ONI y del RONI para cada hora de inicio y tiempo de anticipación. El panel izquierdo muestra la diferencia para el periodo de 1981 a 2009 y el panel derecho para el periodo de 2010 a 2024.

## 5. Hacia adelante

El índice relativo ONI y el índice Niño 3.4 tienen varias características que los hacen atractivos para monitorear y predecir ENOS. Hemos señalado algunos de estos aspectos en este artículo, pero las tendencias climáticas futuras pueden justificar aún más el uso de anomalías relativas de la TSM en lugar de las anomalías tradicionales. No hemos analizado cómo podría cambiar el índice relativo de la TSM en los próximos años y décadas, por lo que exploraciones adicionales deberían analizar simulaciones climáticas de Grandes Conjuntos y otras estilo CMIP. Todavía hay preguntas abiertas sobre por qué el ONI relativo parece haberse vuelto cada vez más relevante en el monitoreo y pronóstico en tiempo real. Es posible que el índice relativo esté creando alias con otros modos de variabilidad tropical decenal y multidecenal, lo que lo hace particularmente útil en este momento. Por lo tanto, una prioridad para el trabajo futuro debería ser continuar explorando los supuestos y los mecanismos físicos que sustentan el índice. Por ejemplo, se requiere una única climatología para calcular el índice relativo de la TSM porque el ciclo estacional de Niño 3.4 y la media tropical no son los mismos (Figura 2, paneles superiores). En este momento, no hay evidencia observada de que la diferencia en la estacionalidad de estos dos índices esté cambiando de manera significativa (Figura 2, panel inferior); sin embargo, si divergieran sustancialmente, sería necesario reexaminar el índice de TSM relativo. Otra prioridad es continuar monitoreando y pronosticando RONI y Niño 3.4 relativo en tiempo real, especialmente dada la importancia de ENOS en todo el mundo en la toma de decisiones y las evaluaciones de riesgos. El hecho de que el ONI tradicional parezca estar cada vez más desalineado con otros índices atmosféricos tropicales es bastante preocupante, porque el índice ONI/Niño 3.4 es un índice ENOS primario para la mayoría, si no casi todos, los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales. Esperamos que este resumen ayude a arrojar luz adicional sobre los desarrollos que han ocurrido desde que se publicaron los estudios de van Oldenborgh et al. (2021) y L'Heureux et al. (2024), y estimule el análisis futuro sobre esta importante cuestión.

## Referencias

Barnston, A. G., Chelliah, M., & Goldenberg, S. B. (1997). Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial pacific: Research note. *Atmos.-Ocean*, 35(3), 367-383.

Johnson, N. C., & Xie, S.-P. (2010). Changes in the sea surface temperature threshold for tropical convection. *Nature Geoscience*, 3(12), 842–845. doi:10.1038/ngeo1008

L'Heureux, M. L., Levine, A. F. Z., Newman, M., Ganter, C., Luo, J., Tippett, M. K., & Stockdale, T. N. (2020). ENSO Prediction. *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*, 227–246. doi:10.1002/9781119548164.ch10

L'Heureux, M. L., Tippett, M. K., Wheeler, M. C., Nguyen, H., Narsey, S., Johnson, N., ... & Di Liberto, T. (2024). A relative Sea Surface temperature index for classifying ENSO events in a changing climate. *Journal of Climate*, 37(4), 1197-1211.

Sobel, A. H., Nilsson, J., & Polvani, L. M. (2001). The weak temperature gradient approximation and balanced tropical moisture waves. *Journal of the atmospheric sciences*, 58(23), 3650-3665.

Sobel, A. H., Held, I. M., & Bretherton, C. S. (2002). The ENSO signal in tropical tropospheric temperature. *Journal of climate*, 15(18), 2702-2706. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2702:TESITT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2702:TESITT>2.0.CO;2).

Van Oldenborgh, G. J., Hendon, H., Stockdale, T., L'Heureux, M., De Perez, E. C., Singh, R., & Van Aalst, M. (2021). Defining El Niño indices in a warming climate. *Environmental research letters*, 16(4), 044003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe9ed>.

## Lecturas adicionales

L'Heureux (2021): NOAA ENSO Blog, <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/enso-running-fever-or-it-global-warming>

Becker (2024): NOAA ENSO Blog, <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/november-2024-enso-update-ask-me-anything>

Johnson (2024): NOAA ENSO Blog, <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/can-little-la-nina-pack-big-precipitation-punch>

Becker (2024): NOAA ENSO Blog, <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/december-2024-enso-update-party-time-excellent>

## Notas

\* Traducción al español por Ken Takahashi.

\*\* Muchos registros de TSM se remontan a fines del siglo XIX, pero los registros de observación irregulares significan que hay más incertidumbre. El Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés), que es la diferencia en la presión media del nivel del mar entre las estaciones ubicadas en Tahití y Darwin, también se remonta a fines del siglo XIX y está relacionado con ENSO. En las actividades operacionales de ENOS actuales en CPC, el SOI no es tan central como las TSM ecuatoriales, en parte, porque está basado en puntos, ya que Tahití se encuentra bastante alejado del ecuador (cerca de 20° S), contiene una variabilidad mensual y submensual considerable, y es menos predecible que las anomalías de TSM ecuatorial.