



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



BOLETÍN CIENTÍFICO EL NIÑO

Vol. 11 n.º 12 diciembre 2024

PROGRAMA PRESUPUESTAL n.º 068

"Reducción de la vulnerabilidad y
atención de emergencias por desastres"

En este boletín

4

pág.

Proyecciones futuras de patrones de circulación atmosférica de bajo nivel sobre el sur de Sudamérica tropical: impactos en la precipitación y la duración de la temporada seca del Amazonas

13

pág.

Evaluación de la sensibilidad del modelo IA IGP-UHM a las condiciones iniciales

21

pág.

Resumen del informe técnico de El Niño

22

pág.

Resumen del comunicado ENFEN



Créditos

Juan Castro Vargas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Jefe institucional

James Apaéstegui Campos
Director de Ciencias de la Atmósfera, Hidrósfera y Cambio Climático

Lina Godoy Encarnación
Coordinadora de la Unidad Funcional de Comunicaciones

Ivonne Katherine Montes Torres
Ken Takahashi Guevara
Jorge Andrés Concha Calle
Editores

Jorge Andrés Concha Calle
Diseño y diagramación

Carátula: Puerto de Nanay, Iquitos, durante la temporada de seca del Amazonas en agosto de 2024, una de las más graves en cuanto al déficit hídrico registrado
Fuente: Elisa Armijos

El boletín científico "El Niño" es generado en el marco del Programa Presupuestal n.º 068 "Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres"

Producto 1: Estudios para la estimación del riesgo de desastres
Actividad 5: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño
Instituto Geofísico del Perú

** Los textos referidos a la contribución de cada investigación son aportes del equipo editorial del presente boletín*

Calle Badajoz 169 Mayorazgo, Ate, 15012

Teléfono: +51-1-3172300

Lima, mayo de 2025

Puedes acceder a la colección completa de los [boletines científicos El Niño](#) escaneando el siguiente código QR.



Introducción

Los eventos El Niño y La Niña corresponden, a grandes rasgos, a situaciones en las que la temperatura de la superficie del mar está por encima o por debajo del promedio en el océano Pacífico ecuatorial. Estas fluctuaciones están fuertemente influenciadas por El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), el cual es uno de los modos de variabilidad climática más importantes en el océano Pacífico que ejerce una gran influencia sobre el clima a nivel global y regional. La fase cálida de ENOS se puede denominar El Niño "global".

En el Perú, los impactos de El Niño y La Niña son particularmente complejos debido a que recibimos influencias tanto costeras, asociadas a las fluctuaciones en el mar peruano en el Pacífico oriental, así como influencias remotas a través de teleconexiones atmosféricas desde el Pacífico central. En particular, El Niño en el Pacífico oriental o costero puede producir lluvias y altas temperaturas en la costa y alterar el ecosistema marino-costero, mientras que El Niño en el Pacífico central o global puede reducir las precipitaciones e incrementar la temperatura en los Andes y en la Amazonía. Por el contrario, La Niña tendría efectos aproximadamente opuestos. Así, El Niño en el Pacífico oriental es el que causa mayores impactos para el Perú, ya que tiene el potencial de provocar grandes daños a infraestructuras, actividades económicas y, más importante, la seguridad y bienestar de las personas, además de sus medios de vida.

El Perú, como parte de la estrategia de gestión pública para enfrentar los peligros naturales, especialmente respecto a El Niño, establece el Programa Presupuestal por Resultados (PPR) 068 "Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres". A partir de 2014, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), al igual que otras instituciones que conforman la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), participa en este PPR con el producto denominado "Estudios para la estimación del riesgo de desastres". Este consiste en la entrega en forma oportuna de información científica sobre el monitoreo y pronóstico de este evento natural oceánico-atmosférico, mediante informes técnicos mensuales, que permita la toma de decisiones de las autoridades a nivel nacional y regional.

A este producto, el IGP contribuye con la actividad "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño", la cual

incluye la síntesis y evaluación de los modelos de pronóstico de El Niño generados internacionalmente, como es el caso de los modelos climáticos globales, así como de aquellos obtenidos a partir de modelos propios como el de predicción de ondas oceánicas ecuatoriales, y los recientemente desarrollados modelo de inteligencia artificial y modelo Sistema Tierra regional de pronóstico para el territorio peruano y el océano Pacífico (IGP RESM-COW v1). Asimismo, incluye el desarrollo de investigaciones y estudios científicos que permiten entender la variabilidad climática y los procesos asociados al cambio climático, a fin de fortalecer, en forma continua, las capacidades para el pronóstico de El Niño.

En esta línea, el IGP ha estructurado y desarrollado el Boletín Científico El Niño, un producto que contiene, en gran medida, los aportes científicos en el estudio y vigilancia de El Niño, así como La Niña y otros fenómenos relacionados. El Boletín, que se publica mensualmente desde 2014, cuenta con aportes nacionales e internacionales en diversos temas asociados a El Niño, sus impactos, procesos vinculados, temas asociados y otros igual de relevantes, artículos que se presentan en las secciones de "Divulgación Científica" y "Avances Científicos". De igual forma, se comparte en el Boletín una versión resumida del informe técnico que el IGP elabora mensualmente para cumplir con los compromisos asumidos en el marco del PPR 068 (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5356>). Dicho informe contiene información actualizada operativamente que el IGP proporciona como insumo para que el ENFEN genere en forma colegiada la evaluación final que será entregada a los usuarios. Finalmente, el Boletín presenta los comunicados ENFEN publicados durante el periodo correspondiente.

El IGP busca consolidar al Boletín Científico El Niño como una publicación técnica-científica de referencia, tanto para la comunidad científica y académica, así como para instituciones y autoridades vinculadas a la gestión del riesgo de desastres ávidas de conocimientos e información actualizada sobre El Niño, sus impactos y procesos asociados.

Puede consultar la colección completa de Boletines Científicos El Niño en este enlace: <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4974>

PROYECCIONES FUTURAS DE PATRONES DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA DE BAJO NIVEL SOBRE EL SUR DE SUDAMÉRICA TROPICAL: IMPACTOS EN LA PRECIPITACIÓN Y LA DURACIÓN DE LA TEMPORADA SECA DEL AMAZONAS

Jhoana Agudelo^{1,2,3}, Jhan Carlo Espinoza¹,
Clementine Junquas^{1,3}, Paola A. Arias²,
Juan Pablo Sierra^{1,4} y Matías E. Olmo^{5,6}

¹ Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France

² Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

³ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Lima, Perú

⁴ LMD/IPSL, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, ENS, PSL Research University, Sorbonne Université, CNRS, Palaiseau, France

⁵ Department of Atmospheric and Ocean Sciences, Faculty of Exact and Natural Sciences, University of Buenos Aires (DCAO-FCEN-UBA), Buenos Aires, Argentina

⁶ Barcelona Supercomputing Center, Barcelona, Spain



Jhoana Agudelo es magíster en Ingeniería Ambiental por la Universidad de Antioquia, Colombia. Actualmente, se encuentra en su tercer año de estudios doctorales en la Universidad de Grenoble Alpes en

Francia. Sus intereses de investigación abarcan una variedad de temas, incluyendo cambio climático, variabilidad climática, circulación y transporte de humedad atmosférica en Sudamérica tropical.

Palabras clave: Patrones de circulación atmosférica, cambio climático, Sudamérica tropical sur, alargamiento de la temporada seca

Citar como Agudelo, J., Espinoza, J-C., Junquas, C., Arias, P., Sierra, J-P. & Olmo, M. (2024). Proyecciones futuras de patrones de circulación atmosférica de bajo nivel sobre el sur de Sudamérica tropical: impactos en la precipitación y la duración de la temporada seca del Amazonas. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.º 12, págs. 4-12.

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

Los tomadores de decisiones deben implementar estrategias para mitigar los impactos del alargamiento de la estación seca en el sur de la Amazonía con el cambio climático, con 19 % más de días secos en los próximos 50 años. El retraso del inicio y adelanto del final del sistema monzónico sudamericano (SAMS) afectaría navegación, pesca, agricultura en la Amazonía y podría causar la pérdida de bosque y humedad que este aporta a la atmósfera, con efectos cascada hacia los Andes y la costa peruana. Es clave integrar información científica en la planificación y fortalecer políticas contra la deforestación y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Resumen

El sur de la Amazonía muestra un alargamiento de la estación seca debido al retraso en el inicio del sistema monzónico sudamericano (SAMS, por sus siglas en inglés). Mediante el reconocimiento de patrones de circulación atmosférica (CPs), se evaluaron los cambios proyectados del periodo histórico (1970-2000) al futuro (2040-2070), según seis modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) de la sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6). Las proyecciones indican cambios significativos en los CPs asociados a la estación seca, a razón de un inicio tardío y una desaparición temprana del SAMS. La frecuencia de días secos en la Amazonía aumentaría en promedio un 19 %, y se prevé un incremento en la frecuencia de CPs secos al inicio y fin de las temporadas de transición.

1. Introducción

Sudamérica tropical sur (STSA, por sus siglas en inglés) se define como la región comprendida entre 10° N y 30° S, y 90° O y 30° O, incluyendo, entre otros ecosistemas, los Andes tropicales y la cuenca del Amazonas. Esta región alberga la mayor cuenca hidrográfica del mundo y un ecosistema dinámico que abarca zonas de Brasil, Perú, Bolivia, Colombia, Ecuador, Venezuela, Guyana y Surinam (Nobre et al., 2009). Así, STSA es una región importante para el estudio de la hidroclimatología regional y global debido a las múltiples interacciones entre biomas, superficie terrestre y procesos atmosféricos (Marengo et al., 2018; Sousa et al., 2022).

Por otro lado, el sistema monzónico sudamericano (SAMS, por sus siglas en inglés) es uno de los componentes clave en la determinación de la dinámica climática regional, a lo cual debe añadirse su rol como impulsor determinante de la temporada de lluvias en la región (Arias et al., 2015; Marengo et al., 2012; Vera et al., 2006).

Durante las últimas décadas, STSA, principalmente el sur de la Amazonía (alrededor de 5°-15° S y 70°-50° O), ha experimentado un alargamiento de la estación seca relacionado con un retraso en el inicio del SAMS (Arias et al., 2015; Espinoza et al., 2019; Fu et al., 2013).

Utilizando un marco de reconocimiento de patrones de

tipificación meteorológica o patrones de circulación atmosférica (CPs, por sus siglas en inglés), es posible investigar los regímenes diarios de circulación atmosférica sobre STSA. Los CPs suelen definirse como estados atmosféricos recurrentes y potencialmente predecibles que pueden relacionarse con variables locales, como la precipitación o la temperatura (Bettolli et al., 2010; Moron et al., 2008; Solman y Menéndez, 2003).

El uso del enfoque de CPs puede ser una metodología atractiva para evaluar las simulaciones de los modelos climáticos globales y regionales, ya que la circulación atmosférica está generalmente mejor representada por los modelos climáticos que por la precipitación (Ban et al., 2021; Flato et al., 2013; Pichelli et al., 2021). En este sentido, el objetivo principal del presente estudio es identificar los cambios proyectados en la circulación regional de bajo nivel en STSA bajo un escenario de cambio climático. Para ello, utilizamos los modelos identificados por Olmo et al. (2022), los cuales consideramos como los mejores para simular la dinámica de los CPs sobre STSA. Para identificar los cambios futuros, utilizamos proyecciones de modelos bajo el escenario SSP3-7.0, con emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) altas (Riahi et al., 2017). En particular, nos centramos en analizar los cambios de los CPs en la estación seca y en la estación de transición de la época seca a la húmeda durante mediados del siglo XXI. Este estudio tiene como objetivo investigar si el alargamiento observado de la estación seca en STSA también se proyecta en futuras simulaciones de los GCM. Además, pretende explorar los mecanismos físicos asociados con este proceso, centrándose especialmente en la circulación regional de bajo nivel.

2. Datos y métodos

2.1 Datos de referencia

2.1.1 Datos atmosféricos

Se utilizó el reanálisis climatológico ERA5 para analizar la circulación atmosférica de bajo nivel (850 hPa) a partir del viento diario zonal y meridional sobre Sudamérica tropical sur (STSA) durante el periodo 1970-2000. Para comparar los datos de ERA5 con los resultados de los diferentes GCM seleccionados, los datos medios diarios se interpolan bilinealmente a una cuadrícula de 1.0° × 1.0° de resolución.

2.1.2 Datos de precipitación

Se utilizó el conjunto de datos Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS; Funk et al., 2014) para analizar la variabilidad de las precipitaciones y su relación con los CPs sobre STSA durante el periodo 1981-2000. Mediante una interpolación bilineal, estos datos se ajustaron a una resolución espacial de $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ para compararlos con los resultados históricos de los GCM.

2.2 Modelos de circulación general (GCM)

Se consideraron los seis GCM seleccionados como los mejores para representar los CPs en STSA, según Olmo et al. (2022) (ver Tabla 1), utilizando los vientos diarios zonales y meridionales a 850 hPa sobre STSA durante los periodos 1970-2000 (histórico) y 2040-2070 (futuro, bajo el escenario SSP3-7.0).

2.3 Duración de la temporada seca

El presente estudio se centra en el análisis de la estación seca (llegada, final y duración) identificada en la región comprendida entre 5° y 15° S, y 50° y 70° O. Para estimar las fechas anuales de inicio de

la temporada seca (DSA, por sus siglas en inglés) y de final de la temporada seca (DSE, por sus siglas en inglés), utilizamos la metodología desarrollada por Li y Fu (2004).

2.4 Definición de patrones de circulación

Se utilizó la metodología de reconocimiento de patrones de tipificación meteorológica o patrones de circulación atmosférica (CPs) descrita por Espinoza et al. (2021) para STSA. Espinoza et al. (2021) identificaron y caracterizaron nueve CPs a partir de las anomalías estandarizadas de los vientos zonales y meridionales a 850 hPa sobre la región 10° N- 30° S y 90° - 30° O. Los vientos horizontales a 850 hPa han demostrado ser adecuados para la descripción de las principales características de la circulación atmosférica de bajo nivel en la región de Sudamérica tropical sur (Paccini et al., 2018). Las anomalías estandarizadas del viento se calcularon utilizando la media climatológica diaria a largo plazo y su desviación estándar, y luego se agruparon sin ningún filtro de tiempo. Este enfoque proporciona una visión general a gran escala de la variabilidad atmosférica al considerar todas las escalas temporales, desde la diaria hasta la decadal, incluidas las tendencias a largo plazo (Espinoza et al., 2021).

Tabla 1. Modelos de circulación general (GCM) CMIP6 utilizados en el presente estudio para las simulaciones históricas (1970-2000) y futuras (2040-2070).

GCM	Resolución horizontal	Institución	Referencia
ACCESS-ESM1-5	$1.9^{\circ} \times 1.2^{\circ}$	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia	Ziehn et al. (2020)
CanESM5	$2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	Swart et al. (2019)
CESM2	$1.2^{\circ} \times 0.9^{\circ}$	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	Danabasoglu et al. (2019)
IPSL-CM6A-LR	$2.5^{\circ} \times 1.3^{\circ}$	Institut Pierre-Simon Laplace, France	Boucher et al. (2020)
MPI-ESM1-2-HR	$0.9^{\circ} \times 0.9^{\circ}$	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	Müller et al. (2018)
NorESM2-MM	$0.9^{\circ} \times 1.2^{\circ}$	Norwegian Climate Centre, Norway	Bentsen et al. (2013)

3. Resultados y discusiones

3.1 Identificación de CPs históricos y futuros

La variabilidad de la circulación atmosférica regional de bajo nivel se resume en nueve CPs que pueden entenderse como estados atmosféricos preferentes a lo largo del año (Figura 1). Por su parte, la Figura 2 muestra la frecuencia media diaria relativa de los nueve CPs en STSA, según el reanálisis climatológico ERA5, y los seis GCM para simulaciones históricas y

futuras. Los GCM analizados muestran un claro ciclo estacional en la frecuencia relativa de CPs durante el periodo histórico (Figura 2). Los ciclos anuales de las CPs simulados por cada modelo para mediados del siglo XXI muestran un aumento en las frecuencias de las CPs invernales (W1, W2 y W3; en colores cálidos) durante la temporada seca del sur de la Amazonía (Figura 2). Para cinco de los seis modelos estudiados (excepto el modelo global CanESM5), los CP W1, W2 y W3 aparecen antes en el año (marzo, en lugar de abril) y prolongan su aparición hasta finales de noviembre (en lugar de finales de octubre) en comparación con las simulaciones históricas.

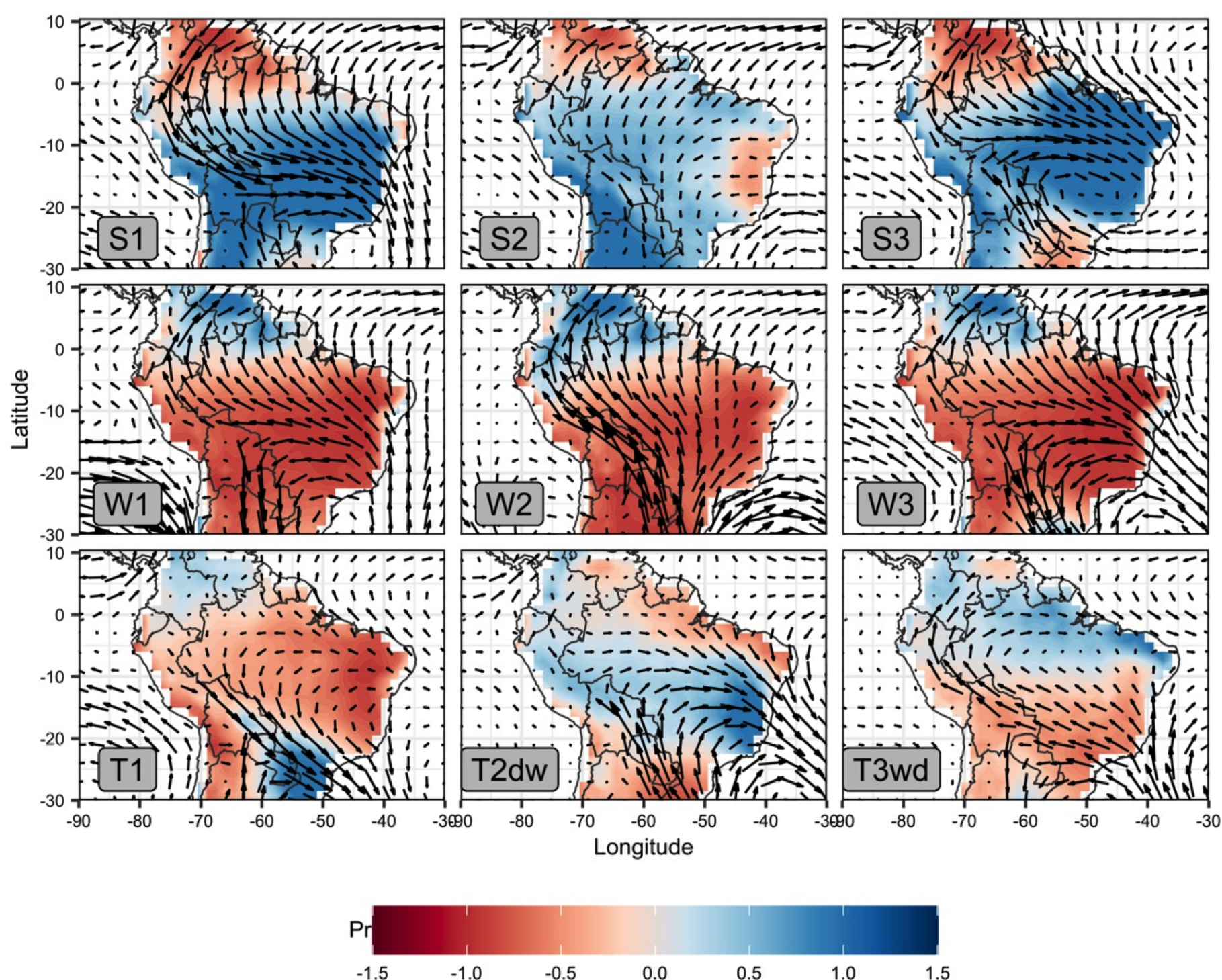


Figura 1. Patrones espaciales de precipitación y anomalías de viento (en mm/día y m/s, respectivamente) para los nueve patrones de circulación (CPs) en Sudamérica Tropical Sur, según el reanálisis climatológico ERA5. Este análisis permite identificar nueve CPs: tres CPs invernales (W1, W2 y W3), tres CPs de verano (S1, S2 y S3) y tres CPs de transición (T1 y T2dw, principalmente para la transición de la estación seca a la húmeda, y T3wd para la transición de la temporada húmeda a la seca). Los vectores indican las anomalías del viento a 850 hPa, mientras que los colores sombreados se refieren a las anomalías de precipitación usando el conjunto de datos CHIRPS.

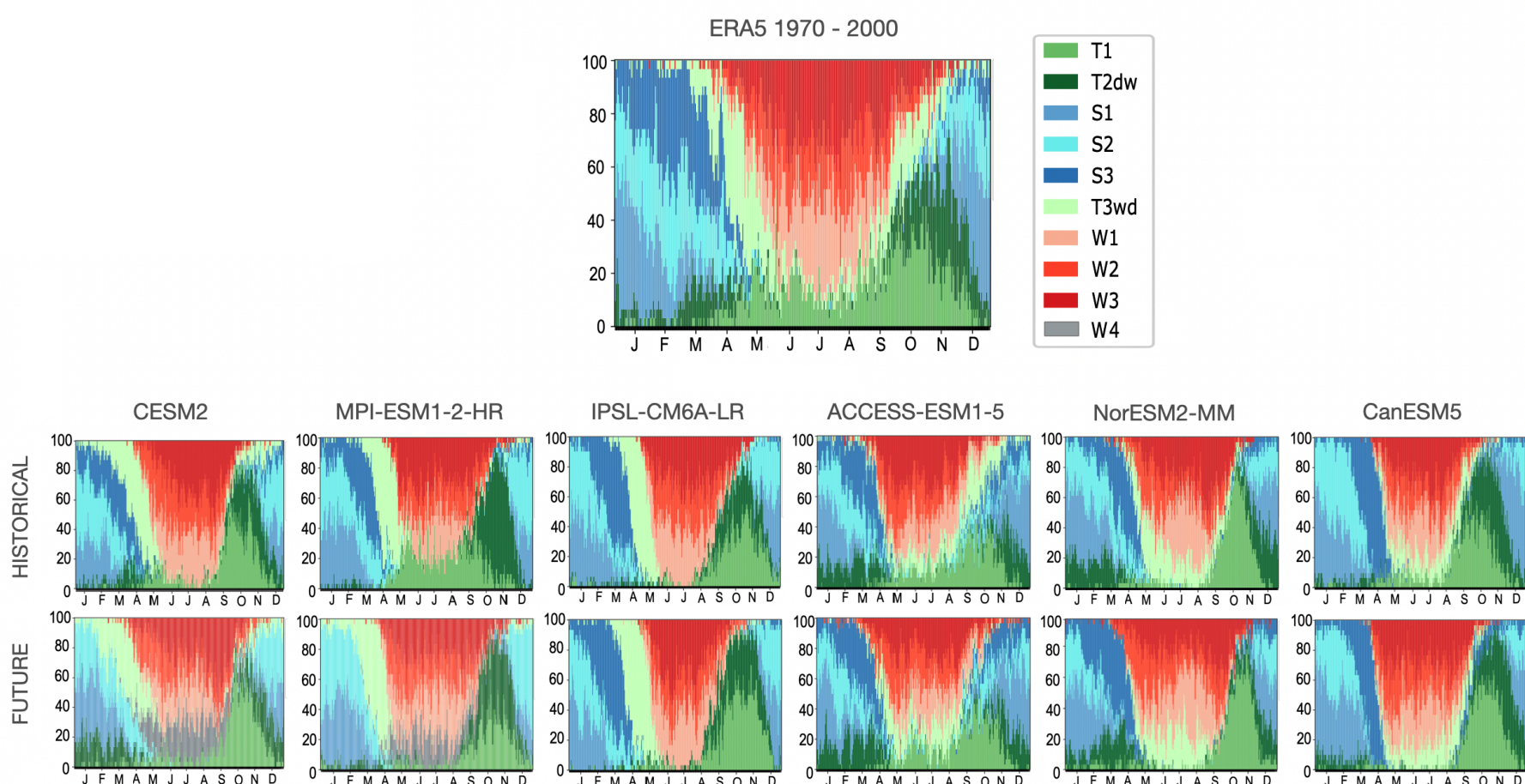


Figura 2. Ciclo anual de la frecuencia diaria relativa de los nueve CPs en STSA, según el reanálisis climatológico ERA5, y los seis GCM para simulaciones históricas y futuras. El eje "x" muestra los 365 días del año, mientras que el eje "y" indica el promedio de la frecuencia diaria relativa de cada CPs.

3.2 Proyecciones futuras del alargamiento de la temporada seca a partir de los CPs

Para comprender cómo pueden cambiar los CPs bajo el escenario SSP3-7.0 (Shared Socioeconomic Pathways 3-70, por sus siglas en inglés), la Figura 3 muestra la frecuencia media relativa de las CPs durante mediados del siglo XXI, correspondiente a dos CPs de invierno (W2 y W3) y dos de transición (T1 y T2dw), tanto para las simulaciones históricas (línea azul) como para las futuras (línea roja). Estos CPs, en particular, fueron seleccionados debido a su relevancia durante la ocurrencia de la estación seca (Espinoza et al., 2021). W2 y W3, como indicadores del periodo seco, pueden ofrecer información valiosa sobre la duración de la temporada seca. Por el contrario, T1 y T2 están asociados con el inicio del monzón, lo que significa el comienzo de la temporada de lluvias (es decir, el DSE). Cabe señalar que SSP3-7.0 es el cuarto escenario socioeconómico global proyectado para el 2100 de cinco establecidos para el futuro del clima, donde las emisiones de CO₂ se duplican respecto a los niveles actuales (Welch, [2024]).

De la Figura 3 es posible notar que el CP W2

proyectado muestra mayores frecuencias durante abril, mayo y junio en comparación con la simulación histórica para los modelos CESM2, MPI-ESM1-2-HR, NorESM2-MM y CanESM5 (columna izquierda de la Figura 3). Esto sugiere una mayor frecuencia de días con condiciones más secas al principio de la estación seca (entre el 10 % y el 20 %), lo que puede favorecer una transición más brusca de la época húmeda a la seca en esta región. El CP W3 proyectado presenta frecuencias crecientes al final del año para todos los modelos considerados, excluyendo el modelo IPSL-CM6A-LR. Específicamente, este CP, asociado a condiciones secas, ocurre no solo durante el invierno, sino también durante la temporada de octubre y noviembre (transición de seco a húmedo), lo que podría favorecer un inicio tardío del SAMS y, por extensión, un DSE retrasado.

Los CPs T1 y T2dw tienen un ligero retraso en su aparición en septiembre y octubre en el futuro, comparado con el pasado, lo que sugiere un inicio tardío del SAMS y la estación lluviosa en la Amazonía sur. El promedio multimodelo revela una aparición más temprana de W2 en el futuro, con un aumento leve de W3 en octubre-noviembre.

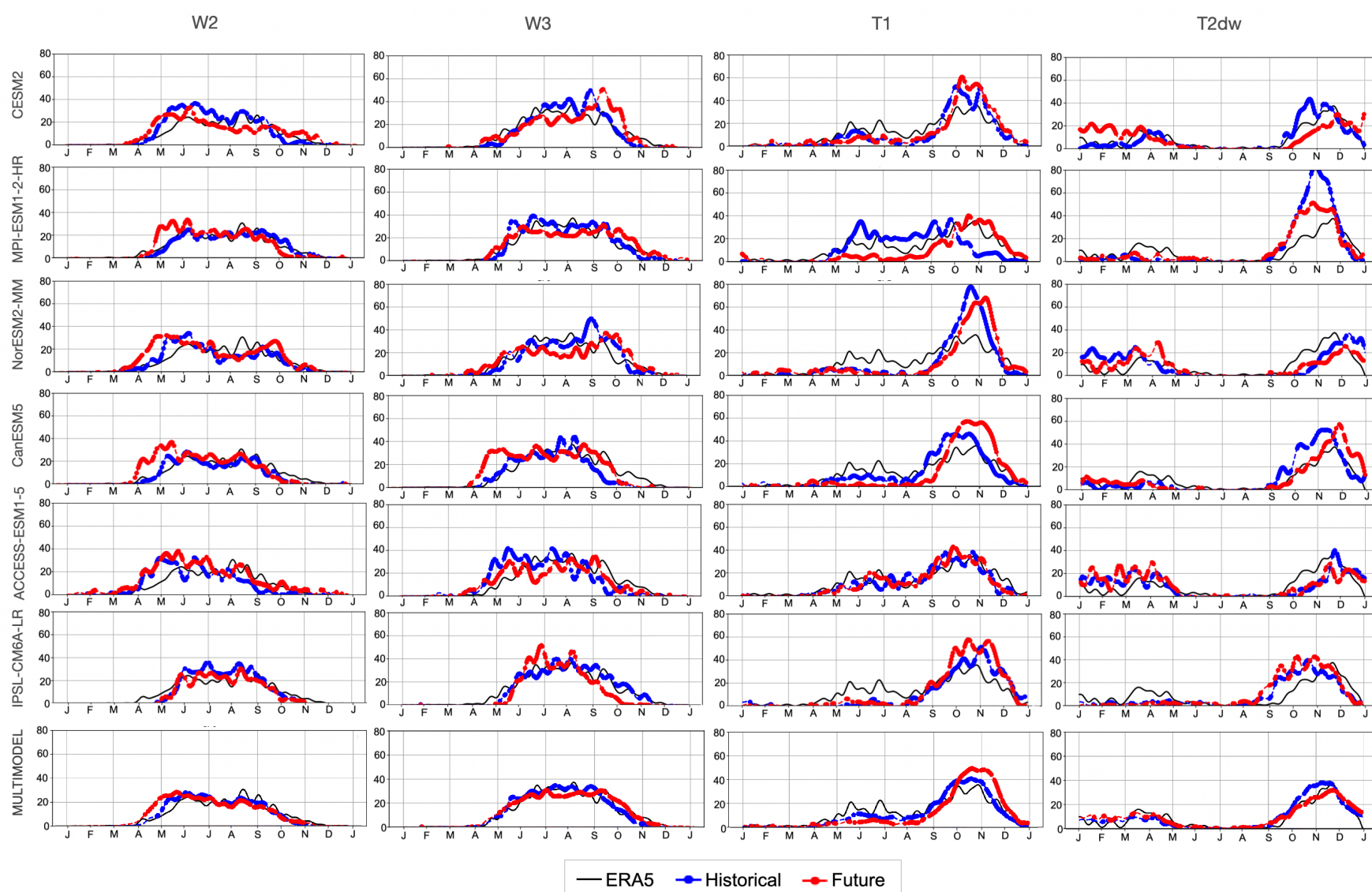


Figura 3. Promedio de frecuencia diaria relativa de los patrones de circulación (CPs) de invierno (W2, W3) y de transición (T1 y T2dw), definido a partir del análisis de agrupación de k-medias para los seis GCM durante los periodos histórico y futuro (líneas azul y roja, respectivamente). La línea de referencia dada por el reanálisis climatológico ERA5 para los mismos años del periodo histórico (1970-2000) se presenta en color negro. El eje "x" muestra los 365 días del año, mientras que el eje "y" indica el promedio de la frecuencia diaria relativa de cada CPs.

3.3 Cambios futuros en el ciclo anual de precipitaciones y en la duración de la estación seca

La Figura 4 ilustra una estimación del ciclo anual de la precipitación sobre la región sur de la Amazonía, calculada para cada modelo durante los periodos histórico y futuro. Los modelos ACCESS-ESM1-5 y MPI-ESM1-2-HR muestran la mejor representación del ciclo anual de la precipitación durante el periodo histórico (línea azul) en comparación con los datos obtenidos a través del dataset CHIRPS (línea gris). Modelos como CanESM5, CESM2 y NorESM2-MM subestiman la precipitación durante la temporada seca (es decir, el invierno austral: junio-julio-agosto [JJA]) y la transición a la temporada húmeda (septiembre-octubre-noviembre [SON]) para el periodo histórico. El modelo IPSL-CM6A-LR (Figura 4d) simula adecuadamente la precipitación durante la estación seca, pero la subestima significativamente durante el verano austral (diciembre-enero-febrero: DJF, por sus siglas en inglés). Este modelo también

muestra el cambio más pequeño en el ciclo anual de la precipitación entre los periodos histórico y futuro. A excepción del modelo IPSL-CM6A-LR, el resto de modelos muestran una reducción importante de las precipitaciones durante la estación de transición de la temporada seca a la húmeda (SON) para las proyecciones futuras (línea roja), lo que coincide con la media multimodelo (Figura 4g).

La pentada climatológica que marca el inicio (DSA) y fin (DSE) de la temporada seca se muestra en la Tabla 2 (columnas 1 y 2, respectivamente), también señalada con puntos en la Figura 4. Además, la duración promedio de la estación seca se presenta en la tercera columna de la Tabla 2, tanto para el periodo histórico como para el futuro. Como referencia, en el caso de los datos CHIRPS, las fechas DSA y DSE se producen durante las pentadas 19 y 60, respectivamente. Esto sugiere que, en promedio, la estación seca abarca, aproximadamente, del 5 de abril al 27 de octubre para este conjunto de datos de referencia.

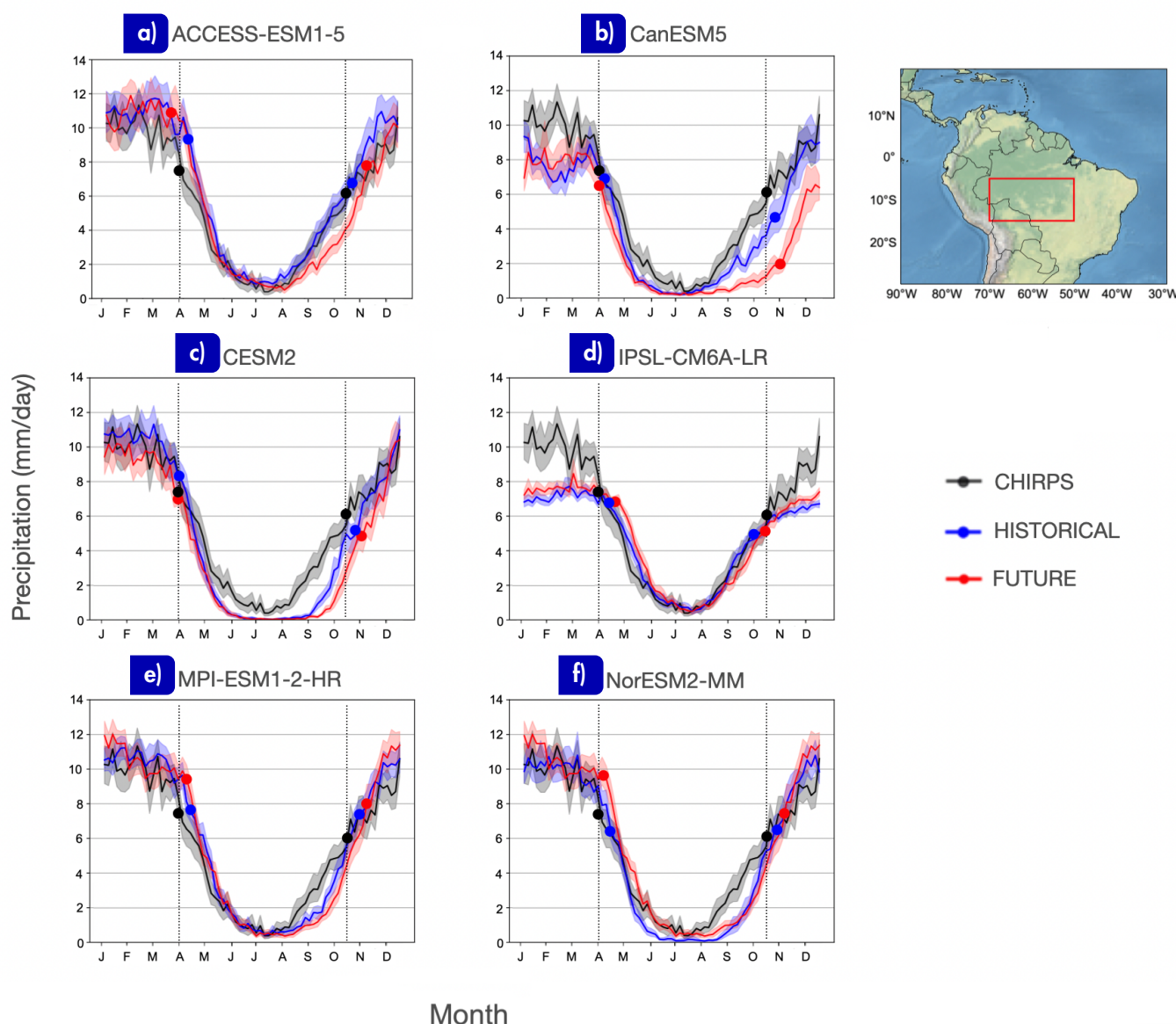


Figura 4. Ciclos anuales de precipitación sobre el sur de la Amazonía (5°-15° S y 50°-70° O; rectángulo rojo), expresados en mm/día y suavizados utilizando una ventana móvil de cinco días (pentada). La línea gris indica el conjunto de datos de referencia CHIRPS durante el periodo 1981-2000, mientras que la línea azul (roja) indica el ciclo anual climatológico simulado para el periodo histórico (futuro) por los diferentes GCM: (a) ACCESS-ESM1-5, (b) CanESM5, (c) CESM2, (d) IPSL-CM6A-LR, (e) MPI-ESM1-HR y (f) NorESM2-MM. Las sombras muestran la envolvente de la incertidumbre utilizando *bootstrapping*, con un intervalo de confianza del 95 %. Las fechas climatológicas de inicio (DSA) y fin (DSE) de la temporada seca se resaltan en círculos.

Tabla 2. Pentada correspondiente al inicio (DSA), final (DSE) y duración de la estación seca (DSL) en el periodo histórico (1970-2000) y el cambio proyectado para el futuro (2040-2070), así como su desviación estándar. El color gris indica cambios estadísticamente significativos según la prueba t ($p < 0.05$). La DSL corresponde a la diferencia entre DSE y DSA.

	DSA		DSE		DSL	
	1970-2000	2040-2070	1970-2000	2040-2070	1970-2000	2040-2070
ACCESS-ESM1-5	20 ± 1.7	-2 ± 1.6	61 ± 2.1	+2 ± 1.7	41 ± 3.2	+4 ± 2.8
CanESM5	20 ± 1.1	-1 ± 1.4	62 ± 0.7	+1 ± 1.7	42 ± 0.9	+2 ± 2.1
CESM2	19 ± 1.9	0 ± 2.1	62 ± 0.8	+1 ± 1.4	43 ± 1.1	+2 ± 2.5
IPSL-CM6A-LR	22 ± 1.7	+1 ± 1.1	57 ± 2.0	+3 ± 2.1	35 ± 2.4	+1 ± 2.6
MPI-ESM1-2-HR	21 ± 1.8	-1 ± 2.0	62 ± 1.8	+1 ± 1.6	41 ± 2.3	+2 ± 2.5
NorESM2-MM	21 ± 1.7	-1 ± 2.2	62 ± 1.8	+1 ± 1.9	41 ± 2.8	+2 ± 2.8

CHIRPS (1981-2000) 19 ± 1.7

60 ± 1.2

La Tabla 2 indica que todos los modelos muestran un aumento proyectado en la duración de la temporada seca (DSL). Este aumento se debe a un retraso en el inicio de la estación de lluvias (de 5 a 15 días en todos los modelos) y a un ligero adelanto en el final de la misma (de 5 a 10 días en cuatro de seis modelos). En particular, el modelo ACCESS-ESM1-5 muestra una prolongación de la temporada seca en veinte días. Los demás modelos indican un aumento de 5 a 10 días en la duración de la temporada seca.

4. Observaciones finales

Nuestro estudio contribuye a reducir la incertidumbre en la predicción del inicio y fin de la estación seca en el sur de la Amazonía por dos razones principales: (1) utilizamos modelos que capturan adecuadamente los mecanismos relacionados con el inicio de la temporada seca y (2) exploramos los factores que prolongan esta temporada mediante un enfoque de patrones de circulación, el cual ofrece una mejor simulación que la precipitación. Dado el aumento esperado de las condiciones secas en la región y los posibles impactos de la deforestación en el ciclo de precipitación, es crucial realizar más investigaciones. Es importante comprender cómo un retraso en el inicio de la estación húmeda en el sur de la Amazonía puede afectar los patrones de precipitación en las regiones adyacentes.

Referencias

- Arias, P. A., Fu, R., Vera, C. & Rojas, M. (2015). A correlated shortening of the North and South American monsoon seasons in the past few decades. *Climate dynamics*, 45(11-12), 3183-3203. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2533-1>
- Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., Pichelli, E., Sobolowski, S., Adinolfi, M., Ahrens, B., Alias, A., Anders, I., Bastin, S., Belušić, D., Berthou, S., Brisson, E., Cardoso, R. M., Chan, S. C., Christensen, O. B., Fernández, J., Fita, L., Frisius, T., ... Zander, M. J. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation. *Climate Dynamics*, 57(1-2), 275-302. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- Bettolli, M. L., Penalba, O. C., & Vargas, W. M. (2010). Synoptic weather types in the south of South America and their relationship to daily rainfall in the core crop-producing region in Argentina. *Australian meteorological and oceanographic journal*, 60(1), 37-48, <https://doi.org/10.22499/2.6001.004>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Marengo, J., & Segura, H. (2019). Contrasting North-South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*, 52(9–10), 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
- Espinoza, J. C., Arias, P., Moron, V., Junquas, C., Segura, H., Sierra-Pérez, J., Wongchuig, S., & Condom, T. (2021). Recent changes in the atmospheric circulation patterns during the dry-to-wet transition season in south tropical South America (1979–2020): Impacts on precipitation and fire season. *Journal of Climate*, 34(22), 9025–9042. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0303.1>
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C. & Rummukainen, M. (2013). Evaluation of climate models. In Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (Eds.) *Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 741-866). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P. A., Dickinson, R. E., Huang, L., Chakraborty, S., Fernandes, K., Liebmann, B., Fisher, R. & Myneni, R. B. (2013). Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America - PNAS*, 110(45), 18110–18115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Li, W., & Fu, R. (2004). Transition of the Large-Scale atmospheric and Land Surface Conditions from the Dry to the Wet Season over Amazonia as Diagnosed by the ECMWF Re-analysis. *Journal of Climate*, 17(13), 2637-2651, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2637:totlaa.2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2637:totlaa.2.0.co;2)
- Marengo, J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V., Silva Dias, P. D., Cavalcanti, I. F. A., Carvalho, L. M. V., Berbery, E. H., Ambrizzi, T., Vera, C. S., Saulo, A. C., Nogues-Paegle, J., Zipser, E., Seth, A., & Alves, L. M. (2012). Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, 32(1), 1-21. <https://doi.org/10.1002/joc.2254>
- Marengo, J. A., Souza Jr, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves L. & Soares W. R.. (2018). Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. *Frontiers in Earth Science*, 6, 228. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>
- Moron, V., Robertson, A. W., Ward, M. N., y Ndiaye, O. (2008). Weather types and rainfall over Senegal. Part II: Downscaling of GCM Simulations. *Journal of Climate*, 21(2), 288–307. <https://doi.org/10.1175/2007jcli1624.1>

Nobre, C. A., Obregón, G. O., Marengo, J. A., Fu, R., & Poveda, G. (2009). Characteristics of Amazonian Climate: Main Features. En Keller, M., Bustamante, M., Gash, J. & Silva, P. (Eds.), *Amazonia and global change*(Vol. 186, pp. 149-162). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/2009GM000903>

Olmo, M. E., Espinoza, J. C., Bettolli, M. L., Sierra, J. P., Junquas, C., Arias, P. A., Moron, V. & Balmaceda-Huarte, R. (2022). Circulation Patterns and Associated Rainfall Over South Tropical South America: GCMs Evaluation During the Dry-To-Wet Transition Season. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD036468. <https://doi.org/10.1029/2022JD036468>

Pichelli, E., Coppola, E., Sobolowski, S., Ban, N., Giorgi, F., Stocchi, P., Alias, A., Belušić, D., Berthou, S., Caillaud, C., Cardoso, R. M., Chan, S., Christensen, O. B., Dobler, A., de Vries, H., Goergen, K., Kendon, E. J., Keuler, K., Lenderink, G., ... Vergara-Temprado, J. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation. *Climate Dynamics*, 56(11-12), 3581-3602. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>

Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An Overview. *Global Environmental Change*, 42(C), 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Solman, S. A., & Menéndez, C. G. (2003). Weather regimes in the South American sector and neighbouring oceans during winter. *Climate Dynamics*, 21(1), 91-104. <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0320-x>

Sousa, T. R., Schiatti, J., Ribeiro, I. O., Emilio, T., Fernández, R. H., Steege, H., Castilho, C. V., Esquivel-Muelbert, A., Baker, T., Castro, W., Mendoza, A. M., Lima, A. J. N., Rudas, A., Araujo-Murakami, A., Andrade, A., Manzatto, A. G., Torres-Lezama, A., Marimon, B., Marimon, B. H., ... Phillips, O. L. (2022). Water table depth modulates productivity and biomass across Amazonian forests. *Global Ecology and Biogeography*. 31(8), 1571–1588. <https://doi.org/10.1111/geb.13531>

Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C. R., Noguez-Paegle, J., Dias, P. L. S., & Zhang, C. (2006). Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. *Journal of Climate*, 19(20), 4977–5000. <https://doi.org/10.1175/jcli3896.1>

Paccini, L., Espinoza, J. C., Ronchail, J., & Segura, H. (2018). Intraseasonal rainfall variability in the Amazon basin related to large-scale circulation patterns: A focus on Western Amazon–Andes transition region. *International Journal of Climatology*, 38(5), 2386–2399. <https://doi.org/10.1002/joc.5341>

Welch, I. (2024). *The IPCC Shared Socioeconomic Pathways (SSPs): Explained, Evaluated, Replaced*(No. w32178). National Bureau of Economic Research.

EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DEL MODELO IA IGP-UHM A LAS CONDICIONES INICIALES

José Obregón¹ y Ken Takahashi¹

¹ Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

Palabras clave: El Niño, inteligencia artificial, viento zonal, índice E, causalidad

Citar como Obregón, J., & Takahashi, K. (2024). Evaluación de la sensibilidad del modelo IA IGP-UHM a las condiciones iniciales. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.º 12, págs. 13-18

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

El surgimiento del uso de la inteligencia artificial fortalece los servicios basados en información, como los pronósticos climáticos. Sin embargo, esta investigación advierte sobre sus limitaciones, especialmente ante situaciones nuevas, y destaca la necesidad de expertos humanos en su desarrollo, evaluación y mejora, con base en el conocimiento físico de fenómenos como El Niño. Se recomienda que entidades como la Comisión ENFEN, así como los tomadores de decisiones, cuenten con el soporte de científicos expertos para aplicar adecuadamente la inteligencia artificial en la predicción climática.

Resumen

El modelo de inteligencia artificial IA IGP-UHM predice El Niño usando información climática reciente, por lo que se esperaba que saque provecho de precursores identificados en investigaciones previas, como la alta probabilidad de ocurrencia de eventos El Niño fuerte según el índice E en enero, cuando la anomalía del esfuerzo de viento del oeste en el Pacífico ecuatorial central (taux_c) excede, en agosto previo, un valor crítico (Takahashi & Dewitte, 2015). En este estudio se evalúa la sensibilidad del modelo IA IGP-UHM a algunos precursores seleccionados. Si bien los pronósticos del modelo para el periodo 1981-2023 reproducen aproximadamente la relación empírica entre taux_c , en agosto, y el índice E, en el enero siguiente, en experimentos aislados, tras neutralizar o incluso invertir artificialmente los valores de taux_c correspondientes a

junio-agosto de 1982, 1997 y 2015, las predicciones del modelo de los eventos El Niño de 1983, 1998 y 2016 presentaron muy poca sensibilidad, manteniendo una alta probabilidad de El Niño, a pesar de la gran importancia esperada de este precursor. Esto sugiere que el entrenamiento no le permitió establecer dicho precursor como una condición importante para El Niño. Más bien, se identificó que el predictor más relevante para el modelo IA es la anomalía de la temperatura superficial del mar (SST', por sus siglas en inglés) en el Pacífico oriental. Estos resultados preliminares sugieren que el modelo IA IGP-UHM no estaría capturando las relaciones físicas causales, las cuales sí están presentes en un modelo climático numérico basado en las leyes de la física, lo cual nos advierte de la necesidad de mantener una posición crítica de los modelos de inteligencia artificial, sobre todo en cuanto a su desempeño en situaciones climáticas novedosas.

1. Introducción

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno climático de gran escala que tiene un impacto significativo en el clima global. La predicción precisa de El Niño es crucial para la toma de decisiones estratégicas en diversos sectores, como la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la planificación ante desastres. Sin embargo, los modelos climáticos globales presentan limitaciones sustanciales en simular y predecir adecuadamente el clima en el Pacífico oriental. Para abordar esta problemática, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y la Universidad de Hawái en Manoa (UHM) han desarrollado un modelo de inteligencia artificial (IA) con un módulo de explicabilidad, basado en la propagación de relevancia por capas (LRP, por sus siglas en inglés; Bach et al., 2015), diseñado para la predicción de El Niño (Rivera-Tello et al., 2023). Este modelo de IA ofrece una herramienta complementaria a los productos de pronóstico tradicionales, con la ventaja de facilitar la identificación de las regiones potencialmente relevantes para la predicción del evento.

Un mecanismo clave en el ENOS es la acción de las anomalías del viento del oeste en el Pacífico ecuatorial, las cuales desempeñan un papel central en la retroalimentación de Bjerknes, capaz de amplificar el desarrollo de El Niño. La retroalimentación de Bjerknes se activa cuando los vientos alisios en el Pacífico occidental se debilitan, lo que provoca una reducción en el afloramiento ecuatorial y, en consecuencia, un mayor calentamiento de la superficie del mar en el Pacífico oriental, lo que fortalece el evento El Niño (Bjerknes, 1966; Bjerknes, 1969; Neelin, 1998; Cane, 1985; Capotondi et al., 2018). Por otro lado, los eventos extremos de El Niño, como los de 1983 y 1998, se caracterizaron por un calentamiento anormalmente intenso en el Pacífico oriental (Takahashi et al., 2011), cuyo desarrollo depende de la amplificación no lineal de la retroalimentación de Bjerknes asociada a la activación de la convección profunda atmosférica, cuando la temperatura superficial del mar en el Pacífico oriental alcanza un umbral lo suficientemente alto para sostenerla (Takahashi & Dewitte, 2015; Takahashi et al., 2018), mientras que fuertes vientos del este pueden suprimir un evento El Niño (por ejemplo, Chiodi y Harrison, 2017).

Según el análisis de observaciones y de un modelo climático, una condición determinante para la

ocurrencia de un evento extremo El Niño en enero sería que el valor de la anomalía del esfuerzo de viento del Pacífico ecuatorial central (taux_c), en el agosto previo, supere un umbral crítico, lo que representaría la inversión de los vientos alisios del este (Takahashi & Dewitte, 2015). Si esta condición no se cumple, la probabilidad de un evento extremo El Niño debería reducirse significativamente, por lo que se esperaría que el modelo IA IGP-UHM refleje este comportamiento. En este estudio, se evalúa la sensibilidad de las predicciones del modelo a los valores de taux_c mediante experimentos en los que se manipulan los datos de entrada.

2. Metodología

En primer lugar, se reprodujeron los resultados de Takahashi y Dewitte (2015) utilizando datos observacionales para los tres predictores más importantes identificados: las anomalías del viento zonal en el Pacífico central (U'), en lugar de taux_c ; la altura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial (SSH' , por sus siglas en inglés), en reemplazo del contenido de calor oceánico; y el índice E, correspondientes al mes de agosto como predictor del índice E observado en enero del año siguiente. Para ello, se emplearon los datos mensuales observados de GODAS y Reanalysis II.

Dado que el modelo IA IGP-UHM considera como entrada los campos mensuales de vientos zonal (U) y meridional (V) en superficie, la temperatura superficial del mar (SST , por sus siglas en inglés) y el nivel del mar (SSH , por sus siglas en inglés) de los últimos tres meses (Rivera-Tello et al., 2023), se repitió este diagnóstico considerando los predictores de agosto correspondientes a las predicciones de E realizadas con datos de entrada de junio, julio y agosto hasta enero del año siguiente. Asimismo, se evaluó la relevancia de las variables de entrada del modelo IA IGP-UHM mediante el método LRP de explicabilidad de inteligencia artificial. Para obtener el LRP de los pronósticos de los eventos de El Niño fuerte, se utilizaron solo los miembros del *ensemble* que pronosticaron un índice E mayor a 1.5, y se calcularon los promedios sobre los años en los que más del 50 % de los *ensembles* pronosticaron dicha condición. Por otro lado, para el LRP de los eventos de El Niño no fuerte, se consideraron solo los miembros del *ensemble* que pronosticaron un índice

Tabla 1. Experimentos realizados.

n.º de experimento	Predicador evaluado	Descripción
1	Um'	U' para junio-agosto de 1982, 1997 y 2015 fue modificado en el Pacífico central (160° E-160° O, 5° S-5° N).
2	SSHm'	SSH' para junio-agosto de 1982, 1997 y 2015 fue modificado en el Pacífico ecuatorial (120° E-80° O, 5° S-5° N).
3	SSTm'	SST' sobre el patrón E fue modificado para junio-agosto de 1982, 1997 y 2015.
4	Um'	Igual que n.º 1, pero manteniendo la SST'm sobre el patrón E en cero.
5	SSTm'	SST' sobre todo el dominio fue modificado para junio-agosto de 1982, 1997 y 2015.
6	Um'	Igual que n.º 1, pero utilizando el dominio (150° E-130° O, 8° S-8° N).
7	Um'	Igual que n.º 4, pero utilizando el dominio (150° E-130° O, 8° S-8° N).
8	Um'	SST', SSH', U' y V' sobre todo el dominio fue modificado para junio-agosto de 1982, 1997 y 2015.

E menor o igual a 1.5, y se promediaron los años en los que más del 50 % de los *ensembles* predijeron esta condición para todos los agostos desde 1981 hasta 2023. Este análisis nos permite conocer el estado medio de la relevancia espacial en el modelo IA e identificar regiones clave para la activación o supresión de El Niño.

Para el análisis de sensibilidad, se adaptó la definición de los predictores de Takahashi y Dewitte (2015) con el fin de controlarlos mediante la modificación de las variables de entrada del modelo IA IGP-UHM (Tabla 1). Los primeros tres experimentos se diseñaron para evaluar la sensibilidad de los predictores U', SSH' y SST'. Tras observar una mayor relevancia de la SST para el modelo, se decidió realizar un cuarto experimento en el que se eliminó la señal de la SST' sobre el patrón E, es decir, se reemplazó su valor por cero en todo el dominio. Para analizar la sensibilidad de todo el campo de la SST', se modificó la totalidad del dominio (experimento n.º 5). En los dos últimos experimentos, se replicaron los experimentos n.º 1 y 4, pero considerando una región más extensa para la modificación de U'.

Las anomalías en las regiones que se describen para cada experimento de la Tabla 1 se intensificaron positiva y negativamente, multiplicándolas por un

coeficiente que variaba en cada corrida entre -3 y 3, con intervalos de 0.5. Sin embargo, para los experimentos 6 y 7, los valores originales fueron reemplazados por una constante espacial sobre el dominio de interés, la cual cambiaba de valor en cada corrida entre -6 y 6, con intervalos de 1. En todos los experimentos, se consideraron los 30 miembros del *ensemble* del modelo IA.

3. Resultados

Los datos observados de GODAS y Reanalysis II permitieron reproducir la relación entre el viento del Pacífico central en agosto y el índice E en enero del año siguiente (Figura 1a), según Takahashi y Dewitte (2015). Dado que estas fuentes de datos fueron utilizadas para el ajuste fino (*fine tuning*) del modelo IA IGP-UHM, se espera que este pueda reproducir la misma sensibilidad en sus pronósticos. La Figura 1d permite verificar dicha relación, incluso considerando los pronósticos realizados con datos independientes (*test*) que no estuvieron disponibles para el modelo durante su desarrollo. De manera similar, en las Figuras 1b, 1c, 1e y 1f se verifican relaciones similares a las encontradas por Takahashi y Dewitte (2015), usando el contenido de calor oceánico ecuatorial y el índice E como predictores.

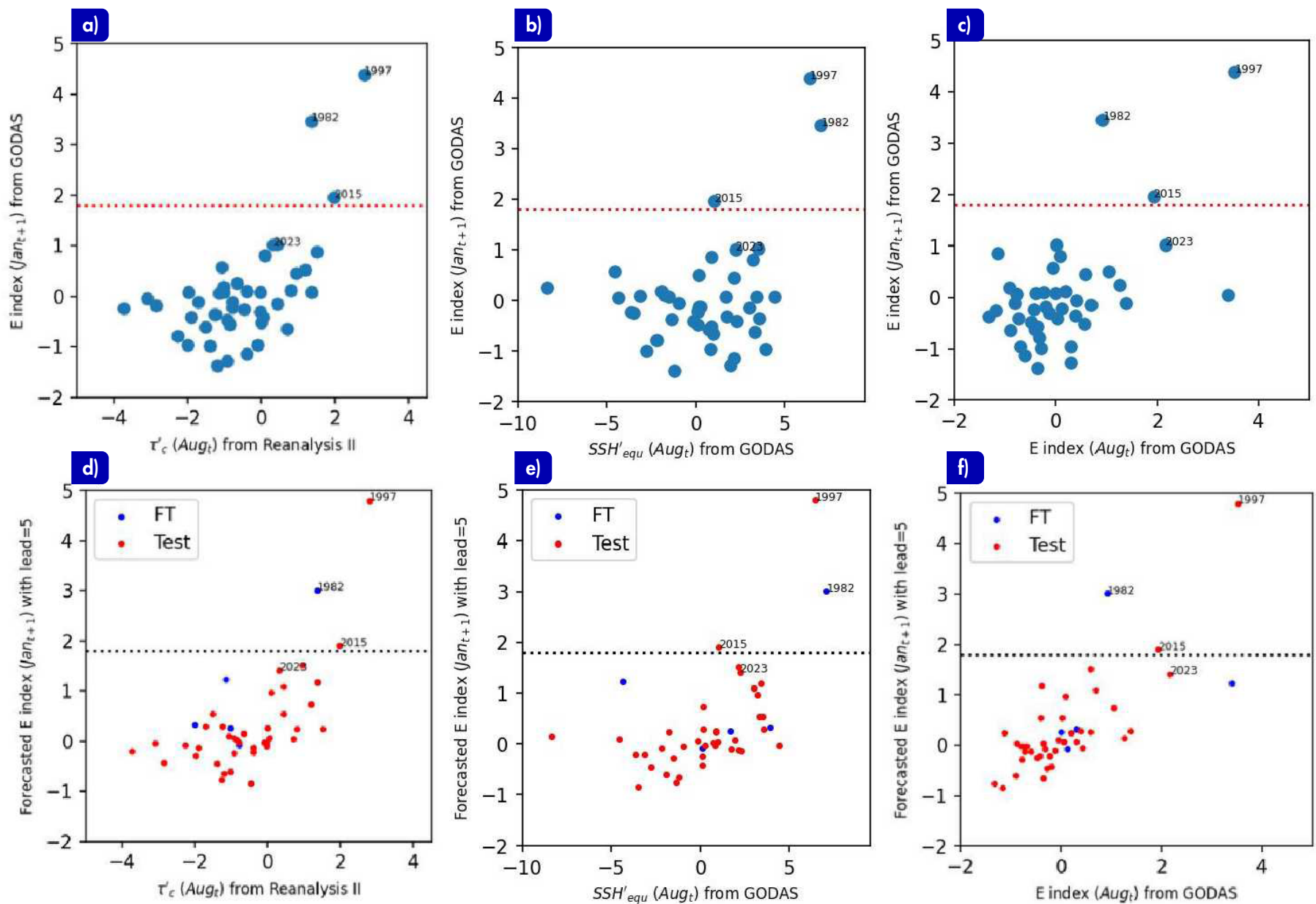


Figura 1. Índice E para el siguiente enero observado (a, b y c) y pronosticado por el modelo de IA (d, e y f) versus las anomalías de esfuerzo de viento zonal, altura superficial del mar e índice E de agosto. La línea horizontal punteada indica el umbral de 1.8. Los puntos azules (rojos) indican los años utilizados para el *fine-tuning* (evaluación independiente o test) del modelo de IA.

El estado medio de agosto de la relevancia LRP para los eventos de El Niño fuerte se muestra en la Figura 2. Los contornos azules, con valores de relevancia de -3 , indican regiones relevantes desfavorables para predecir un evento El Niño fuerte en el siguiente enero, mientras que los contornos rojos, con valores de 6 , indican regiones relevantes favorables para predecirlo. Los campos sombreados en azul/rojo representan anomalías negativas/positivas estandarizadas para cada predictor. Se observa claramente que las anomalías relevantes en los océanos fuera del Pacífico, así como en el Pacífico noroeste, no contribuyen a la predicción de El Niño, mientras que las observadas en el océano Pacífico ecuatorial sí lo hacen.

El efecto negativo de las anomalías negativas de temperatura superficial en el Pacífico noroeste (al norte de 40° N) sobre la predicción de El Niño fuerte posiblemente esté asociado al *seasonal footprinting mechanism* (SPM) propuesto por Vimont et al. (2003). Según este mecanismo, un patrón de anomalías de

temperatura superficial del mar en el Pacífico norte, establecido por variabilidad atmosférica a través de flujos de calor superficiales en invierno, evolucionaría hacia la región ecuatorial en los siguientes meses, favoreciendo la ocurrencia de El Niño. Sin embargo, dicho patrón se caracteriza por presentar anomalías positivas al norte de 40° N (ver Figura 4a en Vimont et al., 2003), mientras que el promedio de las condiciones que resultaron en un pronóstico de El Niño fuerte en el modelo de IA muestra anomalías negativas. En otras palabras, si bien el patrón de SPM es favorable a El Niño, este no se observó en los casos en los que el modelo pronosticó un evento fuerte; por lo tanto, las anomalías observadas serían consideradas desfavorables para dicho pronóstico.

En cuanto a la relevancia LRP de la SST', se observa que el calentamiento en la región del Pacífico oriental y el litoral peruano es considerado favorable para predecir El Niño (Figura 2b) como La Niña (no mostrado), lo que sugiere que es una región sensible

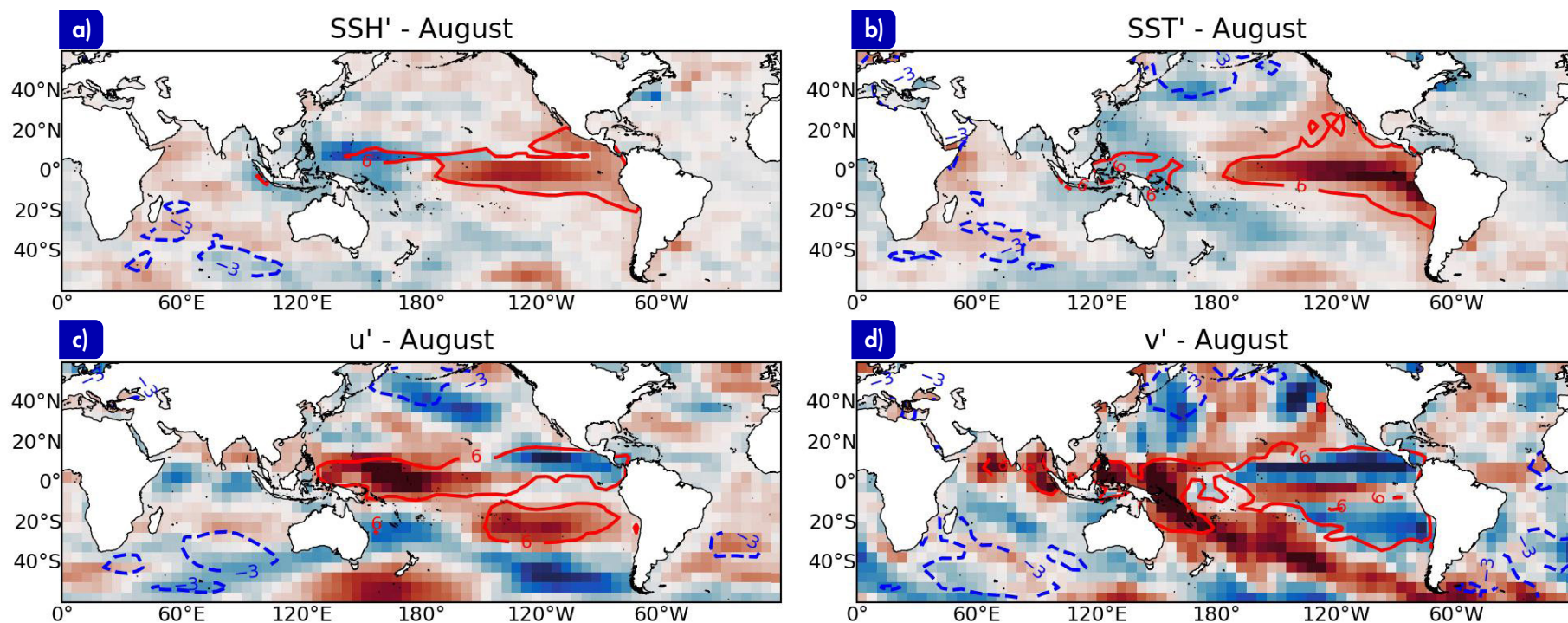


Figura 2. Anomalías y relevancia de LRP promedio (periodo 1981 - 2023) para los predictores de agosto que pronosticaron El Niño fuerte ($E > 1.5$) correspondientes a temperatura (a) y altura (b) superficial del mar, viento zonal (c) y meridional (d). Sombreado azul (rojo) indica anomalías negativas (positivas). Los contornos azules punteados (rojos sólidos) indican regiones relevantes según LRP para reducir (incrementar) la predicción de probabilidad de El Niño fuerte en el siguiente enero.

y gatilladora para el modelo de IA (contornos de relevancia con un valor de 6). Para el caso del U' , se verifica la sensibilidad esperada en el Pacífico occidental ecuatorial; sin embargo, las anomalías negativas no son consideradas desfavorables para predecir El Niño fuerte. No obstante, en la relevancia LRP para los eventos de La Niña (no mostrado), las anomalías de viento zonal del este en el Pacífico ecuatorial occidental no se consideran desfavorables para El Niño, es decir, no presentan relevancia LRP negativa, como se esperaría físicamente. Teniendo

esto en cuenta, se puso a prueba esta hipótesis en los experimentos 1, 3 y 8, los cuales se describen a continuación.

En el experimento n.º 1, se evaluó cómo la anomalía de viento zonal en el Pacífico central, durante junio-agosto, influye en la sensibilidad del pronóstico del índice E en enero en el modelo de IA. En la Figura 3, la línea punteada vertical indica los valores observados del viento zonal en la realidad. Se observa que la intensificación artificial del viento del

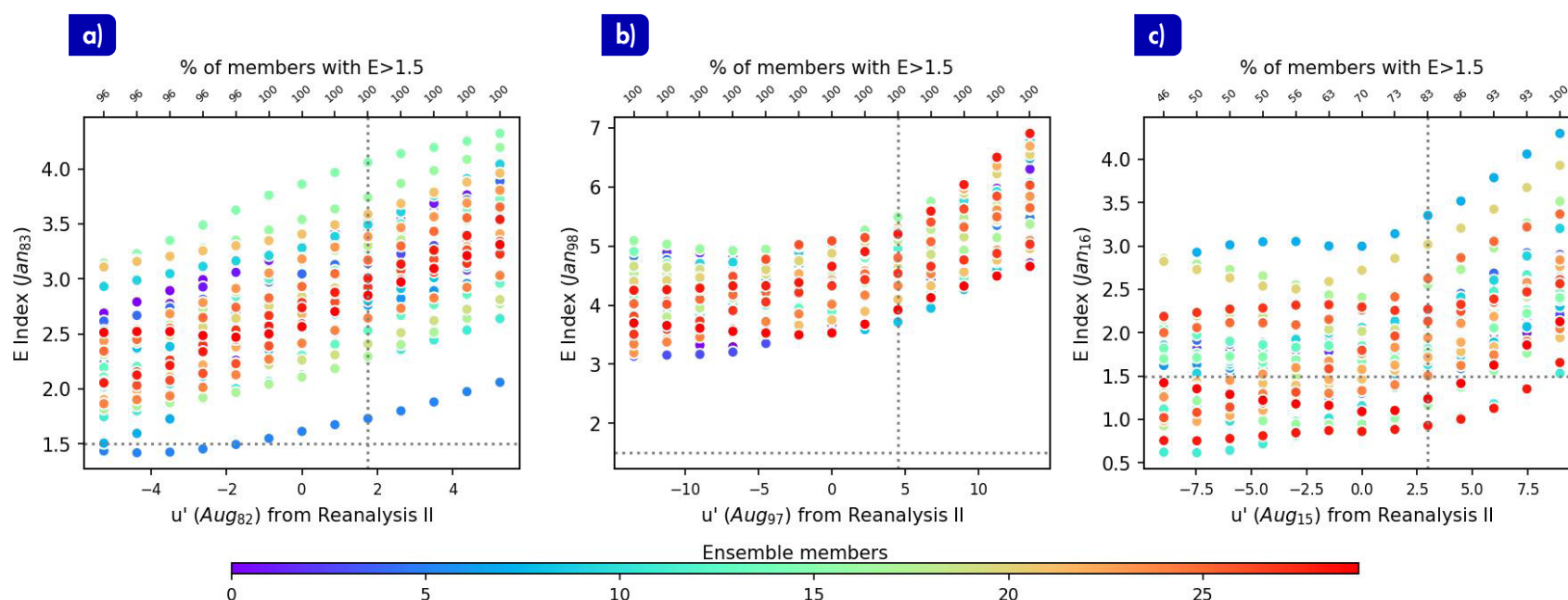


Figura 3. Diagramas de dispersión para el experimento n.º 1 entre las anomalías estandarizadas del viento zonal del Pacífico central, modificadas para agosto de 1982 (a), 1997 (b) y 2015 (c), como predictores, y la predicción de E para enero siguiente. El eje x superior indica el porcentaje de miembros que pronosticaron $E > 1.5$. Cada color representa un miembro del *ensemble*. La línea vertical punteada indica el valor original del predictor. La línea horizontal indica el valor $E = 1.5$.

este en el Pacífico occidental (anomalías negativas), si bien reduce ligeramente la magnitud del índice E pronosticado, no logra neutralizar los pronósticos de El Niño de 1983, 1998 y 2016. Es más, en los casos de 1983 y 1998, el modelo persiste en pronosticar El Niño fuerte ($E > 1.5$), incluso con anomalías de viento negativas con más del doble de intensidad que las positivas observadas. Ampliar la región en la que se modificó U' no incrementó la sensibilidad (experimento 6, no mostrado).

En el experimento n.º 2, se evaluó la sensibilidad de los pronósticos al nivel del mar (*proxy* para el contenido de calor) en el Pacífico ecuatorial inicial en el modelo de IA. Al igual que en el experimento n.º 1, se observa que un menor contenido de calor en el Pacífico ecuatorial disminuye ligeramente la magnitud del índice E, pero tampoco logra neutralizar los pronósticos de los eventos de El Niño de 1983, 1998 y 2016 (no mostrado). Es decir, que el contenido de calor del Pacífico ecuatorial tampoco es un predictor dominante de E en el modelo de IA. También se hizo un experimento (no mostrado) donde tanto la U' como la SSH' fueron reducidas simultáneamente; sin embargo, la modificación de ambos predictores tampoco contribuyó significativamente a la neutralización de los pronósticos de los eventos El Niño evaluados.

En el experimento n.º 3 se evaluó la sensibilidad del pronóstico de E a la temperatura superficial del mar inicial en la región principal del patrón E. Se observó una sensibilidad de alrededor de 1:1 entre

los valores iniciales del índice E, en junio-agosto, y los pronosticados en enero siguiente, aunque esta relación se saturó para valores negativos (Figura 4). Esto indica que la temperatura superficial del mar en el Pacífico oriental es el predictor dominante para el modelo de IA entre los tres evaluados.

Para evaluar si la sensibilidad a los otros predictores sería mayor en ausencia del fuerte calentamiento preexistente en el Pacífico oriental, en el experimento n.º 4 se reemplazó la SST' inicial sobre el patrón E con el valor de cero y se volvió a evaluar la sensibilidad del pronóstico al viento del Pacífico occidental. En general, los valores de E pronosticados se redujeron, por lo que en los casos con las mayores anomalías negativas de viento zonal se logra neutralizar El Niño de 2016, mas se mantiene el pronóstico de El Niño en 1983 y 1998 (no mostrado). Incrementar la región en la que se modificó U' permitió neutralizar parcialmente los pronósticos de los eventos El Niño para los casos en los que las anomalías del viento del este tuvieron magnitudes menores de -2 ; sin embargo, no fue del todo claro (experimento 6 y 7, no mostrados). Aparentemente, la sensibilidad del pronóstico a U' no es sustancialmente distinta al modificar SST' , es decir, que los efectos de ambos predictores se estarían combinando de forma aproximadamente lineal en el pronóstico.

En el quinto experimento se modificó el predictor SST' en todo el dominio, no solo en el Pacífico oriental (no mostrado). A diferencia del experimento n.º 3

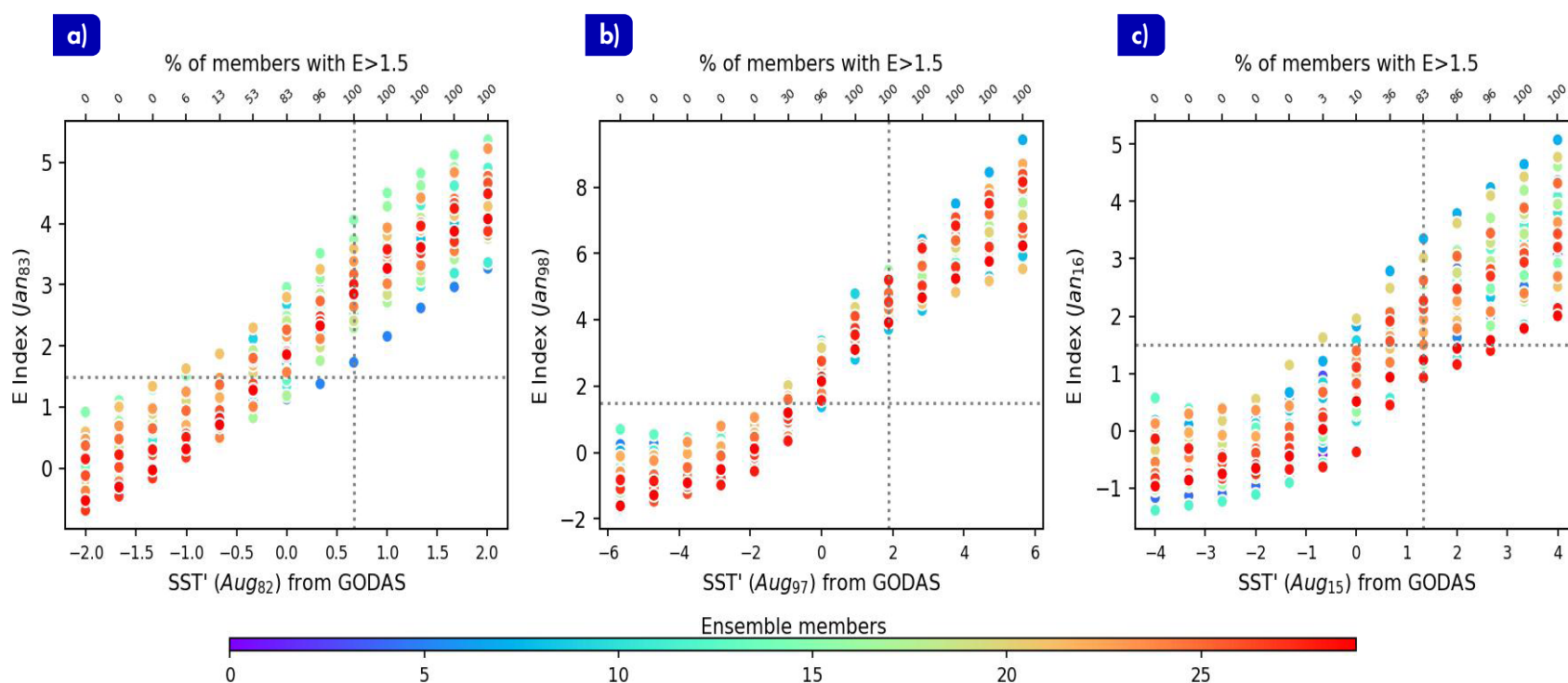


Figura 4. Igual que la Figura 3, pero para el experimento n.º 3, modificando la temperatura superficial del mar en la región de E (SST') como predictor.

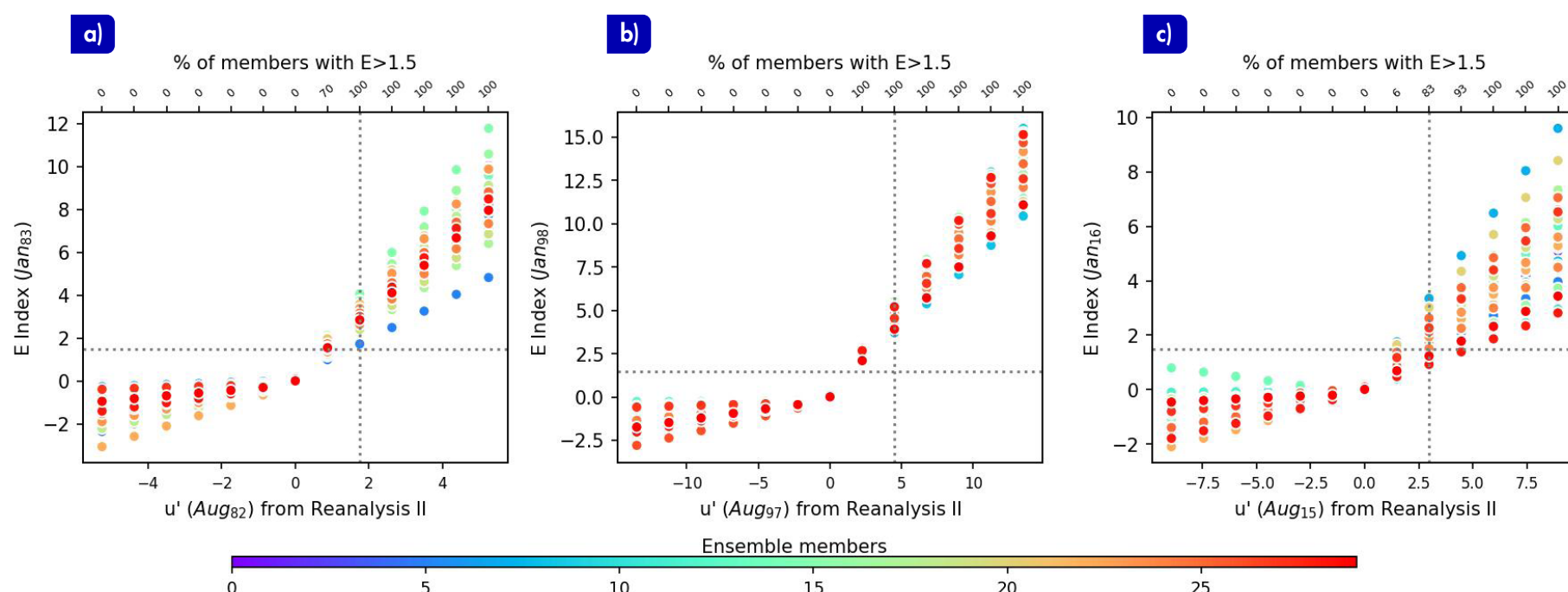


Figura 5. Igual que la Figura 3, pero para el experimento n.º 8, modificando la SST, SSH, U y V en todo el dominio.

(Figura 4), donde los valores negativos pronosticados eran cercanos a cero, en este experimento se logró convertir los pronósticos de los tres eventos El Niño en pronósticos de La Niña. Esto indica que, si bien el Pacífico oriental es la región de mayor relevancia en cuanto a SST', el modelo de IA considera más relevantes los patrones del dominio completo.

En el experimento n.º 8 (Figura 5), se modificaron simultáneamente todos los predictores (SST, SSH, U y V), multiplicándolos por el mismo coeficiente en todo el dominio. Se evidenció una sensibilidad mucho mayor a los patrones con coeficiente positivo, los cuales producen valores positivos de E, en comparación con los de coeficiente negativo, que generan pronósticos negativos de E. En ese sentido, la respuesta del modelo se asemeja a la función de activación "leaky RELU", con el punto de quiebre en cero. En este experimento se observa la variación no lineal del índice E cuando la señal de los predictores del modelo se amplifica positiva y negativamente en agosto.

4. Conclusiones

Este estudio evalúa la capacidad del modelo IA IGP-UHM para reproducir la sensibilidad de sus pronósticos a aquellos aspectos de las condiciones iniciales que son considerados precursores clave y que son identificados a partir de la investigación científica de los mecanismos físicos de ENOS. Para ello, se expuso el modelo a situaciones artificiales en las condiciones iniciales, cuyo efecto en el pronóstico es

fácilmente anticipado cualitativamente sobre la base del conocimiento de la física de ENOS. Sin embargo, los resultados sugieren que dicho conocimiento no habría sido inferido solo a partir de la identificación de patrones con los datos con los que se entrenó al modelo.

Si bien los datos de los predictores y pronósticos del modelo de IA para el periodo 1981-2023 reproducen, en general, la fuerte relación no lineal entre el viento zonal en el Pacífico ecuatorial central (índice U') de agosto y el índice E en enero —lo que sugiere una alta probabilidad de un evento de El Niño fuerte cuando U' es positivo y supera un valor umbral, en concordancia con Takahashi y Dewitte (2015)— los experimentos en los que se modificaron artificialmente los predictores en junio-agosto de 1982, 1997 y 2015 mostraron una baja sensibilidad del valor de E pronosticado a valores ampliamente distintos de U'. En particular, ante los valores fuertemente negativos de U' impuestos al modelo, era de esperarse pronósticos de condiciones neutras o frías ($E \leq 0$). No obstante, el modelo mantuvo el pronóstico de un evento de El Niño fuerte ($E > 1.5$) en el verano, lo que implica que no identificó la relevancia física de dicho predictor. Del mismo modo, el modelo tampoco asignó mayor relevancia al contenido de calor oceánico ecuatorial, otro predictor clave que sustenta el modelo carga-descarga de ENOS.

En contraste, la temperatura superficial del mar (SST') en el Pacífico oriental (región núcleo del patrón E) en junio-agosto emergió como el predictor más

relevante para el pronóstico de E en enero siguiente para el modelo IA. Desde un punto de vista físico, la temperatura superficial por sí sola no refleja memoria en el sistema climático, ya que se puede modificar rápidamente, a diferencia del contenido de calor, que cambia lentamente, o los vientos zonales ecuatoriales, que generan ondas Kelvin que evolucionan en escala de meses y, por lo tanto, tienen un efecto retardado.

Los resultados ilustrarían una limitación fundamental de los modelos de *machine learning*, los cuales no son capaces de identificar relaciones de causalidad, solo de correlación o asociación. En contraste, los humanos logran hacerlo a través del entendimiento teórico/conceptual de los fenómenos, así como del proceso inductivo, que consiste en generalizar a partir de lo particular. Este estudio plantea inquietudes sobre la capacidad de los modelos de IA para realizar predicciones correctas cuando se enfrentan a situaciones novedosas, en las que las relaciones correlacionales pueden fallar. En estos casos, es fundamental que los modelos se basen en relaciones causales, que sí mantienen su validez. Esto subraya la importancia de mantener una perspectiva crítica sobre el desempeño de los modelos de IA en la predicción climática, así como la necesidad de encontrar formas de incorporar el conocimiento experto en su desarrollo.

Referencias

Bach, S., Binder, A., Montavon, G., Klauschen, F., Müller, K.-R., & Samek, W. (2015). On Pixel-Wise Explanations for Non-Linear Classifier Decisions by Layer-Wise Relevance Propagation. *PLOS ONE*, 10(7), e0130140. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130140>

Bjerknes, J. (1966). A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 18(4), 820–829. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1966.tb00303.x>

Bjerknes, J. (1969). Atmospheric Teleconnections from the Equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 97(3), 163–172. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0163:ATFT EP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFT EP>2.3.CO;2)

Cane, M. A., & Zebiak, S. E. (1985). A Theory for El Niño and the Southern Oscillation. *Science*, 228(4703), 1085–1087. <https://doi.org/10.1126/science.228.4703.1085>

Chiodi, A. M. & Harrison, D. E. (2017). Observed El Niño SSTA Development and the Effects of Easterly and Westerly Wind Events in 2014/15. *Journal of Climate*, 1505–1519. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0385.1>

Fang, X., Dijkstra, H., Wieners, C., & Guardamagna, F. (2024). An overlooked aspect concerning the effect of the spatial pattern of zonal wind stress anomalies on El Niño evolution and diversity. *Climate Dynamics*, 62(8), 7037–7047. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07264-5>

Neelin, J. D., Battisti, D. S., Hirst, A. C., Jin, F.-F., Wakata, Y., Yamagata, T., & Zebiak, S. E. (1998). ENSO theory. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C7), 14261–14290. <https://doi.org/10.1029/97JC03424>

Rivera Tello, G. A., Takahashi, K., & Karamperidou, C. (2023). Explained predictions of strong eastern Pacific El Niño events using deep learning. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45739-3>

Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., & Dewitte, B. (2011). ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 38(10). <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>

Takahashi, K., & Dewitte, B. (2015). Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 46(5–6), 1627–1645. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2665-3>

Takahashi, K., Karamperidou, C., & Dewitte, B. (2018). A Theoretical Model of Strong and Moderate El Niño Regimes. *Climate Dynamics*, 52, 12, 7477–7493. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4100-z>

Vimont, D. J., Wallace, J. M., & Battisti, D. S. (2003). The Seasonal Footprinting Mechanism in the Pacific: Implications for ENSO. *Journal of Climate*, 16(16), 2668–75. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<2668:TSMIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2668:TSMIT>2.0.CO;2)

Wang, Y.-L., Jin, F.-F., Wu, C.-R., & Qiu, B. (2024). Northwestern Pacific Oceanic circulation shaped by ENSO. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62361-z>

RESUMEN INFORME TÉCNICO

n.º PPR/EL NIÑO-IGP/2024-11

Publicado el 13 de diciembre de 2024

En octubre, según el valor del Índice Costero El Niño (ICEN), se mantiene la condición neutra (-0.35), al igual que los ICEN temporales (ICEN-tmp) de noviembre (-0.12) y diciembre (-0.08). La mayoría de los pronósticos climáticos, tanto nacionales como internacionales, sugieren la presencia de anomalías negativas en la temperatura superficial del mar (TSM) frente a la costa peruana al menos hasta junio de 2025. Sin embargo, estas anomalías permanecerían dentro del rango neutral, por lo que no se esperaría el desarrollo de un evento La Niña costera durante este periodo.

En el Pacífico central, el Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de octubre (-0.24) y el ONI temporal de noviembre (-0.41) corresponden a una condición neutra; mientras que el ONI temporal (ONI-tmp) de diciembre (-0.66) se ubica en la condición fría débil. Según el promedio de los pronósticos generados por los modelos climáticos con condiciones iniciales de diciembre, se prevé condiciones frías hasta marzo de 2025.

Por otro lado, es importante señalar que el ICEN relativo (ICENr) —indicador desarrollado por el IGP y que se encuentra en proceso de mejora y ajuste para optimizar sus resultados— muestra que en octubre continúan las condiciones frías, las que se habrían iniciado en mayo. Asimismo, el RONI (Relative Oceanic Niño Index) de octubre mantiene una condición Fría Débil, vigente desde julio.

El informe técnico completo se encuentra disponible en <https://bit.ly/InfTecnElNino2024-11IGP>



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia,
y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

PP 068 "Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencia por Desastres"

Producto: "Estudios para la estimación de los riesgos de desastres"

Actividad: "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño"

Instituto Geofísico del Perú

INFORME TÉCNICO N° PpR/El Niño-IGP/2024-11

13/12/2024

Advertencia: El presente informe sirve como insumo para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN). El pronunciamiento colegiado de la comisión multisectorial del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

Resumen

En octubre, según el valor del Índice Costero El Niño (ICEN), se mantiene la condición neutra (-0.35), al igual que los ICEN temporales (ICEN-tmp) de noviembre (-0.12) y diciembre (-0.08). La mayoría de los pronósticos climáticos, tanto nacionales como internacionales, sugieren la presencia de anomalías negativas en la temperatura superficial del mar (TSM) frente a la costa peruana al menos hasta junio de 2025. Sin embargo, estas anomalías permanecerían dentro del rango neutral, por lo que no se esperaría el desarrollo de un evento La Niña costera durante este periodo.

En el Pacífico central, el Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de octubre (-0.24) y el ONI temporal de noviembre (-0.41) corresponden a una condición neutra; mientras que el ONI temporal (ONI-tmp) de diciembre (-0.66) se ubica en la condición fría débil. Según el promedio de los pronósticos generados por los modelos climáticos con condiciones iniciales de diciembre, se prevé condiciones frías hasta marzo de 2025.

Por otro lado, es importante señalar que el ICEN relativo (ICENr) —indicador desarrollado por el IGP y que se encuentra en proceso de mejora y ajuste para optimizar sus resultados— muestra que en octubre continúan las condiciones frías, las que se habrían iniciado en mayo. Asimismo, el RONI (Relative Oceanic Niño Index) de octubre mantiene una condición Fría Débil, vigente desde julio.

www.igp.gob.pe | Calle Badajoz N° 169
Ub. Mayorazgo IV Etapa
Ate, Lima 15012 - Perú.
(51) 13172300



Advertencia: El presente informe sirve como insumo para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN). El pronunciamiento colegiado de la comisión multisectorial del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

COMUNICADO OFICIAL

ENFEN n.º 15-2024



ESTUDIO NACIONAL DEL
FENÓMENO "EL NIÑO"

COMISIÓN MULTISECTORIAL ENCARGADA
DEL ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO "EL NIÑO" – ENFEN
Decreto Supremo n.º 007-2017-PRODUCE

Estado del sistema de alerta: No activo¹

Publicado el 13 de diciembre de 2024

La Comisión Multisectorial del ENFEN, en base al análisis de las condiciones oceánicas y atmosféricas observadas hasta la fecha, así como de los pronósticos, en la región Niño 1+2 (Figura 1), mantiene el estado del "sistema de alerta ante el Niño Costero y la Niña Costera" en "No Activo", debido a que es más probable que continúe, por lo pronto, la condición neutra² hasta julio de 2025 (Figura 2), alcanzando 70 % de probabilidad durante diciembre 2024 a marzo 2025 (Tabla 1).

Por otro lado, en el Pacífico central (región Niño 3.4, Figura 1) son más probables las condiciones frías débiles hasta febrero de 2025, seguidas por la condición neutra hasta julio de 2025 (Figura 2). Para el periodo diciembre 2024 a marzo 2025, la probabilidad de la condición de La Niña es 52 % y la condición neutra es 48 % (Tabla 2).

En consecuencia, para el período diciembre 2024 a febrero 2025 se prevé temperaturas del aire entre normales y superiores a lo normal en gran parte de la costa.

Respecto al pronóstico estacional de lluvias³, son más probables las condiciones normales en la sierra norte occidental y bajo lo normal en la costa norte. Asimismo, según el pronóstico hidrológico⁴, entre diciembre 2024 a febrero 2025, se espera que, en la región hidrográfica del Pacífico, los caudales estén por debajo de lo normal a muy por debajo de lo normal en la zona norte; mientras que, en la zona centro y sur, predominarían caudales normales a sobre lo normal. Adicionalmente, no se descartan crecidas repentinas en los ríos de la costa.

En cuanto a los recursos pesqueros se espera que para las próximas semanas la anchoveta del stock norte-

¹No activo: Ocurre cuando se presentan condiciones neutras o, cuando de acuerdo al análisis de las condiciones oceánicas y atmosféricas observadas y de la predicción de los modelos climáticos, el pronóstico probabilístico mensual del Índice Costero El Niño (ICEN) indica que la probabilidad de la categoría neutra superará el 50 % durante al menos los siguientes tres meses consecutivos (Nota Técnica ENFEN 02-2024; <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-02-2024-sistema-de-alerta-ante-el-nino-y-la-nina-costera/>)

²Las condiciones mensuales se establecen en base al valor del ICEN. En el caso de la condición neutra, esta corresponde cuando el valor del ICEN es mayor o igual que -0.7 y menor o igual que +0.5 (Nota Técnica ENFEN 01-2024; <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-01-2024-definicion-operacional-de-los-eventos-el-nino-costero-y-la-nina-costera-en-el-peru/>). Para el caso del Pacífico central, la condición neutra se considera cuando el valor del ONI es mayor que -0.5 y menor que +0.5 (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

³Perspectivas climáticas diciembre de 2024-febrero de 2025: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-53.pdf>

⁴Pronóstico hidrológico estacional a nivel nacional, diciembre de 2024-abril de 2025: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02694SENA-52.pdf>

centro continúe presentando buena disponibilidad para la pesca. En cuanto a la merluza, se prevé que la disponibilidad del recurso para la pesquería continúe presentando niveles similares a lo observado en las dos semanas previas. Por otro lado, se espera que la disponibilidad de la pota o calamar gigante para la pesca se recupere progresivamente a lo largo del 2025, alcanzando niveles similares a los registrados antes del evento El Niño 2023-2024, siempre y cuando los indicadores biológicos y oceanográficos se mantengan en condiciones similares a los actuales.

Se recomienda a los tomadores de decisiones y a la población en general tener en cuenta los escenarios de riesgo basados tanto en los avisos meteorológicos⁵ y pronósticos estacionales⁶ del siguiente trimestre. Esto con la finalidad de que se adopten las medidas que correspondan para la preparación y reducción del riesgo de desastres, ante la eventualidad de cambios súbitos de las condiciones océano-atmosféricas, principalmente frente a la costa norte.

La Comisión Multisectorial del ENFEN continuará informando sobre la evolución de las condiciones oceánicas-atmosféricas y actualizando las perspectivas. El ENFEN emitirá su próximo comunicado oficial el viernes 17 de enero de 2025.

- Para mayor información, consultar el Informe Técnico Mensual en el siguiente enlace: <https://bit.ly/InfTecENFEN15-2024>
- Puede acceder a leer en comunicado en su totalidad a través del siguiente enlace: <https://bit.ly/comunicadoENFEN15-2024>

⁵ Avisos meteorológicos a nivel nacional: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=aviso-meteorologico>

⁶ Pronóstico climático: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-climatico>

INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN





-  @igp.peru
-  @igp_peru
-  @igp.peru
-  @igp_videos
-  @institutogeofisicodelperu
-  @igp.peru