



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



IGP

Instituto
Geofísico
del Perú

BOLETÍN CIENTÍFICO EL NIÑO

Vol. 11 n.º 03 marzo 2024

PROGRAMA PRESUPUESTAL n.º 068

«Reducción de la vulnerabilidad y
atención de emergencias por desastres»

En este boletín

4

pág.

Fuentes de humedad y
variabilidad de la señal isotópica
 $\delta^{18}\text{O}$ de precipitación en los Andes
centrales de Perú, caso de estudio:
la cuenca del río Mantaro

13

pág.

Herramienta para el
posprocesamiento de los
datos numéricos de modelos
regionales: SCAHpy

18

pág.

Resumen del informe técnico de El Niño

19

pág.

Resumen de los comunicados ENFEN



BICENTENARIO
PERÚ
2024



Créditos

Juan Castro Vargas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Presidente ejecutivo

Edmundo Norabuena Ortiz
Director científico

Ken Takahashi Guevara
Director de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera

Antonella Condorena Franco
Jefatura 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: Río Mantaro
Fuente: Isaías Gutiérrez (Flickr)

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

Calle Badajoz 169 Mayorazgo, Ate, 15012

Teléfono: +51-1-3172300

Lima, mayo de 2024

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>

FUENTES DE HUMEDAD Y VARIABILIDAD DE LA SEÑAL ISOTÓPICA $\delta^{18}\text{O}$ DE PRECIPITACIÓN EN LOS ANDES CENTRALES DE PERÚ, CASO DE ESTUDIO: LA CUENCA DEL RÍO MANTARO

Carol Romero¹, James Apaéstegui^{1,2}, Mathias Vuille³, Juan Sulca¹ y Angela Ampuero⁴

¹ Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

² Programa de Maestría en Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

³ Department of Atmospheric and Environmental Sciences, University at Albany, USA

⁴ Institute of Geosciences, University of São Paulo, Brazil



Carol Romero es licenciada en Física de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y colaboradora en investigación científica en la Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrosfera del IGP. Estudia la aplicación de los isótopos estables del agua en el ciclo hidrológico, como también en el entendimiento de la dinámica de eventos climáticos del pasado.

Palabras clave: Cuenca del río Mantaro, Andes centrales, isótopos estables de precipitación

Citar como Romero, C., Apaéstegui, J., Vuille, M., Sulca, J., & Ampuero, A. (2024). Fuentes de humedad y variabilidad de la señal isotópica $\delta^{18}\text{O}$ de precipitación en los Andes centrales de Perú, caso de estudio: la cuenca del río Mantaro. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.º 03, págs. 4-12.

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

Esta investigación —que ha permitido determinar las fuentes de humedad y la influencia de los factores climáticos locales y regionales sobre la cuenca del río Mantaro, a través de isótopos estables de precipitación— puede ser usada por los tomadores de decisiones para mejorar la gestión del agua y del cambio climático en dicha cuenca, dado que monitorear estos parámetros nos permite comprender la respuesta del sistema hidrológico a condiciones como el fenómeno de El Niño o la deforestación del bosque amazónico.

Resumen

La cuenca del río Mantaro es una región de alta importancia económica en Perú. Especialmente, contribuye de forma significativa a la producción

de energía hidroeléctrica y agrícola que abastece a la capital, Lima. Por ello, es crucial comprender los procesos atmosféricos, climáticos e hidrológicos para abordar eficazmente los desafíos relacionados con la gestión del agua y el cambio climático en esta región.

El presente estudio analiza datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$, Dxs) de precipitación recopilados en la cuenca del río Mantaro mediante las estaciones de Marcapomacocha (enero de 2006-marzo de 2012) y Huayao (diciembre de 2016-abril de 2018). Dicha información se evaluó en términos de fuentes de humedad y parámetros climáticos locales y regionales para su interpretación a escala temporal mensual y anual. Asimismo, se analizaron dos eventos climáticos extremos: la sequía de 2010 y el Niño Costero de 2017, con el fin de entender la influencia de la circulación atmosférica regional con relación a la señal geoquímica. De los resultados obtenidos, se infiere que la variación de la señal isotópica $\delta^{18}\text{O}$ está altamente influenciada por el historial de transporte de las masas de aire y el nivel de precipitaciones aguas arriba. También se observaron correlaciones significativas con la cantidad de precipitación y la humedad relativa, lo que implica que los procesos locales también tienen una influencia importante en la variabilidad de la señal isotópica $\delta^{18}\text{O}$. Estos resultados proporcionan una base para estudios hidroclimáticos y reconstrucciones paleoclimáticas en la cuenca del río Mantaro.

1. Introducción

Las lluvias en la cuenca del río Mantaro (CRM) tienen un impacto directo en actividades económicas vitales como la agricultura, la generación de energía y el suministro de agua potable. Los eventos climáticos extremos, tales como sequías e inundaciones, constituyen uno de los mayores peligros para la región.

En las últimas décadas, se ha observado una tendencia a la reducción de las precipitaciones en la CRM, con una disminución promedio de aproximadamente -5.6 mm por década. Además, el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) ejerce una influencia significativa en el inicio y la duración de las lluvias en la región. La relación entre la CRM y el ENOS, a escalas temporales interanuales, ha sido explorada en diversas investigaciones (p. ej. Silva et al., 2008; Sulca et al., 2018), las cuales muestran que un aumento en la temperatura superficial del mar (TSM, El Niño) en el océano Pacífico central produce un descenso en las lluvias de la CRM, mientras que un enfriamiento (La Niña) produce valores altos de precipitación durante los meses de verano y primavera en la región. En general, existe un fuerte consenso en que cualquier contribución a la comprensión de la dinámica de las precipitaciones en el valle será

información clave para apoyar la seguridad hídrica regional y la resiliencia socioeconómica.

En tal sentido, es importante contar con nuevas metodologías, como la aplicación de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, δD y exceso de deuterio [Dxs]) de precipitación, que son trazadores geoquímicos utilizados como instrumentos para determinar fuentes de humedad (p. ej., Aron et al., 2021; Ampuero et al., 2020). Entender los procesos microfísicos y atmosféricos durante eventos de precipitación es esencial para la calibración de registros paleoclimáticos que permitan entender la variabilidad del clima del pasado y poder documentar la recurrencia de eventos extremos (p. ej., Vuille et al., 2012). A escala de los Andes centrales, existen investigaciones donde se ha demostrado que la variación de la señal isotópica $\delta^{18}\text{O}$ es producto de la convección atmosférica en el sistema de monzón sudamericano, siendo este el principal mecanismo que controla la composición isotópica del vapor de agua en el verano austral; en tanto, la mezcla advectiva a gran escala proporciona un control adicional, especialmente en el invierno austral. Por otro lado, estudios recientes han demostrado que los parámetros locales (precipitación local, temperatura o humedad relativa) afectan la señal isotópica $\delta^{18}\text{O}$ en escalas de tiempo cortas en varias regiones de los Andes (Fiorella et al., 2015).

El presente estudio se basó en un periodo de ocho años de monitoreo de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, δD , Dxs) de aguas pluviales en dos lugares dentro de la CRM. Los datos se utilizaron para analizar la influencia de los factores ambientales a escala local y regional, con el objetivo de aportar nueva información necesaria para las reconstrucciones paleohidrológicas, así como para las estimaciones en el balance hídrico y la gestión de futuros peligros ambientales sobre la CRM.

2. Zona de estudio

La CRM se encuentra en los Andes centrales peruanos. Abarca una extensión de aproximadamente $34\,550\text{ km}^2$, con coordenadas geográficas que oscilan entre los $10^{\circ}34'$ y $13^{\circ}35'$ de latitud sur, y los $73^{\circ}55'$ y $76^{\circ}40'$ de longitud oeste. Esta región se caracteriza por tener una altitud promedio de 3870 m s. n. m.

En cuanto al clima, la precipitación anual promedio (Figura 1D) para el período 2006-2019 es de $1\,100\text{ mm}$, con un 83 % de la precipitación concentrada

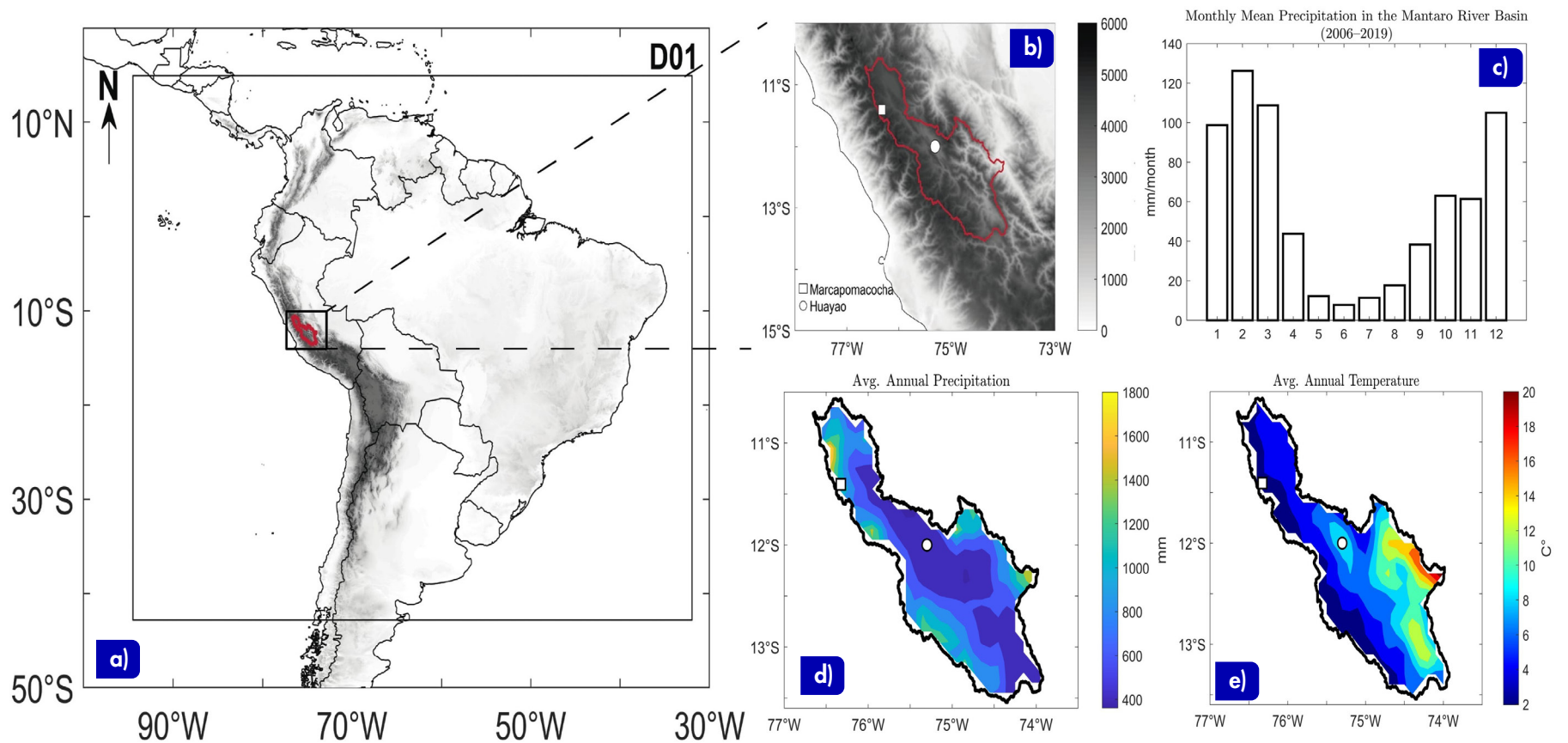


Figura 1. a) Ubicación de la cuenca del río Mantaro dentro de Sudamérica. D01: Área establecida para el cálculo de retrotrayectorias de vientos, con resolución espacial de 27 km. b) La estación Marcapomacocha (cuadrado blanco) y la estación Huayao (círculo blanco) ubicadas en la CRM (línea roja). La topografía se derivó de datos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con una resolución de 90 m. c) Precipitación media mensual en la CRM. d) Distribución espacial de precipitación promedio anual (mm). e) Temperatura promedio anual sobre la CRM con base en las medias de largo plazo de 2006 a 2019 con datos de IMERG (Integrated Multi-SatellitE Retrievals) y ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 5), respectivamente.

entre los meses de octubre y abril (Figura 1C). La variación de la temperatura promedio anual (Figura 2E) en la zona es notable, oscila entre los 2 °C y 20 °C. La temperatura mínima promedio muestra una mayor estacionalidad, varía entre 0.5 °C en invierno y 7 °C en verano. Por otro lado, la temperatura máxima promedio presenta una estacionalidad menos pronunciada, fluctúa entre los 20.8 °C en verano y 18.4 °C en invierno.

3. Datos y metodología

3.1 Isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, δD) de precipitación

La colecta de agua pluvial para el análisis de los isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, δD) se llevó a cabo en las estaciones de Marcapomacocha (11°24'15.8" S, 76°19'30.2" O, 4477 m s. n. m., Figura 1B) y Huayao (12°02'18" S, 75°19'22" O, 3313 m s. n. m., Figura 1B). Los datos de Marcapomacocha fueron obtenidos de la base de datos de la Red Global de Isótopos de Precipitación (GNIP, por sus siglas en inglés), accesible en <https://nucleus.iaea.org/wiser>,

generada por la Agencia Internacional de Energía Atómica en colaboración con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi). Se cuenta con 61 datos recolectados mensualmente desde enero de 2006 hasta marzo de 2012.

En el caso de la estación de Huayao, estos datos fueron recolectados en el observatorio del mismo nombre que opera el Instituto Geofísico del Perú (IGP). Las muestras fueron recolectadas con una frecuencia de 15 días, desde diciembre de 2016 hasta abril de 2018, con lo que se dispone de 28 datos. No obstante, para este estudio, las muestras fueron ponderadas mensualmente, y analizadas en el Centro de Investigaciones de Aguas Subterráneas de la Universidad de Sao Paulo, Brasil, a través del analizador de aguas Picarro, con una precisión analítica de 0.09 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ y 0.9 ‰ δD .

3.2 Datos climáticos

Los parámetros locales (precipitación, humedad relativa y temperatura del aire) para la estación de Huayao fueron obtenidos con los equipos de medición del Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación

(LAMAR), ubicado en el Observatorio Geofísico de Huancayo, para el periodo de diciembre de 2016 hasta abril de 2018. Para la estación de Marcapomacocha, los datos de precipitación local fueron obtenidos por Senamhi, mientras que los datos de temperatura del aire y humedad relativa fueron obtenidos con los productos ERA5-Land monthly averaged y ERA5-hourly *data on pressure level*, con resoluciones espaciales de 0.1° y 0.25° , respectivamente.

Para el cálculo de la precipitación regional, se utilizaron los datos del producto IMERG Late Run (acrónimo de Integrated Multi-Satellite Retrievals en inglés) para la Misión de Precipitación Global, que cuenta con una resolución espacial de 0.1° y su base de datos cubre desde junio de 2000 hasta el presente. Asimismo, para el cálculo de la convergencia de humedad vertical integrada (CHVI), se utilizaron las variables de vientos zonales (u), meridionales (v) y humedad específica (q) de la base de datos de ERA5, con resolución temporal horaria, considerando los niveles de presión desde 1000 hPa hasta 200 hPa. Tanto para la precipitación regional como para la CHVI, se consideró la climatología durante el periodo 2001-2019.

3.3 Modelo de retrotrayectorias

Para determinar de dónde provienen las posibles fuentes de humedad que llegan a las estaciones de Huayao y Marcapomacocha, utilizamos el modelo HYSPLIT 5.2.1 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), desarrollado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Este modelo permite calcular las trayectorias y retrotrayectorias siguiendo la posición de una partícula en el espacio y en el tiempo.

El modelo HYSPLIT requiere datos de entrada que, para este estudio, fueron proporcionados por el modelo WRF (Weather Research and Forecasting). A su vez, el modelo WRF se ejecuta con datos del FNL (Final Operational Global Analysis), los cuales cuentan con una resolución espacial de 1° , 33 niveles verticales y una resolución temporal de 6 horas. Las retrotrayectorias se calculan utilizando las ubicaciones de las estaciones como puntos de partida. El área de cobertura espacial de estas retrotrayectorias está limitado al cuadrante D1, tal como se muestra en la Figura 1, que también se utilizó para el cálculo de los datos del modelo WRF.

Considerando que el tiempo que el vapor de agua permanece en la atmósfera oscila entre aproximadamente 4 y 10 días (Van der Ent et al., 2017), se realizaron retrotrayectorias hasta 7 días atrás para determinar su origen en las estaciones de Huayao y Marcapomacocha. Para un mejor análisis de las retrotrayectorias, el modelo HYSPLIT ofrece la funcionalidad de clusterización, donde se seleccionan las trayectorias cercanas a cada una y se las agrupa. Considerando que las retrotrayectorias son calculadas cada 6 horas, para este estudio solo se consideraron los grupos de trayectorias inversas que integran un movimiento vertical de hasta 500 hPa a las 00:00 UTC, ya que este nivel es importante para el transporte de humedad en nuestras estaciones de estudio.

3.4 Cálculo de la convergencia de flujos de humedad (CFH) y CHVI

Se calculó el flujo de humedad zonal (HZ) a lo largo de las secciones transversales en las latitudes donde se encuentran las estaciones, utilizando el producto de la humedad específica (q) y los vientos zonales (u):

$$\text{HZ} = qu$$

Por otro lado, la convergencia de flujos de humedad (CFH) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{CFH} = -q\nabla \cdot \mathbf{V}_h$$

Donde: $\mathbf{V}_h = (u, v)$ es el vector de viento horizontal y $-\nabla \cdot \mathbf{V}_h$ es su convergencia.

En tanto, la CHVI es calculada por la siguiente ecuación:

$$\text{CHVI} = -\nabla \cdot \frac{1}{g} \int_{1000}^{200} q \mathbf{V}_h dp$$

Donde g = aceleración gravitacional y p = presión.

Se debe tener en cuenta que, las anomalías de la HZ, CFH y CHVI, solo se calcularon para días lluviosos y luego fueron promediadas para los meses de verano (EFM).

4. Resultados

Los isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, δD) de la precipitación en la CRM presentan un promedio de -13.6‰ para la señal isotópica $\delta^{18}\text{O}$, con valores que oscilan entre -3.2‰ y -24.5‰ . En cuanto a la señal isotópica δD ,

el promedio es de -95.2‰ , con rangos que varían entre -12.01‰ y -160.71‰ . Ambos valores son reportados con respecto al estándar internacional VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

A nivel de estación, Marcapomacocha (Figura 2A) presenta valores que oscilan entre -3.21‰ y -21.76‰ para $\delta^{18}\text{O}$, con un promedio de -13.6‰ . En cuanto a la señal isotópica δD , la variación va desde -12.01‰ hasta -160.71‰ , con un promedio de -93.63‰ . Por otro lado, en la estación de Huayao (Figura 2A), la señal isotópica $\delta^{18}\text{O}$ oscila entre -3.2‰ y -24.5‰ , con un promedio de -13.87‰ . En el caso de δD , los valores oscilan entre -12.9‰ y -183.7‰ , con un promedio de -101.77‰ .

La línea meteórica local (LMWL) de la CRM tiene un valor de $\delta\text{D} = (8.14 \pm 0.1) \delta^{18}\text{O} + (15.74 \pm 1.47)$, el cual difiere ligeramente de la línea meteórica global (GMWL) ($\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$) que se utiliza como referencia para describir la coevolución de los isotopólogos del agua como lluvia de una parcela de aire (Craig, 1961). A nivel de estación, la LMWL de Marcapomacocha tiene un valor de $\delta\text{D} = (8.2 \pm 0.1) \delta^{18}\text{O} + (17.74 \pm 1.53)$, que es diferente de la LMWL de Huayao $\delta\text{D} = (7.9 \pm 0.09) \delta^{18}\text{O} + (7.6 \pm 1.44)$.

El Dxs se evalúa individualmente para cada estación. Se observa que Marcapomacocha presenta un

Dxs promedio de 14.9‰ , en comparación con la estación de Huayao que tiene un valor de 9.2‰ . Esta diferencia puede deberse a los altos valores de humedad relativa y a la presencia de un lago cerca del colector, lo que puede influir en los procesos locales, como las condiciones de condensación y el reciclaje de agua superficial, y afectar el Dxs en la estación de Marcapomacocha. Por otro lado, para el caso de la estación de Huayao, la diferencia podría deberse a procesos evaporativos, especialmente durante los meses de invierno.

4.1 Controles locales y regionales de la variabilidad de $\delta^{18}\text{O}$

Para una mejor comprensión de la influencia de los parámetros ambientales locales en la señal isotópica $\delta^{18}\text{O}$, se realizaron correlaciones de Pearson. Se encontró que la precipitación mensual presenta una correlación significativa de $r = -0.59$, con $p < 0.01$. De manera similar, la humedad relativa muestra una correlación significativa con un $r = -0.64$, $p < 0.01$. Además, el promedio mensual de precipitación de la CRM presenta una correlación significativa con $r = -0.63$, $p < 0.01$.

A nivel interanual, basado en un año hidrológico, la correlación entre la precipitación anual y el promedio

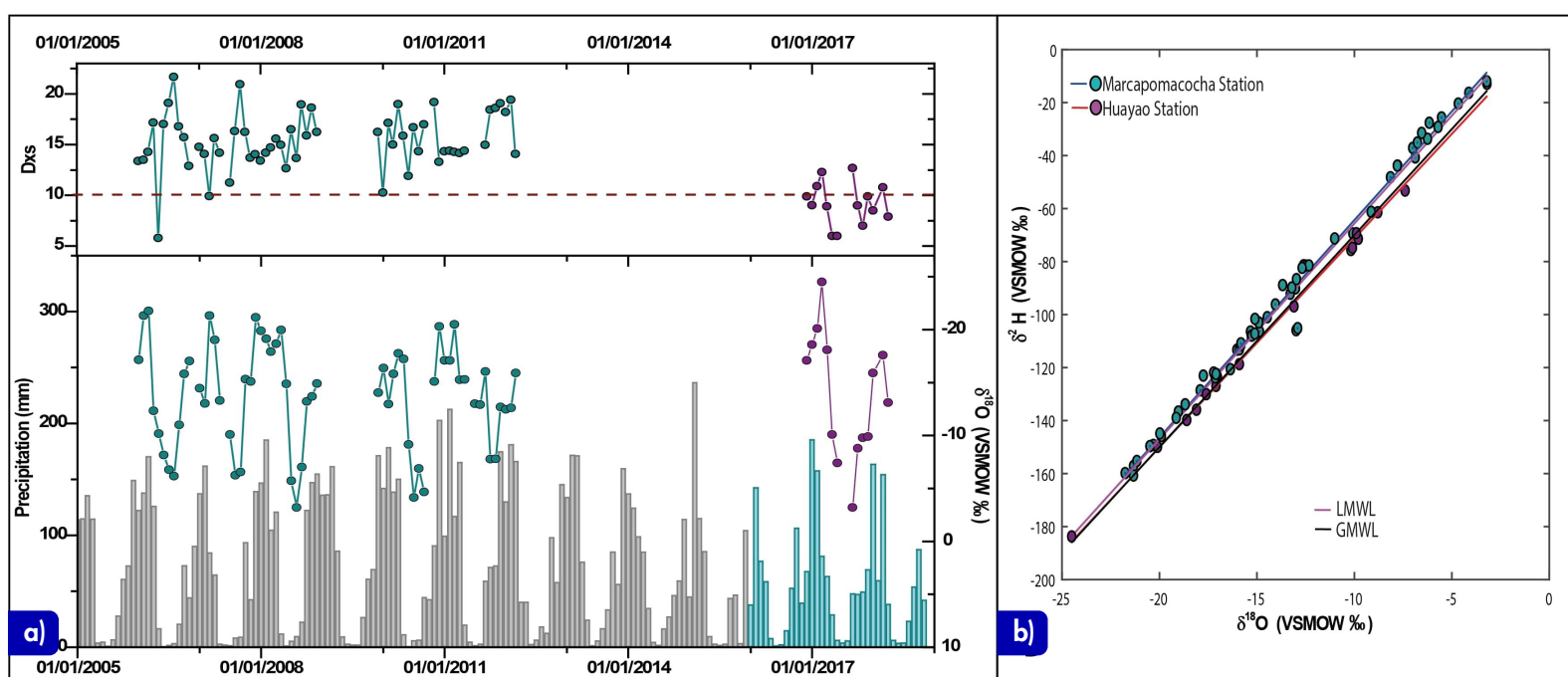


Figura 2. a) Variación temporal en la cantidad de precipitación, Dxs y $\delta^{18}\text{O}$ desde enero de 2006 hasta marzo de 2018. Las barras de color azul claro y los círculos morados indican precipitación mensual, Dxs (panel superior) y $\delta^{18}\text{O}$ (panel inferior) en la estación Huayao, respectivamente. Las barras grises y los círculos azul claro indican precipitación mensual, Dxs (panel superior) y $\delta^{18}\text{O}$ (panel inferior) en la estación Marcapomacocha, respectivamente. La línea discontinua roja representa el promedio global de Dxs (10‰). Se debe tener en cuenta que la escala para $\delta^{18}\text{O}$ está invertida. b) Líneas de agua Global (GMWL) y Local (LMWL). Los círculos morados y azules claros indican $\delta^{18}\text{O}$ y δD en las estaciones Huayao y Marcapomacocha, respectivamente.

anual ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ tiene una correlación significativa de $r = -0.79$, con $p = 0.06$. Asimismo, se observa una correlación significativa con la humedad relativa ($r = -0.46$, $p = 0.36$).

A pesar de que nuestros resultados muestran una correlación significativa entre la cantidad de lluvia y la humedad relativa con respecto a la variabilidad de la señal isotópica $\delta^{18}\text{O}$ a escala mensual y anual, es importante destacar que otras influencias regionales y de gran escala también son relevantes. Esto se debe a que los parámetros ambientales locales solo explicarían una fracción limitada de la variación total observada en el conjunto de datos.

Para una interpretación más completa de la variabilidad de $\delta^{18}\text{O}$ es necesario considerar la influencia de parámetros regionales, como las fuentes de humedad y la lluvia aguas arriba. Por lo tanto, se aplicó un análisis de clúster en las retrotrayectorias para obtener una visión más clara de las posibles fuentes de humedad asociadas con las precipitaciones en las estaciones de Huayao y Marcapomacocha. Es importante mencionar que solo se analizaron los meses de invierno en Marcapomacocha debido a la falta de datos isotópicos en la estación de Huayao.

De acuerdo con los clústeres, se puede inferir que la mayor contribución de humedad proviene del noreste y este de las estaciones de Huayao (Figura 3A) y Marcapomacocha (Figura 3B), lo que representa un 83 % y 82 % de las precipitaciones, respectivamente. Además, se observa que las fuentes de humedad provenientes del oeste (C3) contribuyen con un 6 % de las precipitaciones en la estación de Huayao, mientras que los vientos del oeste (C4) y suroeste (C1) influyen en un 18 % en total en la estación de Marcapomacocha.

Estos resultados son consistentes con los estudios previos de la CRM que muestran que las regiones de origen de la humedad se encuentran al este de la cordillera y están asociadas con la convergencia de humedad a niveles bajos sobre la cuenca del Amazonas occidental durante el verano austral (Chavez et al., 2020; Moya-Álvarez et al., 2018). No obstante, se debe considerar la interpretación de las retrotrayectorias de vientos en la CRM; por ejemplo, las oleadas frías extratropicales pueden causar que la humedad local se eleve y condense, pero las retrotrayectorias no reflejan esto. Por lo tanto, es crucial considerar las características de la circulación atmosférica en cualquier interpretación de las trayectorias de humedad.

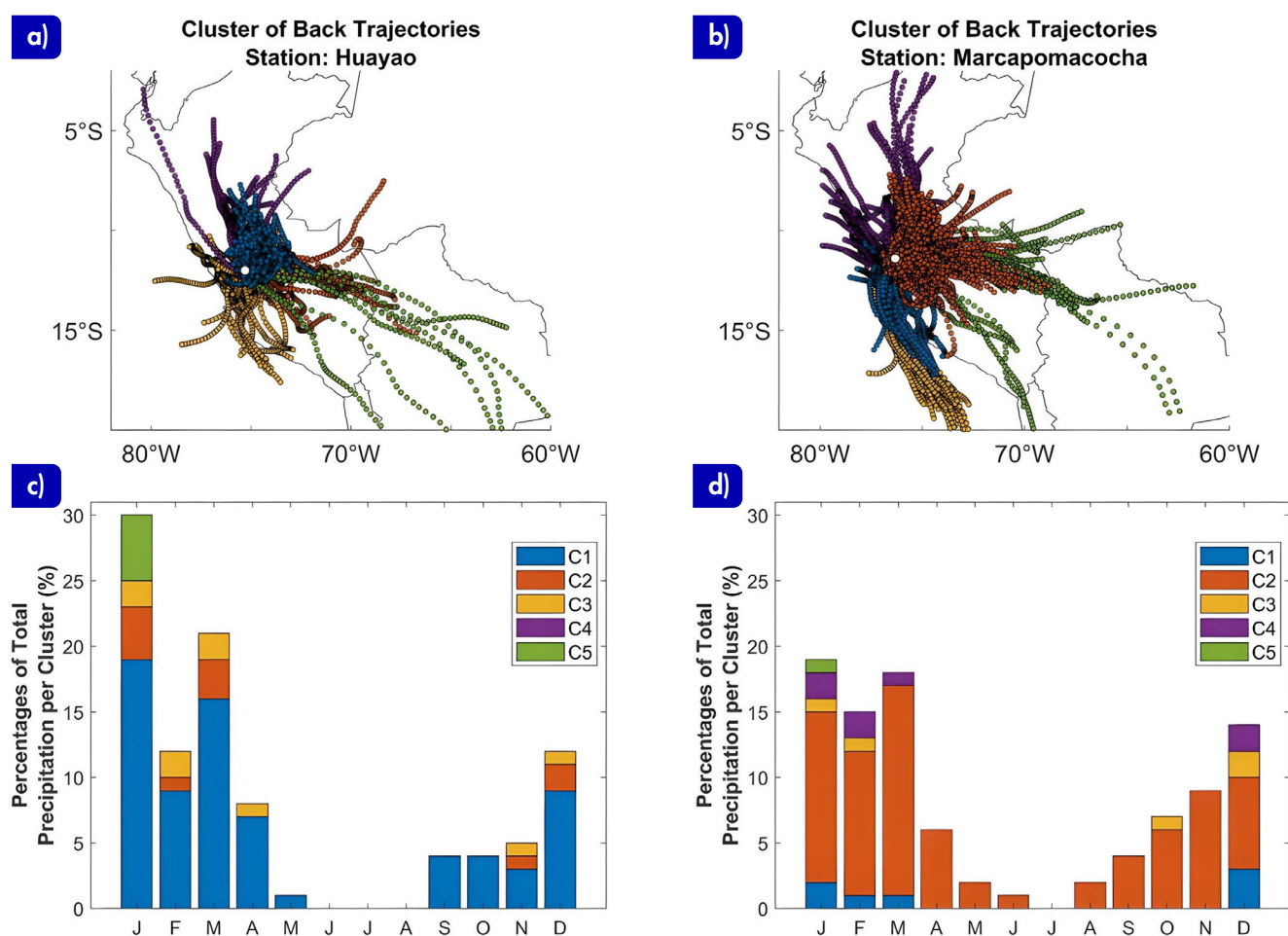


Figura 3. Clústeres de retrotrayectorias de vientos de 7 días calculadas a través del modelo HYSPLIT para la estación Huayao (a) y la estación Marcapomacocha (b), a 500 hPa, desde diciembre de 2016 a junio de 2018, y de enero de 2006 a marzo de 2012, respectivamente. c, d) Porcentajes de precipitación total (por mes) para cada clúster.

4.2 Características climáticas regionales vinculadas a importantes variaciones isotópicas

Para investigar la relación entre la circulación atmosférica regional y la composición isotópica $\delta^{18}\text{O}$ de la precipitación, se analizaron dos eventos extremos: la mayor sequía en el Amazonas (p. ej., Espinoza et al., 2012) y el Niño Costero de 2017 (p. ej., Garreaud, 2018). Ambos eventos se caracterizaron por una circulación atmosférica anómala que, probablemente, dejó una huella en la composición isotópica de la precipitación en la CRM. Este análisis puede proporcionar información sobre cómo las señales geoquímicas de eventos extremos se registran en los Andes peruanos.

La composición isotópica $\delta^{18}\text{O}$ para el verano de 2010 en la estación de Marcapomacocha fue de -15.05‰ , aproximadamente 2.7‰ menor que el promedio de los meses de verano (-17.7‰). Esta variación no se

explica solo por la cantidad de lluvia local (Figura 2A), lo que sugiere que este valor se debe a una convección de escala larga y a la circulación atmosférica a lo largo de la ruta de humedad aguas arriba. La reducida convergencia de humedad (Figura 4B, E), a lo largo de la ruta sobre el norte de Sudamérica tropical durante este evento, demuestra la disminución de la intensidad del monzón sudamericano reflejada en la precipitación regional (Figura 4A), lo que resultó en una disminución de la destilación de Rayleigh y, en última instancia, en valores isotópicos menos negativos sobre la CRM durante este período de sequía.

Caso distinto se observa en el evento de 2017, cuando la composición isotópica media de la precipitación fue de -21.06‰ , alrededor de 1.7‰ más negativa que los valores medios de verano (-19.34‰) presentes en la estación de Huayao. La Figura 4F representa las anomalías diarias de precipitación promediadas durante el evento, lo que indica un

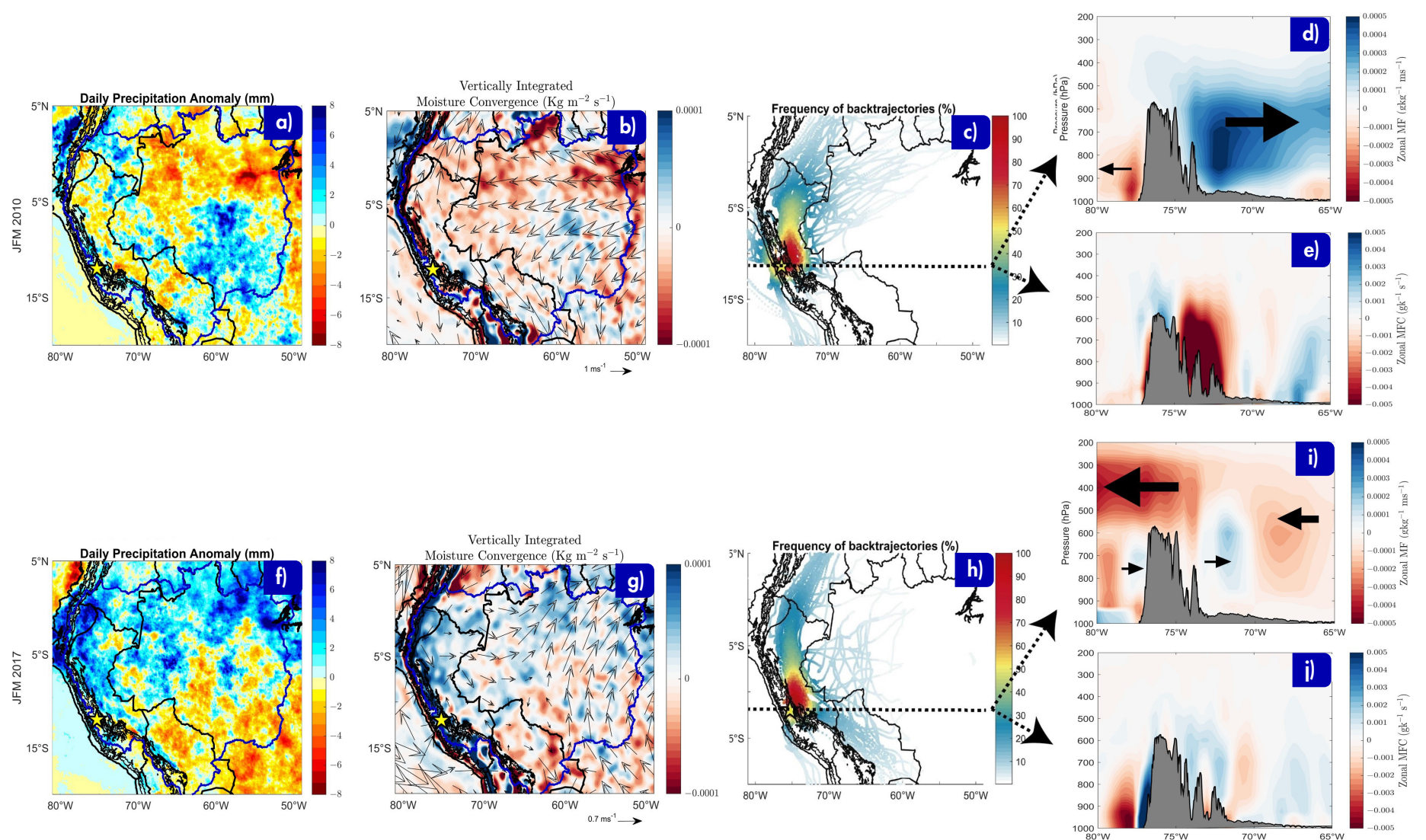


Figura 4. Circulación atmosférica regional durante los eventos extremos en los veranos (enero, febrero y marzo) de 2010 (paneles superiores) y 2017 (paneles inferiores). a, f) Anomalías de precipitación diaria promedio. b, g) Flujo de humedad integrado verticalmente y vectores de viento. c, h) Frecuencia de retrotrayectorias en porcentaje. d, e, i, j) Secciones transversales zonales de flujo de humedad y convergencia de flujo de humedad a lo largo de la latitud de las estaciones Huayao y Marcapomacocha, respectivamente.

comportamiento altamente heterogéneo de la precipitación sobre Sudamérica. De hecho, la región de los Andes orientales y la Amazonía occidental experimentaron las anomalías de precipitación más positivas sobre el dominio analizado. La Figura 4G respalda esta representación al mostrar una convergencia de humedad integrada verticalmente positiva sobre la misma región. Las retrotrayectorias mostradas en la Figura 4H indican que la humedad llegó preferentemente desde el este/noreste, lo que es consistente con informes anteriores.

Siguiendo estos resultados, es posible inferir que los valores más agotados en los isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ de lluvia sobre la CRM están asociados con las características regionales de las masas de aire que contribuyen a la precipitación. Se ha demostrado que los centros de convección profunda en la Amazonía occidental mejoran el transporte meridional de humedad, lo cual fortalece el movimiento ascendente sobre los Andes peruanos centrales (Flores-Rojas et al., 2021). En este sentido, resulta plausible argumentar que el aumento de las precipitaciones sobre los Andes orientales ha conducido a una intensificación de los procesos de destilación de Rayleigh y, en última instancia, a valores isotópicos más bajos sobre la CRM durante este evento específico.

5. Conclusiones

Este estudio presenta la serie temporal más larga de variabilidad isotópica registrada en la precipitación sobre la región sudamericana y el Perú. Se analizó la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) de la precipitación en la CRM considerando factores locales y regionales, tanto a escala estacional como interanual. Se encontró que, aunque la precipitación *in situ* y la humedad relativa local influyen en la variabilidad de $\delta^{18}\text{O}$, también hay una importante contribución de condiciones a gran escala aguas arriba. Esto concuerda con estudios previos que destacan la influencia de la precipitación y la historia de transporte de masas de aire en los Andes peruanos.

Los resultados sugieren que la composición isotópica de la precipitación en la CRM es influenciada por múltiples factores, incluyendo la cantidad de precipitación, las fuentes de humedad, la historia de transporte de humedad y el grado de precipitación aguas arriba, los cuales operan a diferentes escalas

espaciales. Dos estudios de caso sobre eventos extremos en 2010 y 2017, respectivamente, mostraron diferencias significativas en la circulación atmosférica y la cantidad de precipitación, lo que resalta la importancia de considerar tanto factores locales como regionales en la interpretación de la señal isotópica.

En conclusión, el estudio resalta la importancia de integrar análisis isotópicos en investigaciones del ciclo hidrológico, especialmente en modelos climáticos regionales y reconstrucciones *multiproxies* basadas en isótopos. Esto permitirá una mejor interpretación de los registros a largo plazo de isótopos en la precipitación y una mayor disponibilidad de datos para futuros estudios en la región.

El artículo científico original se encuentra en <https://doi.org/10.3390/w15101867>

Referencias

- Ampuero, A., Stríkis, N. M., Apaéstegui, J., Vuille, M., Novello, V. F., Espinoza, J. C., Cruz, F. W., Vonhof, H., Mayta, V. C., Martins, V. T. S., Cordeiro, R. C., Azevedo, V., & Sifeddine, A. (2020). The Forest Effects on the Isotopic Composition of Rainfall in the Northwestern Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(4). <https://doi.org/10.1029/2019JD031445>
- Aron, P. G., Poulsen, C. J., Fiorella, R. P., Levin, N. E., Acosta, R. P., Yanites, B. J., & Cassel, E. J. (2021). Variability and Controls on $\delta^{18}\text{O}$, d-excess, and $\Delta^{17}\text{O}$ in Southern Peruvian Precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(23). <https://doi.org/10.1029/2020JD034009>
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 133(3465), 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Chavez, S. P., Silva, Y., & Barros, A. P. (2020). High-Elevation Monsoon Precipitation Processes in the Central Andes of Peru. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(24). <https://doi.org/10.1029/2020JD032947>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Junquas, C., Drapeau, G., Martinez, J. M., Santini, W., Vauchel, P., Lavado, W., Ordoñez, J., & Espinoza, R. (2012). From drought to flooding: Understanding the abrupt 2010-11 hydrological annual cycle in the Amazonas River and tributaries. *Environmental Research Letters*, 7(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024008>
- Flores-Rojas, J. L., Moya-Álvarez, A. S., Valdivia-Prado, J. M., Piñas-Laura, M., Kumar, S., Karam, H. A., Villalobos-Puma, E., Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2021). On the dynamic mechanisms of intense rainfall events in the central Andes of Peru, Mantaro valley. *Atmospheric Research*, 248(July 2020), 105188. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105188>

Garreaud, R. D. (2018). A plausible atmospheric trigger for the 2017 coastal El Niño. *International Journal of Climatology*, 38(S1), e1296–e1302. <https://doi.org/10.1002/joc.5426>.

Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E., & Mosquera, K. (2008). El Niño – related precipitation variability in Peru. *Advances in Geosciences*, 14, 231–237. www.adv-geosci.net/14/231/2008/.

Moya-álvarez, A. S., Gálvez, J., Holguín, A., Estevan, R., Kumar, S., Villalobos, E., Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2018). Extreme rainfall forecast with the WRF-ARW model in the Central Andes of Peru. *Atmosphere*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/atmos9090362>

Silva, Y., Takahashi, K., & Chávez, R. (2008). Dry and wet rainy seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Advances in Geosciences*, 14, 261–264. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-261-2008>

Sulca, J., Takahashi, K., Espinoza, J. C., Vuille, M., & Lavado-Casimiro, W. (2017). Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.5185>

Van Der Ent, R. J., & Tuinenburg, O. A. (2017). The residence time of water in the atmosphere revisited. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 779–790. <https://doi.org/10.5194/hess-21-779-2017>

Vuille, M., Burns, S. J., Taylor, B. L., Cruz, F. W., Bird, B. W., Abbott, M. B., Kanner, L. C., Cheng, H., & Novello, V. F. (2012). A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia. *Climate of the Past*, 8(4), 1309–1321. <https://doi.org/10.5194/cp-8-1309-2012>

HERRAMIENTA PARA EL POSPROCESAMIENTO DE LOS DATOS NUMÉRICOS DE MODELOS REGIONALES: SCAHpy

Fiorela Castellón¹ e Ivonne Montes¹

¹ Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

Palabras clave: Software de posprocesamiento, WRF, Python, análisis, visualización

Citar como Castellón, F., & Montes, I. (2024). Herramienta para el posprocesamiento de los datos numéricos de modelos regionales: SCAHpy. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, Vol. 11 n.º 03, pág 13 - 17.

¿Cuál es la **contribución** de esta investigación para la comunidad científica?

Los resultados de esta investigación demuestran que SCAHpy facilita el análisis de datos numéricos de modelos atmosféricos, oceánicos e hidrológicos, por lo que la comunidad científica y académica puede beneficiarse enormemente con su uso puesto que simplifica el tiempo que se invierte en construir los algoritmos para el análisis de datos y, en consecuencia, permite dedicarse con exclusividad a la investigación en sí misma. Además, SCAHpy es de código abierto, por lo que los investigadores peruanos y extranjeros pueden contribuir con el desarrollo continuo del *software* para ampliar sus capacidades y diagnósticos.

Resumen

El presente avance de investigación muestra, en su versión inicial, el conjunto de programas de cómputo denominado SCAHpy, paquete de código abierto desarrollado en Python que permite el análisis y visualización de datos provenientes de modelos numéricos. Específicamente, SCAHpy ha sido desarrollado como herramienta de posprocesamiento para la componente atmosférica, oceánica e hidrológica del modelo Sistema Tierra regional de pronóstico para el territorio peruano y el océano Pacífico implementado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP RESM-COW), y contiene una serie de programas para la extracción e interpolación de datos de coordenadas sigma a cartesianas, visualización de series de tiempo, mapas

horizontales, secciones verticales, entre otros. Cabe señalar que, en su fase inicial, el análisis y visualización de datos numéricos solo se enfoca en las salidas de la componente atmosférica del IGP RESM-COW, la cual se basa en el modelo atmosférico WRF.

1. Introducción

El modelado numérico es una herramienta fundamental para compensar la falta de datos observacionales (p. ej., Montes et al., 2010), así como para llevar a cabo una serie de experimentos simulados sobre situaciones observadas (p. ej., Moya et al., 2020) e idealizadas que han ocurrido, podrían haber ocurrido o pueden ocurrir (p. ej., Ticse, 2018) en la naturaleza.

Esto debido a que, en el campo de la geofísica, los procesos en la naturaleza pueden ser expresados a través de ecuaciones diferenciales parciales, las cuales describen la evolución espacial y temporal del proceso, es decir, su dinámica. Por tanto, el modelado numérico es una representación matemática de las propiedades físicas de la Tierra y sus interacciones, las cuales se basan en las leyes fundamentales de la naturaleza (p. ej., conservación de energía, masa, *momentum*).

Si nos referimos a los modelos numéricos del clima, para resolver las ecuaciones se debe definir un espacio físico, que puede ser todo el planeta o una región específica, tal que el espacio para resolver las ecuaciones en una malla dividida en pequeñas celdas que pueden ser regulares o irregulares. Por tanto, los resultados de los modelos que representan la dinámica de uno de los compartimentos del Sistema Tierra (atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera) o las interacciones entre ellos, se obtienen como un volumen de datos definidos en el espacio y tiempo, es decir, las variables que simulan tienen entre 3 y 4 dimensiones. Como consecuencia, se generan cantidades masivas de datos que requieren un tiempo considerable para su análisis posterior (es decir, para el posprocesamiento). Cabe señalar que, para la coordenada vertical, no se usa generalmente la coordenada cartesiana, sino que se construyen nuevas coordenadas para ahorrar el costo de la experimentación real. Por ello, tener una nueva coordenada implica un nivel de complejidad mayor para el análisis de los datos numéricos.

En tal sentido, la comunidad científica, bajo la necesidad de simplificar el costo del posprocesamiento, ha desarrollado *software* o herramientas de análisis tanto de datos observacionales como numéricos, entre los cuales se encuentran OceanSpy (Almansi et al., 2019), Metpy (May et al., 2022), Argopy (Maze et al., 2020), Pyleoclim (Khider et al., 2022), entre otros. Inspirados en lo anterior, se ha desarrollado SCAHPy, un paquete de código abierto desarrollado en Python que permite el análisis y visualización de datos provenientes de modelos numéricos que presentan la estructura vertical en coordenada sigma como el modelo atmosférico WRF o el modelo oceánico CROCO. Específicamente, SCAHPy ha sido desarrollado como herramienta de posprocesamiento de los datos de salida de la componente atmosférica, oceánica e hidrológica del modelo Sistema Tierra regional de pronóstico para el

territorio peruano y el océano Pacífico implementado por el IGP (denominado IGP RESM-COW v1; Segura et al., 2023; Montes et al., 2023), y contiene una serie de programas para la extracción e interpolación de datos de coordenadas sigma a cartesianas, visualización de series de tiempo, mapas horizontales, secciones verticales, entre otros. En el presente artículo damos a conocer una descripción preliminar de SCAHPy (v0.1.0) y el avance que se tiene en la implementación en su versión inicial.

2. Metodología

El paquete SCAHPy, desarrollado en Python, aprovecha las capacidades de paralelización de datos espaciales para acelerar el procesamiento y la visualización de las salidas del modelo. Este *software* no solo permite un análisis más eficiente de los resultados del modelo, sino que también ofrece la flexibilidad necesaria para adaptarse a las salidas de otros modelos atmosféricos, como el WRF.

Esta herramienta de código abierto, distribuida bajo la licencia GPL v3.0, ha sido desarrollada incorporando principalmente las librerías *xarray*, *matplotlib* y *cartopy*. La documentación completa, que incluye los tutoriales de aplicación, se encuentra disponible en el siguiente enlace: <https://fiorelacl.github.io/SCAHPy/>. Además, el paquete está disponible en el repositorio de PyPI (Python Package Index), en el siguiente enlace: <https://pypi.org/project/scahpy>, desde donde puede ser descargado e instalado fácilmente.

La componente atmosférica del modelo acoplado IGP RESM-COW v1 está basada en el modelo atmosférico WRF. Este modelo tiene la característica de tener el sistema de grillas Arakawa tipo C y coordenadas verticales que siguen el terreno (sigma), por lo que los datos requieren un tratamiento previo a su visualización. Para trabajar con datos grillados en Python, se manejan tres conceptos: dimensión, coordenadas y variables. El primero es la etiqueta o nomenclatura, la segunda es una estructura de datos que almacena los valores que conforman cada etiqueta. Un archivo de salida del modelo WRF suele denominarse `wrfout_d0x_YYYY-MM-DD_HH:00:00`. Este archivo, al ser leído en Python para el caso del modelo acoplado, está conformado por 8 dimensiones, 7 coordenadas y 164 variables.

Archivos sin SCAHpy

Dimensión

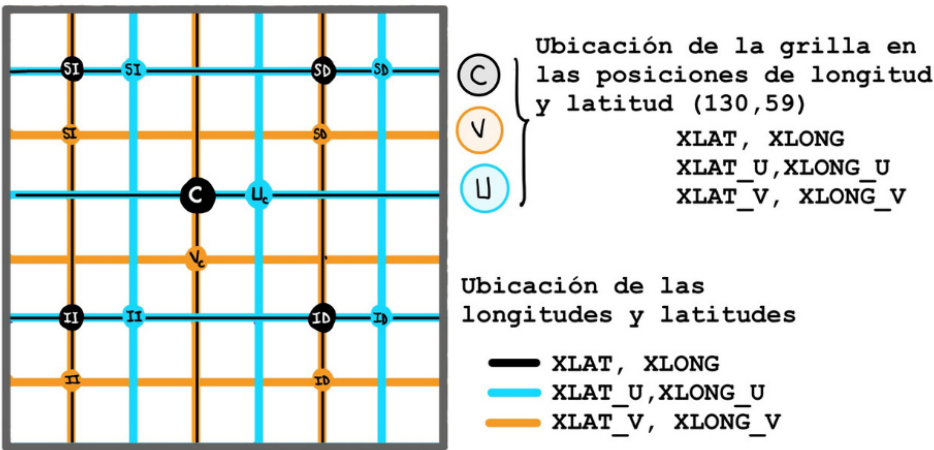
Time, south_north, west_east, bottom_top, bottom_top_stag, soil_layers_stag, west_east_stag, south_north_stag

Coordenadas

XLAT, XLONG, XTIME, XLAT_U, XLONG_U, XLAT_V, XLONG_V

Variables

164 Variables



Archivos con SCAHpy

Dimensión

time, lat, lon

Coordenadas

time, lat, lon

Variables

Variables seleccionadas

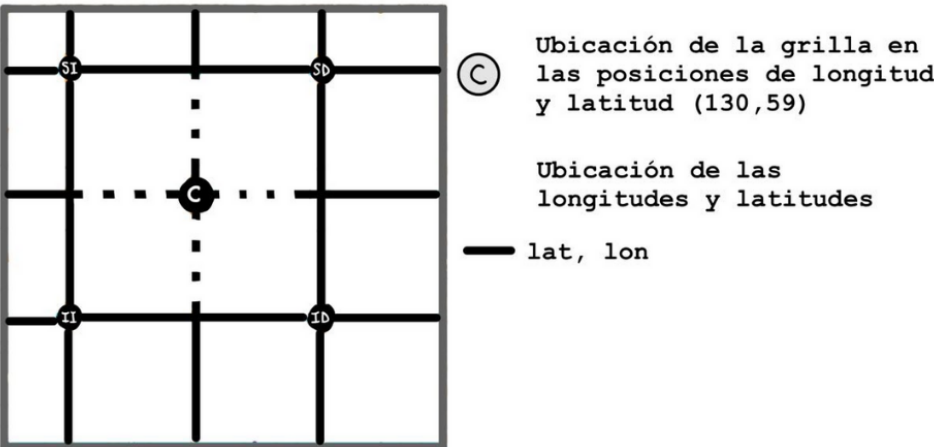


Figura 1. Lectura de archivos de la componente atmosférica del modelo IGP RESM-COW v1 sin el paquete SCAHpy (panel superior) y empleando el paquete SCAHpy (panel inferior).

En la Figura 1 se observa que, al leer el archivo sin SCAHpy, las dimensiones y las coordenadas no coinciden y, por ende, la indexación no funciona. Por ejemplo, la latitud está denominada como 'south_north'; no obstante, los valores de latitud están guardados en la coordenada XLAT para variables centradas y XLAT_U o XLAT_V para los campos de viento. El paquete SCAHpy, en su módulo de lectura de datos, realiza la homogeneización de coordenadas y dimensiones, tras lo cual se queda solo con los principales atributos, tales como latitud, longitud, tiempo y verticales de ser necesario.

Entre las funcionalidades más destacadas del paquete se encuentran:

1. Lectura de datos: El paquete ofrece dos funciones principales, ds_wrf_single y ds_wrf_multi, diseñadas para leer archivos individuales o múltiples, respectivamente. Ambas funciones leen únicamente las variables indicadas por el usuario; asimismo, homogenizan las coordenadas de las variables al pasar las coordenadas de los campos de velocidad de los bordes de la grilla hacia el centro (Figura 1).

- 2. Extracción de datos en puntos de estación:** La función extract_station_wrf permite extraer los valores de las variables de interés en ubicaciones de estaciones proporcionadas a través de archivos .csv o .shp.
- 3. Interpolación vertical:** La función vert_levs permite la interpolación de variables seleccionadas a los niveles de presión indicados por el usuario. En caso contrario, se interpolan a 13 valores de presión preestablecidos.
- 4. Obtención de climatologías:** La función dmy_var convierte los valores horarios en valores diarios, mensuales o anuales, permitiendo sintetizar variables mediante acumulación, promedio o mediana. Por otro lado, monthly_clim calcula la climatología mensual de las variables indicadas utilizando la media o la mediana.
- 5. Visualización:** La función map_pp_uv10_sst genera un gráfico 2D (Figura 2a) que representa las variables de precipitación, viento zonal y meridional a 10 m, así como la temperatura superficial del mar. Además, cross_section_yz produce un corte vertical que muestra la distribución de una variable con respecto a distintos niveles de presión (Figura 2b).

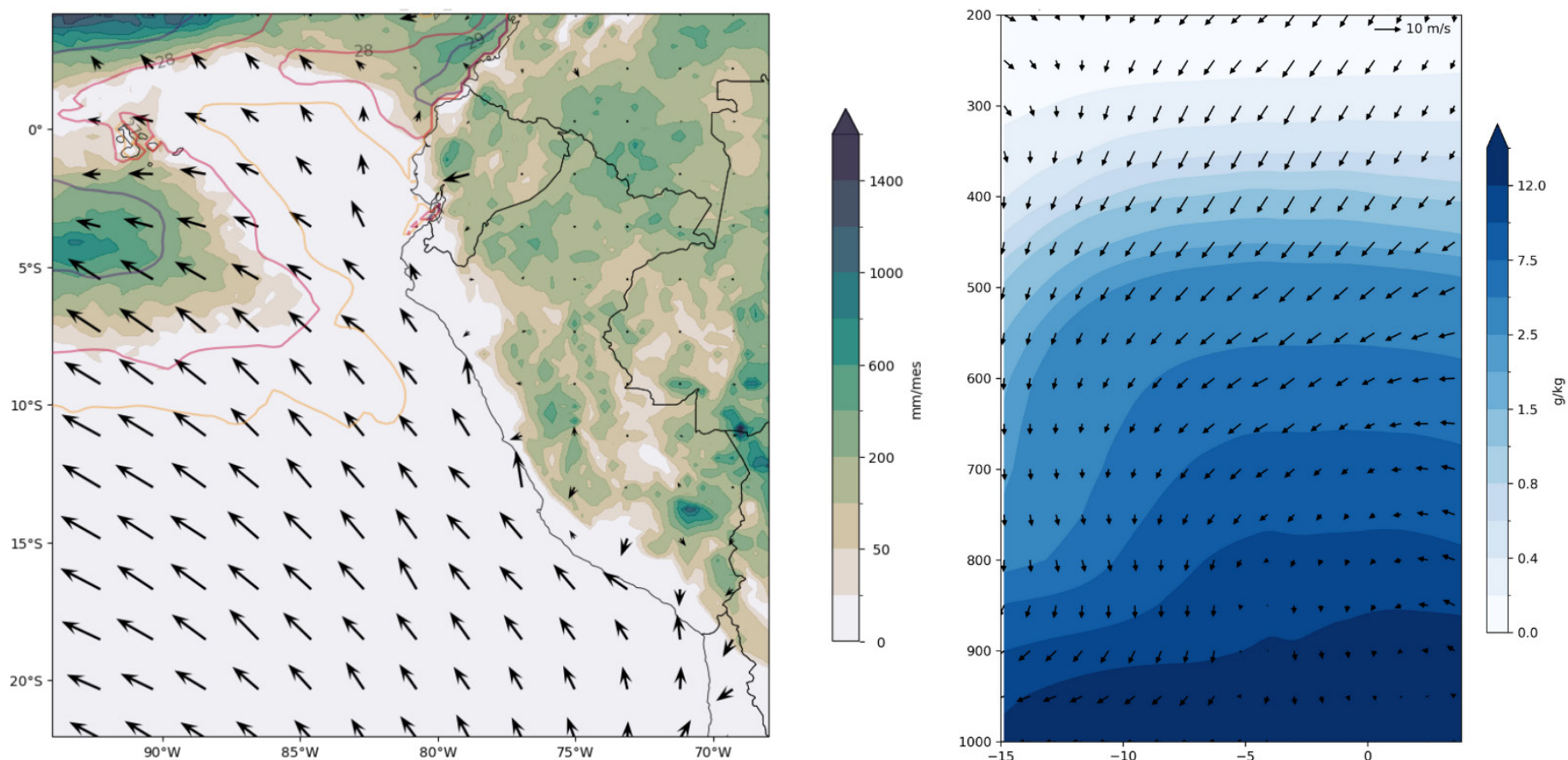


Figura 2. (Panel izquierdo) Mapa en superficie que muestra la precipitación acumulada mensual (izquierda), vientos (flechas), contornos de temperatura superficial del mar (línea amarilla, roja y morada corresponden a las isotermas de 26 °C, 27 °C y 28 °C, respectivamente) y (panel derecho) sección meridional de la atmósfera que muestra la distribución vertical de humedad específica y vientos de la climatología promedio de febrero-marzo-abril .

En cuanto a las visualizaciones, el paquete ofrece la capacidad de generar mapas con hasta tres variables en un mismo nivel, como es el caso de la precipitación, los vientos y los contornos de la temperatura superficial del mar (Figura 2a). Además, para variables distribuidas en distintos niveles verticales, SCAHpy posibilita la creación de gráficas tipo Hovmoller que ilustran el transporte vertical de la humedad específica, tal como se muestra en la Figura 2b.

3. Conclusiones preliminares

El paquete SCAHpy ofrece una solución integral para el procesamiento de archivos de salida del modelo WRF que permite proporcionar archivos netCDF con coordenadas limpias y formato de tiempo adecuado para una fácil lectura con programas como CDO. Además, facilita la interpolación vertical a los niveles especificados y genera gráficos de diagnósticos, incluyendo mapas y secciones verticales.

Para futuras versiones, se planifica la implementación de diagnósticos adicionales para la componente oceánica, así como la inclusión de funciones para la obtención de otros diagnósticos relevantes en

la componente atmosférica, como el transporte de humedad y el cálculo de la humedad relativa. También se espera que el paquete esté disponible en Conda así como en PyPI, lo que ampliará su accesibilidad y la facilidad de instalación para los usuarios.

Referencias

- Almansi, M., Gelderloos, R., Haine, T. W. N., Saberi, A., & Siddiqui, A. H. (2019). OceanSpy: A Python package to facilitate ocean model data analysis and visualization. *Journal Of Open Source Software*, 4(39), 1506. <https://doi.org/10.21105/joss.01506>
- Beuzen, T., & Timbers, T. (2022). *Python packages*. Chapman & Hall/CRC The Python Series.
- Castillón, F., Berlin, S., y Montes, I. (2023). Validación de la componente atmosférica del sistema acoplado regional océano-atmósfera del Pacífico sudeste. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 10 (1), 9-12.
- Geir Arne Hjelle, Real Python (2022, diciembre 1). *How to Publish an Open-Source Python Package to PyPI*. Recuperado el 05 Enero 2024 de <https://realpython.com/pypi-publish-python-package/> High-Performance computing market. (2023, marzo 30). Recuperado el 05 Enero 2024 de <https://www.futuremarketinsights.com/reports/high-performance-computing-market>

Khider, D., Emile-Geay, J., Zhu, F., James, A., Landers, J., Ratnakar, V., & Gil, Y. (2022). Pyleoclim: Paleoclimate Timeseries Analysis and Visualization With Python. *Paleoceanography And Paleoclimatology (Online)*, 37(10). <https://doi.org/10.1029/2022pa004509>

May, R. M., Goebbert, K. H., Thielen, J. E., Leeman, J. R., Camron, M. D., Bruick, Z. S., Bruning, E. C., Manser, R. P., Arms, S. C., & Marsh, P. T. (2022). MetPy: A Meteorological Python Library for Data Analysis and Visualization. *Bulletin Of The American Meteorological Society*, 103(10), E2273-E2284. <https://doi.org/10.1175/bams-d-21-0125.1>

Maze, G., & Balem, K. (2020). argopy: A Python library for Argo ocean data analysis. *Journal Of Open Source Software*, 5(53), 2425. <https://doi.org/10.21105/joss.02425>

Montes, I., Colas, F., Capet, X., & Schneider, W. (2010). On the pathways of the equatorial subsurface currents in the eastern equatorial Pacific and their contributions to the Peru-Chile Undercurrent. *Journal Of Geophysical Research*, 115(C9). <https://doi.org/10.1029/2009jc005710>

Montes, I., Mosquera, K., Luna, M., Gilt, H., Gazen, D., & Woodman, R. (2016). Sistema computacional de alto rendimiento para la simulación de fluidos geofísicos HPC-Linux-Clúster. *Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, 3(3). <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4663>

Moya-Álvarez, A. S., Martínez-Castro, D., Kumar, S., Rojas, J. L. F., Estevan, R., Saavedra, M., & Silva, Y. (2020). Statistical characterization of vertical meteorological profiles obtained with the WRF-ARW model on the central Andes of Peru and its relationship with the occurrence of precipitation on the region. *Atmospheric Research (Print)*, 239, 104915. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104915>

Segura, B. y Montes, I. (2021). Análisis de sensibilidad del sistema acoplado regional COW para el Pacífico sudeste. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, 8 (2), 12-17.

Segura, B., Montes, I., Castillón, F., Manay R. & Takahashi, K. (2023). Implementación del componente acoplado océano-atmósfera del Modelo Regional del Sistema Tierra (RESM, por sus siglas en inglés) para el territorio peruano y el océano Pacífico oriental: periodo enero-julio 2023. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, vol. 10 n.º 11, págs. 10-13.

Srinath, K.R. (2017) Python—The Fastest Growing Programming Language. *In-ternational Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4, 354-357.

Ticse, K. E. (2018). Caracterización de la dinámica oceánica de la costa peruana bajo diferentes escenarios de esfuerzo de vientos (Tesis para obtener el título profesional de Licenciado en Física). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Tucker, T., Giglio, D., Scanderbeg, M., & Shen, S. S. P. (2020). Argovis: A Web Application for Fast Delivery, Visualization, and Analysis of Argo Data. *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*, 37(3), 401-416. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-19-0041.1>

RESUMEN INFORME TÉCNICO

n.º PPR/EL NIÑO-IGP/2024-02

Publicado el 15 de marzo de 2024

En enero, según el valor del Índice Costero El Niño (ICEN), se presentó la condición climática cálida moderada (1.29 °C). Los valores del ICEN temporal (ICEN-tmp) de febrero (0.99 °C) y marzo (0.47 °C) corresponden a condiciones cálidas débiles. Por otro lado, en el Pacífico central, el valor del Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de enero (1.80 °C) indica la condición cálida fuerte. Los valores temporales (ONI-tmp) de febrero (1.50 °C) y marzo (1.08 °C) corresponden a condiciones cálida fuerte y cálida moderada, respectivamente.

Según la información observada a la fechas, así como los pronósticos de los modelos de ondas, se espera que las ondas de Kelvin frías continúen presentes en la costa americana, por lo pronto, hasta mayo. Según la información de altimetría satelital, se sigue observando la presencia de una onda de Kelvin cálida, que se habría formado por pulsos de viento del oeste que se desarrollaron entre fines de enero e inicios de febrero en la zona occidental y central, esta onda ha mostrado una disminución en su magnitud.

El promedio de las predicciones de los siete modelos climáticos de NMME —inicializados con la información de marzo de 2024— para el Pacífico oriental indican condiciones neutras entre los meses de abril y junio, en el periodo julio-setiembre las condiciones frías débiles, finalmente condiciones neutras entre octubre y enero 2025. Por otro lado, para el Pacífico central, se esperaría la condición cálidas débil para abril, en mayo la condición sería neutra y, finalmente, de junio

de 2024 a enero de 2025 las condiciones irían de frías débiles a frías fuertes.

El informe técnico completo se encuentra disponible en <https://bit.ly/InfTecnElNino2024-02IGP>



PERÚ
Ministerio
del Ambiente



Instituto
Geofísico del Perú



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

"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/2024-02

15/03/2024

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 enero, según el valor del Índice Costero El Niño (ICEN), se presentó la condición climática cálida moderada (1.29 °C). Los valores del ICEN temporal (ICEN-tmp) de febrero (0.99 °C) y marzo (0.47 °C) corresponden a condiciones cálidas débiles. Por otro lado, en el Pacífico central, el valor del Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de enero (1.80 °C) indica la condición cálida fuerte. Los valores temporales (ONI-tmp) de febrero (1.50 °C) y marzo (1.08 °C) corresponden a condiciones cálida fuerte y cálida moderada, respectivamente.

Según la información observada a la fechas, así como los pronósticos de los modelos de ondas, se espera que las ondas de Kelvin frías continúen presentes en la costa americana, por lo pronto, hasta mayo. Según la información de altimetría satelital, se sigue observando la presencia de una onda de Kelvin cálida, que se habría formado por pulsos de viento del oeste que se desarrollaron entre fines de enero e inicios de febrero en la zona occidental y central, esta onda ha mostrado una disminución en su magnitud.

El promedio de las predicciones de los siete modelos climáticos de NMME —inicializados con la información de marzo de 2024— para el Pacífico oriental indican condiciones neutras entre los meses de abril y junio, en el periodo julio-setiembre las condiciones frías débiles, finalmente condiciones neutras entre octubre y enero 2025. Por otro lado, para el Pacífico central, se esperaría la condición cálidas débil para abril, en mayo la condición sería neutra y, finalmente, de junio de 2024 a enero de 2025 las condiciones irían de frías débiles a frías fuertes.

www.igp.gob.pe

Calle Badoz N° 169
Urb. Mayrazgo IV Etapa
Ate, Lima 15012 - Perú.
(51) 13172300



Con
PUNTO
Perú



BICENTENARIO
PERÚ
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.

COMUNICADO OFICIAL

ENFEN n.º 04-2024



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: **Alerta de El Niño costero¹**

Publicado el 1 de marzo de 2024

La Comisión Multisectorial del ENFEN mantiene el estado de "Alerta de El Niño Costero", ya que es más probable que El Niño costero (región Niño 1+2, Figura 1) continúe hasta marzo, como consecuencia de la variabilidad de las condiciones climáticas regionales.

Conforme al juicio experto del ENFEN, basado en los datos observados, así como de los pronósticos de los modelos climáticos internacionales que se tienen hasta la fecha², en la región Niño 1+2 son más probables las condiciones cálidas débiles hasta marzo. En abril se espera una transición de condiciones cálidas débiles a neutras. A partir de mayo es más probable un escenario de condiciones neutras, por lo pronto, hasta agosto (Figura 2).

Por otro lado, en el Pacífico central (región Niño 3.4, Figura 1) es más probable que las condiciones cálidas se mantengan hasta abril, variando de moderadas a débiles. En mayo y junio son más probables las condiciones neutras, mientras que, en julio y agosto,

las condiciones frías seguidas de las condiciones neutras (Figura 2).

El pronóstico estacional para marzo-mayo de 2024³ indica valores de temperaturas del aire de normal a sobre lo normal en la costa norte y centro. Por otro lado, es más probable que las lluvias en la costa y sierra norte registren valores dentro lo normal a sobre lo normal, respectivamente con eventos puntuales de lluvia de moderada intensidad en marzo³ en dichas regiones.

Entre marzo y abril, se prevén caudales normales en los ríos de la zona nor-occidental y centro-occidental, con posibilidad de eventos de crecidas repentinas y activación de quebradas, afectando principalmente en las actividades acuáticas en los ríos y zonas aledañas, en marzo. Además, se prevén caudales en el rango normal a debajo de lo normal en ríos de la región hidrográfica del Pacífico Sur y Titicaca, respectivamente. Asimismo, es probable que predominen caudales normales en los ríos de la región hidrográfica del Amazonas⁴.

¹ Alerta de El Niño costero: Según las condiciones recientes, usando criterio experto en forma colegiada, el Comité ENFEN considera que el evento El Niño costero ha iniciado y/o el valor del ICENtmp indica condiciones cálidas, y se espera que se consolide El Niño costero. Al inicio del texto del CO se indicará un rango de magnitudes tentativas y su posible duración, así como una indicación sobre los posibles impactos en la lluvia y temperaturas.

² Hay que tomar en cuenta que los pronósticos de los modelos climáticos son menos confiables desde abril para adelante, esto como consecuencia de la barrera de predictibilidad (<https://doi.org/10.1002/joc.3513>). Esta situación mejorará cuando los pronósticos se realicen a partir de mayo o junio.

³ Perspectivas climáticas marzo-mayo 2024: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-44.pdf>

⁴ Pronóstico hidrológico estacional a nivel nacional, febrero-junio 2024: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02694SENA-42.pdf>

En cuanto a los recursos pesqueros, hasta marzo, se espera que la anchoveta del stock norte-centro continúe con la disminución progresiva de sus procesos de maduración gonadal y desove, asociados a su período secundario de desove. Por otro lado, se mantendría la disponibilidad de especies como bonito, perico y sierra. Asimismo, se espera que el calamar gigante o pota mantenga su disponibilidad a la pesquería, especialmente frente a la costa norte y centro.

Se recomienda a los tomadores de decisiones tener en cuenta los posibles escenarios de riesgo, de acuerdo con los pronósticos meteorológicos⁵ e hidrológicos⁶ a corto plazo y estacional, así como las proyecciones climáticas hasta agosto, con la finalidad de que se adopten las acciones que correspondan para la reducción del riesgo y la preparación para la respuesta.

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 15 de marzo de 2024.

- Para mayor información, consultar el Informe Técnico Mensual en el siguiente enlace: <https://bit.ly/InfTecENFEN04-2024>
- Puede acceder a leer en comunicado en su totalidad a través del siguiente enlace: <https://bit.ly/comunicadoENFEN04-2024>

INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN



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

⁶ Avisos hidrológicos: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=avisos-hidrologicos>

COMUNICADO OFICIAL

ENFEN n.º 05-2024



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: Alerta de El Niño costero¹

Publicado el 15 de marzo de 2024

La Comisión Multisectorial del ENFEN mantiene el estado de "Alerta de El Niño Costero", ya que es más probable que El Niño costero (región Niño 1+2, Figura 1) continúe hasta finales de marzo, como consecuencia de la variabilidad de las condiciones climáticas regionales.

Conforme al juicio experto del ENFEN, basado en los datos observados, así como de los pronósticos de los modelos climáticos internacionales que se tienen hasta la fecha², en la región Niño 1+2 se espera una transición de condiciones cálidas débiles a condición neutra en abril, la que se mantendría hasta mayo (Figura 2). En junio es más probable un escenario de transición de condición neutra a condiciones frías. De julio a setiembre son más probables las condiciones frías (Figura 2).

Por otro lado, en el Pacífico central (región Niño 3.4, Figura 1) es más probable que las condiciones cálidas varíen de moderadas en marzo a débiles en abril. De

mayo a junio es más probable la condición neutra, mientras que de julio a setiembre son más probables las condiciones frías (Figura 2).

El pronóstico estacional para abril-junio de 2024³ indica valores de temperaturas del aire, en promedio, dentro de lo normal en la costa peruana. Por otro lado, es más probable que las lluvias en la costa y sierra norte registren valores entre normales e inferiores a lo normal. En lo que resta de marzo, se esperarían episodios de lluvias de ligera a moderada intensidad en zonas focalizadas de la cuenca media y alta de Tumbes y Piura⁴.

De acuerdo con el pronóstico hidrológico, entre marzo y junio, en la región hidrográfica del Pacífico Norte, predominarían caudales en el rango normal a debajo de lo normal en los ríos de Tumbes y Piura; mientras que, en la zona centro y sur del Pacífico se esperarían caudales normales, sin descartar eventos de crecidas repentinas que puedan superar

¹ Alerta de El Niño costero: Según las condiciones recientes, usando criterio experto en forma colegiada, el Comité ENFEN considera que el evento El Niño costero ha iniciado y/o el valor del ICENtmp indica condiciones cálidas, y se espera que se consolide El Niño costero. Al inicio del texto del CO se indicará un rango de magnitudes tentativas y su posible duración, así como una indicación sobre los posibles impactos en la lluvia y temperaturas.

² Hay que tomar en cuenta que los pronósticos de los modelos climáticos son menos confiables desde abril para adelante, esto como consecuencia de la barrera de predictibilidad (<https://doi.org/10.1002/joc.3513>). Esta situación mejorará cuando los pronósticos se realicen a partir de mayo o junio.

³ Perspectivas climáticas marzo-mayo 2024: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-44.pdf>

⁴ Avisos meteorológicos a nivel nacional: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=aviso-meteorologico>

sus umbrales hidrológicos y afectar las actividades acuáticas en ríos y zonas aledañas, además de posible activación de quebradas. En la región hidrográfica del Amazonas predominarían caudales normales. Finalmente, en la región hidrográfica del Titicaca, se prevén, en promedio, ríos con caudales en el rango sobre lo normal a normal⁵, principalmente, en marzo. En cuanto a los recursos pesqueros, para las siguientes semanas, se espera que continúe la disminución gradual de los procesos de maduración gonadal y desove de la anchoveta del *stock* norte centro. El bonito mantendrá su disponibilidad a la flota pesquera artesanal. Asimismo, se espera que el calamar gigante o pota mantenga su disponibilidad a la pesquería, especialmente frente a la costa norte y centro.

Se recomienda a los tomadores de decisiones tener en cuenta los posibles escenarios de riesgo, de acuerdo con los pronósticos meteorológicos⁶ e hidrológicos⁷ a corto plazo y estacional, así como las proyecciones climáticas, con la finalidad de que se adopten las acciones que correspondan para la reducción del riesgo y la preparación para la respuesta.

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 05 de abril de 2024.

- Para mayor información, consultar el Informe Técnico Mensual en el siguiente enlace: <https://bit.ly/InfTecENFEN05-2024>
- Puede acceder a leer en comunicado en su totalidad a través del siguiente enlace: <https://bit.ly/comunicadoENFEN05-2024>

⁵ Pronóstico hidrológico estacional a nivel nacional, marzo-julio 2024: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02694SENA-43.pdf>

⁶ Avisos meteorológicos a nivel nacional: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=aviso-meteorologico>

⁷ Avisos hidrológicos: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=avisos-hidrologicos>

INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN





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