



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



IGP

Instituto  
Geofísico  
del Perú



BOLETÍN CIENTÍFICO

# EL NIÑO

Vol. 10 n.º 01 enero 2023

**PROGRAMA PRESUPUESTAL n.º 068**

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

## En este boletín ◆◆◆

**4**

pág.

El afloramiento costero  
frente a la costa peruana

**9**

pág.

Validación de la componente atmosférica del  
sistema acoplado regional océano-atmósfera  
del Pacífico sudeste

**13**

pág.

Resumen del informe técnico de El Niño

**14**

pág.

Resumen del comunicado ENFEN



BICENTENARIO  
DEL PERÚ  
2021 - 2024

# CRÉDITOS

---

Albina Ruiz Ríos  
**Ministra del Ambiente**

**Instituto Geofísico del Perú:**

Hernando Tavera Huarache  
**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**

Jeamie Soraya Maihuasca Fernandez  
Jorge Andrés Concha Calle  
**Diseño y diagramación**

Carátula: Aguas oceánicas  
Foto: Pexels.com

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, febrero de 2023

---

Puedes acceder a la colección completa  
de los boletines científicos El Niño  
escaneando el siguiente código QR.

---



# INTRODUCCIÓN

---

El Programa Presupuestal por Resultados (PPR) es una estrategia de gestión pública que vincula la asignación de recursos a productos y resultados medibles a favor de la población. Dichos resultados se vienen implementando progresivamente a través de los programas presupuestales, las acciones de seguimiento del desempeño sobre la base de indicadores, las evaluaciones y los incentivos a la gestión, entre otros instrumentos que determina el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF), a través de la Dirección General de Presupuesto Público, en colaboración con las demás entidades del Estado.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) viene participando en el Programa Presupuestal por Resultados 068: "Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres". A partir del año 2014, algunas de las instituciones integrantes de la Comisión Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) participan en este PPR con el producto denominado "Estudios para la estimación del riesgo de desastres", el cual consiste en la entrega en forma oportuna de información científica sobre el monitoreo y pronóstico de este evento natural océano-atmosférico, mediante informes técnicos mensuales, que permita la toma de decisiones a 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 pronósticos de modelos climáticos internacionales, el desarrollo y validación de nuevos modelos de pronóstico, así como el desarrollo de estudios científicos que fortalecerán en forma continua la capacidad para este fin.

El presente boletín tiene como objetivo difundir conocimientos y avances científicos, además de noticias relacionadas, con la finalidad de mantener informados a los usuarios y proporcionarles las herramientas para un uso óptimo de la información presentada. Asimismo, comparte una versión resumida del Informe Técnico que el IGP elabora mensualmente para cumplir con los compromisos asumidos en el marco del PPR 068. Dicho Informe contiene información actualizada operativamente y proporcionada por el IGP como insumo para que el ENFEN genere en forma colegiada la evaluación final que será entregada a los usuarios. Se advierte que, en caso de discrepancias, el Informe Técnico del ENFEN prevalecerá.

Los resultados de esta actividad están disponibles en [https://bit.ly/IGP-SCAH-informes\\_tecnicos](https://bit.ly/IGP-SCAH-informes_tecnicos)



# EL AFLORAMIENTO COSTERO FRENTE A LA COSTA PERUANA

Ivonne Montes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú,  
Lima, Perú



Ivonne Montes es doctora en Oceanografía de la Universidad de Concepción (Chile) y licenciada en Física de la Universidad Nacional del Callao (Perú). Desde el 2014 es investigadora científica del IGP. Es autora de varios artículos científicos y sus estudios están enfocados en entender el rol del océano sobre el clima y los procesos asociados al cambio climático (tal como la desoxigenación).

**Palabras clave:** afloramiento costero, vientos, dinámica de Ekman

Citar como Montes, I. (2023), El afloramiento costero frente a la costa peruana. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 10 n.º 01, págs. 4-7.

## Resumen

El afloramiento costero es el mecanismo físico manejado por el viento con el que afloran aguas oceánicas frías, ricas en nutrientes y con bajo contenido de oxígeno, aspecto que sustenta la gran abundancia de plantas microscópicas oceánicas (productividad primaria) que, a nivel global, producen casi la mitad del oxígeno atmosférico que respiramos, absorben una gran cantidad de dióxido de carbono y suministran alimento a los peces. La presente revisión trata de ilustrar el conocimiento relacionado a la variabilidad y el cambio climático del afloramiento costero en el mar peruano, además de hacer un especial énfasis en la variabilidad observada durante los eventos El Niño.

## 1. Un poco de historia

El primero en medir la temperatura de la corriente localizada frente a la costa de nuestro país fue Alexander von Humboldt durante su visita al Perú en 1802. Esta corriente fría, que fluye a lo largo de la costa sudamericana hacia el ecuador, se conoce hoy como la corriente de Humboldt. Lejos de atribuirse su descubrimiento, se recoge en la biografía de von Humboldt una cita en la que él expresa su descontento por el mérito atribuido: “La existencia de esta corriente

ha sido conocida desde el siglo XVI por cada marinero joven acostumbrado a navegar desde Chile a Paita”. No obstante, la realidad es que Alexander fue el primero en aplicar el método científico para caracterizar la corriente.

Alexander von Humboldt, al igual que otros investigadores de la época, creía que el agua localizada frente a la costa peruana, y que fluye con la corriente de Humboldt, provenía, por transporte horizontal, principalmente del océano Austral, es decir, de la región Antártica, y era responsable de darle las características frías de la región. Sin embargo, en 1931, durante el crucero de investigación realizado a lo largo de la costa oeste de Sudamérica a bordo del barco de investigación británico William Scoresby, Eustache Rolfe Gunther logró dar a conocer que las características frías de la franja costera eran resultado del proceso de afloramiento, evidenciado, principalmente, a través de la estructura vertical de la temperatura del mar (Gunther, 1936). Durante el crucero se hicieron mediciones en secciones verticales que cubrían las primeras 100 o 200 millas de la costa, iniciando frente a Chile y terminando frente al Perú. Su hallazgo reveló, además, la importancia del factor meteorológico relacionado a la intensidad de viento (Cox et al., 1936). Cabe señalar que el hallazgo de Gunther fue catalogado como un subproducto de

las investigaciones del Comité de Descubrimiento, cuya mayoría de sus operaciones se centraron en la Antártida. En palabras del director de investigación del Comité de Descubrimiento, el Dr. Stanley Kemp, “el crucero se hizo durante el invierno antártico, cuando nuestro trabajo en el sur es mínimo”.

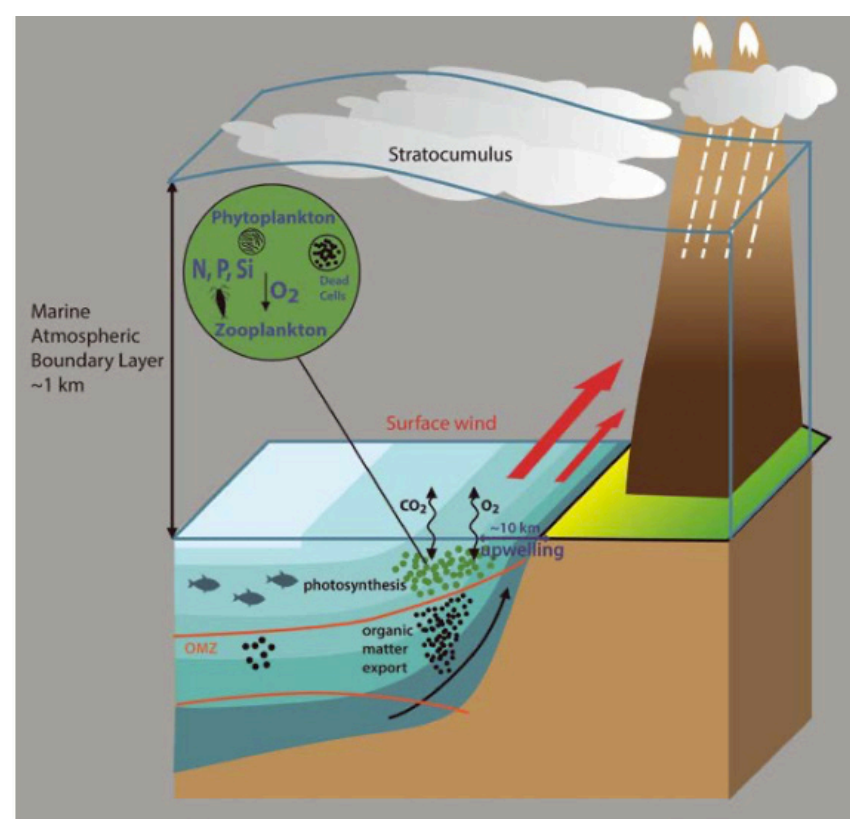
Los avances científicos han permitido conocer que esta corriente es parte de un sistema más complejo que, localmente, se mantiene por la acción del viento. En esta región, los vientos alisios del sudeste soplan constantemente hacia el ecuador a lo largo de la costa provocando un desplazamiento de las aguas costeras hacia el mar abierto. Esto dejaría un vacío en la costa que sería compensado por el ascenso de aguas más profundas que son frías y ricas en nutrientes. Este proceso, conocido como afloramiento costero, es responsable de mantener la riqueza y productividad pesquera en nuestro país, ya que, junto con las condiciones favorables de luz, sostiene el crecimiento del fitoplancton (plantas microscópicas) y determina el clima de la región.

Este mismo proceso también está activo en otras regiones del mundo, las cuales se conocen como Sistemas de Afloramiento de Borde Oriental (EBUS, por sus siglas en inglés). Geográficamente, estos abarcan los Sistemas de Corrientes de Canarias y Benguela en el océano Atlántico y los Sistemas de Corrientes de California y Humboldt en el océano Pacífico. Los EBUS brindan valiosos servicios ecosistémicos para la biosfera y la humanidad, siendo ampliamente conocidos por tener más peces por unidad de área que cualquier otra parte del océano global, lo que contribuye a las estrategias de seguridad de subsistencia y alimentación en muchos países.

## 2. Dinámica del afloramiento costero y procesos asociados

El afloramiento costero es generado por el esfuerzo del viento ( $\tau$ ) sobre la superficie del mar y el efecto de la rotación de la Tierra (Figura 1). La acción del viento se ejerce a través del (a) esfuerzo del viento a lo largo de la costa, en dirección hacia el ecuador ( $\tau_y$ ) y (b) el grado de giro del esfuerzo del viento (siendo el rotor del vector  $= \partial\tau_y / \partial x - \partial\tau_x / \partial y$ , expresado matemáticamente), los cuales generan dos procesos

físicos para explicar la dinámica del afloramiento costero. En las zonas costeras, el movimiento ascendente de agua más profunda (denominado afloramiento o surgencia) es generado para compensar el desplazamiento de las capas superficiales del mar hacia fuera de la costa que se produce por la acción del viento y la rotación de la Tierra (proceso denominado como transporte de Ekman). La rotación de la Tierra genera una fuerza aparente (fuerza de Coriolis) que produce que los cuerpos en movimiento se desvíen hacia la izquierda (derecha) en el hemisferio sur (hemisferio norte). Así, cuando el viento sopla de sur a norte a lo largo de la costa peruana, este se balancea con la fuerza de Coriolis generando que el agua en superficie se desplace hacia fuera de la costa. Esto provoca un vacío en la costa que es compensado con agua que aflora del fondo (entre los 50 y 150 m de profundidad). Con el rotor del esfuerzo del viento y la rotación de la Tierra se genera el ascenso (divergencia o afloramiento) o descenso (convergencia o hundimiento) del agua en la capa superficial, proceso conocido como el bombeo de Ekman. Estos dos procesos forman parte de la teoría propuesta por Van Walfrid Ekman en 1905, la cual es fundamental para estimar la medida o intensidad del afloramiento a través de los denominados índices (Bakun, 1973; 1975; Halpern, 2002; Jacox et al., 2018).



**Figura 1.** Esquema del sistema acoplado aire-mar-tierra en regiones de afloramiento costero extraído de Garçon et al. (2019). Se muestran los procesos químicos y biológicos que se desarrollan durante el proceso de afloramiento costero.

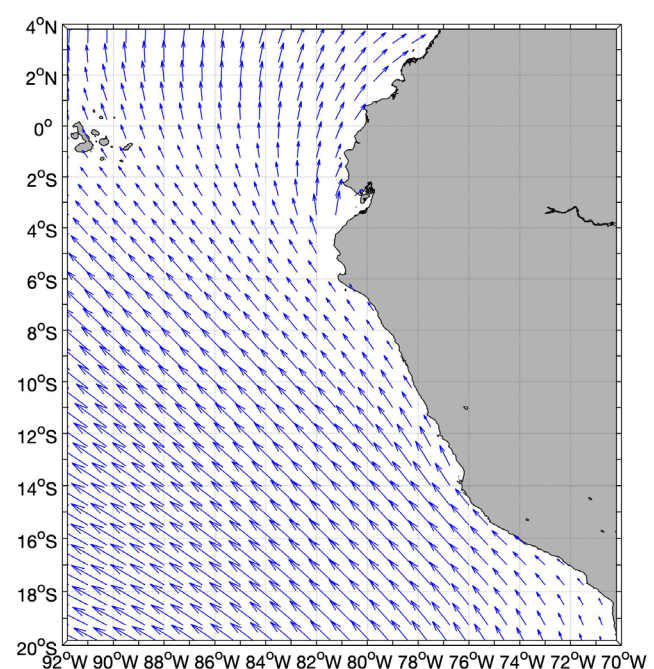
El proceso de afloramiento costero es muy importante para el clima y el ecosistema debido a que refleja la fuerte interacción (es decir, comunicación) entre el océano y la atmósfera, y conecta regiones profundas (por sobre los 200 metros de profundidad) del océano abierto con zonas costeras (Figura 1). Al ascender agua de zonas profundas, afloran aguas frías y ricas en nutrientes que constituyen las condiciones necesarias para sustentar la gran abundancia de fitoplancton. Básicamente, durante el proceso de afloramiento, el fitoplancton localizado en las capas superficiales del océano, donde hay suficiente disponibilidad de luz, obtiene los nutrientes necesarios para que se desarrolle la fotosíntesis. Durante el proceso de fotosíntesis, el fitoplancton remueve el carbono inorgánico disuelto ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera, generando materia orgánica rica en carbono —que constituye la base de la cadena trófica (es decir, la fuente de alimentación para organismos no-fotosintéticos)— y oxígeno.

Se estima que durante la fotosíntesis se produce casi la mitad del oxígeno que respiramos y se absorbe una gran cantidad de  $\text{CO}_2$ , además de que se suministra alimento a los peces. Este proceso ocurre en un escala temporal que va de pocos días a varias semanas en la zona eufótica (es decir, en las capas superficiales del océano que dispone de luz, nutrientes y se encuentra en constante comunicación con la atmósfera). Cabe señalar que se le denomina ecosistema de afloramiento a aquel que involucra al proceso físico gatillado por la acción del viento, así como a los procesos químicos y biológicos que capturan  $\text{CO}_2$  y generan materia orgánica para sostener la vida en el océano.

Los cambios a lo largo del tiempo de la intensidad del afloramiento costero son importantes en la fenología de los procesos fundamentales de los ecosistemas marinos, tales como el reclutamiento, la productividad y la estructura comunitaria (Wang et al., 2019). Por tanto, cualquier cambio en la intensidad y momento del afloramiento, así como en el flujo de nutrientes asociados, tienen impactos diferentes en el crecimiento del tamaño del fitoplancton (por ejemplo, Rykaczewski et al., 2008), lo cual determina la diversidad y población de los peces pelágicos comercialmente valiosos.

### 3. Variabilidad y cambio climático —

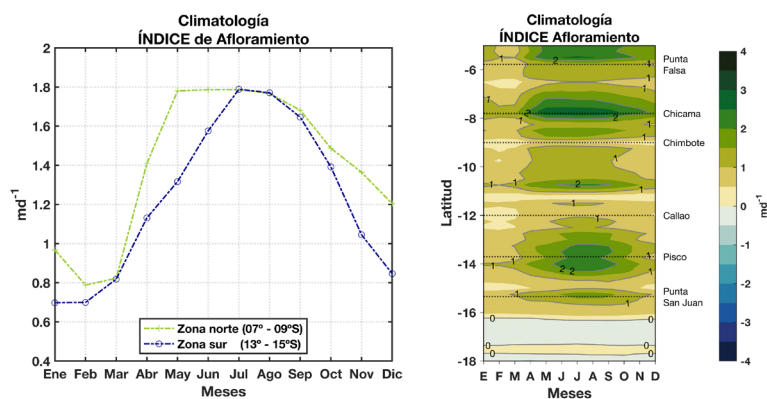
La información más utilizada para determinar la intensidad del afloramiento frente a la costa peruana son las mediciones satelitales del vector del esfuerzo del viento sobre el océano. Asimismo, para completar los vacíos en las observaciones se han usado las salidas numéricas de modelos regionales y globales (Echevin et al., 2018) y, para evaluar el comportamiento futuro, se han utilizado las proyecciones de viento extraídas de los modelos acoplados de circulación general océano-atmósfera (Rykaczewski et al., 2015) que forman parte de los modelos climáticos del proyecto CMIP (Coupled Intercomparison Project) fase 5 y 6 (Bograd et al., 2023). Cabe señalar que el tamaño del grano eólico encontrado en testigos de sedimentos laminados ha sido usado como proxy para reconstruir la fuerza relativa del viento en áreas con alta erosión eólica (Briceño-Zuluaga et al., 2023).



**Figura 2.** Distribución horizontal promedio del esfuerzo del viento durante el periodo 2000-2017 calculado con los datos del producto GEKCO (Geostrophic and Ekman Current Observatory, Sudre et al. [2013]).

En promedio, los vientos fluyen hacia el ecuador, es decir, de sur a norte (Figura 2), dando una situación favorable para que se desarrolle un afloramiento costero permanente (Gunther, 1936; Zuta y Guillén, 1970; Strub et al., 1998; Gutierrez et al., 2011). Un análisis climatológico del índice de afloramiento, calculado a partir de 26 años de datos de viento de





**Figura 3.** Promedio mensual del índice de afloramiento calculado en dos regiones representativas frente la costa peruana (norte y sur, panel izquierdo) y a lo largo de la costa (panel derecho) para el periodo 1992-2018. Se usaron los datos de viento superficial del producto blended generados a partir de ASCAT, QuikSCAT y WindSAT (Bentamy et al., 2017). Extraído de Manay et al. (2021).

un producto satelital en dos regiones diferentes frente al Perú y para toda la costa peruana, ha mostrado que, si bien es permanente e intenso, el afloramiento alcanza un máximo durante los meses de invierno y un mínimo en verano (Figura 3, Manay et al., 2021), denotando un marcado ciclo estacional.

A escala interanual, se ha observado que la variabilidad del afloramiento costero tiene un comportamiento diferenciado durante la fase cálida de El Niño-Oscilación Sur (ENSO), es decir, durante eventos tipo El Niño. Por ejemplo, durante el evento El Niño 97/98 se observó una intensificación significativa del viento superficial que estuvo acompañada de un incremento del afloramiento (Halpern et al., 2002; Carr et al., 2002; Croquette et al., 2004). En tanto, durante el Niño costero 2017, los vientos inicialmente se encontraban debilitados en la zona norte y luego se fueron incrementando a lo largo de costa y en la zona sur, lo cual estuvo acompañado de anomalías negativas en el bombeo de Ekman (Echevin et al., 2017).

Respecto a los cambios observados en décadas, el estudio realizado por Pardo et al. (2011) para el periodo 1948-2009 muestra un debilitamiento en la intensidad del afloramiento acompañado de una ligera tendencia al enfriamiento. Un estudio más reciente, donde se evalúa la frecuencia, intensidad y duración del afloramiento durante el periodo 1982-2019, muestra, por el contrario, una tendencia positiva,

es decir, una intensificación en el afloramiento sin mostrar cambios significativos en los vientos favorables al afloramiento. Por su parte, Briceño-Zuluaga et al. (2023), basados en la reconstrucción de la intensidad relativa del viento a partir de la variabilidad del diámetro medio geométrico de las partículas erosionadas por el viento encontradas en un testigo de sedimentos laminados extraído frente a Pisco, muestra un intensificación progresiva de los vientos favorables al afloramiento durante los últimos 150 años.

Bajo escenarios futuros, las proyecciones señalan un debilitamiento ligero de los vientos favorables para el afloramiento (Goubanova et al., 2010; Belmadani et al., 2013; Chamorro et al., 2021) acompañado de un decrecimiento en el transporte y bombeo de Ekman (Oerder et al., 2015). Asimismo, un ciclo estacional del viento ligeramente más marcado con aumento ligero de vientos en invierno y debilitamiento en verano.

Si bien las investigaciones previas han permitido caracterizar y entender la dinámica del afloramiento costero frente a la costa peruana, la complejidad del sistema requiere que se establezcan mediciones continuas de vientos y una metodología (por ej., establecer un índice estándar) que mida la intensidad del afloramiento de manera más integral (es decir, incluyendo las variaciones de la temperatura, los nutrientes, entre otros) a fin de caracterizar mejor la salud del sistema de corrientes de Humboldt.

## Referencias

- Abrahams, A., Schlegel, R.W., & Smit, A.J. (2021). Variation and Change of Upwelling Dynamics Detected in the World's Eastern Boundary Upwelling Systems. *Front. Mar. Sci.*, 8:626411. doi: 10.3389/fmars.2021.626411
- Bakun, A. (1973). Coastal upwelling indices, West Coast of North America, 1946–71. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service.
- Bakun, A. (1975). Daily and weekly upwelling indices, West Coast of North America. *NOAA Tech. Rpt.*, 16.
- Belmadani, A., Echevin, V., Codron, F., Takahashi, K., & Junquas, C. (2014). What dynamics drive future wind scenarios for coastal upwelling off Peru and Chile?. *Clim. Dyn.*, 43, 1893–1914. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2015-2>

Bentamy, A., Grodsky, S.A., Elyouncha, A., Chapron, B., & Desbiolles, F. (2017). Homogenization of scatterometer wind retrievals. *International Journal of Climatology*, 37(2), 870–889. <https://doi.org/10.1002/joc.4746>

Bograd, S.J., Jacox, M.G., Hazen, E.L., Lovecchio, E., Montes, I., Pozo Buil, M., ... Rykaczewski, R. (2023). Climate change impacts on eastern boundary upwelling systems. *Annual Review of Marine Science*, 15(1). (PMID: 35850490). <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032122-021945>

Briceño-Zuluaga, F., Flores-Aqueveque, V., Nogueira, J., Castillo, A., Cardich, J., Rutllant, J., ... Gutierrez, D. (2023). Surface wind strength and sea surface temperature connections along the south peruvian coast during the last 150 years. *Aeolian Research*, 61, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2023.100855>

Carr, M.E., Strub, P.T., Thomas, C.T., & Blanco, J.L. (2002). Evolution of 1996-1999 La Niña and El Niño conditions off the western coast South America: A remote sensing perspective. *J. Geophys. Res.*, 107(C12), 3236. doi:10.1029/2001JC001183

Chamorro, A., Echevin, V., Dutheil, C., Tam, J., Gutierrez, D., & Colas, F. (2021). Projection of upwelling-favorable winds in the Peruvian upwelling system under the RCP8.5 scenario using a high-resolution regional model. *Clim. Dyn.*, 57, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05689-w>

Cox, P., Kemp, S., Mill, H.R., Matthews, H.A., Gunther, E.R., & Matthews, Dr. (1936). Variations in Behaviour of the Peru Coastal Current: With an Historical Introduction: Discussion. *The Geographical Journal*, 88(1), 61–65. <https://doi.org/10.2307/1786861>

Croquette, M., Gérard, E., & Vincent, E. (2004). On the contributions of Ekman transport and pumping to the dynamics of coastal upwelling in the South-East Pacific. *Gayana (Concepción)*, 68(2, Supl. TlProc), 136–141. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382004000200025>

Echevin, V., Colas, F., Espinoza-Morriberon, D., Vasquez, L., Anculle, T., & Gutierrez, D. (2018). Forcings and Evolution of the 2017 Coastal El Niño Off Northern Peru and Ecuador. *Front. Mar. Sci.*, 5:367. doi: 10.3389/fmars.2018.00367

García-Reyes, M., Sydeman, W.J., Schoeman, D.S., Rykaczewski, RR, Black, B.A., Smit, A.J. & Bograd, S.J. (2015). Under Pressure: Climate Change, Upwelling, and Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Front. Mar. Sci.*, 2:109. doi: 10.3389/fmars.2015.00109

Garcon, V., Dewitte, B., Montes, I., & Goubanova, K. (2019). Section 3.4 Land-sea-atmosphere interactions exacerbating ocean deoxygenation in Eastern Boundary Upwelling Systems (EBUS). In 'Laffoley, D. & Baxter, J.M. (eds.). Ocean deoxygenation: Everyone's problem - Causes, impacts, consequences and solutions. Gland, Switzerland: IUCN. xxii+562pp.

Goubanova, K., Echevin, V., Dewitte, B., Codron, F., Takahashi, K., Terray, P., & Vrac, M. (2011) Statistical downscaling of sea surface wind over the Peru-Chile upwelling region: diagnosing the impact of climate change from the ipsl-cm4 model. *Clim Dyn* 36,

1365–1378. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0824-0>

Gunther, E.R. (1936) A report on oceanographic investigations in the Peru Coastal Current. *Discovery Rep.*, 13, 107-276.

Gutiérrez, D., Bouloubassi, I., Sifeddine, A., Purca, S., Goubanova, K., Graco, M., ... Ortlieb, L. (2011). Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid- twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, 38(7).

Halpern, D. (2002). Offshore Ekman transport and Ekman pumping off Peru during the 1997–1998 El Nino. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 19.1–19.4.

Jacox, M. G., Edwards, C. A., Hazen, E. L., & Bograd, S. J. (2018). Coastal upwelling revisited: Ekman, Bakun, and improved upwelling indices for the U.S. West Coast. *J. Geophys. Res. Oceans*, 123. <https://doi.org/10.1029/2018JC014187>

Manay, R., Montes, I., Campos, F., & Segura, B. (2021). El afloramiento costero en el sistema de corrientes de Humboldt frente a Perú. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, Vol. 8 N.º 04 , págs. 16-21.

Oerder, V., Colas, F., Echevin, V., Codron, F., Tam, J., & Belmadani, A. (2015). Peru-Chile upwelling dynamics under climate change. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 1152–1172, doi:10.1002/2014JC010299

Pardo, P.C., Padín, X. A., Gilcoto, M., Farina-Busto, L., & Pérez, F.F. (2011). Evolution of upwelling systems coupled to the long-term variability in sea surface temperature and Ekman transport. *Clim. Res.*, 48, 231–246. <https://doi.org/10.3354/cr00989>

Rykaczewski, R.R., David, M., & Checkley, J. (2008). Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(6), 1965–1970. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711777105>

Silva, N., Rojas, N., & Fedele, A. (2009). Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16), 1004–1020. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.013>

Strub, P.T., Mesias, J.M., Montecino, V., Rutllant, J., & Salinas, S. (1998). Coastal ocean circulation off western South America, in *The Sea, The Global Coastal Ocean*, vol. 11, edited by A. R. Robinson and K. H. Brink, pp. 273-314, John Wiley, Hoboken, N. J.

Sudre, J., Maes, C., & Garcon, V. (2013). On the global estimates of geostrophic and Ekman surface currents. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 3, <https://doi.org/10.1215/21573689-2071927>

Zuta, S. y Guillén, O.G. (1970). Oceanografía de las aguas costeras del Perú. *Bol. Inst. Mar Perú*, 2: 157-324.



# VALIDACIÓN DE LA COMPONENTE ATMOSFÉRICA DEL SISTEMA ACOPLADO REGIONAL OCÉANO-ATMÓSFERA DEL PACÍFICO SUDESTE

**Fiorela Castellón<sup>1</sup>, Berlin Segura<sup>1</sup>, Ivonne Montes<sup>1</sup>**

**Palabras clave:** validación, modelo acoplado regional, Pacífico sudeste

**Afiliación:**

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú (IGP)

Citar como Castellón, F., Segura, B. & 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, vol. 10 n.º 01, págs. 9-12.

## Resumen

En este estudio se muestran los resultados preliminares de la validación estacional e interanual de la componente atmosférica del modelo acoplado regional océano-atmósfera Croco-Oasis-WRF (COW), implementado para la región del Pacífico sudeste. Se comparan 20 años de datos simulados con productos observacionales de diferentes variables atmosféricas (por ejemplo, temperatura del aire a 2 m, precipitación, velocidad del viento a 10 m) a través del empleo de estadísticos de verificación como el error promedio y el coeficiente de correlación de Pearson a nivel de grilla. Asimismo, se compara la estacionalidad de la variable precipitación en cinco regiones. Los resultados preliminares muestran que el modelo acoplado regional representa adecuadamente la climatología estacional y la variabilidad espacial de la precipitación, la temperatura a 2 m y la velocidad del viento a 10 m, en particular para la región El Niño 1+2. De esta manera, se considera apto en el análisis de eventos pasados tanto a escala interanual como estacional.

## 1. Introducción

El Niño Oscilación del Sur (ENSO) es uno de los modos de variabilidad climática más importantes

en el océano Pacífico (Dewitte et al., 2014), el cual tiene una gran influencia sobre las precipitaciones a nivel global y regional. En el Perú, la fase cálida del ENSO, el Niño, es la que causa mayores impactos no solo al afectar las precipitaciones en la costa norte, sino también en los Andes y la Amazonía (Takahashi, 2022), lo que impacta enormemente el ámbito socioeconómico (Cai et al., 2020) al provocar daños a la infraestructura (Machuca et al., 2014), la agricultura (Heino et al., 2018) y pesca (Bertrand et al., 2020), por solo mencionar algunos aspectos.

Comprender la dinámica entre las componentes del sistema terrestre (es decir, la hidrósfera, atmósfera, litósfera, criósfera y biósfera) es fundamental para analizar los procesos físicos que tienen lugar antes, durante y después de un evento El Niño. Sin embargo, si nos referimos al océano y la atmósfera, aún se tiene poca información observacional en el Pacífico sudeste, sobre todo al oeste de los 95° W y debajo de la superficie oceánica (Cravatte et al., 2016; Kessler et al., 2019; Kessler et al., 2021). Por tanto, surge aquí la necesidad de emplear el modelamiento numérico como técnica para llenar el vacío de las observaciones y estudiar la dinámica del sistema terrestre en diferentes escalas espaciales y temporales (Hamilton & Ohfuchi, 2008), incluso como herramienta para el pronóstico del ENSO.

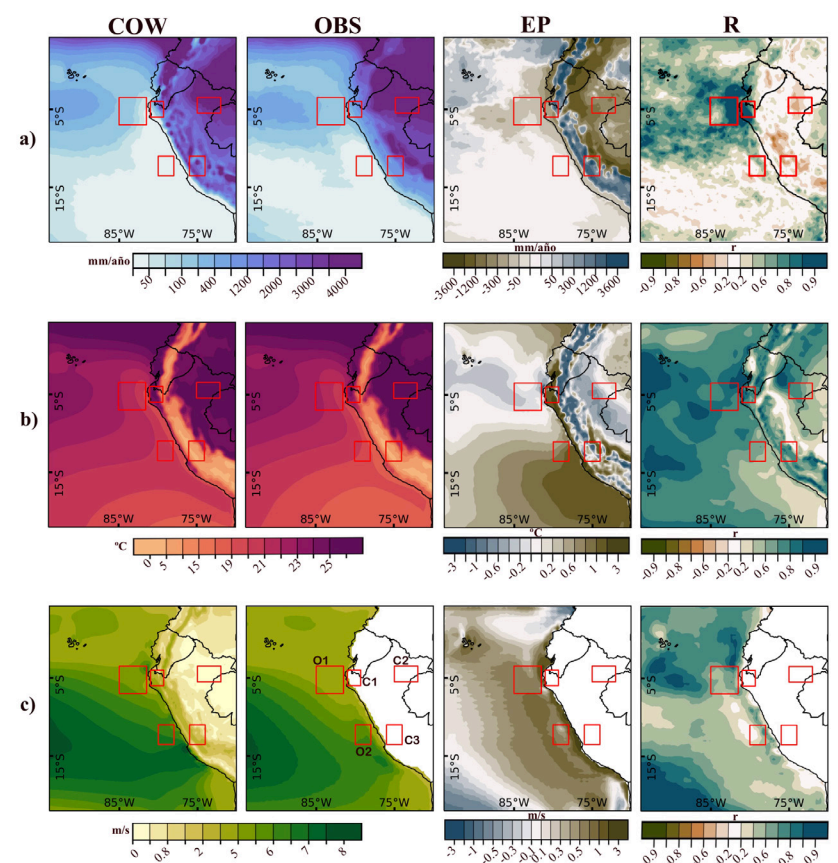
El Instituto Geofísico del Perú (IGP), pionero en el modelado numérico en el Perú, viene implementando actualmente un modelo acoplado océano-atmósfera de alta resolución (Segura & Montes, 2021) haciendo uso del sistema computacional de alto rendimiento HPC-Linux-Clúster (Montes et al., 2016). El modelo ha sido configurado para el Pacífico sudeste cubriendo el periodo 2000-2021. Con el fin de evaluar el realismo de la componente atmosférica y sus posibles sesgos, el presente avance de investigación muestra los resultados preliminares obtenidos con la validación estadística de variables como precipitación, temperatura y velocidad del viento.

## 2. Metodología

Para validar la componente atmosférica del modelo acoplado regional océano-atmósfera, COW, se han utilizado los datos de precipitación del GPM (Global Precipitation Mission) y PISCO (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations; Huerta et al., 2022), la temperatura del aire a 2 m del ERA5 (Fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis) y los vientos del ASCAT (Advanced Scatterometer) entre el período 2001-2020. Los productos utilizados han sido regrillados a la resolución espacial de la componente atmosférica del modelo acoplado (30 km) y, tanto el modelo como los datos de los diferentes productos, han sido trabajados a escala mensual.

Entre los diagnósticos realizados para la validación se tiene el cálculo de estadísticos (Wilks, 2019) como el error promedio (EP) y el coeficiente de correlación de Pearson (R), ambos a escala interanual utilizando los datos mensuales. Además, se ha calculado el ciclo anual de la precipitación en dos regiones oceánicas (**O1**:  $85^{\circ}$ - $81.5^{\circ}$  W/ $3.5^{\circ}$ - $7^{\circ}$  S; **O2**:  $80^{\circ}$ - $78^{\circ}$  W/ $11^{\circ}$ - $13.5^{\circ}$  S) y tres regiones continentales (**C1**:  $81^{\circ}$ - $79.3^{\circ}$  W/ $4^{\circ}$ - $6^{\circ}$  S; **C2**:  $75^{\circ}$ - $72^{\circ}$  W/ $3.5^{\circ}$ - $5.5^{\circ}$  S; **C3**:  $76^{\circ}$ - $74^{\circ}$  W/ $11^{\circ}$ - $13.5^{\circ}$  S) a partir de los datos simulados y observados (GPM y PISCO). Cabe señalar que las regiones continentales seleccionadas cuentan con información del ciclo anual de precipitación obtenida mediante estaciones pluviométricas: C1 abarca la región Piura (Rau et al., 2017); C2, la amazonía (Espinoza et al., 2010; Figueroa et al., 2020); C3, la cuenca del Mantaro (Giraldez et al., 2020).

## 3. Resultados

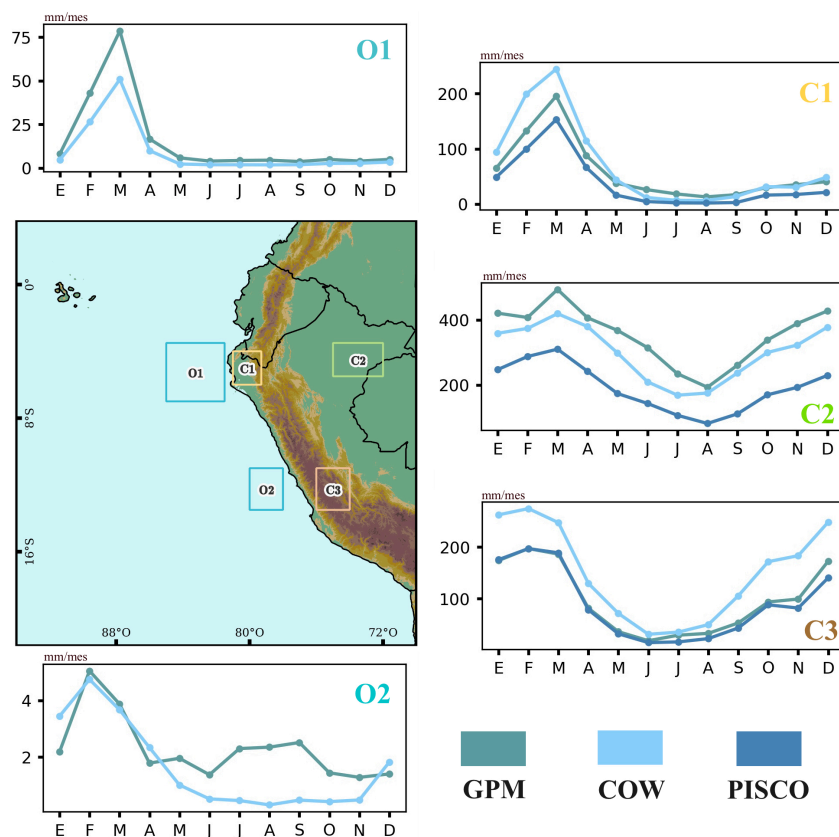


**Figura 1.** Distribución espacial de la climatología anual y el análisis estadístico (EP y R) calculados a partir de los datos de la componente atmosférica de modelo acoplado (COW) y los diferentes productos observacionales (OBS) durante el período 2001-2020: a) la precipitación acumulada (mm/año), b) la temperatura promedio del aire a 2 m ( $^{\circ}$ C), c) la velocidad promedio del viento a 10 metros (m/s). EP y R son referidos al error promedio (EP) y el coeficiente de correlación de Pearson (R), respectivamente.

La Figura 1 muestra la climatología anual de la precipitación acumulada (mm/año, a), la temperatura promedio del aire a 2 m ( $^{\circ}$ C, b) y la velocidad promedio del viento a 10 metros (m/s, c). Esto evidencia que el modelo es capaz de reproducir los patrones espaciales de las variables analizadas, especialmente sobre la región oceánica.

A partir del análisis estadístico en las cinco regiones seleccionadas se observa que en O1 se tienen correlaciones que oscilan entre 0.6 (velocidad del viento) y 0.8 (temperatura y precipitación), mientras que en O2 se obtuvo 0.3 (precipitación y velocidad) y 0.6 (temperatura). Al comparar la velocidad del viento con el producto ASCAT, se obtienen en ambas regiones subestimaciones de 0.6 m/s. Al comparar la temperatura del aire a 2 m con ERA5 se muestra

subestimación en O1 (0.15 °C) y sobreestimación en O2 (0.79 °C). En ambas regiones se subestima la precipitación (O1: 70 mm/año y O2: 8 mm/año). Al observar el ciclo anual de precipitación (Figura 2), se denota que la subestimación en O1 se da principalmente en los meses de febrero y marzo.



**Figura 2.** Ciclo anual de precipitación del período 2001-2020 calculado a partir de los datos simulados (COW) y observados del producto GPM y PISCO en cinco regiones: oceánica norte (O1), costa norte (C1), amazónica (C2), oceánica central (O2) y centro andina (C3).

Las correlaciones obtenidas para la variable temperatura oscilan entre 0.7 (C2 y C3) y 0.8 (C1), mientras que los sesgos obtenidos en C1, C2 y C3 son 1.3 °C, -0.1 °C y 0.1 °C, respectivamente. Solo en la región C1, las correlaciones de precipitación son altas (0.8), mientras que en C2 y C3 son negativas y bajas (-0.2). Las regiones C1 (-185 mm/año) y C3 (641 mm/año) presentan sesgos negativos y positivos debido a que en ambas regiones se incluyen parte de los Andes. La región C2 (-633 mm/año) muestra subestimación; no obstante, el patrón temporal del modelo en esta región es similar a PISCO, aunque en magnitud se asemeja más a GPM, concordando con el estudio de Zubieta et al. (2017), quien compara datos de estaciones con diferentes productos satelitales incluyendo GPM.

## 4. Conclusiones preliminares

A partir de los resultados preliminares se concluye que el modelo representa apropiadamente los patrones espaciales de las variables temperatura, precipitación y velocidad de viento, especialmente entre los 0 y 6° S. Cuantitativamente, existen sesgos en los Andes y en la región oceánica debajo de los 10° S. El ciclo anual de las precipitaciones en las cinco regiones analizadas se asemeja bastante bien a PISCO, donde los sesgos más altos se dan en los meses más lluviosos de cada región. Finalmente, para completar la validación se realizará Hovmoller de las anomalías de precipitación, temperatura del aire y velocidad del viento junto con sus componentes meridional-zonal, perfiles verticales de temperatura potencial, vapor de agua, velocidad vertical del viento, además del análisis de eventos ENSO durante el periodo simulados.

## Referencias

- Bertrand, A., Lengaigne, M., Takahashi, K., Avadí, A., Poulain, F. & Harrod, C. 2020. El Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on fisheries and aquaculture. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper N°. 660. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8348en>
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.-G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H.-S., Marengo, J. A., Alves, L. M., Osman, M., Li, S., ... Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 215-231. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>
- Cravatte, S., Kessler, W., Smith, N., Wijffels, S., & Contributing Authors. (2016). *First Report of TPOS 2020* (p. 200 pp.). GOOS-215. <http://tpos2020.org/first-report/>
- Dewitte, B., Takahashi, K., Goubanova, K., Montecinos, A., Mosquera, K., Illig, S., Montes, I., Paulmier, A., Garçon, V., Purca, S., Flores, R., Bourrel, L., Rau, P., Labat, D., Lavado, W., & Espinoza, J. C. (2014). 9. Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú. En S. González Molina & J.-J. Vacher (Eds.), *El Perú frente al cambio climático* (pp. 125-140). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.19877>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Lavado-Casimiro, W., Carranza, J., Cochonneau, G., De Oliveira, E., Pombosa, R., Vauchel, P., & Guyot, J. L. (2010). Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional. Un enfoque particular sobre la región andina. *Repositorio Institucional - SENAMHI*. <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1047>



Figuerola, M., Armijos, E., Espinoza, J. C., Ronchail, J., & Fraizy, P. (2020). On the relationship between reversal of the river stage (repiquetes), rainfall and low-level wind regimes over the western Amazon basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100752. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100752>

Giraldez, L., Silva, Y., Zubieta, R., & Sulca, J. (2020). Change of the Rainfall Seasonality Over Central Peruvian Andes: Onset, End, Duration and Its Relationship With Large-Scale Atmospheric Circulation. *Climate*, 8. <https://doi.org/10.3390/cli8020023>

Hamilton, K., & Ohfuchi, W. (Eds.). (2008). High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-49791-4>

Heino, M., Puma, M. J., Ward, P. J., Gerten, D., Heck, V., Siebert, S., & Kummu, M. (2018). Two-thirds of global cropland area impacted by climate oscillations. *Nature Communications*, 9(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02071-5>

Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., & Obando, F.O. (2022) High-resolution gridded hourly precipitation dataset for Peru (PISCOp\_h). *Data in Brief*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340922007776>

Kessler, W. S., Cravatte, S., & Lead Authors. (2021). Final Report of TPOS 2020 (p. 83). GOOS-268. <https://tropicalpacific.org/tpos2020-project-archive/reports/>

Kessler, W., Wijffels, S., Cravatte, S., Smith, N., & Lead Authors. (2019). *Second Report of TPOS 2020* (p. 265). GOOS-234. <http://tpos2020.org/second-report/>

Machuca, R., Takahashi, K., & Martínez, A. (2014). Impactos económicos de El Niño costero en el sector vivienda a causa de inundaciones en la costa norte del Perú. <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5053>

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>

Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., & Felipe, O. (2017). Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *International Journal of Climatology*, 37(1), 143-158. <https://doi.org/10.1002/joc.4693>

Segura, B., & Montes, I. (2021). Análisis de sensibilidad del sistema acoplado regional COW para el Pacífico sudeste. *Boletín Científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 8 (02), 12-17.

Takahashi, K. (2022). Avances en el conocimiento y la predicción de El Niño y su diversidad en el Perú. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 9(7), 5-13.

Wilks, D. (2019). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences (4th ed.). Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/statistical-methods-in-the-atmospheric-sciences/wilks/978-0-12-815823-4>

Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J. C., Lavado-Casimiro, W., & Aragon, L. (2017). Hydrological modeling of the Peruvian–Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3543-3555. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3543-2017>

# RESUMEN INFORME TÉCNICO

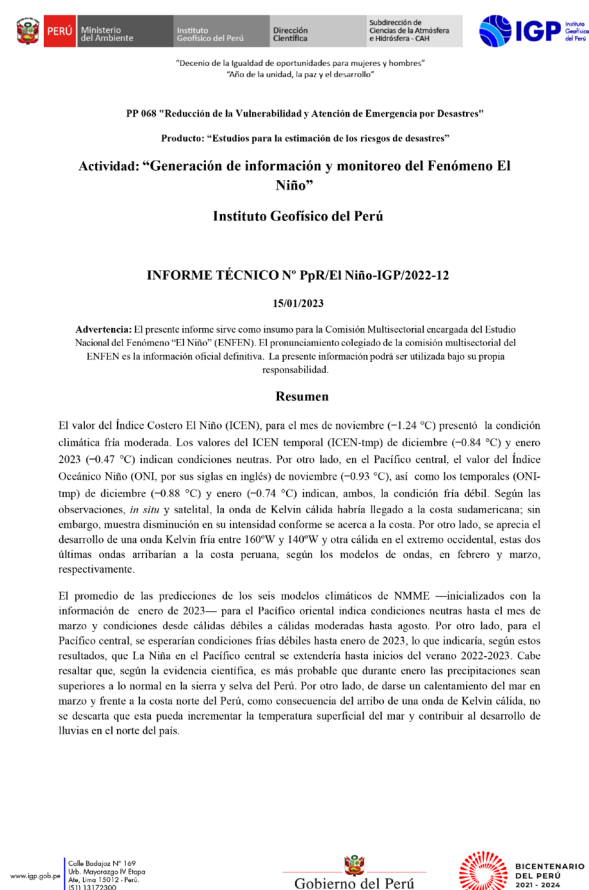
## n.º PPR/EL NIÑO-IGP/2022-12

El valor del Índice Costero El Niño (ICEN), para el mes de noviembre ( $-1.24^{\circ}\text{C}$ ) presentó la condición climática fría moderada. Los valores del ICEN temporal (ICEN-tmp) de diciembre ( $-0.84^{\circ}\text{C}$ ) y enero 2023 ( $-0.47^{\circ}\text{C}$ ) indican condiciones neutras. Por otro lado, en el Pacífico central, el valor del Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de noviembre ( $-0.93^{\circ}\text{C}$ ), así como los temporales (ONI-tmp) de diciembre ( $-0.88^{\circ}\text{C}$ ) y enero ( $-0.74^{\circ}\text{C}$ ) indican, ambos, la condición fría débil. Según las observaciones, in situ y satelital, la onda de Kelvin cálida habría llegado a la costa sudamericana; sin embargo, muestra disminución en su intensidad conforme se acerca a la costa. Por otro lado, se aprecia el desarrollo de una onda Kelvin fría entre  $160^{\circ}\text{W}$  y  $140^{\circ}\text{W}$  y otra cálida en el extremo occidental, estas dos últimas ondas arribarían a la costa peruana, según los modelos de ondas, en febrero y marzo, respectivamente.

El promedio de las predicciones de los seis modelos climáticos de NMME —inicializados con la información de enero de 2023— para el Pacífico oriental indica condiciones neutras hasta el mes de marzo y condiciones desde cálidas débiles a cálidas moderadas hasta agosto. Por otro lado, para el Pacífico central, se esperarían condiciones frías débiles hasta enero de 2023, lo que indicaría, según estos resultados, que La Niña en el Pacífico central se extendería hasta inicios del verano 2022-2023. Cabe resaltar que, según la evidencia científica, es más probable que durante enero las precipitaciones sean

superiores a lo normal en la sierra y selva del Perú. Por otro lado, de darse un calentamiento del mar en marzo y frente a la costa norte del Perú, como consecuencia del arribo de una onda de Kelvin cálida, no se descarta que esta pueda incrementar la temperatura superficial del mar y contribuir al desarrollo de lluvias en el norte del país.

El informe técnico completo se encuentra disponible en <https://bit.ly/InfTecnElNino2022-12IGP>



**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 01-2023



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 Activo**<sup>1</sup>

La Comisión Multisectorial del ENFEN mantiene el estado del sistema de alerta **"No Activo"**, debido a que es más probable que la temperatura superficial del mar en la región Niño 1+2, que incluye la zona norte y centro del mar peruano, continúe en un escenario de condición neutra, en promedio, hasta mediados de otoño. Cabe resaltar que no se descarta que en marzo se desarrolle un calentamiento en la región norte.

Por otro lado, en la región del Pacífico central, es más probable que La Niña continúe hasta febrero de 2023 con una magnitud débil.

De acuerdo al pronóstico estacional vigente para el trimestre enero-marzo de 2023<sup>2</sup>, se prevé precipitaciones superiores a lo normal en la sierra nororiental, central y suroccidental, así como en la selva norte y centro; en el resto del país, las condiciones, en promedio, serían normales, pero no se descartan posibles eventos localizados de lluvias de moderada a fuerte intensidad y de corta duración en la costa norte. Finalmente, se esperan que las temperaturas extremas del aire a lo largo de la costa, en promedio, presenten valores dentro de lo normal.

En relación con la anchoveta se prevé que, de acuerdo a las condiciones ambientales actuales y su proyección hasta febrero 2023, continúe presentando una distribución amplia, específicamente en la zona

norte-centro. En cuanto a las especies transzonales, se prevé que continúe la disponibilidad de bonito, jurel, caballa, perico y otros recursos oceánicos de acuerdo a su estacionalidad. Así mismo, el calamar gigante o pota mantendrá su mayor abundancia y disponibilidad principalmente en la zona norte del mar peruano.

Se recomienda a los tomadores de decisiones tener en cuenta los posibles escenarios de riesgo de acuerdo al pronóstico estacional vigente para fines de prevención y reducción del riesgo de desastres.

La Comisión Multisectorial del ENFEN continuará monitoreando e informando sobre la evolución de las condiciones oceánicas-atmosféricas y actualizando las perspectivas. La emisión del próximo informe técnico será el 16 de febrero de 2023.

- Para mayor información, consultar el Informe Técnico Mensual en el siguiente enlace: <https://bit.ly/InfENFENDic2022>
- Puede acceder a leer en comunicado en su totalidad a través del siguiente enlace: <https://bit.ly/comunicadoENFEN2023-001>

#### INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN



<sup>1</sup>No activo: En condiciones neutras o cuando el Comité ENFEN espera que El Niño o La Niña costeros están próximos a finalizar.

<sup>2</sup>Pronóstico climático EFM 2023: <https://bit.ly/SenamhiPronos-Clima2023>





@igp.peru



@igp\_peru



@igp.peru



@igp\_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru