



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



# BOLETÍN CIENTÍFICO EL NIÑO

Vol. 12 n.º 06 junio 2025

**PROGRAMA PRESUPUESTAL n.º 068**

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

## En este boletín

- El fenómeno El Niño y la huella hídrica en la costa norte del Perú: Cuando el aumento de la disponibilidad no disminuye la escasez | **Pág. 4**
- Representación y variabilidad de la zona mínima de oxígeno en el Océano Pacífico sudeste: Un análisis comparativo entre bases de datos | **Pág. 11**
- Resumen del informe técnico de El Niño | **Pág. 21**
- Resumen de comunicado ENFEN | **Pág. 22**



# Créditos

---

Juan Castro Vargas  
**Ministro del Ambiente**

Hernando Tavera  
**Jefe institucional**

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

Lina Godoy Encarnación  
**Coordinadora de la Unidad Funcional de Comunicaciones**

Ricardo Zubieta Barragan  
Ken Takahashi Guevara  
**Editores**

Erick Manuel Dávalos Cucchi  
**Diseño y diagramación**

Fotografía de inundación por el desborde del río Piura, con fecha 27 de marzo del 2017.  
Fuente: Universidad de Piura

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

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

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

Calle Badajoz 169 Mayorazgo, Ate, 15012

Teléfono: +51-1-3172300

Lima, septiembre de 2025

---

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

---





# EL FENÓMENO EL NIÑO Y LA HUELLA HÍDRICA EN LA COSTA NORTE DEL PERÚ: CUANDO EL AUMENTO DE LA DISPONIBILIDAD NO DISMINUYE LA ESCASEZ

Joan Sanchez-Matos\*, Ian Vázquez-Rowe  
Ramzy Kahhat

Red Peruana Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN), Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Avenida Universitaria 1801, San Miguel 15088, Lima, Perú

\*Autor de correspondencia:  
sanchez.joan@pucp.edu.pe



Joan Sanchez Matos es ingeniero en Gestión Ambiental por la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP). Cuenta con un máster en Contaminación Industrial por la Universidad de Vigo (Galicia, España) y un doctorado en Desarrollo y Ambiente por la Universidade Estadual de Santa Cruz (Bahía, Brasil). Actualmente se desempeña como investigador postdoctoral en la Red Peruana de Análisis de Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Sus líneas de investigación se centran en la ecología industrial, el desarrollo de nuevas métricas de Análisis de Ciclo de Vida, como la escasez hídrica o la eutrofización, así como en la evaluación del impacto ambiental de productos agrícolas, pesqueros y acuícolas.

**Palabras clave:** América Latina; Análisis de Ciclo de Vida; ecología industrial; economía circular; escasez de agua; región hiperárida.

Citar como: Sanchez-Matos, J., Vasquez-Rowe, I., Kahhat, R. (2025) El Fenómeno El Niño y la huella hídrica en la costa norte del Perú: cuando el aumento de la disponibilidad no disminuye la escasez. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.o 06, págs. 4-10.

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

Este estudio propone la mejora en la estimación de impactos de la escasez hídrica en la zona norte del Perú en un contexto de Fenómeno El Niño. Esto es relevante dados los factores de caracterización y la importancia del recurso hídrico en el sector económico agrícola. La investigación destaca la precisión alcanzada, para representar el impacto de la escasez de agua a pesar del aumento de las lluvias y caudales de ríos. Por lo tanto, dada la alta importancia estratégica de la costa norte, se recomienda fortalecer la infraestructura hidráulica para un adecuado sistema de captación y almacenamiento. Finalmente, promover las medidas de adaptación de la población ante eventos hidrológicos extremos durante El Niño.

## Resumen

La escasez hídrica en el Perú se intensificará debido al cambio climático y al incremento sostenido de la demanda humana, especialmente en regiones vulnerables como la costa, donde la alta demanda y baja disponibilidad hídricas, además del Fenómeno El Niño (FEN) agravan la situación. Esta complejidad

territorial limita la aplicabilidad de modelos globales para representar adecuadamente la escasez hídrica a nivel local. Por otro lado, la huella hídrica, derivada del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), permite estimar impactos ambientales relacionados con la cantidad y calidad del agua utilizada en el ciclo de vida de productos. Para cuantificar estos impactos, se utilizan factores de caracterización (FdC) basados en modelos

de escasez hídrica, siendo AWARE (Available Water Remaining) el modelo de consenso actual. Sin embargo, este presenta limitaciones en zonas donde la demanda supera la disponibilidad, como en la costa hiperárida del Perú. Este estudio propone actualizar los FdC para cuencas de la costa norte peruana, utilizando el modelo AWARE, usando datos locales y considerando además escenarios específicos del FEN. Para ello, se emplearon bases de datos oficiales sobre disponibilidad, demanda y la delimitación oficial de cuencas. Así mismo, los FdC durante el FEN se estimaron retrospectivamente a partir de información histórica. Los resultados muestran diferencias entre los FdC originales y los actualizados, debido principalmente a la baja resolución espacial de los datos globales. Además, los nuevos FdC actualizados resultaron hasta 12 veces mayores que los originales. Por otro lado, durante el FEN, los FdC mensualizados fueron menores a los obtenidos con promedios históricos, lo que sugiere una posible subestimación del impacto real de la escasez hídrica. Finalmente, estos nuevos FdC mejoran la precisión en la estimación del impacto de escasez hídrica, especialmente en productos agrícolas, que constituyen un consumo importante en la costa peruana. Además, se evidencia que, a pesar del aumento de caudales en ciertas zonas durante el FEN, este incremento no garantiza la satisfacción de la demanda hídrica, y por el contrario, agrava los problemas en los sistemas de abastecimiento humano, debido a una baja capacidad de adaptación de estos.

## 1. Introducción

La escasez hídrica ocurre cuando la demanda supera la disponibilidad hídrica (He et al., 2021), una problemática cada vez más grave debido por el impacto de las actividades humanas, la contaminación y el cambio climático (Blöschl & Chaffe, 2023). Al día de hoy, se estima que un tercio de la población mundial ya enfrenta condiciones severas de escasez (Mekonnen & Hoekstra, 2016), habiéndose sobrepasado el límite planetario del uso de agua dulce (Richardson et al., 2023).

En Perú, a pesar de su relevante aporte de agua dulce en Sudamérica, y la existencia de una gran cantidad de reservorios (ANA, 2016), la región costera del Pacífico enfrenta una alta presión humana sobre sus recursos hídricos. Esta situación se debe a su aridez y a la creciente demanda humana, especialmente en agricultura (Esteve-Llorens et al., 2022) y a fenómenos climáticos como el Fenómeno El Niño

(FEN) al ejercer este una influencia en el régimen de lluvias estacionales en el Perú (Lavado & Espinoza, 2014), que altera la disponibilidad de agua de manera irregular. Estas alteraciones provocan daños en infraestructuras de abastecimiento y áreas agrícolas (Parodi et al., 2021; Ramírez & Lee, 2022). En particular, la agricultura de exportación en la costa peruana —arándanos, espárragos y paltas (aguacates)— ha experimentado un incremento, intensificando el consumo de agua (Esteve-Llorens et al., 2022; Raihan & Tuspekova, 2022). Para enfrentar este contexto, el gobierno peruano condujo la creación del "Certificado Azul" en 2015, una certificación nacional que promueve la medición y la reducción de la huella hídrica, con base a estándares internacionales como la norma ISO 14046 o la guía de Water Footprint Network (WFN) (ANA, 2015). Particularmente, el cálculo de la huella hídrica basado en la ISO 14046 considera un enfoque de impacto ambiental de ciclo de vida, a diferencia del enfoque de WFN, que considera consumos de agua en volúmenes de agua azul, verde o gris (Martínez-Arce et al., 2018).

La huella hídrica basada en un enfoque de impacto ambiental, considera el método de consenso Available Water Remaining (AWARE) (Boulay et al., 2018). Sin embargo, los factores de caracterización (FdC) usados en el método AWARE para medir la escasez hídrica presentan elevadas incertidumbres en ciertas regiones del planeta, porque se basan en bases de datos globales difícilmente adaptadas a la realidad de países como el Perú (Boulay et al., 2021). Diversos estudios han demostrado la necesidad de adaptar los FdC a la realidad hidrológica local, especialmente considerando eventos como el FEN (Sanchez-Matos et al., 2023; Vázquez-Rowe et al., 2017).

En este contexto, el presente estudio propone una actualización metodológica para recalcular los FdC del modelo AWARE en Perú usando datos más precisos, además de estimar FdC incorporando los efectos de FEN. Se tiene como objetivo, de este modo, analizar cómo las fluctuaciones en la disponibilidad hídrica pueden afectar los valores de escasez hídrica en la costa norte del Perú.

## 2. Metodología

El cálculo de los FdC actualizados se realizó siguiendo el método AWARE, el cual mide la escasez hídrica considerando el volumen de agua disponible una vez satisfechas las necesidades humanas y ecológicas de

cada cuenca (AMDi, availability minus demand) (Boulay et al., 2018). De acuerdo con el método AWARE, la disponibilidad hídrica es el agua de escorrentía de una cuenca después de las intervenciones humanas (Boulay et al., 2018). Los FdC mensuales fueron calculados a través de la inversa de AMDi, normalizada respecto al promedio global mensualizado de esta variable. Así, los FdC indican cuánta agua queda disponible en una región comparado con el promedio mundial. Este método considera un criterio de corte del FdC entre 0,1 y 100 (m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup>).

Para actualizar los FdC en la región de estudio, se seleccionaron cuencas hidrográficas del norte del Perú como caso de análisis (Figura 1a). Para ello se usaron nuevas fuentes de datos: se adoptaron unidades hidrográficas oficiales (ANA, 2008), en lugar de la escala original (0.5°x0.5°). Además, se reemplazaron los datos de disponibilidad de agua de WaterGAP2.2 (Müller Schmied et al., 2014) por estimaciones basadas en registros históricos del SENAMHI (Lavado-Casimiro et al., 2021). Para representar la demanda humana, se utilizaron derechos de uso del agua, excepto para el uso doméstico, el cual se calculó con datos demográficos y de consumo per cápita (SUNASS, 2004). Además, debido a que la delimitación original de cuencas de AWARE difiere geográficamente con las cuencas delimitadas oficialmente (ANA, 2008), la comparación entre los valores de FdC recalculados con los originales se limitó exclusivamente para la cuenca del río Piura y la cuenca AWARE 55852 (Figura 2).

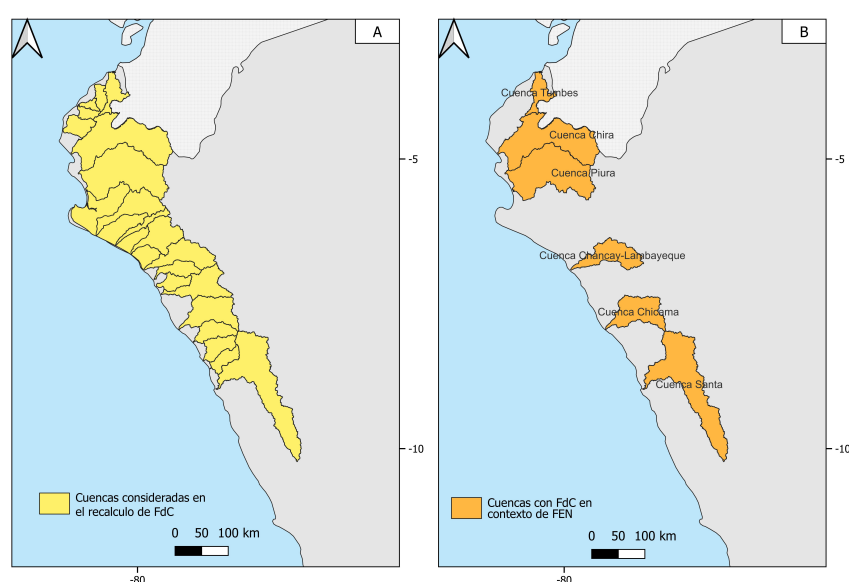
Por otro lado, para calcular los FdC durante el FEN, se seleccionaron seis cuencas de la costa norte del Perú, considerándose las altamente sensibles a este fenómeno: Tumbes, Piura, Chira, Chancay-Lambayeque, Santa y Chicama (Figura 1b). Esta decisión se basó en el monitoreo histórico de las cuencas y en el aumento de hasta 400 % en sus caudales promedio durante eventos El Niño (Lavado-Casimiro et al., 2013), y debido a que han sido catalogadas entre las más afectadas en términos de impacto poblacional registrado durante el FEN de 2017 (Ramírez & Briones, 2017).

Así mismo, se consideraron los periodos considerados como El Niño de al menos doce meses de duración y el Niño Costero de 2017. La disponibilidad de agua se obtuvo de datos históricos de estaciones hidrométricas (IGP, 2023; Llauca et al., 2021). Para estimar las demandas humanas de agua, se adoptó un enfoque retrospectivo: se calculó a partir de la población de cada año (INEI, 1998b, 2021b) y el consumo promedio de agua (SUNASS, 2004). Las demandas agrícola y pecuaria se estimaron proporcionalmente al área cultivada según datos oficiales (INEI, 1998a, 2008, 2013, 2021a), y la demanda industrial se vinculó al producto bruto interno (PIB) del sector manufacturero, considerando la relación entre PBI y consumo de agua (Boretti & Rosa, 2019; Chu et al., 2022).

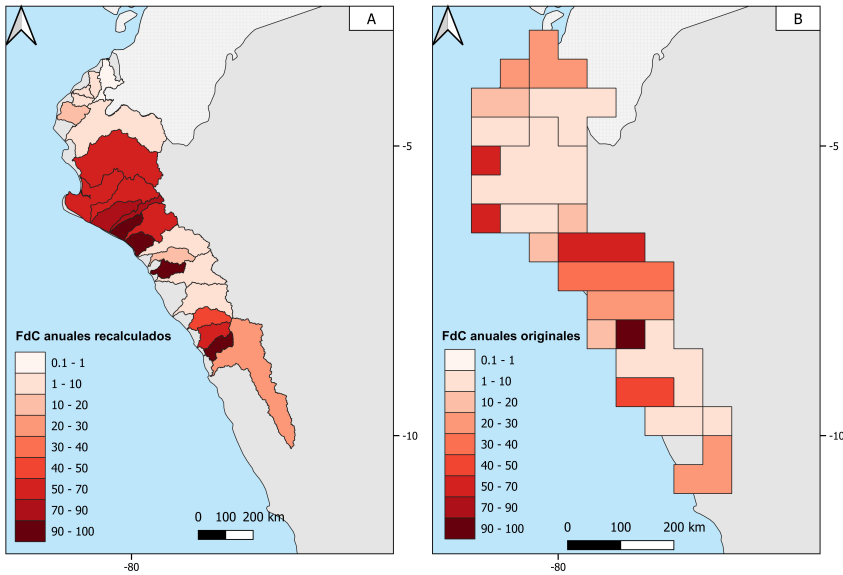
### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Comparación entre factores de caracterización (FdC) originales y recalculados

Los resultados revelaron diferencias tanto en la delimitación espacial de las cuencas como en los niveles de escasez hídrica estimados (Figura 2). Un caso ilustrativo de comparación directa es la cuenca del río Piura, la cual puede ser directamente comparada con la cuenca AWARE 55852. En esta zona, el FdC anual recalculado alcanzó un valor de 59.7 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup>, es decir, hasta doce veces al valor original (4.8 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup>). Este hallazgo sugiere que el uso de los FdC originales podría subestimar el verdadero nivel de la escasez hídrica en la costa norte peruana.

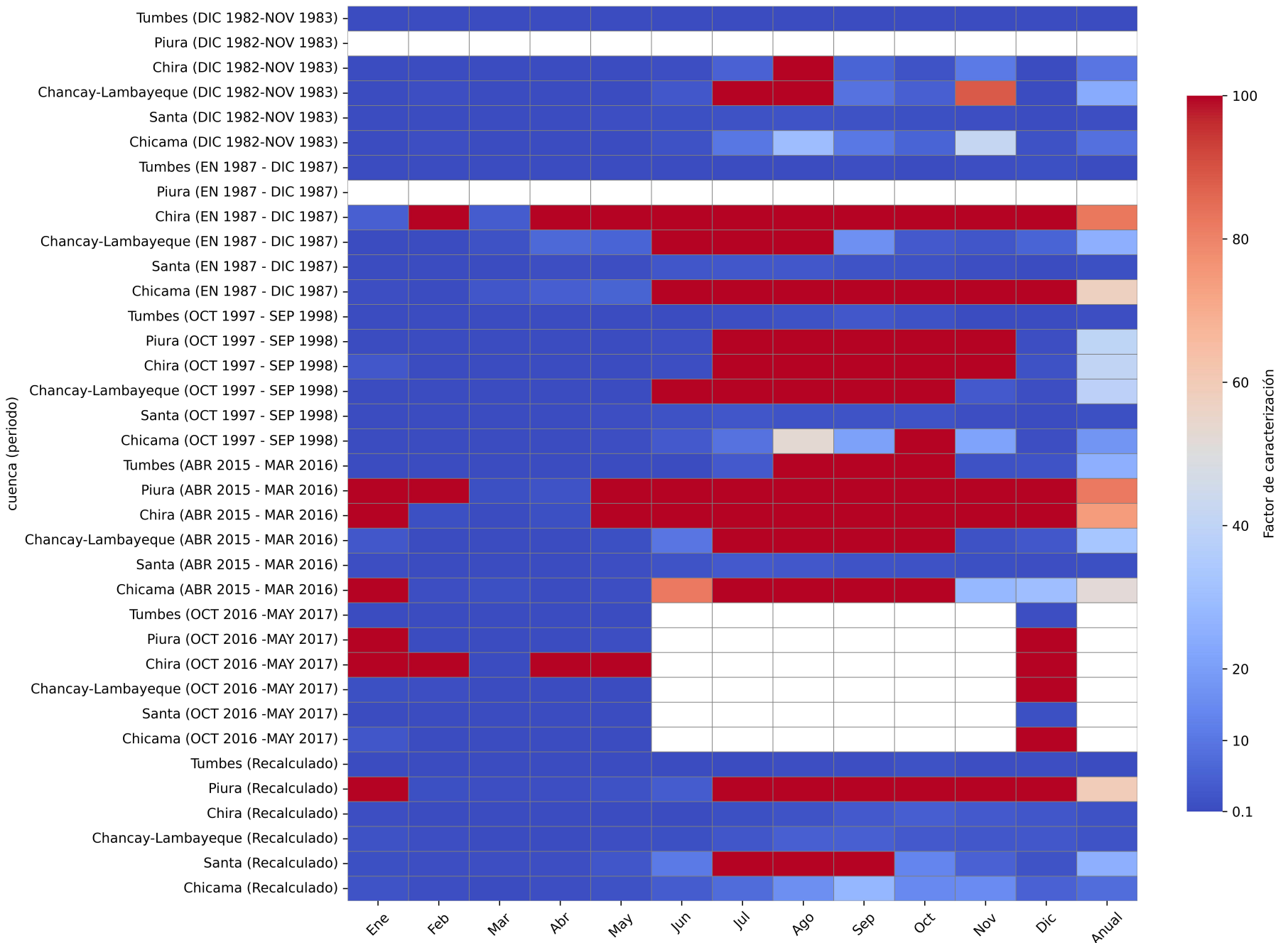


**Figura 1.** Cuencas de la Costa Norte del Perú consideradas en el recálculo de los factores de caracterización (FdC) de escasez hídrica (A), y cuencas consideradas en el desarrollo de FdC considerando el Fenómeno El Niño (B).



**Figura 2.** Comparación entre los factores de caracterización (FdC) anuales de escasez hídrica recalculados para condiciones peruanas (A) y FdC anuales originales del método AWARE (B). Nota: todos los factores de caracterización son expresados en m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup>. Nota: Valores más cercanos a 100 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup> representan mayor escasez hídrica, por el contrario, valores más cercanos a 0.1 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup> representan baja escasez hídrica.

Estas discrepancias en los resultados se deben principalmente a las fuentes de datos usadas por ambos enfoques. El enfoque actualizado emplea datos de derechos de uso de agua para uso agrícola (principalmente licencias permanentes, que representan el 97 % de los retiros agrícolas), mientras que WaterGAP modela la demanda basado en dos tipos de cultivos, categorizados como arroz y otros cultivos (Döll & Siebert, 2002; Siebert et al., 1999). Así mismo, en cuanto a la disponibilidad hídrica, el presente estudio utilizó el modelo SWAT calibrado con datos locales de estaciones hidrométricas para el periodo 1981–2016 (Lavado-Casimiro et al., 2021), a diferencia del AWARE, que emplea WaterGAP2.2 basado en datos globales de precipitación y evapotranspiración. En consecuencia, el enfoque actualizado refleja de manera más precisa la demanda agrícola real durante todo el año, mientras que el modelo original subestima la escasez en muchos meses secos.



**Figura 3.** Comparación entre los factores de caracterización (FdC) mensualizados y anualizados considerando los periodos del Fenómeno El Niño (FEN) y los FdC recalculados. Nota: Valores más cercanos a 100 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup> representan mayor escasez hídrica, por el contrario, valores más cercanos a 0.1 m<sup>3</sup>eq/m<sup>3</sup> representan baja escasez hídrica. Los valores en blanco, representan meses sin registro.

### 3.2 Comparación entre factores de caracterización (FdC) originales y recalculados

Durante eventos fuertes de FEN (excepto en 2015/2016 y 2016/2017), los FdC de los meses de febrero a abril presentan los menores niveles de escasez hídrica en la costa norte (Figura 3). Marzo destaca como el mes con el menor déficit en todas las cuencas hídricas evaluadas, coincidiendo con el periodo de aumento de lluvias y disponibilidad de agua entre los meses de diciembre y mayo. Además, todas las cuencas, con excepción de la cuenca Santa, presentaron menores FdC anuales promediados a partir de los años con evento FEN, que los FdC anuales recalculados, sugiriendo una subestimación de la escasez hídrica.

Según el análisis de los datos de disponibilidad hídrica de las estaciones hidrométricas proporcionados por Llauca et al. (2021), los eventos FEN fuertes como los de 1982/1983 y 1997/1998 provocaron aumentos extremos del caudal en cuencas como Tumbes, Piura, Chicama y Santa, con incrementos de entre 12 a 69 veces respecto a los valores históricos. En el caso del Niño Costero de 2017, también se observaron incrementos sustanciales, particularmente en la cuenca del río Piura.

No obstante, el aumento en la disponibilidad de agua durante los FEN, provocan inundaciones, causando daños significativos, afectando tanto al suministro doméstico como agrícola, y por lo tanto afectando a la demanda hídrica humana. Por ejemplo, en el FEN de 2017, la planta de tratamiento de agua de Lima suspendió su operación por varios días debido al incremento de la turbidez en el río Rímac (Bell, 2022), además de generar daños en miles de hectáreas agrícolas a lo largo de la costa peruana (Parodi et al., 2021). Este contexto evidencia que un incremento en la disponibilidad hídrica no necesariamente se traslada en una reducción real de la escasez hídrica, ya que los daños debido a una baja capacidad de adaptación de los sistemas de colecta, tratamiento y distribución de agua para consumo humano y uso agrícola, serían superiores a los beneficios de un incremento repentino en los caudales de los cuerpos de agua dulce durante el FEN.

En este sentido, dado que los FdC suelen calcularse considerando promedios de al menos 20 años de

registros históricos, estos podrían no representar adecuadamente los eventos de alta disponibilidad hídrica. Por ello, se sugiere desarrollar FdC adaptados a ventanas temporales más cortas para capturar mejor los cambios durante los FEN, y evitar una subestimación de la escasez hídrica en zonas con alta variabilidad de precipitación. Además, se sugiere la actualización periódica de los FdC, lo que permitiría reducir la incertidumbre en los valores de escasez hídrica, por el efecto del progresivo cambio de uso de suelo en la disponibilidad hídrica (Zorogastúa-Cruz et al., 2011).

## 4. Conclusiones

Los FdC actualizados mejoran sustancialmente la representatividad de la huella hídrica en el Perú, al incorporar datos primarios regionales que capturan con mejor precisión la variabilidad espacial y temporal de disponibilidad y demanda de agua, superando las limitaciones del modelo original. Esta mejora resulta particularmente relevante en la costa norte hiperárida, donde la escasez hídrica es crítica. Los resultados muestran que los FdC son altamente sensibles a los eventos FEN. En este sentido, se recomienda aplicar criterios diferenciados al calcular huellas de escasez hídrica en zonas sensibles al FEN, a fin de evitar errores en la estimación de impactos de escasez hídrica, especialmente de productos agrícolas.

Además, dada la importancia estratégica de la costa norte del Perú —tanto por su densidad poblacional como por su aporte agrícola—, resulta imperativo adoptar distintas dinámicas para minimizar los daños y potenciar los beneficios del incremento de la disponibilidad hídrica durante los FEN. Esto se podría lograr al fortalecer la infraestructura hidráulica de captación, almacenamiento y distribución, promover la formalización del uso de agua de usuarios informales, y desarrollar e implementar medidas de adaptación frente a eventos extremos hídricos.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Agencia Ejecutiva de Investigación Europea (the European Research Executive Agency) por financiar el Proyecto BAMBOO (101059379). El Dr. Joan Sanchez-Matos desea agradecer al DFI-PUCP por financiar su estancia de investigación postdoctoral a través del programa Estancias Postdoctorales PUCP 2023.

## Referencias

- Autoridad Nacional del Agua. (2008). Delimitación y codificación de las unidades hidrográficas del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/597>
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). Resolución Jefatural N° 246 de 2015: Por la cual se promueve la medición voluntaria de la Huella Hídrica. <https://www.ana.gob.pe/normatividad/rj-ndeg-246-2015-ana-0>
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). Inventario de Presas del Perú: Primera parte - 2015. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/200>
- Bell, M. G. (2022). Overlooked legacies: Climate vulnerability and risk as incrementally constructed in the municipal drinking water system of Lima, Peru (1578–2017). *Geoforum*, 132, 205–218. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.02.016>
- Blöschl, G., & Chaffe, P. L. B. (2023). Water scarcity is exacerbated in the south. *Science*, 382(6670), 512–513. <https://doi.org/10.1126/science.adk8164>
- Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A. V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., & Pfister, S. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
- Boulay, A. M., Lesage, P., Amor, B., & Pfister, S. (2021). Quantifying uncertainty for AWARE characterization factors. *Journal of Industrial Ecology*, 25(6), 1588–1601. <https://doi.org/10.1111/jiec.13173>
- Chu, Y., Wang, Y., Zhang, Z., & Dai, S. (2022). Decoupling of Economic Growth and Industrial Water Use in Hubei Province: From an Ecological–Economic Interaction Perspective. *Sustainability*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/su142013338>
- Döll, P., & Siebert, S. (2002). Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, 38(4), 1037. <https://doi.org/10.1029/2001wr000355>
- Esteve-Llorens, X., Ita-Nagy, D., Parodi, E., González-García, S., Moreira, M. T., Feijoo, G., & Vázquez-Rowe, I. (2022). Environmental footprint of critical agro-export products in the Peruvian hyper-arid coast: A case study for green asparagus and avocado. *Science of the Total Environment*, 818, 151686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151686>
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, 12(1), 4667. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>
- Instituto Geofísico Del Perú. (2023). Eventos El Niño y La Niña Costeros. [http://met.igp.gob.pe/elniño/lista\\_eventos\\_ICEN\\_ERSSTv3b.html](http://met.igp.gob.pe/elniño/lista_eventos_ICEN_ERSSTv3b.html)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (1998a). Agropecuario. En Compendio estadístico 1996-97. <https://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/LIB0170/N46/N46.htm>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (1998b). Población. En Compendio estadístico 1996-97. <https://doi.org/https://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0170/n00.htm>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2008). Agrario. En Perú: Compendio Estadístico 2008. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib0808/Libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0808/Libro.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2013). Agrario. En Compendio Estadístico del Perú 2013. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1097/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1097/libro.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2021a). Agrario. En Compendio Estadístico: Perú 2021. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/3000248-compendio-estadistico-peru-2021>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2021b). Población. En Compendio Estadístico: Perú 2021. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/3000248-compendio-estadistico-peru-2021>
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 14046: Environmental management — Water footprint — Principles, requirements, and guidelines. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:en>
- Lavado-Casimiro, W., Felipe, O., Silvestre, E., & Bourrel, L. (2013). ENSO impact on hydrology in Peru. *Advances in Geosciences*, 33, 33–39. <https://doi.org/10.5194/adgeo-33-33-2013>

- Lavado-Casimiro, W., & Espinoza, J. C. (2014). Impactos de El niño y La niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2), 171–182. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200003>
- Lavado-Casimiro, W., Traverso, K., & Gutierrez, L. (2021). Atlas de Hidrología superficial del Perú - Una evaluación presente y futura. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1252>
- Llauca, H., Lavado-Casimiro, W., Montesinos, C., Santini, W., & Rau, P. (2021). PISCO\_HyM\_GR2M: A model of monthly water balance in Peru (1981–2020). *Water*, 13(8), 1048. <https://doi.org/10.3390/w13081048>
- Martínez-Arce A, Chargoy JP, Puerto M, et al (2018) Water footprint (ISO 14046) in latin america, state of the art and recommendations for assessment and communication. *Environments*, 5, 1–16. <https://doi.org/10.3390/environments5110114>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Müller Schmied, H., Eisner, S., Franz, D., Wattenbach, M., Portmann, F. T., Flörke, M., & Döll, P. (2014). Sensitivity of simulated global-scale freshwater fluxes and storages to input data, hydrological model structure, human water use and calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3511–3538. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3511-2014>
- Parodi, E., Kahhat, R., & Vázquez-Rowe, I. (2021). Multi-dimensional damage assessment (MDDA): A case study of El Niño flood disasters in Peru. *Climate Risk Management*, 33, 100329. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100329>
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: New insights from Peru. *Energy Nexus*, 6, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100067>
- Ramírez, I. J., & Briones, F. (2017). Understanding the El Niño Costero of 2017: The definition problem and challenges of climate forecasting and disaster responses. *International Journal of Disaster Risk Science*, 8(4), 489–492. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0151-8>
- Ramírez, I. J., & Lee, J. (2022). Deconstructing the spatial effects of El Niño and vulnerability on cholera rates in Peru: Wavelet and GIS analyses. *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology*, 40, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2021.100474>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kumm, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Stefan, P., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, S., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Wang-Erlandsson, L., Weber, L., & Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Sanchez-Matos, J., Andrade, E. P., & Vázquez-Rowe, I. (2023). Revising regionalized water scarcity characterization factors for selected watersheds along the hyper-arid Peruvian coast using the AWARE method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(11), 1447–1465. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02195-5>
- Siebert, S., Döll, P., Feick, S., Hoogeveen, J., Faurès, J.-M., & Frenken, K. (1999). The Global Map of Irrigation Areas. FAO.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (2004). La calidad del agua potable en el Perú. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1115225/Sunass\\_JICA\\_2004\\_La\\_calidad\\_del\\_agua\\_potable\\_en\\_el\\_Per%C3%BA..pdf?v=1596205266](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1115225/Sunass_JICA_2004_La_calidad_del_agua_potable_en_el_Per%C3%BA..pdf?v=1596205266)
- Vázquez-Rowe, I., Torres-García, J. R., Cáceres, A. L., Larrea-Gallegos, G., Quispe, I., & Kahhat, R. (2017). Assessing the magnitude of potential environmental impacts related to water and toxicity in the Peruvian hyper-arid coast: A case study for the cultivation of grapes for pisco production. *Science of the Total Environment*, 601–602, 532–542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.221>
- Zorogastua Cruz, P., Quiroz Guerra, R., & Garatuza Payán, J. (2011). Evaluación de cambios en la cobertura y uso de la tierra con imágenes de satélite en Piura-Perú. *Ecología Aplicada*, 10(1-2), 13–22. <https://doi.org/10.21704/rea.v10i1-2.409>

# REPRESENTACIÓN Y VARIABILIDAD DE LA ZONA MÍNIMA DE OXÍGENO EN EL OCÉANO PACÍFICO SUDESTE: UN ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE BASES DE DATOS

Fiorela Castellón<sup>1,2</sup>, Roger Manay<sup>1</sup>, Hector Retamozo<sup>2</sup>, Ivonne Montes<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), Perú

**Palabras clave:** Zona Mínima de Oxígeno (ZMO), bases de datos, espesor, flotadores ARGO.

Citar como Castellón, F., Manay, R., Retamozo, H., & Montes, I. (2025). Representación y variabilidad de la zona mínima de oxígeno en el océano Pacífico sudeste: un análisis comparativo entre bases de datos. *Boletín Científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.o 06, págs. 11-19.

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

La alta productividad de la pesquería en nuestro mar está asociado al proceso de afloramiento costero. Sin embargo, la expansión de las aguas pobres en oxígeno a mayores profundidades asociada a la acción humana podría limitar la distribución de las especies marinas. Esta investigación analiza la dinámica de la zona mínima de oxígeno (ZMO) en el océano Pacífico sudeste. Los resultados describen el importante rol de los eventos climáticos extremos, como es el caso de El Niño en la variabilidad espacial y temporal de la profundidad y espesor de la ZMO. Esta información es importante para conocer los posibles impactos de los cambios en la distribución espacial y temporal de la ZMO, con el fin de gestionar en forma sostenible la productividad pesquera de nuestros ecosistemas marinos.

## Resumen

Esta investigación realiza un análisis comparativo entre las bases de datos climatológicas grilladas (GOBAI, WOA23, CARS09, WOA09) disponibles en el océano Pacífico sudeste, con el objetivo de investigar la dinámica de la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO). Asimismo, analiza de manera preliminar su estructura vertical utilizando datos de flotadores ARGO. Los resultados muestran que la ZMO presenta una configuración elongada, con el límite norte de orientación zonal (oeste-este) y el límite sur con dirección noroeste-sureste, claramente identificable a 200 metros de profundidad en todas las bases de datos analizadas. Las bases de datos GOBAI y WOA23 muestran una mayor extensión horizontal del

núcleo de la ZMO, mientras que CARS09 presenta una cobertura más reducida. A 700 m de profundidad, el núcleo de la ZMO se restringe significativamente, localizándose únicamente frente a la costa peruana, con una marcada diferencia entre todas las bases de datos empleadas. El análisis de perfiles verticales de oxígeno disuelto a lo largo de las trayectorias de tres flotadores ARGO, representativos de las regiones norte, centro y sur frente a la costa peruana, revela una alta variabilidad espacio-temporal en la profundidad y el espesor de la ZMO. Esta variabilidad se intensifica especialmente durante eventos climáticos extremos, como El Niño Costero 2023–2024, lo que sugiere un fuerte control por parte de procesos dinámicos tanto locales como regionales.

## 1. Introducción

El océano Pacífico sudeste alberga uno de los cuatro Sistemas de Afloramiento de Bordes Orientales, conocido como el Sistema de Corrientes de Humboldt (SCH), considerado el más productivo de todos los océanos del mundo (Garçon et al., 2019). Sólo la parte norte del SCH, ubicada frente a las costas de Perú, produce aproximadamente el 10% de la captura mundial de peces (Chavez et al., 2008).

Además, esta zona se caracteriza por alojar una de las regiones con menor cantidad de oxígeno en el océano, conocida como Zona Mínima de Oxígeno (ZMO u OMZ, por sus siglas en inglés). Esta ZMO se mantiene por la combinación de una circulación oceánica lenta y del afloramiento costero, proceso que se extiende entre los 4°S y 40°S a lo largo de la costa sudamericana. Este afloramiento, impulsado por la acción del viento y la rotación de la Tierra (e.g., Manay et al., 2021), transporta verticalmente aguas subsuperficiales frías y ricas en nutrientes hacia la superficie, generando una alta o moderada productividad en las capas superficiales. En el caso del Perú, esta productividad representó el 0.8 % del Producto Bruto Interno (PBI) en 2024, con un valor económico estimado de 4482 millones de soles (PRODUCE, 2024). Como consecuencia de esta alta productividad, se produce una elevada exportación de materia orgánica, cuya descomposición consume oxígeno disuelto y contribuye a la dinámica de la ZMO (Wyrski, 1962; Helly & Levin, 2004; Fuenzalida et al., 2009; Paulmier & Ruiz-Pino, 2009).

El oxígeno en el agua es esencial para la vida marina, al igual que lo es en el aire para los organismos terrestres. Diversas investigaciones científicas han evidenciado que las especies marinas requieren un mínimo de oxígeno disuelto para desarrollarse de forma óptima, y cuya escasez puede provocar alteraciones metabólicas y de comportamiento, e incluso ser letal (Breitburg et al., 2019; Pitcher et al., 2021; Roman et al., 2024).

Actualmente existe una problemática que diversos estudios han reportado. Esta consiste en una disminución significativa del oxígeno en las regiones oceánicas y costeras, la cual está asociada tanto al calentamiento global como al exceso de nutrientes en las áreas costeras debido a actividades antrópicas, tales como el ingreso de nutrientes a zonas costeras producto de los desechos y prácticas agrícolas inadecuadas (Breitburg et al., 2018). Todo ello está provocando la pérdida de hábitats marinos,

desencadenando procesos que contribuyen aún más al calentamiento global (e.g., Morée et al., 2023).

En este contexto, el presente avance de investigación tiene como objetivo realizar un análisis comparativo entre las bases de datos climatológicas disponibles para el océano Pacífico sudeste, con el fin de estudiar la dinámica de la ZMO en esta región. Asimismo, identificar los flotadores tipo ARGO que cuentan con mediciones de oxígeno durante el periodo 2000 - 2024, y, a su vez, presentar un análisis preliminar para caracterizar la estructura vertical de la columna de agua en la región de estudio.

## 2. Metodología

Este estudio combina datos provenientes de productos grillados y observaciones in situ para analizar la distribución del oxígeno disuelto en el Pacífico sudeste, con énfasis en la identificación y caracterización de la ZMO frente a la costa peruana.

### Productos Grillados

- **CSIRO Atlas of Regional Seas (CARS):** Es un conjunto de datos climatológicos mensuales o atlas de las propiedades del océano (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nitrato, fosfato y silicato), el cual es construido en base a mediciones históricas disponibles del océano, principalmente de instrumentos de buques de investigación y boyas de perfilación autónomas. La versión empleada en este estudio tiene una resolución espacial de 0.5° x 0.5°, los campos de temperatura y salinidad se crearon con datos hasta julio de 2008 en base al WOD05 (Base de Datos Mundial de Océanos 2005) mientras que los nutrientes se generaron empleando WOD09, los archivos globales de ARGO (con corrección de presión superficial hasta mayo de 2009), el Programa Hidrográfico Global (WOCE, por sus siglas en inglés) y otros conjunto de datos disponibles hasta 2008. Para encontrar mayor información puede consultar el siguiente enlace: <https://catalogue-imos.aodn.org.au/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/d9302a48-57b1-41c2-a0dc-78bd00dd5e4b>
- **World Ocean Atlas 2009 (WOA09):** Es también un conjunto de datos climatológicos mensuales y estacionales del océano global, derivado de los datos históricos del océano obtenidos de diversas fuentes instrumentales (como CTD, DBT, XBT, entre

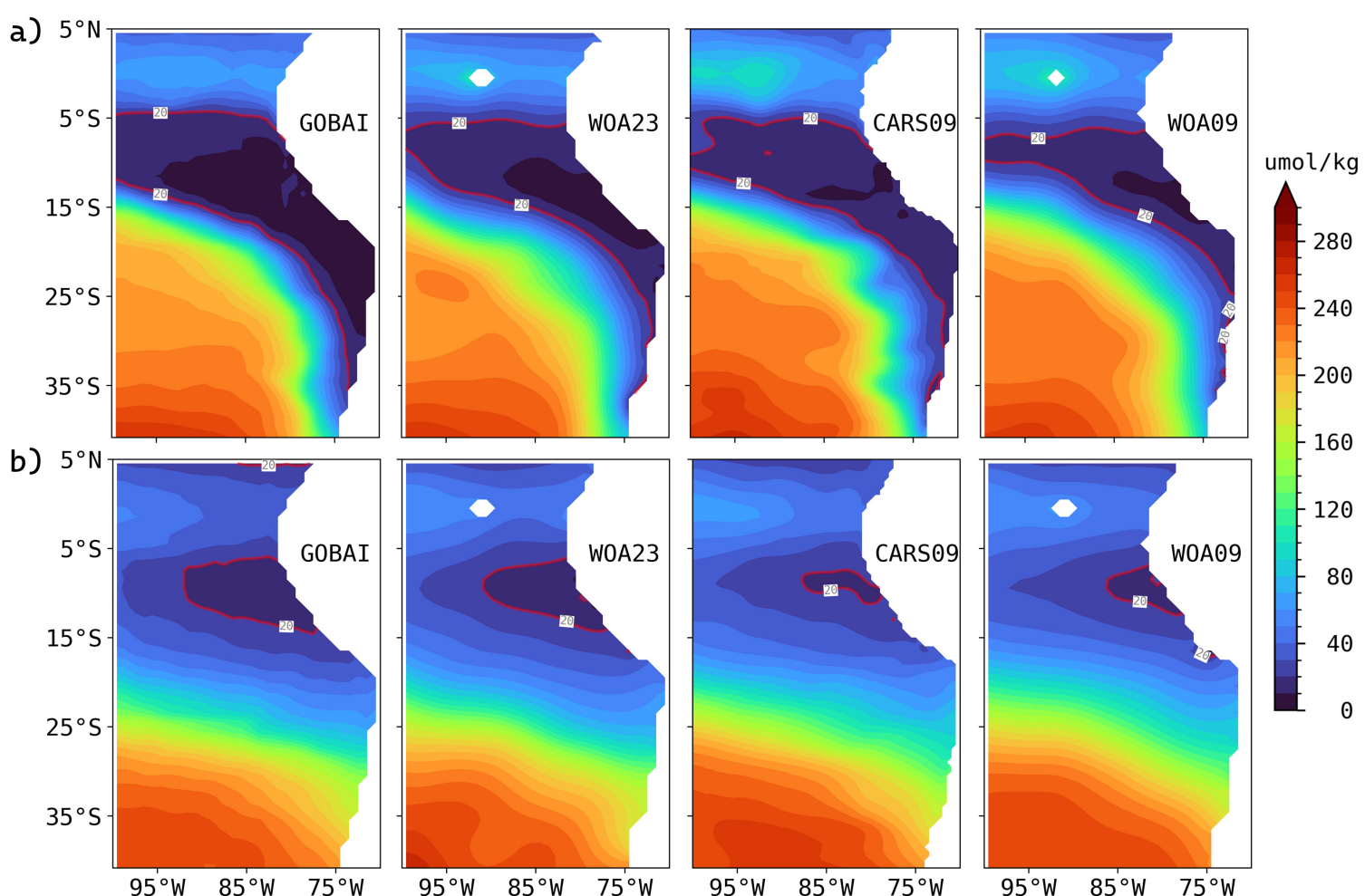
otros). Estos datos fueron recopilados a través de los proyectos GODAR (*Global Oceanographic Data Archaeology and Rescue*) y WOD (*World Ocean Database*), y están disponibles en los archivos del NODC (*National Oceanographic Data Center*) y WDC (*World Data Center*). La información cubre el periodo 1973 y 2008, con una resolución horizontal de 1° x 1°. Además, el WOA09 se basa en la base de datos global WOD09, que reúne registros instrumentales históricos hasta el 2008. Para encontrar mayor información puede consultar el siguiente enlace: [https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr\\_woa09.html](https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr_woa09.html)

- **World Ocean Atlas 2023 (WOA23):** Es la versión más actualizada del WOA, mejora la resolución y la calidad de las estimaciones al incluir observaciones recientes. WOA23 proporciona climatologías anuales, estacionales y mensuales con una resolución de 1° x 1° para todas las variables, calculadas a partir de datos recolectados desde 1965 hasta 2022. Además, ofrece una resolución de 0.25° x 0.25° para temperatura y salinidad. Estos datos provienen del WOD23 e incorporan observaciones del programa ARGO. Para encontrar mayor información puede consultar el siguiente enlace:

<https://catalog.data.gov/dataset/world-ocean-atlas-2023>

- **Gridded Ocean Biogeochemistry from Artificial Intelligence (GOBAI):** Es un nuevo producto global mensual en 3D de oxígeno disuelto, generado mediante algoritmos de aprendizaje automático entrenados con datos in situ (cruceros en marco del proyecto GLODAP (*Global Ocean Data Analysis Project*) y flotadores ARGO). Se basa en campos de temperatura y salinidad, y ha sido validado con observaciones reales, modelos y comparado con el World Ocean Atlas (Sharp et al., 2023). Esta data cubre desde -179.5° a 179.5° de longitud y desde -64.5° a 79.5° de latitud, con resolución de 1°, 58 niveles de presión entre 2.5 y 1975 dbar, y un periodo mensual de enero 2004 a diciembre 2023. Para encontrar mayor información puede consultar el siguiente enlace: <https://www.pmel.noaa.gov/gobai/>

Para cada uno de estos productos, se extrajo la climatología anual del oxígeno disuelto a 200 y 700 metros de profundidad, con el fin de analizar la distribución espacial del oxígeno disuelto e identificar la isolínea de 20  $\mu\text{mol/kg}$ , la cual es comúnmente utilizada como el núcleo de la Zona Mínima de Oxígeno (Figura 1).



**Figura 1.** Climatología anual de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol/kg}$ ) a (a) 200 m y (b) 700 m de profundidad extraídos de los productos grillados GOBAI, WOA23, CARS09 y WOA09. La línea roja indica la isolínea de 20  $\mu\text{mol/kg}$ .

## b) Flotadores tipo ARGO

Los flotadores tipo ARGO, también conocidos como perfiladores oceanográficos, son equipos automáticos capaces de recolectar información desde la superficie hasta profundidades de 1000, 2000 o incluso 6000 metros. Estos dispositivos registran variables como temperatura, salinidad, presión y, dependiendo del modelo, oxígeno disuelto, entre otras variables biogeoquímicas. Los datos se obtienen dentro de lo que se denomina un ciclo que, en promedio, dura 10 días. Una vez en la superficie, el flotador determina su ubicación mediante el GPS para luego transmitir los datos a través del satélite. Posteriormente, desciende hasta alcanzar una profundidad de deriva de 1000 metros, donde permanece durante 8 a 10 días, para luego descender hasta los 2000 metros y, tras ello, ascender recolectando en todo su trayecto datos de conductividad, temperatura y presión (e.g., Morris et al., 2024).

Los datos se obtuvieron a través de la plataforma Argo Fleet Monitoring (<https://fleetmonitoring.euro-argo.eu/dashboard>; Figura 2). Inicialmente, se filtraron todos los flotadores ubicados en el océano Pacífico sudeste (92°O – 68°O / 0°S – 45°S).

Posteriormente, se aplicó un filtro adicional para seleccionar únicamente los flotadores que registran mediciones de oxígeno disuelto (Tabla 1).

De los 38 flotadores identificados con esta variable, se seleccionaron únicamente tres flotadores que fueron lanzados frente a la costa norte, centro y sur del Perú (cuyos códigos son 6902963, 6902961, 6902962, respectivamente; Figura 3). A lo largo de sus trayectorias, se analizaron los perfiles verticales de oxígeno disuelto. Se identificó, para cada fecha y perfil, la profundidad (en metros) correspondiente a la concentración de aproximadamente 20 μmol/kg. A partir de las profundidades mínima y máxima que cumplían con este umbral, se estimó el espesor vertical de la ZMO. Además, usando los perfiles verticales de temperatura del mar, se extrajo la profundidad correspondiente a la isoterma de 15°C, como referencia para comparar con la ubicación vertical de la ZMO. El análisis y procesamiento de los datos climatológicos y de las observaciones in situ se realizaron utilizando los lenguajes de programación Python y R.

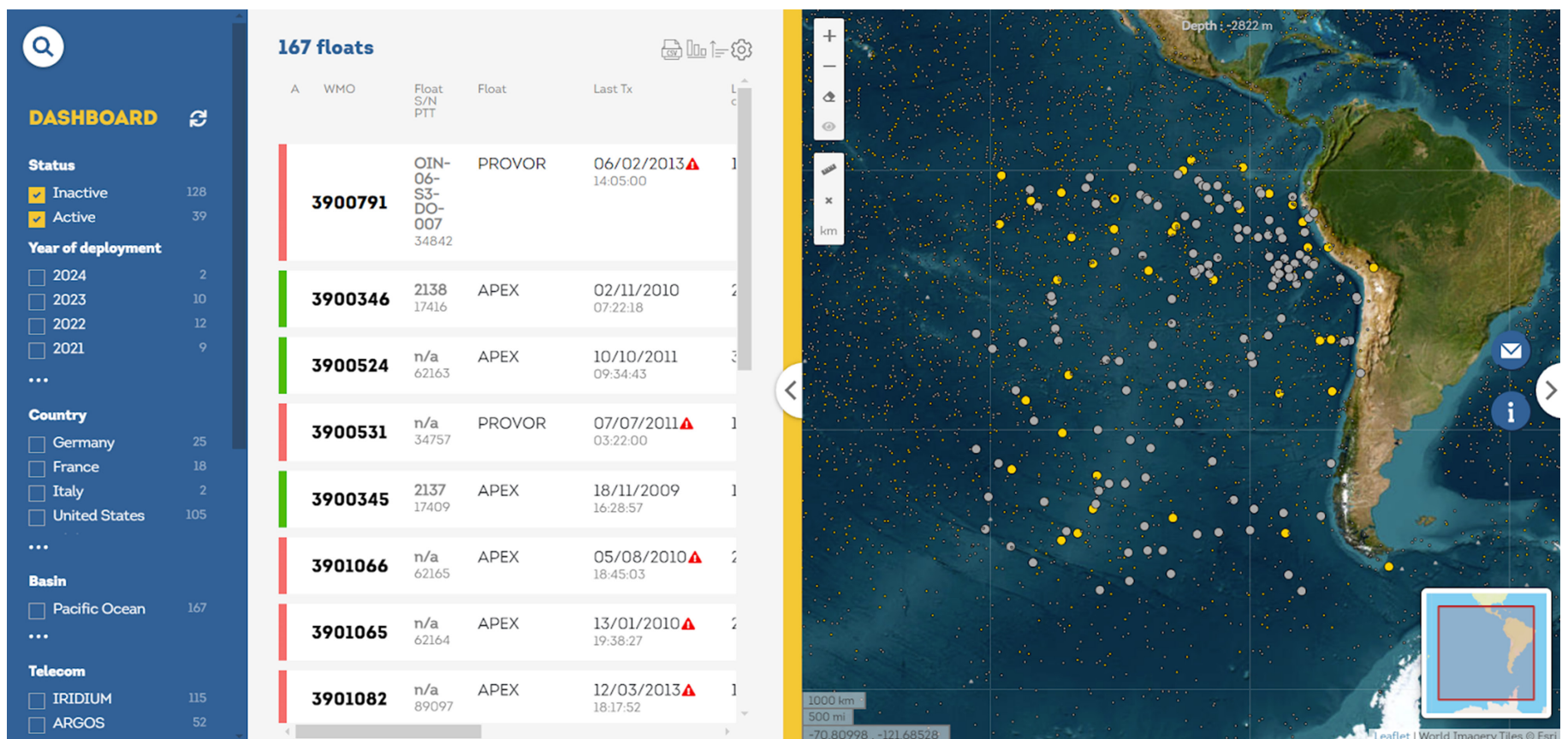


Figura 2. Plataforma Argo Fleet Monitoring. Los puntos representan los flotadores lanzados dentro de la región del Pacífico sudeste.

**Tabla 1.** Inventario de flotadores activos localizados en el océano Pacífico sudeste que registran mediciones de oxígeno disuelto, con datos disponibles hasta septiembre de 2024.

#FLOTADOR	ESTADO	PLATAFORMA	LANZAMIENTO	ÚLTIMO DATO	CICLO
1902501	Activo	NAVIS_EBR	13/05/2024	19/09/2024	14
1902644	Activo	NAVIS_EBR	18/12/2023	21/09/2024	28
2903858	Activo	NAVIS_EBR	10/12/2023	24/09/2024	29
3902556	Activo	NAVIS_EBR	9/12/2023	23/09/2024	29
6902959	Activo	PROVOR	28/01/2023	19/09/2024	66
6902962	Activo	PROVOR	20/10/2021	20/09/2024	117
5906308	Activo	NAVIS_EBR	30/10/2020	24/09/2024	140
5906306	Activo	NAVIS_EBR	29/10/2020	22/09/2024	140
5906305	Activo	NAVIS_EBR	26/10/2020	25/09/2024	144
6902961	Activo	PROVOR	23/09/2021	21/09/2024	177
6902963	Activo	PROVOR	25/09/2021	23/09/2024	206
3900714	Inactivo	SOLO_W	25/10/2008	29/10/2008	1
3900730	Inactivo	SOLO_W	28/11/2008	22/12/2008	8
3900716	Inactivo	SOLO_W	26/10/2008	25/12/2008	20
3900713	Inactivo	SOLO_W	25/10/2008	17/01/2009	28
6900531	Inactivo	APEX	12/03/2014	29/03/2016	77
6900868	Inactivo	APEX	02/04/2011	22/05/2013	79
6900528	Inactivo	APEX	11/03/2014	18/04/2016	79
6900527	Inactivo	APEX	11/03/2014	26/05/2016	83
6900530	Inactivo	APEX	12/03/2014	12/07/2016	88
6900532	Inactivo	APEX	13/03/2014	11/08/2016	91
6900529	Inactivo	APEX	11/03/2014	11/08/2016	91
6902960	Inactivo	PROVOR	28/04/2021	08/04/2023	107
6900869	Inactivo	APEX	02/04/2011	07/04/2014	111
6900872	Inactivo	APEX	02/04/2011	27/05/2014	116
6900875	Inactivo	APEX	10/04/2011	14/07/2014	120
6900874	Inactivo	APEX	02/04/2011	03/11/2014	132
3901078	Inactivo	APEX	03/02/2009	24/12/2012	143
3901075	Inactivo	APEX	02/02/2009	02/01/2013	144
6900891	Inactivo	APEX	10/04/2011	08/08/2015	159
6900870	Inactivo	APEX	02/04/2011	26/04/2016	186
6901461	Inactivo	PROVOR	19/02/2014	17/04/2019	189
3900348	Inactivo	APEX	10/11/2005	30/10/2009	189
5905106	Inactivo	APEX	22/09/2017	23/11/2022	190
5905105	Inactivo	APEX	26/09/2017	24/11/2021	230
3900347	Inactivo	APEX	09/11/2005	03/11/2010	237
3900715	Inactivo	SOLO_W	25/10/2008	08/04/2014	276
3900729	Inactivo	SOLO_W	17/11/2008	05/03/2015	302

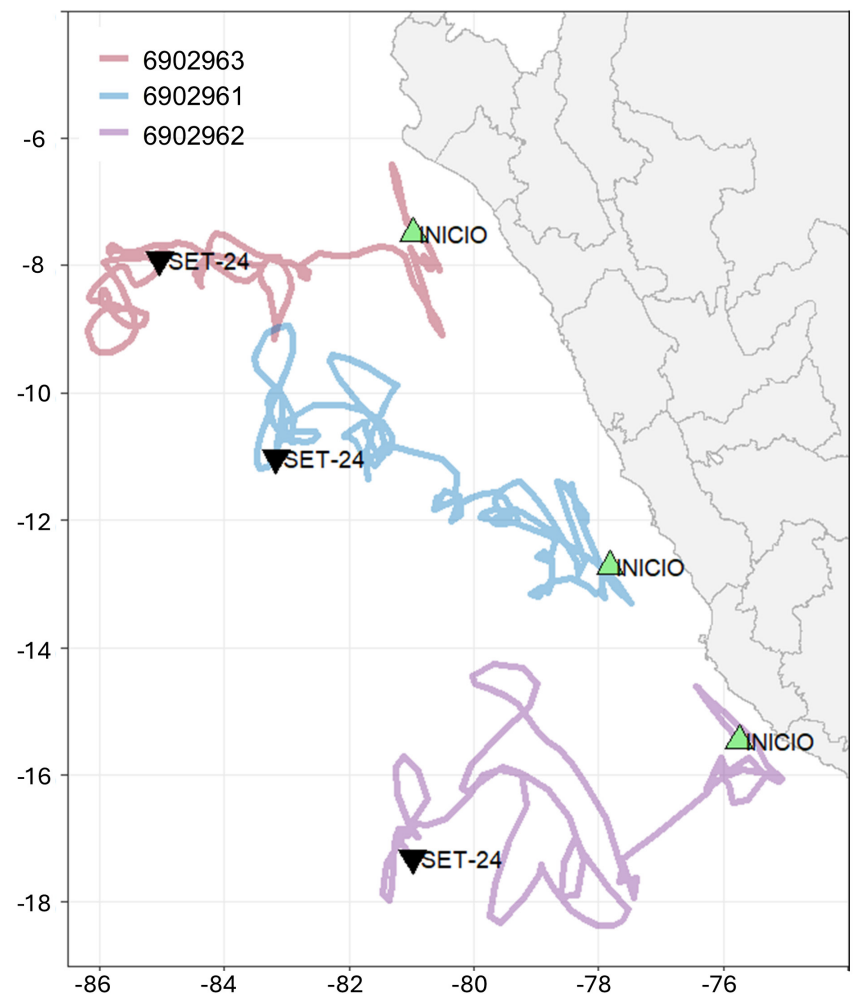
### 3. Resultados preliminares

La Figura 1 muestra la distribución espacial promedio de las concentraciones de oxígeno disuelto en el Pacífico sudeste según las diferentes bases de datos utilizadas, donde claramente se puede identificar el núcleo de la ZMO ( $O_2 \leq 20 \mu\text{mol/kg}$ , la línea roja) vista como en forma de lengua que se proyecta mar adentro. Su límite norte está orientado zonalmente, mientras que su límite sur presenta una marcada orientación noroeste-sureste. Sin embargo, entre las bases de datos se muestran algunas diferencias destacables.

A los 200 m de profundidad, en la frontera oeste, alrededor de los  $97^\circ\text{O}$ , los límites norte y sur de la ZMO alcanzan el área comprendida entre los  $5^\circ$  y  $13^\circ\text{S}$  en GOBAL, envolviendo una zona moderada de baja concentración de  $O_2$ . En cambio, en WOA23 y CARS09, el núcleo de la ZMO ocupa un área ligeramente menor y rodea una zona de baja concentración de  $O_2$ , que es más extensa en WOA23 que en CARS09 (Figura 1). En el caso de WOA09, el área se limita a una franja mucho más estrecha, alcanzando aproximadamente entre los  $10^\circ$  y  $12^\circ\text{S}$  a los  $97^\circ\text{O}$ , también envolviendo una zona de baja concentración de  $O_2$  moderada. No obstante, todas las bases de datos coinciden en que el límite sur de la ZMO, frente a la costa sudamericana, alcanza los  $35^\circ\text{S}$ .

A los 700 m de profundidad, el núcleo de la ZMO se reduce considerablemente, restringiéndose únicamente frente a la costa peruana en todas las bases de datos. En este nivel, GOBAL y WOA23 muestran una mayor extensión del área, seguida por WOA09, siendo considerablemente menor que CARS09.

La Figura 3 muestra las trayectorias espaciales de los tres flotadores ARGO seleccionados para esta investigación, lanzados frente a la costa norte (6902963), centro (6902961) y sur (6902962) del Perú entre setiembre y octubre de 2021. Las trayectorias de los flotadores 6902961 y 6902963 describen recorridos predominantemente hacia el noroeste, evidenciando ser principalmente impulsados por las corrientes oceánicas. En contraste, el flotador 6902962 parece estar influenciado por la actividad de mesoescala.



**Figura 3.** Mapa que muestra las trayectorias de los tres flotadores seleccionados (en colores) para este estudio, los cuales forman parte del proyecto SEPICAF fase 1 (Montes et al., 2024). El triángulo verde señala la posición de lanzamiento frente a la costa peruana (entre setiembre y octubre de 2021), mientras que el triángulo negro indica el corte temporal, es decir, su posición final, del análisis (setiembre de 2024).

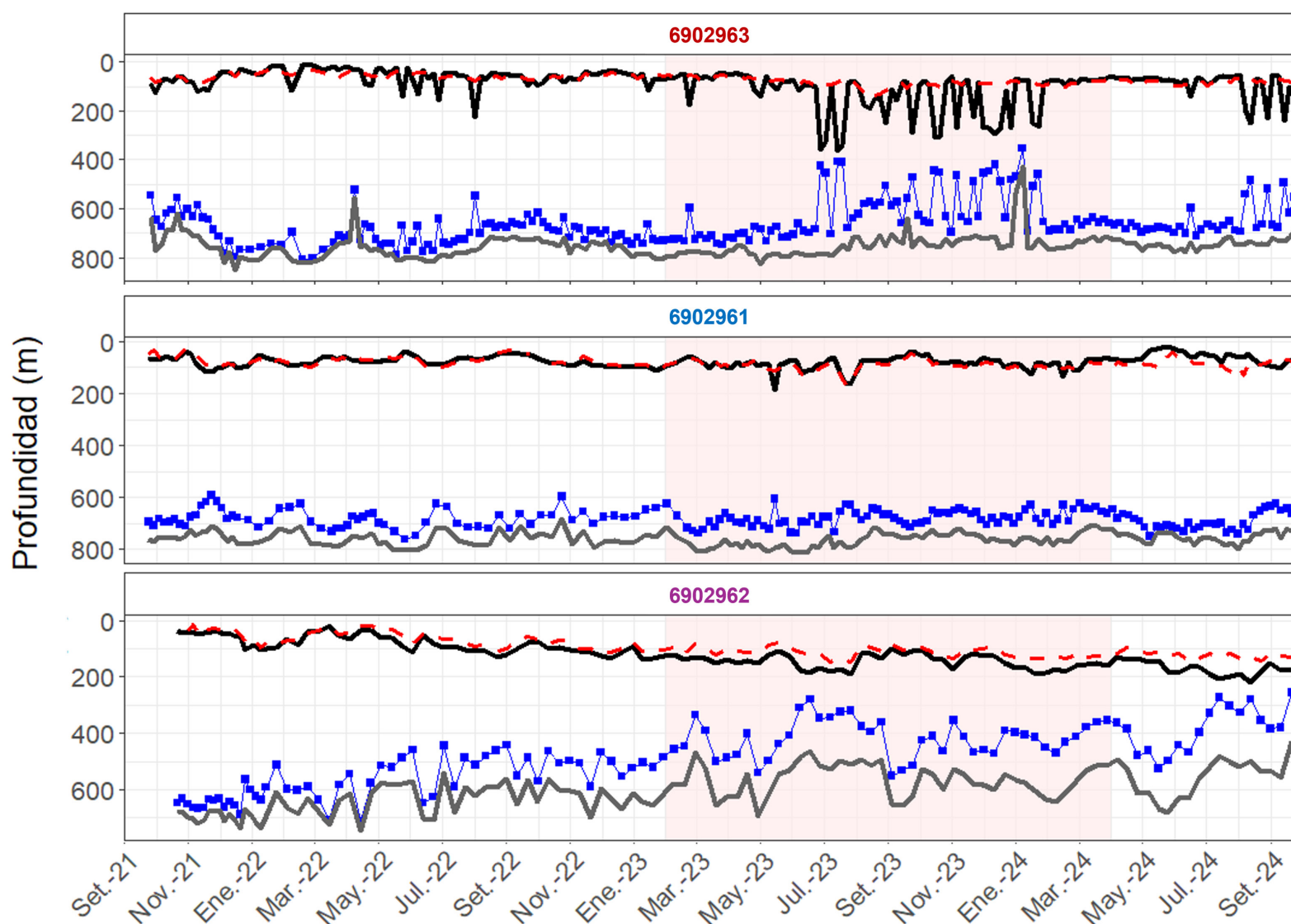
Por otro lado, el análisis de la distribución vertical a lo largo de cada trayectoria (Figura 4) muestra que los límites superior (línea negra) e inferior (línea gris) del núcleo de la ZMO tiene una marcada variabilidad espacio-temporal a lo largo de la columna de agua. Esta dinámica es especialmente pronunciada en el flotador 6902963, desplegado en el norte, y en el flotador 6902962, ubicado en la región sur frente a Perú. Ambos registraron una alta variabilidad vertical en los límites de la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO), en contraste con el comportamiento más estable observado en el flotador central (6902961).

En el caso del flotador 6902963, el límite superior de la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO) presenta una alta variabilidad, mostrando una profundización significativa entre julio de 2023 y enero de 2024. Este descenso es particularmente notorio hacia los  $84^\circ\text{O}$  (Figura 5), donde se alcanzan profundidades cercanas a los 400m (Figura 4).

El contraste de este comportamiento con el de la isoterma de 15°C, indica que la dinámica de la ZMO no está determinada exclusivamente por la temperatura en esa región. Esta discrepancia se debe a que la formación, mantenimiento, ventilación y variabilidad espacio-temporal de la ZMO están regulados por un complejo balance entre procesos físicos y biogeoquímicos (Paulmier et al., 2006; Breitburg et al., 2018). Entre los procesos físicos, la advección por corrientes subsuperficiales ecuatoriales (Corriente Ecuatorial Subsuperficial-EUC, Contracorriente Subsuperficial Sur Primaria-pSSCC y la Contracorriente Subsuperficial Sur Secundaria-sSSCC) desempeña un rol crucial. Mediante simulaciones numéricas, Montes et al. (2014) demostraron que, en términos absolutos, los cambios en el oxígeno asociados a estas advecciones dominan la dinámica de la ZMO en el océano abierto, superando en un orden de magnitud los efectos de los procesos biogeoquímicos. Además, Pizarro-Koch et al. (2019) mostraron que la actividad de mesoescala también modula el contenido de oxígeno en la ZMO a través de flujos inducidos por remolinos y jets zonales alternantes, especialmente en su límite sur. Esta

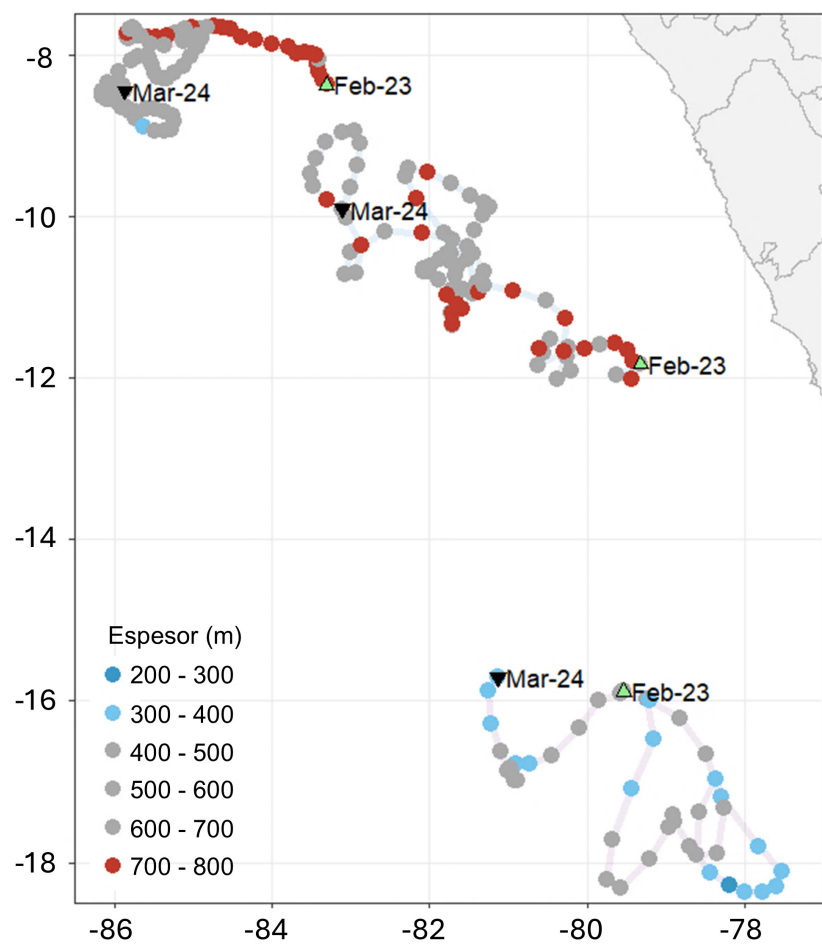
modulación refuerza la importancia de los mecanismos físicos en la dinámica estacional y espacial de la ZMO, mientras que los procesos biogeoquímicos y la mezcla vertical estarían jugando un rol secundario en su variabilidad a escala estacional.

Paralelamente, el límite inferior del flotador 6902963 mostró una ligera, pero sostenida tendencia hacia la superficialización, más evidente durante el periodo cálido, con profundidades promedio cercanas a los 700 m. De forma similar, el flotador de la zona sur (6902962) presentó una superficialización más pronunciada del límite inferior, alcanzando profundidades de hasta 500 m. En conjunto, estos cambios reflejan una contracción vertical de la ZMO, cuyo espesor se redujo de aproximadamente 500 m a 300 m de forma intermitente entre julio de 2023 y enero de 2024. Estos resultados ponen en evidencia la alta sensibilidad de la ZMO frente a las anomalías oceanográficas asociadas a eventos climáticos extremos como El Niño, y subrayan la influencia moduladora de factores locales, como la topografía, la circulación regional y la interacción con estructuras de mesoescala.



**Figura 4.** Serie temporal del límite superior (línea negra), límite inferior (línea gris), espesor de la ZMO (línea con cuadrados azules) y profundidad de la isoterma de 15°C (línea discontinua roja) para los tres flotadores seleccionados. El área sombreada en rojo corresponde al periodo del evento El Niño costero (febrero de 2023 a marzo de 2024).

Durante el periodo comprendido entre febrero 2023 y marzo 2024, se desarrolló un evento El Niño, clasificado como El Niño Costero de magnitud fuerte por el ENFEN (2024), el cual produjo alteraciones significativas en las condiciones océano-atmosféricas de la región. Entre las variables afectadas se encuentra la concentración de oxígeno disuelto, cuya distribución vertical experimentó cambios notables debido a la intensificación de la estratificación térmica y al calentamiento superficial del mar, fenómenos típicos de la dinámica asociada a eventos El Niño.



**Figura 5.** Mapa mostrando las trayectorias de los tres flotadores seleccionados durante el periodo del evento El Niño costero (febrero de 2023 - marzo de 2024). Cada punto representa una medición individual. Los colores azul y celeste indican un espesor de la ZMO menor a 400 m, mientras que los puntos rojos representan espesores superiores a 700 m.

Estos impactos se reflejan en la evolución tridimensional de la ZMO: en los flotadores ubicados en el norte y centro (6902963 y 6902961), se observó un incremento en la amplitud vertical de la ZMO, que superó los 700 m durante el periodo analizado (Figura 5). Esta expansión estaría relacionada con la disminución de la ventilación vertical y el debilitamiento del aporte de aguas subsuperficiales ricas en oxígeno. Por el contrario, el flotador 6902962, ubicado frente al sur del Perú, mostró un comportamiento opuesto, con una contracción de la ZMO que no superó los 300 m de espesor.

Esta diferencia sugiere la influencia de procesos de mesoescala, así como la dinámica regional modulada por el anticiclón del Pacífico Sur, los cuales habrían favorecido una mayor ventilación en esta zona durante el desarrollo del evento.

## 4. Conclusiones y perspectivas

Resulta importante destacar que los datos analizados constituyen una fuente valiosa de información observacional sobre las condiciones físico-químicas del océano, fundamentales tanto para la investigación científica como para el monitoreo operativo. En particular, las bases de datos climatológicas grilladas se utilizan principalmente como forzantes de modelos físico-biogeoquímicos regionales (e.g., Montes et al., 2014) y para la generación de anomalías. Por su parte los flotadores ARGO representan una herramienta clave para el monitoreo casi en tiempo real (e.g., <http://met.igp.gob.pe/variabclim/argo.html>, Rivera & Mosquera, 2019), la validación de modelos regionales, su asimilación en modelos globales, y como fuente para la construcción de las propias bases grilladas.

Para nuestra región de estudio, definida como un Sistema de Afloramiento de Borde Oriental (EBUS, por sus siglas en inglés), se evidencian discrepancias importantes entre las bases de datos climatológicas empleadas (GOBAI, WOA23, CARS09, WOA09), tanto en la extensión horizontal como en la ubicación y configuración del núcleo de la ZMO. Estas diferencias podrían atribuirse a las limitaciones inherentes de cada base de datos, como la resolución espacial, la frecuencia de muestreo y los métodos de interpolación utilizados. No obstante, reflejan principalmente la baja densidad de datos disponibles en la región del presente estudio. En este contexto, el uso de flotadores ARGO surge como una herramienta alternativa clave para suplir el vacío de las observaciones y proporcionar una resolución espacio-temporal adecuada para el estudio detallado de procesos oceanográficos y biogeoquímicos del Pacífico sudeste.

## Referencias

- Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G. S., Limburg, K. E., Montes, I., Naqvi, S. W. A., Pitcher, G. C., Rabalais, N. N., Roman, M. R., Rose, K. A., Seibel, B. A., Telszewski, M., Yasuhara, M., & Zhang, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371). <https://doi.org/10.1126/science.aam7240>
- Breitburg, D. -, Baumann, H., Sokolova, I. M., & Frieder, C. A. (2019). Multiple stressors—forces that combine to worsen deoxygenation and its effects. En Laffoley, D. & Baxter, J.M. (Eds.). *Ocean Deoxygenation: Everyone's problem - Causes, impacts, consequences and solutions*. IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.13.en>
- Chavez, F. P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P., & Csirke, J. (2008). The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 95-105.
- ENFEN. (2024) Definición operacional de los eventos El Niño costero y La Niña costera en el Perú. [Nota Técnica N° 01, 7p]. Comité Técnico del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño. <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-01-2024-definicion-operacional-de-los-eventos-el-nino-costero-y-la-nina-costera-en-el-peru/?wpdmml=1905&ind=1733921744133>
- Fuenzalida, R., Schneider, W., Garces, J., Bravo, L. & Lange, C. (2009). Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean, Deep-Sea Research. Part II, Topical Studies in Oceanography, 56(16), 992–1003, <https://doi:10.1016/j.dsr2.2008.11.001>
- Garçon, V., Dewitte, B., Montes, I., & Goubanova, K. (2019). Land-Sea-Atmosphere interactions exacerbating ocean deoxygenation in Eastern Boundary Upwelling Systems (EBUS). En Laffoley, D. & Baxter, J.M. (Eds.). *Ocean Deoxygenation: Everyone's problem - Causes, impacts, consequences and solutions* (pp. 171-186). IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.13.en>
- Helly, J. J., & Levin, L. A. (2004). Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Research. Part I, Oceanographic Research Papers*, 51(9), 1159–1168. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.03.009>
- Manay, R., Montes, I., Campos, F. y, Segura, B. (2021). El afloramiento costero en el sistema de corrientes de Humboldt frente a Perú. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, 8(4), 16-21. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5333>
- Montes, I., Dewitte, B., Gutknecht, E., Paulmier, A., Dadou, I., Oschlies, A., & Garçon, V. (2014). High-resolution modeling of the Eastern Tropical Pacific oxygen minimum zone: Sensitivity to the tropical oceanic circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8), 5515-5532. <https://doi.org/10.1002/2014JC009858>
- Montes, I., Mosquera, K. & Dewitte, B. (2024). South Eastern Pacific Circulation from ARGO floats (SEPICAF): estado actual y perspectivas. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, 11(4), 11-16. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5635>
- Morée, A. L., Clarke, T. M., Cheung, W. W. L., & Frölicher, T. L. (2023). Impact of deoxygenation and warming on global marine species in the 21st century. *Biogeosciences*, 20(12), 2425-2454. <https://doi.org/10.5194/bg-20-2425-2023>
- Morris, T., Scanderbeg, M., West-Mack, D., Gourcuff, C., Poffa, N., Bhaskar, T. V. S. U., Hanstein, C., Diggs, S., Talley, L., Turpin, V., & Liu, Z. (2024). Best practices for Core Argo floats - part 1: getting started and data considerations. *Frontiers in Marine Science*, 11. 1358042. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1358042>
- Ministerio de la Producción. (2024). PBI del sector Pesca creció 24.9% durante el 2024 por el impulso de la anchoveta. *Gob.pe - Plataforma Digital Única del Estado Peruano*. <https://www.gob.pe/institucion/produce/noticias/1100218-produce-pbi-del-sector-pesca-crecio-24-9-durante-el-2024-por-el-impulso-de-la-anchoveta>
- Paulmier, A., & Ruiz-Pino, D. (2009). Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Progress in Oceanography*, 80(3-4), 113–128. <https://doi: 10.1029/j.pocean.2008.08.001>
- Pitcher, G. C., Aguirre-Velarde, A., Breitburg, D., Cardich, J., Carstensen, J., Conley, D. J., Dewitte, B., Engel, A., Espinoza-Morriberón, D., Flores, G., Garçon, V., Graco, M., Grégoire, M., Gutiérrez, D., Hernandez-Ayon, J. M., Huang, H. M., Isensee, K., Jacinto, M. E., Levin, L., Lorenzo, A., Machu, E., Merma, L., Montes, I., SWA, N., Paulmier, A., Roman, M., Rose, K., Hood, R., Rabalais, N., Salvanes, A.; Salvattecí, R., Sánchez, S., Sifeddine, A., Tall, A., Plas, A., Yasuhara, M, Zhang, & Zhu, Z. (2021). System controls of coastal and open ocean oxygen depletion. *Progress in Oceanography*, 197, 102613. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102613>

Pizarro-Koch, M., Pizarro, O., Dewitte, B., Montes, I., Ramos, M., Paulmier, A., & Garçon, V. (2019). Seasonal variability of the southern tip of the Oxygen Minimum Zone in the eastern South Pacific (30-38 S): A modeling study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(12), 8574-8604.

Rivera, G. & Mosquera, K. (2019). Disponibilidad de flotadores ARGO para el monitoreo oceánico continuo frente a la costa sudamericana. *Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 6 (7), 9-12.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12816/4707>

Roman, M. R., Altieri, A. H., Breitbart, D., Ferrer, E. M., Gallo, N. D., Ito, S. I., Limburg, K., Rose, K., Yasuhara, M., & Levin, L. A. (2024). Reviews and syntheses: Biological indicators of low-oxygen stress in marine water-breathing animals. *Biogeosciences*, 21(22), 4975-5004.  
<https://doi.org/10.5194/bg-21-4975-2024>

Sharp, J. D., Fassbender, A. J., Carter, B. R., Johnson, G. C., Schultz, C., & Dunne, J. P. (2023). GOBAI-O<sub>2</sub>: temporally and spatially resolved fields of ocean interior dissolved oxygen over nearly 2 decades. *Earth System Science Data*, 15(10), 4481-4518.  
<https://doi.org/10.5194/essd-15-4481-2023>

Wyrtki, K. (1962). The oxygen minima in relation to ocean circulation, *Deep-Sea Research Oceanographic Abstracts*, 9(1), 11-23.  
[https://doi.org/10.1016/0011-7471\(62\)90243-7](https://doi.org/10.1016/0011-7471(62)90243-7)

# RESUMEN INFORME TÉCNICO

## n.º PPR/EL NIÑO-IGP/2025-05

Publicado el 12 de junio de 2025

En abril, el valor del Índice Costero El Niño (ICEN) se ubicó en la categoría Neutra (0.46); esta misma categoría presentan los ICEN temporales (ICEN-tmp) de mayo (0.22) y junio (0.08). Por otro lado, el promedio de los pronósticos de los modelos climáticos de NMME indican, a la fecha, que las anomalías de la temperatura superficial del mar frente a la costa norte y centro del Perú oscilarían dentro de la categoría Neutra hasta finales del verano de 2026.

En el Pacífico central, el Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de abril (-0.09), así como sus temporales de mayo (-0.13) y junio (-0.09), corresponden a la categoría Neutra. Según el promedio de los pronósticos generados por los modelos climáticos de NMME, se prevé condiciones dentro de la categoría Neutra hasta finales del verano de 2026.

Cabe señalar que los pronósticos de los modelos climáticos aún podrían estar influenciados por la llamada “barrera de predictibilidad” del ENOS, aunque en menor medida que en los meses anteriores.

El informe técnico completo se encuentra disponible en:

<http://bit.ly/4oxVmZE>



“Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres”  
“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

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/2025-05

12/06/2025

**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 abril, el valor del Índice Costero El Niño (ICEN) se ubicó en la categoría Neutra (0.46); esta misma categoría presentan los ICEN temporales (ICEN-tmp) de mayo (0.22) y junio (0.08). Por otro lado, el promedio de los pronósticos de los modelos climáticos de NMME indican, a la fecha, que las anomalías de la temperatura superficial del mar frente a la costa norte y centro del Perú oscilarían dentro de la categoría Neutra hasta finales del verano de 2026.

En el Pacífico central, el Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de abril (-0.09), así como sus temporales de mayo (-0.13) y junio (-0.09), corresponden a la categoría Neutra. Según el promedio de los pronósticos generados por los modelos climáticos de NMME, se prevé condiciones dentro de la categoría Neutra hasta finales del verano de 2026.

Cabe señalar que los pronósticos de los modelos climáticos aún podrían estar influenciados por la llamada “barrera de predictibilidad” del ENOS, aunque en menor medida que en los meses anteriores.

www.igp.gob.pe  
Calle Rodóñez N° 169  
Urb. Moyazapa IV Etapa  
Ato. Lima 15012 - Perú.  
(51) 13172900



**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

## EFEN n.º 07 - 2025



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>**

Publicado el 13 de junio de 2025

La Comisión Multisectorial del ENFEN, en base al análisis de las condiciones oceánicas y atmosféricas observadas hasta la fecha, así como de los pronósticos de los modelos climáticos nacionales e internacionales, mantiene el Estado del Sistema de Alerta ante El Niño costero/La Niña costera en "No Activo" en la región Niño 1+2 (Figura 1). Por lo pronto, es más probable que la temperatura superficial del mar en dicha región continúe, en promedio, con valores dentro de las condiciones neutras<sup>2</sup> hasta enero de 2026. Para el verano de 2026, existe una probabilidad de 61% de presentarse condiciones neutras (Tabla 1, Figura 2).

Asimismo, en el Pacífico central (región Niño 3.4, Figura 1) se prevé que la condición neutra continúe, siendo más probable hasta el verano de 2026 (Tabla 2, Figura 2). Hay que tomar en cuenta que los pronósticos de los modelos climáticos aún podrían estar

influenciados en otoño por la barrera de predictibilidad<sup>3</sup>, aunque en menor medida que en los meses anteriores.

Según el pronóstico estacional vigente para el trimestre junio – agosto<sup>4</sup> de 2025, es más probable que las temperaturas del aire registren valores entre normales y por encima de lo normal en gran parte del territorio nacional, a excepción de la costa centro y sur que presentarían condiciones térmicas entre normales y ligeramente frías, principalmente durante el periodo nocturno. Asimismo, es probable que las regiones andina y amazónica presenten lluvias entre normales y sobre lo normal para este trimestre; asociado a ello, se estima que los caudales de los ríos de la vertiente occidental norte y centro aún superen sus rangos estacionales durante junio, con una tendencia a la normalización en los meses siguientes<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> No activo: Ocurre cuando se presentan condiciones neutras o, cuando de acuerdo al análisis de las condiciones oceánicas y atmosféricas observadas y de la predicción de los modelos climáticos, el pronóstico probabilístico mensual del Índice Costero El Niño (ICEN) indica que la probabilidad de la categoría neutra superará el 50% durante al menos los siguientes tres meses consecutivos (Nota Técnica ENFEN 02-2024; <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-efen-02-2024-sistema-de-alerta-ante-el-nino-y-la-ninacostera/?wpdmdl=1906&refresh=684a1c6b8f2e71749687403>)

<sup>2</sup> Las condiciones mensuales se establecen en base al valor del ICEN. En el caso de la condición neutra, esta corresponde cuando el valor del ICEN es mayor o igual que -0.7 y menor o igual que +0.5 (Nota Técnica ENFEN 01-2024; <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-efen-01-2024-definicion-operacional-de-los-eventos-el-nino-costero-y-la-ninacostera-en-el-peru/>). Para el caso del Pacífico central, la condición neutra se considera cuando el valor del ONI es mayor que -0.5 y menor que +0.5 ([https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)).

<sup>3</sup> <https://doi.org/10.1002/joc.3513>

<sup>4</sup> <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-58.pdf>

En cuanto a los recursos pesqueros, para las próximas semanas se espera que en la región norte – centro la anchoveta presente rendimientos de acuerdo al avance de la temporada de pesca. En el caso de las especies trans-zonales, se prevé que continúe la disponibilidad de bonito a lo largo del litoral peruano. En cuanto a la merluza, se prevé que la baja disponibilidad para la pesquería industrial observada en mayo se mantenga; mientras que habría una mayor presencia de ejemplares por encima de los 35 cm al norte de Cabo Blanco. La disponibilidad del calamar gigante a la pesquería mantendría condiciones similares a las observadas en abril y mayo.

Se recomienda a los tomadores de decisiones adoptar medidas correspondientes a la prevención y reducción del riesgo de desastres, durante el periodo de condiciones neutras. Asimismo, hacer el seguimiento de los avisos meteorológicos<sup>6</sup> y pronósticos estacionales<sup>7</sup>, para las acciones correspondientes. Por otro lado, se exhorta a la población a mantenerse informada a través de las fuentes oficiales del ENFEN.

La Comisión Multisectorial del ENFEN continuará monitoreando la evolución de las condiciones oceánicas, atmosféricas y biológicas-pesqueras, y actualizando las perspectivas. La emisión del próximo Comunicado Oficial ordinario será el martes 15 de julio de 2025.

- Puede acceder a leer en comunicado en su totalidad a través del siguiente enlace:  
<http://bit.ly/4mwVWFt>

#### INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN



<sup>5</sup> <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-59.pdf>

<sup>6</sup> <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=aviso-meteorologico>

<sup>7</sup> <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=pronostico-climatico>



-  @igp.peru
-  @igp\_peru
-  @igp.peru
-  @igp\_videos
-  @institutogeofisicodelperu
-  @igp.peru