

# IMPLEMENTACIÓN DEL COMPONENTE ACOPLADO OCÉANO-ATMÓSFERA DEL MODELO REGIONAL DEL SISTEMA TIERRA (RESM) EN MODO PRONÓSTICO PARA EL TERRITORIO PERUANO Y EL OCÉANO PACÍFICO ORIENTAL: PERIODO ENERO-JULIO 2023

**Berlín Segura<sup>1</sup>, Ivonne Montes<sup>1</sup>, Fiorela Castellón<sup>1</sup>, Roger Manay<sup>1</sup>, Ken Takahashi<sup>1</sup>**

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

**Palabras clave:** Modelo regional del sistema tierra, RESM, CROCO, OASIS, WRF, ENSO, acoplamiento océano-atmósfera, pronóstico

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

## Resumen

Este avance de investigación tiene como propósito mostrar el progreso de la implementación de la componente acoplada océano-atmósfera del Modelo Regional del Sistema Tierra (RESM), cuyo objetivo final es su empleo como herramienta de predicción para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno “El Niño” (ENFEN).

## 1. Introducción

El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es uno de los modos de variabilidad climática más importantes en el océano Pacífico (Dewitte et al., 2014), con gran influencia sobre las precipitaciones a nivel global y regional. En el Perú, durante la

fase fría del ENSO, La Niña en el océano Pacífico central incrementa las precipitaciones en la sierra sur (Barreiro et al., 2016), así como en la región noreste del altiplano-Puno (Sulca et al., 2018). Por otro lado, El Niño en el océano Pacífico oriental es el que causa mayores impactos a través del incremento de las precipitaciones y olas de calor en la costa norte, mientras que El Niño en el océano Pacífico central puede resultar en sequías en los Andes y la Amazonía (Takahashi, 2022). Esto afecta enormemente el ámbito socioeconómico (Cai et al., 2020), ya que provoca daños a la infraestructura (Machuca et al., 2014), la agricultura (Heino et al., 2018) y pesca (Bertrand et al., 2020), entre otros.

El Perú, como parte de la estrategia de gestión pública para enfrentar al ENSO, especialmente respecto al Niño, establece el Programa Presupuestal por

Resultados (PPR) 068 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. El Instituto Geofísico del Perú (IGP), al igual que otras instituciones que conforman la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno “El Niño”, participa en este PPR con el producto denominado “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”. Este producto consiste en la entrega en forma oportuna de información científica, mediante informes técnicos mensuales, sobre el monitoreo y pronóstico de este evento natural oceánico-atmosférico que permita la toma de decisiones a autoridades a nivel nacional y regional.

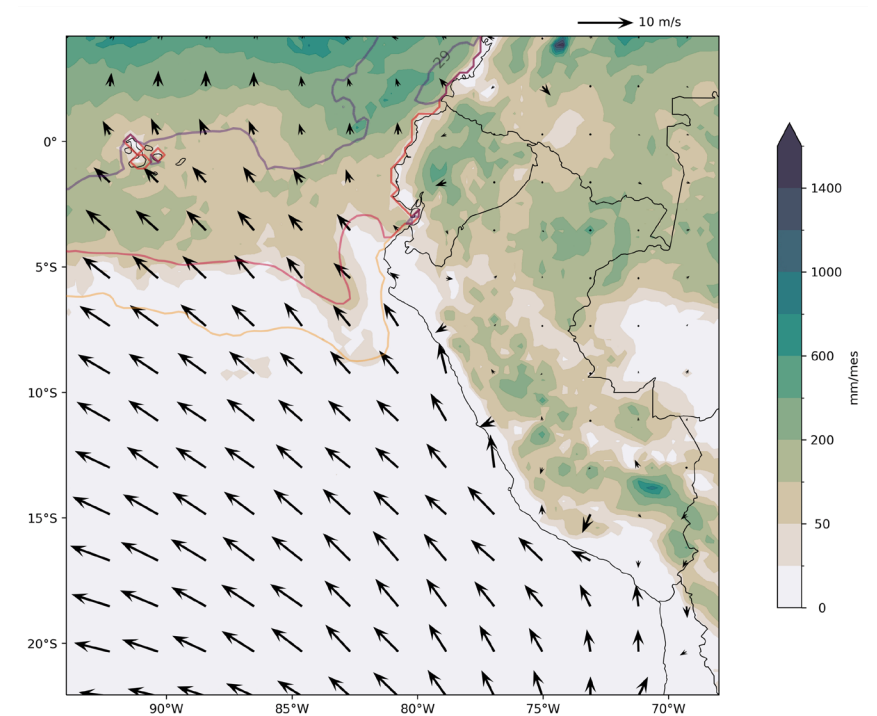
El IGP, pionero en el modelado numérico en el Perú y como parte del producto antes mencionado, viene desarrollando e implementando actualmente el componente acoplado océano-atmósfera (Segura & Montes, 2021; Castellón et al., 2023) del Modelo Regional del Sistema Tierra (RESM, por sus siglas en inglés), haciendo uso del sistema computacional de alto rendimiento HPC-Linux-Clúster (Montes et al., 2016), cuyo fin último es su utilización como herramienta de pronóstico. El presente artículo tiene como objetivo mostrar los avances de la implementación del componente acoplado océano-atmósfera del Modelo Regional del Sistema Tierra (RESM), los que son descritos en las siguientes secciones.

## 2. Metodología

El componente acoplado océano-atmósfera del RESM se construye sobre la base del modelo oceánico regional CROCO (*Coastal and Regional Ocean COmmunity model*; Debreu et al., 2012), el modelo atmosférico WRF (*Weather Research and Forecasting model*; Skamarock et al., 2019) y el acoplador OASIS (*Ocean Atmosphere Sea Ice Surface*; Valcke et al., 2013).

CROCO es el nuevo modelo oceánico construido con base en ROMS (Sistema Regional de Modelado Oceánico; Shchepetkin y McWilliams, 2005), diseñado para simular la circulación a escalas espaciales muy finas y su interacción con escalas mayores. WRF está diseñado para ser un sistema de simulación atmosférica flexible, portátil y eficiente en una plataforma de cálculo paralela (Skamarock et al., 2019). OASIS tiene como función principal el intercambiar e interpolar los campos de acoplamiento

entre los modelos CROCO y WRF. WRF envía a CROCO, cada hora, los promedios de las simulaciones horarias del esfuerzo de viento zonal y meridional, de los flujos radiativos de onda corta y larga y de los flujos de agua dulce (evaporación-precipitación). En tanto, CROCO envía al WRF, cada hora, el promedio horario de la temperatura superficial del mar (TSM; ver Segura & Montes, 2021 para más detalles).



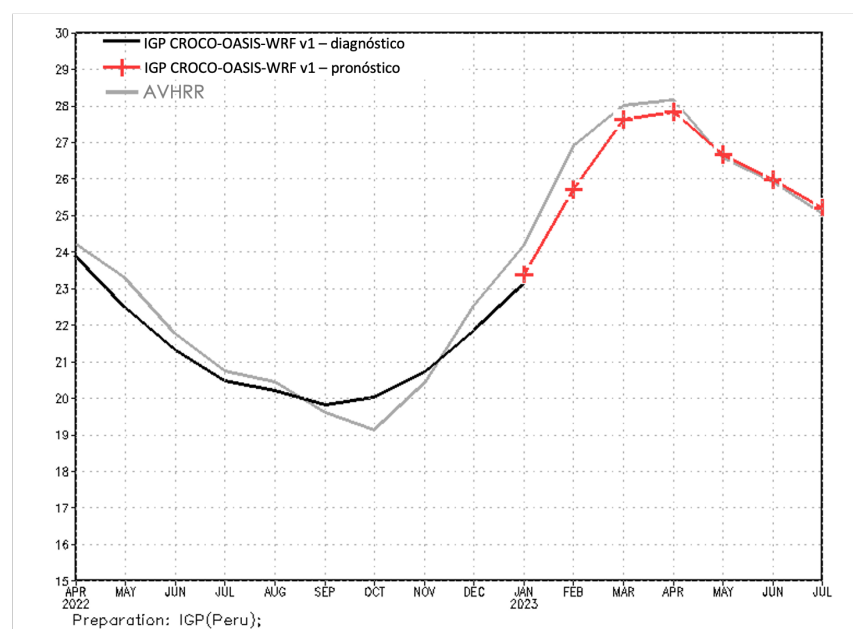
**Figura 1.** Promedios mensuales de la precipitación, vientos en superficie y contornos de TSM (27 °C, 28 °C y 29 °C, línea amarilla, roja y morada, respectivamente) calculados a partir de las salidas del componente acoplado océano-atmósfera del RESM en modo pronóstico durante abril de 2023 con condición inicial enero de 2023.

La configuración del modelo acoplado CROCO-OASIS-WRF para el territorio peruano (Figura 1) se realiza bajo dos modos denominados diagnóstico y pronóstico. El periodo de diagnóstico se refiere a una corrida histórica que abarca el periodo 2000-2022 (Segura & Montes, 2021), mientras que el periodo de pronóstico se refiere a una corrida futura con un horizonte de 7 meses que hace uso de los datos provenientes del Sistema de Pronóstico Climático (*Climate Forecast System-CFS*) para el periodo enero-julio de 2023. Cabe señalar que los datos de modelos globales muestran sesgos de sobreestimación de la temperatura y precipitación en el océano Pacífico oriental, por ejemplo, en la región El Niño 1+2; en el caso de modelos de pronóstico, se observa que existe una “deriva” al establecerse progresivamente dicho sesgo. Por ello, se debe realizar una corrección a los

datos de los modelos globales de pronóstico utilizados como condición de frontera para el RESM para evitar que dichos sesgos contaminen la simulación regional. Para estas correcciones, se ha calculado el error promedio climatológico de los datos retrospectivos de CFS para cada mes de condición inicial y de pronóstico (para 12 meses de condición inicial por año y hasta 7 meses de pronóstico por corrida, se tiene un total de  $12 \times 7 = 84$  promedios).

### 3. Resultados preliminares

Se han efectuado varias corridas experimentales del componente acoplado océano-atmósfera del RESM en modo pronóstico, lo que ha permitido (1) evaluar las técnicas necesarias (tanto de personal como computacionales) para completar la implementación, (2) aplicar la corrección climatológica a todos los datos que forman parte de las condiciones de frontera del modelo y (3) evaluar el realismo de la simulación ejecutada.



**Figura 2.** Serie de tiempo del promedio mensual de la temperatura superficial del mar en la región Niño 1+2 calculada con las salidas del modelo acoplado en modo diagnóstico, periodo 2000-2022 (línea negra, que es usada como condición inicial para el modo pronóstico), modo pronóstico, periodo enero-julio de 2023 (línea roja) y los datos observados del AVHRR (línea gris).

Respecto al realismo de la simulación, la validación preliminar de la implementación en modo pronóstico del periodo enero-julio de 2023 muestra que el modelo acoplado es capaz de reproducir la dinámica de la región de estudio. Esto se observa en la Figura 2, donde se compara la temperatura superficial del mar (TSM) simulada en la región Niño 1+2 con la

TSM observada extraída del producto OISST AVHRR (es decir, la TSM de interpolación óptima diaria del satélite/sensor [NOAA/AVHRR: *Advanced Very High Resolution Radiometer*]) con resolución de 25 km.

### 4. Perspectivas

Se espera que, a corto plazo, el modelo RESM constituya una herramienta adecuada para predecir con anticipación las condiciones del océano-atmósfera, de necesaria importancia bajo el contexto del cambio climático que vivimos. A mediano plazo, se aspira a utilizar otros modelos globales para mejorar las condiciones de frontera del modelo. Asimismo, se espera integrar otros componentes del sistema Tierra, tal como el componente biológico, el cual podría incluir cambios en el tipo de cobertura vegetal en el continente, el ciclo de carbono o el aporte de microorganismos en el océano para los stocks de nutrientes y concentración de gases (oxígeno principalmente). Estos hitos demandan mayores recursos computacionales y masa crítica capacitada, es decir, investigadores, tesis, practicantes y otros servicios asociados para el desarrollo sostenido del modelo RESM, lo cual se traduce a un presupuesto consistente que asegure su sostenibilidad en el tiempo.

### Referencias

Barreiro, M. (2016). La Niña y sus teleconexiones. *Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 3 (8), 4-7.

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* No. 660. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8348en>

Cai, W., Wang, G., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., Jin, F.-F., Timmermann, A., Collins, M., Vecchi, G., Lengaigne, M., England, M. H., Dommenges, D., Takahashi, K., & Guilyardi, E. (2015). Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(2), 132–137. <https://doi.org/10.1038/nclimate2492>

Castillón, 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.

Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., y Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49, 1–21.

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>

Heino, M., Puma, M. J., Ward, P. J., Gerten, D., Heck, V., Siebert, S., & Kumm, 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>

Machuca, R., Takahashi, K. y Martínez, A. G. (2014). Impactos económicos de El Niño costero en el sector vivienda a causa de inundaciones en la costa norte del Perú. *Boletín técnico: Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 1 (12), 4-8.

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>

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, Vol. 8 n.º 02. págs. 12-17.

Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams, 2005: The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Modelling*, 9, 347–404.

Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J., Duda, M., Barker, D., y Huang, X. (2019). *A Description of the Advanced Research WRF Version 4*. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97

Sulca, J., Takahashi, K., Espinoza, J. C., Vuille, M., & Lavado-Casimiro, W. (2018). Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. *International Journal of Climatology*, 38(1), 420–435. <https://doi.org/10.1002/joc.5185>

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, vol. 9 n.º 07, págs. 5-13.

Valcke, S. (2013). The OASIS3 coupler: A European climate modelling community software, *Geoscientific Model Development*, 6(2), 373–388, doi:10.5194/gmd-6-373-2013