



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

EL PERÚ PRIMERO



BOLETÍN CIENTÍFICO EL NIÑO

Cambios en la estacionalidad de las lluvias en los Andes centrales peruanos y su relación con la circulación atmosférica a gran escala.

Pág. 4

Implementación y validación de un modelo oceánico multimodal.

Pág. 13

Resumen del informe técnico de El Niño.

Pág. 20

Comunicado ENFEN.

Pág. 21



IGP

Instituto
Geofísico
del Perú

CRÉDITOS

Kirla Echegaray Alfaro

Ministra del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú:

Hernando Tavera Huarache

Presidente Ejecutivo

Danny Scipión Castillo

Director Científico

Yamina Silva Vidal de Millones

Directora

Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera

Equipo editorial:

James Apaéstegui Campos

Kobi Mosquera Vásquez

Katherine Morón Rodríguez

Servicios externos:

Gianna Faccin Zaconett

Directora creativa

Wilfredo Paz Rodríguez

Diseño y diagramación

Lima, octubre de 2020

El boletín científico “El Niño” es generado en el marco del Programa Presupuestal N° 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

EDITORIAL

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), institución pública adscrita al Ministerio del Ambiente, tiene por finalidad generar, utilizar y transferir conocimientos e información científica y tecnológica en el campo de la geofísica y ciencias afines. El IGP forma parte de la comunidad científica internacional y contribuye a la gestión del riesgo de desastres en el Perú, con énfasis en la prevención y mitigación de desastres naturales y de origen antrópico.

El IGP, a través del Programa de Investigación en Variabilidad y Cambio Climático, genera conocimiento científico sobre los componentes del sistema climático (atmósfera, océano, suelo, biósfera y criósfera) y la interacción entre ellos. El Niño - Oscilación del Sur es uno de los principales modos de variabilidad, el cual es objeto de estudio en el programa de investigación, debido a la alta vulnerabilidad del Perú y los impactos negativos asociados.

Desde el 2014, el IGP y otras instituciones integrantes de la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno “El Niño” (ENFEN) participan en el Programa Presupuestal 068: “Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”- PREVAED, contribuyendo con el producto denominado “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”. El IGP realiza la síntesis y evaluación de los pronósticos de modelos climáticos internacionales, el desarrollo y validación de nuevos modelos, y otros estudios que fortalecen en forma continua la capacidad de monitoreo y pronóstico de El Niño en el Perú.

Con el fin de divulgar el conocimiento científico, el Instituto Geofísico del Perú presenta periódicamente sus investigaciones y avances en temas de variabilidad y cambio climático, a través de su Boletín Científico “El Niño”, tratando de presentar la información con un lenguaje sencillo y sintetizando los aspectos más relevantes de dichas

investigaciones. El objetivo es que las autoridades y técnicos especialistas en la gestión del riesgo de desastres (GRD) pertenecientes a los tres niveles de gobierno, así como el público en general interesado, puedan tener como fuente de conocimiento a los materiales de investigación que el IGP genera.

El presente ejemplar suma dos artículos de investigación. El primero es un trabajo publicado recientemente en la revista *Climate* que lleva el título en castellano “Cambios en la estacionalidad de las lluvias en los Andes centrales peruanos”, investigación que se enfoca en las evidencias sobre la reducción del periodo de lluvias en la cuenca del río Mantaro. El segundo artículo refiere los avances en el desarrollo e implementación de un modelo oceánico multimodal para el análisis de la dinámica del océano Pacífico ecuatorial, con énfasis en las dos fases de El Niño-Oscilación del Sur.

Como tercer punto del contenido de esta edición, se puede leer un resumen del informe técnico de El Niño, material que el IGP elabora mensualmente como parte de los compromisos asumidos en el marco del PPR 068. Este documento provee información actualizada sobre el pronóstico de El Niño y los procesos físicos asociados, utilizando diferentes modelos internacionales, así como los propios del IGP, los cuales son contrastados con los datos y observaciones disponibles.

Al final de este boletín también se incluye el resumen del Comunicado Oficial del ENFEN, indicando que mantiene el sistema de alerta en “No Activo” para el verano 2020. Se advierte que, en caso de discrepancias entre el Informe técnico de El Niño emitido por el IGP, prevalecerá la información emitida en el Comunicado Oficial del ENFEN.

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

CAMBIOS EN LA ESTACIONALIDAD DE LAS LLUVIAS EN LOS ANDES CENTRALES PERUANOS Y SU RELACIÓN CON LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA A GRAN ESCALA

Lucy Giráldez ¹, Yamina Silva ¹, Juan Sulca ¹ y Ricardo Zubieta ¹

RESUMEN

Los cambios en las fechas de inicio, finalización y duración de la temporada de lluvias en los Andes centrales del Perú, específicamente en la cuenca del río Mantaro (CRM), afectan gravemente la gestión de los recursos hídricos y las principales actividades económicas de la región (ej. agricultura de secano, ganadería, entre otras). Para evaluarlo, se usan datos diarios de lluvia observada de distintas fuentes durante el período 1965-2013. Para este período, la fecha promedio de inicio de la temporada de lluvias sobre la CRM ocurren entre el 19 y 23 de septiembre (pentada 17), en tanto que la finalización de la temporada de lluvias ocurre entre el 7 y 11 de abril (la pentada 57). La duración de la temporada de lluvias depende principalmente de la fecha de inicio, debido a que esta tiene una mayor variabilidad que la fecha de finalización. Se ha encontrado una reducción de 3 días por década en la duración de la temporada de lluvias sobre la CRM durante las últimas cuatro décadas, debido al retraso en el inicio de la temporada. Además, las condiciones El Niño favorecen el inicio tardío y la finalización temprana de la temporada de lluvias, es decir, una temporada de lluvias más corta. Por otro lado, La Niña favorece el inicio temprano y el final tardío de la temporada de lluvias, es decir una temporada más amplia.

El artículo científico original se encuentra en: <https://www.mdpi.com/2225-1154/8/2/23>

Palabras clave: Temporada de lluvias, fecha de inicio de lluvias, fecha de finalización de lluvias; estacionalidad de las lluvias; Andes centrales del Perú; cuenca del río Mantaro.

AFILIACIÓN:

1- Instituto Geofísico del Perú (IGP)

Citar como: Giráldez, L., R., Silva, Y., Zubieta, R., y Sulca, J. (2020). Cambios en la estacionalidad de las lluvias en los Andes centrales peruanos y su relación con la circulación atmosférica a gran escala. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, Vol. 7 N° 01, pag. 4-12.

INTRODUCCIÓN

La estación lluviosa es esencial para el desarrollo de varias actividades económicas en los Andes centrales peruanos como la agricultura, ganadería, generación de energía, agua potable, entre otros (Silva et al., 2008). El inicio de la temporada de lluvias es el factor más decisivo para la agricultura en secano de la cuenca del río Mantaro (CRM) (IGP, 2012; Figura 1). Los agricultores usan el inicio del período de lluvias como un indicador para la siembra. El retraso en el inicio de las lluvias y la intensa radiación existente en la CRM representan una limitación climática significativa para la agricultura, ya que dichas condiciones generan mayor evaporación del agua en el suelo, y, por ende, reducen la disponibilidad del recurso hídrico para las plantas, lo cual resulta, particularmente, perjudicial para la germinación de las semillas. A consecuencia de las condiciones anteriormente mencionadas, se reducen las superficies sembradas, cosechadas, y la producción de cultivos; por lo cual, muchos agricultores locales cambian de actividad económica debido a que no les resulta rentable sembrar con la incertidumbre de no saber si habrá o no lluvias durante la época de siembra.

Existen muchos estudios sobre el inicio de las lluvias en América del Sur, principalmente para la cuenca del río Amazonas. En el centro y sureste de Brasil, durante el período 1984–2004, el inicio de las lluvias fue tardía en un 17 % de los años y temprana en un 11 % (Raia & Cavalcanti, 2008). Las simulaciones realizadas con modelos climáticos globales indican que las fechas de inicio de lluvias se retrasan en algunas pentadas (PENs) (Latinović et al., 2019) y que existirá un acortamiento de las estaciones lluviosas para todo el África tropical y el noreste de Brasil bajo un escenario de calentamiento global de 1.5 °C y 2.0 °C (Saeed et al., 2018). Para los Andes del Perú se han realizado pocos estudios. Entre ellos, Silva y Mosquera (2012) encontraron un retraso de 26,3 días en la temporada de lluvias en la zona central de la CRM durante el período 1921–2010; sin embargo, no se pudo verificar el retraso de la temporada de lluvias para el resto de la CRM.

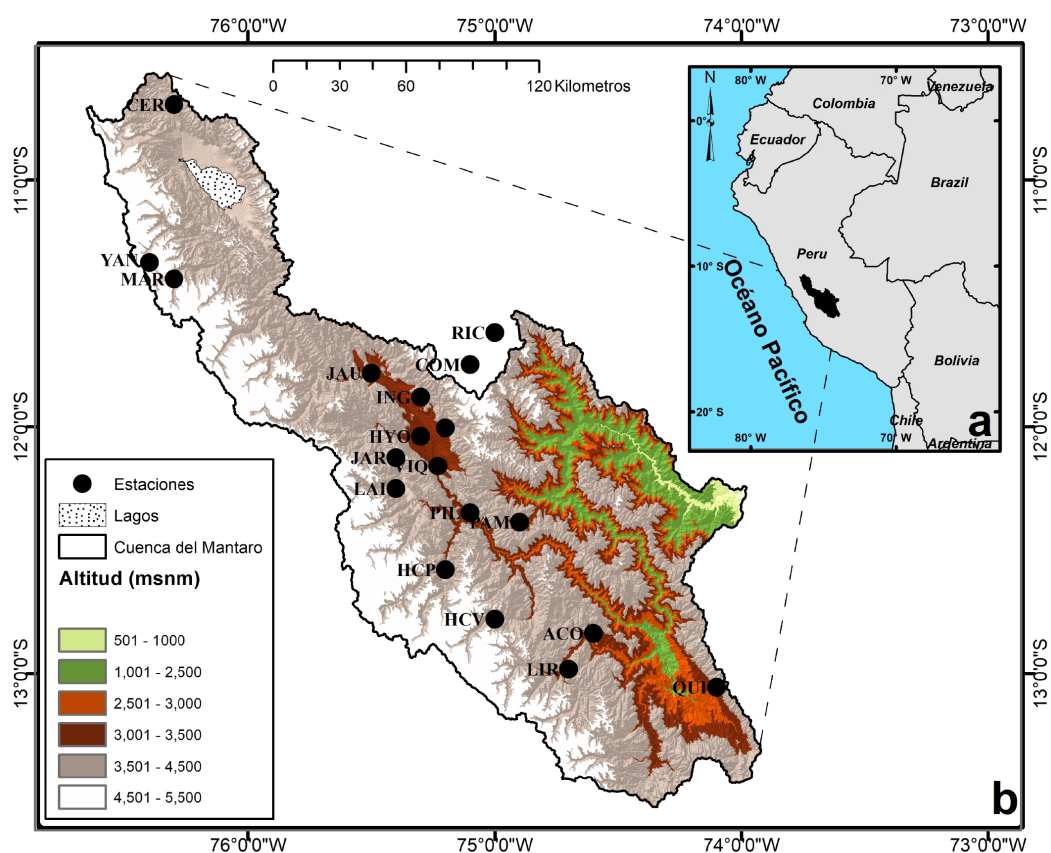


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Mantaro (CRM). Los puntos negros representan la ubicación de las estaciones utilizadas en este estudio. El sombreado representa la elevación topográfica en la CRM.

Investigar sobre los cambios en la estacionalidad de las lluvias es una prioridad en la región andina debido a los impactos que se generan en diversas actividades, especialmente en las prácticas culturales de la agricultura local. Por lo cual, el objetivo de este estudio es la documentación del cambio de las características climatológicas del ciclo estacional de las lluvias (inicio, finalización y duración) sobre CRM para el período 1965-2013 y su asociación con los patrones regionales de circulación atmosférica.

Este estudio contribuirá a una mejor comprensión de las causas de la variabilidad interanual de las fechas de inicio y finalización de las lluvias en la CRM. Los resultados pueden servir para sensibilizar a las personas y autoridades sobre cómo el cambio climático afecta la estacionalidad de las lluvias y cómo debemos adaptarnos.

DATOS Y METODOLOGÍA

Se han utilizado datos de precipitación diaria de 19 estaciones meteorológicas en la CRM (IGP, SENAMHI y ELECTRO-PERU) durante el período 1965-2013. Otros registros de lluvia usados en este trabajo provienen del producto grillado GPCP (de sus siglas en inglés *Global Precipitation Climatology Project*) con una resolución de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Adicionalmente, se utilizaron datos de radiación de onda larga saliente (OLR, de sus siglas en inglés), como trazador de lluvias. Estos datos, proporcionados por el NCEP/NOAA¹ están a una resolución espacial de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ y a $1^\circ \times 1^\circ$ del UMD/ESSIC/CDR/NOAA². Los datos de viento zonal y meridional a escala diaria a 700 hPa, 600 hPa y 200 hPa provienen de ERA-Interim, los cuales poseen una resolución espacial de $0.75^\circ \times 0.75^\circ$.

Para identificar las fechas de inicio y finalización de las lluvias en la CRM, utilizamos el criterio de las PENs, como lo usó (Marengo et al., 2001) y la línea de promedio móvil (García-Páez & Cruz-Medina, 2008). En este estudio, definimos las fechas de inicio de la temporada de lluvias cuando la primera pentada (PEN) de un conjunto de seis PENs, entre ocho PENs consecutivas, excede un umbral de precipitación previamente identificado, además la línea de promedio móvil de tres PENs debe exceder dicho umbral. Análogamente, la fecha de finalización de la temporada de lluvias se determinó como la PEN anterior a la primera PEN de un conjunto de seis PENs entre ocho PENs sucesivas que no exceden un umbral de precipitación determinado previamente.

Para el análisis de la variabilidad espacio-temporal de la temporada de lluvias sobre CRM, se aplicó una técnica estadística multivariada llamada Análisis de Componentes Principales (ACP). Se empleó el método basado en la matriz de correlaciones como ha sido documentado (Cuadras, 2007; Maćkiewicz & Ratajczak, 1993).

Para estudiar la existencia de cualquier banda de tiempo preferencial (años) del comienzo del día, el final y la duración de la temporada de lluvias en los Andes centrales peruanos para el período 1965–2012, se realizó un análisis de ondeletas para la precipitación y series de tiempo OLR. Los detalles matemáticos del análisis de coherencia Wavelet están documentados por (Grinsted et al., 2004; Torrence & Compo, 1998; Torrence & Webster, 1999).

¹<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

²<https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00875#>

RESULTADOS

La variabilidad espacial y temporal es mayor en las fechas de inicio que en las fechas finales de la temporada de lluvias en la CRM (Figura 2 a, b). La desviación estándar (SD) de las fechas de inicio varía de ± 1 a ± 5 PENs, mientras que la SD de las fechas finales varía de ± 1 a ± 3 PENs. Por lo tanto, la duración de la temporada de lluvias está modulada más por las fechas de inicio que las de finales. La variabilidad espacial probablemente se deba a la influencia de un patrón local, como la topografía de la cuenca. La variabilidad temporal probablemente esté relacionada con la influencia de un patrón global, como los sistemas transitorios para iniciar y organizar la convección profunda.

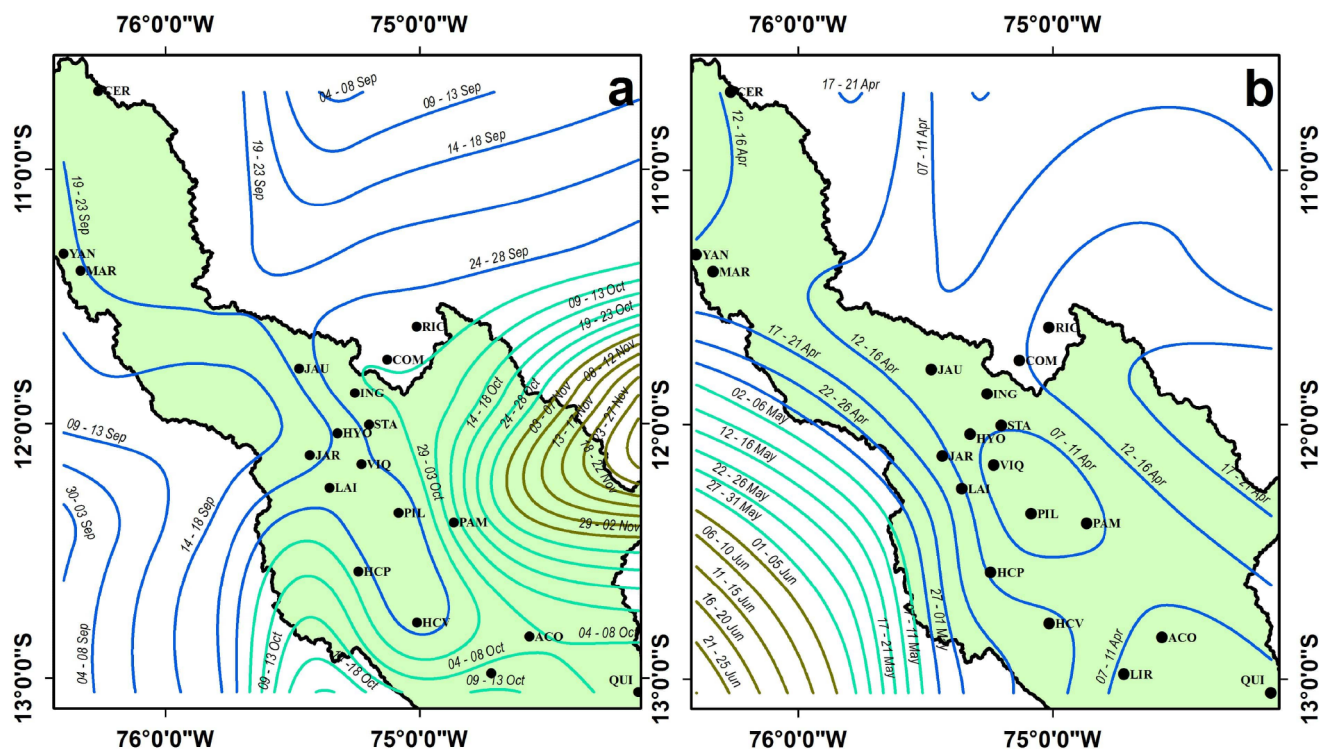


Figura 2. Distribución espacial de las isolíneas de (a) inicio y (b) fechas de finalización de la temporada de lluvias en la CRM para el período 1965-2013. Las líneas azules representan las fechas de inicio en septiembre y las fechas de finalización en abril. Las líneas verdes claras representan las fechas de inicio en octubre y las fechas de finalización en mayo. Las líneas verdes oscuras representan las fechas de inicio en noviembre y las fechas de finalización en junio.

Las fechas de inicio de las lluvias oscilan entre PEN 11 y 24, la PEN 17 (19-23 de septiembre) representa la fecha de inicio promedio de la temporada de lluvias. La fecha de finalización oscila entre PEN 53 y 61, la PEN 57 (7-11 de abril) representa la fecha de finalización promedio de la temporada de lluvias sobre CRM para el período 1965-2013. En comparación, la duración de la temporada de lluvias en la cuenca del Amazonas es más larga que la duración de la temporada de lluvias en la CRM. Según Marengo et al. (2001), la fecha de inicio promedio en la cuenca del Amazonas es la PEN centrada el 25 de septiembre, y la fecha de finalización es la PEN centrada el 2 de junio para el período 1979-1996.

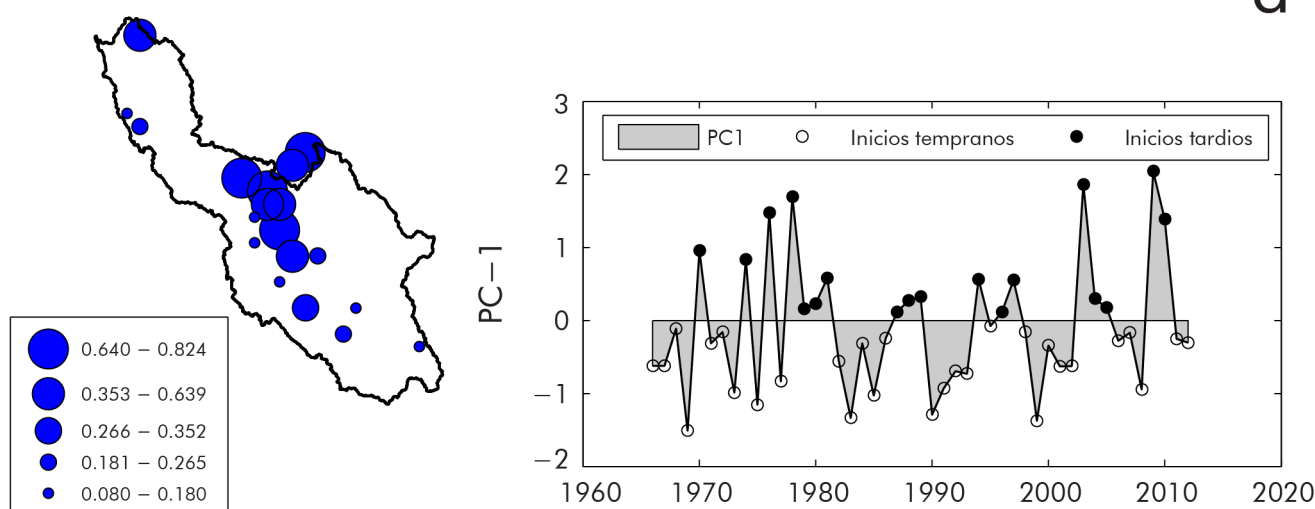
En particular, encontramos que la CRM tiene una duración de la temporada de lluvias (duración 49 PENs) ligeramente más larga que el centro-oeste de Brasil (duración 46 PENs) (Gan et al., 2004). Esto concuerda con los resultados del estudio de Raia y Cavalcanti (2008) quienes indican que la duración del Sistema de Monzones de América del Sur (SAMS) determinada con el índice de flujo de humedad muestra un ciclo de lluvia más corto que el encontrado para la CRM.

Del análisis de ACP, se observa que las características espaciales y temporales asociadas con el primer componente principal (PC1) explican el 55.2 % de la varianza de las fechas de inicio de las lluvias (Figura 3a). La Figura 3a también muestra que todas las cargas de la PC1 son positivas con valores más altos sobre el valle y la parte oriental central de la CRM (> 0.352), lo cual se considera una señal fuerte y significativa de una correlación positiva asociada a un inicio tardío; los valores negativos se asocian al inicio temprano de las lluvias. La Figura 3a muestra que en 18 años, del periodo de estudio, se presentó un inicio tardío, mientras que en 29 años del total corresponden a un inicio temprano.

Del total de años con anomalías positivas (inicios tardíos), el 41.2 %, 35.3 % y 23.5 % ocurrieron durante años Neutral, El Niño y La Niña, respectivamente (Figura 3a). El 30 %, 40 % y 30 % de los años con anomalías negativas (finales tempranos) ocurren durante años Neutral, El Niño y La Niña, respectivamente (Figura 3b). Estos resultados sugieren que El Niño favorece el inicio tardío y el final temprano de la temporada de lluvias en la CRM.

INICIO EOF-1 (55.2%)

a



FIN EOF-1 (45.9%)

b

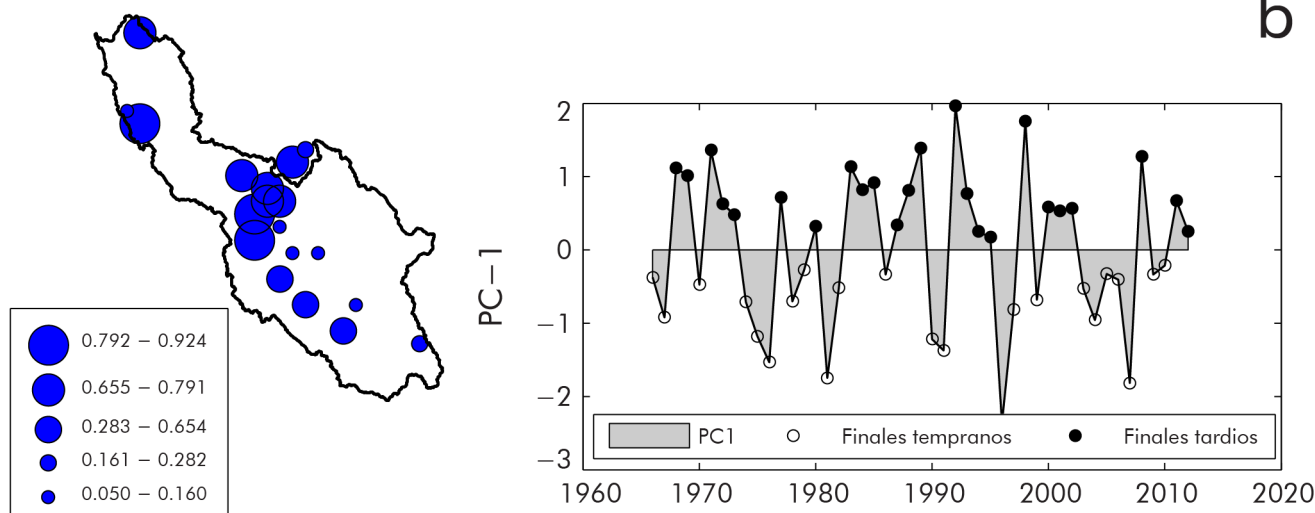


Figura 3. Variación espacial y temporal del primer componente para (a) la fecha de inicio de la lluvia y (b) la fecha de finalización de la temporada de lluvias. Los puntos blancos representan fechas de inicio temprano y finalización temprana. Los puntos negros representan fechas de inicio y finalización tardías. Análisis para el período 1966-2013.

Predominan las tendencias positivas en las fechas de inicio (Figura 4a). Los finales de la temporada de lluvias no presentan tendencias significativas (Figura 4b) y la duración de la temporada de lluvias presenta una tendencia negativa. En general, se evidencia una reducción de la duración de la temporada de lluvias aproximadamente 3 días/década debido al retraso de los días de inicio de las lluvias (Figura 4c). Confirmándose el retraso del inicio de las lluvias y el acortamiento de la temporada de lluvias con el análisis del conjunto de datos de OLR a diferentes resoluciones (2.5° y 1° de latitud-longitud) para el periodo de 1979/80–2012/13 y 1974/75–2012/13.

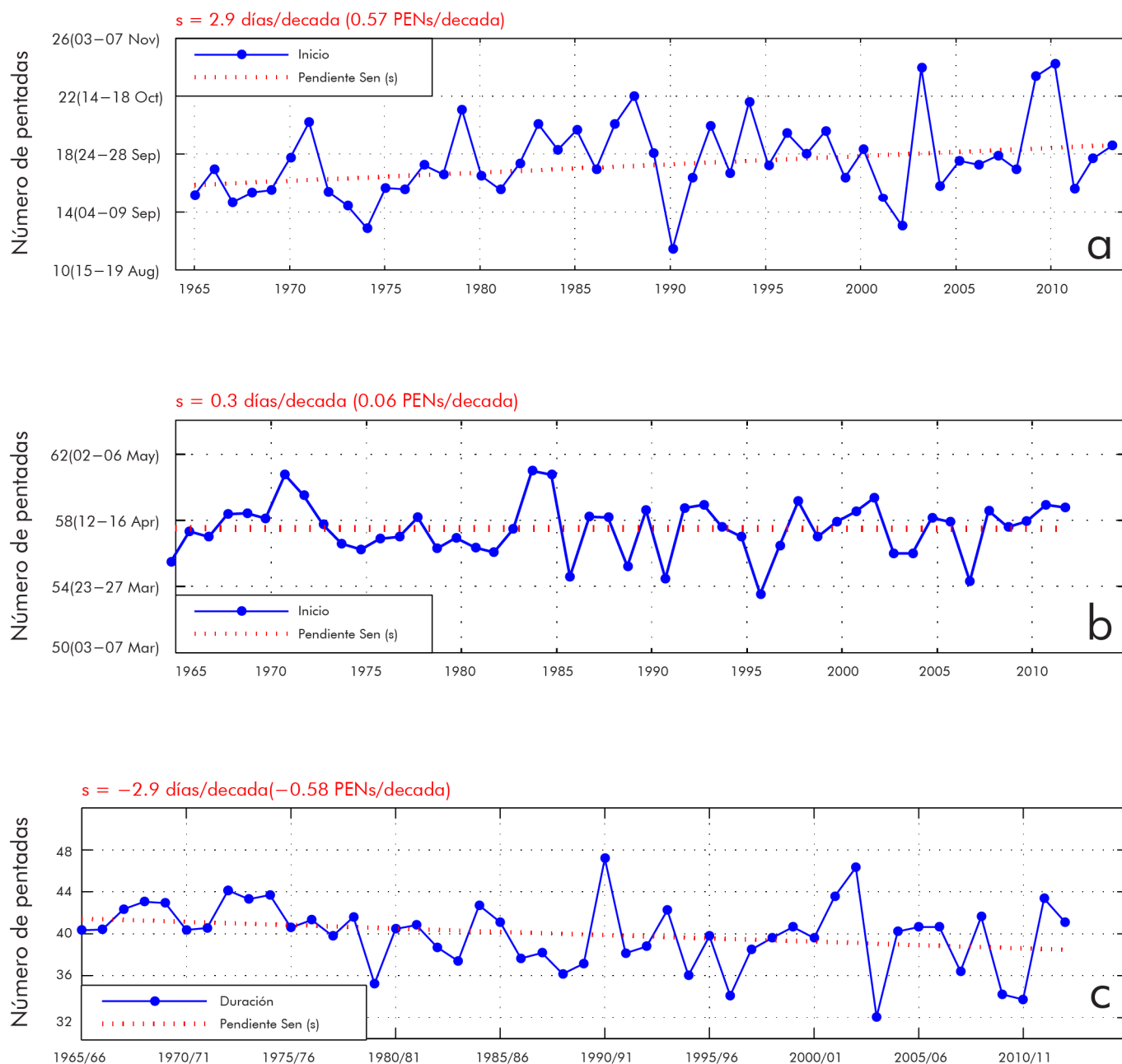


Figura 4. Serie temporal del número de PEN (línea azul) y tendencia por década (línea de puntos rojos) para (a) inicio, (b) final y (c) duración de la temporada de lluvias en la CRM para el periodo 1965-2013. Solo la tendencia de inicio es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95 %, mientras que la tendencia de la duración de la temporada de lluvias es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 90 %.

El inicio de la temporada de lluvias sobre la CRM es inducido por la propagación hacia el sur de la región convectiva ($< 240 \text{ W/m}^2$), desde la región del Caribe (Figura 5a) hacia la cuenca del Amazonas (Figura 5i).

En términos de circulación regional, el inicio temprano (tardío) de las lluvias está asociado con el desplazamiento hacia la migración al sur (norte) de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS).

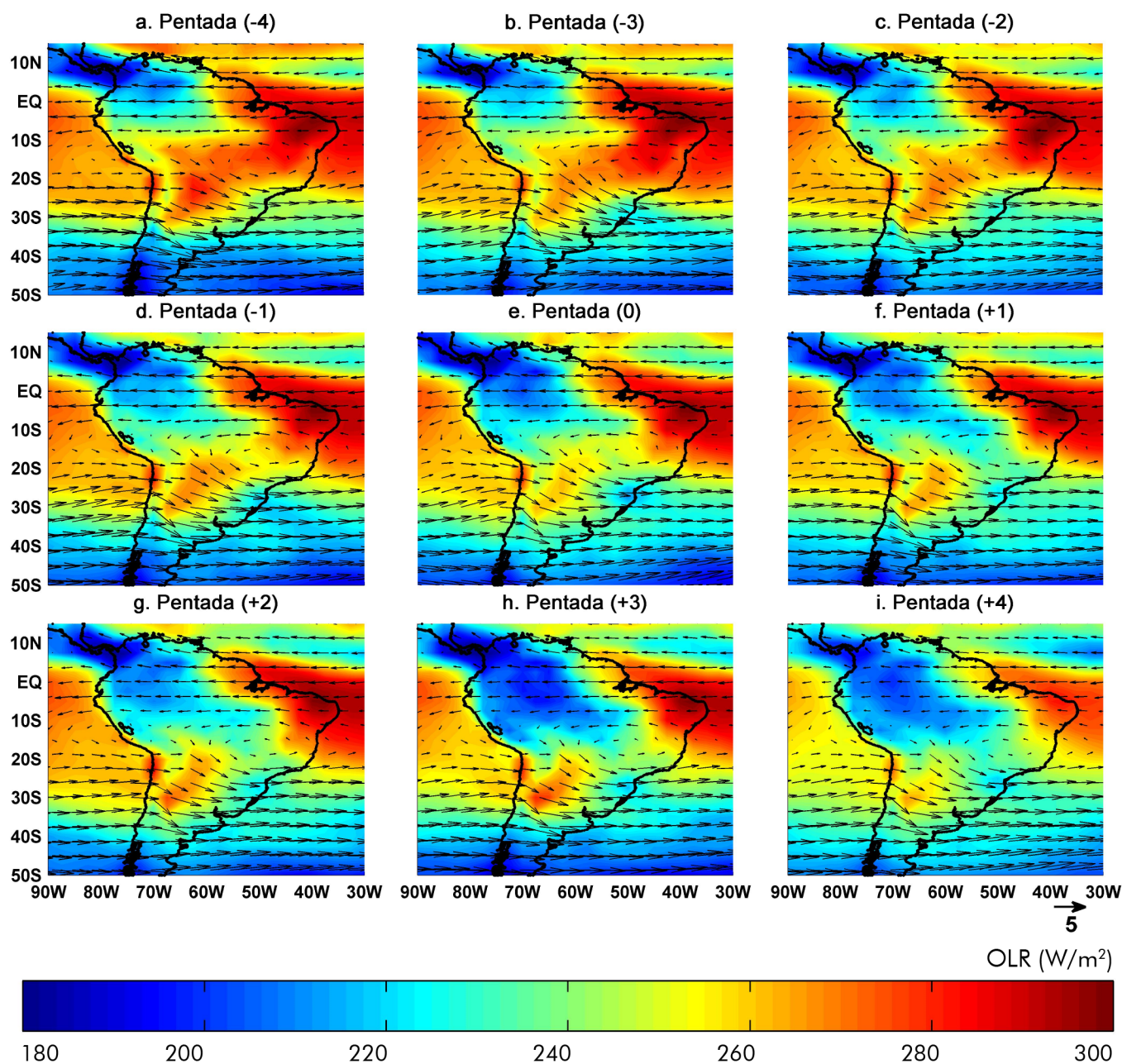


Figura 5. Análisis de época superpuesta para OLR (W/m^2) y vientos de 600 hPa (m/s) para el período anterior (4 PEN antes) e inmediatamente después (4 PEN después) del inicio de la temporada de lluvias (PEN 0: 24-28 de septiembre) en la CRM para el período 1979-2013. Análisis basado en reanálisis ERA-Interim.

CONCLUSIONES

- Las estaciones lluviosas se inducen durante la propagación hacia el sur de las regiones convectivas del SAMS desde la región del Caribe hacia la cuenca central del río Amazonas entre fines de septiembre (19-23 de septiembre, fecha de inicio) y principios de abril (7-11 de abril, fecha de finalización).
- La duración de la temporada de lluvias está modulada principalmente por las fechas de inicio debido a su mayor variabilidad (entre 1 y 5 pentadas, es decir entre 5 a 25 días) frente a la de las fechas de finalización (entre 5 y 15 días).
- Hay una reducción de aproximadamente 3 días/década en la duración de la temporada lluviosa que se ha observado durante las últimas cuatro décadas, debido principalmente al retraso en el inicio de las lluvias.
- El análisis del conjunto de datos de radiación de onda larga a diferentes resoluciones (2.5° y 1° latitud-longitud), confirma la existencia de un retraso en las fechas de inicio; así como, el acortamiento de la temporada de lluvias.
- Los resultados presentados sugieren que El Niño favorece el inicio tardío y el final temprano de la temporada de lluvias acortando el periodo lluvioso; mientras que La Niña favorece el inicio temprano y el final tardío de la temporada de lluvias en la cuenca, en otras palabras, extiende el periodo lluvioso.
- Los días de inicio temprano (tardío) están asociados con un desplazamiento hacia el sur (norte) de la ZCAS.

REFERENCIAS

Cuadras, C. M. (2007). *Nuevos Métodos de Análisis Multivariante* (CMC, Vol. 20; C. M. C., ed.). Recuperado de http://www.est.uc3m.es/esp/nueva_docencia/getafe/estadistica/analisis_multivariante/doc_generica/archivos/metodos.pdf

Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137: 553-597. doi:10.1002/qj.828

Gan, M. A., Kousky, V. E., & Ropelewski, C. F. (2004). The South America Monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. *Journal of Climate*, 17(1), 47-66.

García-Páez, F., & Cruz-Medina, I. R. (2008). Fechas de inicios y terminación de la temporada de lluvias en la región Pacífico Norte. *Ingeniería Hidráulica En México*, 23(3), 179-188. Recuperado de <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/142/138>

Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5/6), 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>

Instituto Geofísico del Perú. (2012). *Manejo de riesgos de desastres ante eventos meteorológicos extremos en el valle del Mantaro - Tomo II* (IGP, Vol. 2; A. G. Martínez, ed.). Recuperado de <http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/2735>

- Latinović, D., Chou, S. C., Rančić, M., Medeiros, G. S., & Lyra, A. de A. (2019). Seasonal climate and the onset of the rainy season in western-central Brazil simulated by Global Eta Framework model. *International Journal of Climatology*, 39(3), 1429–1445. doi: 10.1002/joc.5892
- Maćkiewicz, A., & Ratajczak, W. (1993). Principal components analysis (PCA). *Computers and Geosciences*, 19(3), 303–342. doi:10.1016/0098-3004(93)90090-R
- Marengo, J. A., Liebmann, B., Kousky, V. E., Filizola, N. P., & Wainer, I. C. (2001). Onset and End of the Rainy Season in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*, 14(5), 833–852.
- Raia, A., & Cavalcanti, I. F. de A. (2008). The life cycle of the South American monsoon system. *Journal of Climate*, 21(23), 6227–6246. doi:10.1175/2008JCLI2249.1
- Saeed, F., Bethke, I., Fischer, E., Legutke, S., Shiogama, H., Stone, D. A., & Schleussner, C.-F. (2018). Robust changes in tropical rainy season length at 1.5°C and 2°C. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064024. doi:10.1088/1748-9326/aab797
- Silva, Y., Takahashi, K., & Chavez, R. (2008). Dry and wet rainy seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Advances In Geosciences*, 14, 261–264. doi:10.5194/adgeo-14-261-2008, 2008
- Silva, Y., & Mosquera, K. (2012). Inicio de temporada de lluvias en el valle del Mantaro. In M. Villaverde (Ed.), *Eventos meteorológicos extremos (sequías, heladas, lluvias intensas) en el valle del Mantaro- Tomo I* (IGP, pp. 72–75). Recuperado de <http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/740>
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 66–78.
- Torrence, C., & Webster, P. J. (1999). Interdecadal Changes in the ENSO-Monsoon System. *Journal of Climate*. 12(8): 2679–2690.

AVANCE DE INVESTIGACIÓN

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO OCÉANICO MULTIMODAL PARA LA REGIÓN ECUATORIAL DEL OCÉANO PACÍFICO

Brayan Urbina ¹ y Kobi Mosquera ¹

RESUMEN

Debido a las condiciones anómalas en el sistema océano-atmósfera en el Pacífico tropical durante las dos fases de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), varios eventos climáticos extremos se desarrollan alrededor del mundo y, con mayor intensidad, en el Perú. Por este motivo es importante estudiar y entender cada uno de los procesos físicos que están involucrados en las fases de ENOS, de tal manera que se puede contribuir a un mejor pronóstico. El objetivo de este trabajo es mostrar los avances en el desarrollo e implementación de un modelo oceánico multimodal cuyos resultados permitirán analizar con mayor detalle la dinámica del Pacífico ecuatorial, con énfasis en las dos fases de ENOS. El modelo oceánico multimodal se basa en la descomposición baroclínica de un océano estratificado, del cual se extraen los coeficientes de proyección en todo el océano Pacífico ecuatorial y que, finalmente, se asocian a los forzantes del modelo. Los resultados evidencian una adecuada habilidad para representar la variabilidad del océano en términos de las anomalías del nivel del mar y precisamente son los dos primeros modos baroclínicos los que reproducen la mayor parte de dicha variabilidad. Por último, las salidas del modelo se proyectaron en los modos meridionales de ondas de Kelvin y Rossby oceánicos.

Palabras clave: Modos baroclínicos, ondas ecuatoriales, coeficientes de proyección, ondas de Kelvin, ondas de Rossby, El Niño.

AFILIACIÓN:

1- Instituto Geofísico del Perú (IGP)

Citar como: Urbina, B., Mosquera, K. (2020). Implementación y validación de un modelo oceánico multimodal para la región ecuatorial del océano Pacífico. Boleín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, Vol. 7 N° 01, pag. 13-20.

INTRODUCCIÓN

Como se sabe, es importante estudiar el incremento de la temperatura superficial del mar (TSM) en el océano Pacífico ecuatorial debido a los efectos que puede producir en la circulación atmosférica tanto a nivel global como local. Parte de la variabilidad en la TSM, durante los períodos de ocurrencia de El Niño/La Niña, se ve reflejada por la influencia de forzantes remotos oceánicos como los asociados a las ondas de Kelvin y Rossby ecuatoriales, dado que generan impacto en el nivel del mar y la profundidad de la termoclina.

En vista de la importancia de las ondas ecuatoriales en el marco de El Niño/La Niña, se viene estudiando la dinámica del Pacífico tropical por medio de modelos oceánicos lineales, los cuales han demostrado efectividad para reproducir la variabilidad interanual e intraestacional del nivel del mar en esta región. No obstante, debido a que El Niño-Oscilación del Sur viene a ser un proceso acoplado océano-atmósfera, el modelo oceánico multimodal planteado aquí, trata de representar la respuesta oceánica al forzamiento atmosférico. En ese contexto, a través de los llamados modos baroclínicos reproducidos por el modelo, estamos interesados en la propagación de ondas ecuatoriales como procesos físicos remotos de impacto en la costa peruana (Mosquera, 2014).

Es así que una vez que el modelo oceánico multimodal fue implementado, se procedió a validar los resultados del nivel del mar con la información de altimetría satelital para el periodo 1993-2019. Luego, como parte de un ejemplo, se revisó la actividad de las ondas de Kelvin y Rossby ecuatoriales durante El Niño 1997/1998. Para esto último se aplicó una descomposición meridional sobre la salida del modelo (anomalías del nivel del mar y corrientes zonales) para obtener las estructuras meridionales de cada onda y para cada modo baroclínico.

DATOS

La data necesaria para este estudio son los campos de salinidad y temperatura que se obtienen del producto Global Ocean Data Assimilation System (GODAS; Behringer et al., 2004) proporcionados por NOAA/ESRL PSD. El registro histórico de la data comprende desde enero de 1980 hasta diciembre de 2019, tomando una resolución temporal mensual y espacial de $1/3^\circ$ en latitud x 1° en longitud con 40 niveles de profundidad oceánica.

Asimismo, se ha utilizado la información de esfuerzos de vientos zonales y meridionales diarios, los cuales fueron calculados a partir de la velocidad de vientos a 10 metros, generados por la *reanalysis* de NCEP-DOE (Kanamitsu et al., 2002). Finalmente, se emplearon también los datos de altimetría dado por CMEMS (AVISO, 2016).

El periodo climatológico para estos dos últimos grupos de datos (vientos y altimetría) fue de 1993-2010.

SOBRE EL MODELO

Bajo condiciones de equilibrio hidrostático, sin aceleración vertical, en estado de reposo inicial y considerando pequeñas perturbaciones, se pueden obtener ecuaciones de momento lineales en un plano beta ecuatorial, así como condiciones de frontera que permiten representar la dinámica de un océano libre con un fondo marino de profundidad constante. En este punto, se asume que todas las variables oceánicas involucradas tienen la misma estructura vertical, lo cual permite simplificar el modelo en modos baroclínicos, tal como lo detalla Clarke (2008). Las estructuras verticales $F_n(z)$ y las velocidades características por cada modo se obtienen resolviendo el problema de Sturm Liouville. Sin embargo, para propósitos prácticos, se resolverá este problema aplicando diferencias finitas tal como lo explica Dewitte (1999):

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{dF_n(z)}{dz} \frac{1}{N^2} \right) + \frac{F_n(z)}{c_n^2} = 0$$

$$\frac{dF_n(z)}{dz} \frac{1}{N^2} + \frac{F_n(z)}{g} = 0 \quad \text{en } z = 0 \text{ (superficie)}$$

$$\frac{dF_n(z)}{dz} = 0 \quad \text{en } z = -H \text{ (fondo marino)}$$

donde c_n representa la velocidad característica de onda de cada modo, tal como lo señalan Kantha y Clayson (2000). N es la frecuencia de Brunt-Vaisalla calculada a partir de la ecuación de estado con datos de temperatura y salinidad.

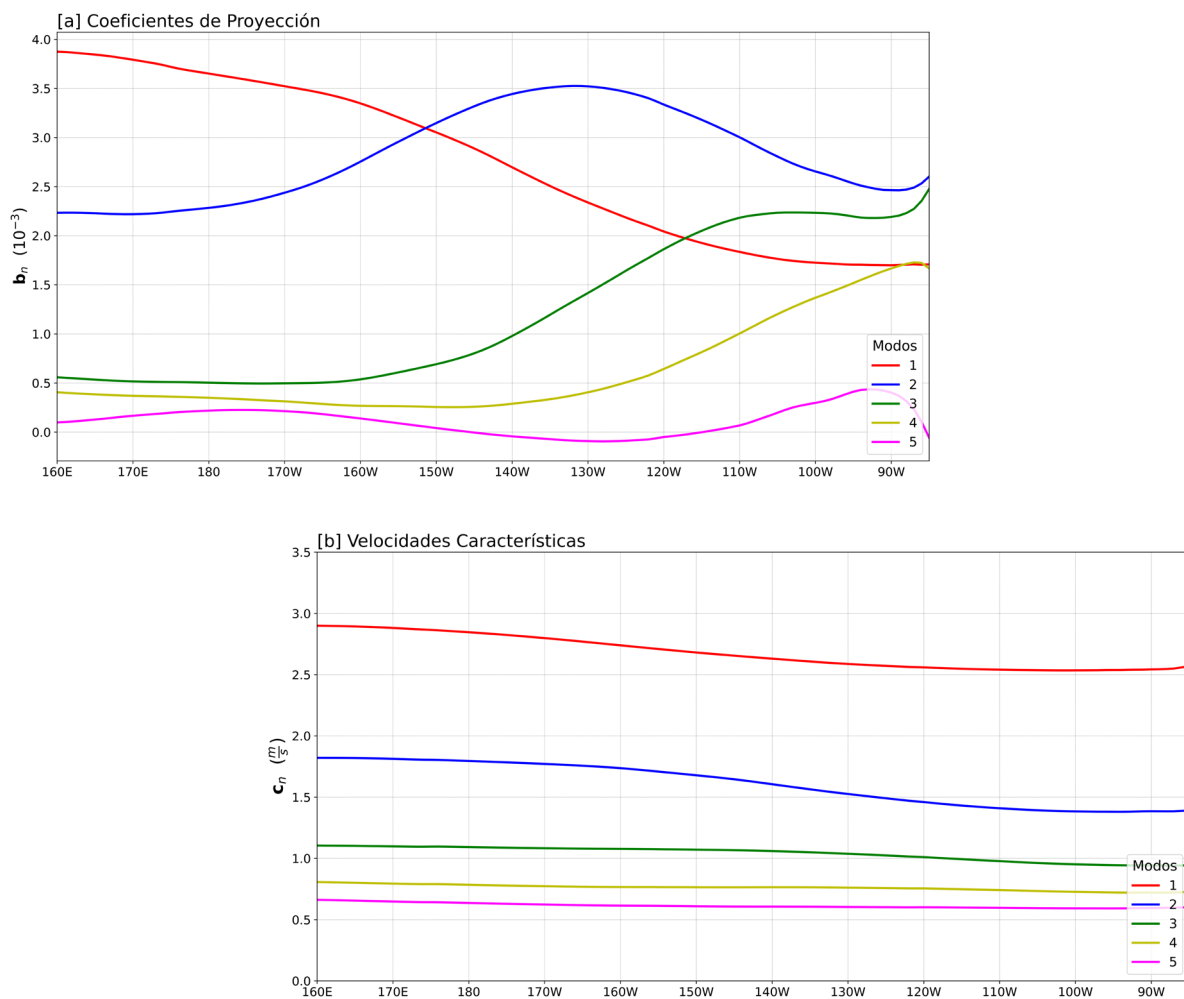


Figura 1. a) Coeficientes de proyección y b) velocidad de fase promedio (1980-2010) a lo largo del Pacífico ecuatorial, correspondientes a los primeros 5 modos a partir de datos verticales de salinidad y temperatura obtenidas del reanalysis de GODAS.

Los modos verticales nos permiten calcular los coeficientes de proyección que acompañan al término de esfuerzo de viento, suponiendo que el esfuerzo de viento actúa sobre una capa de mezcla de profundidad H_{mix} como menciona Lighthill (1969).

Estos coeficientes de proyección indican el grado de intensidad que tendrá el esfuerzo de viento al proyectarse en el océano. Como se observa en la Figura 1a, la variabilidad se evidencia a lo largo del ecuador para cada modo, en ella se observan valores altos para el primer y segundo modo en el Pacífico occidental y central, respectivamente. Por ello la mayor parte de la variabilidad oceánica está proyectada en los primeros dos modos. El tercer y cuarto modo empiezan a ser relevantes a partir de los 140 °W y 120 °W, respectivamente.

Además, tal como lo señala Dewitte (1999), las ondas ecuatoriales de baja frecuencia tienen velocidades de propagación horizontal proporcionales a la velocidad característica c_n . En la Figura 1b mostramos las velocidades características para cada modo a lo largo de la línea ecuatorial. Se observa una disminución desde el Pacífico central hasta la parte oriental para dichos modos. Esto se debe principalmente a la diferencia de la estratificación vertical a lo largo de la franja ecuatorial y de la idealización del fondo oceánico.

Las ecuaciones modales finales del modelo, como resultado de la simplificación y tomando en cuenta los coeficientes de proyección, se presentan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\frac{du_n}{dt} - \beta y v_n &= -g \frac{d\eta_n}{dx} + b_n \frac{\tau^x}{\rho} - r_n u_n \\ \frac{dv_n}{dt} + \beta y u_n &= -g \frac{d\eta_n}{dy} + b_n \frac{\tau^y}{\rho} - r_n v_n \\ g \frac{d\eta_n}{dt} \frac{1}{c_n^2} + \frac{du_n}{dx} + \frac{dv_n}{dy} &= 0\end{aligned}$$

Donde (τ^x, τ^y) representa el vector esfuerzo de viento con sus respectivas componentes zonales y meridionales. El vector (u, v) representa la componente zonal y meridional de la anomalía de la velocidad oceánica superficial y, finalmente, η es la anomalía del nivel del mar. El subíndice n indica el modo baroclínico.

RESULTADOS Y VALIDACIÓN

Las ecuaciones anteriores se discretizan y se resuelven utilizando una grilla del tipo Arakawa-C como sugiere Mosquera (2009). Los datos de esfuerzo de viento entre enero de 1993 hasta diciembre de 2019, obtenidos de NCEP-DOE, serán utilizados como forzantes del modelo en el Pacífico tropical.

Como se demostró líneas arriba, los primeros 5 modos se toman como los más relevantes, basados en la magnitud de los coeficientes de proyección. Por lo tanto, la suma de los resultados producto de la simulación de cada modo, se validan con los datos de altimetría satelital de CMEMS, con el propósito de conocer si la variabilidad interanual en el Pacífico ecuatorial simulado por el modelo se asemeja a lo observado. Para ello utilizamos la anomalía de nivel del mar obtenida del modelo (en adelante ANM) y la comparamos con las anomalías del producto de CMEMS mediante métodos estadísticos como la correlación de Pearson y la diferencia del error medio cuadrático (RMSD, de las siglas en inglés: *Root Mean Square Difference*).

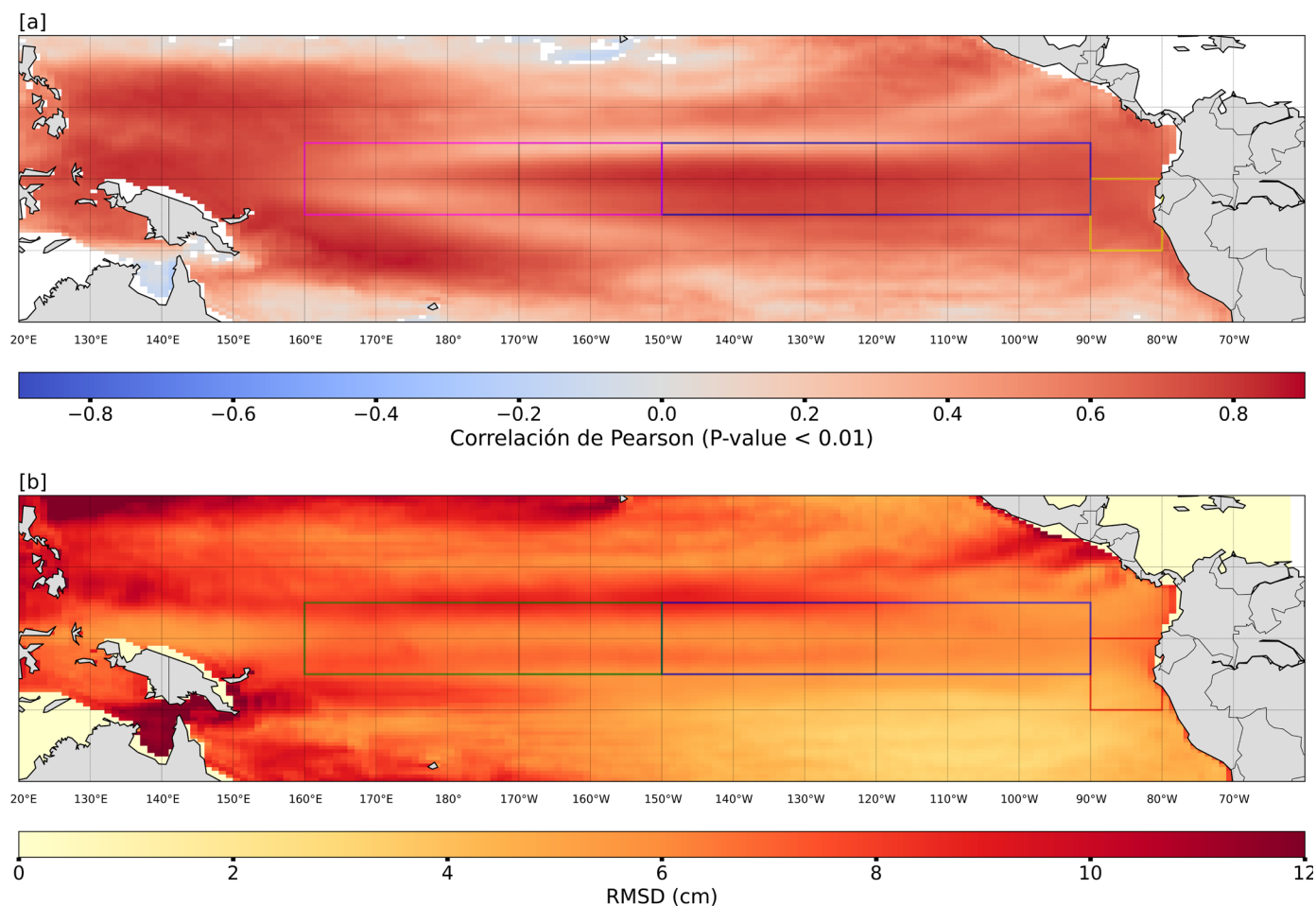


Figura 2. a) Mapa de correlación de Pearson entre la ANM generada por el modelo y la ANM dada por CMEMS y b) Mapa de RMSD entre la ANM generada por el modelo y la ANM dada por CMEMS. En ambos casos se utiliza la suma de los primeros 5 modos como resultado de la ANM del modelo.

La Figura 2a muestra el resultado de la correlación y el RMSD entre la ANM del modelo y de CMEMS, mostrando la habilidad del modelo para representar la variabilidad observada en el periodo que va de 1993 hasta el 2019, así como la proximidad (magnitud) entre ambos. La primera gráfica muestra una fuerte correlación, sobre todo en la región tropical y en la parte occidental del Pacífico. Esto nos indica que el modelo reproduce adecuadamente, por medio de ondas oceánicas largas, la dinámica del nivel del mar, sobre todo en la región Niño 3.4, con una correlación mayor o igual a 0.8. Sin embargo, tal como lo señala Boulanger (2001), el modelo no representa bien la variabilidad en la latitud 5° N justo por encima en el límite de la región Niño 3.4 debido a la presencia de corrientes ecuatoriales no modeladas adecuadamente que repercuten en la anomalía de nivel del mar. La Figura 2b muestra que, a lo largo de la línea ecuatorial, la RMSD se encuentra entre los 4 y 6 cm.

Finalmente, como ejemplo de la simulación con el modelo, se observa la variabilidad de las ondas de Kelvin y Rossby que se desarrollaron durante El Niño extraordinario 1997-98. Para ello, utilizamos la descomposición meridional de las ondas largas ecuatoriales propuesta por Boulanger y Menkes (1995). Este procedimiento se realiza con el fin de obtener las ondas que intervienen en la señal resultante del modelo. Dichos modos corresponden, entre otros más, a señales Kelvin y Rossby 1 con su respectiva distribución meridional característica. La Figura 3 muestra la reconstrucción espacial de estas ondas largas (Kelvin y Rossby 1) a partir de la ANM del modelo, en el periodo mencionado antes.

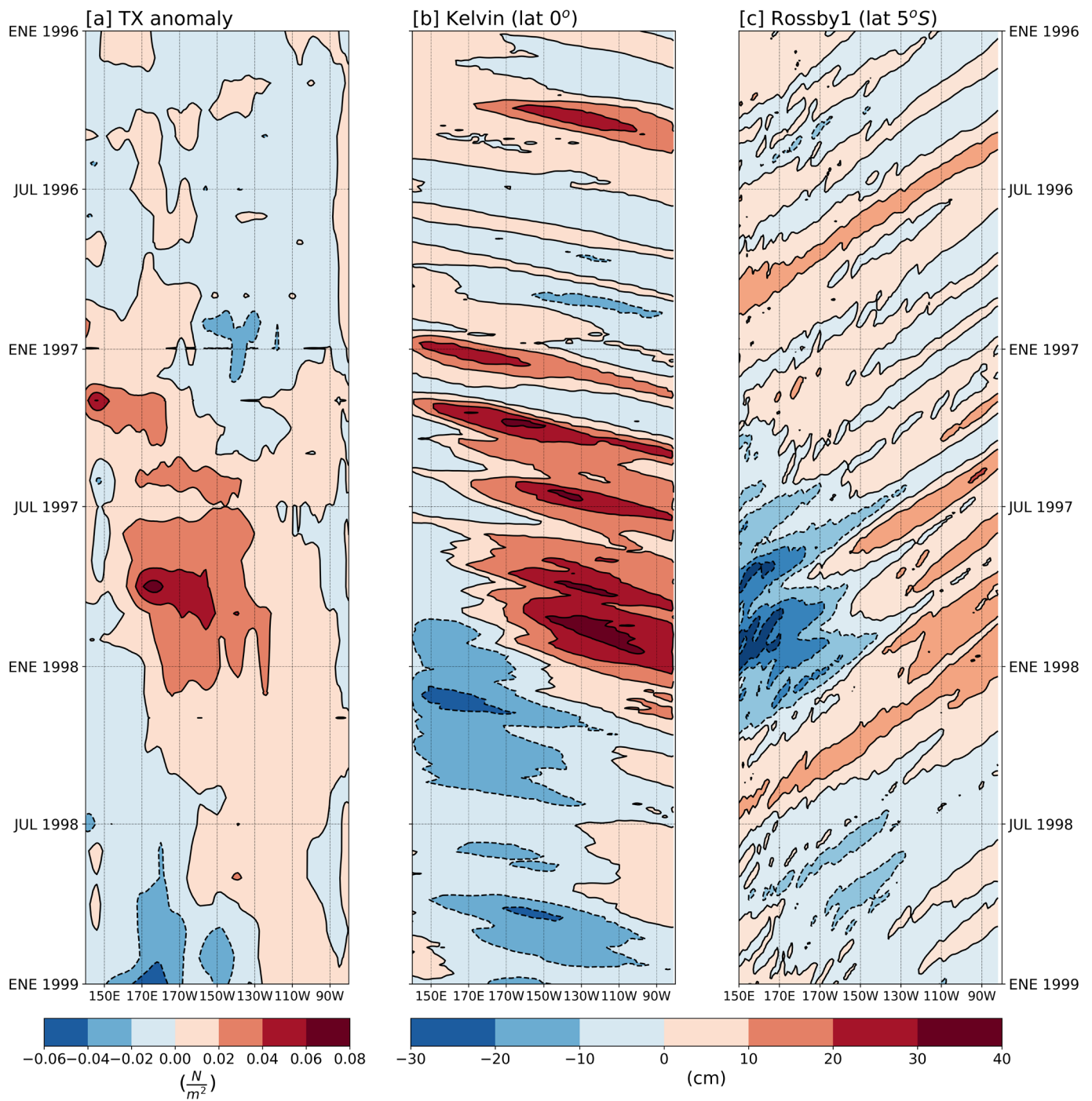


Figura 3. Diagramas Hovmoller (espacio-tiempo) en el periodo 1996-1998 de a) anomalías de esfuerzo de viento zonal (Nm^{-2}) b) ANM (cm) a lo largo del ecuador producida por la onda de Kelvin y c) lo mismo que (b) pero para la onda de Rossby en 5°S.

Como se aprecia en la Figura 3a, ocurren múltiples perturbaciones de anomalías positivas de esfuerzo de viento zonal entre finales de 1996 hasta inicios de diciembre de 1997. Estas perturbaciones se corresponden con el origen y propagación ondas de Kelvin del tipo downwelling (Figura 3.b) y con la ocurrencia simultánea de ondas de Rossby 1 (Figura 3c). Los múltiples pulsos generados en 1997 cruzaron todo el Pacífico y modificaron la temperatura superficial del mar a lo largo de su trayectoria y, además, a lo largo de la costa peruana.

REFERENCIAS

AVISO (2016). SSALTO/DUACS user handbook: MSLA and (M)ADT near-real time and delayed time products. CLS-DOS-NT-06-034. SALPMU-P-EA-21065- CLS. 5rev 0.

Boulanger, J.-P. (2001). The Trident Pacific model: simulating surface ocean currents with a linear model during the 1993-1998 TOPEX-POSEIDON period, *Climate Dynamics*, 17, 159-173.

Boulanger, J.-P., Menkes, C. (1995). Propagation and reflection of long equatorial waves in the Pacific Ocean during the 1992–1993 El Niño. *Journal of Geophysical Research* 100, 25041, doi:10.1029/95JC02956

Behringer, D.W. and Y. Xue, (2004). Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific Ocean. *Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, AMS 84th Annual Meeting*, Washington State Convention and Trade Center, Seattle, Washington, 11-15.

Derber, J.C., and A. Rosati. (1989). A global oceanic data assimilation system. *Journal of Physical Oceanography*, 19, 1333-1347.

Clarke, A. J., (2008). *An introduction to the dynamics of El Niño and the southern oscillation*. London: Academic Press.

Dewitte, B., Reverdin, G., & Maes, C., (1999). Vertical structure of an OGCM simulation of the equatorial Pacific Ocean in 1985-94. *Journal of Physical Oceanography*, 29(7), 1542–1570.

Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter (2002). NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1631-1643.

Lakshmi, H. K., & Clayson, C. A., (1999). *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes*. Onbekend.

Lighthill, M.J. 1969. Dynamic response of the Indian Ocean to onset of the Southwest Monsoon. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 265, 45 – 92.

Mosquera, K. (2009). *Variabilidad Intra-estacional de la Onda de Kelvin Ecuatorial en el Pacífico (2000-2007): Simulación Numérica y datos observados* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Recuperado de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/67>

Mosquera, K. A., 2014. Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico. *Boletín técnico: Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño*, 1 (1), 4-7. Recuperado de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/4638>

RESUMEN DEL INFORME TÉCNICO DE EL NIÑO

PP N°068/EL NIÑO -IGP/2019-12



El presente informe es elaborado por el IGP y sirve como insumo para el informe técnico y Comunicado Oficial de la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno “El Niño” (ENFEN). Se presentan los principales resultados de los modelos climáticos con el pronóstico de El Niño. En ocasiones puede diferir del Comunicado del ENFEN, debido a que el comunicado es un consenso. En caso de discrepancias entre el Informe técnico de EL Niño emitido por el IGP y el Comunicado del ENFEN, prevalecerá el Comunicado del ENFEN.

El valor del Índice Costero El Niño (ICEN), para el mes de noviembre, basado en los datos de ERSSTv3b (ICENv3), OISSTv2 (ICENOI) y ERSSTv5 (ICENv5) indican una condición climática neutra frente a la costa peruana con valores de -0.78, -0.56 y -0.40, respectivamente. Los valores temporales del ICEN (ICENtmp), de ERSSTv3, ERSSTv5 y OISSTv2 para los meses de diciembre de 2019 y enero de 2020, coinciden en mostrar condiciones neutras. Con respecto al Pacífico central, el valor del Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) muestran condiciones neutras para el mes de noviembre (0.46 °C) y, según la información de los valores temporales, se esperarían condiciones cálidas débiles y neutras para los meses de diciembre y enero, respectivamente.

Con referencia a los datos de altimetría satelital (producto DUACS), la onda de Kelvin cálida, formada a fines de octubre e inicios de noviembre, habría iniciado su arribo a la costa americana. Asimismo, se observa la presencia de otra onda de Kelvin cálida que se habría formado por un pulso de viento del oeste que se desarrolló durante el mes de diciembre. Actualmente la onda se localiza en 160 °W.

Según el promedio de los siete modelos numéricos climáticos de NMME, inicializados con información oceánica y atmosférica del mes de enero de 2020, se mantendrían las condiciones neutras para el periodo que va de diciembre 2019 a julio de 2020, tanto para el Pacífico central como oriental. Es importante recordar que, debido a la barrera de predictibilidad, los pronósticos para el otoño en adelante no son muy confiables.

Instituto Geofísico del Perú. (2020). *Informe técnico N° PPR/El Niño-IGP/2019-12*. Recuperado de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/4737>

COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 01-2020

CALLAO, 13 DE ENERO DE 2020

ESTADO DEL SISTEMA DE ALERTA: **NO ACTIVO**

Debido a la llegada de ondas Kelvin cálidas entre enero y marzo de 2020, se espera un aumento de la temperatura del mar frente a la costa norte y centro del Perú, por lo que no se descarta en los departamentos de Tumbes y Piura la ocurrencia de lluvias episódicas, por encima de lo normal pero sin llegar a ser extraordinarias.

No obstante, el calentamiento descrito en el párrafo anterior, la Comisión Multisectorial ENFEN mantiene el sistema de Alerta "No Activo", debido a que actualmente no se observan condiciones para que el calentamiento esperado se prolongue después de inicios de otoño.

Frente a este panorama, se recomienda a las entidades competentes considerar los escenarios de riesgo de corto y mediano plazo para tomar las medidas que correspondan.



COMISIÓN MULTISECTORIAL
ENCARGADA DEL ESTUDIO NACIONAL
DEL FENÓMENO "EL NIÑO" (ENFEN)
DECRETO SUPREMO N° 007-2017-PRODUCE



ESTUDIO NACIONAL DEL
FENÓMENO "EL NIÑO"

¹El Estado del Sistema de Alerta "No Activo" se da en condiciones neutras o cuando la Comisión ENFEN espera que El Niño o La Niña costera estén próximos a finalizar.

Puede acceder al Comunicado Oficial del ENFEN N° 01-2020 en el:
<http://enfen.gob.pe/download/comunicado-oficial-enfen-n-01-2020/>
<http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/4735>

COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 02-2020

CALLAO, 24 DE ENERO DE 2020

ESTADO DEL SISTEMA DE ALERTA: **NO ACTIVO**

La dinámica reciente de los vientos en la franja ecuatorial ha atenuado la intensidad de una de las ondas Kelvin cálidas próximas a arribar en febrero a la costa peruana. Sin embargo, otra onda Kelvin cálida formada en enero arribaría a partir de marzo.

La presencia de estas ondas, sumada a episodios de debilitamiento de la intensidad de los vientos del sudeste frente a la costa peruana, favorece el incremento anómalo de la temperatura del mar principalmente frente al litoral norte y centro. Este escenario propiciaría la ocurrencia de lluvias episódicas por encima de lo normal entre febrero y marzo en la zona baja y media de los departamentos de Tumbes y Piura, principalmente, pero sin llegar a ser extraordinarias.

No obstante, las condiciones descritas, la Comisión Multisectorial ENFEN mantiene el sistema de Alerta

COMISIÓN MULTISECTORIAL
ENCARGADA DEL ESTUDIO NACIONAL
DEL FENÓMENO "EL NIÑO" (ENFEN)
DECRETO SUPREMO N° 007-2017-PRODUCE



"No Activo", debido a que actualmente no se observan condiciones para que el calentamiento esperado se prolongue después de inicios de otoño.

Frente a este panorama, se recomienda a las entidades competentes considerar los escenarios de riesgo de corto y mediano plazo para tomar las medidas que correspondan.



ESTUDIO NACIONAL DEL
FENÓMENO "EL NIÑO"

¹El Estado del Sistema de Alerta "No Activo" se da en condiciones neutras o cuando la Comisión ENFEN espera que El Niño o La Niña costera estén próximos a finalizar.

Puede acceder al Comunicado Oficial del ENFEN N° 02-2020 en el:
<http://enfen.gob.pe/download/comunicado-oficial-enfen-n-02-2020/>
<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/4738>

Redes IGP:

<https://www.gob.pe/igp>

 <https://web.facebook.com/igp.peru>

 https://twitter.com/igp_peru

 https://www.youtube.com/c/IGP_videos