



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



IGP

Instituto
Geofísico
del Perú



BOLETÍN CIENTÍFICO

EL NIÑO

Vol. 10 n.º 09 septiembre 2023

PROGRAMA PRESUPUESTAL n.º 068

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

En este boletín ◆◆◆

4

pág.

Inteligencia humana y artificial
para la democratización del conocimiento
científico sobre el clima

13

pág.

Desarrollo de un modelo de Machine Learning
para el pronóstico meteorológico de precipitación
a escala subestacional en Perú

18

pág.

Resumen del informe técnico de El Niño

19

pág.

Resumen de los comunicados ENFEN



BICENTENARIO
DEL PERÚ
2021 - 2024



CRÉDITOS

Albina Ruiz Ríos
Ministra del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú:

Hernando Tavera
Presidente Ejecutivo

Edmundo Norabuena Ortiz
Director Científico

Ken Takahashi Guevara
Director de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera

Antonella Condorena Franco
Jefatura de la Unidad Funcional de Comunicaciones

Ivonne Katherine Montes Torres
Ken Takahashi Guevara
Jorge Andrés Concha Calle
Editores

Jorge Andrés Concha Calle
Diseño y diagramación

Carátula: "Hackaton" organizada por el IGP con la participación de diversos especialistas en ciencias del clima
Fuente: IGP

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

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

Calle Badajoz 169 Mayorazgo, Ate, 15012

Teléfono: +51-1-3172300

Lima, noviembre de 2023

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



INTRODUCCIÓN

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

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

A este producto, el IGP contribuye con la actividad "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño", la cual incluye la síntesis y evaluación de los pronósticos de modelos climáticos internacionales, el desarrollo y validación de nuevos modelos de pronóstico, así como el desarrollo de estudios científicos que fortalecerán en forma continua la capacidad para este fin.

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

Los resultados de esta actividad están disponibles en https://bit.ly/IGP-SCAH-informes_tecnicos

INTELIGENCIA HUMANA Y ARTIFICIAL PARA LA DEMOCRATIZACIÓN DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO SOBRE EL CLIMA

**Ken Takahashi¹,
Jahir Anicama¹**

¹ Instituto Geofísico del Perú
(IGP), Lima, Perú



Ken Takahashi es investigador científico principal del Instituto Geofísico del Perú, especializado en El Niño y aplicaciones de la inteligencia artificial. Es director de la Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera y responsable del Observatorio del Conocimiento Científico sobre Cambio Climático. Doctor en Ciencias Atmosféricas por la Universidad de Washington e investigador distinguido en RENACYT.

Palabras clave: Cambio climático, gestión del riesgo de desastres, El Niño, inteligencia artificial, modelos grandes de lenguaje, búsqueda semántica

Citar como Takahashi, K., & Anicama, J. (2023). Inteligencia humana y artificial para la democratización del conocimiento científico sobre el clima. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 10 n.º 09, págs. 4-12.

Resumen

El cambio climático plantea retos sustanciales, especialmente en países como Perú. A pesar de la amplia información científica disponible, existe una desconexión entre los investigadores del clima y aquellos que podrían beneficiarse de sus hallazgos. El Observatorio del Conocimiento Científico sobre Cambio Climático (O4C) busca cerrar esta brecha interpretando y simplificando artículos científicos para una fácil comprensión y uso. Sin embargo, la proliferación constante de literatura científica supone un desafío. Sumado a ello, los avances en inteligencia artificial (IA), particularmente los modelos grandes de lenguaje (LLM) y técnicas como la generación aumentada con recuperación (RAG), permiten sintetizar rápidamente información de documentos complejos. A pesar de estos avances, el uso de la IA presenta desafíos en lo que respecta a la precisión y coherencia de los resultados. El enfoque combinado de inteligencia humana e inteligencia artificial del O4C puede reducir estas limitaciones subrayando la importancia de la intervención humana para garantizar la calidad de los

resultados. En síntesis, si bien la IA tiene el potencial de facilitar la democratización del conocimiento sobre el clima, la supervisión y la interpretación humana seguirán siendo fundamentales para asegurar su exactitud y confiabilidad.

1. Introducción

El cambio climático es uno de los grandes desafíos de nuestro planeta e impactará particularmente a países vulnerables como el Perú, no solo por los cambios en el clima promedio, sino, sobre todo, por el incremento de eventos extremos como olas de calor, inundaciones y sequías. En particular, se espera un incremento en la frecuencia e intensidad de eventos El Niño extremos en el océano Pacífico oriental y de las intensas lluvias asociadas, similares a los ocurridos en los años 1983 y 1998 (Cai et al., 2014, 2018, 2021; Carreric et al., 2020).

Esto tiene importantes implicancias para la gestión del riesgo de desastres y la adaptación al cambio

climático. Por ejemplo, en el caso del diseño de infraestructuras resilientes al clima, debemos reconocer que las estadísticas del pasado ya no son una base tan confiable para dicho diseño. Sin embargo, no basta con que la comunidad científica y académica esté al tanto de esto, ya que resulta esencial que los ingenieros, técnicos, autoridades, tomadores de decisiones y demás actores llamados a poner en práctica este conocimiento lo comprendan plenamente.

En general, la evidencia científica es necesaria para la gestión integral del cambio climático. Por tanto, los estados que han suscrito la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, como Perú, toman los informes científicos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) como base para las negociaciones. Con la misma lógica, según la Ley del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres del Perú, Ley N°29664, “la Gestión del Riesgo de Desastres está basada en la investigación científica y de registro de informaciones” (2011, art. 3).

Sin embargo, existe una importante brecha entre la comunidad científica del cambio climático y los potenciales usuarios de dicho conocimiento, no solo en nuestro país, sino en todo el mundo. Como reporta el IPCC, los desafíos para la participación de partes interesadas en la toma de decisiones climáticas incluyen el acceso a los últimos resultados científicos, la capacidad de identificar información científica falsa o no confiable, así como la eliminación de sesgos (IPCC WGII 2022). Es por esto que el Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP, por sus siglas en inglés) ha priorizado como un objetivo estratégico el establecer “puentes entre la ciencia del clima y la sociedad” (WCRP, 2019).

El IPCC también menciona que las informaciones que estén basadas en ciencia —y en modelos climáticos— deben de ser creíbles, destacadas y legítimas para las audiencias, con la finalidad de que estas puedan, finalmente, procesarlas y comunicarlas (IPCC, 2022). Para alcanzar una eficaz y eficiente personalización —customización— de la información relevante sobre la crisis climática, es necesario identificar y conocer las necesidades de uso y perspectivas de las distintas personas que consumen y consumirán la evidencia científica sobre el cambio climático.

El acceso al conocimiento científico también se ha masificado de una manera exponencial, tanto antes como después de la pandemia. Esta alta demanda de consumo científico ha tenido un impresionante acceso por medio de interfaces no formales (Bohannon, 2016). Tomando el caso particular de la plataforma Sci-Hub, al definirla como una red de literatura de acceso abierto, podemos observar que los consumidores principalmente son del sur global y de países de ingresos medios; sin embargo, a pesar de la naturaleza abierta de la plataforma, esta características no garantiza el acceso de usuarios de los países más pobres (Sagemüller et al., 2021).

Asimismo, existe un sesgo geográfico en la literatura científica y las evaluaciones del IPCC hacia la producción científica del hemisferio norte (Sietsma et al., 2021). En el mismo sentido, se ha podido observar, a través de 15 000 publicaciones analizadas, que la generación de evidencia científica tuvo su origen principalmente en los países en desarrollo y los países BRICS (Brasil, Rusia, China y Sudáfrica), donde, en el 56.5 % de estas publicaciones, el primer autor (también denominado como autor principal) radica en el país en donde se realizó la investigación (Pasgaard et al., 2015). Sin embargo, si solo consideramos la participación de autores del sur global, se estaría abordando el problema de manera limitada, pues la comprensión e implementación de los procesos de inclusión y sus diferentes facetas todavía plantea un desafío permanente en la ciencia (Yamineva, 2017).

Esto es cada vez más urgente debido, por un lado, a la gran abundancia de información disponible a través de internet, lo cual, a pesar de ser valioso, también genera riesgo de desinformación. Por otro lado, las publicaciones científicas están aumentando en forma acelerada generando un gran desafío a los investigadores para mantenerse al día y evaluar la calidad de las investigaciones. Esta situación tiene un potencial efectivo negativo: la posibilidad de que trabajos de calidad cuestionable se filtren en la literatura científica sin ser disputados. La Figura 1 muestra como referencia el número de publicaciones por año relacionadas con El Niño y cambio climático. En ella podemos apreciar que durante el 2001 se publicaron 153 documentos, mientras que durante el 2021 se publicaron 1075 documentos.

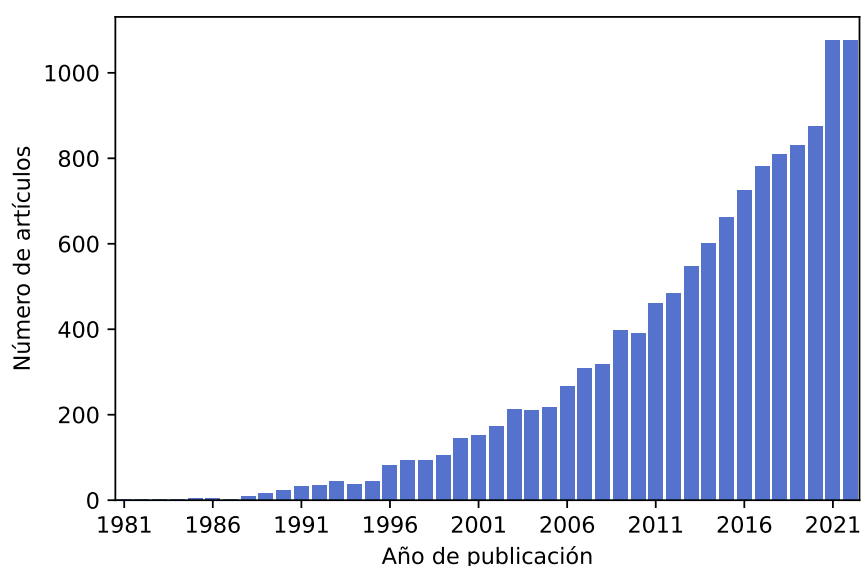


Figura 1. Número de artículos científicos publicados en revistas indizadas ("journals") entre 1981 y 2022 a nivel mundial relacionados con El Niño y cambio climático (Búsqueda realizada usando el término ("El Niño" OR "ENSO") AND "Climate change" en <https://www.lens.org>).

La democratización del conocimiento climático —y no climático— permitirá enfrentar las desigualdades históricas en el acceso al conocimiento que hemos tenido en el marco del desarrollo de nuestras sociedades (IPCC, 2023). Un enfoque innovador en la coproducción de conocimiento es movilizar a las comunidades, tanto de los usuarios del conocimiento como a los productores de conocimiento, en interfaces que permitan generar oportunidades adicionales para incorporar el conocimiento desde diferentes perspectivas. Esto ofrecería un enfoque de transformación sobre la capacidad científica de responder a las necesidades de la sociedad y viceversa.

2. El Observatorio del Conocimiento Científico sobre Cambio Climático —

El Observatorio del Conocimiento Científico sobre Cambio Climático (también denominado "Ciencia Climática" y "O4C", <https://cienciaclimatica.igp.gob.pe>) es un intento de acercar la ciencia no solo a un público más amplio, sino también a la comunidad académica misma. La prioridad del O4C es facilitar que la gestión integral del cambio climático y del riesgo de desastres se base en evidencias obtenidas de la investigación científica. Cabe señalar que la evidencia científica pasa un proceso de revisión por pares, es decir, antes de ser publicada, la información generada es revisada por expertos que evalúan el fondo, la forma, los métodos y resultados obtenidos,

con el fin último de confirmar la veracidad de la ciencia reportada. Por tanto, las estrategias y planes correspondientes deberían estar sustentados con referencias a los artículos científicos relevantes, no solo a informes de proyectos, reportes técnicos u otra "literatura gris" como es la práctica predominante. No es menester del presente texto desmerecer su valor; sin embargo, generalmente estas referencias no representan la totalidad del conocimiento científico riguroso y relevante. Para lograr esto, se pueden considerar las siguientes estrategias complementarias:

- I. Generar más conocimiento científico relevante.
- II. Identificar el conocimiento científico relevante a nivel internacional.
- III. Incrementar la inteligibilidad del conocimiento científico relevante.
- IV. Colocar el conocimiento científico disponible a demanda de los usuarios.
- V. Facilitar el uso de este conocimiento científico a los usuarios.

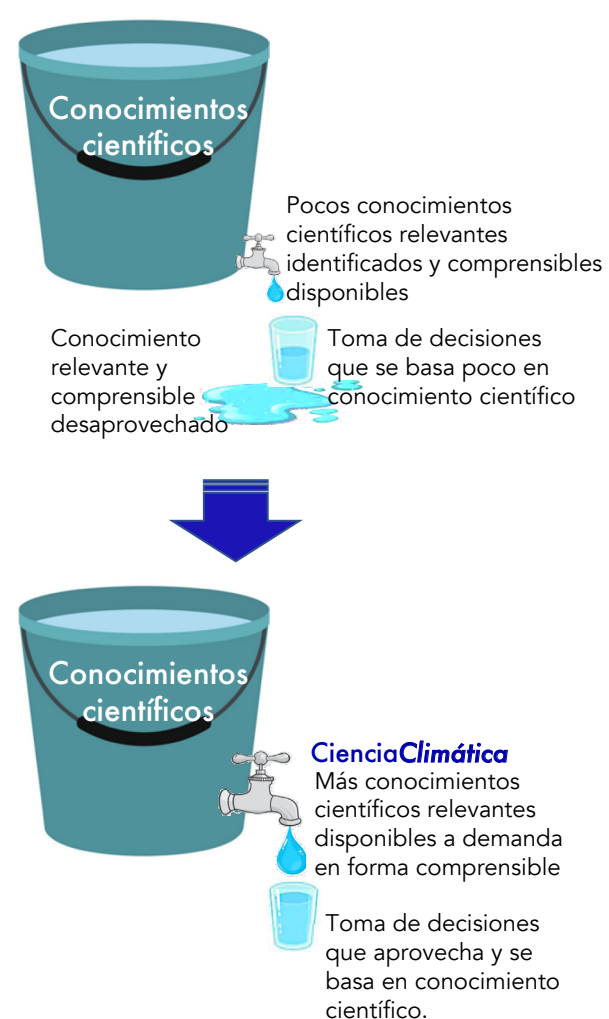


Figura 2. Modelo conceptual del cambio generado por el Observatorio Ciencia Climática (O4C) en la disponibilidad y uso de los conocimientos científicos en la toma de decisiones. Se muestra la información claramente disponible para que sea usada por la toma de decisiones antes del O4C (panel superior) y después del O4C (panel inferior).

Si bien el quehacer básico de la comunidad científica se centra en la primera estrategia y es un aspecto que necesitamos fortalecer, en el O4C nos enfocaremos en las otras cuatro estrategias. El concepto de cómo el O4C contribuye en este sentido se bosqueja en la Figura 2. El elemento básico de conocimiento científico es la interpretación del contenido de un artículo publicado en alguna revista indizada internacional. Esta acción es realizada por un intérprete sobre la base de su lectura de dicho documento; en consecuencia, es matizada por su propia experiencia, conocimientos, intereses y perspectiva. Esta interpretación identifica algún mensaje o resultado clave del documento y lo plasma en un lenguaje sencillo en castellano, sin pretender ser un resumen general del estudio (Figura 3). Dicho eso, un mismo documento científico puede tener más de una interpretación, incluso de un mismo intérprete.

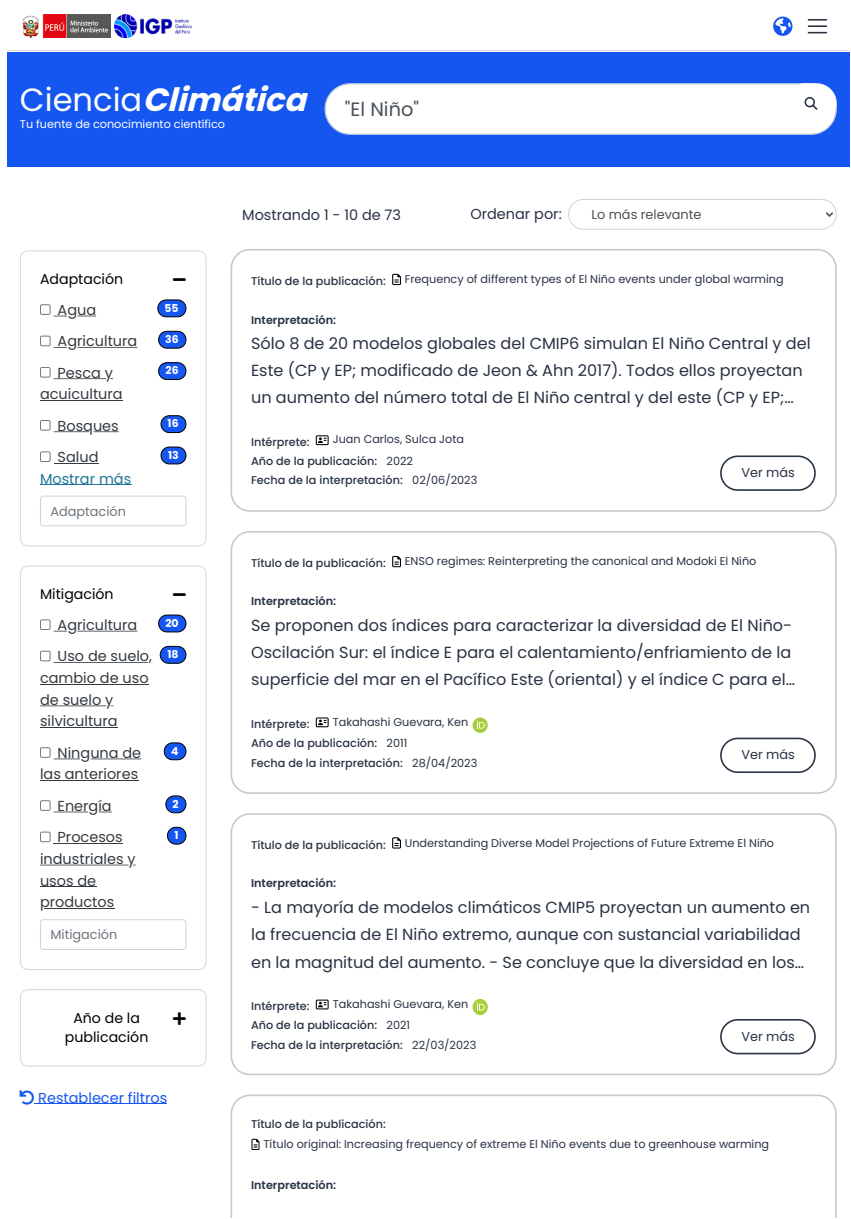


Figura 3. Plataforma web del O4C que muestra el resultado de una búsqueda de interpretaciones de artículos en la temática de “El Niño”. Extraída de la página <https://cienciaclimatica.igp.gob.pe/>

Por ejemplo, en el caso de un artículo científico sobre el evento El Niño costero del año 1925 (Takahashi y Martínez, 2017), consideremos tres interpretaciones disponibles en el O4C. La primera interpretación destaca las características de la interacción océano-atmósfera a nivel regional asociada a dicho evento (<https://cienciaclimatica.igp.gob.pe/entities/interpretation/511e9286-e4c1-40ea-b3b4-7efa1bd67533>). Otra interpretación resalta que el 10 de marzo de 1925 se presentó una precipitación de 12 mm en la ciudad de Lima, la segunda mayor registrada en dicha ciudad (<https://cienciaclimatica.igp.gob.pe/entities/interpretation/9b537b5a-7530-414e-99ee-15e1ae94564b>). La tercera se enfoca en las grandes lluvias registradas en Tumbes durante este evento (<https://cienciaclimatica.igp.gob.pe/entities/interpretation/04990ad2-9642-4aa6-9816-64e8af8b9193>). Se debe notar que lo indicado en las dos últimas interpretaciones no se encuentra en el resumen (*abstract*) del artículo mismo y que alguien interesado tendría que leer el documento completo para encontrar esta información, asumiendo que sepa *a priori* que dicha información existe en este documento. En el caso de alguien interesado en las lluvias en Lima, por ejemplo, le resultaría mucho más fácil encontrar esos datos en las interpretaciones que en el artículo original.

Un importante desafío para el O4C es generar continuamente las interpretaciones y mantener el ritmo del crecimiento de los documentos científicos, los cuales apreciamos en la Figura 1. Para lograrlo, la estrategia principal es recurrir a la comunidad científica/académica tanto nacional como internacional, cuyos miembros son creadores y usuarios del contenido del O4C.

Debido a la gran diversidad de temas relevantes a la gestión integral del cambio climático y del riesgo de desastres, es importante que las comunidades que participan en el O4C abarquen una amplia diversidad de especialidades y temáticas. La Figura 4 muestra un mapeo de temáticas aproximadas contenidas recientemente en el O4C. Se aprecia una importante diversidad, pero a la vez se evidencian brechas en temas como, por ejemplo, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, es decir, la mitigación del cambio climático.

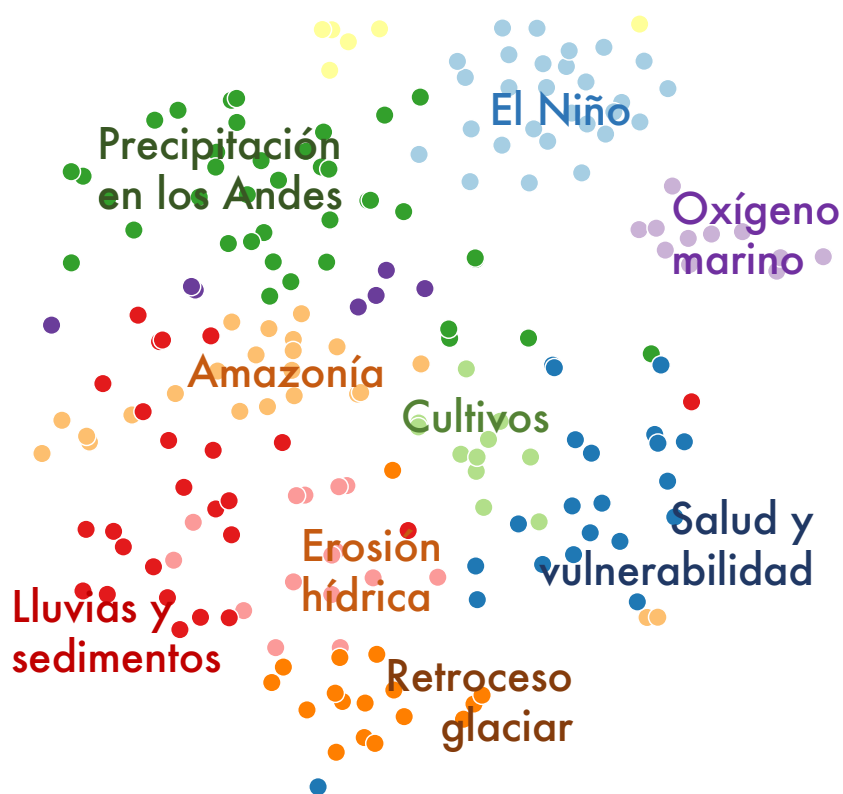


Figura 4. Mapa de temáticas de las interpretaciones en el Observatorio Ciencia Climática (O4C) (proyección t-SNE de los “embeddings” semánticos de las interpretaciones, clusters k-means en colores).

Para ello, es necesario generar comunidades y valorar el capital humano —material e inmaterial— de quienes consumen, producen y transfieren los conocimientos y de todas sus manifestaciones híbridas. Para lograr sinergias entre este universo de comunidades es importante considerar la reconciliación de intereses, la integración de diferentes visiones del mundo y el respeto por los valores y conocimientos de las diversas comunidades en respuesta a la crisis climática.

La coproducción puede ser una vía para poder aproximarnos a estas metas. Esta ha recibido una gama de definiciones; sin embargo, se podría acotar a un grupo de personas u entidades que colaboran de manera conjunta para crear logrando nuevos avances en el conocimiento y que orientan a la acción (Miller & Wyborn, 2020). Para poder contar con un sistema de gobernanza efectivo frente al cambio climático (se esperaría que logre ello la gestión integral de cambio climático en el Perú) se debe de permitir la integración de los diferentes tipos de conocimientos —local, profesional, indígena— con el conocimiento científico convencional. Los sistemas de gobernanza que han facilitado la coproducción se han sostenido a través de mecanismos formales de información y discusión de soluciones por medio de comités regionales, redes personales y locales,

así como grupos de discusión (IPCC, 2023).

Es con base en esto último, pero no limitado a ello, que el O4C quiere ofrecerse como un servicio público del Estado peruano llamado a fortalecer la coproducción de conocimiento fundado en las diversidades de la manifestación de la inteligencia humana, pero asistido por las diversas materializaciones de la inteligencia artificial. Un desafío concreto es que el O4C sea efectivamente utilizado e interiorizado en el marco de la gestión integral del cambio climático y del riesgo de desastres.

3. Inteligencia humana + inteligencia artificial para gestionar el conocimiento científico

El año 2023 ha sido notable, entre otras cosas, por el surgimiento del uso directo de la inteligencia artificial (IA) por parte de las personas a nivel mundial, a raíz del lanzamiento del aplicativo ChatGPT y de otros posteriores.

Desde hace varios años, la IA ha estado presente en nuestra vida diaria desde recomendaciones de *posts* de Facebook, películas de Netflix, la identificación de rutas óptimas en Waze o la traducción de textos con alta confiabilidad. Ahora, la IA es generativa, es decir, crea contenido nuevo como textos o imágenes a partir de solicitudes realizadas por los usuarios en lenguaje natural (*prompts*). Si bien ya existían asistentes virtuales como Siri de Apple o Alexa de Amazon, el avance en las capacidades de los modelos de IA ha sido dramático con respecto a lo que existía, a tal punto que los modelos grandes de lenguaje (*large language models* o LLM, por sus siglas en inglés) han alcanzado, en términos prácticos, una capacidad de comprensión y uso del lenguaje capaz de superar al de las mismas personas. Por ejemplo, el LLM denominado GPT-4 (OpenAI, 2023) ha superado a los humanos en algunas secciones del examen para abogacía de EE. UU. (Katz et al., 2023) y en preguntas sobre cirugía neurológica (Guerra et al., 2023).

Los LLM representan una gran promesa en la gestión de conocimientos científicos en formato de texto, pero aún no son confiables como fuente de información, ya que los modelos no almacenan la información con

la que son entrenados, sino que aprenden patrones y relaciones entre los datos a partir de esta. En consecuencia, son susceptibles a “alucinaciones”, es decir, pueden generar y presentar conocimiento ficticio como real. Una solución a este problema es la “generación aumentada con recuperación” (o RAG, por sus siglas en inglés), que combina los LLM con bases de conocimiento externas y herramientas de búsqueda y recuperación para acceder a estas y lograr así resultados más exactos y confiables (Figura 5).

Consideremos los reportes del IPCC sobre el estado del arte del conocimiento científico en diversos temas

relacionados con el cambio climático, documentos de gran envergadura y complejidad para lectores no especializados. En la actualidad hay varios aplicativos con RAG que usan estos reportes como base de conocimientos para un LLM, como ChatClimate (Vaghefi et al., 2023). Si le preguntamos cómo se espera que El Niño cambie con el cambio climático, la respuesta es una síntesis de secciones relevantes recogidas de más de un reporte del IPCC, empezando con “se espera que El Niño experimente muchos cambios debido al cambio climático. Se proyecta un aumento en eventos El Niño fuertes ...” (Figura 6a).

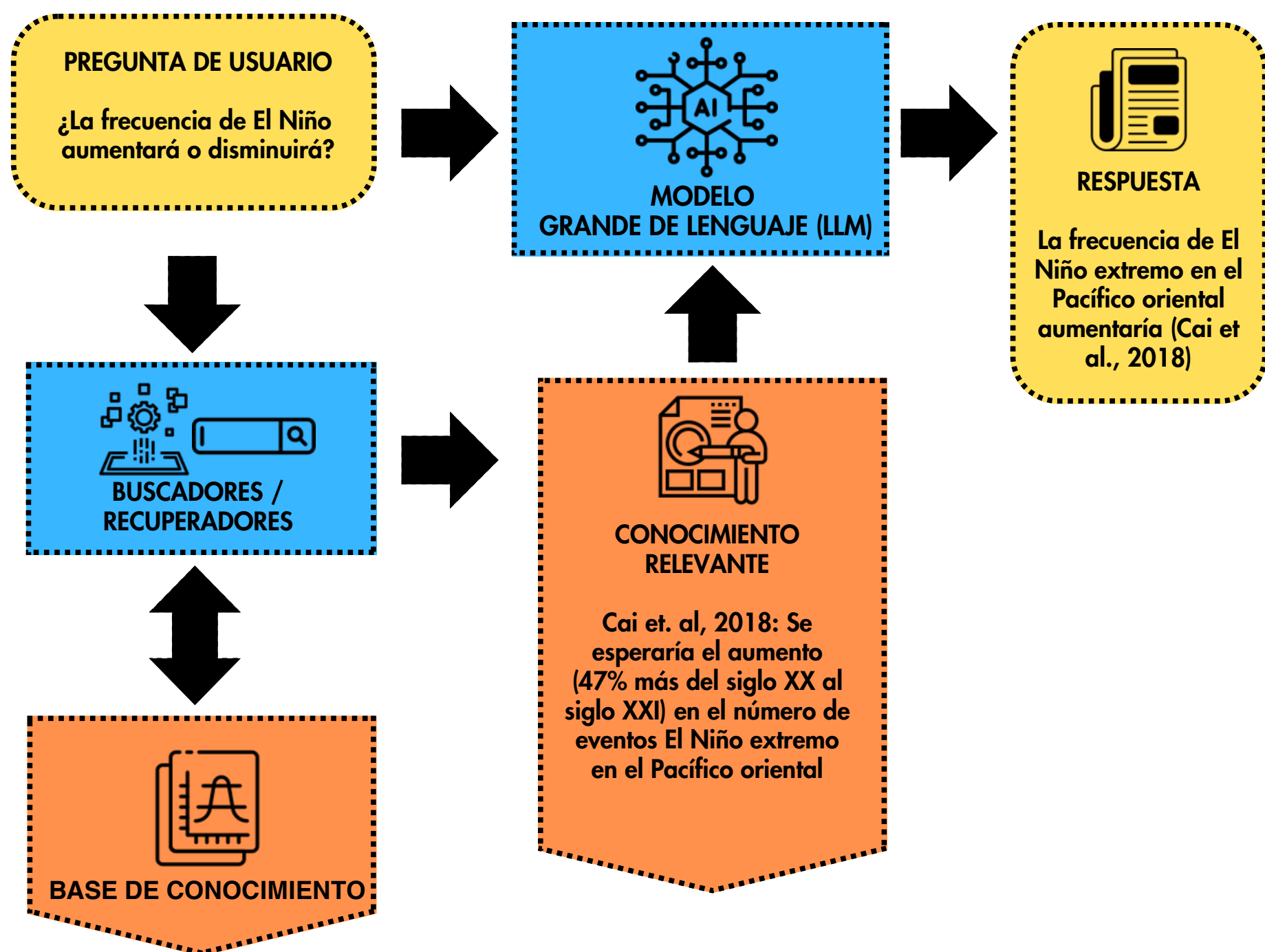


Figura 5. Esquema RAG para la aplicación de un modelo grande de lenguaje (LLM) para la consulta a una base de conocimientos como el O4C utilizando inteligencia artificial.

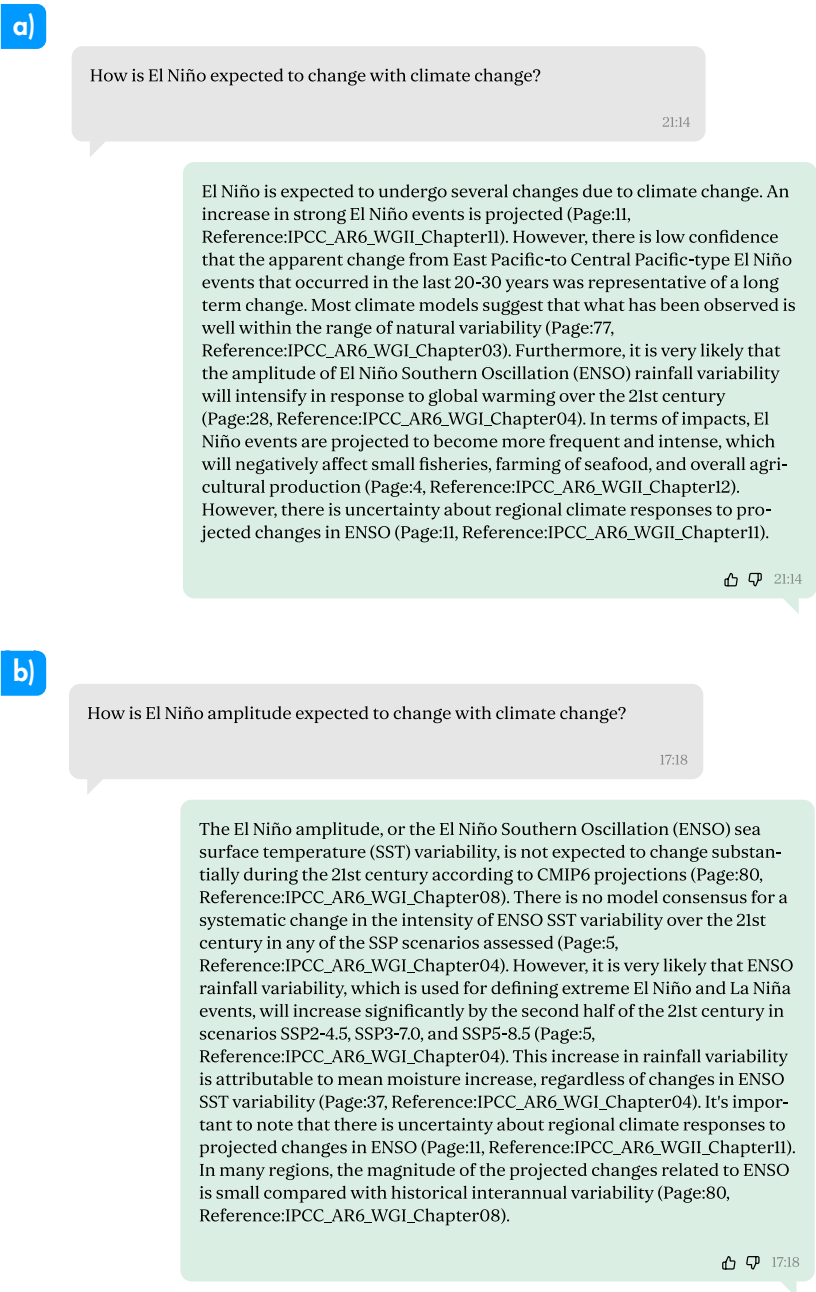


Figura 6. Respuestas a las preguntas a) “¿Cómo se espera que El Niño cambie con el cambio climático?” y b) “¿Cómo se espera que la amplitud de El Niño cambie con el cambio climático?” (en inglés) en el aplicativo ChatClimate (<https://www.chatclimate.ai>).

Este hallazgo nos remite al reporte del Grupo II de la evaluación AR6 (Lawrence et al., 2022), donde se afirma que se proyecta un aumento en eventos fuertes de El Niño y La Niña, citando a Cai et al. (2015). Sin embargo, dicho capítulo es sobre vulnerabilidad y adaptación en Australasia y no constituye la evaluación experta del IPCC sobre cambios en El Niño, lo cual corresponde al Grupo I del mencionado panel. Si en su lugar revisamos el reporte del Grupo I, la sección 4.3 concluye que no hay evidencia de un posible cambio en la amplitud de la variabilidad de la temperatura superficial del mar asociada a El Niño, lo cual no fue recuperado por ChatClimate.

Por otro lado, si a ChatClimate le preguntamos específicamente por el cambio en la amplitud de El

Niño con el cambio climático, en este caso la respuesta es que “no se espera que la amplitud de la variabilidad de la temperatura de la superficie del mar asociada a El Niño o ENOS aumente sustancialmente ...” (Figura 6b), contradiciendo su respuesta anterior.

Más allá del hecho de que esta última conclusión del IPCC está sesgada hacia el índice Niño 3.4 en el Pacífico central, nos indica que, además del problema de las alucinaciones de los LLM, existen limitaciones en la búsqueda y recuperación de contenidos. Más aún, se ha encontrado que sistemas LLM-RAG aún presentan problemas sustanciales en la integración de información de varias fuentes, así como en negarse a responder si no tiene la respuesta y en identificar información falsa (Chen et al., 2023).

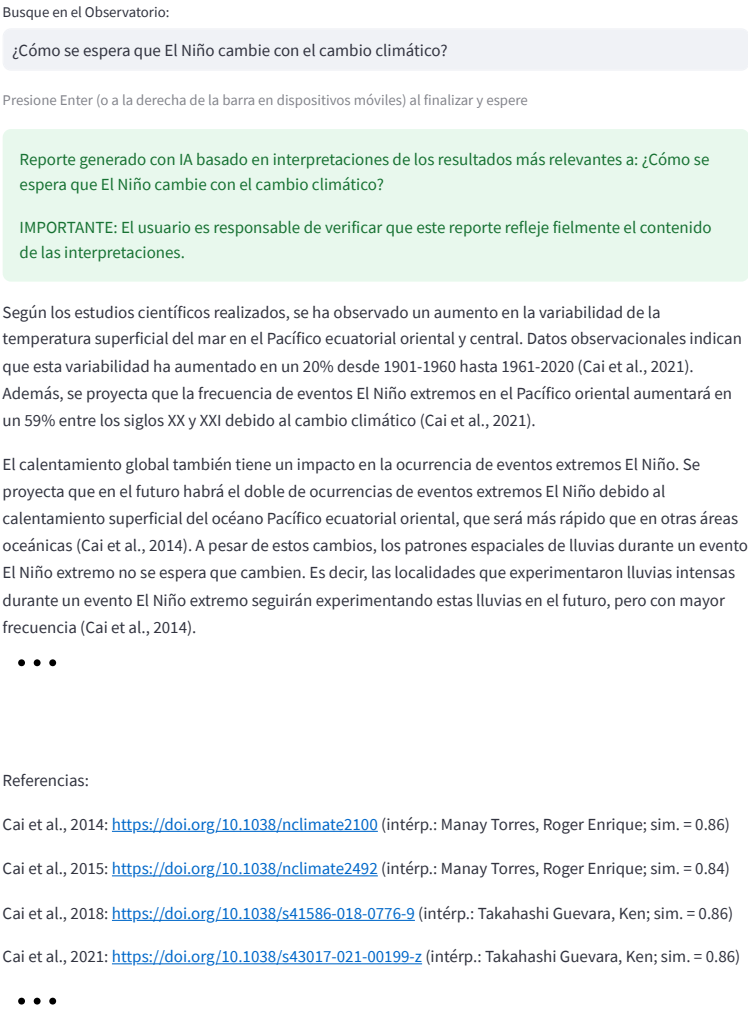


Figura 7. Fragmento de reporte generado con un prototipo de sistema RAG usando al O4C como base de conocimientos y el modelo GPT3.5 como LLM.

En el caso del Observatorio Ciencia Climática, se ha desarrollado un prototipo de sistema LLM-RAG que realiza una búsqueda semántica de las interpretaciones que sean más relevantes al término de búsqueda (*query*) introducido por el usuario

entre las interpretaciones disponibles en la base de conocimientos del O4C. Posteriormente, estas son derivadas a un LLM con instrucciones para generar un reporte síntesis de dicho contenido con relación al tema solicitado. El reporte generado contiene referencias a cada artículo interpretado e indica quiénes fueron los intérpretes que contribuyeron (Figura 7). Este es un modelo híbrido de inteligencia humana e inteligencia artificial, ya que en lugar de incorporar los artículos científicos completos a la base de conocimientos, los intérpretes humanos realizan la labor inicial de identificar lo potencialmente relevante de estos y permite que el usuario consulte directamente las interpretaciones humanas en lenguaje sencillo a partir del reporte del LLM.

Esto tiene la importante característica de establecer la responsabilidad de la interpretación en una persona, sin tener que depender del LLM para simplificar el texto técnico original, como en el caso de LLM-RAG típico. Además, es importante considerar que, a pesar de proporcionarle las interpretaciones humanas, el sistema LLM-RAG aún podría generar alucinaciones y es necesario que la comunidad experta del O4C esté constantemente evaluando su desempeño y contribuyendo a su mejora.

Lo anterior está en la línea de lo sugerido

recientemente por Debnath et al. (2023), quienes consideran necesario sistemas de IA “humano-céntricos” o de “humanos en el circuito” (*humans in the loop*) para reducir los sesgos de dichos sistemas y poder utilizarlos de forma confiable en la toma de decisiones para la acción climática. Sin embargo, si bien el reporte generado con inteligencia artificial puede ser un primer acercamiento, el O4C entrega no solo las interpretaciones generadas por los intérpretes humanos, sino también la asistencia técnica que miembros de la comunidad del O4C pueden dar al usuario, particularmente en el caso de que estos sean autoridades competentes en la gestión integral del cambio climático, tales como gobiernos regionales o ministerios para que el uso del conocimiento científico sea lo más confiable posible (Figura 8).

En conclusión, si bien los enormes avances en la tecnología de la inteligencia artificial crean una gran oportunidad para finalmente empezar a cerrar las brechas entre la ciencia y la toma de decisiones, es necesario conocer sus limitaciones y establecer mecanismos para asegurar la calidad del resultado final. Incluso con las probables mejoras a corto plazo de la IA, el rol de humanos expertos en la ciencia del cambio climático deberá fortalecerse para que la masificación de la información facilitada por la IA se realice de forma exacta y confiable.

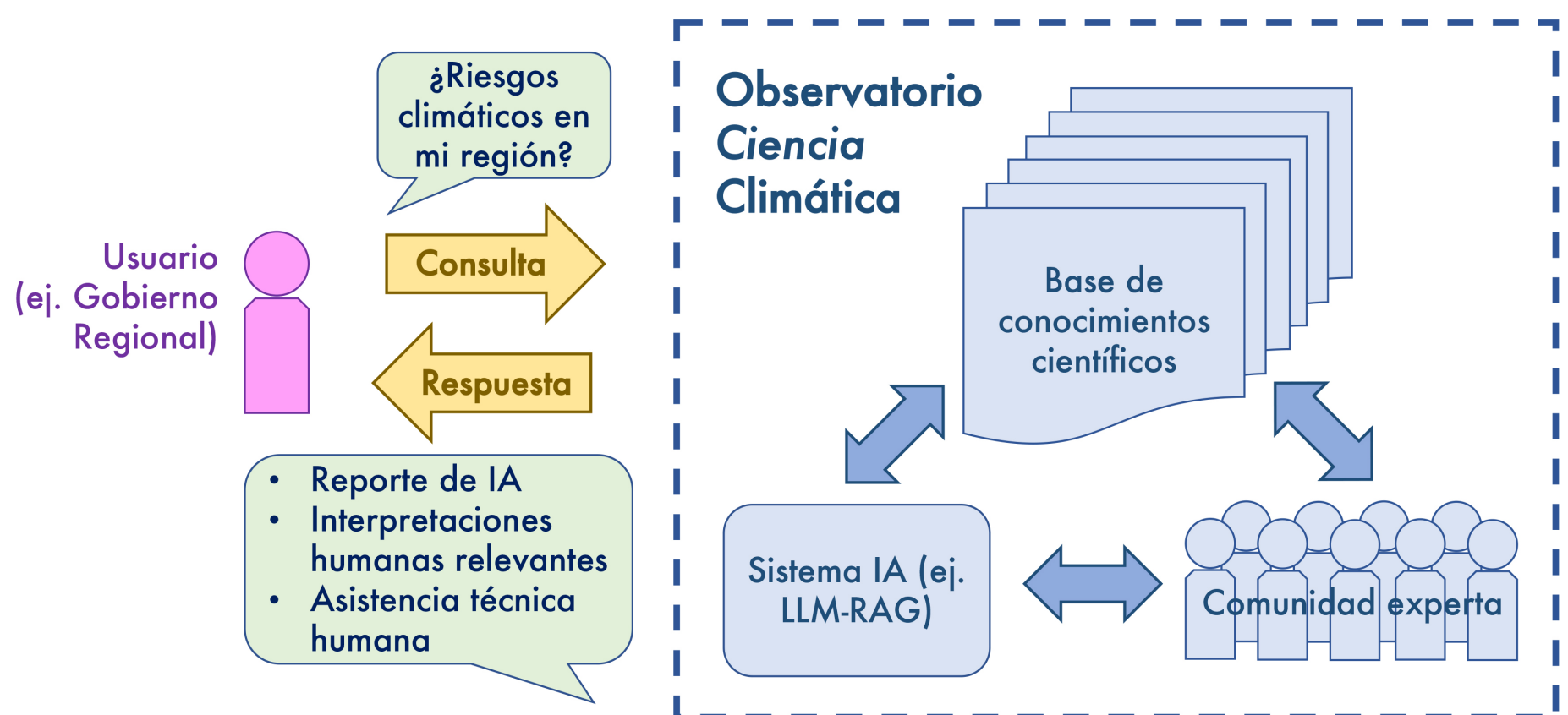


Figura 8. Modelo conceptual de la interacción entre Observatorio Ciencia Climática y el usuario.

Referencias

- Bohannon, J. (2016). Who's downloading pirated papers? Everyone. *Science*, 352(6285), 508-512. <https://doi.org/10.1126/science.352.6285.508>
- Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., ... Jin, F.-F. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 4(2), 111-116. doi:10.1038/nclimate2100
- Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S.-W., An, S.-I., Cobb, K. M., ... Wu, L. (2015). ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(9), 849-859. doi:10.1038/nclimate2743
- Cai, W., Santoso, A., Collins, M., Dewitte, B., Karamperidou, C., Kug, J.-S., ... Zhong, W. (2021). Changing El Niño-Southern Oscillation in a warming climate. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9), 628-644. doi:10.1038/s43017-021-00199-z
- Cai, W., Wang, G., Dewitte, B., Wu, L., Santoso, A., Takahashi, K., ... McPhaden, M. J. (2018). Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming. *Nature*, 564(7735), 201-206. doi:10.1038/s41586-018-0776-9
- Carréric, A., Dewitte, B., Cai, W., Capotondi, A., Takahashi, K., Yeh, S.-W., ... Guémas, V. (2019). Change in strong Eastern Pacific El Niño events dynamics in the warming climate. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-019-05036-0
- Cavalcanti Cárdenas, K. G. (2023). *La investigación científica y su impacto en la gestión integrada del recurso hídrico en la cuenca del río Santa* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Agraria La Molina].
- Debnath, Ramit, Felix Creutzig, Benjamin K. Sovacool, and Emily Shuckburgh. "Harnessing Human and Machine Intelligence for Planetary-Level Climate Action." *Npj Climate Action* 2, no. 1 (August 17, 2023): 20. <https://doi.org/10.1038/s44168-023-00056-3>.
- Ramit, D., Creutzig, F., Sovacool, B., & Shuckburgh, E. (2023). Harnessing Human and Machine Intelligence for Planetary-Level Climate Action. *Npj Climate Action* 2, 1(20). <https://doi.org/10.1038/s44168-023-00056-3>.
- Guerra, G. A., Hofmann, H., Sobhani, S., Hofmann, G., Gómez, D., Soroudi, D., Hopkins, B., Dallas, J., Pangal, S., Cheok, V., Nguyen, W., & Zada, G. (2023). GPT-4 Artificial Intelligence Model Outperforms ChatGPT, Medical Students, and Neurosurgery Residents on Neurosurgery Written Board-Like Questions. *World Neurosurgery*, <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.08.042>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report* of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). *Australasia*. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1581-1688. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009325844.013
- New, M., D.Reckien, D.Viner, C.Adler, S.-M.Cheong, C.Conde, A.Constable, E.Coughlan de Perez, A.Lammel, R. Mechler, B. Orlove, and W. Solecki, 2022: *Decision-Making Options for Managing Risk*. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2539-2654, doi:10.1017/9781009325844.026. Sección 17.3.1.3.2
- Katz, D., Bommarito, M.J., Shang, G. & Arredondo, P. (2023). GPT-4 Passes the Bar Exam, SSRN, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4389233>
- Miller, C. A., & Wyborn, C. (2020). Co-production in global sustainability: Histories and theories. *Environmental Science & Policy*, 113, 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.016>
- OpenAI, 2023: *GPT-4 Technical Report*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.08774>
- Pasgaard, M., Dalsgaard, B., Maruyama, P. K., Sandel, B., & Strange, N. (2015). Geographical imbalances and divides in the scientific production of climate change knowledge. *Global Environmental Change*, 35, 279-288. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.09.018>
- Sagemüller, F., Meißner, L., & Mußhoff, O. (2021). Where Can the Crow Make Friends? Sci-Hub's Activities in the Library of Development Studies and its Implications for the Field. *Development and Change*, 52(3), 670-683. <https://doi.org/10.1111/dech.12638>
- Sietsma, A.J., Ford, J., Callaghan, M., & Minx, J. (2021). Progress in Climate Change Adaptation Research. *Environmental Research Letters*, 16(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf7f3>.
- Takahashi, K., & Martínez, A. G. (2017). The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-017-3702-1
- World Climate Research Programme. (2019). *Strategic Plan 2019–2028*, https://www.wcrp-climate.org/images/documents/WCRP_Strategic_Plan_2019/WCRP-Strategic-Plan-2019-2028-FINAL-c.pdf
- Yamineva, Y. (2017). Lessons from the Intergovernmental Panel on Climate Change on inclusiveness across geographies and stakeholders. *Environmental Science & Policy*, 77, 244-251. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.04.005>

DESARROLLO DE UN MODELO DE MACHINE LEARNING PARA EL PRONÓSTICO METEOROLÓGICO DE PRECIPITACIÓN A ESCALA SUBESTACIONAL EN PERÚ

Brayan Urbina¹, Ken Takahashi¹

¹ Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú

Palabras clave: Machine Learning, precipitación, downscaling, subestacional

Citar como Urbina, B., & Takahashi, K. (2023). Desarrollo de un modelo de Machine Learning para el pronóstico meteorológico de precipitación a escala subestacional en Perú. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 10 n.º 09, págs. 13-17.

Resumen

Este trabajo muestra los avances de la aplicación del Machine Learning (ML) para predecir las precipitaciones en Perú a escala subestacional con hasta seis semanas de anticipación. Para ello, se utiliza el proyecto Subseasonal to Seasonal (S2S) como insumo para aplicar el enfoque de *downscaling* y mejorar la precisión y la resolución espacial de las predicciones teniendo como referencia el producto PISCOp V2.1 del SENAMHI. Luego de procesar los datos, se realiza un Análisis de Componentes Principales y se desarrollan modelos de regresión lineal múltiple para predecir los principales componentes observados utilizando los preestablecidos a partir de NCEP CFSv2 como predictores para cada día de pronóstico. Los resultados muestran un buen desempeño de las predicciones hasta 5 días de anticipación, especialmente en la región amazónica, pero la habilidad de pronóstico disminuye más allá de los cinco días debido a la complejidad de los factores que influyen en las precipitaciones y debido también a la simplicidad del modelo de regresión lineal. Se plantea la posibilidad de incorporar variables adicionales relacionadas con las oscilaciones de Madden-Julian (MJO, por sus siglas en inglés) en futuras versiones del modelo para ampliar el horizonte de pronóstico.

1. Introducción

El Perú tiene un territorio heterogéneo que comprende la Amazonía, la cordillera de los Andes y una costa árida. Está influenciado por una diversidad de fenómenos meteorológicos y climáticos, como El Niño y, particularmente, por fenómenos subestacionales tropicales, en escalas de algunas semanas, como la oscilación Madden-Julian en la atmósfera y las ondas Kelvin ecuatoriales oceánicas. Esto crea una oportunidad importante para la implementación de servicios climáticos con importantes beneficios sociales y económicos significativos, en particular para aquellos asociados con la modelización hidrológica y agrometeorológica, los cuales requieren pronósticos con plazos de entrega de datos de hasta algunas semanas.

Para una buena simulación y pronóstico numérico de los sistemas atmosféricos tropicales subestacionales es necesario representar adecuadamente la fuerte interacción con la convección. Sin embargo, los Modelos de Circulación General (MCG) tergiversan la precipitación convectiva y la temperatura de la superficie del mar en el océano Pacífico oriental (Seager et al., 2019), y no resuelven adecuadamente

las montañas de los Andes para sus aplicaciones. Si bien la reducción de escala utilizando modelos oceánicos-atmosféricos regionales de alta resolución podría ser una forma de superar este problema, la necesidad de conjuntos de múltiples miembros y múltiples modelos hace que este enfoque no sea práctico. Por lo tanto, la Organización Meteorológica Mundial recomienda aprovechar los datos de pronóstico subestacionales fácilmente disponibles de los MCG y utilizar modelos de inteligencia artificial/aprendizaje automático como una forma hábil y altamente eficiente de reducir los pronósticos para las aplicaciones de servicios climáticos.

En tal sentido, el objetivo de este trabajo es utilizar el Machine Learning (ML) para predecir las precipitaciones en el territorio peruano a escala subestacional con hasta 6 semanas de anticipación.

2. Metodología

Para esta investigación utilizamos uno de los modelos miembros del proyecto Subseasonal to Seasonal (S2S; Vitart et al., 2017) como insumo para nuestro modelo de ML. De esta manera, el enfoque utilizado para este sistema de pronóstico es el *downscaling*, donde tendremos la variable de lluvias pronosticadas desde el NCEP CFSv2 (National Center for Environmental Prediction-Climate Forecast System Version 2) en una resolución más baja para luego transformarlas a una escala local (Perú) de mayor exactitud de pronóstico y mayor resolución espacial.

En resumen, se representará la variabilidad de las precipitaciones observadas y pronosticadas por NCEP CFSv2 para el territorio peruano mediante principales componentes y se desarrollarán modelos de regresión lineal múltiple para predecir cada componente principal observada y cada tiempo de pronóstico (lead) usando los principales componentes pronosticados por NCEP CFSv2 como predictores.

2.1 Fuentes de datos

Los datos de precipitación considerados como objetivo de pronóstico (predictando) fueron obtenidos a través del producto de precipitación grillado PISCOp

V2.1 (*peruvian interpolated data of SENAMHI'S Climatological and Hydrological Observations*) de alta resolución del SENAMHI, que utiliza un algoritmo basado en métodos de interpolación a partir de datos de pluviómetros en Perú e información satelital para convertirla en información de alta resolución (Aybar et al., 2020). Este producto proporciona registros de lluvias en todo el territorio nacional a intervalos regulares diarios. Además, como fuente de previsibilidad (predictores), se utilizaron datos de precipitación del pronóstico subestacional de hasta 6 semanas del modelo climático océano-atmósfera global del NCEP CFSv2 (Saha et al., 2014). Los datos obtenidos tienen resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ y con resolución temporal diaria, y abarcan el periodo entre 1999 y 2021 en todos los datos.

2.2 Procesamiento de datos

Como se aprecia en el flujo de la Figura 1, el primer paso fue el procesamiento de los datos. Para ello, se realizó (1) la descarga de los datos en el periodo del caso de estudio para luego seleccionar el dominio de interés, (2) se calcularon las anomalías con el periodo base climatológico 1999-2010 y (3) se utilizó el filtro pasa-banda Butterworth (Butterworth, 1930) de orden 1 y periodos de corte entre los 20 y 60 días. Esto último se realizó para obtener la señal subestacional tanto de las precipitaciones pronosticadas como de las observadas, de manera que el ajuste del modelo de ML se pueda enfocar mejor en los patrones relevantes en esta escala.

El segundo paso fue hacer un Análisis de Componentes Principales (Wold et al., 1987), donde se seleccionan los componentes más representativos de la variabilidad, tanto para los predictores como los predictandos. Esto reduce la dimensionalidad de los datos y disminuye a su vez el tamaño del modelo necesario, lo cual es importante para evitar que el modelo se sobreajuste a patrones espurios.

Posteriormente, además de hacer la normalización estándar, se guardan los patrones espaciales de los Principales Componentes (PCs) o EOFs de PISCOp V2.1. Finalmente, el *dataset* se divide en dos grupos. El primer grupo de datos se utiliza para el entrenamiento, abarcando los periodos 1999-2010

y 2015-2017, mientras que el segundo grupo de datos se utiliza para validar el modelo, abarcando el periodo 2018-2021. En el caso de los datos de PISCOp V2.1, se consideran los primeros 13 PCs, los cuales explican el 90 % de la varianza.

2.3 Desarrollo del método

Una vez preparados los datos (según la Figura 1), se procede a realizar la selección de predictores mediante un *backward elimination* (Ferri et al., 1994) de los PCs calculados previamente. Este proceso de selección consiste en entrenar primero un modelo de regresión lineal múltiple con todos los posibles predictores para, seguidamente, hacer una evaluación del modelo tentativo mediante la métrica RMS (*root mean square*) y luego comparar con el modelo que resulta de quitar uno de los predictores, repitiendo esto último con cada predictor y eliminando la versión del modelo con peor desempeño según la métrica seleccionada. Esto se repite hasta finalmente obtener la mejor combinación de predictores.

El producto final del modelo es la anomalía de precipitación subestacional a paso diario sobre todo el territorio peruano en la grilla de PISCOp V2.1, la cual se construye mediante la suma de los PCs pronosticadas multiplicadas por los patrones espaciales de los EOFs correspondientes.

3. Resultados

Siguiendo el esquema de la Figura 1, después de obtener el modelo seleccionado (*predictive model*), este se utiliza para realizar predicciones con el *dataset* independiente de prueba (*test data*) y ver cuál es la habilidad del modelo comparando los PCs con lo observado según lo calculado con el producto PISCOp V2.1 para ese periodo. Luego se hace la reconstrucción de los mapas de precipitación utilizando los EOFs almacenados en la etapa de procesamiento.

En resumen, el flujo metodológico de la Figura 1 funciona para cada *lead* (día de pronóstico desde una fecha de referencia) de pronóstico del NCEP CFSv2. Por lo tanto, podemos obtener predicciones de lluvias teóricamente con hasta 43 días de anticipación.

La Figura 2 resume el rendimiento para cada *lead* mediante la correlación obtenida entre los PCs pronosticados del modelo de regresión lineal (modelo de *downscaling*) y los datos observados de PISCOp V2.1 en la data de prueba (*test data*). De acuerdo con esta figura, los PCs 1, 3 y 6, enfocados principalmente en la región amazónica y parte de la sierra oriental, tienen el mejor rendimiento en el eje de los *leads*. Las PCs 2, 5 y 7 están más enfocadas en la sierra y en algunas zonas de la Amazonía, aunque pierden rendimiento a los pocos días de pronóstico (3 *leads* en promedio).

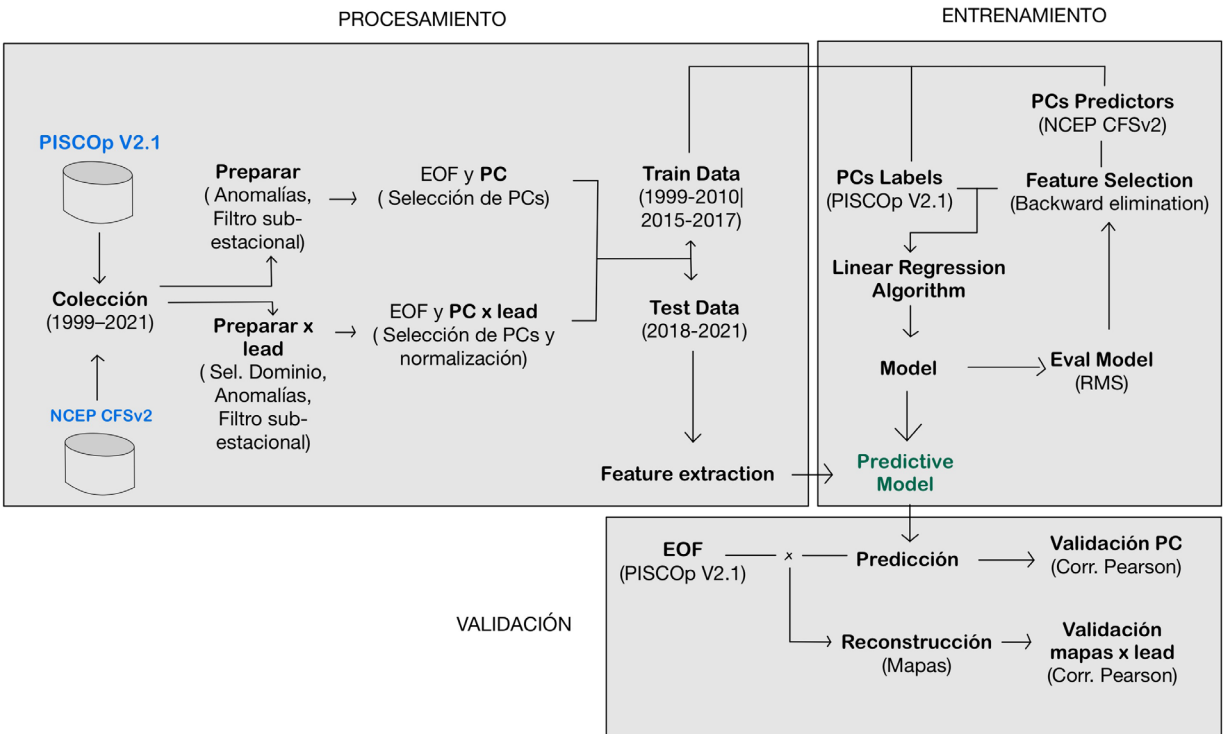


Figura 1. Diagrama de flujo del modelo de regresión lineal para cada *lead*. Se muestran los pasos involucrados en el procesamiento, entrenamiento y validación.

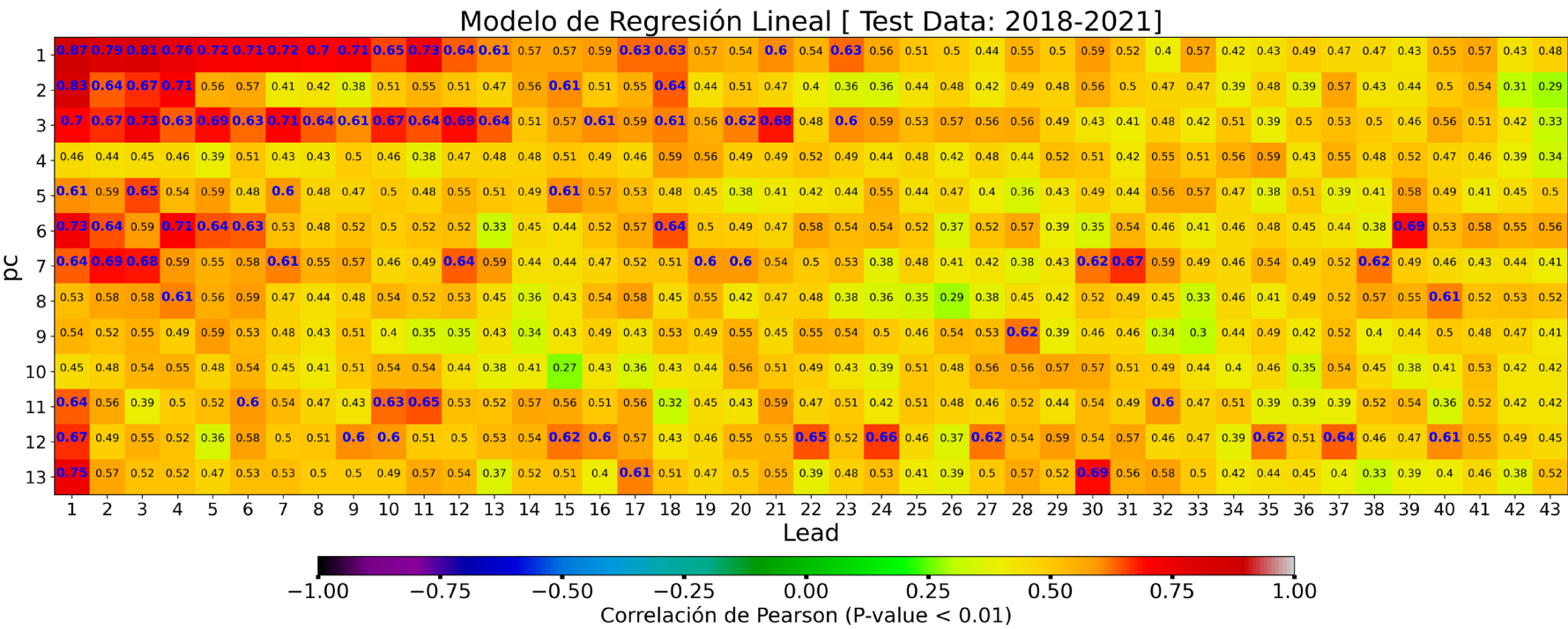
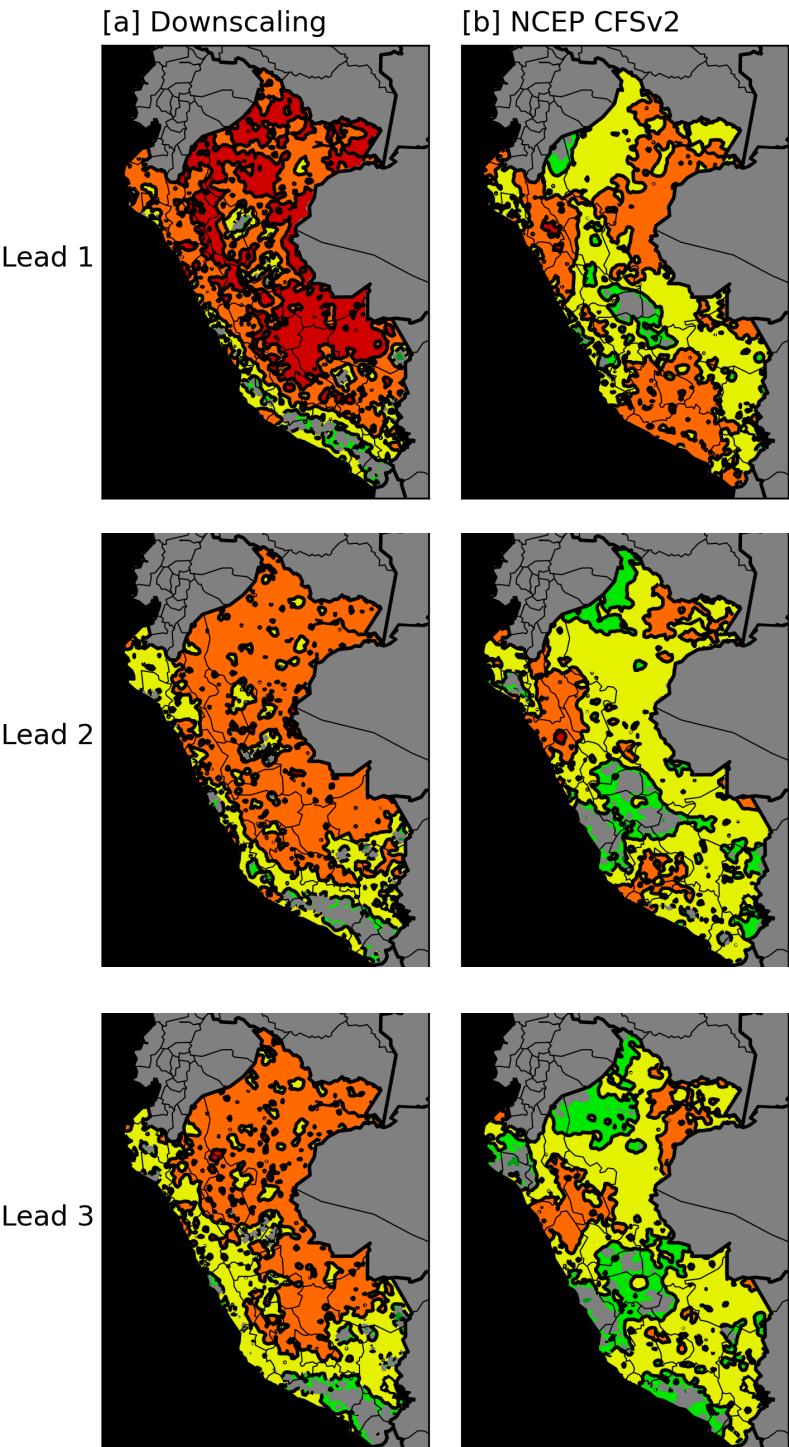


Figura 2. Tabla de valores de los coeficientes de correlación de los PCs versus cada *lead* de pronóstico. Se resaltan en morado los valores por encima de 0.6.

Dado que el objetivo final es comparar los resultados de previsión de nuestro modelo de *downscaling* con el producto de NCEP CFSv2, se obtienen correlaciones en todo el Perú. La Figura 3 muestra que el mejor rendimiento en el área de estudio se obtiene para el modelo *downscaling*, sobre todo en la mayor parte de la región amazónica hasta el *lead* 5 de pronóstico. También se aprecia un resultado por encima del valor de correlación positivo (>0.25) para la sierra del Perú y parte de la costa central y norte, mientras que el producto NCEP CFSv2 no tiene una habilidad adecuada de pronóstico (correlación por debajo de 0.25) en la zona centro del Perú. Por otro lado, la habilidad en el sur disminuye rápidamente desde el primer día de pronóstico (*lead* 1) y en gran parte de la zona norte, excepto para un área cercana a la región La Libertad.

Entonces, podemos concluir que la variabilidad de los patrones de EOFs localizada en región amazónica del producto PISCOp V2.1 responde adecuadamente y de forma lineal a algunos PCs predichos por el modelo climático, al menos para los primeros *leads* de pronóstico. Esto, presumiblemente, se debe a que algunos mecanismos responsables de las precipitaciones en esa región son bien reproducidos por el producto NCEP CFSv2. Por último, ninguno de los modelos resuelve bien el pronóstico de lluvias subestacionales, para ninguna región, más allá de los 5 días de pronóstico.



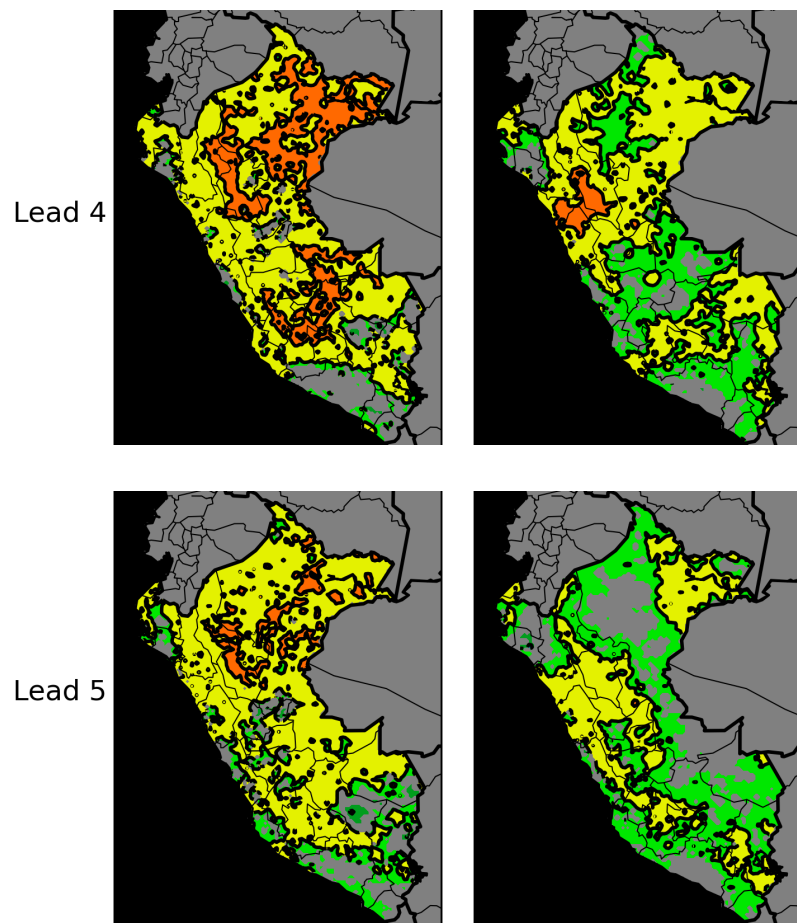


Figura 3. Mapas de correlación de Pearson hasta el *lead* 5 (día cinco de pronóstico): entre el Producto PISCOp V2.1 y la reconstrucción de las predicciones del modelo de regresión lineal (izquierda) y, lo mismo que el anterior, pero evaluando con los pronósticos de precipitación directos y previamente regrillados del producto NCEP CFSv2 (derecha).

4. Discusión

La limitación en el desempeño del pronóstico de *downscaling* más allá de los 5 días se debe posiblemente a la complejidad del desarrollo de la precipitación, ya que esta está influenciada por diversos factores tanto oceánicos como atmosféricos que no han podido ser adecuadamente capturados por el modelo climático. Asimismo, debemos tener en cuenta que el modelo de regresión lineal, por su misma simplicidad, no puede resolver comportamientos no lineales posiblemente existentes entre los predictores y la variable objetivo.

Por último, considerando que las oscilaciones de Madden-Julian (MJO), en principio, nos ofrecen una oportunidad de predicción a mayor plazo, es posible que la incorporación de variables predictoras adicionales asociadas a estas puedan ampliar el horizonte de pronóstico. Esto se evaluará en las siguientes versiones del modelo de *downscaling*.

Referencias

- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65, 770-785.
- Butterworth S. (1930). "On the Theory of Filter Amplifiers". *Experimental Wireless and the Wireless Engineer*, 7, 536-541.
- Ferri, F.J., Pudil, P., Hatef, M., & Kittler, J. (1994). Comparative Study of Techniques for Large-Scale Feature Selection. *Pattern Recognition in Practice IV*, 16, 403-413.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27, 2185-2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- Seager, R., Cane, M., Henderson, N., Lee, D.-E., Abernathey, R., & Zhang, H. (2019). Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases. *Nature Climate Change*, 9(7), 517-522. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0505-x>
- Vitart, F., Ardilouze, C., Bonet, A., Brookshaw, A., Chen, M., Codorean, C., Déqué, M., Ferranti, L., Fucile, E., Fuentes, M., Hendon, H., Hodgson, J., Kang, H., Kumar, A., Lin, H., Liu, G., Liu, X., Malguzzi, P., Mallas, I., Manoussakis, M., Mastrangelo, D., MacLachlan, C., McLean, P., Minami, A., Mladek, R., Nakazawa, T., Najm S., Nie, Y., Rixen, M., Robertson A. W., Ruti, P., Sun, C., Takaya, Y., Tolstykh, M., Venuti, F., Waliser, D., Woolnough, S., Wu, T., Won, D.-J., Xiao, H., Zaripov, R., & Zhang, L. (2017). The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 163-173. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0017.1>
- Wold, S., Esbensen, K. & Geladi, P. (1987). Principal Component Analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2, 37-52. [http://dx.doi.org/10.1016/0169-7439\(87\)80084-9](http://dx.doi.org/10.1016/0169-7439(87)80084-9)

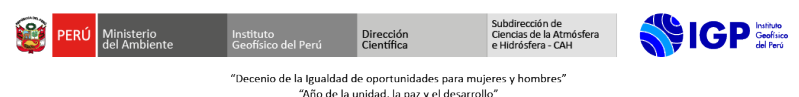
RESUMEN INFORME TÉCNICO

n.º PPR/EL NIÑO-IGP/2023-08

Según el valor del Índice Costero El Niño (ICEN), en julio se presentó la condición climática cálida fuerte (2.94 °C). Los valores del ICEN temporal (ICEN-tmp) de agosto (2.98 °C) y setiembre (2.68 °C), coinciden en indicar condiciones cálidas fuertes. Por otro lado, en el Pacífico central, el valor del Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de julio (1.06 °C) indica la condición cálida moderada. Los valores temporales (ONI-tmp) de agosto (1.32 °C) y setiembre (1.59 °C) indican condiciones cálidas moderadas y cálidas fuertes, respectivamente. Según las observaciones, *in situ* y satelital, de setiembre, se observa el arribo de una nueva onda de Kelvin cálida a la costa peruana y se espera en la siguiente semana el arribo del núcleo. Por otro lado, se observa en la profundidad de la termoclina, una posible onda de Kelvin fría débil alrededor de 160°W.

El promedio de las predicciones de los seis modelos climáticos de NMME —inicializados con la información de setiembre de 2023— para el Pacífico oriental indica condiciones de cálidas fuertes hasta el mes de noviembre, condiciones de cálidas moderadas a cálidas débiles de diciembre a junio de 2024. Por otro lado, para el Pacífico central, entre setiembre y febrero de 2024 se esperarían condiciones cálidas fuertes, en el periodo de marzo a mayo las condiciones serían de cálidas moderadas a cálidas débiles. Por otro lado, el modelo de Inteligencia Artificial del IGP pronostica un evento El Niño extremo ($E > 1.5$) para enero de 2024.

El informe técnico completo se encuentra disponible en <https://bit.ly/InfTecnElNino2023-08IGP>



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

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/2023-08

14/09/2023

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

Según el valor del Índice Costero El Niño (ICEN), en julio se presentó la condición climática cálida fuerte (2.94 °C). Los valores del ICEN temporal (ICEN-tmp) de agosto (2.98 °C) y setiembre (2.68 °C), coinciden en indicar condiciones cálidas fuertes. Por otro lado, en el Pacífico central, el valor del Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de julio (1.06 °C) indica la condición cálida moderada. Los valores temporales (ONI-tmp) de agosto (1.32 °C) y setiembre (1.59 °C) indican condiciones cálidas moderadas y cálidas fuertes, respectivamente. Según las observaciones, *in situ* y satelital, de setiembre, se observa el arribo de una nueva onda de Kelvin cálida a la costa peruana y se espera en la siguiente semana el arribo del núcleo. Por otro lado, se observa en la profundidad de la termoclina, una posible onda de Kelvin fría débil alrededor de 160°W.

El promedio de las predicciones de los seis modelos climáticos de NMME —inicializados con la información de setiembre de 2023— para el Pacífico oriental indica condiciones de cálidas fuertes hasta el mes de noviembre, condiciones de cálidas moderadas a cálidas débiles de diciembre a junio de 2024. Por otro lado, para el Pacífico central, entre setiembre y febrero de 2024 se esperarían condiciones cálidas fuertes, en el periodo de marzo a mayo las condiciones serían de cálidas moderadas a cálidas débiles. Por otro lado, el modelo de Inteligencia Artificial del IGP pronostica un evento El Niño extremo ($E > 1.5$) para enero de 2024.

www.igp.gob.pe
Calle Badajoz N° 169
Urb. Mayerazgo IV Etapa
Ate, Lima 15012 - Perú.
(51) 13172300

Gobierno del Perú

BICENTENARIO
DEL PERÚ
2021 - 2024

Advertencia: El presente informe sirve como insumo para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN). El pronunciamiento colegiado de la comisión multisectorial del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

COMUNICADO OFICIAL

ENFEN n.º 14-2023



ESTUDIO NACIONAL DEL
FENÓMENO "EL NIÑO"

COMISIÓN MULTISECTORIAL ENCARGADA
DEL ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO "EL NIÑO" – ENFEN
Decreto Supremo n.º 007-2017-PRODUCE

Estado del sistema de alerta: **Alerta de El Niño costero¹**

La Comisión Multisectorial del ENFEN mantiene el estado de "Alerta de El Niño Costero", ya que se espera que El Niño costero (región Niño 1+2, Figura 1) continúe hasta el verano de 2024, como consecuencia de la alta probabilidad que se desarrolle El Niño en el Pacífico central con magnitud moderada.

Conforme al juicio experto del ENFEN, basado en los datos observados, así como de los pronósticos de los modelos climáticos internacionales que se tienen hasta la fecha, es más probable que en la región Niño 1+2 las condiciones cálidas fuertes se mantengan hasta diciembre (Figura 2). Para el verano de 2024, en promedio, las magnitudes más probables de El Niño costero serían moderada (56 %) y fuerte (25 %) (Tabla 1).

Por otro lado, en el Pacífico central (región Niño 3.4, Figura 1) se espera que El Niño continúe su desarrollo hasta el verano de 2024. La magnitud más probable de este evento sería moderada, inclusive

en el verano (ver Figura 2 y Tabla 2).

Para el trimestre setiembre-noviembre de 2023², a lo largo de la costa se esperan temperaturas del aire por encima de lo normal. Además, se esperan lluvias por encima de lo normal en la costa norte y sierra norte. Para el verano de 2024, bajo el escenario de El Niño costero, es probable la ocurrencia de lluvias por encima de lo normal en la costa y la sierra norte, sin descartar lluvias intensas especialmente en la costa norte. Por otro lado, considerando el escenario de El Niño en el Pacífico central es probable un escenario de lluvias bajo lo normal en la región andina, particularmente en la sierra sur³.

Entre setiembre y noviembre, los caudales y niveles de los principales ríos del país presentarían valores entre debajo de lo normal y normal; mientras que en la zona noroccidental se presentarían caudales por encima de lo normal hacia diciembre y enero. El nivel del lago Titicaca continuaría presentando una tendencia

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

² Perspectivas climáticas setiembre-noviembre 2023: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-38.pdf>

³ Escenario probabilístico de lluvias verano 2024: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02261SENA-10.pdf>

descendente; asimismo, los caudales de los principales ríos afluentes al lago presentarían un comportamiento por debajo de lo normal⁴. Para el verano de 2024, podrían presentarse caudales por encima de lo normal en la zona noroccidental, principalmente. Por otro lado, es probable que continúen las condiciones hidrológicas por debajo de lo normal en la zona sur, especialmente en la región hidrográfica del Titicaca⁵. En cuanto a los recursos pesqueros pelágicos, para las próximas semanas se espera que la anchoveta mantenga su mayor actividad reproductiva dentro de su período principal de desove (invierno-primavera).

En cuanto al bonito, continuaría disponible y accesible, principalmente en la zona norte del litoral peruano. En el caso de los recursos demersales, para las próximas semanas, se prevé que la merluza mantenga el comportamiento observado en agosto, con valores bajos en los desembarques industriales y artesanales. Asimismo, es predecible que, de persistir las condiciones cálidas anómalas, disminuya levemente la disponibilidad del calamar gigante o pota. Por otro lado, continuaría la permanencia de especies indicadoras de aguas cálidas en la zona costera.

Se recomienda a los tomadores de decisiones tener en cuenta los posibles escenarios de riesgo, de acuerdo con el pronóstico estacional vigente y las proyecciones para el verano de 2024, con la finalidad que se adopten las acciones que correspondan para la reducción del riesgo y la preparación para la respuesta.

La Comisión Multisectorial del ENFEN continuará informando sobre la evolución de las condiciones oceánicas-atmosféricas y actualizando las perspectivas. El ENFEN emitirá su próximo comunicado oficial el jueves 28 de setiembre de 2023.

- Para mayor información, consultar el Informe Técnico Mensual en el siguiente enlace: <https://bit.ly/InfTecENFEN13-2023>
- Puede acceder a leer en comunicado en su totalidad a través del siguiente enlace: <https://bit.ly/comunicadoENFEN2023-014>

INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN



⁴ Pronóstico hidrológico estacional setiembre 2023-enero 2024: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02694SENA-37.pdf>

⁵ Escenarios de las condiciones hidrológicas en un contexto de El Niño: <https://www.gob.pe/institucion/senamhi/informes-publicaciones/4553093-escenarios-de-las-condiciones-hidrologicas-en-%20un-contexto-de-el-nino>

COMUNICADO OFICIAL

ENFEN n.º 15-2023



ESTUDIO NACIONAL DEL
FENÓMENO "EL NIÑO"

COMISIÓN MULTISECTORIAL ENCARGADA
DEL ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO "EL NIÑO" – ENFEN
Decreto Supremo n.º 007-2017-PRODUCE

Estado del sistema de alerta: **Alerta de El Niño costero¹**

La Comisión Multisectorial del ENFEN mantiene el estado de "Alerta de El Niño Costero", ya que se espera que El Niño costero (región Niño 1+2, Figura 1) se prolongue hasta el verano de 2024, como consecuencia de la alta probabilidad del desarrollo de El Niño en el Pacífico central.

Conforme al juicio experto del ENFEN, basado en los datos observados, así como de los pronósticos de los modelos climáticos internacionales que se tienen hasta la fecha, en la región Niño 1+2, pese a la reciente disminución de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM), es más probable que las condiciones cálidas fuertes se mantengan hasta noviembre (Figura 2). Para el verano de 2024, en promedio, las magnitudes más probables de El Niño costero serían moderada (51 %) y fuerte (35 %) (Tabla 1).

Por otro lado, en el Pacífico central (región Niño 3.4, Figura 1) se espera que El Niño continúe su

desarrollo hasta el verano de 2024, alcanzando su máxima intensidad a fines de año. Las magnitudes más probables de este evento en el verano son moderada (57 %) y fuerte (26 %) (ver Figura 2 y Tabla 2).

Para el trimestre octubre-diciembre de 2023², a lo largo de la costa se esperan temperaturas del aire por encima de lo normal. Además, se prevé lluvias por encima de lo normal en la costa norte, costa centro y sierra norte. Para el verano de 2024, bajo el escenario de El Niño costero, es probable la ocurrencia de lluvias por encima de lo normal en la costa norte y la sierra norte, sin descartar lluvias intensas especialmente en la región noroccidental del país. Por otro lado, considerando el escenario de El Niño en el Pacífico central es probable un escenario de lluvias bajo lo normal en la región andina, particularmente en la sierra sur³.

Entre octubre y noviembre, los caudales y niveles de los principales ríos del país presentarían valores entre

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

² Perspectivas climáticas octubre-diciembre 2023: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-39.pdf>

³ Escenario probabilístico de lluvias verano 2024: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02261SENA-11.pdf>

debajo de lo normal y normal; mientras que en la zona noroccidental del país se presentarían caudales por encima de lo normal hacia diciembre. El nivel del lago Titicaca continuaría presentando una tendencia descendente; asimismo, los caudales de los principales ríos afluentes al lago presentarían un comportamiento por debajo de lo normal⁴. Para el verano de 2024, bajo el escenario de El Niño, podrían presentarse caudales por encima de lo normal, principalmente en la zona noroccidental del país. Por otro lado, se prevé que continúen las condiciones hidrológicas por debajo de lo normal en la zona sur, especialmente en la región hidrográfica del Titicaca⁵.

En cuanto a los recursos pesqueros pelágicos, para las próximas semanas, se espera que la anchoveta aún mantenga su mayor actividad reproductiva dentro de su período principal de desove (invierno-primavera). El bonito permanecería disponible y accesible a lo largo del litoral peruano. En cuanto a los recursos demersales, para las próximas semanas, se espera que la merluza mantenga el comportamiento observado desde agosto, con valores bajos en los desembarques industriales y artesanales, así como el aumento de la presencia de ejemplares menores a los 28 cm, propios del proceso de reclutamiento de primavera. Asimismo, de continuar la reciente tendencia al debilitamiento de las condiciones cálidas anómalas, el calamar gigante o pota mantendrá su disponibilidad actual.

Se recomienda a los tomadores de decisiones tener en cuenta los posibles escenarios de riesgo, de acuerdo con el pronóstico estacional vigente y las proyecciones para el verano de 2024, con la finalidad que se adopten las acciones que correspondan para la reducción del riesgo y la preparación para la respuesta.

La Comisión Multisectorial del ENFEN continuará informando sobre la evolución de las condiciones oceánicas-atmosféricas y actualizando las perspectivas. El ENFEN emitirá su próximo comunicado oficial el viernes 13 de octubre de 2023.

- Para mayor información, consultar el Informe Técnico Mensual en el siguiente enlace: <https://bit.ly/InfTecENFEN14-2023>
- Puede acceder a leer en comunicado en su totalidad a través del siguiente enlace: <https://bit.ly/comunicadoENFEN2023-015>

INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN



⁴ Pronóstico hidrológico estacional setiembre 2023-enero 2024: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02694SENA-37.pdf>

⁵ Escenarios de las condiciones hidrológicas en un contexto de El Niño: <https://www.gob.pe/institucion/senamhi/informes-publicaciones/4553093-escenarios-de-las-condiciones-hidrologicas-en-un-contexto-de-el-nino>



@igp.peru



@igp_peru



@igp.peru



@igp_videos



@institutogeofisicodelperu



@igp.peru