

LLUVIA EN LOS ANDES DEL NORTE: COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL ISOTÓPICA EN EL AGUA METEÓRICA Y SU RESPUESTA AL ENSO

Lizbeth Bulnes¹, James Apaéstegui^{1,2}, Carol Romero²

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina

² Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú

Palabras clave: El Niño, isótopos, índices ENSO

Citar como Bulnes, L., Apaéstegui, J. & Romero, C. (2023). Lluvia en los Andes del norte: comportamiento de la señal isotópica en el agua meteórica y su respuesta al ENSO. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 10 n.º 06, págs. 11-15.

Resumen

La respuesta de la lluvia a la dinámica del ENSO se ha manifestado significativamente en las últimas décadas, sobre todo en la región norte peruana donde las intensas lluvias, asociadas a los eventos El Niño, han generado estragos en la economía local y nacional. La información disponible, que permita la interpretación y comprensión de estos eventos, se limita a algunas décadas, por lo que el estudio e interpretación de las condiciones pasadas resultan ser relevantes por su potencial de ser empleado como una herramienta en la gestión del riesgo de desastres. En este sentido, el presente trabajo busca interpretar la señal isotópica ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) de la lluvia de los Andes del norte y analizar su respuesta a los índices ENSO para poder ser empleada como un registro paleoclimático. Como parte del estudio se analizó la señal isotópica de las muestras de lluvia colectadas en Polulo, Cajamarca, durante el periodo mayo de 2021 a noviembre de 2022, la relación entre la Línea Meteórica Local (LMWL, por sus siglas en inglés) respecto de la Línea Meteórica Global (GMWL, por sus siglas en inglés) y la respuesta de la señal isotópica a los índices E, C y MEI para caracterizar las variaciones del ENSO. Los resultados revelan una variabilidad en la señal de $\delta^{18}\text{O}_p$ de la lluvia a lo largo de todos los meses evaluados. Se observa una concordancia

entre la LMWL y GMWL que se entiende como aguas meteóricas sin efectos por parte de la evaporación. Además, se identifica una asociación entre la señal de $\delta^{18}\text{O}_p$ con los índices E y MEI, lo que lleva a inferir la aplicabilidad de los isótopos en la interpretación de las condiciones ambientales de la zona.

1. Introducción

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es un evento natural que resulta del acoplamiento océano-atmósfera en el océano Pacífico tropical, expresado con fluctuaciones irregulares en la escala interanual. Además, el ENSO presenta dos fases: la fase positiva o cálida (El Niño) y la fase negativa o fría (La Niña) (Garreaud et al., 2003; Mc Phaden et al., 2021).

En el último siglo, la costa norte del Perú ha sido la región de Sudamérica con mayor afectación por parte del fenómeno de El Niño. El incremento de la temperatura superficial del mar (TSM) en las costas de Ecuador y el norte peruano, como efecto del desarrollo del fenómeno, conlleva a cambios en la atmósfera que se manifiestan a través de lluvias anómalas. Este evento ha sido registrado a lo largo del tiempo, como en el caso de El Niño 1997-1998, donde las lluvias en la ciudad de Piura aumentaron significativamente de

60 mm a 1820 mm (Sulca et al., 2018). Otro ejemplo importante es El Niño Costero 2017, el cual presentó anomalías en la TSM con valores entre 1.4 °C y 6 °C, llegando a alcanzar registros de TSM por encima de 28 °C (ENFEN 2017; Garreaud, 2018; Rodríguez-Morata et al., 2019), lo que generó incrementos considerables de precipitación en las regiones del norte peruano y resultó en pérdidas sociales y económicas significativas, afectando viviendas, carreteras, cultivos, entre otros.

La importancia de conocer la dinámica del fenómeno y sus impactos es relevante para la gestión del riesgo de desastres en el territorio peruano. No obstante, los registros ambientales se limitan a algunas decenas de años, por lo que resulta insuficiente para comprender la magnitud y frecuencia de los eventos extremos. En esa brecha de información, se busca incrementar los registros de precipitación a través de reconstrucciones paleoambientales. En tal sentido, el presente trabajo analiza el comportamiento de la señal isotópica en las lluvias en los Andes del norte, su respuesta a los índices oceánicos para caracterizar la variabilidad del ENSO y su aplicación como registros paleoclimáticos.

2. Área de estudio

El área de estudio comprende a la parte alta de la microcuenca del río Chancay, la cual se emplaza sobre cinco formaciones y un grupo geológico. De estas formaciones, las de mayor representatividad corresponden a la formación Llama (o volcánico Llama P-II), conformada por una secuencia gruesa de volcánicos, y la formación Huambos (Nm-huam). Por otro lado, en menor proporción se registró la formación Cajamarca (ks-ca), la formación Carhuaz (Kica) y la formación Pariatambo (Ki-pt). El Grupo Pulluicana (Ks-pu) se localizó en la región norte de la microcuenca, y se encuentra constituido principalmente por caliza, lo que le confiere características kársticas. Además, como parte de la litología, se registraron los depósitos aluviales (Qh-al) y la Dacita (PN-da) (Figura 1). Dentro la microcuenca se ubicó la cueva Polulo, localizada en 6.680° S y 78.799° O, a los 2200 m s. n. m, la cual presenta un desarrollo de 483 m con un desnivel de 75 m desde el ingreso a la cavidad (Moquet et al., 2009). En este punto se colectaron aguas de goteo y espeleotemas para las reconstrucciones paleoambientales. A

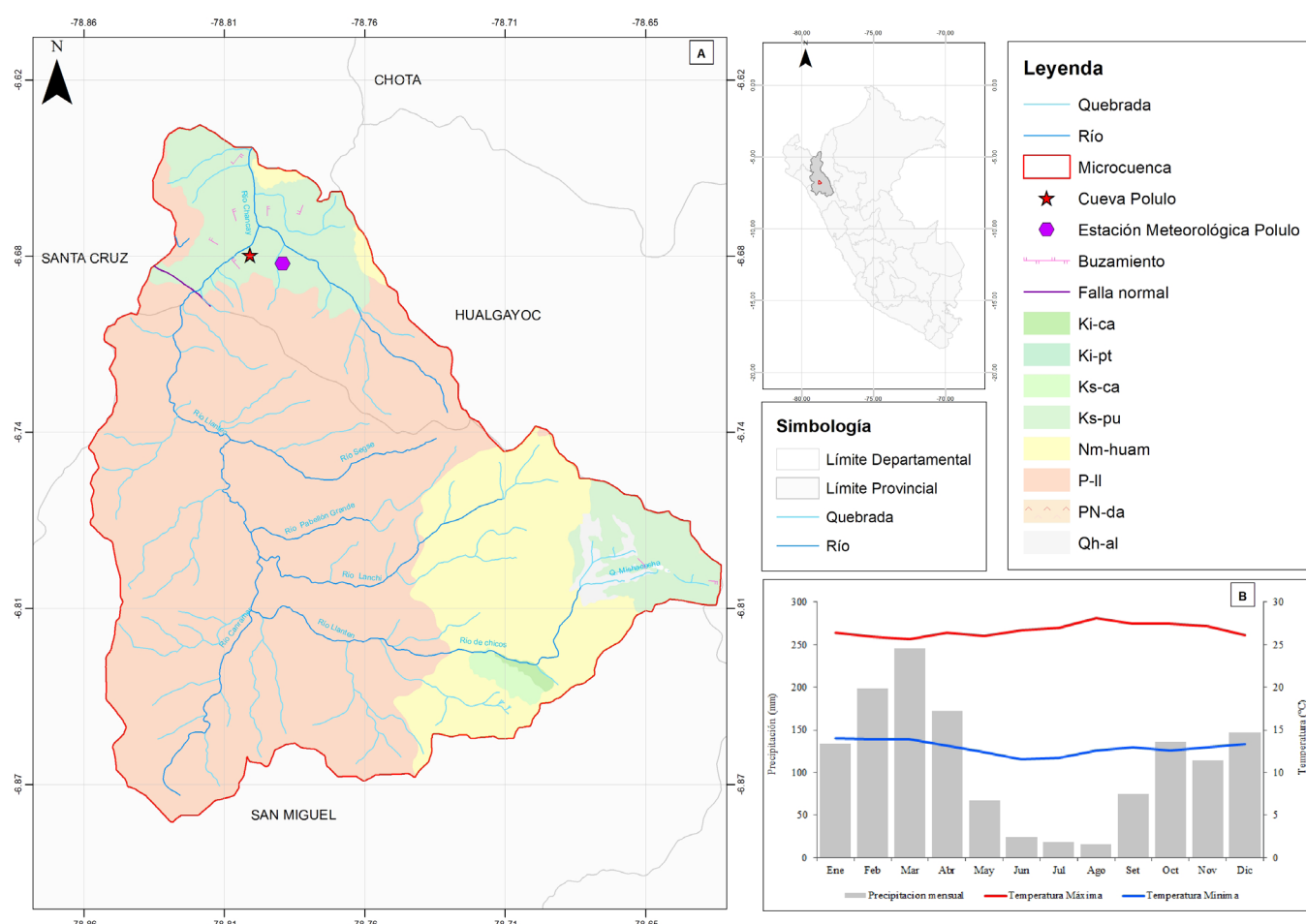


Figura 1. (Panel izquierdo) Localización del área de estudio en el contexto peruano. Se indican las formaciones litológicas que conforman la parte alta de la cuenca del río Chancay, la estación de monitoreo (el punto morado) y la cueva de Polulo (estrella roja). (Panel inferior derecho) Climatología de las precipitaciones (barras grises). Se incluyen las temperaturas máximas (línea roja) y mínimas (línea azul) para el área de estudio obtenidas de la estación de Chugur en el periodo 1964-2022.

metros de la cueva Polulo se instaló una estación de monitoreo (estación meteorológica Polulo-EMP, 6.683° S y 78.787° O) para el registro de variables ambientales (precipitación, temperatura y humedad relativa) y colecta de muestras de agua de lluvia para su análisis de isótopos estables correspondiente ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$). El registro de variables ambientales fue diario, con ausencia de datos de precipitación entre abril y noviembre de 2022 debido a problemas técnicos en los equipos. Por otro lado, la colecta de muestras de agua fue aproximadamente cada 15 días, entre abril de 2021 y febrero de 2023.

3. Resultados preliminares

La ausencia de registros de lluvia en la EMP (abril-noviembre de 2022) se complementó con el tratamiento de los datos de la estación meteorológica Chugur, ubicada a menos de 6 km. La lluvia anual en Polulo se encontró en el orden de 1 500 mm anuales, mostrando un régimen bimodal acorde con lo documentado para las precipitaciones en el norte peruano (Segura et al., 2020). Los dos picos de mayores registros se registraron en marzo y octubre (Figura 1b).

Por otro lado, se midieron las razones isotópicas de las muestras de agua de lluvia y goteo colectadas durante el periodo mayo de 2021 a noviembre de 2022, esto mediante su análisis en el espectrómetro Los Gatos Research (LGR), modelo 912 0008 de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). La señal isotópica de ^{18}O en la lluvia ($\delta^{18}\text{O}_p$) mantuvo registros desde -2.55 ‰ hasta -15.15 ‰, con un valor promedio de -7.61 ‰ y desviación estándar (σ) de 3.14. La señal isotópica de deuterio en la lluvia ($\delta^2\text{H}_p$) varió desde -4.14 ‰ hasta -107.47 ‰, con un valor promedio de 47.14 ‰ y σ de 26.56. La señal isotópica de las muestras de goteo ($\delta^{18}\text{O}_g$ y $\delta^2\text{H}_g$) mostró una menor variabilidad en relación con los registros de precipitación, con un σ inferior a 0.60. El valor promedio de $\delta^{18}\text{O}_g$ fue -8.85 ‰ y de $\delta^2\text{H}_g$ fue de -60.26 ‰ (Figura 2a).

La relación lineal entre las señales isotópicas ($\delta^{18}\text{O}_p$, $\delta^2\text{H}_p$) obtenidas de la lluvia y el agua de goteo definen la LMWL ($\delta^2\text{H}_p = 8.42 \delta^{18}\text{O}_p + 16.95$ ‰), la cual presenta una configuración similar con respecto a la GMWL ($\delta^2\text{H}_p = 8.0 \delta^{18}\text{O}_p + 10$ ‰) (Figura 2b). Esto indica un comportamiento homogéneo y típico de aguas meteóricas sin impactos de evaporación, lo

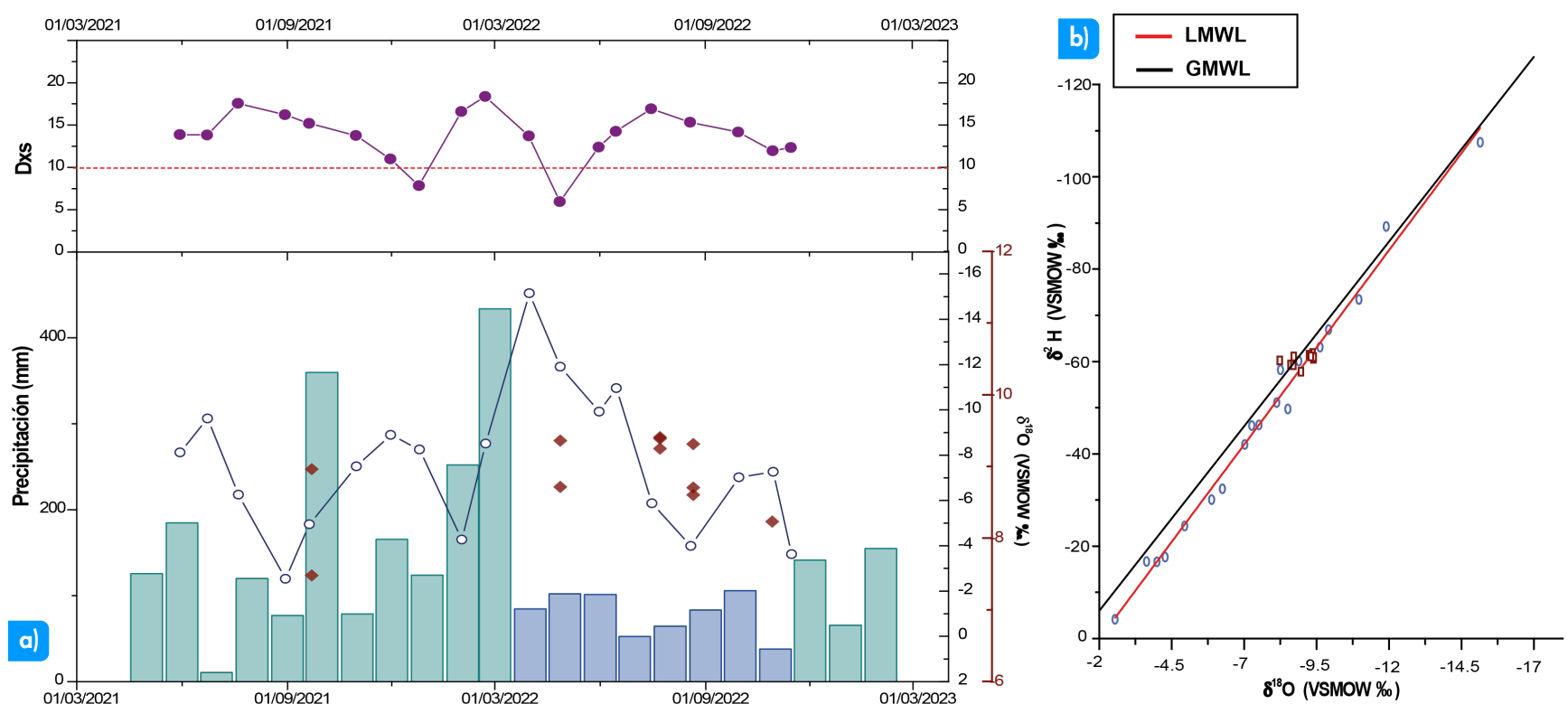


Figura 2. a) Variación temporal de la cantidad de precipitación (Dxs_p), $\delta^{18}\text{O}_p$ y $\delta^{18}\text{O}_g$ entre mayo de 2021 y febrero de 2023. Las barras representan la precipitación mensual; las sombreadas en color verde, los valores medidos en la EMP y, las sombreadas en azul, los registros reconstruidos con información de la estación meteorológica convencional Chugur. Los círculos blancos indican el $\delta^{18}\text{O}_p$; los cuadrados rojos, el $\delta^{18}\text{O}_g$ y, los círculos morados, la variación temporal de Dxs_p . La línea punteada representa el promedio global de Dxs_p (10 ‰). Es importante destacar que las escalas para $\delta^{18}\text{O}_p$ y $\delta^{18}\text{O}_g$ están invertidas. b) Comparación entre la GMWL y la LMWL. Los círculos blancos representan los valores de $\delta^{18}\text{O}_p$ y $\delta^2\text{H}_p$, mientras que los cuadrados rojos representan los valores $\delta^{18}\text{O}_g$ y $\delta^2\text{H}_g$, respectivamente.

cual es fundamental para su aplicación en estudios ambientales. No obstante, se percibe que la pendiente de LMWL muestra un valor ligeramente superior a la GMWL, asociado al exceso de deuterio determinado (16.95 ‰), siendo superior al valor teórico (10 ‰). Esto podría indicar fuentes de humedad de la región amazónica, la cual se caracteriza por procesos de reciclaje de humedad como se ha visto en el estudio de Ampuero et al. (2020) y Jiménez-Iñiguez et al. (2022).

A fin de evaluar las condiciones oceánicas y atmosféricas en el océano Pacífico ecuatorial en las señales isotópicas, se hicieron comparaciones entre las señales isotópicas de los índices E y C, determinadas por Takahashi et al. (2011), así como con el índice bimestral multivariado del ENSO (MEI, por sus siglas en inglés), las cuales se presentan en la Figura 3. Dichas comparaciones mostraron que existe una respuesta favorable al índice E y el MEI, lo que valida la utilidad de los isótopos para el estudio de las señales del ENSO en las lluvias de la región de Polulo.

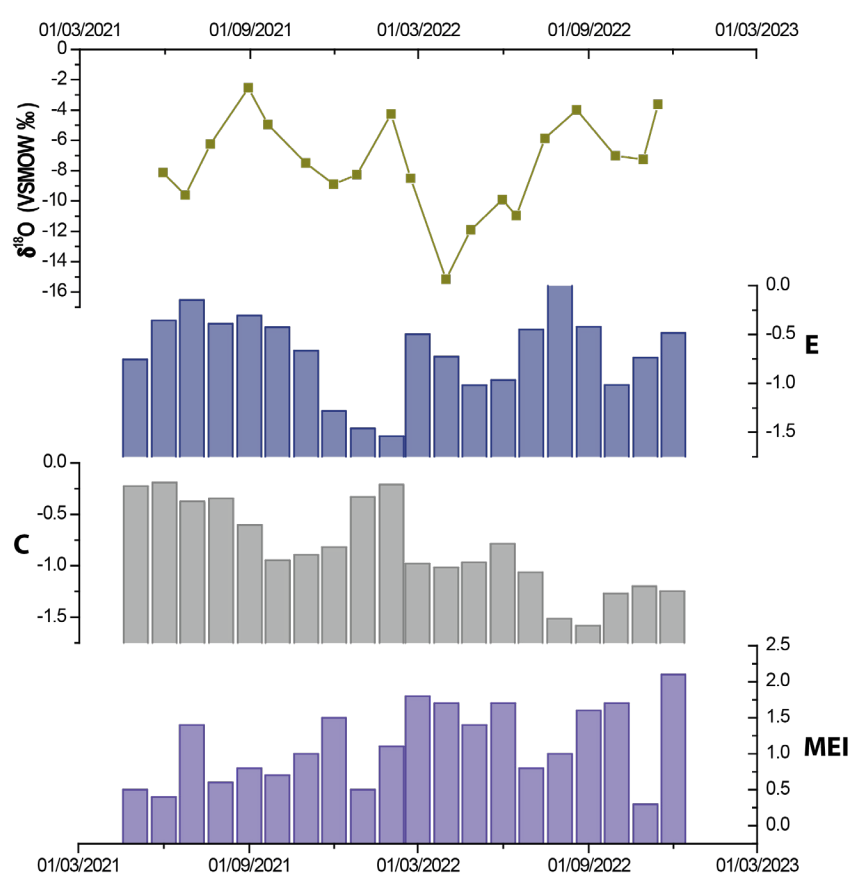


Figura 3. Variación temporal de la señal isotópica $\delta^{18}O_p$, el índice E, el índice C y el índice bimestral multivariado ENSO (MEI) durante el periodo de estudio (mayo de 2021-diciembre de 2022). Los índices E y C resumen la variabilidad asociada a El Niño y La Niña, y representan el calentamiento superficial anómalo en el Pacífico este y Pacífico central, respectivamente. El índice MEI representa una medida integral de la variabilidad del ENSO.

4. Comentarios

Los resultados muestran la caracterización de la señal isotópica de la región de Polulo, apreciándose una configuración similar entre los resultados de la LMWL y la GMWL, lo que señala un comportamiento característico de aguas meteóricas sin impactos de evaporación; además, una representatividad con los índices E y MEI empleados en el estudio del ENSO. Las comparaciones con ambos índices mostraron que el comportamiento de la señal isotópica $\delta^{18}O_p$ presenta una respuesta a condiciones relacionadas con El Niño, lo que resulta favorable para la comprensión de las condiciones ambientales de la zona de Polulo. Por lo tanto, se procederá a evaluar las series históricas y los parámetros hidrológicos en las muestras de goteo a fin de validar la reconstrucción paleoambiental con base en los espeleotemas colectados.

Este estudio forma parte del proyecto “Paleo ENSO y eventos climáticos extremos pasados: Generación de evidencias para la gestión de riesgo de desastre en el norte peruano” (Contrato n.º 124-2020 FONDECYT), el cual es ejecutado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) con el financiamiento del Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT).

Referencias

- Ampuero, A., Stríkis, N. M., Apaéstegui, J., Vuille, M., Novello, V. F., Espinoza, J. C., Cruz, F. W., Vonhof, H., Mayta, V. C., Martins, V. T. S., Cordeiro, R. C., Azevedo, V. & Sifeddine, A. (2020). The Forest Effects on the Isotopic Composition of Rainfall in the Northwestern Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 125, e2019JD031445. <https://doi.org/10.1029/2019JD031445>.
- Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño. (2017). *Informe Técnico Extraordinario N.º 001-2017 / ENFEN El Niño Costero 2017*. https://www.dhn.mil.pe/Archivos/Oceanografia/ENFEN/nota_tecnica/01-2017.pdf
- Garreaud, R.D. (2018). A plausible atmospheric trigger for the 2017 coastal El Niño. *International Journal of Climatology*, 38, e1296-e1302. <https://doi.org/10.1002/joc.5426>
- Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194, 5-22. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)

Jiménez-Iñiguez, A., Ampuero, A., Valencia, B. G., Mayta, V. C., Cruz, F. W., Vuille, M., Novello, V. F., Misailidis Stríkis, N., Aranda, N., & Conicelli, B. (2022). Stable isotope variability of precipitation and cave drip-water at Jumandy cave, western Amazon River basin (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 610:127848. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127848>

McPhaden, M., Santoso, A., & Cai, W. (2021). El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. *Wiley & Sons, Inc.*

Moquet, J. S., Crave, A., Da Cruz, F., Fabre, O., Guyot, J. L., Huaman, J., Morera, S., & Sifeddine, A. (2009). *Rapport de mission PE 63, prélèvements de spéléothèmes et échantillonnages d'eaux de petits bassins monolithologiques.*

Rodríguez-Morata, C., Díaz, H. F., Ballesteros-Canovas, J. A., Rohrer, M., & Stoffel, M. (2019). The anomalous 2017 coastal El Niño event in Peru. *Climate Dynamics*, 52(9-10), 5605-5622. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4466-y>

Segura, H., Espinoza, J.C., Lebel, T., Vuille, M. & Garreaud, R. (2020). Recent changes in the precipitation-driving processes over the southern tropical Andes/western Amazon. *Climate Dynamics*, 54 (5-6), 2613-2631. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05132-6>

Sulca, J., Vuille, M., Roundy, P., Takahashi, K., Espinoza, J. C., Silva, Y., Trasmonte, G., & Zubieta, R. (2018). Climatology of extreme cold events in the central Peruvian Andes during austral summer: origin, types and teleconnections. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144 (717), 2693-2714. <https://doi.org/10.1002/qj.3398>

Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K. & Dewitte, B. (2011). ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 38(10), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>