

Control estacional e interanual de la distribución de las precipitaciones en isótopos de Sr y Nd en sedimentos fluviales, y sus implicancias para trazar eventos ENOS en la vertiente del Pacífico (cuenca del río -Puyango-Tumbes)



Jean-Sébastien Moquet, Ph.D.

INSTITUT DES SCIENCES DE LA TERRE D'ORLÉANS (FRANCIA)

Ph.D. en Hidrología, Hydroquímica, Suelos y Medioambiente de la Universidad de Toulouse (Francia). Actualmente es postdoctorante en el Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (Francia). Es autor de numerosos artículos publicados en revistas internacionales y su investigación está enfocada en la dinámica de las transferencias de material disuelto y sedimentaria por los hidrosistemas continental desde la escala local (karsts, cuencas de montaña) hasta la escala de los grandes ríos (ex Amazonas, Orinoco) así como en paleoclima.



Dr. Sergio Morera Julca

INVESTIGADOR CIENTÍFICO DEL INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ

Es investigador científico en el Instituto Geofísico del Perú (IGP), experto en hidrología, erosión y transporte de sedimentos fluvial. Es profesor invitado de postgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM). Sus estudios se desarrollan en el marco de dos proyectos de investigación aplicada (INNÓVATE PERÚ, 2015-2018 y FONDECYT, 2016-2019), ambos tienen como fin entender los procesos que dominan la erosión de los suelos ante los riesgos ambientales en las cuencas agrícolas alto andinas. Ello, mediante el uso de equipos hidrométricos de avanzada, del monitoreo del transporte de sedimento total y de trazadores geoquímicos e isótopos.

RESUMEN

La geoquímica de los registros sedimentarios es una herramienta eficiente para la reconstrucción paleo-hidro-climática. Sin embargo, la reconstrucción del clima requiere una buena comprensión de la relación entre la geoquímica, la variabilidad hidrológica y de las fuentes de sedimentos. En este estudio analizamos la relación entre la geoquímica de los sedimentos exportados por el Río Puyango-Tumbes (norte de Perú y sur de Ecuador) y la variabilidad hidrológica. Evidenciamos que la firma isotópica del estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) y del neodimio (ϵNd) en los sedimentos dependen de la distribución espacial de las precipitaciones tanto estacionales como interanuales, estas últimas asociadas al ENOS (El Niño Oscilación del Sur). Los resultados constituyen un instrumento prometedor para las reconstrucciones paleohidroclimáticas a partir de registros sedimentarios marinos y continentales en relación con los impactos de los diferentes tipos de El Niño y La Niña.

Finalmente, este estudio es el resultado de una cooperación internacional (Perú-Francia) interdisciplinaria,

que involucra a hidro-sedimentólogos, geoquímicos, geólogos, climatólogos y paleoclimatólogos; evidencia la importancia del monitoreo del caudal (PEBPT y SENAMHI), de sedimentos e isotópico (SO-HYBAM – IGP / programa presupuestal-068), así como la lluvia (base de datos PISCO), todos ellos a largo plazo..

INTRODUCCIÓN

El régimen hidrológico e hidrosedimentológico de los Andes es particularmente sensible a fenómenos hidrológicos extremos como los relacionados con El Niño Oscilación Sur (ENOS). El Niño y La Niña (las dos fases del ENOS) controlan la hidrología y la producción de sedimentos en cuencas andinas que residen a lo largo de la costa del Pacífico (Sulca et al., 2018; Morera et al., 2017; Rau et al., 2017; Lavado and Espinoza, 2014, Armijos et al., 2013) y en laderas amazónicas (Espinoza et al., 2012).

La reconstrucción de los eventos paleo-ENOS es necesaria para entender las principales forzantes de estos eventos.

La composición isotópica de neodimio (Nd) y de estroncio (Sr) de los sedimentos son trazadores de las fuentes de estos últimos y, por lo tanto, de la distribución espacial e intensidad de la lluvia. Para interpretar la variabilidad de la asignatura isotópica del Sr y del Nd de núcleos sedimentarios, un método, raramente aplicado (ej : Viers et al., 2008; Rousseau et al., 2019), consiste en monitorear la composición isotópica de sedimentos a lo largo de un año hidrológico para entender la relación entre esta firma isotópica y las condiciones hydro-climáticas (distribución e intensidad de la lluvia y del caudal) de una cuenca.

Entonces, el uso combinado de isótopos Sr y Nd en rocas sedimentarias como marcadores potenciales de eventos paleo-ENOS puede ser particularmente útil si las rocas isotópicamente contrastadas son erosionadas diferencialmente durante los años ENOS y normales. Para explorar esta posibilidad, presentamos la geoquímica y la composición de isótopos Nd y Sr del material particulado suspendido (SPM, por sus siglas en inglés) exportado por el río Puyango-Tumbes a lo largo de períodos hidrológicos contrastados tanto en la escala temporal estacional (seca vs lluviosa) como interanual (húmeda vs normal). Con este fin, hemos analizado mensualmente las muestras de SPM en el ámbito inferior de la cuenca a lo largo de dos ciclos hidrológicos, e interpretado los datos correspondientes como función de caudales, concentración de SPM, flujos de SPM, la distribución estacional e interanual de las

precipitaciones y las características geoquímicas de las fuentes de SPM.

ENTORNO REGIONAL

La cuenca del río Puyango-Tumbes se encuentra en la ladera occidental de los Andes en el sur de Ecuador y norte de Perú, y desemboca en el Océano Pacífico (área de 4.8 103 km², pluviosidad ~1000 mm.año⁻¹ y escurrimiento ~750 mm.año⁻¹; Lavado et al., 2012; Moquet et al., 2018; Figura 1). La cuenca del río Puyango-Tumbes está compuesta de tres principales dominios litológicamente contrastados: un dominio volcánico (Alto Puyango-Tumbes), un dominio plutónico/metamórfico (media altura de la cuenca) y un dominio sedimentario que representan respectivamente 17, 25 y 58% del área (Figura 1).

El régimen de precipitaciones y, en consecuencia, el régimen de descarga, muestra una fuerte estacionalidad tanto en términos de cantidad como de distribución geográfica. El período de lluvia se produce durante el verano/otoño austral entre diciembre y mayo (Segura et al., 2019). La contribución de escurrimiento del dominio volcánico (sedimentario) aumenta (disminuye) durante el periodo seco y disminuye (aumenta) en el periodo húmedo. La contribución del dominio plutónico/metamórfico es casi constante a lo largo del año.

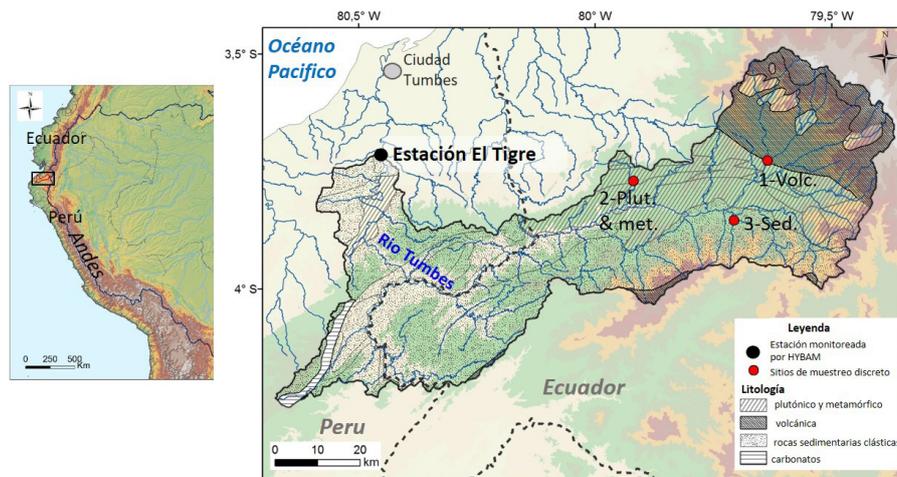


Figura 1. Mapa de la cuenca del río Puyango-Tumbes : red hidrológica, dominios litológicos, líneas limítrofes y estaciones de muestreo (1 - Río Calera @Portovelo @ Área volcánica; 2 - Río Marcabelli @ Marcabelli - Área plutónica y metamórfica y 3 - un río Pindo tributary @Buenavista = una subcuenca sedimentaria).

MATERIAL Y MÉTODOS

Se analizó la composición en elementos mayores, la mineralogía (para ver detalles revisar Moquet et al., 2020) y la composición isotópica de estroncio (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) y neodimio (εNd) del SPM muestreado mensualmente durante dos años hidrológicos contrastados (2007-2008, un año húmedo – el cuarto año más húmedo durante el periodo 1985-2015, y 2010-2011, un año hidrológico normal) en la estación hidrológica de El Tigre situada cerca de la desembocadura del río Puyango-Tumbes (Figura 1). Los periodos de estudio (2007-2008 y 2010-2011) se caracterizaron por las condiciones La Niña en el Pacífico central, esto según el ONI¹. Mientras que, según

el Índice Costero El Niño (ICEN)², durante el año 2007 y 2010 se desarrollaron eventos La Niña Costera 2007 y 2010, respectivamente.

Comparamos estos datos con la descarga diaria y la concentración de SPM medida en la estación El Tigre (cada 10 días entre 04/02/2004 y 21/04/2014 - HYBAM-<http://www.so-hybam.org>, Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes (PEBPT)) y con los datos de precipitaciones mensuales registrados sobre la cuenca. Se

¹ https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

² http://www.met.igp.gob.pe/elniño/lista_eventos.html

extrajo la precipitación media mensual de la base de datos Pisco v1.1 (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations; Lavado et al., 2016) para el período 1985-2015. En el presente estudio consideramos el caudal diario disponible en la estación de El Tigre (HYBAM/proyecto PEBPT/SENAMHI) para el período 1985-2015 que consideramos como la referencia (<http://www.so-hybam.org>).

Para identificar posibles efectos de origen que puedan influir en la composición geoquímica de los sedimentos muestreados en la estación El Tigre, también realizamos dos veces (estación seca de 2015 y estación húmeda de 2016) un muestreo puntual de SPM de dos afluentes del río Puyango-Tumbes, lo cuales son representativos de dos ambientes litológicos: Zonas volcánicas y plutónicas/metamórficas. También se ha muestreado dos veces una subcuenca sedimentaria localizada aguas abajo de la zona volcánica, y aguas arriba de la zona plutónica/metamórfica (Figura 1). Nótese que no consideramos esta cuenca como representativa de toda la zona sedimentaria de la cuenca de Puyango-Tumbes.

Los veinte y nueve (29) filtros de sedimentos obtenidos en el trabajo de campo fueron tratados en el laboratorio Géosciences-Environnement-Toulouse (GET) - Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) según el mismo método aplicado por Rousseau et al. (2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Relación entre la composición isotópica Sr-Nd y las variables hidroclimáticas

Se ha demostrado que la composición isotópica ϵNd y $^{87}Sr/^{86}Sr$ de rocas sedimentarias o de SPM fluvial son herramientas robustas para determinar su procedencia cuando las fuentes están isotópicamente contrastadas (por ejemplo, McLennan et al., 1993; Faure and Mensing, 2004; Viers et al., 2008; Roddaz et al., 2014; Höppner et al., 2018; Rousseau et al., 2019). La composición isotópica de Nd y Sr de las SPM del Puyango-Tumbes tiene valores isotópicos intermedios entre cuencas volcánicas/sedimentarias ($\epsilon Nd = -0,3$ hasta $2,7$ y $^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7058$ hasta $0,7063$) y cuencas plutónicas/metamórficas ($\epsilon Nd = -10,1$ y $-10,8$; $^{87}Sr/^{86}Sr$

$= 0,7090$ y $0,7092$), sugiriendo que corresponden a una mezcla de estas dos fuentes.

En la estación El Tigre, los valores de ϵNd de las SPM presentan una gran amplitud, la cuales varían desde $-7,8$ hasta $-1,9$ y siguen un comportamiento estacional correlacionado negativamente con la descarga y, en consecuencia, la concentración y el flujo de SPM (Figura 2, 3). Durante ambos años hidrológicos analizados, los isótopos de Nd varían de la firma de los « endmembers » volcánicos (periodo seco) a plutónico/metamórfico (periodo húmedo) en escala de tiempo estacional (figuras 2 y 3a, b, c). Estos resultados sugieren que los valores de SPM ϵNd son sensibles a la distribución de las precipitaciones en toda la cuenca estudiada (ver más detalles en la versión original de este artículo, Moquet et al., 2020). Según una simple ecuación de mezcla entre los dos miembros finales (cuenca volcánica vs cuenca plutónica/metamórfica) se puede estimar que el endmember volcánico contribuye desde 24 a 74% de las SPM del Puyango-Tumbes según el mes. Esta contribución de SPM de origen volcánico se correlaciona negativamente con la descarga (Figura 2).

La variabilidad de $^{87}Sr/^{86}Sr$ es baja para la mayoría de las muestras (0,7115 a 0,7139) con excepción de las muestras de marzo y abril de 2008 que presentan valores más altos (0,7176 y 0,7155 respectivamente). Interesantemente, estos dos meses corresponden a la mayor concentración de SPM registrada para las muestras analizadas y corresponden a condiciones de alta descarga (Figura 2). $^{87}Sr/^{86}Sr$ también muestra una correlación significativa con la variabilidad del caudal, de la concentración de SPM y de los flujos de SPM a la escala de tiempo estacional e interanual (figura 3d, e, f), es importante destacar que esto se debe esencialmente a los dos valores extremos de caudal y de concentración de SPM que se producen durante el año hidrológico húmedo (2007-2008). Interesantemente, el $^{87}Sr/^{86}Sr$ parece menos sensible que Nd a la variabilidad de la fuente en la cuenca de Puyango-Tumbes siendo únicamente sensible a eventos hidrológicos intensos.

Para concluir, dado el contexto climático y geológico estudiado aquí, las variaciones en la composición isotópica de Nd y Sr de SPM, asociados a la distribución espacial de la lluvia, son, respectivamente, poderosas proxies de la variabilidad hidrológica estacional e interanual. Estas propiedades pueden ser explotadas para la reconstrucción paleoclimática basada en registros sedimentarios.

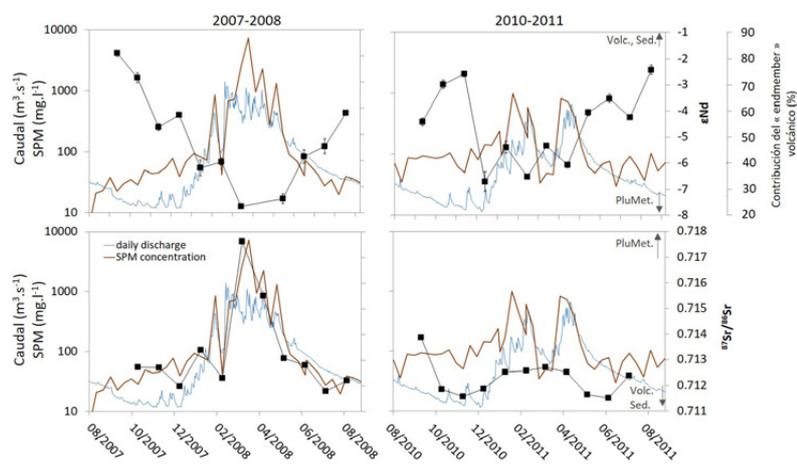


Figura 2. Variación del caudal diario (línea azul), concentración de SPM (línea marrón), composición de isótopos ϵNd y Sr (línea negra y cuadrados) del SPM del río Puyango-Tumbes en la estación de El Tigre durante los dos ciclos hidrológicos seleccionados. El error en $^{87}Sr/^{86}Sr$ es menor que el tamaño del símbolo. La contribución relativa de la fuente SPM calculada a partir de la ecuación 4 se añade como referencia (el mismo símbolo que ϵNd porque resulta de una relación proporcional). La abreviatura Volc., Plumet y Sed se refiere a los valores determinados para muestras de SPM de la cuenca volcánica ($\epsilon Nd = -0,3$ y $^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7059$), la cuenca plutónica/metamórfica ($\epsilon Nd = -10,1$ y $-10,8$; $^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7090$ y $0,7092$) y la cuenca sedimentaria ($\epsilon Nd = 0,7$ y $2,7$; $^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7058$ y $0,7063$), respectivamente.

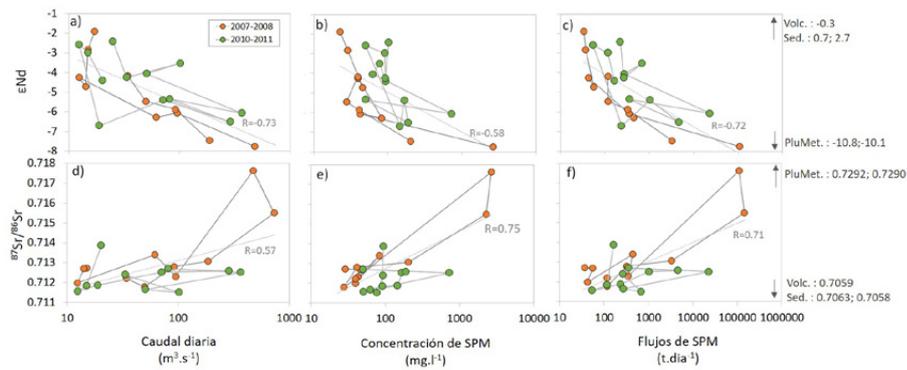


Figura 3. ϵNd vs a) caudal diario; b) concentración de SPM y c) flujo SPM diario. $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs d) caudal diario; e) concentración de SPM y f) flujo SPM diario. Los coeficientes de correlación consideran todos los puntos de ambos ciclos hidrológicos y son todos significativos (p -value < 0.01). Las abreviaturas Volc, Plumet y Sed se refieren a los valores determinados para las muestras de SPM de las subcuencas volcánica, plutónica/metamórfica y sedimentaria, respectivamente.

2. Implicación para paleo ENOS y reconstrucción de eventos hidrológicos paleo extremos

La mayoría de las reconstrucciones paleoclimáticas basadas en la composición isotópica Sr-Nd de los sedimentos marinos se basa en un único muestreo de SPM de los diferentes afluentes o ríos que alimentaron estos depósitos (p.ej. Ehlert et al., 2013; Höppner et al., 2018). El conjunto de datos presentado en este estudio puede ser utilizado para mejorar este enfoque en las regiones costeras del Pacífico afectadas por eventos ENOS. Ser sensible a la distribución estacional de las precipitaciones (principalmente ϵNd) y a las anomalías interanuales de precipitaciones elevadas ($^{87}Sr/^{86}Sr$), estas firmas isotópicas pueden ser particularmente interesantes para reconstruir la paleoclimatología de la cuenca estudiada que es altamente sensible a los eventos de El Niño (Morera et al., 2017). Además, los resultados de este estudio pueden extenderse más allá de la reconstrucción paleoclimática del río Puyango-Tumbes y aplicarse a otras cuencas costeras del Pacífico Peruano y ecuatoriano afectadas por los eventos del ENOS. De hecho, en Ecuador y Perú, las cuencas costeras del Pacífico se caracterizan por reparticiones litológicas similares caracterizadas por rocas volcánicas en regiones elevadas y rocas plutónicas y metamórficas en regiones elevadas inferiores. Durante los eventos de ENOS, las intensidades de las lluvias pueden aumentar o disminuir y su distribución (Andes vs llanura) se modifica (Lagos et al., 2008; Lavado y Espinoza, 2014). Según los resultados presentados en el presente estudio,

esperamos valores de $^{87}Sr/^{86}Sr$ más radiogénicos y valores de ϵNd más negativos durante eventos fuertes de El Niño debido a la menor precipitación en las alturas de los Andes en el dominio de las rocas volcánicas (Figura 4). Durante los eventos de La Niña, mayor precipitación en las áreas más elevadas ocupadas por rocas volcánicas (valores altos de ϵNd) y la baja precipitación a lo largo de la costa y en la región aguas abajo produciría SPM con valores de ϵNd más altos y composiciones isotópicas Sr menos radiogénicas (Figura 4). Como los flujos de sedimentos dependen de la cantidad de lluvia, especialmente durante los años excepcionalmente lluviosos (Morera et al., 2017), una comparación de isótopos Sr y Nd con la tasa de sedimentación, puede indicar si existe una relación entre los lugares de precipitación y la cantidad de precipitaciones durante el período cubierto por el núcleo.

CONCLUSIÓN

En este estudio se analizó la firma isotópica del Nd y del Sr en los sedimentos exportados por el Río Tumbes, durante un año particularmente lluvioso (2007-2008) y un año normal (2010-2011), ambos a un paso de tiempo mensual.

La sensibilidad de ambas firmas isotópicas asociada a las fuentes de sedimentos, la cantidad de lluvia y su distribución espacial en la cuenca, así como su variabilidad hidrológica estacional e interanual, hacen de ambos trazadores una herramienta poderosa para reconstruir las crónicas del Paleo-ENSO a partir de archivos de núcleos de sedimentos continentales y marinos.

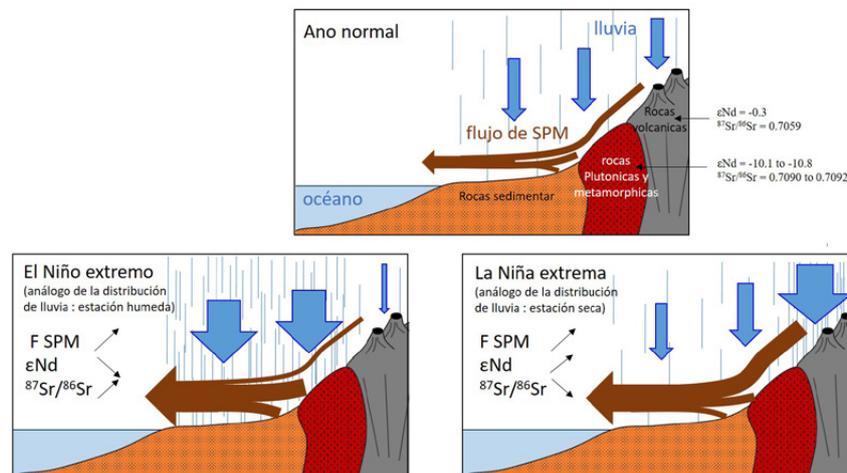


Figura 4. Representación esquemática del flujo de SPM y su firma isotópica Nd y Sr en respuesta a los modos extremos de ENOS.

Es oportuno indicar que la vertiente del Pacífico de los Andes de Perú y Ecuador presentan una relativa homogeneidad en la distribución litológica, por ello nuestros resultados pueden generalizarse a una escala regional, y permitirá reconstruir la variabilidad de los ENOS a una escala de tiempo decenal a multimilenarias.

Mayor información en:

- Moquet, Jean-Sébastien; Morera, Sergio Byron; Turcq, Bruno; Poitrasson, Franck; Roddaz, Martin; Moreira-Turcq, Patricia; Espinoza, Jhan Carlo; Guyot, Jean-Loup; Takahashi, Ken; Orrillo-Vigo, Jhon; Petrick, Susana; Mounic, Stéphanie, & Sondag, Francis. (2020). Control of seasonal and inter-annual rainfall distribution on the Strontium-Neodymium isotopic compositions of suspended particulate matter and implications for tracing ENSO events in the Pacific coast (Tumbes basin, Perú). *Global and Planetary Change*. 185: 103080. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103080>.

REFERENCIAS

Armijos, E., Laraque, A., Barba, S., Bourrel, L., Ceron, C., Lagane, C., Magat, P., Moquet, J.S., Pombosa, R., Sondag, F., Vera, A., Guyot, J.L., 2013. Yields of suspended sediment and dissolved solids from the Andean basins of Ecuador. *Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques* 58, 1478–1494.

Ehlert, C., Grasse, P., Frank, M., 2013. Changes in silicate utilisation and upwelling intensity off Perú since the Last Glacial Maximum – insights from silicon and neodymium isotopes. *Quaternary Science Reviews* 72, 18–35. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.04.013>

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Junquas, C., Drapeau, G., Martinez, J.M., Santini, W., Vauchel, P., Lavado, W., Ordoñez, J., Espinoza, R., 2012. From drought to flooding: understanding the abrupt 2010–11 hydrological annual cycle in the Amazonas River and tributaries. *Environmental Research Letters* 7, 24008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024008>

Faure, G., Mensing, T.M., 2004. *Isotopes. Principles and Applications*. 3rd Edition, John Wiley and Sons Ltd. ed.

Höppner, N., Lucassen, F., Chiessi, C.M., Sawakuchi, A.O., Kasemann, S.A., 2018. Holocene provenance shift of suspended particulate matter in the Amazon River basin. *Quaternary Science Reviews* 190, 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.04.021>

Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E., Mosquera, K., n.d. El Niño – related precipitation variability in Perú. *ADGEO* 14, 231–237. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-231-2008>

Lavado Casimiro, W.S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza Villar, J.-C., Guyot, J.L., 2012. Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Perú (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal* 57, 1–18.

Lavado, W., Espinoza, J.C., 2014. Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú. *Revista Brasileira de Meteorologia* 29, 171–182.

Lavado W, Fernandez C, Vega F, Caycho T, Endara S, Huerta A, Obando OF. 2016. PISCO: Peruvian interpolated data of the SENAMHI's climatological and hydrological observations. *Precipitación v1.0*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, pp. 1–4.

McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K., Hanson, G.N., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics, in: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Geological Society of America.

Moquet, J.-S., Guyot, J.-L., Morera, S., Crave, A., Rau, P., Vauchel, P., Lagane, C., Sondag, F., Lavado, C.W., Pombosa, R., Martinez, J.-M., 2018. Temporal variability and annual budget of inorganic dissolved matter in Andean Pacific Rivers located along a climate gradient from northern Ecuador to southern Perú. *Comptes Rendus Geoscience* 350, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.11.002>

Morera, S.B., Condom, T., Crave, A., Steer, P., Guyot, J.L., 2017. The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012). *Scientific Reports* 7, 11947. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12220-x>

Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., Felipe, O., 2017. Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *International Journal of Climatology* 37, 143–158. <https://doi.org/10.1002/joc.4693>

Roddaz, M., Viers, J., Moreira-Turcq, P., Blondel, C., Sondag, F., Guyot, J.-L., Moreira, L., 2014. Evidence for the control of the geochemistry of Amazonian floodplain sediments by stratification of suspended sediments in the Amazon. *Chemical Geology* 387, 101–110.

Rousseau, T.C.C., Roddaz, M., Moquet, J.-S., Handt Delgado, H., Calves, G., Bayon, G., 2019. Controls on the geochemistry of suspended sediments from large tropical South American rivers (Amazon, Orinoco and Maroni). *Chemical Geology* 522, 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.05.027>

Sulca J. Takahashi K., Espinoza JC., Vuille M., Lavado-Casimiro W. 2017. Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Perú. *Int. Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.5185

Segura H., Junquas C., Espinoza JC., Vuille M., Jauregui YR., Rabatel A., Condom T., Lebel T. 2019. New insights into the rainfall variability in the tropical Andes on seasonal and interannual time scales. *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-018-4590-8.

Viers, J., Roddaz, M., Filizola, N., Guyot, J.-L., Sondag, F., Brunet, P., Zouiten, C., Boucayrand, C., Martin, F., Boaventura, G.R., 2008. seasonal and provenance controls on Nd–Sr isotopic compositions of Amazon rivers suspended sediments and implications for Nd and Sr fluxes exported to the Atlantic Ocean. *Earth and Planetary Science Letters* 274.