

Artículo de Divulgación Científica

Influencia de los sismos y los eventos El Niño extremos (1982-83 y 1997-98) en la producción de sedimentos en la costa peruana

A escala mundial las zonas críticas de erosión se encuentran en las montañas tropicales donde sismos de gran magnitud y eventos climáticos extremos son frecuentes ^{1,2}. Asimismo, numerosos estudios, sobre la erosión a escala global, regional y local, identificaron a la geología^{3,4}, el clima^{5,6} y la actividad antrópica ^{7,10} como los principales factores que controlan la erosión y su balance de masas. Esta observación cuestiona el impacto de los eventos extremos, en función a las condiciones normales, en las fuentes y sumideros de erosión en los cinturones de montañas.

Los Andes peruanos occidentales (entre 3°S y 18°S) se ubican en una región altamente sísmica con profundos impactos en el paisaje ¹¹. Sismos de gran magnitud ocurren frecuentemente, por ejemplo 9.5°S-1996 (Mw 7.5), 13.3°S-2007 (Mw 8.0), 15.2°S-1996 (Mw 7.7), 16.6°S-2001 (Mw 6.7, 7.5 y 8.4), 17.3°S-2001 (Mw 7.5) ^{12,13}, y desencadenan numerosos deslizamientos ^{11,14}. Además, esta área cuenta con la presencia recurrente de eventos climatológicos extremos. En los últimos 35 años, Eventos El Niño Extremo (EENE) han afectado el clima, la hidrología y también la sedimentología de las cuencas a lo largo de los Andes y su impacto varía según su posición geográfica. En el centro de Chile (27°-35°S), se observó un incremento del doble de la escorrentía y Producción de los Sedimentos en Suspensión (SSY, por sus siglas en inglés) ¹⁵. No obstante, se observaron condiciones secas o caudales bajos y SSY en: el sur de Chile (35-40°S) ¹⁶, los Andes bolivianos orientales ¹⁷, el noroeste de Colombia (2-11°N) ¹⁸ y el noroeste de Venezuela ¹⁹. En contraste, en el oeste de Ecuador (1°N-3°S) ²⁰ y el noroeste de Perú (3°-5°S) ²¹, EENE producen un caudal (Q) y una SSY excepcional de 5.4 y 11 veces el promedio histórico, respectivamente. En consecuencia, las tierras de cultivo, casas, puentes y caminos fueron destruidos, asimismo, las inundaciones y epidemias mataron a miles de personas y animales generando en su conjunto grandes pérdidas económicas ¹⁵.

En la vertiente del Pacífico peruano los sistemas montañosos altos son áreas ubicadas a 1000 m sobre el nivel del mar ²² que en el lado occidental cubren solo el 7% del territorio peruano y suministran de agua al 64% de los 32 millones de habitantes. Para beneficiarse de este recurso natural, sucesivos gobiernos nacionales han invertido miles de millones



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 en 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 isotopos.

de dólares en la construcción de ocho sistemas hidráulicos multipropósito a lo largo de la costa peruana. Sin embargo, la alta carga de sedimentos en suspensión que se transportan durante los

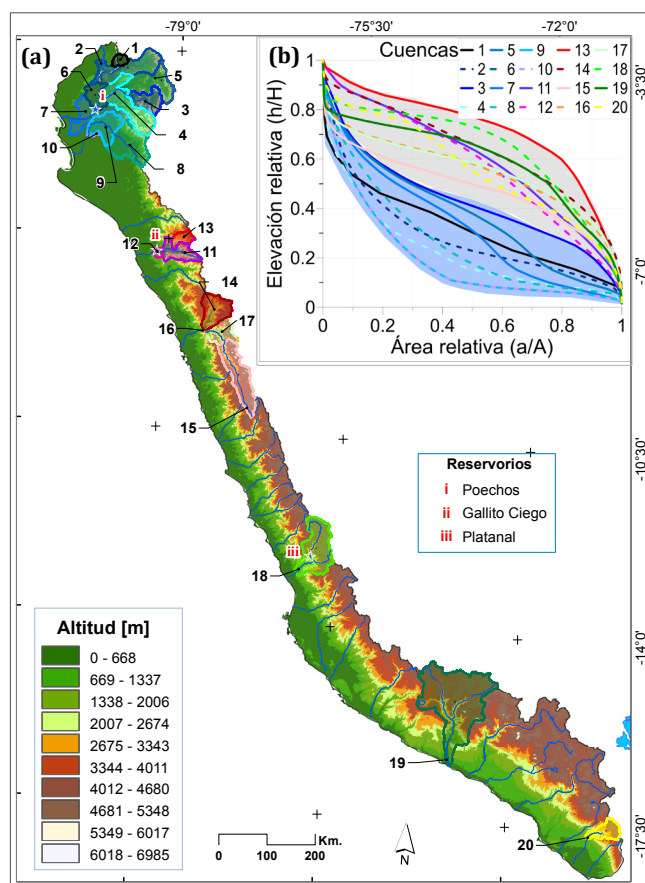


Figura 1: a) Topografía basada en datos del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM de 90x90m. b) Estado del relieve a partir del gradiente de curvas hipsométricas, cuencas en el norte del Perú muestran un estado viejo de evolución (líneas convexas-fondo azul), mientras cuencas en el centro y sur presentan un estado joven (líneas cóncavas-fondo plomo).

Influencia de los sismos y los eventos El Niño extremos (1982-83 y 1997-98) en la producción de sedimentos en la costa peruana

Morera, S.

EENE afecta los sistemas acuáticos, disminuyen la disponibilidad del agua y facilitan el colapso de las infraestructuras hidráulicas²³. Escenario que podría agravarse, pues estudios mencionan que la recurrencia y la intensidad de los EENE aumentarán durante el calentamiento global y el cambio climático^{24,25}.

A partir de registros en 20 estaciones hidro-sedimentológicas distribuidas a lo largo de la vertiente del Pacífico (Figura 1), la presente investigación propone: (i) identificar la influencia de los sismos y los EENE en la variabilidad espacial y temporal de la producción de los sedimentos, (ii) evidenciar si la geomorfología y los eventos climatológicos extremos están relacionados con la evolución de la costa peruana.

Comportamiento de los caudales y del transporte de sedimentos durante EENE

Fueron analizados a partir de la Función de Distribución Acumulada (CDF, por sus siglas en inglés) basados en el caudal promedio diario de las series históricas (Figura 2a). Se agruparon dos niveles con respecto al promedio histórico (i) caudales altos es decir $Q/(Q_{\text{mean}} > 1)$, y (2) caudales bajos es decir $Q/(Q_{\text{mean}} < 1)$. Para todas las cuencas, la frecuencia de eventos de bajo caudal sigue un comportamiento similar, y no cambia significativamente al comparar períodos normales con EENE. Sin embargo, la frecuencia de los caudales altos aumenta significativamente durante EENE. Este aumento es mayor para las cuencas ubicadas en el norte de Perú (3-7°S, en azul Figura 1) que en el centro y sur de Perú (7-18° S, en rojo Figura 1). De hecho, durante los períodos normales, aproximadamente 90% de los eventos de caudales altos ocurren para $Q/(Q_{\text{mean}} < 2.5)$ para todas las cuencas, mientras que durante los

períodos EENE, 90% de los eventos de descarga diaria ocurren (1) para $Q/(Q_{\text{mean}} < 12)$ u 8 cuando se consideran las estaciones de Ardilla y El Tigre (cuencas septentrionales), respectivamente; o (2) para $Q/(Q_{\text{mean}} < 4)$ cuando se consideran las estaciones Socsi, Condorcerro y La Balsa (cuencas centrales). El mismo análisis se realizó para los flujos de sedimentos en suspensión (Q_s , Figura 2b).

Impacto regional de los sismos y los EENE

Se analizó la distribución espacial de SSY con respecto a la precipitación anual media, incluyendo y excluyendo los años EENE (09/1982 - 08/1983 y 09/1997 - 08/1998). Además, se utilizó la distribución espacial del momento sísmico acumulativo regional como un proxy para inferir el impacto potencial de la sismicidad histórica (1962-2015) en la distribución espacial de las tasas del transporte de sedimentos²⁶. Aunque los principales sismos monitoreados ($M_w > 8$) ocurrieron principalmente en el centro y sur del Perú (8-17.5° S), no hay una correlación espacial obvia entre el momento sísmico y el SSY (Figura 3). De hecho, el momento sísmico acumulado se centra, principalmente, a lo largo de la interfaz de subducción, por debajo de la línea de costa, mientras que el SSY tiende a ser mayor en el este, cerca de la divisoria de la vertiente. Esto sugiere que durante el período monitoreado los terremotos de gran magnitud no fueron factores primarios que influyeron en la producción de sedimentos y la disponibilidad a escala regional en Perú. Sin embargo, la influencia potencial a largo plazo de los terremotos de gran magnitud anteriores al marco temporal del catálogo sísmico es completamente desconocida.

La presencia de los EENE cambia por completo la intensidad y la distribución espacial de la precipitación (Figura 3 a y b). Se observan dos regiones con distintos patrones de precipitación durante el

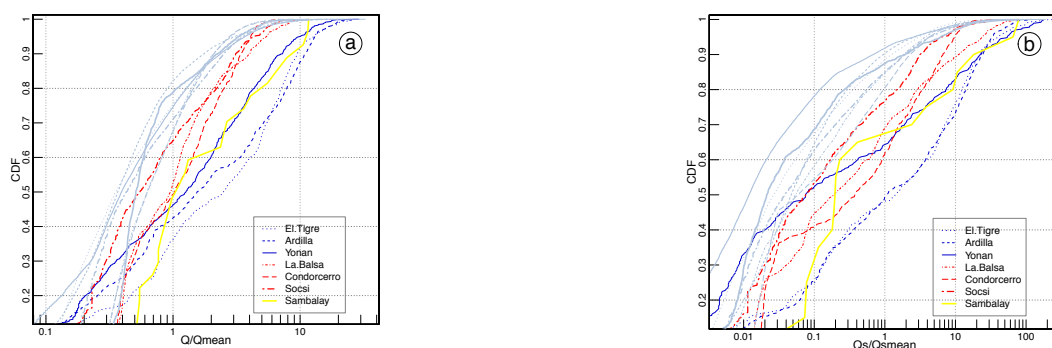


Figura 2: . Normal-log CDF de los (a) caudales y (b) flujos de sedimentos en suspensión (Q_s), ambos normalizados en base a los promedios históricos. Líneas sombreadas estimadas a partir de las series históricas. Líneas coloreadas estimadas para períodos EENE.

período más lluvioso de los EENE (enero-abril): (i) Perú central y suroccidental (7-18°S), donde ocurre el patrón espacial normal de precipitación, pero con 2 a 4 veces más precipitación que durante años normales en la cabecera de las cuencas (Figura 3b); y (ii) el norte de Perú (3-7°S), donde el gradiente espacial E-O habitual de precipitación se invierte, con más precipitación en el oeste. Durante los EENE, las áreas áridas y semiáridas (0-1100 msnm) experimentan altas precipitaciones (170 veces el promedio histórico). Como consecuencia se observa un aumento muy fuerte en la SSY para las cuencas ubicadas en el norte y centro de Perú (Figura 3b).

Las planicies y zonas áridas tienden a acumular sedimentos durante años normales. Sin embargo, durante los EENE el incremento de la precipitación y la capacidad del transporte fluvial facilitan una alta descarga de sedimentos ²⁷. Por ejemplo, las áreas semiáridas entre las estaciones 6 y 7 (3403 km², Figura 1), reciben ~2000 mm/año de precipitación durante EENE, facilitando una producción de 26 Mt/año y 44 Mt/año de SSY para los periodos 1982-83 y 1997-98, respectivamente, en lugar de 4,4 Mt/año durante años normales (Figura 3b y c). Dicha dinámica de la producción de sedimentos está altamente

relacionada la geomorfología de las cuencas: (i) en el norte y centro del Perú la estimación de sus curvas hipsométricas en su totalidad “cóncavas” se asocian a planicies aluviales extendidas y relativamente planas en la cuenca media y baja, a diferencia de (ii) las cuencas en el sur, cuyas curvas hipsométricas “convexas” (Figura 1b), muestran llanuras aluviales más empinadas y encañonadas en la cuenca media y baja. Esto ilustra el papel de la topografía para modular la sensibilidad de los flujos de sedimentos entregados al Océano Pacífico.

Conclusiones

Se evidenció que durante años normales la vertiente del Pacífico almacena grandes depósitos de sedimentos, su transporte es limitado por el efecto orográfico y las bajas escorrentías (2.4-25.5 l/km²/año). Además, se verificó que a pesar que la costa peruana es una de las zonas sísmicas más activas del planeta, a escala regional los sismos no controlan la producción de sedimentos.

Finalmente, se documentó que el transporte de sedimentos estaría principalmente controlado por

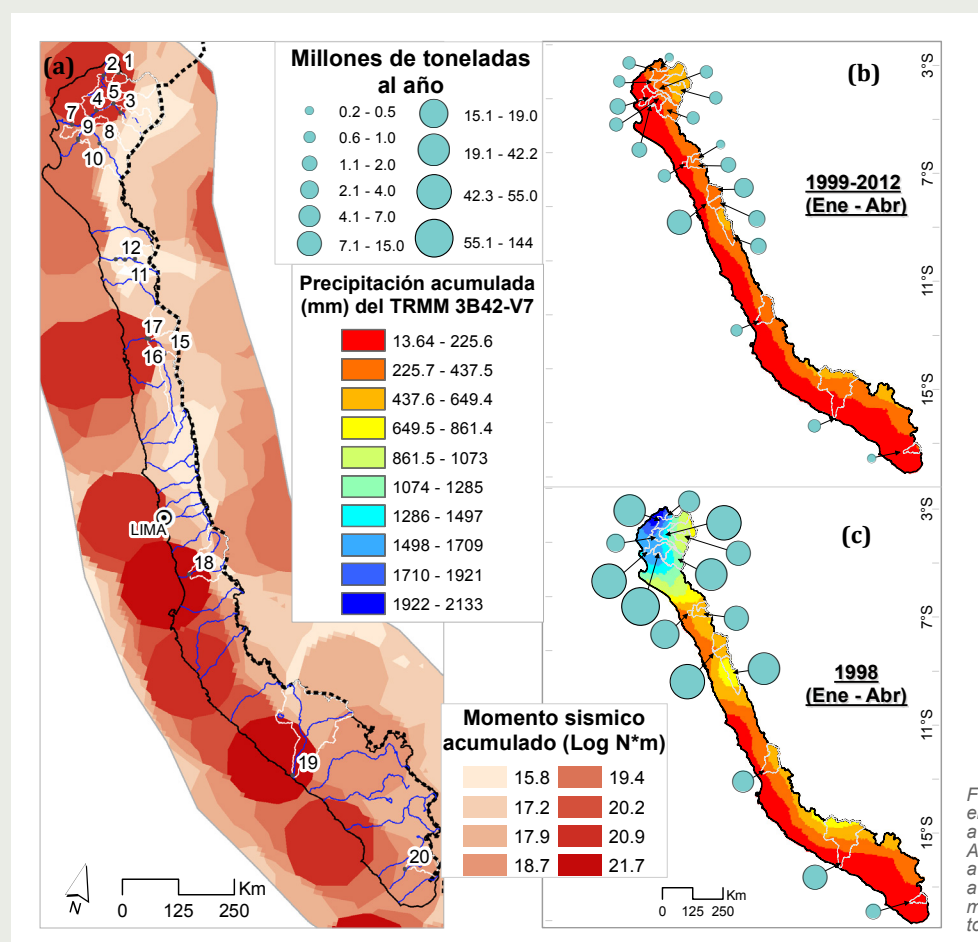


Figura 3. (a) Momento sísmico acumulado para el periodo 1962-2015, para magnitudes mayores a 4.0 Mw. (b) Precipitación acumulada Enero a Abril (1999-2012), no incluye el periodo de enero a abril 1998. (c) Precipitación acumulada de enero a abril (1998). El tamaño de los círculos indica la magnitud del transporte de sedimento en millones de toneladas anual.

Influencia de los sismos y los eventos El Niño extremos (1982-83 y 1997-98) en la producción de sedimentos en la costa peruana

Morera, S.

los EENE, durante dichos eventos la erosión y el transporte de sedimentos son muy variados, incrementándose entre 3 a 60 veces el promedio anual histórico. Según su grado de severidad se dividen en dos grandes regiones geomorfológicas, con un punto de transición a los 7°S. Desde los 7°S al norte del Perú se encuentra la región más impactada, entre el 82-98% es transportado de enero a abril, y solo 3,5 días son suficientes para transportar el promedio anual histórico²⁸.

Referencias

- 1.- Hovius, N. et al. Prolonged seismically induced erosion and the mass balance of a large earthquake. *Earth and Planetary Science Letters* 304, 347-355; DOI:10.1016/j.epsl.2011.02.005 (2011).
- 2.- Lee, T.-Y. et al. Magnified Sediment Export of Small Mountainous Rivers in Taiwan: Chain Reactions from Increased Rainfall Intensity under Global Warming. *PLoS ONE* 10, e0138283; DOI:10.1371/journal.pone.0138283 (2015).
- 3.- Pinet, P. & Souriau, M. Continental erosion and large-scale relief. *Tectonics* 7, 563-582; DOI:10.1029/TC007i003p00563 (1988).
- 4.- Sklar, L. S. & Dietrich, W. E. Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock. *Geology* 29, 1087-1090; DOI:10.1130/0091-7613(2001)029<1087:sarsco>2.0.co;2 (2001).
- 5.- Darby, S. E. et al. Fluvial sediment supply to a mega-delta reduced by shifting tropical-cyclone activity. *Nature* 539, 276-279; DOI:10.1038/nature19809 (2016).
- 6.- Peizhen, Z., Molnar, P. & Downs, W. R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2-4[thinsp]Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates. *Nature* 410, 891-897; DOI:10.1038/35073504 (2001).
- 7.- Syvitski, J. P. M., Vörösmarty, C. J., Kettner, A. J. & Green, P. Impact of human on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308, 376-380; DOI:10.1126/science.1109454 (2005).
- 8.- Walling, D. E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology* 79, 192-216; DOI:10.1016/j.geomorph.2006.06.019 (2006).
- 9.- Dai, Z., Fagherazzi, S., Mei, X. & Gao, J. Decline in suspended sediment concentration delivered by the Changjiang (Yangtze) River into the East China Sea between 1956 and 2013. *Geomorphology* 268, 123-132; DOI:10.1016/j.geomorph.2016.06.009 (2016).
- 10.- Morera, S. B. et al. Pertinent spatio-temporal scale of observation to understand suspended sediment yield control factors in the Andean region: the case of the Santa River (Peru). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 4641-4657; DOI:10.5194/hess-17-4641-2013 (2013).
- 11.- Keefer, D. K. & Moseley, M. E. Southern Peru desert shattered by the great 2001 earthquake: Implications for paleoseismic and paleo-El Niño–Southern Oscillation records. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101, 10878-10883; DOI:10.1073/pnas.0404320101 (2004).
- 12.- Bilek, S. L. Invited review paper: Seismicity along the South American subduction zone: Review of large earthquakes, tsunamis, and subduction zone complexity. *Tectonophysics* 495, 2-14; DOI:10.1016/j.tecto.2009.02.037 (2010).
- 13.- Bilek, S. L. & Ruff, L. J. Analysis of the 23 June 2001 Mw = 8.4 Peru underthrusting earthquake and its aftershocks. *Geophysical Research Letters* 29, 21-21-21-24; DOI:10.1029/2002GL015543 (2002).
- 14.- McPhillips, D., Bierman, P. R. & Rood, D. H. Millennial-scale record of landslides in the Andes consistent with earthquake trigger. *Nature Geosci* 7, 925-930; DOI:10.1038/ngeo2278 (2014).
- 15.- Kober, F. et al. Denudation rates and a topography-driven rainfall threshold in northern Chile: Multiple cosmogenic nuclide data and sediment yield budgets. *Geomorphology* 83, 97-120; DOI:10.1016/j.geomorph.2006.06.029 (2007).
- 16.- Montecinos, A. & Aceituno, P. Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate* 16, 281-296; DOI:10.1175/1520-0442(2003)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2 (2003).
- 17.- Aalto, R. et al. Episodic sediment accumulation on Amazonian flood plains influenced by El Niño/Southern Oscillation. *Nature* 425, 493-497; DOI:10.1038/nature02002 (2003).
- 18.- Restrepo, J. D. & Kjerfve, B. Magdalena river: interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology* 235, 137-149; DOI:10.1016/S0022-1694(00)00269-9 (2000).
- 19.- Warne, A. G. et al. Regional controls on geomorphology, hydrology, and ecosystem integrity in the Orinoco Delta, Venezuela. *Geomorphology* 44, 273-307; DOI:10.1016/S0169-555X(01)00179-9 (2002).
- 20.- Armijos, E. et al. Yields of suspended sediment and dissolved solids from the Andean basins of Ecuador. *Hydrological Sciences Journal* 58, 1478-1494; DOI:10.1080/02626667.2013.826359 (2013).
- 21.- Tote, C. et al. Effect of ENSO events on sediment production in a large coastal basin in northern Peru. *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 1776-1788; DOI:10.1002/esp.2200 (2011).
- 22.- Barsch, D. & Caine, N. The Nature of Mountain Geomorphology. *Mountain Research and Development* 4, 287-298; DOI:10.2307/3673231 (1984).
- 23.- Morera, S. B., Crave, A. & Guyot, J. P. in 13th International Symposium on River Sedimentation (ISRS 2016). (Taylor & Francis Group, (eds S. Wieprecht et al.) 82 (2016).
- 24.- Cai, W. et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Clim. Change* 4, 111-116; DOI:10.1038/nclimate2100 (2014).
- 25.- Widlansky, M. J. et al. Changes in South Pacific rainfall bands in a warming climate. *Nature Clim. Change* 3, 417-423; DOI:10.1038/nclimate1726 (2013).
- 26.- Dadson, S. J. et al. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature* 426, 648-651; DOI:10.1038/nature02150 (2003).
- 27.- Fryirs, K. (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 30-46; DOI:10.1002/esp.3242 (2013).
- 28.- Morera, S. B., Condom, T., Crave, A., Steer, P. & Guyot, J. L. The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012). *Scientific Reports* 7, 11947; DOI:10.1038/s41598-017-12220-x (2017).