



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

ROL DE LA EROSION Y DE LA ISOSTASIA EN LA CONSTRUCCION DE LA TOPOGRAFIA EN CONTEXTO DE TECTONICA ACTIVA: CONTRIBUCIONES A PARTIR DE DATOS DE TERMOCRONOLOGIA DE BAJA TEMPERATURA Y DE MODELOS DE EVOLUCION DEL RELIEVE (CORDILLERA BLANCA, ANDES PERUANOS)

MARGIRIER Audrey^{1,2}, ROBERT Xavier³, BRAUN Jean¹, AUDIN Laurence³, BENAVENTE Carlos⁴

¹ Helmholtz-Zentrum Potsdam, GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam, Potsdam, Germany; ² University of Potsdam, Institute for Earth and Environmental Sciences, Germany; ³ ISTERre, Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, 38000 Grenoble, France; ⁴ INGEMMET, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Lima, Perú

Resumen:

El levantamiento y la exhumación de la Cordillera Blanca están vinculados a la falla normal de la Cordillera Blanca (CBNF), esta estructura tectónica regional delimita y da forma al flanco occidental del batolito de la Cordillera Blanca. Dos modelos han sido propuestos anteriormente para explicar la presencia de esta falla normal activa en un contexto en compresión (Dalmayrac and Molnar, 1981; McNulty and Farber, 2002), pero hoy, la falla normal de la Cordillera Blanca y la exhumación asociado de la Cordillera Blanca permanecen como procesos geológicos poco conocidos. Estudios recientes (e.g. Margirier et al., 2016) sugieren un aumento en las tasas de exhumación durante el Cuaternario en la Cordillera Blanca y relacionan este aumento con un cambio en el clima y/o proceso erosivo dominante (erosión glacial vs. erosión fluvial). La intrusión de Cordillera Blanca se ha erosionado significativamente desde su emplazamiento hace 12-5 Myr. Recientemente se ha demostrado que el efecto de la erosión de rocas más densas, como el batolito Cordillera Blanca, puede contribuir a un aumento en el rebote isostático impulsado por la erosión y la tasa de elevación (Braun et al., 2014). Sin embargo, faltan responder preguntas sobre si la erosión y la isostasia son responsables del aumento reciente de la tasa de elevación en la Cordillera Blanca, y como esto influye a lo largo de la falla normal de la Cordillera Blanca.

Aquí abordamos el efecto de la erosión y de la isostasia sobre el levantamiento y la exhumación de la Cordillera Blanca utilizando un modelo numérico de evolución del paisaje (FastScape). Realizamos varias inversiones de la topografía actual, de la exhumación total (deducida de la barometría de anfíboles) y datos termocronológicos (trazas de fisión de apatita y (U-Th-Sm)/He) para obtener los mejores valores de ajuste de la tasa de elevación, el espesor elástico de la litosfera, la erosionabilidad del batolito y de la roca caja que alberga el batolito, y el gradiente geotérmico. Nuestros resultados muestran que la contribución de la erosión y del rebote flexural asociada es de ~20% de la tasa de elevación actual en la Cordillera Blanca. Sugerimos que la erosión de la intrusión densa de la Cordillera Blanca desde 3 Ma también puede contribuir al aumento de la tasa de exhumación cuaternaria en esta área. Finalmente, comparamos con nuestros resultados los dos modelos propuesto antiguamente para la formación de la falla normal de Cordillera Blanca.

Palabras clave: Andes, Termocronología de baja temperatura, Cordillera Blanca, Evolución del relieve en base a modelos numéricos

Abstract:

The uplift and exhumation of the Cordillera Blanca are linked to activity on the Cordillera Blanca normal fault that delimits and shapes the western flank of the Cordillera Blanca batholith (Fig. 1). Two models have been previously proposed to explain the presence of this active normal fault in a compressional setting but, to this day, the Cordillera Blanca normal fault and

the uplift and exhumation of the Cordillera Blanca remain, for the most, enigmatic. Recent studies (e.g. Margirier et al., 2016) suggest an increase in exhumation rates during the Quaternary in the Cordillera Blanca and relate this increase to a change in climate and/or dominant erosional process (glacial erosion vs. fluvial erosion). The Cordillera Blanca intrusion has been significantly eroded since its emplacement 12-5 Myr ago. It has been demonstrated recently that the effect of eroding denser rocks, such as the Cordillera Blanca batholith, can contribute to an increase in erosion-driven isostatic rebound and uplift rate (Braun et al., 2014). However, whether erosion and isostasy are responsible for the recent increase in uplift rate in the Cordillera Blanca and thus for the increase of the displacement rate along the Cordillera Blanca normal fault has never been explored.

Here, we address the effect of erosion and isostasy on the uplift and exhumation of the Cordillera Blanca using a numerical model of landscape evolution (FastScape, Fig. 2). We performed several inversions of the present-day topography, total exhumation (inferred from amphibole barometry) and thermochronological data (apatite fission track and (U-Th-Sm)/He) to obtain best fitting values of the uplift rate, the elastic thickness of the lithosphere, the erodability of the batholith and the rocks it intruded, and the geothermal gradient. Our results show that the contribution of erosion and associated flexural rebound to uplift accounts for approximately 20% of the present-

day uplift rate in the Cordillera Blanca. We suggest that the erosion of the Cordillera Blanca dense intrusion since 3 Ma can also contribute in the Quaternary exhumation rate increase in this area. Finally, based on our results we revisit the two models previously proposed for the formation of the Cordillera Blanca normal fault.

Keywords: Andes, Low-temperature thermochronology, Cordillera Blanca, Landscape evolution modeling

Metodología:

Utilizamos el algoritmo FastScape (Braun y Willett, 2013) para resolver la ley de stream power, con la finalidad de predecir la evolución del paisaje, siguiendo un conjunto de factores o patrones que impulsan la elevación y la topografía (actividad tectónica y configuración geomorfológica). Debido al orden óptimo de los nodos, el algoritmo está implícito en el tiempo y computacionalmente muy eficiente, requiriendo solo $O(n)$ operaciones donde n es el número de puntos utilizados para discretizar la topografía. En consecuencia, FastScape se puede usar repetitivamente, incluso si se usa una discretización espacial muy alta, para intentar reproducir las características principales de la topografía actual y, utilizando un modelo térmico 1D simple, las edades de enfriamiento pronosticadas (trazas de fisión en apatitos y (U-Th)/He que pueden estar relacionadas con la erosión) con la esperanza de deducir una historia plausible de levantamiento y topografía de primer

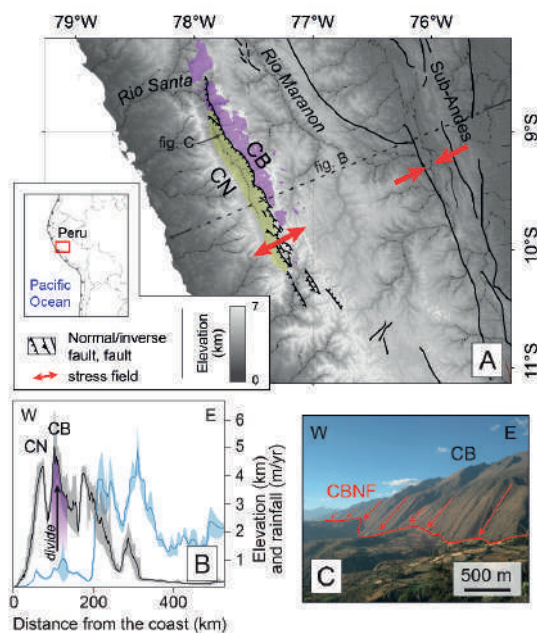


Figura 1: A) Mapa topográfica del norte del Perú con fallas activas (Neotectonic Open Database, neotec-opendata.com), ubicación de la Cordillera Blanca (CB, el batolito es en púrpura), ubicación de la Cordillera Negra (CN) y ubicación del Callejón de Huaylas (amarillo). El inset muestra el ubicación del área de trabajo adentro del América del Sur. B) Perfil E-W a través los Andes a la latitud de la Cordillera Blanca con la topografía (línea negra) y las precipitaciones (línea azul); El batolito de la Cordillera Blanca es en púrpura y la flecha negra marca el ubicación de la límite de drenaje. C) Foto de la falla Normal de la Cordillera Blanca con facetas triangulares de 1 km de altura en el escarpe de falla activa (Margirier et al., 2018) / A) Topographic map of the northern Peru showing active tectonic features (Neotectonic Open Database, neotec-opendata.com), location of the Cordillera Blanca (CB, the batholith is highlighted in purple), the Cordillera Negra (CN) and the Callejón de Huaylas (yellow). Inset shows map location within the South America. B) E-W cross-section of the Andes at the latitude of the Cordillera Blanca both the topography (black line) and the rainfall (blue line) are represented (modified from Bookhagen and Strecker, 2008). On the topographic cross-section the Cordillera Blanca batholith is represented in purple and a black arrow points the drainage divide location. C) Photograph of the CBNF showing the 1 km high triangular facets along the active fault scarp. (Margirier et al., 2018).

orden. Para hacer esto, acoplamos FastScape al algoritmo de Sambridge (1999a, 1999b) para “invertir” las edades termocronológicas, las restricciones barométricas y la topografía final conocida para encontrar los valores de mejor ajuste de varios parámetros desconocidos, incluyendo la eficiencia de la erosión, el espesor elástico, las tasas de elevación en varios periodos en el pasado y la temperatura en la base del modelo.

Para cada camino, las predicciones del modelo se compararon con los datos y se estimó una

función misfit, que se utilizó para seleccionar un nuevo conjunto de parámetros del modelo que se probarán. Este procedimiento se repitió varias veces hasta que se encontró una combinación óptima de valores de parámetros y, más importante aún, se pudo mapear la forma de la función misfit. Esto nos permite analizar el rango de parámetros del modelo donde la predicción del modelo se ajusta a las observaciones, así como la sensibilidad de las predicciones del modelo a los parámetros del modelo.

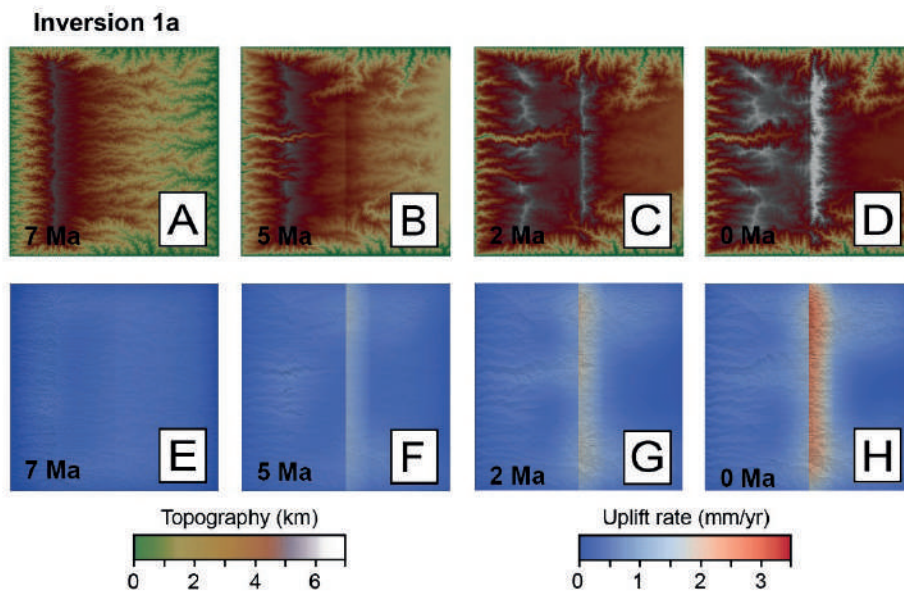


Figura 2: Evolución de la topografía y del levantamiento con los mejores valores de los parámetros (Margirier et al., 2018) / Evolution of the topography and rock uplift rate for the best fitting parameter model of inversion (Margirier et al., 2018).

CONCLUSIONES

Nuestro estudio proporciona nuevas restricciones sobre la eficiencia de la erosión, el espesor elástico de la litosfera, el gradiente de temperatura en la corteza y las tasas de elevación en los Andes del norte de Perú. La velocidad absoluta de Cordillera Blanca (que varía de 1.5 a 2.5 mm/a) es consistente con la CBNF (5.1 ± 0.8 mm/a a 0.6 ± 0.2 mm/a, Schwartz, 1988, Siame et al., 2006, Margirier et al., 2017). Nuestros resultados sugieren una aceleración de la elevación de la roca en la Cordillera Blanca a 2 Ma, de acuerdo con el aumento en la tasa de erosión evidenciado por Margirier et al. (2016). Sin embargo, mostramos que tal aumento en la tasa de erosión puede ser el resultado de la descarga erosional y la isostasia en lugar de estar relacionado con un cambio de esfuerzos tectónicos o climáticos. También demostramos que esta aceleración puede haber sido amplificada por la exhumación/emersión

de una intrusión granítica densa. Además, proponemos en base a nuestros modelos, que el Callejón de Huaylas ya era una depresión/valle antes del emplazamiento del batolito de la Cordillera Blanca y que ya existía una proto-Cordillera Blanca en ese momento.

Finalmente, a la luz de nuestro modelado de la evolución del paisaje, mostramos que los dos modelos publicados previamente para el CBNF (e.g., Colapso gravitacional de la corteza engrosada / levantamiento del footwall debido a la subducción de la Cordillera de Nazca; Dalmayrac y Molnar, (1981) ; McNulty y Farber (2002) respectivamente) son inconsistentes con los datos termocronológicos, geodinámicos y numéricos. Se necesitan más investigaciones para evaluar si la tectónica extensional cuaternaria ha sido desencadenada por la subducción de losa plana, lo que también puede haber desencadenado al mismo

tiempo el levantamiento de la Cordillera Blanca. Sugerimos, sin embargo, que, en este contexto, la construcción de la topografía en alto relieve estuvo fuertemente influenciada por el rebote flexural isostático y, hasta cierto punto, por la exhumación del denso granito de la Cordillera Blanca.

REFERENCIAS:

- Bookhagen B., Strecker M. 2008. Orographic barriers, high-resolution TRMM rainfall, and relief variations along the eastern Andes. *Geophys. Res. Lett.*, 35(6).
- Braun J., Willett S. 2013. A very efficient O(n), implicit and parallel method to solve the stream power equation governing fluvial incision and landscape evolution. *Geomorphology*, 180–181(0):170–179.
- Braun J., Simon-Labric T., Murray K., Reiners P. 2014. Topographic relief driven by variations in surface rock density. *Nature Geosci.*, 7(7):534–540.
- Dalmayrac B., Molnar P., 1981. Parallel thrust and normal faulting in Peru and constraints on the state of stress. *Earth Planet. Sci. Lett.* 55, 473–481.
- Margirier, A., Audin L., Robert X., Herman F., Ganne J., Schwartz S., 2016. Time and mode of exhumation of the Cordillera Blanca batholith (Peruvian Andes). *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121, 6235–6249.
- Margirier A., Audin L., Robert X., Pêcher A., Schwartz S. 2017. Stress field evolution above the Peruvian flat-slab (Cordillera Blanca, northern Peru). *J. South Am. Earth Sci.*, 77:58–69.
- Margirier A., Braun J., Robert X., Audin L., 2018. Role of erosion and isostasy in the Cordillera Blanca uplift : Insights from landscape evolution modeling (northern Peru, Andes). *Tectonophysics* 728-729, 119–129.
- McNulty B., Farber D., 2002. Active detachment faulting above the Peruvian flat slab. *Geology* 30 (6), 567–570.
- Sambridge M. 1999. Geophysical Inversion with a Neighbourhood Algorithm -I. Searching a parameter space. *Geophys. J. Int.*, 138:479–494.
- Sambridge M. 1999. Geophysical Inversion with a Neighbourhood Algorithm -II. Appraising the ensemble. *Geophys. J. Int.*, 138:727–746.
- Schwartz D. 1988. Paleoseismicity and Neotectonics of the Cordillera Blanca Fault Zone, Northern Peruvian Andes. *J. Geophys. Res.*, 93(B5):4712–4730
- Siame, L., Sébrier M., Bellier O., Bourles D. 2006. Can cosmic ray exposure dating reveal the normal faulting activity of the Cordillera Blanca fault, Peru? *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61(4):536–544.