

INFLUENCIA DE ESTRUCTURAS TOPOGRÁFICAS LOCALES EN LOS MECANISMOS ATMOSFÉRICOS ASOCIADOS A LA ZONA MÁS LLUVIOSA DE LA CUENCA ANDINO-AMAZÓNICA

Ricardo A. Gutierrez^{1,2}, Clémentine Junquas^{3,4}, Jhan-Carlo Espinoza^{3,5}, Patrice Baby⁶ y Elisa Armijos²

¹ Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

² Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

³ Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, INRAE, Grenoble-INP, IGE, 38000 Grenoble, France

⁴ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Lima, Perú

⁵ Instituto de Investigación sobre la Enseñanza de las Matemáticas, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima 15088, Perú

⁶ Géosciences Environnement Toulouse, Université Paul Sabatier, IRD, CNRS, 31400 Toulouse, France.



Ricardo Gutiérrez es ingeniero meteorólogo y magíster en Recursos Hídricos por la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Su área de investigación gira en torno a los procesos físicos asociados a la variabilidad y cambio climático en la región andino-amazónica a través del modelado numérico del clima. Actualmente, es asistente de investigación en el Instituto Geofísico del Perú (IGP), donde viene investigando las sensibilidades del sistema acoplado vegetación-atmósfera de la Amazonía a las sequías y deforestación.

Palabras clave: Hotspots de precipitación, región de transición Andes-Amazonía, modelo WRF, Topografía, experimentos de sensibilidad, Perú.

Citar como Gutierrez, R., Junquas, C., Espinoza, J.-C., Baby, P., & Armijos, E. (2025). Influencia de estructuras topográficas locales en los mecanismos atmosféricos asociados a la zona más lluviosa de la cuenca andino-amazónica. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.º 08, págs. 4-10.

¿Cuál es la contribución de esta investigación para los tomadores de decisiones?

Este estudio es una contribución importante para el entendimiento científico de los mecanismos que influyen la precipitación en la transición Andes-Amazonía, particularmente en el *hotspot* de Quincemil, lo cual ofrece insumos para mejorar la representación de procesos atmosféricos en modelos climáticos y tener proyecciones más confiables de lluvias extremas, fundamentales para la planificación de medidas de prevención frente a inundaciones y deslizamientos, así como la conservación de los ecosistemas en esta región, que sostienen biodiversidad única y regulan el recurso hídrico regional.

Resumen

Los mecanismos físicos que explican la existencia del *hotspot* de Quincemil, la zona más lluviosa de la Amazonía, aún no son del todo entendidos, particularmente aquellos influenciados por la orografía andina. En este estudio se evalúa la sensibilidad de la precipitación de verano y los

procesos atmosféricos asociados al *hotspot* de Quincemil frente a estructuras orográficas locales que se formaron entre hace 5 y 10 millones años como resultado de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Para ello, se realizaron experimentos con un modelo numérico de la atmósfera en el que se modificaron dichas estructuras. Los resultados sugieren que estructuras topográficas

vecinas al *hotspot*, como el arco de Fitzcarrald y la montaña de Camisea, canalizan los flujos de humedad amazónica, explicando entre un 16 % y el 40 % de la precipitación simulada en Quincemil, así como su ubicación actual. Asimismo, aproximadamente la mitad de la altitud moderna de los Andes sostiene cerca del 60 % de la precipitación en Quincemil, al generar un forzamiento mecánico que incrementa el flujo de humedad a escala regional.

1. Introducción

La región de transición andino-amazónica de Perú alberga a la zona más lluviosa de toda la cuenca amazónica. Allí, en el departamento de Cusco, se encuentra Quincemil, un *hotspot* de precipitación donde se registran acumulados anuales de precipitación en promedio de 7000 milímetros (Espinoza et al., 2015). Esta alta pluviosidad, en interacción con procesos geológicos como la tectónica de placas y la geodinámica superficial, ha favorecido una biodiversidad excepcional en la región (Antonelli et al., 2018; Hoorn et al., 2010). Los registros fósiles de mamíferos y palmas del Mioceno muestran que la riqueza de especies de esta zona cercana al *hotspot* de Quincemil se remonta a entre 5 y 10 millones de años (Roncal et al., 2015; Tejada-Lara et al., 2015). Coincidentemente, en esa época se formó el arco de Fitzcarrald, una estructura topográfica cuya máxima altitud no supera los 6000 m s.n.m., la cual es producto de la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana (Espurt et al., 2009). Dicha estructura se localiza en el límite de la vertiente oriental de los Andes del sur del Perú, su origen se asocia con el de la montaña de Camisea y ambas son vecinas al *hotspot* de Quincemil (Figura 1). El arco de Fitzcarrald constituye uno de los primeros obstáculos topográficos que encuentra el flujo de humedad proveniente de la Amazonía. En conjunto con la montaña de Camisea, ubicada adyacente al *hotspot* de Quincemil, surge la pregunta de cuál es su contribución a la dinámica atmosférica asociada a este *hotspot*.

La precipitación en el *hotspot* de Quincemil durante el verano (entre diciembre y febrero, diciembre-febrero) es producto del flujo de humedad amazónica de gran escala asociado al Jet de Bajos Niveles Sudamericano (SALLJ, por sus siglas en inglés) y de su interacción con la topografía local (Junquas et al., 2018). El contraste del calentamiento diferencial entre las cimas y las pendientes de la vertiente oriental de los Andes produce la formación de vientos anabáticos

(pendiente arriba) durante el día y catabáticos (pendiente abajo) durante la noche. La alta convergencia de estos últimos con el SALLJ explica cerca del 70 % de la precipitación total en el *hotspot* de Quincemil y produce una máxima pluviométrica nocturna (Chavez & Takahashi, 2017; Junquas et al., 2018). Este mecanismo muestra cómo la circulación atmosférica regional y las particularidades de la topografía local son cruciales para explicar el régimen pluviométrico de esta región.

En el presente estudio, se busca dilucidar los controles de las estructuras topográficas locales —como el arco de Fitzcarrald y la montaña de Camisea— en los procesos atmosféricos asociados al *hotspot* de Quincemil. Para ello, se realizaron simulaciones numéricas con el modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock et al., 2021), a partir de una configuración “control” (CTRL), la cual fue obtenida tras la validación del modelo bajo pruebas de parametrizaciones físicas, y se realizaron experimentos de sensibilidad topográfica removiendo los relieves mencionados y reduciendo la altitud de los Andes.

2. Metodología

Modelo WRF

Se utilizó el modelo WRF, versión 4.3 (Skamarock et al., 2021), para simular el clima regional de la zona de transición Andes-Amazonía durante diciembre-febrero 2012-2013. Los datos de las condiciones iniciales y de frontera laterales provinieron del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020). El modelo fue inicializado con condiciones atmosféricas de ERA5 noviembre del 2012 y se descartó el primer mes de simulación con el fin de evitar los “shocks” asociados a la modificación de la topografía en los experimentos de sensibilidad topográfica. Se seleccionó diciembre-febrero 2012-2013 porque en este periodo no se registraron anomalías significativas de la precipitación en la región andina, tampoco en la temperatura superficial de los océanos Atlántico y Pacífico tropical, configurándose en un verano “normal”; es decir, dentro de su climatología (Mourre et al., 2016). El *dominio* 01 (d01) cubrió una parte importante de Sudamérica tropical a una resolución espacial de 15 km (Figura 1a) y fue forzado directamente por el reanálisis ERA5. El *dominio* d02 (d02), forzado por el d01, se centró en el *hotspot* de Quincemil a una resolución espacial de 5 km (Figura 1b).

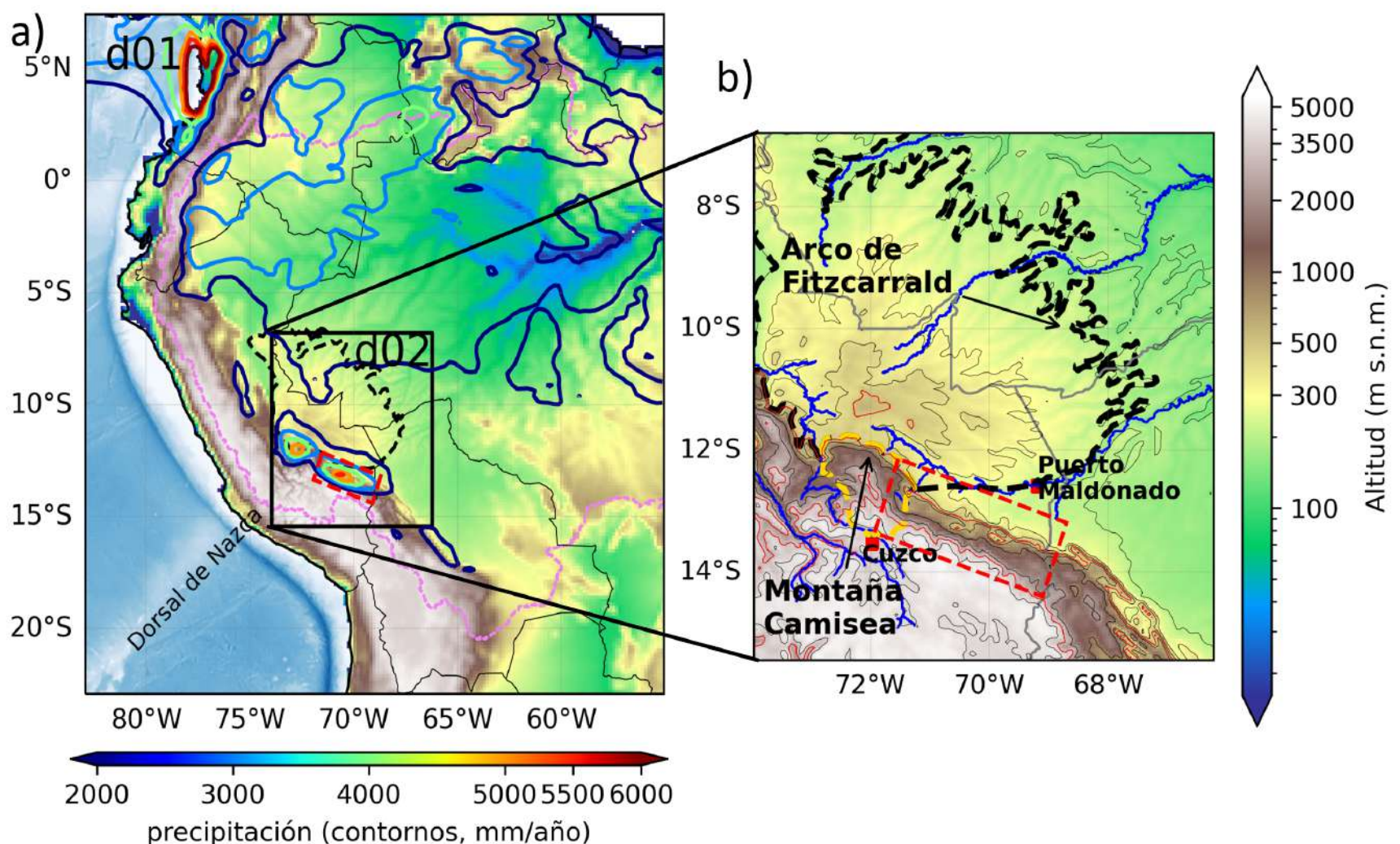


Figura 1. Dominios de la simulación en el modelo WRF (a). Las líneas violetas representan el límite de la cuenca amazónica y los contornos seleccionados (barra de colores inferior) representan a la climatología de la precipitación del producto CMORPH (2000-2020). La batimetría oceánica para representar la localización de la dorsal de Nazca fue obtenida del General Bathymetric Chart of the Oceans (<https://www.gebco.net>). Detalles geográficos de la región de transición Andes-Amazonia alrededor del arco de Fitzcarrald y la montaña de Camisea en el dominio d02 (b). La montaña de Camisea está representada por una línea dorada. Tanto en a) como en b), el arco de Fitzcarrald está delimitado por líneas negras discontinuas, el rectángulo oblicuo de líneas rojas discontinuas representa la localización aproximada del hotspot de Quincemil, y la altitud topográfica está representada por la barra de colores de la derecha.

Las parametrizaciones utilizadas en el modelo son las siguientes: el esquema de microfísica empleado fue Morrison (Morrison et al., 2009); para cumulus, New Tiedtke (Zhang & Wang, 2017); para la capa límite planetaria, Asymmetric Convective Model v2 (ACM2; Pleim, 2007); para el de superficie, Noah-MP (Yang et al., 2011); para la capa superficial, MM5 revisado (Paulson, 1970); y para radiación de onda larga y corta, RRTM y Dudhia, respectivamente (Dudhia, 1989; Mlawer et al., 1997). Esta elección de parametrizaciones físicas provino de un análisis de sensibilidad a esquemas de parametrización que incluyó simulaciones bajo tres parametrizaciones diferentes de capa límite planetaria: ACM2, Yonsei University (YSU; Hong et al., 2006) y Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino 2.5 (MYNN; Nakanishi & Niino, 2009). Las demás parametrizaciones fueron las mismas que las descritas. La simulación con ACM2 representó de mejor manera la ubicación de los máximos de precipitación nocturna en las altitudes que corresponden a las estimaciones satelitales y pluviómetros in-situ: 1000-2000 m s.n.m., así como la supresión de la sobrestimación de la precipitación

por encima de los 3000 m s.n.m. Esta configuración se denomina, en adelante, la simulación CTRL.

Experimentos de sensibilidad topográfica

Los experimentos de sensibilidad topográfica se realizaron en condiciones idénticas al CTRL salvo por la modificación de estructuras orográficas. Específicamente, en el experimento "No Lowlands" (NL, Figura 2b), se removió al arco de Fitzcarrald, aplanándolo a una altitud constante de 200 m s. n. m. En el experimento "No Lowlands No Camisea" (NLC, Figura 2c), además de remover al arco, se eliminó también la montaña de Camisea, asociada a la formación del arco de Fitzcarrald (Espurt et al., 2009). El experimento NLC50A (Figura 2d) replicó las condiciones de NLC, pero además se redujo a la mitad la altitud de los Andes. Estos cambios también se implementaron en el dominio d01 (no mostrado).

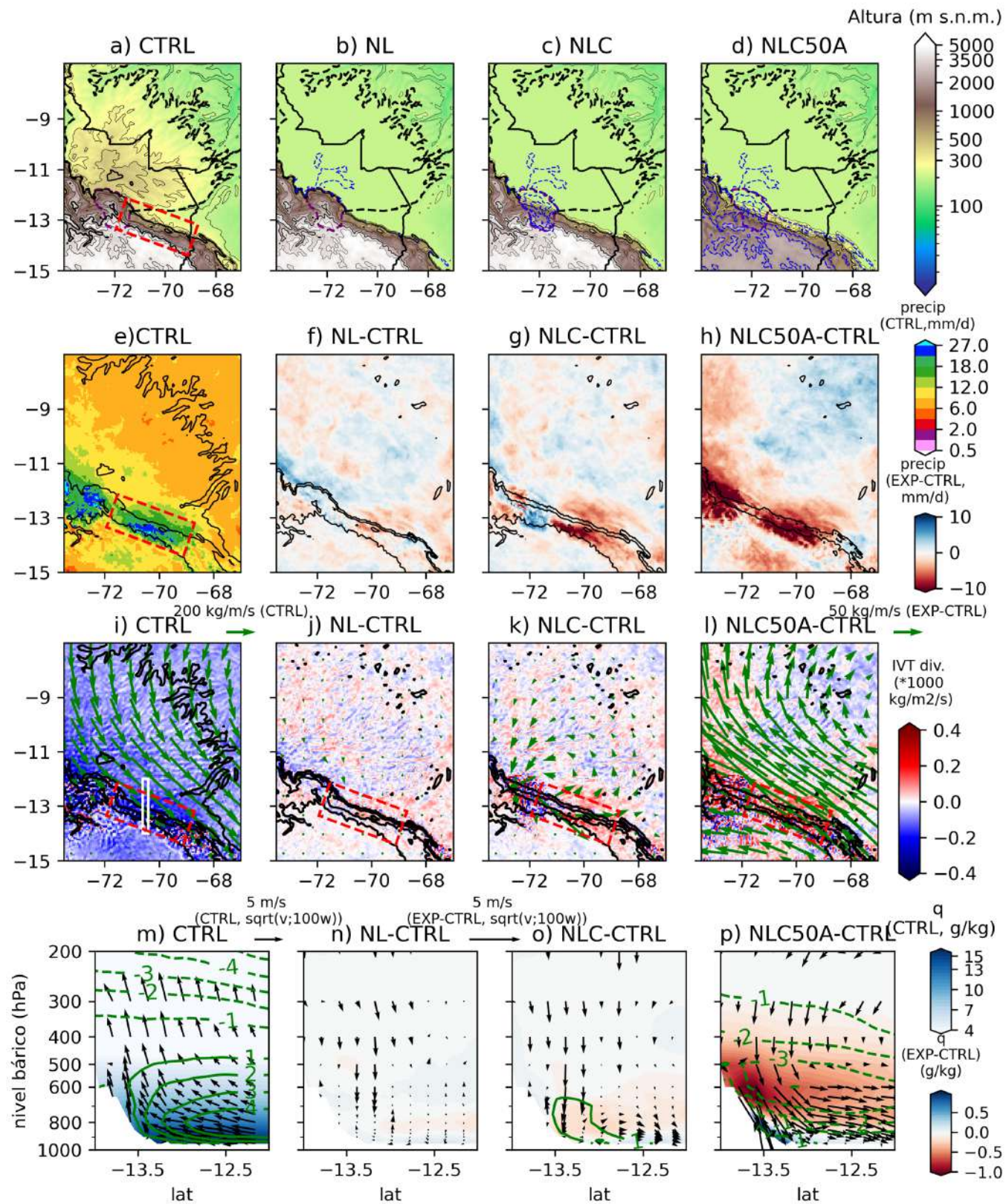


Figura 2. Experimentos de sensibilidad topográfica para los casos CTRL, NL, NLC y NLC50A en el dominio d02 (a-d). Las líneas azules discontinuas en a-d representan diferencias de -250, -1000 y -2500 m s.n.m. respecto de CTRL. Precipitación media durante diciembre-febrero 2012-13 en CTRL con isohipsas de 200, 500 y 3000 m s. n. m. (líneas negras) (e) y sus diferencias con los demás experimentos de sensibilidad topográfica (f-h). VIMF (vectores verdes) y su divergencia (barra de colores) para diciembre-febrero 2012-13 en CTRL (i) y sus diferencias con los demás experimentos de sensibilidad topográfica (j-l). Corte transversal de la humedad específica (barra de colores) vientos verticales (meridional; vertical x 100, vectores) y zonal (contornos) durante diciembre-febrero 2012-13 en la región delimitada por un rectángulo blanco en i) y sus diferencias con los demás experimentos de sensibilidad topográfica (m-p). El rectángulo oblicuo de líneas rojas discontinuas representa la localización aproximada del hotspot de Quincemil.

3. Resultados

La remoción del arco de Fitzcarrald en NL produjo una disminución de cerca de 4 mm/d en la precipitación total en el *hotspot* de Quincemil, lo cual corresponde al 16 % respecto de CTRL (~25 mm/d), especialmente en altitudes intermedias por debajo de los 1000 m s. n. m. (Figura 2f). En NLC, estas disminuciones son más pronunciadas (~ 9 mm/d, 40% de CTRL) y abarcan una mayor extensión espacial

(Figura 2g). El aumento de la precipitación (~6 mm/d) al oeste de la ubicación del *hotspot* de Quincemil en NLC sugiere que la montaña de Camisea, además de controlar la intensidad del *hotspot*, también controla su localización, anclándola hacia el este. En NLC50A se produce una disminución de hasta 13 mm/d en la precipitación de la vertiente oriental de los Andes, lo que representa una disminución de hasta el 60 % respecto de CTRL (Figura 2h). Estas señales de disminución respecto de CTRL son más intensas durante la noche, que es el periodo más lluvioso del día en el *hotspot* (no mostrado).

Los mecanismos atmosféricos que explican estas diferencias pueden estar asociados con el Flujo de Humedad Verticalmente Integrado (VIMF, por sus siglas en inglés) y su divergencia (Figura 2i-l), así como con posibles cambios en los procesos vinculados a la convección local en la vertical (Figura 2m-p). Tanto en NL como en NLC, se observa una anomalía anticiclónica centrada en la concavidad de la montaña de Camisea, donde se registran disminuciones de VIMF hacia el *hotspot* en el orden del 4 % y 10 %, respectivamente (Figura 2j,k). Estos cambios parecen relacionarse con una disminución en la convergencia de VIMF (Figura 2j,k), con menores valores de humedad específica en niveles bajos y medios, y con un debilitamiento de la velocidad vertical a lo largo del corte transversal, particularmente en NLC (Figura 2n-o). En NLC50A, el flujo de humedad se reduce hasta en un 70% respecto de CTRL alrededor del *hotspot* (Figura 2l), lo que sugiere una reducción notable del suministro de humedad específica —en especial en niveles medios— y, en consecuencia, de la convección (menor velocidad vertical, Figura 2p).

4. Discusiones

Los resultados obtenidos dan luces sobre los patrones climáticos que ejercen algunas estructuras topográficas locales sobre el *hotspot* de Quincemil. Además, la interacción entre la topografía local y las circulaciones atmosféricas, tanto locales como regionales, podría haber contribuido en la formación de los paisajes únicos que favorecieron el desarrollo de la gran biodiversidad local (Antonelli et al., 2018).

No obstante, se debe considerar que las modificaciones implementadas en los experimentos de sensibilidad se basaron en idealizaciones de condiciones ambientales ocurridos hace entre 5 y 10 millones de años, cuando la altura de los Andes era aproximadamente la mitad de la actual (Boschman, 2021; Espurt et al., 2009). Por ejemplo, en NLC50A se redujo la altura de los Andes a la mitad, pero su levantamiento real fue diacrónico y no uniforme (Boschman, 2021). Por ello, estas simulaciones no deben interpretarse como representaciones paleoclimáticas exactas, ya que otros factores geográficos o numéricos (condiciones de frontera), que no se consideraron en el estudio, podrían haber influido en el clima local. Entre ellos se incluyen los cambios en la insolación asociados a la deriva continental, la composición química de la atmósfera, la circulación oceánica de gran escala y la existencia

de otros tipos de cobertura del suelo, como el gran humedal del sistema Pebas (Hoorn et al., 2022).

Asimismo, la representación de los mecanismos aquí analizados en simulaciones de modelos climáticos y sus proyecciones futuras puede resultar crucial, dada la resolución espacial gruesa y la “suavización” de la orografía que fuerza a estos modelos. Sesgos en esta representación podrían traducirse en estimaciones incorrectas de la intensidad y extensión del *hotspot* de Quincemil. Además, este error podría trasladarse a proyecciones del clima futuro bajo escenarios de gases de efecto invernadero y deforestación, aumentando las incertidumbres de dichas proyecciones.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos apuntan a que estructuras orográficas locales vecinas al *hotspot* de Quincemil, como el arco de Fitzcarrald y la montaña de Camisea, desempeñan un rol importante en la modulación de la intensidad y localización al canalizar el flujo de humedad hacia la zona del *hotspot* de Quincemil. Estos mecanismos inducidos a escala local, en cuanto a que el arco de Fitzcarrald y la montaña de Camisea, explicarían entre un 16 % y un 40 % de la precipitación en el *hotspot* de Quincemil, respectivamente. Por otra parte, la presencia de los Andes parece modular de manera notable el flujo de humedad amazónico a escala regional, lo que se evidencia en el experimento en el que se redujo a la mitad su altura. En este escenario, los Andes controlan en mayor medida la precipitación sobre la región de transición Andes-Amazonía, donde una reducción de la mitad de su altura contemporánea corresponde a, aproximadamente, una reducción del 60 % de la precipitación en el *hotspot* de Quincemil.

Cabe señalar que los resultados presentados en esta investigación forman parte del artículo científico “Influence of local topographic structures on the atmospheric mechanisms related to the Andean-Amazon rainiest zone” de Gutiérrez-Villarreal et al. (2025).

Referencias

- Antonelli, A., Kissling, W. D., Flantua, S. G. A., Bermúdez, M. A., Mulch, A., Muellner-Riehl, A. N., Kreft, H., Linder, H. P., Badgley, C., Fjeldså, J., Fritz, S. A., Rahbek, C., Herman, F., Hooghiemstra, H., & Hoorn, C. (2018). Geological and climatic influences on mountain biodiversity. *Nature Geoscience*, 11(10), 718–725.
<https://doi.org/10.1038/s41561-018-0236-z>
- Boschman, L. M. (2021). Andean mountain building since the Late Cretaceous: A paleoelevation reconstruction. *Earth-Science Reviews*, 220, Article 103640.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103640>
- Chavez, S. P., & Takahashi, K. (2017). Orographic rainfall hot spots in the Andes-Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(11), 5870–5882.
<https://doi.org/10.1002/2016JD026282>
- Dudhia, J. (1989). Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(20), 3077–3107.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2)
- Espinoza, J. C., Chavez, S., Ronchail, J., Junquas, C., Takahashi, K., & Lavado, W. (2015). Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resources Research*, 51(5), 3459–3475.
<https://doi.org/10.1002/2014WR016273>
- Espurt, N., Baby, P., Brusset, S., Roddaz, M., Hermoza, W., & Barbarand, J. (2009). The Nazca Ridge and Uplift of the Fitzcarrald Arch: Implications for Regional Geology in Northern South America. En C. Hoorn & F. P. Wesselingh (Eds.), *Amazonia: Landscape and Species Evolution* (pp. 89–100). John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/9781444306408.ch6>
- Gutiérrez-Villarreal, R. A., Junquas, C., Espinoza, J.-C., Baby, P., & Armijos, E. (2025). Influence of local topographic structures on the atmospheric mechanisms related to the Andean-Amazon rainiest zone. *Atmospheric Research*, 320, 108068.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108068>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hong, S.-Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318–2341.
<https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Hoorn, C., Boschman, L. M., Kukla, T., Sciumbata, M., & Val, P. (2022). The Miocene wetland of western Amazonia and its role in Neotropical biogeography. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 199(1), 25–35.
<https://doi.org/10.1093/botlinnean/boab098>
- Hoorn, C., Wesselingh, F. P., ter Steege, H., Bermudez, M. A., Mora, A., Sevink, J., Sanmartín, I., Sanchez-Meseguer, A., Anderson, C. L., Figueiredo, J. P., Jaramillo, C., Riff, D., Negri, F. R., Hooghiemstra, H., Lundberg, J., Stadler, T., Särkinen, T., & Antonelli, A. (2010). Amazonia Through Time: Andean Uplift, Climate Change, Landscape Evolution, and Biodiversity. *Science*, 330(6006), 927–931.
<https://doi.org/10.1126/science.1194585>
- Junquas, C., Takahashi, K., Condom, T., Espinoza, J.-C., Chavez, S., Sicart, J.-E., & Lebel, T. (2018). Understanding the influence of orography on the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Climate Dynamics*, 50(11–12), 3995–4017.
<https://doi.org/10.1007/s00382-017-3858-8>
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663–16682.
<https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- Morrison, H., Thompson, G., & Tatarskii, V. (2009). Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes.

Monthly Weather Review, 137(3), 991–1007.
<https://doi.org/10.1175/2008MWR2556.1>

Mourre, L., Condom, T., Junquas, C., Lebel, T., E. Sicart, J., Figueroa, R., & Cochachin, A. (2016). Spatio-temporal assessment of WRF, TRMM and in situ precipitation data in a tropical mountain environment (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1), 125–141.
<https://doi.org/10.5194/hess-20-125-2016>

Nakanishi, M., & Niino, H. (2009). Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 87(5), 895–912.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.87.895>

Paulson, C. A. (1970). The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 9(6), 857–861.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1970\)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1970)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2)

Pleim, J. E. (2007). A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(9), 1383–1395.
<https://doi.org/10.1175/JAM2539.1>

Roncal, J., Couderc, M., Baby, P., Kahn, F., Millán, B., Meerow, A. W., & Pintaud, J.-C. (2015). Palm diversification in two geologically contrasting regions of western Amazonia. *Journal of Biogeography*, 42(8), 1503–1513.
<https://doi.org/10.1111/jbi.12518>

Skamarock, C., Klemp, B., Dudhia, J., Gill, O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, G., Duda, G., Barker, D., & Huang, X. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (NCAR Technical Note NCAR/TN-588+STR).
<https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>

Tejada-Lara, J. V., Salas-Gismondi, R., Pujos, F., Baby, P., Benammi, M., Brusset, S., De Franceschi, D., Espurt, N., Urbina, M., & Antoine, P.-O. (2015). Life in proto-Azononia: Middle Miocene mammals from the Fitzcarrald Arch (Peruvian Amazonia). *Palaeontology*, 58(2), 341–378.
<https://doi.org/10.1111/pala.12147>

Yang, Z.-L., Niu, G.-Y., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., Longuevergne, L., Manning, K., Niyogi, D., Tewari, M., & Xia, Y. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12), Article D12110.
<https://doi.org/10.1029/2010JD015140>

Zhang, C., & Wang, Y. (2017). Projected Future Changes of Tropical Cyclone Activity over the Western North and South Pacific in a 20-km-Mesh Regional Climate Model. *Journal of Climate*, 30(15), 5923–5941.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0597.1>