EL INTERCAMBIO DE ENERGÍA Y CARBONO EN LOS ANDES CENTRALES DE PERÚ: AVANCES DEL PROYECTO LAMAR

José Luis Flores Rojas[1]

[1] Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

Palabras clave: Eddy Covariance, flujos turbulentos, capa límite atmosférica, cambio climático, Huancayo.

Citar como Flores Rojas J.L. (2025). El intercambio de energía y carbono en los Andes centrales: avances del proyecto LAMAR. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.° 10, págs. 14-18.

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

Esta investigación ofrece mediciones directas y de alta resolución sobre cómo los cultivos altoandinos intercambian energía, agua y carbono con la atmósfera. Esta información permite determinar, con evidencia local, cuánto estos ecosistemas capturan o emiten carbono hacia la atmósfera a lo largo del día. Estos datos son importantes para ajustar los factores de emisión utilizados en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y para mejorar la evaluación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. Además, al asegurar que las mediciones representen realmente el territorio donde se cultiva, los resultados incrementan la confiabilidad de los modelos que apoyan la planificación agrícola, la gestión del agua y la reducción de riesgos climáticos. En conjunto, esta evidencia ofrece a los tomadores de decisiones una base científica sólida para diseñar políticas más efectivas y focalizadas, orientadas a reducir riesgos climáticos en los Andes centrales.

Resumen

El proyecto LAMAR (Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación) del Instituto Geofísico del Perú fortalece la capacidad nacional de observación climática mediante tecnología avanzada para medir el intercambio de energía, agua y carbono entre la superficie agrícola y la atmósfera en los Andes centrales del Perú. A través del sistema Eddy Covariance, instalado en el Observatorio Geofísico de Huancayo, se cuantifican los flujos turbulentos de dióxido de carbono y vapor de agua (CO_2 y H_2O), complementados con estudios de la Capa Límite Atmosférica (CLA), simulaciones de turbulencia y modelación del footprint o área de influencia. Los resultados permiten caracterizar la respiración del ecosistema agrícola y aportar información esencial para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y las estrategias de adaptación al cambio climático. El fortalecimiento de LAMAR consolida al Perú como referente regional en observaciones de parámetros físicos en la superficie y la atmósfera en zona de montaña.

1. Introducción

Los Andes centrales del Perú constituyen un entorno altamente sensible donde la agricultura depende del equilibrio energético entre suelo y atmósfera. Hasta hace poco, las mediciones directas de flujos turbulentos eran escasas. El proyecto LAMAR, ejecutado en el Observatorio Geofísico de Huancayo (12°02′ S, 75°19′ O; 3350 m s. n. m.), responde a esta necesidad mediante observaciones continuas y de alta frecuencia que describen los procesos de intercambio superficie–atmósfera.

El proyecto "Fortalecimiento de LAMAR" forma parte del programa SINACTI II (Mejoramiento y ampliación de los servicios de Ciencia, Tecnología e Innovación), financiado por PROCIENCIA–CONCYTEC (registro E044-2023-01-BM/86050) a través del préstamo del Banco Mundial. Su objetivo general es fortalecer las capacidades de medición y modelado micro-meteorológico del IGP para evaluar medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en la zona agrícola del valle del Mantaro.

2. Metodología

Medición de flujos turbulentos

El núcleo del proyecto es el sistema Eddy Covariance (EC), integrado por un anemómetro sónico tridimensional y un analizador de gases. El primero mide las componentes del viento (U, V, W) y la temperatura a 10 Hz; el segundo registra concentraciones instantáneas de CO^2 y H^2O. A partir de la covarianza entre las fluctuaciones turbulentas de la velocidad vertical (w') y la concentración (c') se obtiene el flujo medio vertical:

$$F = w'c'$$

Este método cuantifica el intercambio neto de gases y energía con alta resolución temporal.

Caracterización de la capa límite atmosférica (CLA)

La CLA es la región de la atmósfera que responde en minutos a la influencia de la superficie: calentamiento radiativo, fricción y evapotranspiración. Se analizan datos de radio-sondeos, realizados en campañas de observación y gradientes térmicos observados mediante sensores instalados en una torre de gradiente, con la finalidad de describir su estructura diurna, desde la capa superficial hasta la capa convectiva (Figura 1).

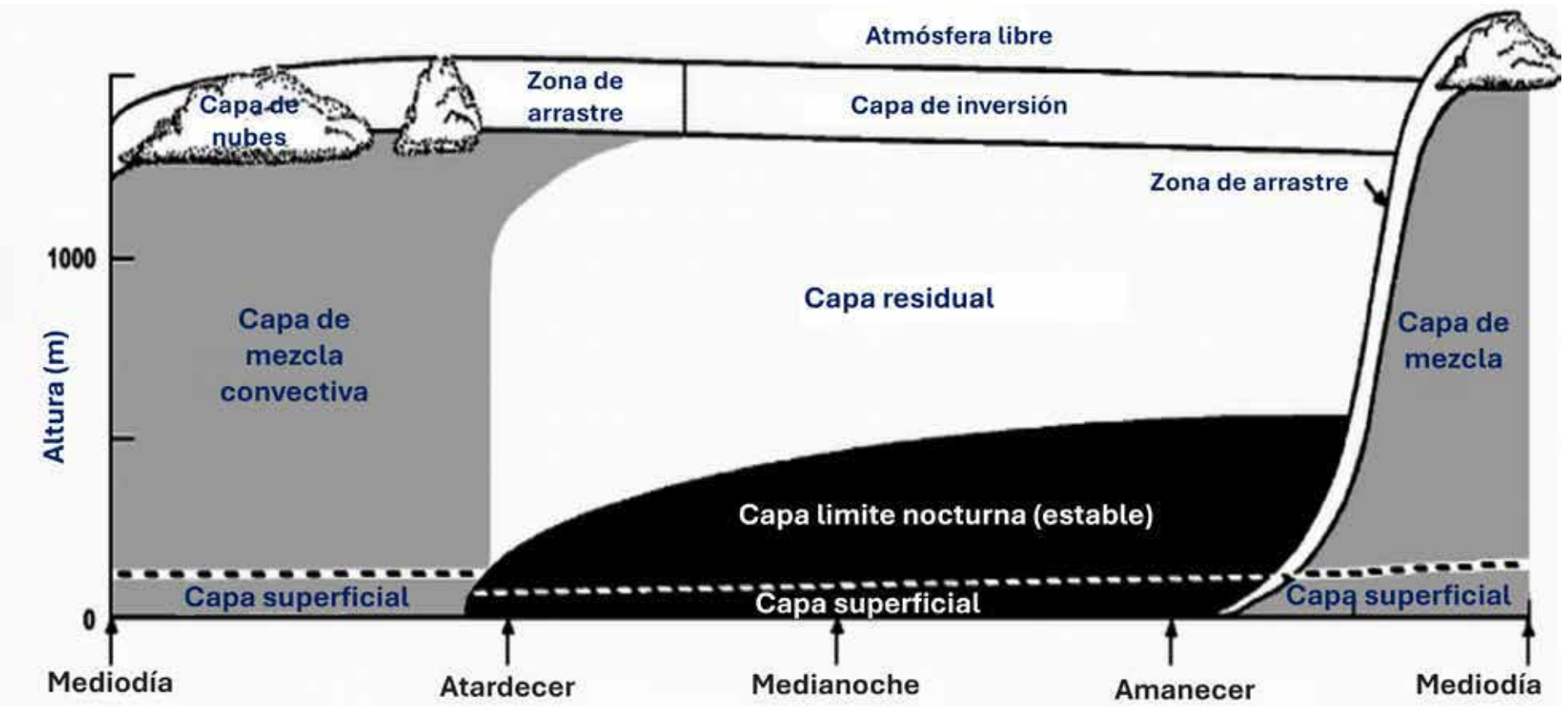

Figura 1. Estructura típica de la CLA durante el día y la noche (adaptado de Stull, 2003).

Modelación de turbulencia y *footprint*

Se aplican modelos de energía cinética turbulenta (k) y tasa de disipación (ω) (Liu, et.al., 2020). Paralelamente, se calculan *footprints* (Kljun, et.al., 2015) que delimitan el área de contribución de cada medición, considerando la dirección del viento, la rugosidad superficial (zo) y la altura del sensor. El proyecto adopta criterios de calidad (WMO, 2018) y procesamiento en Python para el cálculo de covarianzas, detección de anomalías y filtrado nocturno.

Figura 2. Sistema Eddy Covariance para la medición de flujos de vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2), instalado en el Observatorio Geofísico de Huancayo del IGP.

3. Resultados y discusión

Flujos de energía y carbono

Las observaciones del sistema Eddy Covariance (Figura 2) muestran ciclos diurnos definidos: el flujo de calor sensible alcanza su máximo al mediodía, mientras que el de calor latente predomina por la tarde, reflejando una intensa evapotranspiración. Los flujos de CO_2 evidencian fuerte asimilación fotosintética entre 09:00 y 15:00 horas, seguida de emisión nocturna por respiración vegetal y del suelo. Estos datos permiten estimar el balance neto de carbono (NBP), indicador de si el ecosistema actúa como fuente o sumidero de dióxido de carbono.

De acuerdo a las estimaciones del balance hídrico, la ET en las cuencas de los ríos Marañón y Ucayali alcanzó medias anuales de 529 mm y 639 mm, respectivamente, mientras que en la cuenca del Madeira el promedio fue de 971 mm por año (Figura 1). Para los dos años de observaciones en la torre de Quistococha, la ET media anual fue cercana a 1025 mm por año. Baker et al. (2021) reportaron una notable sobreestimación de la ET "observada" —derivada por balances hídricos (11 cuencas) y 6 torres de flujo a lo largo de toda la Amazonía— por parte del producto satelital GLEAM.

Este comportamiento también se observa en los productos grillados ERA5Land, XBASE y TerraClimate para la Amazonía occidental (Figura 1).

Dinámica de la capa límite

El espesor de la CLA varía entre 300 m en la noche y más de 1 500 m al mediodía, en respuesta al calentamiento solar y a la turbulencia convectiva. Este ciclo controla la dispersión de calor y humedad, coincidiendo con observaciones internacionales (Helbig et al., 2021).

Importancia del footprint

El análisis del *footprint* indica que los contornos de contribución de 75 %, 50 % y 25 % para las emisiones de vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) indican que las áreas que influyen en las mediciones se extienden hasta 100-150 metros del sistema Eddy Covariance y que cambian su dirección y alcance según la dirección e intensidad del viento; así como, por la intensidad de la turbulencia, que presenta un ciclo diurno bien definido (Figura 3).

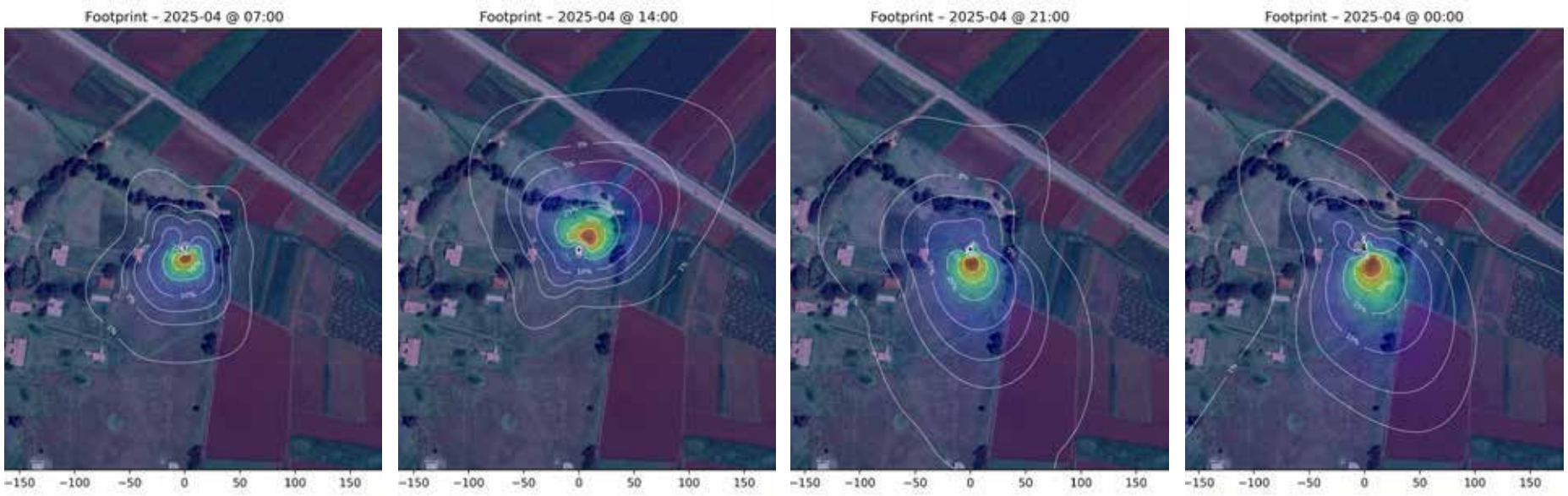

Figura 3. Ejemplos de footprint calculados para el sistema Eddy Covariance para diferentes horas del día con los contornos de 75 %, 50 % y 25 %. Las distancias se indican en metros.

Fotosíntesis y respiración

Los datos de flujos de CO_2 permiten cuantificar la "respiración del ecosistema". Durante el día, la fotosíntesis supera la respiración, resultando en un flujo negativo (hacia la superficie); de noche, el proceso se invierte. Por otro lado, la captura de carbono por la vegetación se realiza a través de sus estomas abiertas, lo cual resulta también en la pérdida de agua hacia la atmósfera mediante la transpiración, la cual sirve para impulsar el transporte de nutrientes y agua desde el suelo hacia las hojas, además de contribuir a regular la temperatura de las mismas ante el calentamiento por radiación. Por esto, el flujo de carbono y de agua tienden a ser opuestos a lo largo del día.

La medición directa de estos flujos ofrece una visión integrada del ciclo del carbono y del vapor de agua (Figura 4) en ecosistemas agrícolas altoandinos, relevante para los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero del Perú.

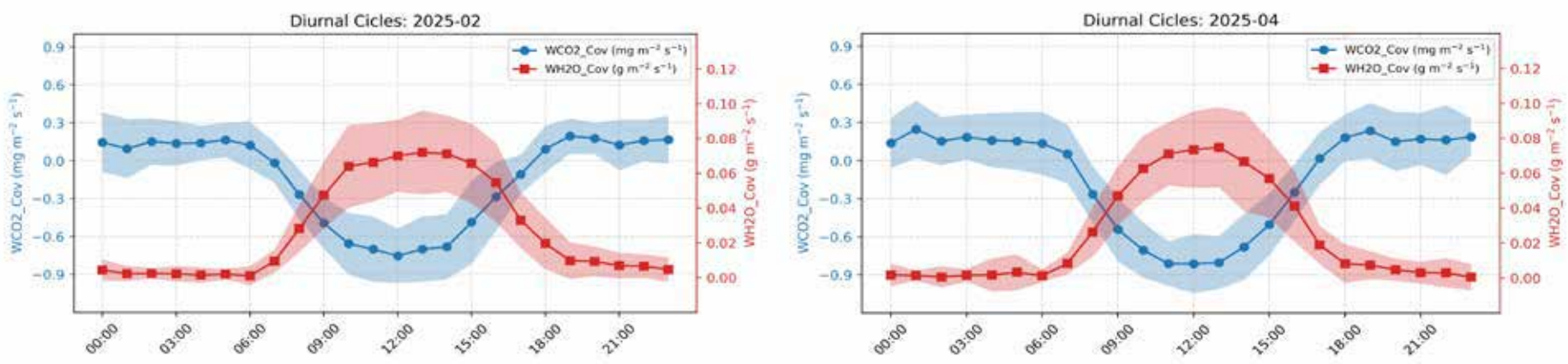

Figura 4. Ciclo diurno del flujo vertical de vapor de agua (H2O) y del dióxido de carbono (CO2) para los meses de febrero (panel de laizquierda) y abril (panel de la derecha).

Relevancia regional e internacional

El Observatorio Geofísico de Huancayo, fundado en 1922 por la Fundación Carnegie, posee la serie climática más larga del país (1921–presente). LAMAR combina esta tradición histórica con instrumentación moderna: radares de viento y nubes, radiómetros, disdrómetros, sensores de humedad del suelo, entre otros. Su integración a redes como AmeriFlux (Chu et al., 2023) y GLAFO (Wulfmeyer et al., 2022) pone al Perú en la vanguardia de la investigación de flujos de energía y carbono en montaña y promueve la cooperación científica con Estados Unidos y Alemania.

4. Conclusiones

- LAMAR ha instalado la primera torre de flujos turbulentos en los Andes centrales del Perú, lo que permite cuantificar directamente el intercambio de energía y carbono entre el suelo y la atmósfera.
- Las mediciones revelan alta variabilidad diurna de flujos de calor y CO_2, característica de ecosistemas agrícolas altoandinos.
- El *footprint* confirma la representatividad de las observaciones y facilita el filtrado de influencias externas.
- LAMAR fortalece la investigación micrometeorológica del IGP y sirve como plataforma de formación para nuevos investigadores.
- Los datos generados alimentan modelos climáticos y políticas de mitigación, posicionando al Perú como referente regional en ciencia atmosférica de montaña.

Referencias

Liu, Y., Liu, Y., Muñoz-Esparza, D., Hu, F., Yan, C., & Miao, S. (2020). Simulation of Flow Fields in Complex Terrain with WRF-LES: Sensitivity Assessment of Different PBL Treatments. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 59(9), 1481-1501. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0304.1

Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., and Schmid, H. P. (2015): A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). Geoscientific Model Development, 8(11), 3695–3713, https://doi.org/10.5194/gmd-8-3695-2015

Chu, H., Christianson, D. S., Cheah, Y.-W., Pastorello, G., O'Brien, F., Geden, J., Ngo, S.- T., Hollowgrass, R., Leibowitz, K., Beekwilder, N. F., Sandesh, M., Dengel, S., Chan, S.W., Santos, A., Delwiche, K., Yi, K., Buechner, C., Baldocchi, D., Papale, D., Keenan, T. F., Biraud, S. C., Agarwal, D. A., & Torn, M. S. (2023). AmeriFlux BASE data pipeline to support network growth and data sharing. Scientific Data, 10(1), 614. https://doi.org/10.1038/s41597-023-02531-2

Helbig, M., Gerken, T., Beamesderfer, E. R., Baldocchi, D. D., Banerjee, T., Biraud, S. C., Brown, W. O. J., Brunsell, N. A., Burakowski, E. A., Burns, S. P., Butterworth, B. J., Chan, W. S., Davis, K. J., Desai, A. R., Fuentes, J. D., Hollinger, D. Y., Kljun, N., Mauder, M., Novick, K. A., ... Richardson, A. D. (2021). Integrating continuous atmospheric boundary layer and tower-based flux measurements to advance understanding of land-atmosphere interactions. Agricultural and Forest Meteorology, 307, Article 108509. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108509

Oke, T. R. (2002). Boundary Layer Climates. Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203407219

Stull, R. B. (1988). An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8

Instituto Geofísico del Perú (2025). Proyecto LAMAR: Fortalecimiento del Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación. Wulfmeyer, V., Apituley, A., Berger, F., Breil, M., Bogena, H., Bosfeld, F. C., Chaney, N., Edwards, J., Ek, M., Ferguson, C. R., Findell, K. L., Mauder, M., Rotach, M., Turner, D. D., van Oevelen, P., Vercauteren, N., Vereecken, H., Verhoef, A., Zhang, Y., ... Torn, M. S. (2022). Exploring Terra Incognita in the Earth System: The GEWEX Land-Atmosphere Feedback Observatory (GLAFO). GEWEX/GLASS White Paper. https://www.gewex.org/gewex-content/uploads/2022/12/221003_GLAFO_White_Paper.pdf