

EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA AMAZONÍA OCCIDENTAL DERIVADA DE FUENTES OBSERVACIONALES Y SATELITALES

Ricardo A. Gutierrez¹ y Ken Takahashi¹

¹ Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

Palabras clave: Evapotranspiración, Amazonía occidental, climatología, balance hídrico, intercomparación, Perú.

Citar como Gutierrez, R., & Takahashi, K. (2025). Evapotranspiración en la Amazonía occidental derivada de fuentes observacionales y satelitales. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.o 09, págs. AA-BB.

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

Esta investigación entrega estimaciones actualizadas y comparativas de la evapotranspiración en la Amazonía peruana, un proceso que sostiene las lluvias y la estabilidad hídrica regional. El artículo analiza la evapotranspiración usando balances hídricos, mediciones de torres de flujo y datos satelitales que diversos servicios internacionales producen y distribuyen para uso global. Al contrastar estas fuentes, el estudio muestra diferencias importantes entre ellas y explica por qué varias de estas bases de datos satelitales no representan con precisión las condiciones locales del país. Estos resultados ayudan a los tomadores de decisión a identificar incertidumbres críticas en la información climática que podrían encontrar al gestionar riesgos hidrometeorológicos y planificar intervenciones en cuencas amazónicas. Además, la investigación ofrece insumos concretos para validar modelos hidrológicos y climáticos, herramientas esenciales para anticipar sequías, mejorar la gestión del agua y orientar políticas frente a la deforestación y el cambio climático.

1. Introducción

La evapotranspiración (ET) es un flujo hidrológico fundamental que consiste en la transferencia de agua desde el suelo hacia la atmósfera mediante la evaporación del suelo, cuerpos de agua y precipitación interceptada por la vegetación, así como la transpiración de las plantas. Este proceso es clave para la partición de flujos de calor en la superficie terrestre y el ciclo hidrológico (Seneviratne et al., 2010). La ET amazónica desempeña un papel esencial en el mantenimiento del ciclo hidrológico regional, dado que hasta la mitad de la precipitación en la vertiente oriental de los Andes puede originarse por el reciclaje de la humedad generada por la evapotranspiración del bosque amazónico (Staal et al., 2018; Zemp et al., 2014, 2017). Por ello, variaciones en la ET podrían afectar la estabilidad del sistema amazónico, y dichos cambios pueden estar controlados por el aumento de los gases de efecto invernadero o por la deforestación. Algunos estimados observacionales sugieren reducciones de hasta 30 % de la ET en zonas deforestadas durante la

temporada seca (Da Silva et al., 2019; von Randow et al., 2004). Asimismo, el clima global puede modificar la ET al incrementar la demanda atmosférica por vapor de agua (mayor ET) o mediante la reducción de la conductancia estomática de la vegetación en respuesta al aumento del CO₂ (menor ET) (IPCC, 2023). A pesar de la alta importancia de la ET amazónica como proceso clave del ciclo hidrológico, su medición y cuantificación aún representa un desafío (Baker et al., 2021; Martínez-Castro et al., 2025). En este artículo, se presentan avances en la cuantificación de la ET en la Amazonía peruana a partir de estimaciones del balance hídrico de cuencas hidrográficas, datos de la torre de flujo de Quistococha, productos de reanálisis y observaciones satelitales.

2. Datos

La ET fue estimada a partir de balances hídricos, productos globales y datos de torres de flujo. Un resumen de las componentes del balance hídrico, cuyo procedimiento es descrito en la sección "Balance hídrico para la estimación de ET", y los demás productos de ET son presentados en la Tabla 1.

Una de las fuentes de datos de ET corresponde a la torre de medición de flujos de Quistococha (PE-QFR), localizada en 3.83° S y 73.32° W, en un aguajal de

Iquitos (Griffis et al., 2020). Esta torre forma parte de la red FLUXNET/AmeriFlux y la obtención de ET es posible a partir de la técnica de covarianza de remolinos ("eddy covariance" en inglés). Los datos disponibles corresponden a los años 2018 y 2019, con una resolución temporal de una hora. Asimismo, se obtuvieron estimaciones de la ET a partir de productos globales, como el reanálisis ERA5Land (Muñoz-Sabater et al., 2021) y TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018); de sensores satelitales, como GLEAM (Miralles et al., 2024); y de productos híbridos que combinan observaciones de torres de flujo para escalarlas globalmente, como X-BASE (Nelson et al., 2024).

Tabla 1. Descripción de los conjuntos de datos disponibles para los análisis realizados en este manuscrito.

VARIABLE	PRODUCTO DE OBTENCIÓN	RESOLUCIÓN ESPACIAL	PERIODO DE DISPONIBILIDAD
Precipitación (P)	CHIRPS (Funk et al., 2015)	0.05°x0.05°	1981 – presente
	RAIN4PE (Fernandez-Palomino et al., 2022)	0.1°x0.1°	1981 – 2015
Almacenamiento de agua en el suelo (TWS) y dS/dt	GRACE JPL RL06M (Watkins et al., 2015)	0.5°x0.5°	2002 – presente
Escorrentía (R)	Derivado de datos de caudales mensuales en las estaciones de San Regis (cuenca del Marañón),	Representativo de una cuenca hidrográfica	1998 – 2019
	Requena (cuenca del Ucayali),		1996 – 2019
	Tamshiyacu (cuenca del Amazonas hasta Tamshiyacu)		1984 – 2019
	y Porto Velho (cuenca del Madeira)		1967 – 2019
Evapotranspiración (ET)	ERA5Land (Muñoz-Sabater et al., 2021)	0.1°x0.1°	1940 – presente (se analizó el periodo 2002-2019)
	TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018)	4 km x 4 km	1958 – 2024 (se analizó el periodo 2002-2019)
	FLUXCOM X-BASE (Nelson et al., 2024)	0.05° x 0.05°	2001 – 2020 (se analizó el periodo 2002-2019)
	Torre de flujos de FLUXNET en el bosque de Quistococha (PE-QFR, (Griffis et al., 2020)	Puntual, representativo de un bosque de guajales (Quistococha)	2018 – 2019
	Derivado de la ecuación de balance hídrico (este estudio)	Representativo de una cuenca hidrográfica	2002 – 2019 cuando se utilizó CHIRPS 2002 – 2015 cuando se utilizó RAIN4PE

Balance hídrico para la estimación de ET

Se estimó la ET a partir del balance hídrico en las cuencas de los ríos Maraón, Ucayali, Madeira y río Amazonas hasta Tamshiyacu, todas representativas de la cuenca amazónica sur-occidental (ver Figura 1). Estas poseen superficies de 358 358, 361 407, 1 009 620 y 71 765 km², respectivamente. La cuenca del río Amazonas hasta Tamshiyacu se considera como “suma” de las cuencas del río Maraón y Ucayali.

El cálculo de la ET mensual se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$ET = P - R - dS/dt \text{ [mm/mes]}$$

Donde, P corresponde a la precipitación media sobre cada cuenca, derivada de estimaciones satelitales de P (CHIRPS o RAIN4PE). La escorrentía (R) se obtuvo a partir de mediciones de caudal en las estaciones de San Regis, Requena, Tamshiyacu y Porto Velho, representativas de las cuencas del Maraón, Ucayali, Amazonas hasta Tamshiyacu y Madeira, respectivamente. Dichos datos son administrados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Autoridad Nacional de Aguas de Brasil.

Para transformar los caudales (m³/s) a R (mm/mes), los valores fueron divididos entre el área de la cuenca en m², multiplicados por el número de segundos del mes y por 1 000 para convertir a mm.

La tendencia temporal dS/dt del agua almacenada en el suelo (S) se estimó a partir del almacenamiento total del agua (TWS) provisto por el dataset GRACE JPL RLO6M (Watkins et al., 2015), tomando los datos de TWS de GRACE como S , aplicando diferencias finitas centradas: $[dS/dt = (TWS_{t+1} - TWS_{t-1}) / 2dt]$. Anteriormente, los valores de S fueron remuestreados a paso mensual con splines lineales, dado que las observaciones de GRACE no presentan intervalos de tiempo homogéneos. Cuando no hubo datos por más de 2 meses consecutivos, no se realizó el remuestreo. Finalmente, se le pasó un filtro 1-2-1 para reducir el ruido asociado a la derivada numérica.

La serie de datos de GRACE cubre el periodo comprendido entre junio del 2002 y julio del 2019, coincidiendo con el último registro disponible de R .

Como medida de incertidumbre, la ET se estimó utilizando dos fuentes de datos distintos de P (CHIRPS y RAIN4PE), manteniendo los mismos *datasets* para R y dS/dt , al ser los únicos disponibles hasta el momento. Los balances hídricos que resultaron en valores ET negativos fueron forzados a 0, lo cual refleja las incertidumbres observacionales, y se descartaron los meses en los cuales faltó algún componente del balance en particular.

3. Resultados preliminares

De acuerdo a las estimaciones del balance hídrico, la ET en las cuencas de los ríos Maraón 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).

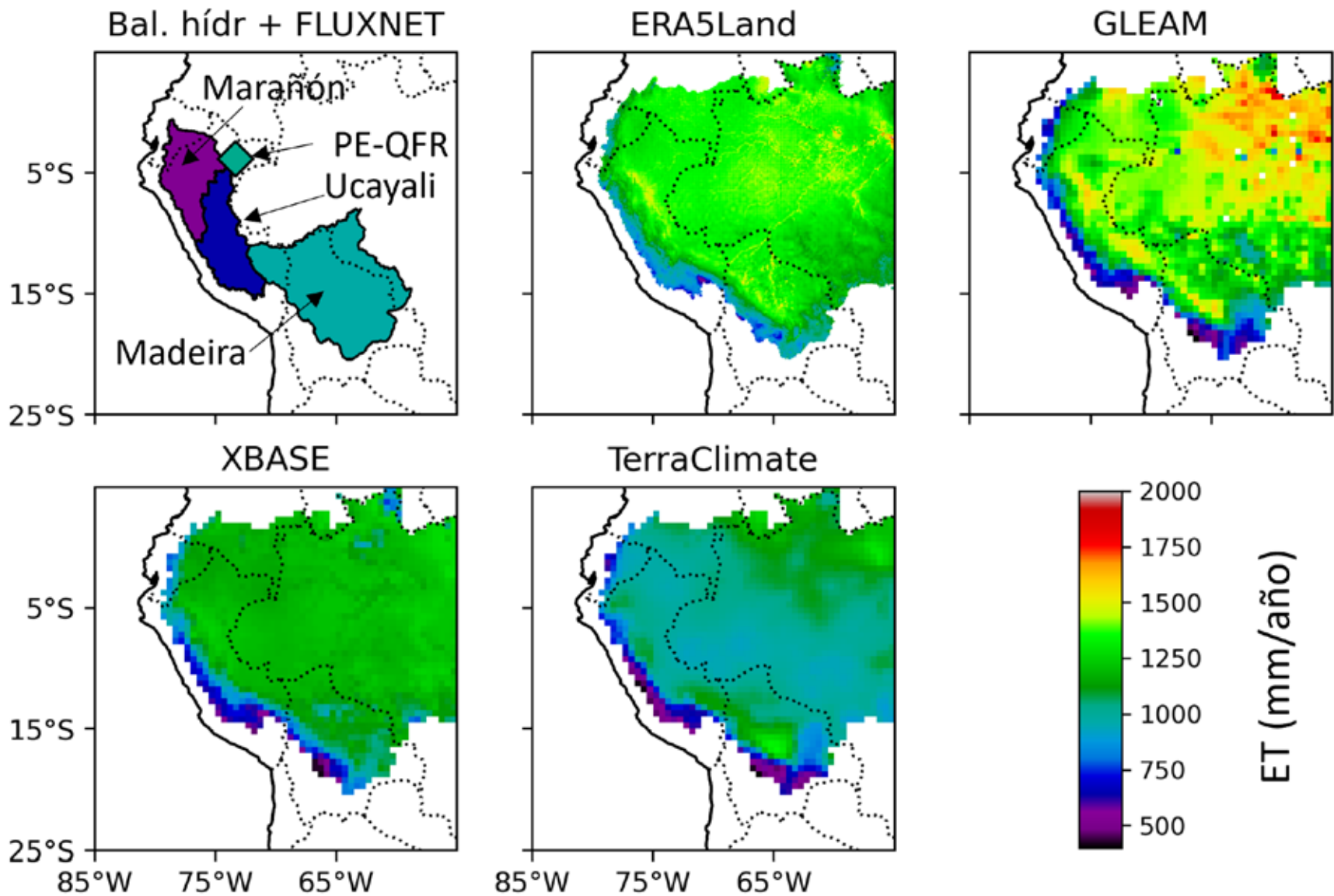


Figura 1. Distribución espacial de la ET media anual en la cuenca amazónica. El panel superior izquierdo muestra la ET media anual estimada a partir del balance hídrico en las 3 cuencas analizadas, así como la media de la ET disponible en la torre de Quistococha (PE-QFR; diamante). También se presentan las estimaciones de ET simuladas por ERA5Land, GLEAM, XBASE y TerraClimate (productos grillados de reanálisis y satélites).

Al examinar con mayor detalle las componentes del balance hídrico, se observa que la ET no presenta un ciclo anual tan pronunciado como otras variables, tales como P y dS/dt (Figura 2). Además, el ciclo anual de R muestra un leve retraso respecto al de P, mientras que dS/dt exhibe un comportamiento opuesto. Esta combinación hace que la ET mantenga un ciclo estacional relativamente estable en comparación con las demás componentes.

Se resalta el rol de dS/dt en la conservación de niveles mínimos y en la persistencia de un segundo pico estacional de ET en los meses de setiembre a noviembre. Por otro lado, la elección de distintas bases de datos de P, como CHIRPS y RAIN4PE, producen variaciones en la climatología media de ET de 53 %, 67 % y 74 % para las cuencas de Ucayali, del Amazonas hasta Tamshiyacu y Marañón, respectivamente. Estas diferencias se amplifican durante el periodo lluvioso, cuando la ET derivada de RAIN4PE puede duplicar a la estimada con CHIRPS.

Se observan amplios errores estándar del promedio en componentes como dS/dt y, en particular, en la ET: los coeficientes de variación estándar mensuales para la ET estimada a partir de CHIRPS en las cuencas del Madeira, Marañón, Ucayali y Amazonas hasta Tamshiyacu están en el rango de 12-47 %, 27-131 %, 27-76 % y 23-107 %, respectivamente.

Aunque RAIN4PE un periodo temporal más corto (hasta el 2016) en comparación del balance hídrico realizado con CHIRPS (que está limitado hasta el 2019 por los datos de R), los errores estándar son iguales o menores para algunos meses, generalmente durante aquellos con menor ET en CHIRPS. Esto podría explicarse porque RAIN4PE representa valores más altos de P que CHIRPS, dichos meses de mínimas estacionales de ET no alcanzan balances hídricos negativos y, en consecuencia, reduce la desviación estándar al no requerir forzar los valores de ET a 0.

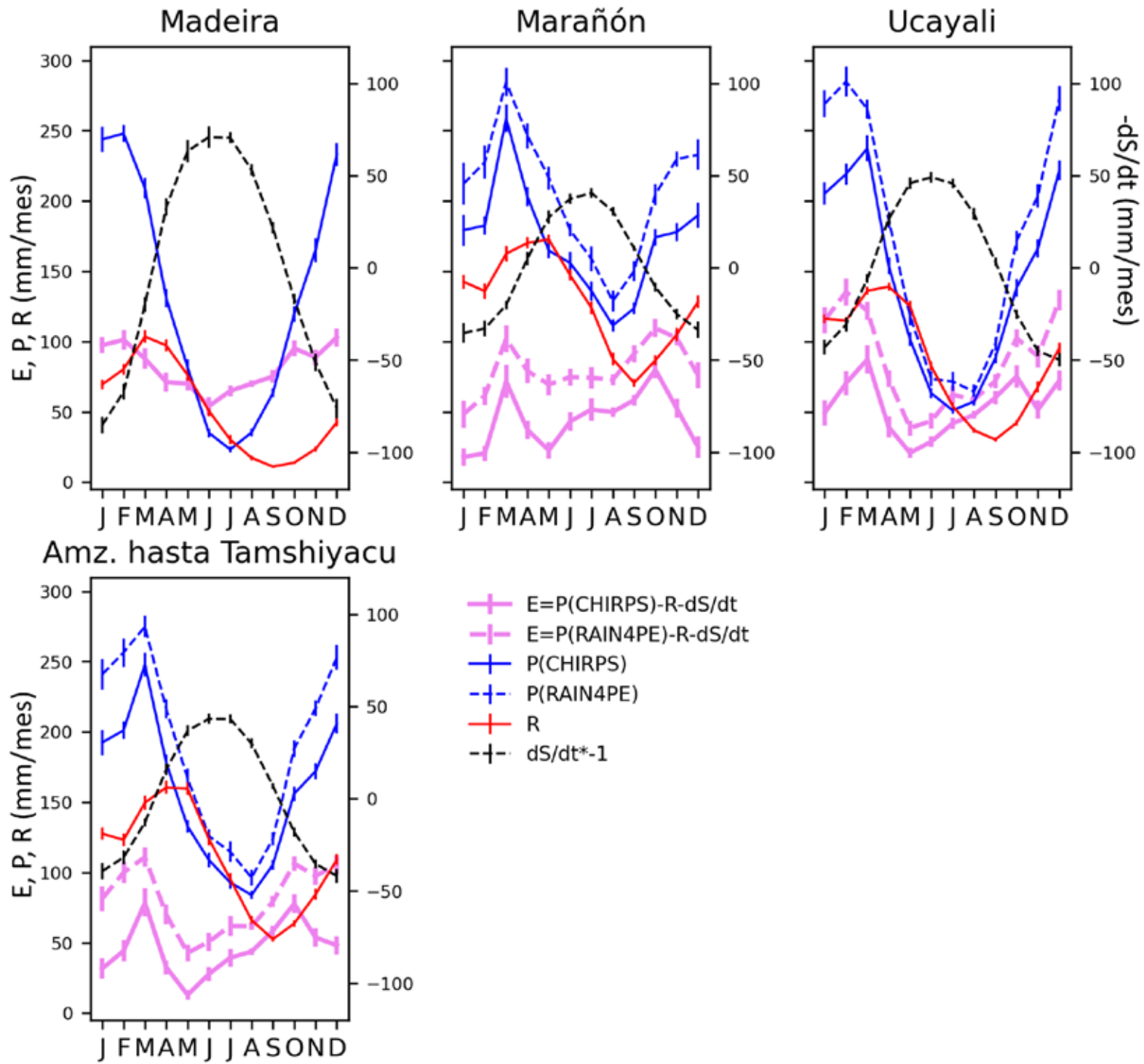


Figura 2. Ciclos anuales de la ET estimada mediante balance hídrico utilizando CHIRPS (línea rosa sólida) y balance hídrico con RAIN4PE en lugar de CHIRPS (línea rosa rayada). Se muestran también la P de CHIRPS (línea azul sólida), la P de RAIN4PE (línea azul discontinua), la R por cada cuenca (línea roja) y el dS/dt multiplicado por menos 1 (línea negra, eje derecho de cada subplot). Nótese que para la cuenca de Madeira no se dispone de P ni de ET derivadas de RAIN4PE, dado que este producto no cubre la totalidad de dicha región. Las barras representan al error estándar del promedio multianual ($SE = \sigma / \sqrt{N}$, σ = desviación estándar muestral).

Así, la elección de la base de datos de P para derivar ET a partir de balances hídricos resulta particularmente relevante al momento de validar la ET derivadas de reanálisis, y productos grillados de reanálisis y satélites (Figura 3). A escala de cuencas hidrográficas, las estimaciones de los productos grillados tienden a sobreestimar la ET en comparación con la derivada del balance hídrico. En la cuenca de Madeira, la ET estimadas de productos grillados de reanálisis y satélites reproducen adecuadamente la forma del ciclo estacional, con un máximo durante el periodo lluvioso y un mínimo en el periodo seco, consistente también con la ET derivada del balance hídrico.

Por su parte, la estacionalidad de la ET derivada del balance hídrico en las cuencas del Ucayali y del Amazonas hasta Tamshiyacu muestra un adelanto de 1-2 meses respecto de los demás productos. En cambio, en la cuenca del Marañón —y particularmente en la torre de flujo de Quistococha— todas las formas de estimación de ET mantienen una estacionalidad similar, aunque con diferencias cuantitativas y de fase. En el caso particular de Quistococha, XBASE y TerraClimate tienden a parecerse más entre sí. Sin embargo, para el resto de cuencas la alta incertidumbre debido a la opción del producto de P en la estimación de ET por balance hídrico dificulta esta validación y su evaluación cuantitativa.

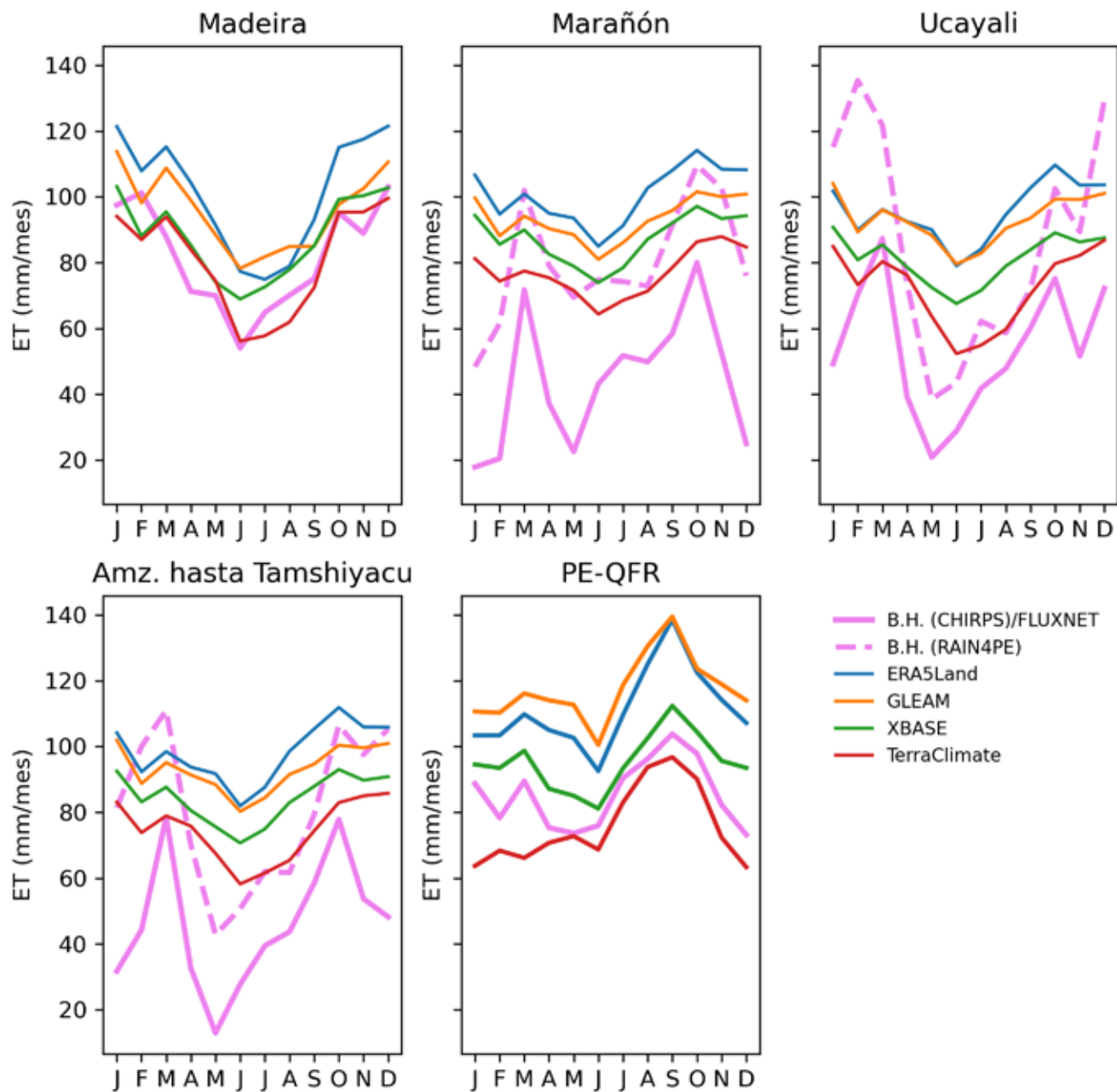


Figura 3 Ciclos anuales de la ET (mm/mes) estimada por balance hídrico (CHIRPS) y los datos de FLUXNET para PE-QFR (línea rosa), balance hídrico, pero con RAIN4PE en vez de CHIRPS (línea rosa discontinua) y ET de reanálisis, productos grillados de reanálisis y satélites (líneas sólidas de otros colores). Las estimaciones para PE-QFR (2018-19) por parte de modelos y productos grillados fueron hechos para el punto de grilla más cercano a 3.83°S y 73.32°W. Nótese que para el Madeira no se dispone de ET derivado de RAIN4PE ya que este producto no cubre la totalidad de dicha cuenca.

Conclusiones preliminares

La ET estimada en las cuencas del Marañón, Ucayali y Madeira en productos grillados de reanálisis y satélites presenta deficiencias cuantitativas en la representación del ciclo estacional, en comparación con la ET derivada de balances hídricos.

No obstante, la estimación de la ET por balances hídricos en la Amazonía occidental depende significativamente de la elección de las fuentes de datos originales del balance hídrico (P, R y dS/dt). Particularmente, el reemplazo del conjunto de datos de precipitación CHIRPS por RAIN4PE genera aumentos en la cantidad de ET media anual entre el 53 % al 74 % en las 3 cuencas analizadas. Estas incertidumbres constituyen un insumo relevante para la validación de futuras simulaciones de la hidrología y el sistema tierra acoplado en la Amazonía.

Asimismo, en dichas simulaciones y en los productos analizados, se prevé investigar la variabilidad interanual y las tendencias de largo plazo, particularmente durante eventos de sequías, dado que su relevancia para sostener la precipitación en la región amazónica occidental. Para este propósito, sería fundamental evaluar en qué medida la ET está limitada por la disponibilidad de agua o por la radiación, considerando que ambos factores se reconocen como controladores clave de la dinámica temporal de la ET en los ecosistemas amazónicos (Seneviratne et al., 2010; Zanin et al., 2024).

Referencias

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5(1), Article 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Baker, J. C. A., Garcia-Carreras, L., Gloor, M., Marsham, J. H., Buermann, W., Da Rocha, H. R., Nobre, A. D., De Araujo, A. C., & Spracklen, D. V. (2021). Evapotranspiration in the Amazon: Spatial patterns, seasonality, and recent trends in observations, reanalysis, and climate models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(4), 2279-2300. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2279-2021>
- Da Silva, H. J. F., Gonçalves, W. A., & Bezerra, B. G. (2019). Comparative analyzes and use of evapotranspiration obtained through remote sensing to identify deforested areas in the Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.015>
- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2022). A Novel High-Resolution Gridded Precipitation Dataset for Peruvian and Ecuadorian Watersheds: Development and Hydrological Evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23(3), 309-336. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0285.1>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), Article 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Griffis, T. J., Roman, D. T., Wood, J. D., Deventer, J., Fachin, L., Rengifo, J., Del Castillo, D., Lilleskov, E., Kolka, R., Chimner, R. A., del Aguila-Pasquel, J., Wayson, C., Hergoualc'h, K., Baker, J. M., Cadillo-Quiroz, H., & Ricciuto, D. M. (2020). Hydrometeorological sensitivities of net ecosystem carbon dioxide and methane exchange of an Amazonian palm swamp peatland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 295, 108167. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108167>
- Intergovernmental Panel on Climate Change - [IPCC]. (2023). Summary for Policymakers. En Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., & Zhou, B. (Eds.), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3-32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Martinez-Castro, D., Takahashi, K., Espinoza, J.-C., Vichot-Llano, A., Andrade, M. O., & Silva-Vidal, F. Y. (2025). Extreme Droughts in the Peruvian Amazon Region (2000-2024). *Water*, 17(12), 1744. <https://doi.org/10.20944/preprints2025041451.v1>
- Miralles, D. G., Bonte, O., Koppa, A., Villanueva, O. B., Tronquo, E., Zhong, F., Beck, H. E., Hulsman, P., Dorigo, W., Verhoest, N. E. C., & Haghdoost, S. (2025). GLEAM4: Global land evaporation dataset at 0.1° resolution from 1980 to near present. *Scientific Data*, 12(1), Article 416. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04610-y>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349-4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Nelson, J. A., Walther, S., Gans, F., Kraft, B., Weber, U., Novick, K., Buchmann, N., Migliavacca, M., Wohlfahrt, G., Šigut, L., Ibrom, A., Papale, D., Göckede, M., Duveiller, G., Knohl, A., Hörtnagl, L., Scott, R. L., Dušek, J., Zhang, W., , ... Jung, M. (2024). X-BASE: The first terrestrial carbon and water flux products from an extended data-driven scaling framework, FLUXCOM-X. *Biogeosciences*, 21(22), 5079-5115. <https://doi.org/10.5194/bg-21-5079-2024>
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A. J.

(2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4), 125-161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>

Staal, A., Tuinenburg, O. A., Bosmans, J. H. C., Holmgren, M., Van Nes, E. H., Scheffer, M., Zemp, D. C., & Dekker, S. C. (2018). Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8(6), 539-543. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>

Von Randow, C., Manzi, A. O., Kruijt, B., de Oliveira, P. J., Zanchi, F. B., Silva, R. L., Hodnett, M. G., Gash, J. H. C., Elbers, J. A., Waterloo, M. J., Cardoso, F. L., & Kabat, P. (2004). Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1-3), 5-26. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0041-z>

Watkins, M. M., Wiese, D. N., Yuan, D.-N., Boening, C., & Landerer, F. W. (2015). Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(4), 2648-2671. <https://doi.org/10.1002/2014JB011547>

Zanin, P. R., Pareja-Quispe, D., & Espinoza, J.-C. (2024). Evapotranspiration in the Amazon Basin: Couplings, hydrological memory and water feedback. *Agricultural and Forest Meteorology*, 352, Article 110040. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110040>

Zemp, D. C., Schleussner, C.-F., Barbosa, H. M. J., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., Wang-Erlandsson, L., & Rammig, A. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications*, 8(1), Article 14681. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>

Zemp, D. C., Schleussner, C.-F., Barbosa, H. M. J., van der Ent, R. J., Donges, J. F., Heinke, J., Sampaio, G., & Rammig, A. (2014). On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23), 13337-13359. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13337-2014>