

LAS SEQUÍAS EXTREMAS EN LA AMAZONÍA PERUANA (2000-2024)

Daniel Martínez-Castro¹, Ken Takahashi¹, Jhan-Carlo Espinoza^{2,3}, Alejandro Vichot-Llano^{4,5}, Miguel Octavio Andrade¹ y Yamina Silva Vidal¹

¹ Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú

² Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE, UMR 5001), Grenoble, Francia

³ Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

⁴ Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

⁵ CMCC Foundation—Euro-Mediterranean Center on Climate Change, Lecce, Italia



Físico por la Universidad de La Habana (1976) y PhD en Ciencias Físicas por la Academia de Ciencias de Cuba. Realizó estancias de investigación en Rusia y en el IFA-CNR de Roma. Trabajó casi cuatro décadas en el Instituto de Meteorología de Cuba. Entre 2020 y 2023 fue subdirector de Gestión del Conocimiento y Fortalecimiento de Capacidades en el Instituto Nacional de Investigaciones en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). Asimismo, fue autor líder del Grupo de Trabajo I para la redacción del Sexto Informe de Evaluación del IPCC. Actualmente es investigador asociado en el Instituto Geofísico del Perú.

Palabras clave: Amazonía peruana; precipitación; evapotranspiración; sequía; déficit hídrico acumulado máximo

Citar como Martínez-Castro, D., Takahashi, K., Espinoza, J-C, Vichot-Llano, A., Andrade, M., & Silva Vidal, Y. (2025). Las sequías extremas en la Amazonía peruana (2000-2024). Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.º 12, págs. 04-13.

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

Esta investigación identifica las sequías más intensas que afectaron a la Amazonía entre 2000 y 2024, y señala qué zonas estuvieron expuestas al estrés por falta de agua. El estudio compara tres fuentes de información sobre lluvias y evapotranspiración para evaluar su consistencia. También muestra que, durante la estación seca, la falta de lluvias y la alta demanda de energía se asocian con un aumento del estrés hídrico del bosque amazónico, al limitar su capacidad de regular la temperatura y sostener funciones esenciales. Estos resultados permiten estimar con mayor precisión la severidad de las sequías y respaldar los sistemas de seguimiento y alerta. En conjunto, ayudan a que los tomadores de decisiones usen mejor la información científica y refuercen medidas de adaptación y manejo del agua frente a riesgos crecientes.

Resumen

Se prevé que las sequías en la región amazónica aumenten en frecuencia e intensidad, afectando negativamente al bosque tropical y potencialmente desencadenando un círculo vicioso entre el clima y el bosque que podría llevar al colapso del ecosistema. En este estudio, se identificaron condiciones de sequía extrema en la Amazonía peruana durante el período 2000-2024 mediante el índice de déficit hídrico acumulado máximo (DHCM), relacionado con el estrés hídrico del bosque tropical. Se utilizaron los conjuntos de datos ERA5, CHIRPS y MSWEP para estimar la precipitación, y el ERA5 para la

evapotranspiración. El análisis se centra en las características específicas de las sequías y en las diferencias entre seis áreas de estudio: tres en Loreto, una centrada en la ciudad de Moyobamba, otra en Ucayali y una en Madre de Dios. Se observó que los eventos de sequía son más frecuentes e intensos en las regiones central y sur de la cuenca amazónica peruana. Con base en la severidad regional y la extensión espacial, estimada a partir del promedio de datos de precipitación y las áreas de estudio utilizadas, identificamos los años hidrológicos 2023-24, 2022-23, 2009-10 y 2004-05 como sequías extremas, y 2015-16 y 2006-07 como sequías moderadas.

1. Introducción

Las sequías amazónicas han ganado frecuencia e intensidad durante las últimas décadas, con impactos que abarcan desde el estrés hídrico de los bosques tropicales y la mortalidad arbórea, hasta disrupciones en el transporte fluvial, la pesca y la salud pública (Marengo et al., 2016; Jiménez et al., 2019; Papastefanou et al., 2022). En el caso peruano, la Amazonía occidental interactúa estrechamente con la zona de transición Andes–Amazonía y con el Sistema de Monzones de Sudamérica (SAMS, por sus siglas en inglés). Esta combinación singular de forzantes atmosféricos y orográficos modula la estacionalidad de lluvias, los déficits hídricos y la sensibilidad de los ecosistemas frente a anomalías de gran escala (p. ej., El Niño Oscilación Sur (ENOS), los dipolos atlánticos, la variabilidad interestacional).

En este artículo se evalúan las sequías extremas en la Amazonía peruana entre 2000 y 2024 mediante el índice MCWD (*Maximum Cumulative Water Deficit*), ampliamente utilizado como un proxy del estrés hídrico de la vegetación tropical al integrar la persistencia del déficit mensual de precipitación respecto de la evapotranspiración (Et). Se emplean estimaciones de precipitación de CHIRPS, MSWEP y ERA5, así como evapotranspiración de ERA5. Además, se incorporan datos de radiación y flujos superficiales para interpretar el acoplamiento superficie atmósfera y las condiciones de oferta/limitación de energía y agua en el sistema monzónico de América del Sur.

Los objetivos principales son detectar y comparar las sequías extremas en seis subregiones. También se evalúa la sensibilidad del MCWD frente a la fuente de precipitación y al tratamiento de Et. Asimismo, se analiza su relación de este índice con los flujos estacionales de energía radiación de onda corta entrante, calor sensible y calor latente, que regulan la demanda evaporativa. Estos objetivos permiten vincular la caracterización de las sequías con la dinámica climática regional descrita previamente y evaluar en qué medida las anomalías de gran escala amplifican la severidad de los déficits hídricos. Así, el análisis aporta una base para entender la variabilidad espacial y temporal de las sequías en un sistema altamente sensible a los factores climáticos que influyen en el monzón de Sudamérica.

En este trabajo, se sintetizan los hallazgos principales del artículo “Extreme Droughts in the Peruvian Amazon Region (2000–2024)” (Martínez-Castro et al., 2025), publicado en la revista *Water*. El trabajo caracteriza la ocurrencia, severidad, extensión y evolución de las sequías extremas en la Amazonía peruana a lo largo de 25 años, integrando observaciones *in situ*, productos satelitales y reanálisis climáticos, y utilizando un índice de sequía. Su propósito es identificar las principales sequías que han afectado a la Amazonía peruana en el siglo XXI y ofrecer una visión sobre su dinámica y sus forzantes de gran escala. El enfoque multiproducto y multi-índice permite evaluar con robustez la severidad de los déficits hídricos.

Tabla 1. Fuentes de los datos y variables utilizadas

Fuente	URL	Variable	Unidades
ERA5	https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview accesada el 6 de febrero, 2025;	Precipitación Pr (total precipitation tp en ERA5)	mm
		Evapotranspiración Et (Evaporation, e en ERA5)	mm en equivalente de agua
		Surface shortwave radiation downwards en ERA5 (ssrd)	W/m ²
CHIRPS	https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/grid-dap/chirps20GlobalDailyP05_Lon0360.html accesada el 6 de febrero, 2025;	Precipitación	mm
MSWEP	https://www.gloh2o.org/mswep/ accesada el 6 de febrero, 2025;	Precipitación	mm

2. Metodología

2.1 Datos y variables

Para estimar la precipitación se emplearon las bases de datos CHIRPS, MSWEP y ERA5 mensual, productos ampliamente usados en la Amazonía y evaluados favorablemente en trabajos previos (Paccini et al., 2018; Espinoza et al., 2019). MSWEP que combina información proveniente de pluviómetros, satélites y reanálisis, con una resolución 0.1°/3 h (Beck et al., 2017). Por su parte, CHIRPS integra estimaciones satelitales combinadas con estaciones meteorológicas (Funk et al., 2015). ERA5 (Hersbach et al., 2020) aporta, además, variables relacionadas con la radiación solar. La Tabla 1 muestra un resumen de las fuentes, URL, variables y unidades utilizadas.

2.2 Áreas de estudio

La región de estudio se ubica aproximadamente entre 16° S–1° N y 82°–68° O. Al oeste la delimitan los Andes (4 000–5 000 m s. n. m.) y al este/norte/sur coinciden con los límites del territorio peruano. En las estribaciones andinas, entre 400 y 700 m s. n. m., se identifican *hotspots* de lluvia que alcanzan hasta 4 000 mm anuales, favorecidas por el chorro de bajos niveles de Sudamérica (CBNSA) (Espinoza et al., 2015; Chávez et al., 2016). La estación húmeda en la Amazonía centro-sur ocurre entre diciembre y marzo, mientras que la estación seca se presenta entre junio y septiembre. Para la cuenca del Amazonas, la hidrografía adopta un año hidrológico de septiembre a agosto, con estiaje en septiembre y máximos en abril–mayo (Espinoza et al., 2011).

Se analizaron seis subregiones representativas: tres en Loreto (LOR1, LOR2, LOR3), una en Moyobamba (MOY, zona de transición Andes–Amazonía), otra en Ucayali (UCA) y una en Madre de Dios (MD). Estas subregiones capturan gradientes latitudinales y orográficos, distintos regímenes de lluvias (norte, más influido por la ZCIT; sur, más monzónico y orográfico) y diferentes sensibilidades a sequías extremas.

2.3 Cálculo de déficit hídrico y del índice de sequía MCWD

El déficit mensual de agua (WD) se define como diferencia entre precipitación (Pr) y evapotranspiración (Et). Este déficit se acumula intermensualmente aplicando una función de recorte de tipo Heaviside, que

impide la acumulación cuando el balance mensual es positivo. El resultado es el CWD (Cumulative Water Deficit). El MCWD corresponde al valor mínimo (más negativo) del CWD dentro de un período, usualmente anual o de transición de estación húmeda a seca y representa la intensidad máxima del estrés hídrico para la vegetación (Aragão et al., 2018; Malhi et al., 2008; Malhi et al., 2009).

En este trabajo, el MCWD se calcula combinando la Et de ERA5 con cada una de las tres fuentes de Pr (CHIRPS, MSWEP, ERA5). Esta aproximación permite comparar la sensibilidad del índice frente a las distintas fuentes de precipitación y evaluar la consistencia espacio-temporal entre los productos utilizados.

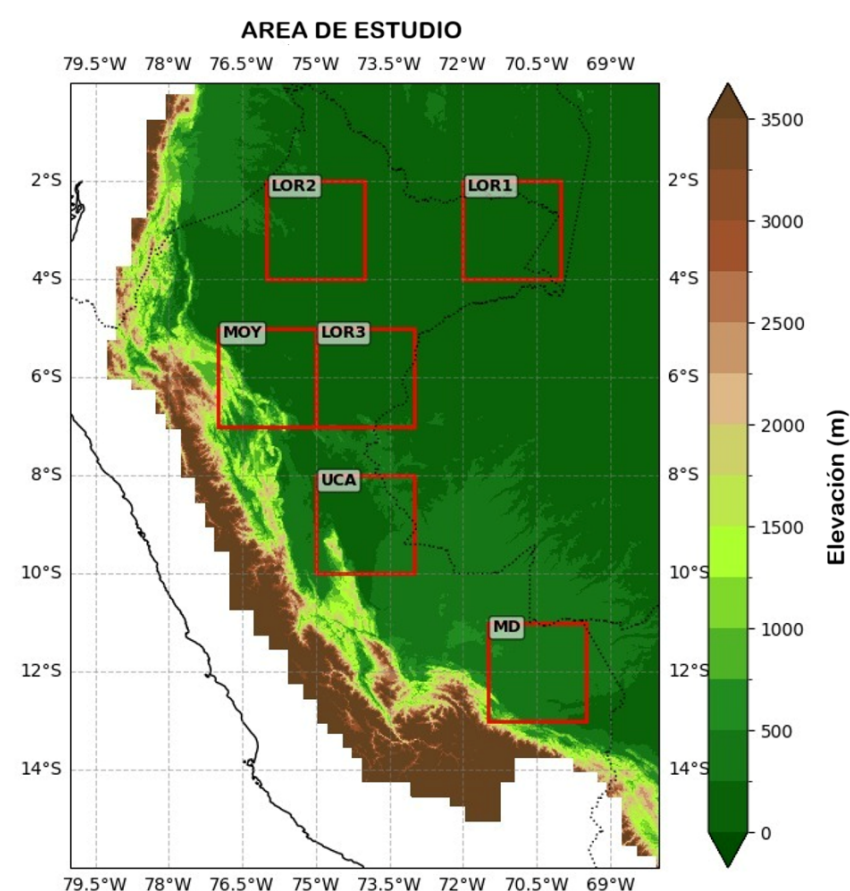


Figura 1. Ubicación de las seis áreas de estudio en la Amazonía peruana, y relieve.

3. Resultados

3.1 Sequías extremas identificadas (2000–2024)

La Figura 2 muestra el promedio anual de MCWD para cada conjunto de datos, considerando las seis áreas de estudio. Los años hidrológicos con mayor promedio de MCWD difieren entre todos los conjuntos de datos. En ERA5 (Figura 2A), considerando los cuatro valores más altos de MCWD para cada conjunto de datos, el promedio más alto de MCWD corresponde a los años 2023–24, 2022–23, 2015–2016 y 2009–2010. En MSWEP (Figura 2B), destacan los

años 2023–24, 2004–05, 2009–10 y 2006–07. En CHIRPS (Figura 2C), los mayores valores de MCWD corresponden a los años 2022–23, 2006–07, 2004–05 y 2023–24. El único año coincidente entre los tres productos fue 2023–24.

Con el fin de establecer un criterio general, se promediaron los valores de MCWD obtenidos de los tres conjuntos de datos de observación, generando la distribución que se muestra en la Figura 2D. La Tabla 2 resume estos resultados: la columna 1 lista los años hidrológicos ordenados de mayor a menor; las columnas 2 a 4 muestran los valores individuales para cada uno de los conjuntos de datos; y la columna 5 presenta el valor promedio de MCWD correspondiente para cada año.

Para clasificar la severidad de las sequías, se utilizaron las estadísticas del MCWD promedio, cuyo valor medio es 53,8 mm y su desviación estándar es 22,6 mm. Con este criterio, se consideran sequías extremas (Tabla 2, en caracteres rojos) los años con valores promedio de MCWD más altos (Figura 2D), 2023–24, 2022–23, 2009–10 y 2004–05, pues sus valores superan la media más una desviación estándar. Asimismo, los años 2006–07 y 2015–16, con MCWD por debajo de este valor, pero por encima del percentil 70, se clasifican como sequías moderadas para la Amazonía peruana (Tabla 2, en caracteres naranjas).

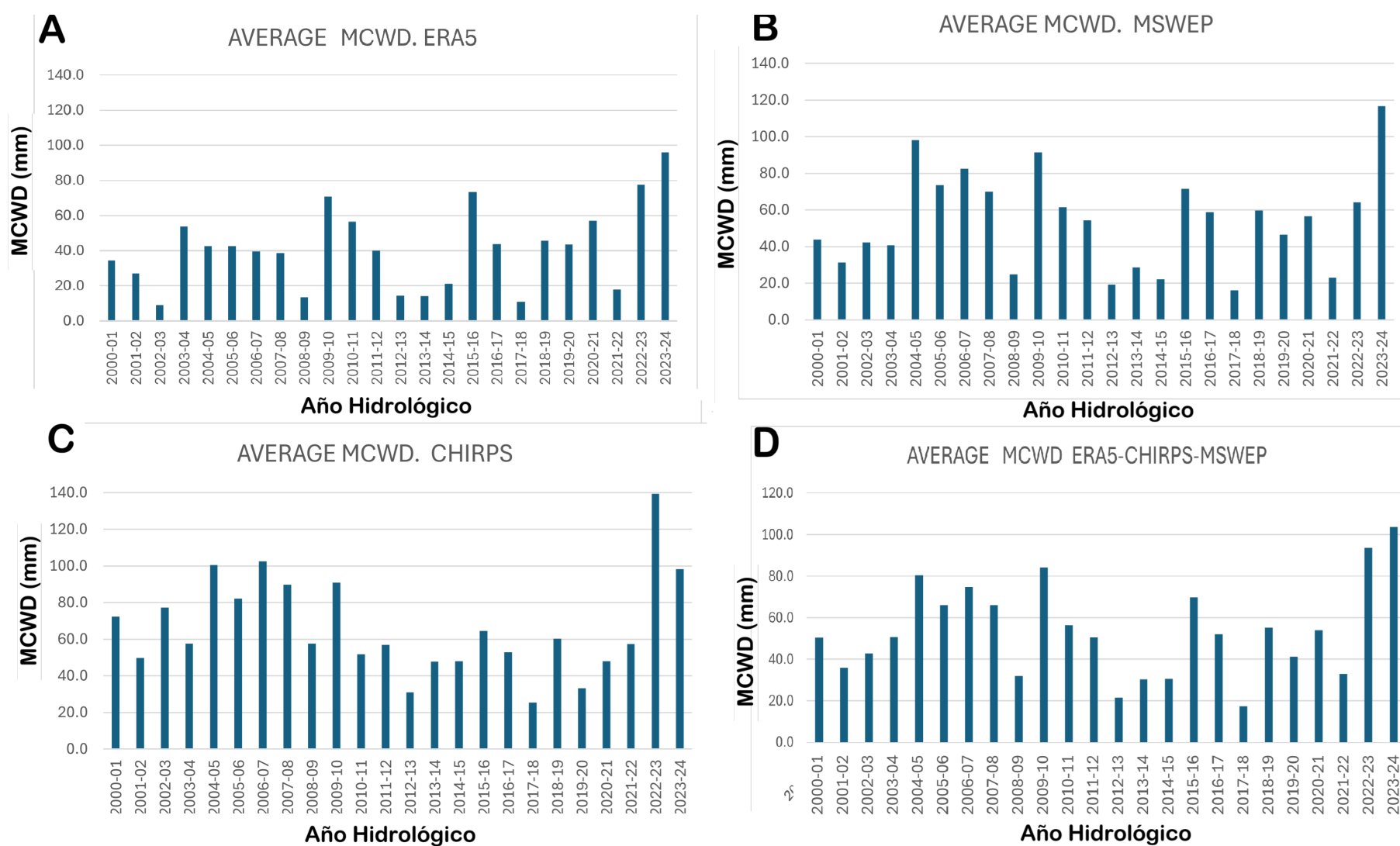


Figura 2. Promedio anual de MCWD de las seis áreas de estudio (Figura 1; Tabla 2) para los años hidrológicos del período 2000–2024. (A) Precipitación y evaporación de ERA5. (B) Precipitación de MSWEP y evaporación de ERA5. (C) Precipitación de CHIRPS y evaporación de ERA5. (D) Promedio de los tres conjuntos de datos.

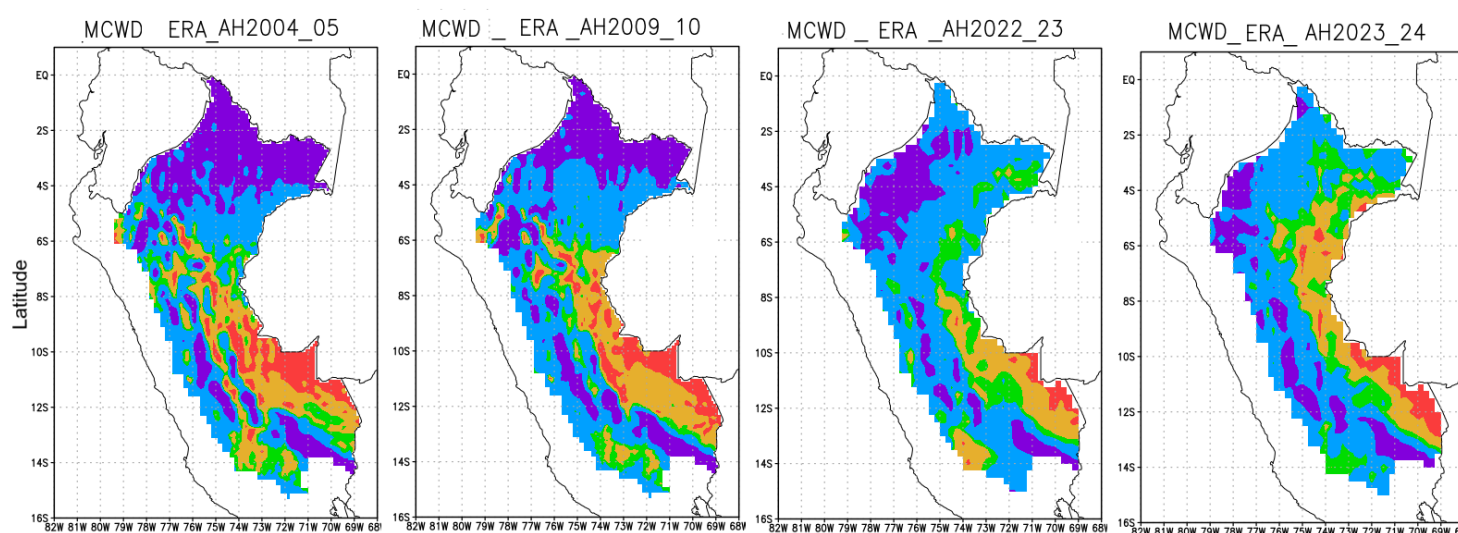
Tabla 2. Valores anuales de MCWD por producto y promedio (años hidrológicos 2000–2024)

1	2	3	4	5
Año hidrológico	ERA5	MSWEP	CHIRPS	Promedio
2023-24	96.0	116.8	98.2	103.7
2022-23	77.3	64.2	139.3	93.6
2009-10	70.6	91.5	90.8	84.3
2004-05	42.6	98.1	100.4	80.4
2006-07	39.6	82.5	102.5	74.8
2015-16	73.3	71.5	64.6	69.8
2005-06	42.6	73.4	82.1	66.0
2007-08	38.4	69.9	89.8	66.0
2010-11	56.4	61.5	51.8	56.5
2018-19	45.6	59.8	60.2	55.2
2020-21	56.8	56.6	48.0	53.8
2016-17	43.9	58.8	52.8	51.9
2003-04	53.7	40.6	57.5	50.6
2011-12	40.0	54.4	56.8	50.4
2000-01	34.5	43.9	72.4	50.2
2002-03	8.9	42.3	77.2	42.8
2019-20	43.8	46.5	33.1	41.1
2001-02	27.2	31.2	49.7	36.0
2021-22	17.6	23.0	57.3	32.6
2008-09	13.4	24.7	57.6	31.9
2014-15	21.2	22.2	47.9	30.4
2013-14	14.1	28.6	47.8	30.2
2012-13	14.4	19.3	30.9	21.5
2017-18	10.8	16.1	25.4	17.4

3.2 Flujos de energía y estacionalidad

Para interpretar la demanda evaporativa y la partición de energía, se analizaron los ciclos anuales de radiación de onda corta (ssr) y los flujos de calor

sensible y latente derivados de ERA5. Además, se empleó el índice de Bowen (slhf/sshf) para inferir si el sistema está limitado por energía o por disponibilidad de agua.



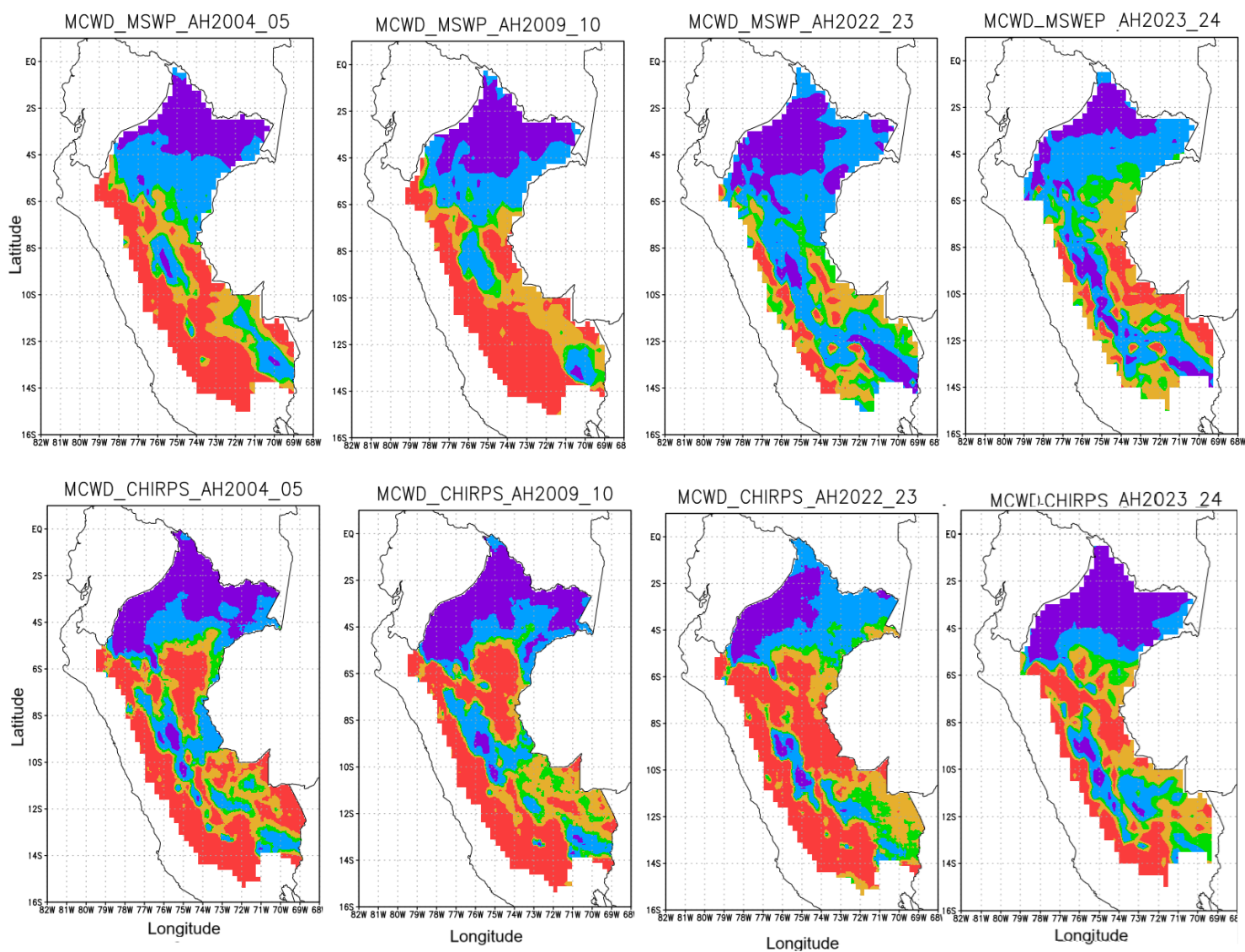


Figura 3. Distribución espacial de MCWD en la Amazonía peruana durante los años hidrológicos (AH) de sequía extrema, utilizando tres conjuntos de datos. Fila 1: Precipitación y evaporación: ERA5. Fila 2: Precipitación: MSWEP; evaporación: ERA5. Fila 3: Precipitación: CHIRPS; evaporación: ERA5. Columna 1: 2004-05. Columna 2: 2009-10. Columna 3: 2022-23. Columna 4: 2023-24.

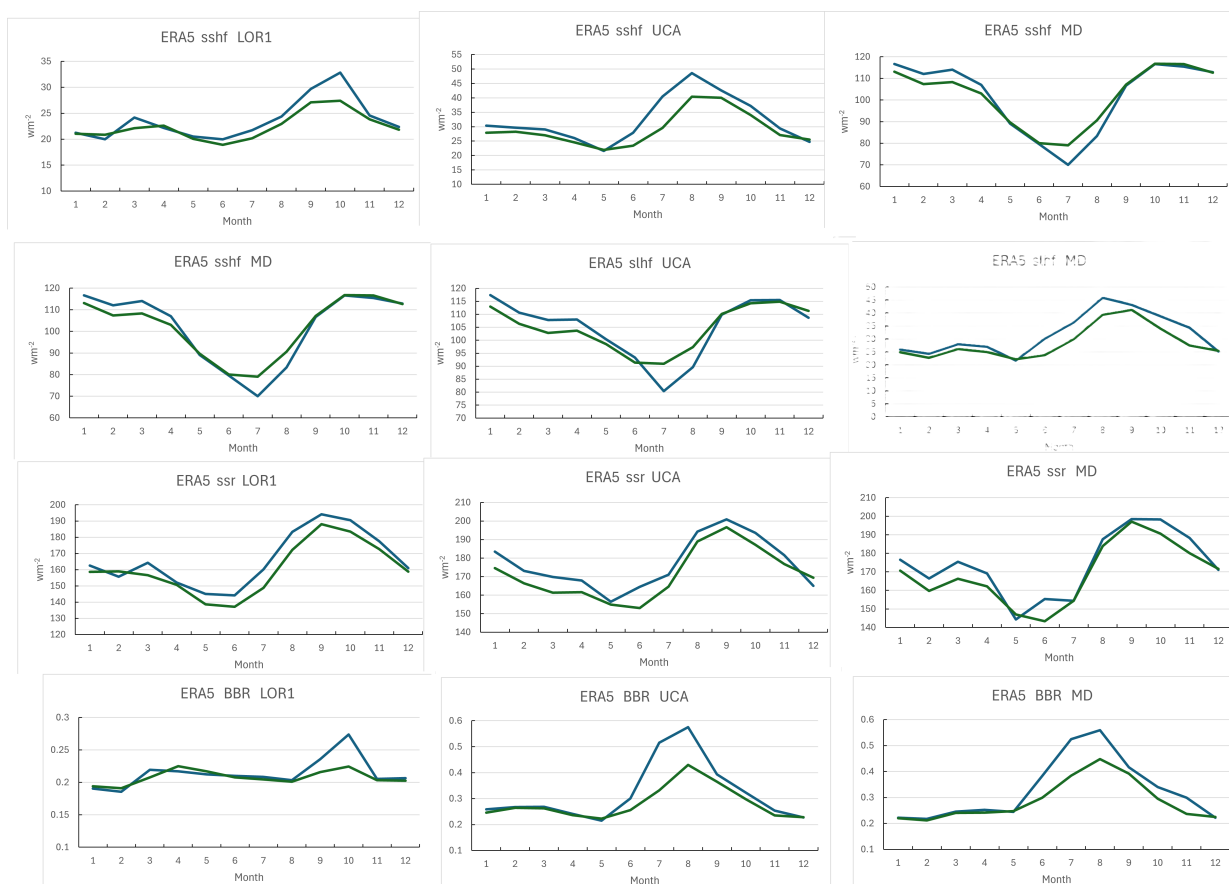


Figura 4. Ciclos anuales promedio de tres flujos de energía y la relación de Bowen global, a partir de datos ERA5 para LOR1, UCA y MD. Fila superior: flujo de calor sensible (sshf). Segunda fila: flujo de calor latente (slhf). Tercera fila: radiación solar neta superficial (ssr). Fila inferior: relación de Bowen global. Columna 1: LOR1. Columna 2: UCA. Columna 3: MD. Las curvas muestran los promedios durante sequía extrema (ED) y la climatología (CLIM).

3.3 Contrastes espaciales: norte vs. sur y transición Andes–Amazonía

LOR1–LOR3 muestran una fuerte modulación por la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y pulsos intraestacionales. En esta zona, las sequías se relacionan principalmente con anomalías en el transporte de humedad y con la persistencia de déficits mensuales durante la estación seca o con fases específicas de ENSO. En MOY, UCA y MD, el SAMS y los forzantes orográficos condicionan respuestas diferenciadas: una estación seca más larga y bien definida aumenta la probabilidad de valores muy negativos de MCWD cuando la estación húmeda se retrasa o cuando la demanda evaporativa se mantiene alta debido a la radiación y la temperatura. Los ciclos anuales de radiación y flujos muestran que, durante la estación seca, la energía disponible para evaporación aumenta; sin embargo, la limitada disponibilidad de agua del suelo reduce el flujo latente y aumenta el flujo sensible, elevando el índice de Bowen. Esta realimentación superficie–atmósfera intensifica el estrés hídrico y profundiza los valores negativos de CWD.

3.3 Rol de la estacionalidad y mecanismos físicos

Los ciclos estacionales revelan que, cuando la radiación aumenta de manera sostenida durante la estación seca, la demanda evaporativa se incrementa, pero la evaporación se ve restringida por la baja humedad del suelo y la limitada recarga asociada a lluvias deficitarias. En estas condiciones, el sistema desplaza más energía hacia el calor sensible, lo que eleva la temperatura del aire y de la superficie, y refuerza el déficit hídrico acumulado, favoreciendo valores más severos de MCWD (Malhi et al., 2002). Este acoplamiento tierra–atmósfera aparece consistentemente en MD y UCA; en MOY, la topografía y la interacción con brisas orográficas modulan la señal.

4. Discusiones

La identificación de 2023–2024 como un evento extremo coincide con reportes regionales recientes que documentan condiciones excepcionales de sequía y calor en la Amazonía, junto con un aumento en los días secos y la persistencia de déficits a escala estacional, asociados a forzantes oceánicos y atmosféricos, así como a señales de cambio de más largo plazo (Espinoza et al., 2024; Marengo et al., 2020; Marengo et al. 2024). En conjunto, estos hallazgos son consistentes con un mayor riesgo de estrés hídrico en el sur de la Amazonía peruana y en la región de transición Andes–Amazonía.

El uso simultáneo de CHIRPS, MSWEP y ERA5-Pr, junto con Et-ERA5, permite estimar la incertidumbre del MCWD y triangular evidencias cuando los productos muestran discrepancias. De ello se desprende una recomendación operativa: evitar depender de un único dataset para diagnosticar sequías extremas, especialmente en zonas de orografía compleja y evaluar la consistencia con variables de energía (ssrd, H, LE), que ayudan a contextualizar la demanda evaporativa.

La lectura conjunta de radiación, flujos y MCWD sugiere que la severidad de sequías extremas en la Amazonía peruana depende tanto de escasez de lluvia como de episodios de alta demanda energética. Esto perfila un ciclo de retroalimentación superficie–atmósfera comparable, en su lógica, a la descrita en regiones semiáridas, pero aquí actuando de manera estacional sobre el dosel amazónico y la franja de transición andina.

El uso del año hidrológico ayuda a capturar el mínimo anual del CWD, clave para diagnosticar el MCWD. En la Amazonía peruana, este calendario coincide con los ciclos del nivel del río y con la estación húmeda (DJFM), que recarga el sistema. Un inicio tardío de la estación húmeda o una finalización temprana de la misma tienden a profundizar el MCWD, incluso si la precipitación total anual no disminuye drásticamente, porque lo relevante es la persistencia temporal del déficit.

5. Conclusiones

- Sequías extremas recurrentes (2004–05, 2009–10, 2015–16, 2023–24) han afectado la Amazonía peruana en lo que va del siglo XXI, destacando la de 2023–24 por su severidad en la Amazonía peruana, en sintonía con otras regiones amazónicas.
- El déficit hídrico acumulativo máximo (MCWD) constituye un indicador útil del estrés hídrico de la vegetación tropical. No obstante, es sensible a la fuente de datos de precipitación y al tratamiento de evapotranspiración (Et). En particular, al utilizar Et-ERA5, la comparación entre diferentes conjuntos de datos de estas variables mejora la confiabilidad del diagnóstico y permite estimar rangos de incertidumbre relevantes para la toma de decisiones.
- Los ciclos de los flujos de energía superficial explican por qué ciertas subregiones —especialmente en las zonas de estudio de Ucayali, Madre De Dios y Moyobamba (UCA, MD y MOY)— exhiben condiciones de mayor de MCWD cuando la estación seca coincide con alta demanda energética.

Glosario de abreviaturas

En el manuscrito se utilizaron las siguientes abreviaturas:

WD	Déficit hídrico (Water deficit)
CWD	Déficit hídrico acumulativo (Cumulative water deficit)
MCWD	Déficit hídrico acumulativo máximo (Maximum cumulative water deficit)
Pr	Precipitación
Et	Evapotranspiración
sshf	Flujo superficial de calor sensible (Surface sensible heat flux)
slhf	Flujo superficial de calor latente (Surface latent heat flux)
ssr	Flujo superficial de radiación solar neta (Surface solar radiation)
ERA5	Reanálisis del ECMWF de quinta generación
ECMWF	Centro Europeo de Pronóstico del Tiempo de Plazo Medio (European Centre for Medium-range Weather Forecasts)
MSWEP	Precipitación de conjuntos de fuentes múltiples (Multi-source weighted-ensemble precipitation)
CHIRPS	Precipitación infrarroja con datos de estaciones del grupo de peligros climáticos (Climate hazards group infrared precipitation with station data)
MSWEP	Precipitación de conjuntos de fuentes múltiples (Multi-source weighted-ensemble precipitation)
LOR1	Área de estudio del nordeste de Loreto
LOR2	Área de estudio del noroeste de Loreto
LOR3	Área de estudio del sur de Loreto
MOY	Área de estudio en la región de transición Andes-centrada en la ciudad de Moyobamba

UCA	Área de estudio en Ucayali
MD	Área de estudio en Madre de Dios
ED	Sequía extrema (extreme drought)
CLIM	Climatología
SAMS	Sistema monzónico de Sudamérica
ZCIT	Zona de convergencia intertropical

Referencias

- Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., Silva, C. V., Silva Junior, C. H., Arai, E., Aguiar, A. P., Barlow, J., Berenguer, E., Deeter, M. N., Domingues, L. G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J. A., Miller, J. B., ... Saatchi, S. (2018). 21st Century Drought-Related Fires Counteract the Decline of Amazon Deforestation Carbon Emissions. *Nature Communications*, 9(1), Article 536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., & de Roo, A. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Science*, 21(1), 589–615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>
- 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 Geophysical Research: Atmospheres*, 122(11), 5870–5882. <https://doi.org/10.1002/2016JD026282>
- Espinoza, J.-C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Junquas, C., Vauchel, P., Lavado, W., Drapeau, G., & Pombo, R. (2011). Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, 38(13), L13406. <https://doi.org/10.1029/2011GL047862>
- 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>

Espinoza, J.-C., Ronchail, J., Marengo, J. A., & Segura, H. (2019). Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*, 52(9-10), 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>

Espinoza, J. -C., Jimenez, J. C., Marengo, J. A., Schöngart, J., Ronchail, J., Lavado-Casimiro, W., & Ribeiro, J. V. M. 2024. The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports*, 14(1), Article 8107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>

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>

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. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
Jiménez, J.-C., Marengo, J.A., Alves, L.M., Sulca, J.C., Takahashi, K., Ferrett, S., & Collins, M. (2021). The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, 41(7), 3761–3780. <https://doi.org/10.1002/joc.6453>

Malhi, Y., Pegoraro, E., Nobre, A. D., Pereira, M. G. P., Grace, J. A., Culf, D., & Clement, R. (2002). Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20), 8061. <https://doi.org/10.1029/2001JD000623>

Malhi, Y., Roberts, T., Betts, R. A., & Killeen, T. J. (2008) Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science*, 319(5860), 169–172. <https://doi.org/10.1126/science.1146961>

Malhi, Y., Aragão, L. E. O. C., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., McSweeney, C., & Meir, P. (2009). Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(49), 20610–20615. <https://doi.org/10.1073/pnas.0804619106>

Marengo, J.A., & Espinoza, J.-C. (2016). Extreme Seasonal Droughts and Floods in Amazonia: Causes, Trends and Impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>

Marengo, J., Cunha, A., Espinoza, J.-C., Fu, R., Schöngart, J., Jimenez, J., Costa, M., Ribeiro, J., Wongchuig, S., & Zhao, S. The Drought of Amazonia in 2023–2024. (2024). *American Journal of Climate Change*, 13(3), 567–597. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2024.133026>

Marengo, J. A., Costa, M. C., Cunha, A. P., Espinoza, J.-C., Jimenez, J. C., Libonati, R., Miranda, V., Trigo, I. F., Sierra, J. P., Geirinhas, J. L., Ramos, A. M., Skansi, M., Molina-Carpio, J., & Salinas, R. (2025). Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for 1979–2023 in central South America. *Frontiers in Climate*, 7, 1529082. <https://doi.org/10.3389/f-clim.2025.1529082>

Martinez-Castro, D., Takahashi, K., Espinoza, J.-C., Vichot-Llano, A., Andrade, M.O., & Silva, F. Y. (2025). Extreme Droughts in the Peruvian Amazon Region (2000–2024). *Water*, 17(12), 1744. <https://doi.org/10.3390/w17121744>

Papastefanou, P., Zang, C. S., Angelov, Z., de Castro, A. A., Jimenez, J. C., De Rezende, L. F. C., Ruscica, R. C., Sakschewski, B., Sörensson, A. A., Thonicke, K., Vera, C., Viovy, N., Von Randow, C., & Rammig, A. (2022). Recent extreme drought events in the Amazon rainforest: Assessment of different precipitation and evapotranspiration datasets and drought indicators. *Biogeosciences*, 19(16), 3843–3861. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3843-2022>

Paccini, L., Espinoza, J.-C., Ronchail, J., & Segura, H. (2018). Intra-seasonal rainfall variability in the Amazon basin related to large-scale circulation patterns: A focus on western Amazon–Andes transition region. *International Journal of Climatology*, 38(5), 2386–2399. <https://doi.org/10.1002/joc.5341>