

Transporte y reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del río Congo: comparaciones con la cuenca del río Amazonas

Andrés Octavio Pérez Brand; Grupo de Investigación GIGA, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

Paola Andrea Arias Gómez; Grupo de Investigación GIGA, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

Sara Cristina Vieira Agudelo; Grupo de Investigación GIGA, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

PALABRAS CLAVE:

Amazonas; Congo; DRM; transporte de humedad atmosférica; reciclaje de humedad atmosférica.

RESUMEN:

La cuenca del río Amazonas ha presentado cambios en el ciclo hidrológico evidenciados por estudios que evidencian alteraciones en la ocurrencia de temporadas secas de mayor duración asociadas a la reducción del reciclaje de humedad atmosférica, en comparación, poco se ha estudiado sobre la cuenca del río Congo. En este trabajo se analiza el transporte y el reciclaje de humedad atmosférica en esta cuenca, utilizando el modelo DRM (Dynamic Recycling Model) con información del reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) durante el periodo 1980–2015. Este modelo se emplea bajo el supuesto de una atmósfera homogénea y bien mezclada en la vertical, haciendo posible la descomposición de humedad atmosférica en términos de precipitación y agua precipitable. La implementación de este modelo permitió evidenciar una tendencia hacia anomalías negativas de precipitación reciclada dentro del Congo, así como en la precipitación transportada desde el océano Índico, siendo la región norte de la cuenca (dominada por el bosque húmedo tropical) donde se presentaron las mayores alteraciones. El reciclaje de precipitación en la región Congo Norte (Congo Sur) equivale aproximadamente al 28.22% (25.97%) de la precipitación total sobre la región, el cual no presenta cambios estadísticamente significativos durante la ocurrencia del fenómeno ENOS. Finalmente, los resultados sugieren en conjunto con diversas investigaciones la existencia de alteraciones en el transporte y reciclaje de humedad atmosférica sobre las cuencas del Congo y Amazonas, presentando un comportamiento similar en la región sur de ambas cuencas.

1. Introducción

Los bosques tropicales son fundamentales en el clima global y componen aproximadamente el 12% de la cobertura total del planeta. Del total de esta cobertura, la cuenca del Amazonas cubre el 35% mientras que la cuenca del Congo cubre el 11% [1]. En general, los bosques tropicales aportan aproximadamente un tercio de la evapotranspiración de la superficie terrestre [2], son epicentros de biodiversidad y grandes reguladores del clima fuertemente asociados al ciclo hidrológico en gran medida por los patrones de lluvia y la influencia de la humedad atmosférica.

La cuenca del río Congo (anteriormente conocido como río Zaire), comprende el segundo bosque húmedo tropical más grande del planeta después del Amazonas, se ubica en África central y se extiende a lo largo de 9 países. Debido a su extensión y a su interacción con la atmósfera, esta cuenca es considerada uno de los “hotspot” de humedad reciclada en el planeta, donde se presenta un ciclo bimodal a lo largo del año, con dos periodos de lluvias y dos periodos secos [3]. A pesar de su importancia, es una región con una menor cantidad de investigaciones comparada con el Amazonas, con una relación aproximada de 9 artículos referentes al Amazonas por cada 1 para el Congo, donde los temas enfocados a evapotranspiración y temperatura han sido menos investigados que los temas asociados a precipitación [4]. En particular, el transporte de humedad atmosférica en diferentes regiones del planeta ha recibido recientemente mayor atención, aunque aún es necesario profundizar en regiones como el bosque tropical del Congo. A su vez, se hace pertinente analizar en este tipo de regiones como el transporte y reciclaje de humedad atmosférica se ve alterado debido a los grandes fenómenos que afectan la interacción océano-atmósfera como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y el Dipolo del Océano Índico (DOI) [5].

El modelo DRM (Dynamic Recycling Model) es un modelo de reciclaje de precipitación dinámico que, a diferencia de otros más tradicionales, incorpora el término de almacenamiento de humedad, el cual en ocasiones es despreciado cuando se consideran escalas de tiempo grandes (mensuales o mayores) [6]. En este sentido, esta herramienta representa una alternativa adecuada para realizar investigaciones que involucran simulación de transporte de humedad atmosférica, donde sus principales errores se relacionan a la cizalladura del viento en la vertical y a su uso para épocas de invierno, debido a que este modelo se fundamenta en la consideración de una atmósfera bien mezclada [7]. Este modelo ha sido utilizado eficientemente a lo largo del planeta: Estados Unidos [6][8], Centro y Sur América [9]-[15] o en India [16]. Así, surge la idea de desarrollar esta investigación la cual plantea realizar un análisis de sobre el comportamiento del reciclaje y transporte (desde las principales regiones fuente) de humedad atmosférica en la cuenca del río Congo en el periodo 1980-2015 y realizar comparaciones con el comportamiento de la humedad atmosférica en la cuenca del río Amazonas para el periodo 1980-2005, utilizando datos obtenidos de simulaciones con el modelo DRM hechas con el producto de reanálisis atmosférico de última generación ERA5 del Centro Europeo de Pronóstico Meteorológico a Mediano Plazo (ECMWF por sus iniciales en inglés) [17].

2. Datos y metodología

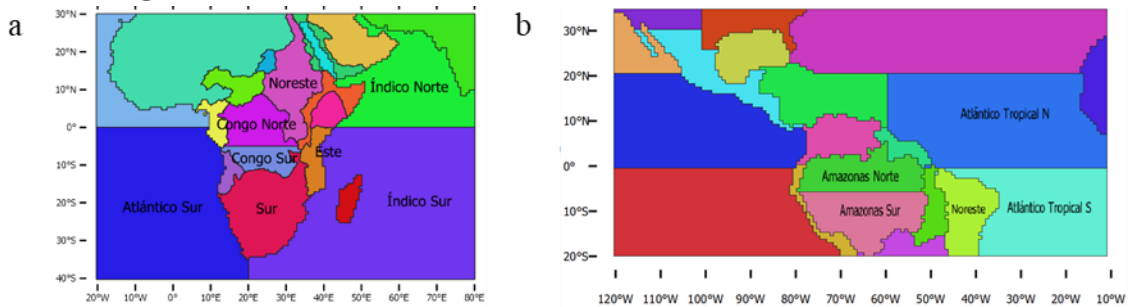


Figura 1 Área de estudio y regiones fuente de humedad atmosférica hacia el Congo (a) y el Amazonas (b).

2.1. Región de estudio

La Figura 1.a presenta el dominio espacial utilizado para esta investigación centrada en la cuenca del río Congo. Esta región de estudio se encuentra comprendida entre las longitudes 80°E–20°W y las latitudes 30°N–40°S. Este ráster fue construido para ser ingresado al modelo a partir del producto HydroBASINS [18]. La Figura 1.b, a su vez, presenta el dominio espacial para las simulaciones realizadas para la cuenca del río Amazonas, con base en el trabajo desarrollado por Agudelo et al. (2019) [12].

2.2. Modelo DRM

El modelo DRM se deriva de la ecuación de conservación de masa de vapor de agua atmosférico (Ecuación 1) y representa la atmósfera como una sola capa utilizando las variables precipitación total, evapotranspiración, columna total de vapor de agua (agua precipitable), flujo de vapor de agua integrado en la vertical (zonal y meridional) a una escala temporal diaria y sin considerar el término referente a la difusión molecular [8].

$$\frac{\partial(w)}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} = E - P \quad (1)$$

En esta ecuación, w es la columna total de vapor de agua (agua precipitable), u es la componente zonal del viento, v es la componente meridional del viento, E es la evapotranspiración y P es la precipitación. En pocas palabras, este modelo permite descomponer la humedad atmosférica sobre una región en términos de precipitación y agua precipitable (reciclada y transportada).

3. Resultados

La Tabla 1 presenta los valores de precipitación reciclada y sus respectivos porcentajes con respecto a la precipitación total para las cuencas del río Congo y del río Amazonas, en las regiones norte y sur (Figura 1). Se observa un comportamiento similar en la región sur de ambas cuencas, a pesar de la diferencia en la magnitud de su área superficial. Esto puede asociarse a la semejanza en las características que ambas regiones presentan, ya que en ambas cuencas el sur cuenta con una menor porción de bosque húmedo tropical predominando la vegetación tipo sabana, y es una zona más permeada por procesos de deforestación y en general actividades antrópicas.

Por otra parte, en la región norte de la cuenca del Amazonas se observa un menor reciclaje de precipitación que en el norte de la cuenca del Congo; sin embargo, esto es compensado con un mayor transporte de humedad atmosférica desde el Atlántico Tropical Norte hacia el norte del Amazonas, lo que comparado con su contraparte (océano Índico Norte) para la región norte de la cuenca del Congo contribuye a una precipitación de mayor magnitud sobre la cuenca del Amazonas.

Tabla 1 Porcentajes de precipitación reciclada en la cuenca del río Congo y la cuenca del río Amazonas

Región	Precipitación (mm/día)					
	Promedio	% Promedio	Mínimo	% Mínimo	Máximo	% Máximo
Congo Norte	1.36	28.22	0.35	17.41	2.82	44.98
Congo Sur	0.92	25.97	0.00	16.87	2.16	41.41
Amazonas Norte	1.20	17.17	0.47	11.25	1.98	28.27
Amazonas Sur	1.26	24.04	0.25	15.95	2.34	45.05

Las Figuras 2.a-b-c-d presentan el ciclo anual multianual de precipitación total y los aportes desde las principales regiones fuente para el norte y sur de las cuencas del Congo y Amazonas respectivamente. En estas se evidencia un comportamiento bimodal para la región norte y un comportamiento unimodal para la región sur de la cuenca del Congo, realizando un paralelo con lo que ocurre en la cuenca del Amazonas se observa un ciclo anual unimodal en la región norte del Amazonas a diferencia del ciclo bimodal observado en la región norte del Congo, mientras que la región sur de ambas cuencas presenta un comportamiento similar, con un ciclo anual unimodal presentado sus valores mínimos de precipitación durante el trimestre junio-julio-agosto (JJA). Se debe resaltar que el comportamiento del ciclo anual en ambas regiones de las cuencas del Congo y Amazonas se repite en la variable agua precipitable.

Un análisis de tendencias con la prueba no paramétrica Mann-Kendall evidencia una tendencia decreciente estadísticamente significativa en las anomalías del reciclaje de precipitación en ambas regiones de la cuenca del Congo y en la región sur de la cuenca del Amazonas. Los ciclos anuales presentados en las Figuras 2.e-f-g-h permiten evidenciar este comportamiento particularmente en la cuenca del Congo, mientras que en la región sur del Amazonas, aunque se presenta de un modo más caótico, se alcanza a evidenciar un aumento de las anomalías negativas de precipitación reciclada, especialmente durante los meses de octubre, noviembre y diciembre, los cuales corresponden al inicio del monzón de Suramérica, donde simulaciones bajo diversos escenarios de deforestación han demostrado disminución en el reciclaje de humedad atmosférica en esta región de la cuenca [15].

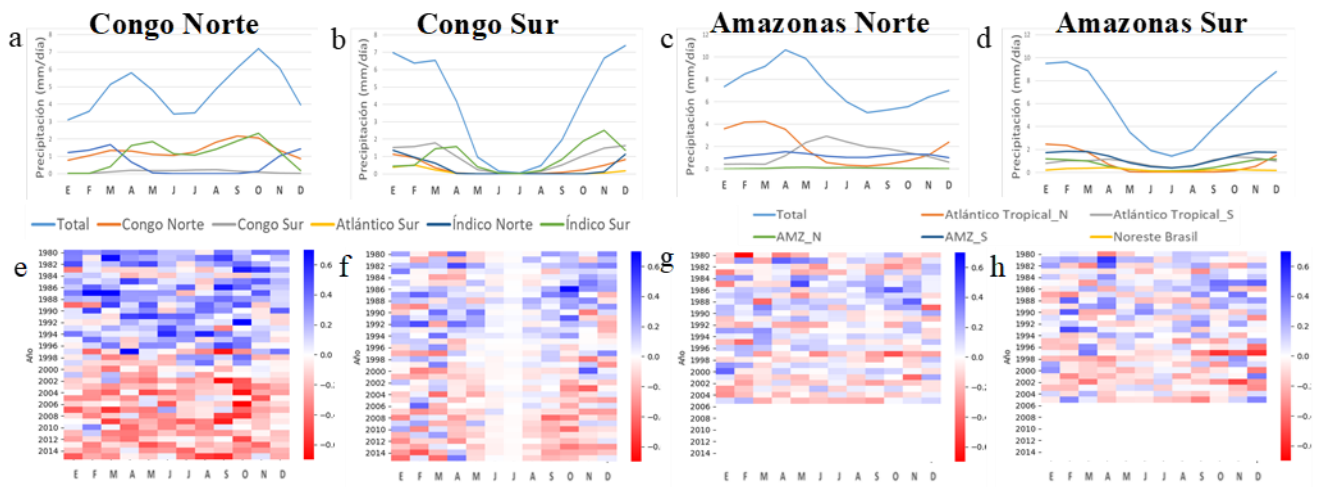


Figura 2 (a, b, c, d) Ciclo anual multianual de precipitación total y transportada desde las principales regiones fuente y (e, f, g, h) ciclo anual de anomalías de precipitación reciclada para Congo norte, Congo sur, Amazonas norte y Amazonas sur respectivamente.

Finalmente, utilizando la prueba de análisis de varianza (ANOVA) se analizó el comportamiento de la humedad atmosférica en la región del Congo durante la ocurrencia del fenómeno ENOS. En esta se observa que el reciclaje de humedad atmosférica no presenta cambios estadísticamente significativos durante los eventos El Niño y La Niña en comparación con los periodos neutros, sin embargo, el transporte de precipitación desde la región norte del océano Índico hacia la región Congo norte sí presenta un incremento significativo durante eventos El Niño en el trimestre marzo, abril, mayo (MAM) y desde el Índico sur hacia la región Congo sur durante el trimestre SON.

4. Conclusiones

Se observó una disminución en la precipitación total sobre la cuenca del Congo durante el periodo 1980-2015 la cual se encuentra asociada a la disminución en el reciclaje de precipitación en ambas regiones de la cuenca, exhibiendo un mayor impacto la región norte de la cuenca. A su vez, en términos de agua precipitable se observó un comportamiento similar en el norte de la cuenca, con una reducción en el reciclaje de esta variable.

A pesar de sus diferentes magnitudes, la región sur de ambas cuencas presentó un comportamiento similar en los periodos de estudio, con ambas cuencas exhibiendo una tendencia decreciente en el reciclaje de humedad atmosférica (especialmente en términos de precipitación). Esto evidencia procesos similares que ocurren en el sur del Amazonas (especialmente en el arco de deforestación) y en el sur y este del Congo [19], regiones expuestas a una presión antrópica constante relacionada con los cambios de cobertura con fines ganaderos y agrícolas. Durante el periodo 1980-2000 en las regiones tropicales del planeta más del 55% de las nuevas tierras de cultivo provino de bosque intacto y un 28% provino de bosque alterado [20], con tasas anuales de deforestación para el periodo 1990-2000 en la cuenca del Congo (Amazonas) aproximadamente del 0.23% (0.45%), mientras que estas cuencas durante el periodo 2000-2010 tasas anuales de deforestación aproximadas del 0.23% (0.44%) [21], sin embargo, se hace necesario indagar más en esta relación entre la deforestación y las alteraciones en el transporte de humedad atmosférica.

Bibliografía

- [1] R. Negrón, W. Li, K. Fernandes, A. de Oliveira, “Comparison of precipitation data sets over the

- tropical South American and African continents”, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10, no. 1, pp. 289–299, 2009. Disponible: <https://doi.org/10.1175/2008JHM1023.1>
- [2] Y. Malhi, T. Gardner, G. Goldsmith, M. Silman, P. Zelazowski, “Tropical forests in the Anthropocene”, *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 39, pp. 125–159, 2014. Disponible: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-030713-155141>
- [3] D. Crowhurst, S. Dadson, R. Washington, “Evaluation of Evaporation Climatology for the Congo Basin Wet Seasons in 11 Global Climate Models”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 125, no. 6, 2020. Disponible: <https://doi.org/10.1029/2019jd030619>
- [4] D. Alsdorf, E. Beighley, A. Laraque, H. Lee, R. Tshimanga, F. O’Loughlin, G. Mahé, G., B. Dinga, G. Moukandi, R. Spencer, “Opportunities for hydrologic research in the Congo Basin”, *Reviews of Geophysics*, vol. 54, no. 2, pp. 378–409, 2016. Disponible: <https://doi.org/10.1002/2016RG000517>
- [5] A. Abiy, A. Melesse, W. Seyoum y W. Abteu, “Drought and climate teleconnection and drought monitoring”, en *Extreme Hydrology and Climate Variability Monitoring, Modelling, Adaptation and Mitigation*, A. Melesse, W. Abteu, G. Senay: Elsevier Inc, 2019, pp. 275–295. Disponible: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00022-1>
- [6] F. Dominguez, P. Kumar, X. Liang, M. Ting, “Impact of Atmospheric Moisture Storage on Precipitation Recycling”, *Journal of Climate*, vol. 19, no. 8, pp. 1513–1530, 2006. Disponible: <https://doi.org/10.1175/JCLI3691.1>
- [7] H. Goessling, C. Reick, “On the “well-mixed” assumption and numerical 2-D tracing of atmospheric moisture”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13, no. 11, pp. 5567–5585, 2013. Disponible: <https://doi.org/10.5194/acp-13-5567-2013>
- [8] F. Dominguez, H. Hu, J. Martinez, “Two-layer dynamic recycling model (2L-DRM): Learning from moisture tracking models of different complexity”, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 21, no. 1, pp. 3–16. 2020. Disponible: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0101.1>
- [9] J. Martinez, F. Dominguez, “Sources of Atmospheric Moisture for the La Plata River Basin”, *Journal of Climate*, vol. 27, no. 17, pp. 6737–6753, 2014. Disponible: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/27/17/jcli-d-14-00022>
- [10] P. Arias, J. Martínez, S. Vieira, “Moisture sources to the 2010–2012 anomalous wet season in northern South America”, *Climate Dynamics*, vol. 45, pp. 2861–2884, 2015. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2511-7>
- [11] I. Hoyos, F. Dominguez, J. Cañón-Barriga, J. Martínez, R. Nieto, L. Gimeno, P. Dirmeyer, “Moisture origin and transport processes in Colombia, northern South America”, *Climate Dynamics*, vol. 50, pp. 971–990, 2018. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3653-6>
- [12] J. Agudelo, P. Arias, S. Vieira, J. Martínez, “Influence of longer dry seasons in the Southern Amazon on patterns of water vapor transport over northern South America and the Caribbean”, *Climate Dynamics*, vol. 52, pp. 2647–2665, 2019. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4285-1>
- [13] J. Herrera-Estrada, J. Martinez, F. Dominguez, K. Findell, E. Wood, J. Sheffield, “Reduced Moisture Transport Linked to Drought Propagation Across North America” *Geophysical Research Letters*, vol. 46, no. 10, pp. 5243–5253, 2019. Disponible <https://doi.org/10.1029/2019GL082475>
- [14] J. Morales, P. Arias, J. Martínez, A. Durán-Quesada, “The role of low-level circulation on water vapor transport to Central and northern South America: insights from a 2D lagrangian approach”, *International Journal of Climatology*, 2020. Disponible: <https://doi.org/10.1002/joc.6873>
- [15] M. Ruiz-Vásquez, P. Arias, J. Martínez, J. Espinoza, “Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America”, *Climate Dynamics*, vol. 54, pp. 4169–4189, 2020. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>
- [16] A. Pathak, S. Ghosh, P. Kumar, “Precipitation recycling in the Indian subcontinent during summer monsoon”, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 15, no. 5, pp. 2050–2066, 2014. Disponible:

<https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0172.1>

- [17] H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, et al., "The ERA5 global reanalysis", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, pp. 1999–2049, 2020. Disponible: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [18] B. Lehner, G. Grill, "Global river hydrography and network routing: Baseline data and new approaches to study the world's large river systems", *Hydrological Processes*, vol. 27, no. 15, pp. 2171–2186, 2013. Disponible: <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
- [19] I. Rosa, M. Smith, O. Wearn, D. Purves, R. Ewers, "The Environmental Legacy of Modern Tropical Deforestation", *Current Biology*, vol. 29, no. 16, pp. 2161-2166, 2016. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.06.013>
- [20] H. Gibbs, A. Ruesch, F. Achard, M. Clayton, P. Holmgren, N. Ramankutty, J. Foley, "Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s", *National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 107, no. 38, pp. 16732–16737, 2010. Disponible: <https://doi.org/10.1073/pnas.0910275107>
- [21] FAO, "The State of Forests in the Amazon Basin, Congo Basin and Southeast Asia", 2011.