

EVALUACIÓN DE LOS TRANSPORTES DE FLUJOS Y BALANCE DE HUMEDAD EN EL PARAMO DE CHINGAZA: UN ESTUDIO BASADO EN DATOS DE OBSERVACION Y MODELOS CLIMATICOS

K. Sánchez¹, G. Corzo², G. Santos¹, G. Hernández¹, C. Tami¹, J. Gacharná¹, G. Herrán³ y D. Gutierrez³, F. Rubiano³

¹Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia

²IHE – Delft Institute for Water Education, The Netherlands

³Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Colombia

karel.sanchez@mail.escuelaing.edu.co, g.corzo@un-ihe.org, german.santos@escuelaing.edu.co, guillermo.hernandez@mail.escuelaing.edu.co, carlos.tami@mail.escuelaing.edu.co, juan.gacharna@escuelaing.edu.co, gherran@acueducto.com.co, dgutierrezb@acueducto.com.co, frubiano@acueducto.com.co

Introducción

El páramo de Chingaza presenta hoy la mayor concesión de agua para el sistema de abastecimiento de Bogotá. Debido a su alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático, y a su importancia biológica paramuna, cuando se presenta una condición climática seca en el país, el rendimiento hídrico se reduce significativamente, en comparación con condiciones normales; así, la oferta natural del recurso hídrico en un año promedio y en un año seco tiene diferencias regionales que son importantes de considerar.

El objetivo de este estudio es descubrir los patrones estacionales de los orígenes de las lluvias en la región Chingaza, Colombia. Mediante el análisis de su variabilidad, distribución y el impacto de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se busca inferir indirectamente el porcentaje de lluvia estacional que llega a la región. Para comprender el flujo atmosférico y la formación de sistemas convectivos en los Andes, se propone una técnica que combina análisis eulerianos y lagrangianos. Se resalta cómo la circulación de aire frío desde el Atlántico afecta el clima local y el sistema hidrológico de Chingaza, demostrando la interconexión entre los patrones atmosféricos y los ciclos hidrológicos.

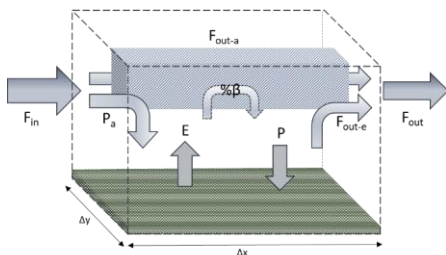


Figura 1. Escala Espacial y modelo Conceptual de análisis para las posibles fuentes de humedad al paramo de Chingaza. Modelo conceptual Euleriano-Lagrangiano de humedad.

Metodología

Este estudio comprende un análisis de la información atmosférica y climatológica de la región, detallando los periodos de mayor recarga hídrica en la región Chingaza. a una escala macro que incluye un análisis de regiones de miles de km y se conecta detallado de los transportes en una el Amazonas y una parte de Colombia, donde primero estima los

balances mensuales como una medida media de transporte de vapor de agua, y que implícitamente se asume que esta relación de transporte será la misma que origina las temporadas de lluvias. El primer componente del análisis (Euleriano), usa la conservación de la humedad integrada verticalmente:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = - \left(\frac{\partial F_u}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} \right) + E - P, \quad \text{ecuación 1}$$

La cual permite analizar cómo varía el vapor de agua atmosférico (∂q), en función de los flujos de precipitación (P) y evaporación (E) en relación con la divergencia horizontal del vapor de agua. Esta formulación permite bajo un enfoque bidimensional, evaluar el flujo advectivo de humedad y el reciclaje del vapor de agua, destacando su tránsito y contribución estacional a través de la región estudiada (ecuación 1).

De esta ecuación se usa para derivar el coeficiente de reciclaje de esta. Inicialmente, se estableció una delimitación espacial clara, como se muestra en la figura 1 y se definió el periodo de análisis desde 1980 hasta 2022, con una frecuencia de datos a escala mensual. Para la investigación, se recopilieron datos globales que incluyen precipitación, evapotranspiración, humedad, así como componentes zonales y meridionales del viento, todos analizados en el perfil de presión con una resolución espacial de 0.25×0.25 grados.

En la fase final del estudio, se procedió al análisis de las características del balance de vapor de agua, bajo el seguimiento de partículas o retro trayectoria, permitiendo así cuantificar la incidencia de las regiones fuente de humedad en Chingaza. Este análisis permitió cuantificar, de manera porcentual, la dependencia del sistema respecto a las fuentes de humedad provenientes de regiones cercanas y evaluar la influencia de la vegetación en los procesos de regulación y soporte del ciclo hidrológico.

Resultados

La cuantificación de los flujos atmosféricos y su dinámica en la región Chingaza bajo el enfoque euleriano-lagrangiano, muestran que la recirculación de la humedad es considerable y que un porcentaje

significativo, específicamente un 93% de fuentes terrestres externas a la región (Orinoquia, Andes, Caribe, Amazonia). Este estudio permitió determinar valores que muestran una correlación directa con los patrones de precipitación. Aunque esta relación puede parecer evidente, es crucial para identificar los orígenes del transporte de humedad y las contribuciones específicas entre diferentes cuencas hidrográficas, facilitando así la comprensión de la dinámica de intercambio de humedad de un sistema a otro. Por lo que de acuerdo con el análisis de retro trayectorias, se logró identificar temporalmente que la para Chingaza cerca del 50% de su humedad proviene de la Orinoquia y Amazonia, en mayor participación en la temporada MAM y JJA respectivamente (figura 2 y 3). Estos hallazgos representan un avance importante para el análisis y la generación de pronósticos más precisos, mediante la integración de sistemas combinados que evalúan tanto las trayectorias de la humedad como los balances hídricos mensuales. Se estableció el coeficiente de correlación entre la precipitación y el transporte de vapor de agua es de 0,78, mientras que la relación entre la precipitación y la evaporación es de 0,24. Estos resultados subrayan la importancia predominante del vapor de agua en el proceso de precipitación ($P > E$) a lo largo de la región estudiada, relegando a la evaporación a un papel secundario pero necesario en el ciclo hídrico. Finalmente,

Conclusión

La productividad hídrica en Chingaza se ve intrínsecamente relacionada a la dinámica de la ZCIT. Este estudio identificó que las principales fuentes de humedad para Chingaza son el Orinoco, Amazonas aportando cerca del 50%, mientras que el Pacífico, Atlántico y Caribe y Andes son fuentes secundarias. La precipitación anual acumulada se determina en 2500 mm, cifra ligeramente inferior a la suma de la convergencia de la humedad (10^2mm) y la evaporación 400 mm. Esto indica Chingaza no únicamente solamente actúa como sumidero de humedad, sino que también funciona dinámicamente como fuente a los sistemas altoandinos. Durante la temporada JJA, las precipitaciones aumentan en toda la región (Figura 2). Por el contrario, durante DJF, cuando la ITCZ está en su posición más meridional, la precipitación y escorrentía disminuyen; incluso, la humedad atmosférica diverge de las tierras bajas del Orinoco. A pesar de esto, Chingaza permanece con un remanente de humedad perteneciente a su reciclaje propio de la vegetación en representación porcentual del 7 al 20% de su humedad durante JJA y MAM, que son las estaciones más húmedas del año.

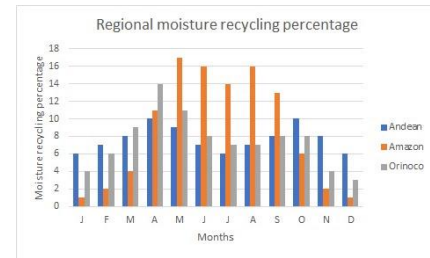


Figura 2. Variabilidad neta porcentual, sobre la contribución del Orinoco, Amazonia y Pacifico-Andina sobre el Paramo de Chingaza, Valores promedios multianuales del 1980-2022.

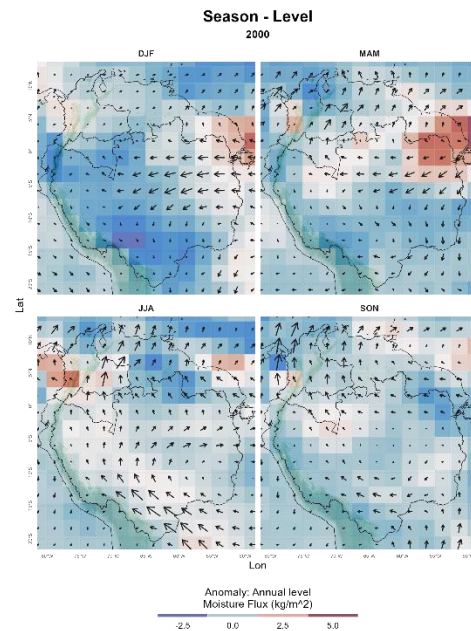


Figura 3. Variación estacional del Flujo de Humedad Adveectivo en temporadas acumuladas trimestrales a) Diciembre-Febrero (DJF), b) Marzo-Mayo (MAM), c) Junio-Agosto (JJA), d) Septiembre-Noviembre (SON).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB por financiar este estudio como parte del contrato de consultoría No. 2-02-26200-1571-2022.

Referencias

- Builes-Jaramillo, A., & Poveda, G. (2018). Conjoint Analysis of Surface and Atmospheric Water Balances in the Andes-Amazon System. *Water Resources Research*, 54(5). <https://doi.org/10.1029/2017WR021338>
- Cárdenas, M. F., Tobón, C., & Buytaert, W. (2017a). Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrological Processes*, 31(24), 4440-4449. <https://doi.org/10.1002/hyp.11374>
- Hernández, K.A.S., Perez, G.A.C. (2022). A Comparative Analysis of Spatiotemporal Drought Events from Remote Sensing and Standardized Precipitation Indexes in Central America Dry Corridor. In: Singh, V.P., Yadav, S., Yadav, K.K., Corzo Perez, G.A., Muñoz-Arriola, F., Yadava, R.N. (eds) *Application of Remote Sensing and GIS in Natural Resources and Built Infrastructure Management*. Water Science and Technology Library, vol 105. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14096-9_5