

# Uso de Isotopos Estables para el Estudio de las Fuentes de Agua Superficiales en el Ecuador y sus Implicaciones para la Gestión de los Recursos Hídricos

Lima P.\*

\*Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática, Instituto de Investigación y Posgrado, Quito, Ecuador  
e-mail: prlima@uce.edu.ec

Información del artículo  
Recibido: julio 2018  
Aceptado: septiembre 2018

## Resumen

Esta investigación está enfocada en el análisis de los procesos de lluvia-escorrentía en las Montañas del Ecuador con énfasis en las implicaciones de la gestión de recursos hídricos mediante el uso de los valores de los isotopos estables de hidrogeno ( $\delta D$ ) y oxígeno ( $\delta 18O$ ). La pregunta que guía este estudio es ¿Cómo pueden los valores de  $\delta D$  y  $\delta 18O$  variar en procesos hidrológicos tales como lluvia-escorrentía en los proyectos hidráulicos? En primer lugar, se realiza un análisis de la variación espacial y temporal de la composición de isotopos en la lluvia en el Ecuador. Adicionalmente, se comparan estas variaciones con los datos tomados de aguas superficiales durante diciembre 2016 y abril 2017 en ríos y glaciares ecuatorianos. Los resultados del análisis de datos de las precipitaciones muestran que los isotopos estables varían especialmente con la altitud y estacionalmente. En el caso de las aguas superficiales a pesar que es más difícil definir cuáles son sus principales fuentes, la composición de isotopos estables exponen la misma variación de las aguas lluvias. Esta dependencia muestra el gran potencial que tienen los isotopos estables para representar y estudiar las fuentes de aguas superficiales en el Ecuador.

**Palabras clave:** Isotopos estables, lluvia, escorrentía, cuenca

## Abstract

This study is focused on an investigation of rainfall and runoff processes in the Ecuadorian Andean Mountains with emphasis on implications to the management of hydraulic resources using of  $\delta D$  and  $\delta 18O$  values. The following question have guided this project: (1) How do the  $\delta D$  and  $\delta 18O$  values vary in runoff-rainfall processes in two adjacent watersheds that have different rainfall patterns? By answering this question, a broader question of how can hydrogen and oxygen isotope compositions be used to improve understanding of runoff sources in mountain streams and their contribution to hydraulic resource projects? First, I analyzed the temporal and spatial variation of isotope composition of rainfall data in Ecuador. I compared the previous data with surface water in streams and glaciers during two different seasons in December 2016 and April 2017. The results of this analysis exposed that rainfall isotope values are more affected by altitude and seasonal factors than amount effect factors. Although in hydrologic studies, surface water is difficult to understand, in this case, the results in runoff during both months expose the same variation of the rainfall values. This dependency exposes the high potential that stables isotopes have to represent and understand the sources of surface water in Ecuador.

**Key Words:** Stable Isotopes, streams, rainfall, runoff, watershed

## Introducción

Las interacciones del agua en una cuenca producen diferente composición de isotopos estables de oxígeno y el hidrógeno debido a los cambios de las fases del agua dentro del ciclo hidrológico [1]. Los isotopos estables tienen como característica principal que el número de masa atómica es diferente en estos átomos debido al cambio del número de neutrones. Esta diferencia en el número de neutrones no afecta en las propiedades químicas del elemento y sus compuestos, sin embargo, la diferencia de masa puede afectar sutilmente en diferencias químicas y físicas en los procesos que resultan en fraccionamiento isotópico [2]. Existen dos isotopos estables de hidrogeno que son protio ( $^1\text{H}$ ), y deuterio (D), y existen tres isotopos estables de oxígeno ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$ ) dando la posibilidad a la formación a nueve posibles isotopólogos de agua. La abundancia en la tierra del isótopo  $^{18}\text{O}$  es de 0.20004% mientras que la del isótopo  $^{16}\text{O}$  es del 99.7621% [2].

Las Montañas Ecuatorianas (ME) contienen fuentes importantes de aguas superficiales las mismas que dependen de procesos hidrológicos que resultan en infiltración, precipitación, evaporación y desglaciación (Figura 1). Del mismo modo, estas fuentes influyen en otros mecanismos geomorfológicos, ecológicos, químicos, y socio-económicos aguas abajo [3].

La mayor parte de proyectos hidráulicos en el Ecuador dependen altamente de los procesos hidrológicos en las montañas (Figura 1). Por ejemplo, el Proyecto Hidroeléctrico Manduriacu tiene el 39% de la superficie de su cuenca en zonas más altas de los 3000 m.s.n.m. mientras que el Proyecto Coca Codo Sinclair tiene un 54%. El objeto de este estudio es analizar las diferentes composiciones de los isotopos en los procesos de lluvia y escorrentía con el fin de usarlos en la gestión de los recursos hídricos.

Generalmente el entendimiento de los procesos hidrológicos es muy complejo debido a factores globales y locales que pueden influir. Entre los factores globales que afectan las lluvias en el Ecuador se cuenta con mecanismos climáticos como: la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), los efectos del Niño y la Niña (ENSO), y la zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) [4]–[6]. Los factores locales relevantes son la orografía, e interacciones biogeoquímicas. Adicionalmente, a esta complejidad se le

suma la problemática del déficit de estaciones hidrometeorológicas en zonas del páramo debido a su difícil acceso.

En este estudio se analiza la variación de las lluvias en el Ecuador usando los datos de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), se comparan dichos valores con la variación de los isotopos en aguas superficiales en el Ecuador durante el mes de diciembre 2016 y abril 2017. Este análisis de la composición de los isótopos de hidrógeno ( $\delta\text{D}$ ) y de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) se basa en la consideración de los principales factores que controlan la composición isotópica de la precipitación que son: temperatura, el efecto continental o de distancia, el efecto de la altitud, el efecto de la latitud, el efecto de la cantidad de lluvia y el efecto estacional.

## Metodología

Con el fin de entender la distribución espacial de las lluvias en el Ecuador, en este estudio se usan las medias mensuales de 1712 valores de  $\delta\text{D}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  publicados en la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) que cubren 24 estaciones en Ecuador. Además, para este análisis con el fin de analizar la influencia de las lluvias en la escorrentía, se complementan 56 resultados de isotopos estables obtenidos de 28 muestras de ríos en el Ecuador durante diciembre 2016 y abril 2017 (Tabla 1) la ubicación de estas muestras se exponen en la Figura 1.

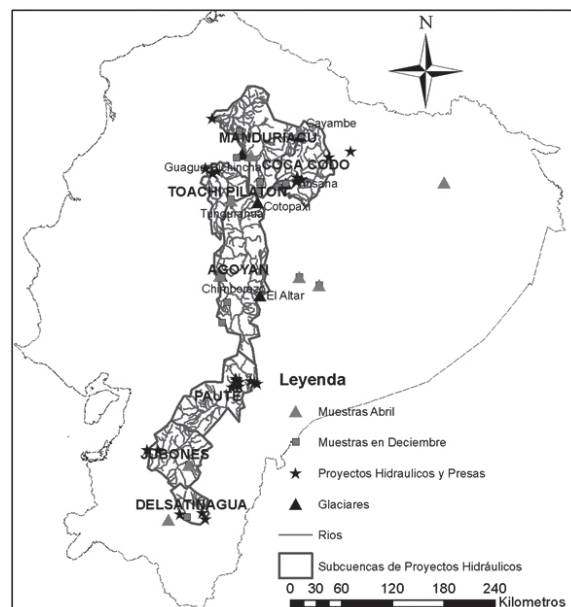


Figura 1. Localización de puntos de muestreo, proyectos hidráulicos y sus subcuencas.

Las muestras de agua superficiales fueron obtenidas en los lugares descritos en la Tabla 1, recolectadas en botellas de plástico de alta densidad, fueron herméticamente tapadas y selladas. Las muestras de glaciación fueron recolectadas en envases de plástico de alta densidad pasando naturalmente a la fase líquida debido al aumento de temperatura. El análisis de dichas muestras se lo realizó en el Centro de Isótopos Estables (CSI) de la Universidad de Nuevo México. La ubicación de los proyectos hidroeléctricos fue proporcionada por la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC).

Los datos de precipitación se encuentran disponibles libremente en la página web de la IAEA [7]. Los resultados obtenidos en aguas superficiales y glaciares en este estudio se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1** Ubicación y valores de la composición de isótopos de oxígeno e hidrógeno de las muestras de agua en aguas superficiales durante diciembre 2016 y abril 2017

Descripción de la muestra	Elevación (m)	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta D$ (‰)
Muestreo en diciembre 2016			
ILLINIZA NORTE	5116	-10,24	-68,35
CAYAMBE NORTE	5773	-13,45	-92,19
ANTISANA	5712	-11,95	-82,61
CUMBRE VEINTIMILLA	6234	-12,66	-86,9
CUMBRE MAXIMA	6271	-12,02	-85,59
LOJA	2180	-6,97	-39,09
OÑA	2250	-8,5	-52,85
RIO BLANCO-LLOA	2370	-10,69	-70,56
CASCADA MINDO VIA CALACALI	1315	-8,09	-51,99
RIO MINDO	1340	-9,11	-58,8
ANTISANA	3870	-14,29	-100,99
COTOPAXI P14	3195	-11,31	-77,37
PITA	3580	-11,48	-79,88
BOBONAZA	590	-5,46	-28,87
QUEBRADA ISHIQU-EYACU	3750	-12,58	-87,8
LAGUNA COLTA	3250	-3,31	-38,34
RIO PUYO	970	-5,62	-29,36
CAYAMBE	5773	-12,58	-87,8
CAYAMBE	5773	-14,69	-102,13

#### Muestreo en abril 2017

ILLINIZA NORTE	5116	-10,24	-68,35
CAYAMBE NORTE	5773	-13,45	-92,19
ANTISANA	5712	-11,95	-82,61
CUMBRE VEINTIMILLA	6234	-12,66	-86,9
CUMBRE MAXIMA	6271	-12,02	-85,59
LOJA	2180	-6,97	-39,09
OÑA	2250	-8,5	-52,85
RIO BLANCO-LLOA	2370	-10,69	-70,56
CASCADA MINDO VIA CALACALI	1315	-8,09	-51,99

### Isótopos Estables en Precipitación

Existen un sin número de factores que gobiernan la composición de agua meteórica. Entre los procesos hidrológicos más importantes que contribuyen a los proyectos hidráulicos están la precipitación, escorrentía, infiltración, y desglaciación. En este estudio se analizará los procesos de precipitación, escorrentía y desglaciación.

La gráfica que relaciona  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  de las aguas de origen meteórica, es decir las aguas que se originan de la atmósfera, presenta una relación lineal con una pendiente de 8. Este no es el caso de todas las aguas superficiales, ya que las fuentes de agua que han experimentado procesos de evaporación, como es el caso de los embalses, exponen altos valores de  $\delta^{18}O$  [1], [2]. Al realizar una regresión de ambos datos se obtiene que la mayoría de las aguas meteóricas se alinean con la línea meteórica global:

$$\delta_D = 8.0\delta_{18}O + 10 \quad (1)$$

$$\delta_D = 8.0\delta_{18}O + 10.2 \quad (2)$$

### Isótopos Estables en Aguas superficiales

Los resultados obtenidos en la composición de los isótopos estables de aguas superficiales están alineados con el agua meteórica (Figura 2). El caso de la Laguna de Colta presenta un valor alto de  $\delta^{18}O$  exponiendo los procesos de evaporación a través del fraccionamiento isotópico entre las fases del aire y la laguna que es típico en embalses con tiempos de retención elevados.

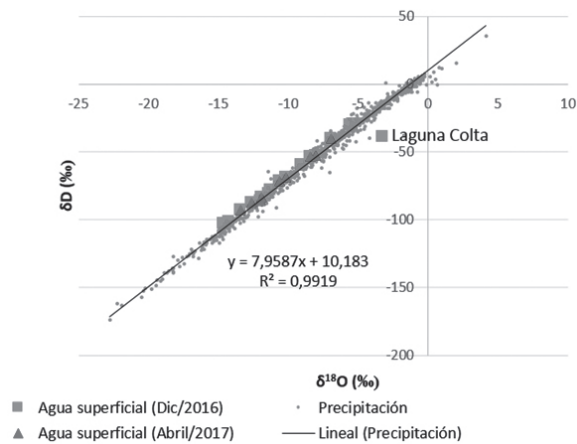


Figura 2. relación de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  de la precipitación y aguas superficiales en el Ecuador

### Principales Factores que Controlan la Composición Isotópica de la Precipitación en el Ecuador

Entre los principales factores que pueden afectar la variación isotópica en la precipitación son el cambio estacional, efecto espacial, efecto de la cantidad de lluvias, temperatura, distancia continental, y altitud. En este documento se analizan estos efectos y se destacan los más importantes.

Las aguas naturales están sometidas principalmente al proceso de evaporación. Este proceso cinético se destaca en las aguas mostrando un gran fraccionamiento de los isotopos estables encontrándose principalmente en las nubes, embalses, suelo, y respiración en plantas y animales. La condensación, por otro lado, es un proceso de equilibrio que depende solamente de la temperatura. Es importante reconocer los efectos isotópicos de estos procesos en las masas de aire y de los reservorios para mejorar nuestro entendimiento acerca del ciclo hidrológico [2].

La figura 3 muestra cómo estos factores que intervienen en el ciclo hidrológico interactúan con dos proyectos hidráulicos. En este caso, se expone que la variación anual de los isotopos estables en los procesos de lluvia en el Ecuador varía principalmente con la altitud

en este mismo perfil es posible identificar dos proyectos hidroeléctricos que dependen de la escorrentía proveniente de las montañas andinas que son Manduriacu en la parte del drenaje hacia el Océano Pacifico y Coca Codo Sinclair que dreña hacia el Amazonas.

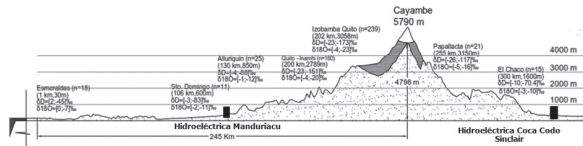


Figura 3. Variación anual de los isotopos estables en un corte de las montañas del Ecuador y los proyectos hidráulicos a los que influyen.

### Efecto de la temperatura

En el Ecuador especialmente existe una gran dependencia de la temperatura con la altitud debido a los drásticos cambios de gradientes desde la parte costera hasta la cordillera andina y luego hacia la Amazonía. Estos cambios orográficos hacen que los valores de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  en precipitaciones varían también fuertemente con la temperatura [8]. Este efecto no solamente es evidente en los valores de la composición isotópica de las precipitaciones sino también en aguas superficiales (Figura 4 y Tabla 1 Tabla 2).

Tabla 2 Datos de temperatura e isotopos de oxígeno en aguas superficiales durante diciembre 2016

DESCRIPCION	Temperatura (° C)	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta D$ (‰)
RIO BLANCO-LLOA	15,2	-10,7	-70,6
RIO MINDO	18,4	-9,1	-58,8
ANTISANA	9,3	-14,3	-101,0
COTOPAXI P14	15	-11,3	-77,4
PITA	11,1	-11,5	-79,9
BOBONAZA	24	-5,5	-28,9
QUEBRADA ISHIQU-EYACU	9,4	-12,6	-87,8

Las correlaciones entre  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  y la temperatura de las aguas superficiales en el Ecuador son:

$$\delta^{18}O = 0.51 T_{rio} - 18.1 \quad (3)$$

$$\delta D = 4.2 T_{rio} - 133.5 \quad (4)$$

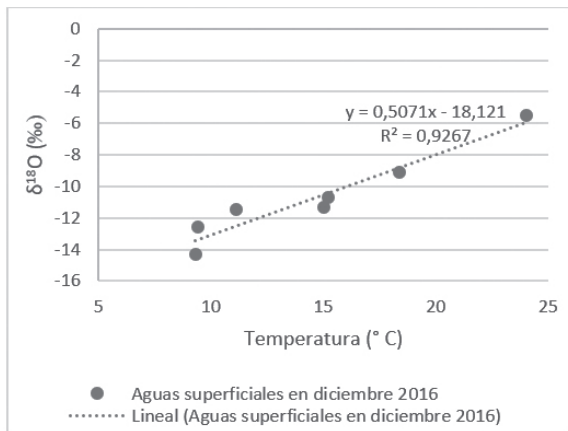


Figura 4. Variación de los isotopos de  $\delta^{18}O$  en función de la temperatura en aguas superficiales del Ecuador.

### Efecto continental

La precipitación se vuelve más liviana o con más déficit de isotopos estables de hidrógeno y oxígeno cuanto más se aleja de su fuente [2]. En el caso del Ecuador la principal fuente de estos isotopos es el Océano Pacífico. Por esta razón, en el presente análisis se realiza una comparación de las tendencias de valores de isotopos de las estaciones ubicadas en las cuencas que drenan hacia el Pacífico y la Amazonía considerando la distancia desde las estaciones hasta el Océano Pacífico.

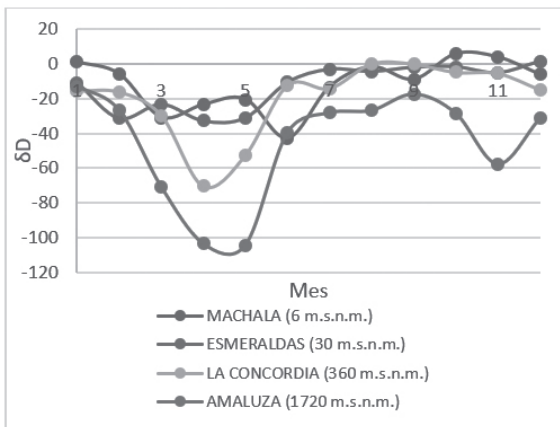


Figura 5. Variación del deuterio en lluvias en estaciones ubicadas en la zona de drenaje hacia el Pacífico. La más cercana es la de Machala a 0 km de distancia, la más lejana es Amaluza a 142 Km de la costa.

Analizando la figura 5 se puede evidenciar el efecto de la distancia en la composición isotópica de las aguas lluvias en la cuenca que drena hacia el Océano Pacífico. Por otro lado, en la figura 6, la zona que drena a la Amazonía presenta un comportamiento inverso. Esta diferencia muestra que el efecto de la distancia es menos influyente en la composición isotópica que el efecto de la altitud.

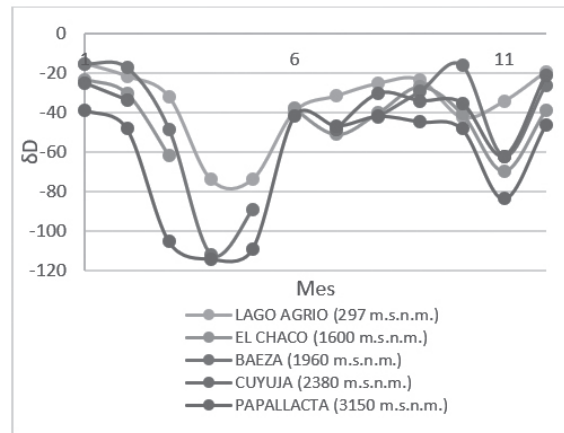


Figura 6. Variación del deuterio en lluvias en estaciones ubicadas en la zona de drenaje hacia la Amazonía. La más cercana al Océano Pacífico es la de Papallacta que se encuentra a 218 km de distancia, la más lejana es la de Lago Agrio a 350 km.

### Efecto de la altitud

Este efecto hace que la composición de isotopos estables de oxígeno e hidrógeno en el agua lluvia disminuya con la altura. El efecto de la altitud en el Ecuador es el más influyente sobre la composición isotópica de las lluvias y escorrentía. La altitud varía desde una elevación de 0 m.s.n.m. en la Costa hasta los 6263.5 m.s.n.m en el Chimborazo en solamente una distancia de aproximadamente 220 km. Luego, la altitud nuevamente disminuye desde la cordillera andina hasta la región amazónica desde los 6263.5 m.s.n.m. hasta los 200 m.s.n.m. en la frontera con Perú.

La composición de isotopos estables de oxígeno en la precipitación varía linealmente con la altitud [2]. Sharp (2017) explica que el gradiente de  $-0.26 \text{ ‰}/100\text{m}$  caracteriza este efecto de la mayoría de lugares en el mundo que alcancen los 5000 m. Sin embargo, en el caso del Ecuador este gradiente alcanza el valor de  $-2.8 \text{ ‰}/100\text{m}$  en diciembre y  $-3.5 \text{ ‰}/100\text{m}$  en mayo (Figura 7).

Debido a estos altos gradientes, el efecto de la altitud no solamente se ve reflejado en la precipitación pues las aguas superficiales también presentan gradientes similares a las de las aguas lluvias (Figura 7). Otro punto importante es que las muestras tomadas de fuentes de origen glaciar en el tope de las montañas presentan valores que no corresponden a la tendencia normal de las lluvias evidenciando la complejidad en la representación de los procesos hidrológicos usando isótopos estables en glaciares. Además, comparando estos puntos con las muestras de aguas en ríos de alta montaña muestran que la principal fuente de estos ríos del páramo no depende principalmente de la desglaciación.

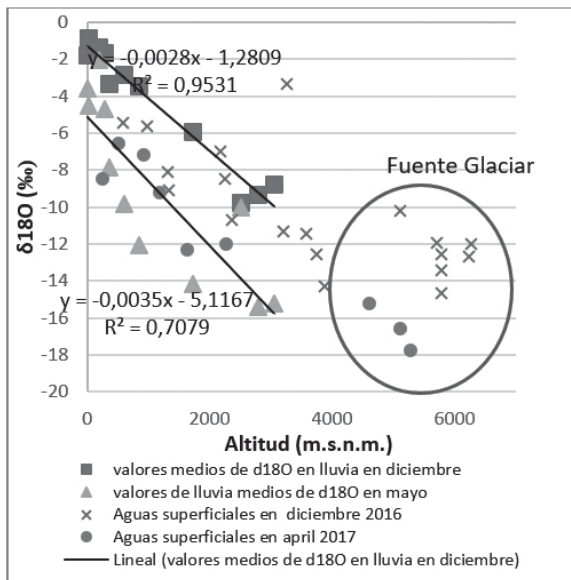


Figura 7. Variación de la composición de isótopos de oxígeno en lluvia y escorrentía en función de la altitud.

### Efecto de la cantidad de precipitación

El efecto de la cantidad de lluvia tiene una correlación negativa con los valores medios mensuales de la composición de isótopos estables de oxígeno e hidrógeno [2]. Según indica toda la literatura existente se ha establecido que mientras más cantidad de lluvia ocurre, menor es el valor de delta [2], [9], [10].

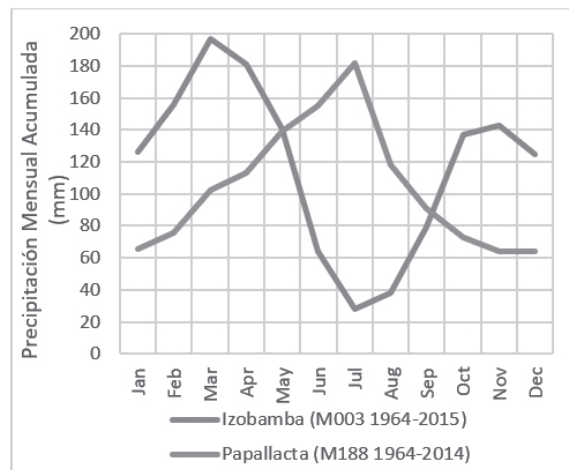


Figura 8. Variación de la cantidad de dos diferentes estaciones del Ecuador localizadas en la zona de drenaje del Pacífico (Izobamba) y Amazonía (Papallacta)

Aunque, prácticamente el efecto de la cantidad de lluvia se evidencia en la mayoría de previos estudios relacionados con hidrología isotópica, en el caso del Ecuador este efecto presenta excepciones. En las figuras 8 y 9 se representan dos estaciones que tienen variación estacional totalmente diferente. La estación de Izobamba ubicada en la cuenca que drena hacia el Pacífico tiene variación bimodal, por otro lado, la estación de Papallacta que drena hacia la cuenca de la Amazonía tiene una variación unimodal (Figura 8). La diferencia en la variación estacional en ambas estaciones evidencia la diferencia de las cantidades de lluvia durante el año en el Ecuador en ambas cuencas. Contrario a la propiedad de los isótopos relacionado con la cantidad de lluvia, estas estaciones presentan la misma tendencia de los valores de la composición de isótopos estables (Figura 9).

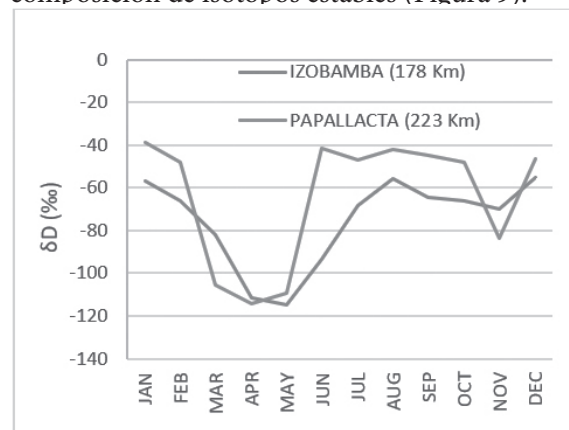


Figura 9. Variación de la composición de deuterio en la lluvia

## Efecto de la variación estacional

Analizando la variación mensual de la composición de isótopos estables en la precipitación se puede observar que el efecto de la altura afecta mayormente durante los meses de marzo, abril y mayo, esto puede ser debido a efectos globales sobre el clima como son los vientos alisios que son un efecto de la ZCIT (Figura 5, Figura 6, y Figura 9).

El resto del año esta variación de isótopos tiene un rango menor evidenciando que puede existir un tipo de precipitaciones que dependen de efectos convectivos en las nubes.

El estudio detallado de estos procesos va fuera del alcance de este documento por lo que se requerirá estudios más profundos para lograr un mejor entendimiento de los efectos climáticos en el Ecuador.

## Conclusiones

El presente estudio muestra que los efectos predominantes en la composición de aguas lluvias en el Ecuador son el efecto de la altitud y la variación estacional (Figura 10).

Adicionalmente, esta variación de la composición de isótopos estables  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  en las aguas lluvias afecta directamente a las composiciones de las aguas superficiales mostrando que la influencia de las lluvias en los proyectos hidráulicos de la zona es predominante en comparación a otros procesos hidrológicos.

Los gradientes de la composición de isótopos estables son similares para los procesos de lluvia-escorrentía y alcanzan valores excepcionales de -3.5 ‰.

La influencia de otros factores globales como el ZCIT deberán ser considerados para el estudio hidrológico en el Ecuador usando isótopos estables.

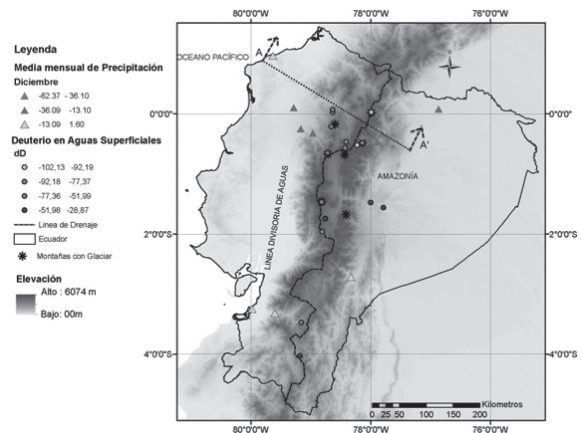


Figura 11. Ubicación y variación de la composición de deuterio en aguas lluvias y superficiales en el Ecuador

## Referencias

- [1] J. R. Gat, «Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle», Annual Review of Earth and Planetary Sciences, vol. 24, n.o 1, pp. 225–262, 1996.
- [2] Z. Sharp, «Principles of stable isotope geochemistry», 2017.
- [3] P. Lima, M. Stone, E. Ortiz, y B. Andrew, «Analysis rainfall trends in ecuadorian andean mountains over 3000 mand their effects in hydropower projects», Congreso REDU, pp. 12–16, oct. 2018.
- [4] Y. Hu, D. Li, y J. Liu, «Abrupt seasonal variation of the ITCZ and the Hadley circulation», Geophysical Research Letters, vol. 34, n.o 18, sep. 2007.
- [5] M. C. Molles, y C. N. Dahm, «A Perspective on El Niño and La Niña: Global Implications for Stream Ecology», Journal of the North American Benthological Society, vol. 9, n.o 1, pp. 68–76, mar. 1990.
- [6] M. Newman et al., «The Pacific Decadal Oscillation, Revisited», Journal of Climate, vol. 29, n.o 12, pp. 4399–4427, jun. 2016.

- [7] «WaterIsotopes.org». [En línea]. Disponible en: <http://wateriso.utah.edu/waterisotopes/>. [Accedido: 20-jul-2018].
- [8] W. Dansgaard, «Stable isotopes in precipitation», *Tellus*, vol. 16, n.º 4, pp. 436-468, 1964.
- [9] J. Gat, *Isotope hydrology: a study of the water cycle*, 1 online resource (vii, 189 pages) : illustrations. vols. London: : Imperial College Press, 2010.
- [10] J. Galewsky, H. C. Steen-Larsen, R. D. Field, J. Worden, C. Risi, y M. Schneider, «Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle», *Rev. Geophys.*, vol. 54, n.º 4, p. 2015RG000512, dic. 2016.