



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN**

**PROGRAMA DE POSGRADO**

**“Análisis de los procesos de formación y renovación de aguas de  
recarga subterránea en la cuenca El Guayabo, Bajo Lempa, El Salvador”**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de  
Posgrado como requisito para optar al grado de**

***MAGISTER SCIENTIAE***

**en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas**

**Yaneth Alvarado Callejas**

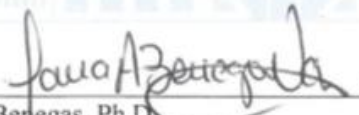
**Turrialba, Costa Rica**

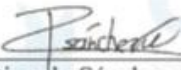
**2018**

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de


**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL  
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**FIRMANTES:**

  
\_\_\_\_\_  
Laura Benegas, Ph.D.  
Directora de tesis

  
\_\_\_\_\_  
Ricardo Sánchez, Ph.D.  
Miembro Comité Consejero

  
\_\_\_\_\_  
Arturo Hernández, Ph.D.  
Miembro Comité Consejero

  
\_\_\_\_\_  
Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.  
Decana Escuela de Posgrado

  
\_\_\_\_\_  
Yaneth Alvarado Callejas  
Candidata

## **Dedicatoria**

*A*

*Dios.*

*A mi madre.*

*A mi Andy, motor de vida.*

*A mi papá, Rocío, Danilo, Estela y Sara.*

*A todas mis tías, tíos y sobrinos, son la forma más bella  
de expresión de amor que tiene Dios para demostrarme su incondicionalidad.  
A todos los compañeros de la generación 2016, compañeros de batallas en el paso de  
esta aventura.*

## **Agradecimientos**

Al Creador, dador de vida y sabiduría.

A mi hermosa familia, principalmente a mi madre Estela Callejas, por depositar siempre esa confianza en mí y dejarme saber que si se quiere se puede lograr todo lo que se propone en esta vida.

A mi hijo Andy, motor de mi vida.

A mis padres y hermanos, quienes amo tanto y son siempre apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida.

Al Comité de Tesis: Laura Benegas Negri, Ricardo Sánchez Murillo y Arturo Antonio, por apoyar este trabajo de grado y permitirme adquirir nuevos conocimientos y enriquecer mi formación profesional.

Al DAAD Programa Regional de Becas, por otorgarme la oportunidad de financiamiento durante todo el programa de maestría, al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), al claustro de profesores en Cuencas que colaboraron a que pudiera adquirir el grado de *Magister Scientiae*.

Gracias al proyecto WaterClima-LAC, Gestión de zonas costeras, por el apoyo financiero para la realización del estudio, Walter Chacón, José Antonio, a don Alejandro Félix, y a los pobladores de la cuenca El Guayabo.

## CONTENIDO

I INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivos.....	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos .....	4
Preguntas de investigación.....	4
MARCO DE REFERENCIA .....	5
2.1 El recurso hídrico en Centroamérica y El Salvador.....	5
2.2 El agua subterránea .....	5
2.2.1 Los acuíferos.....	5
2.3 El ciclo hidrológico y los isótopos ambientales .....	7
2.3.1 Procesos atmosféricos y la composición isotópica del agua. ....	9
2.4 Isótopos, terminología y unidades.....	10
2.4.1 Estándar de referencia .....	11
2.4.2 Fraccionamiento isotópico .....	11
2.5 Línea Meteórica Global del Agua y la composición de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ .....	12
2.5.1 Línea Meteórica Local o LMWL .....	13
2.6 Deuterio en exceso .....	14
2.8 La zona de estudio .....	15
II ARTÍCULO. ....	17
COMPOSICIÓN Y VARIACIÓN ESPACIAL DE ISÓTOPOS ESTABLES EN LA CUENCA EL GUAYABO, SAN VICENTE. EL SALVADOR. ....	17
RESUMEN.....	17
2.1 Introducción.....	18
METODOLOGÍA .....	20
3.1 Descripción de la zona de muestreo .....	20
3.1.1 El clima de la zona .....	20

3.1.2 Hidrogeología de la zona .....	21
3.2.1 Recolección de precipitación y agua superficial .....	22
3.2.2 Muestreo de agua subterránea .....	23
3.2.3 Análisis de las masas de aire en la zona de estudio .....	24
4 RESULTADOS .....	24
4.1 Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de precipitación y agua subterránea durante el periodo seco en la cuenca El Guayabo .....	24
4.1.2 Composición isotópica de la lluvia .....	25
4.1.3 Composición isotópica subterránea .....	28
4.2 Variación espacial de isótopos estables y el origen de las masas de aire en la cuenca El Guayabo .....	29
5 DISCUSIÓN .....	32
5.1 Composición isotópica subterránea .....	32
5.2 Composición isotópica en agua superficial .....	33
5.3 Composición isotópica en la precipitación .....	33
6 CONCLUSIONES .....	34
BIBLIOGRAFÍA .....	35
Anexos .....	40

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Relación de la humedad relativa y el efecto fraccionamiento isotópico.....	21
Tabla 2.- Puntos de recolecta de lluvia, Octubre 2016 a Junio 2017.....	23

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Representación esquemática de un sistema hidrogeológico.....	6
Figura 2.- Línea local del agua meteórica para la región montañosa del Norte del Valle Central de Costa Rica en 2013.....	14
Figura 3.- Climograma: estación Puente Cuscatlán y beneficio Acahuapa .....	20
Figura 4.- Ubicación de la Cuenca El Guayabo.....	21
Figura 5.- Puntos de recolección de agua subterránea en la cuenca El Guayabo.....	23
Figura 6.- Lluvia anual acumulada 2015 y 2016 comparado con el promedio (1981-2010).....	25
Figura 7.- Composición isotópica de la precipitación durante el periodo seco 2016-2017 en la cuenca EL Guayabo, Bajo Lempa.....	26
Figura 8.- Línea meteórica mundial o GMWL (línea solida) y línea meteórica local (línea intermitente).....	27
Figura 9.- Composición isotópica subterránea promedio, cuenca EL Guayabo.....	28
Figura 10.- Composición isotópica, agua de precipitación y pozos o agua subterránea en la época seca 2017, cuenca EL Guayabo.....	29
Figura 11.- Composición isotópica en los tres putos de precipitación contra la fecha de la precipitación.....	30
Figura 12.- Fuentes de humedad durante la época de muestreo.....	31

## LISTA DE ACRONIMOS

ANDA:	Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados
ARL:	Laboratorio de Recursos del Aire
GMWL:	Global Meteoric Water Line
GNIP:	Global Network of Isotopes in Precipitation
GDASA:	Sistema Global de Asimilación de Datos
HYSPLIT:	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory
MARN:	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
NIST:	Instituto Nacional de Tecnología y Estandarización
NOAA:	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
OIEA:	Organismo Internacional de Energía Atómica
OMM:	Organización Meteorológica Mundial
SMOW:	Standard Mean Ocean Water
VSMOW:	Vienna Standard Mean Ocean Water
ZCIT:	Zona de Convergencia Intertropical



## I INTRODUCCIÓN

En Centroamérica, la escasez del agua o sequía tiene una definición diferente a la de otras partes del mundo. Ésta se relaciona con la distribución anómala de la precipitación, donde el ciclo anual muestra una distribución bimodal con máximos en junio y septiembre-octubre y un mínimo relativo durante julio y agosto, conocida como sequía de verano o "canícula"; fenómeno influenciado por las fluctuaciones en intensidad y localización de la Zona de Convergencia Inter Tropical del Pacífico, más los vientos alisios, resultando en precipitaciones máximas a lo largo de la costa caribeña y precipitación mínima a lo largo de la costa del Pacífico de Centroamérica; este fenómeno también se ha relacionado estrechamente con la fase cálida del fenómeno de El Niño (Magaña *et al.* 1999; Algeet Abarquero *et al.* 2012; Meyrat *et al.* 2012; Sánchez-Murillo *et al.* 2016).

La amenaza de sequías prolongadas, más la variación acelerada en los patrones de precipitación y temperatura que acarrea el cambio climático prevé efectos negativos en los sistemas de producción agrícola y la seguridad alimentaria de la región (Sepúlveda López y Ibrahim 2013). La sequía es evidente en países como Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, el noroeste de Costa Rica y el arco seco de Panamá, que forman parte del recién declarado Corredor Seco, por integrar un grupo de ecosistemas característicos de una eco región del bosque tropical seco, que inicia en Chiapas, México; y abarca las zonas bajas de la vertiente del Pacífico y gran parte de la región central pre montana (Meyrat *et al.* 2012; Sánchez-Murillo y Birkel 2016a).

En la vertiente Pacífica de Centroamérica escurre únicamente el 30%, pero en ella se ubica el 70% de la población y se concentra la mayor actividad económica. Debido a los patrones de distribución, así con la demanda sobre los recursos, muchos territorios y poblaciones padecen situaciones de estrés hídrico (Ballesteros 2005).

Para 1992, un 42% de habitantes rurales y un 83% urbanos contaban con algún sistema de abastecimiento de agua potable; en la actualidad, las cifras han aumentado, pero cada vez más población está recibiendo agua de dudosa calidad (CAAD 1998).

En particular, El Salvador es un país altamente dependiente del recurso hídrico, y debido a la poca área, este en su mayoría es compartido. La cuenca del río Lempa es la más importante para el país, con una superficie de 18,240 km<sup>2</sup>, de los cuales, el 56% pertenecen a este país, el 14% y 30% restantes, a Guatemala y Honduras, respectivamente. Las plantas hidroeléctricas, los sistemas de riego y el abastecimiento humano en El Salvador dependen del estado, de la conservación de esta cuenca y de la recarga de aguas del subsuelo (CAAD 1998; GWP-CA 2005b).

La variación del ciclo hidrológico y la distribución irregular del recurso hídrico (IPCC 2014), ha generado la necesidad de incrementar los estudios y el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de aguas subterráneas. Las mediciones sistemáticas a largo plazo de los niveles de agua proporcionan datos esenciales necesarios para evaluar los cambios en el recurso a lo largo del tiempo, así como desarrollar modelos de aguas subterráneas, pronosticar

tendencias, diseñar, implementar y monitorear la efectividad de los programas de manejo y protección del agua subterránea (Taylor y Alley 2001).

La comprensión de los patrones de precipitación, sobre todo su distribución espacial y temporal, proporciona más información sobre los procesos hidrológicos regionales y globales y da paso a una mejor planificación y preparación para posibles cambios futuros en el clima, constituyendo herramientas eficaces para los decisores y organismos ambientales que priorizan esfuerzos y recursos en las cuencas no aforadas, donde potenciales futuras sequías o inundaciones pueden afectar drásticamente las agrupaciones ecológicas y las actividades socioeconómicas (Sánchez-Murillo *et al.* 2013).

Actualmente, para el estudio de los recursos naturales, y en específico del recurso hídrico, se han desarrollado metodologías basadas en mediciones isotópicas. Éstas se utilizan para la descripción de balances hídricos, aprovechando los cambios naturales de la composición isotópica de las diferentes fuentes de agua, las cuales varían debido al fraccionamiento isotópico, provocados por los complejos procesos de transporte y las transiciones de fase a través de la atmósfera, la litosfera y la biosfera (Unkovich *et al.* 2013).

En particular, los isótopos estables  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , se reparten selectivamente en cada etapa del ciclo hidrológico, desde la evaporación sobre los océanos, a través de la condensación y precipitación y la recarga de aguas subterráneas y descarga como escorrentía. Su variación espacial y temporal proporciona una huella característica del origen y la historia de los cambios de fase del agua. Esta es la huella química fundamental en que se basan las metodologías de análisis de la hidrología isotópica (Gat 1996; Kortelainen 2007).

Existen algunos estudios hidrológicos en Centroamérica y Belice que han incorporado isótopos estables (Lachniet y Patterson 2002; Marfia *et al.* 2004; Lachniet y Patterson 2009; Algeet Abarquero *et al.* 2012; Sánchez-Murillo *et al.* 2013; Corrales *et al.* 2016; Sánchez-Murillo y Birkel 2016a; Sánchez-Murillo *et al.* 2016), con el objetivo de comprender la complejidad de los componentes del ciclo hidrológico y los procesos de recarga, distribución y su relación con las características de la zona en lagos, regiones montañosas, islas y aguas subterráneas.

Las relaciones sistemáticas entre el contenido de isótopos estables y parámetros climáticos son útiles para la caracterización y la cuantificación de los regímenes de transporte de masas de aire y las fluctuaciones estacionales, y puede adaptarse para estudios locales y regionales (Froehlich *et al.* 2001a; Bowen 2010; Sánchez-Murillo *et al.* 2016). Por lo tanto, el estudio del contenido isotópico en los cuerpos de agua en países de la región es importante para conocer las características de los flujos en zonas de recarga hídrica principalmente para asentamientos con difícil acceso al agua.

En El Salvador los cuerpos de agua superficial se encuentran seriamente deteriorados, menos del 10% presentan una buena calidad de agua, según el monitoreo de las autoridades competentes (MARN 2013b), por lo que se estima que más de un ochenta por ciento de los sistemas de abastecimiento de agua potable del país se alimentan de pozos y manantiales (Losilla 2001). La zona de regeneración más importante del país se distribuye principalmente a lo largo de la cordillera costera y los flancos del volcán El Boquerón. En el área urbana, por

ejemplo, la capa freática en los acuíferos se encuentra entre 30 y más de 200 m por debajo de la superficie (Schiaidt-thomé 1975).

Es conocido que el estudio y evaluación del agua subterránea requiere técnicas específicas y equipos más sofisticado comparado con el estudio del agua superficial, por lo que toda técnica que ayude a dilucidar el comportamiento natural de los recursos subterráneos en una región determinada tiene gran potencial. El estudio de la composición de isótopos estables  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  resultan eficaces para conocer mejor el ciclo hidrológico, logrando grandes aportes cuando se usan en combinación con los métodos hidrológicos convencionales.

El presente estudio se enmarca dentro del proyecto Waterclima LAC- Gestión de zonas costeras, específicamente en la zona Piloto del Bajo Lempa, desarrollado para evaluar los aspectos sociales, biofísicos y económicos que afectan al recurso hídrico en la zona. Mediante el estudio de la composición isotópica del agua subterránea, de precipitación y superficial fue posible conocer los principales aportes de infiltración que recibe el acuífero durante la época seca en la parte baja de la cuenca El Guayabo, en la zona del bajo Lempa El Salvador.

### **Definición del problema**

En El Salvador, se estima que más de un 80% de los sistemas de abastecimiento de agua potable se alimentan de pozos y manantiales; en 1980, habían 685 pozos con una extracción anual de 149 millones  $\text{m}^3$  /año, de los cuales más de la mitad se ha utilizado para abastecimiento humano (Losilla 2001). En la zona del bajo Lempa, las prácticas de producción agroindustrial, la interacción de patrones inadecuados de ocupación de la tierra con amenazas naturales y antrópicas, las prácticas agrosilvopastoriles inadecuadas, la sobreexplotación del recurso pesquero y otras acciones de deforestación o cambio de uso de suelo destacan como los principales elementos que comprometen la calidad y disponibilidad del recurso hídrico e incrementan las condiciones de riesgo para la población (MARN 2004).

Las actividades agrícolas y productivas que se dan en las zonas altas y medias de las cuencas, comprometen y limitan seriamente la calidad del agua en la parte baja, obligando a la población de las zonas costeras a la explotación del recurso subterráneo como alternativa de abastecimiento. Este hecho también hace dirigir la atención para conocer el estado de los acuíferos, a través de estudios especializados, que permitan caracterizar y determinar la disponibilidad a futuro del recurso.

## 1.1 Objetivos

### Objetivo general

Conocer el proceso de recarga subterránea durante el caudal base de la cuenca El Guayabo, Bajo Lempa, El Salvador.

### Objetivos específicos

- Analizar la composición isotópica base de la precipitación y agua subterránea durante la época seca en la cuenca El Guayabo.
- Analizar la variación espacial de isótopos estables y el origen de las masas de aire en la cuenca El Guayabo.

### Preguntas de investigación

<i>Objetivos Específicos</i>	<i>Preguntas de investigación</i>
<b>1- Analizar la composición isotópica base de la precipitación y agua subterránea durante la época seca en la cuenca El Guayabo.</b>	<p>¿Cuál es la composición de isótopos estables en muestras de agua de precipitación, agua superficial y subterránea de la cuenca El Guayabo?</p> <p>¿Cuál es el comportamiento de la línea meteórica local con relación con la línea meteórica global?</p> <p>¿La composición isotópica del agua subterránea es similar a la de las precipitaciones en la zona, dada la permeabilidad de la zona de recarga?</p>
<b>2- Analizar la variación espacial de isótopos estables y el origen de las masas de aire en la cuenca El Guayabo.</b>	<p>¿Existe variación espacial en la composición isotópica en la cuenca El Guayabo?</p> <p>¿Cuáles son los principales aportes de humedad en la zona y las características climáticas que influyen en la composición isotópica de la precipitación?</p>

## **MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1 El recurso hídrico en Centroamérica y El Salvador**

En la vertiente Pacífica escurre únicamente el 30% del total de agua contenida en la región, y se ubica entre el 70 y 80% de la población, concentrando ahí la mayor actividad económica. La mala distribución y la creciente demanda de los recursos, lleva a que muchos territorios y poblaciones padezcan situaciones de estrés hídrico (Vargas 1992; Ballestero 2005).

El creciente desequilibrio entre oferta y demanda, hace que los procesos de producción se desarrollen de forma desequilibrada en las áreas metropolitanas, contaminando el recurso superficial y obligando la explotación de fuentes subterráneas para abastecimiento humano (Losilla 2001; Van der Zee Arias *et al.* 2012).

En Centroamérica, la sequía afecta más a la agricultura y a la ganadería, que al sistema de recarga de las fuentes de agua, por lo que la sequía meteorológica es suficientemente acentuada para transformarse en una sequía agrícola y un tanto a la agropecuaria (Losilla 2001); sin embargo, su prolongación no llega al grado de evolucionar a sequía hidrológica severa. Las fuentes de recarga dependen en la época lluviosa, la cual en el Pacífico inicia entre abril-mayo y se prolonga hasta fines de noviembre, mientras que la época seca entre diciembre y abril, durante la cual se observan 2 máximos en junio y octubre, como respuesta a la migración de la ZCIT (Poveda *et al.* 2006).

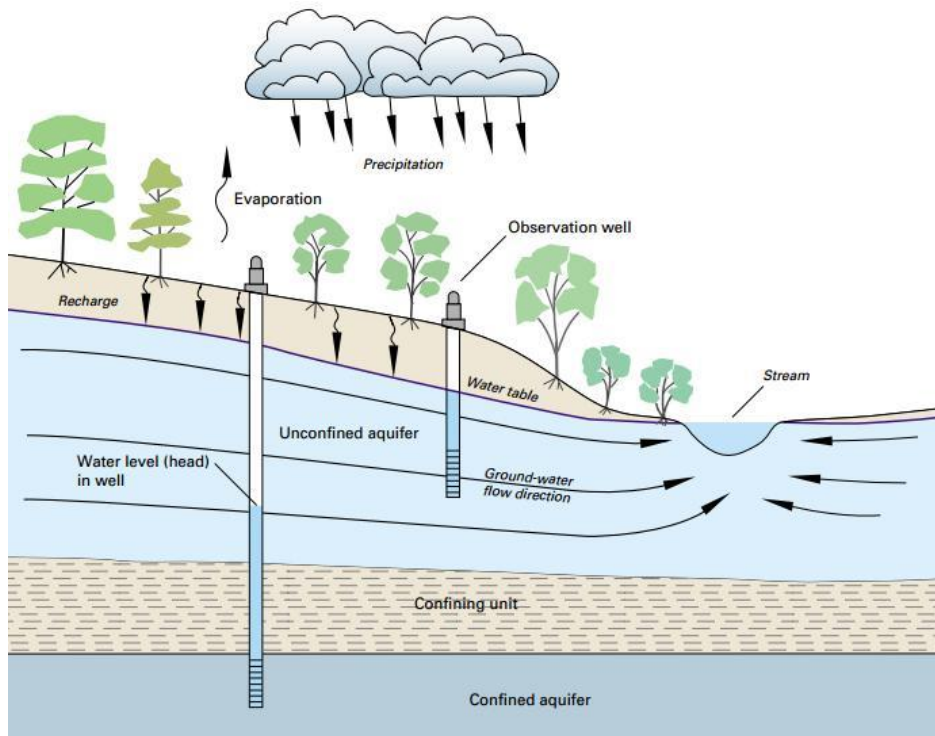
La demanda hídrica está aumentando debido al crecimiento social y económico del país. El agua para consumo humano es escasa, y el área rural se agrava debido a la ausencia de infraestructura de almacenamiento (Losilla 2001; GWP-CA 2005a). Las adversidades en cuanto al recurso hídrico se presentan por un mal uso y manejo de las cuencas, de tal manera que sus efectos pueden ser menores si se emplea un uso eficiente de este (Meyrat *et al.* 2012).

### **2.2 El agua subterránea**

#### **2.2.1 Los acuíferos**

Los acuíferos son definidos como el medio rocoso en que se mueve el agua subterránea, compuestos por rocas con características, tales que conducen cantidades de agua económicamente utilizables; a la vez que cumplen funciones de almacenamiento y conducción de agua subterránea y como medio de intercambio geoquímico (Werner 1996). El agua subterránea se mueve de elevaciones más altas a elevaciones más bajas y desde ubicaciones de presión más alta hasta ubicaciones de presión más baja. Por lo general, este movimiento es bastante lento.

**Figura 1.** Representación esquemática de un sistema hidrogeológico



Fuente: (Taylor y Alley 2001).

Los acuíferos pueden ser confinados o no confinados. Cuando hay niveles múltiples de acuíferos, el acuífero más alto típicamente no está confinado, como se muestra en la figura 1. La recarga vertical de un acuífero no confinado se da por agua de lluvia o agua de riego, que se filtra hacia abajo a través del suelo. La capa freática en la parte superior del acuífero no confinado puede migrar libremente hacia arriba y hacia abajo dentro de la formación de sedimentos, dependiendo de la cantidad de agua almacenada allí. El nivel de agua en un pozo perforado en un acuífero no confinado estará a la misma profundidad que el nivel freático en el acuífero (Werner 1996; Harter 2003).

El fenómeno de infiltración hacia el subsuelo conlleva a una serie de procesos de interacción agua-roca. El agua infiltrada debe encontrar un nuevo estado de equilibrio con el acuífero y este se logra por medio de reacciones específicas entre el sólido y el agua (PRISMA 2001).

En cuanto a su composición isotópica, como regla general, una vez infiltrada, las aguas subterráneas cambian su composición isotópica solo en la medida en que se produce la mezcla con otras aguas. A diferencia de los marcadores medioambientales radiactivos, la composición del isótopo estable no depende intrínsecamente del tiempo ni se establecen escalas de tiempo. Por lo tanto, los isótopos estables ayudan a resolver cuestiones sobre el origen del agua y el grado de mezcla. En este sentido, su papel es similar a los trazadores químicos, como la salinidad. Los trazadores isotópicos suelen tener ventajas prácticas de una mayor variabilidad

de la composición y de interacciones menores con el suelo y el material rocoso, siempre que las temperaturas no sean demasiado altas (Gat y Gonfiantini 1981a).

### 2.3 El ciclo hidrológico y los isótopos ambientales

Todos los componentes del complejo sistema terrestre presentan naturalmente cierta cantidad de isótopos que no son más que elementos químicos con el mismo número atómico, pero con diferente masa, sin embargo, solo algunos tienen importancia práctica para su estudio. Los principales isótopos que componen los sistemas hidrológicos, geológicos y biológicos son el H, C, N, O, P y S; los cuales han aumentado dada la especialización de los equipos y métodos de análisis. Ahora, los isótopos han abierto una nueva gama para el estudio del ciclo hidrológico (Clark y Fritz 1997; Reyes-García y Andrade 2007).

Los isótopos naturales  $\text{H}_2\text{O}^{16}$ ,  $\text{HDO}^{16}$  y  $\text{H}_2\text{O}^{18}$ , son un componente intrínseco de la molécula de agua (Dansgaard 1964). Se reparten selectivamente en cada paso del ciclo hidrológico, desde la evaporación primaria sobre los océanos, pasando por la condensación y la precipitación hasta la recarga de aguas subterráneas y la escorrentía hacia los mares. Los isótopos proporcionan huellas características del origen y la historia del agua. Esta huella digital es la base de la hidrología isotópica (Gat 1996).

El mayor cambio en la composición isotópica del agua ocurre en la parte atmosférica del ciclo hidrológico y en aguas superficiales, las cuales están expuestas a la atmósfera. El suelo y el agua subterránea "heredan" o guardan una marca isotópica al infiltrarse, a excepción de una mezcla subterránea de composición isotópica diferente (Gat y Gonfiantini 1981a).

El Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), en conjunto con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), mantienen investigaciones sobre la composición de isótopos en precipitación en diversos puntos a escala global; de lo cual han observado que la distribución de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  mantienen relación con las características del sitio como la altitud, distancia de la costa, temperatura ambiental y cantidad de precipitación. Así para una localidad en específico, se considera que la composición isotópica estaría en función de la medida de la lluvia o humedad de la masa de aire que se desplaza desde la fuente u origen hasta el sitio donde precipita (Rozanski y Araguás-Araguás 1995; Araguas-Araguas *et al.* 2000).

El estudio de la composición isotópica del agua ( $\delta^{18}\text{O}$  o  $\delta^2\text{H}$ ) y su uso como trazadores naturales en el ciclo hidrológico ayuda en la identificación de diferentes masas de agua, su dinámica y el rastreo de sus interrelaciones (Gat 1996; Stumpp *et al.* 2014; Hernández-Antonio *et al.* 2015).

Al ser estables, los isótopos tienen propiedades físicas y químicas ligeramente diferentes y requieren energía para los cambios de fase. Estos cambios ocurren en varias escalas dentro del ciclo hidrológico global, resultando en cambios relativos de su distribución espacio-temporal (Yoshimura 2015).

## Durante la precipitación

Cuando el vapor se condensa para crear una nube, las moléculas de agua que contienen los isótopos más pesados se condensan primero; la eliminación continua de la fase condensada por precipitación gradualmente agota los isótopos pesados y la composición de la precipitación y el vapor se hace más ligero (es decir, los valores  $d$  se vuelven más negativos) a medida que avanza la precipitación (Dansgaard 1964; Mazor 2003).

Las variaciones de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  en el vapor de agua atmosférico a partir del fraccionamiento de isótopos durante la evaporación del océano y la posterior condensación durante la formación de lluvia ocurren casi exclusivamente en la parte atmosférica del ciclo hidrológico, incluida la superficie de la Tierra. (Araguas-Araguas *et al.* 2000). Una vez que el agua ha penetrado profundamente en el suelo, debajo de la zona no saturada, su composición isotópica permanece prácticamente sin cambios durante el movimiento y almacenamiento sub-superficial "excepto a alta temperatura donde puede ocurrir el intercambio isotópico de oxígeno con la matriz de la roca". Es importante recordar que aunque una tormenta individual puede ser grande e isotópicamente muy diferente de la del agua vieja en la cuenca, la cantidad de precipitación que se infiltrará probablemente sea pequeña en comparación con la cantidad de agua vieja almacenada (Araguas-Araguas *et al.* 2000; Taylor y Alley 2001).

En resumen, Gat (1996) considera que los principales procesos hidrológicos que afectan la huella digital isotópica del agua son:

1. formación primaria de vapor atmosférico por evaporación bajo diferentes condiciones de humedad,
2. condensación en nubes y precipitación a lo largo de un gradiente de temperatura, impartiendo un agotamiento gradual tanto del vapor como de las sucesivas precipitaciones,
3. evaporación de suelos y aguas superficiales, que enriquece el agua residual en ambos isótopos,
4. 4) mezcla de aguas en la superficie o subsuelo, un proceso que a menudo ocurre en pozos abiertos que pueden conectar y muestrear zonas de acuíferos poco profundos y profundos.

En aguas superficiales y subterráneas, las condiciones de aguas dulces, generalmente, tienen su "firma" isotópica que refleja su origen. Sin embargo, si las aguas dulces se evaporan, se enriquecerán isotópicamente. Esto se debe a la pérdida de isótopos ligeros en la fracción de vapor. Además, si la evaporación se produce en condiciones de baja humedad (es decir, inferior al 100% de saturación), los efectos de no equilibrio o "cinéticos" imparten un fraccionamiento adicional (Tabla 1).

El fuerte efecto isotópico cinético de la evaporación modifica la relación meteórica de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ . Esto puede ocurrir durante el flujo por tierra en paisajes áridos, durante la retención en lagos y embalses, y durante la infiltración a través de suelos y superficies de arena. También puede ocurrir por las lluvias ligeras que caen a través del aire cálido y seco, según lo observado por Dansgaard (1964) como el efecto de la cantidad (Clark y Peter 1997).



**Tabla 1:** Relación de la humedad relativa y el efecto fraccionamiento isotópico.

<b>Pendiente</b>	<b>3.9</b>	<b>4.2</b>	<b>4.5</b>	<b>5.2</b>	<b>6.8</b>	<b>8</b>
<b>Humedad</b>	0	25%	50%	75%	95%	100%

Fuente: Tomado de Clark y Peter (1997).

### **2.3.1 Procesos atmosféricos y la composición isotópica del agua.**

En Centroamérica y Suramérica, la distribución espacial y temporal de los isótopos estables en la precipitación está regida por:

- a) los océanos Pacífico, Atlántico y Caribe,
- b) cadenas montañosas que liberan flujos de aire que conducen a una condensación de la humedad a lo largo de las laderas debido al levantamiento orográfico de las masas de aire,
- c) la presencia de la cuenca evaporativa más grande del mundo, y
- d) la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical o ZCIT (Guswa *et al.* 2007).

La composición isotópica del  $\delta^{18}\text{O}$ , varía dentro de un rango relativamente estrecho entre  $-2\text{‰}$  y  $-7\text{‰}$ . Sus valores medios siguen de cerca la Línea de Agua Meteorológica Global (WML); aunque se pueden observar desviaciones localmente significativas (Rozanski y Araguás-Araguás 1995).

En el último evento Niño registrado, Sánchez-Murillo *et al.* (2016) estudiaron en Costa Rica los isótopos estables en la precipitación a lo largo del periodo 2013-2016, la composición de  $\delta^2\text{H}$  varió de  $-129,4$  a  $+18,1$  (‰) con una media aritmética de  $-49,4 \pm 32,4$  (‰) ( $1\sigma$ ), mientras que la composición de  $\delta^{18}\text{O}$  varió desde  $-17,3$  hasta  $+1,0$  (‰) Con una media aritmética de  $-7,3 \pm 4,0$  (‰) ( $1\sigma$ ) evidenciando la gran influencia de la temperatura, las fuentes de humedad, el tipo de precipitación entre otros factores condicionantes de la composición isotópica.

En general, todos los procesos atmosféricos que influyen en pérdidas de agua por evaporación, incorporación de humedad atmosférica reciclada por evapotranspiración, y mezcla entre reservorios isotópicamente distintos, dejan una huella química única que puede ser utilizada para entender los procesos de lluvia-escorrentía, trayectorias complejas de flujos de agua, conectividad de aguas subterráneas y superficiales, análisis de flujo de base de recesión, entre otros (Lachniet y Patterson 2002; Corrales *et al.* 2016).

De este modo, la composición isotópica se encuentra correlacionada con varios parámetros ambientales como la altitud, distancia de la costa, la cantidad de precipitación, la temperatura superficial (Dansgaard 1964; Rozanski *et al.* 1982; Scholl *et al.* 2009). En una perspectiva general, la composición de  $\delta^{18}\text{O}$  o  $\delta^2\text{H}$  de un evento de precipitación dado se puede interpretar como el resultado de la "historia" previa de las masas de aire húmedo, que a su vez puede

entenderse en términos de los patrones de circulación atmosférica y los mecanismos involucrados en la evaporación y condensación de agua (Araguas-Araguas *et al.* 2000).

En Centroamericana, particularmente, se ha observado que la composición isotópica es definida o afectada por la influencia del fenómeno de El Niño, los cambios en la circulación atmosférica y la humedad proveniente de América del Sur; además, el complejo sistema de estacionalidad indica valores más altos o enriquecidos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  durante meses con menor precipitación, y valores más bajos o empobrecidos en  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  correlacionados con la cantidad de precipitación, conocido como el *efecto de la cantidad* (Dansgaard 1964; Scholl *et al.* 2009).

## 2.4 Isótopos, terminología y unidades

La palabra "isótopo" viene del griego *isos* = iguales y *topos* = lugar que presuntamente se refieren a su "dirección elemental" o ubicación específica dentro de la tabla periódica de los elementos. Los isótopos estables no tienden a decaer a cualquier otro isótopo o nucleído una vez que se forman. Por el contrario, los isótopos radiactivos se desintegran espontáneamente, emitiendo partículas alfa o beta, para convertirse en isótopos estables (Unkovich *et al.* 2013).

Para uniformizar las mediciones de isótopos estables del agua, se ha desarrollado un método con el cual se miden simultáneamente las diferencias relativas o absolutas entre dos muestras (un patrón y la muestra); con el objetivo de conocer las variaciones en la composición isotópica para un área específica respecto a un promedio mundial aceptado (Dansgaard 1964; Clark y Fritz 1997).

En los diferentes componentes de la biosfera, las variaciones en los niveles base de la mayoría de los isótopos estables son muy pequeñas, esas variaciones hacen que por lo general sus abundancias se expresen como partes por mil (‰), la desviación de una norma o estándar aceptado internacionalmente. Esta notación se utiliza debido a que la abundancia absoluta de los isótopos menores es, por lo general, menor del 1% del total para un elemento dado (por ejemplo  $^2\text{H}$  normalmente sólo representa el 0,015576 % de hidrógeno). Estos valores relativos de la desviación de una norma arbitraria (pero internacionalmente aceptada) son conocidas como delta ( $\delta$ ) valores con unidades de ‰ (Kortelainen 2007; Unkovich *et al.* 2013).

De este modo, el valor  $\delta$  de cualquier material se calcula como:

$$\delta = \left( \frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estandar}}} - 1 \right) * 1000$$

Donde:

**$R_{\text{muestra}}$** : es la relación del isótopo de interés  $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$  o  $\text{H}^2/\text{H}$

**$R_{\text{estandar}}$** : estándar de referencia

**$\delta$** : valor obtenido del  $\delta^{18}\text{O}$  o  $\delta^2\text{H}$ .

Un valor delta en partes por mil que es positivo significa que la muestra contiene más isótopos pesados o enriquecidos que el estándar de referencia. Del mismo modo, una muestra con valor negativo o empobrecido implica que la muestra contiene menos isótopos pesados que

el estándar de referencia; por ejemplo, un valor de  $\delta^{18}\text{O} = 10 \text{ ‰}$  significa que hay 10 partes por mil más de  $^{18}\text{O}$  en la muestra respecto al estándar (Kendall y McDonnell 1998).

Para analizar el comportamiento de los diferentes procesos de formación y renovación de aguas subterráneas en la cuenca, se utiliza la línea meteórica local versus la línea meteórica global ( $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ ) (Craig 1961).

#### **2.4.1 Estándar de referencia**

Existe una lista de patrones de referencia mundialmente aceptados y bajo los cuales se expresan y comparan las concentraciones de isótopos naturales estudiados. Para su medición, históricamente, se ha utilizado espectrometría de masas, ahora, con el creciente interés de estos estudios, se ha desarrollado la espectrometría atómica de relaciones isotópicas IRMS (por sus siglas en inglés), con un valor delta aceptado por definición en un estándar de referencia y expresado en ‰. (Mazor 2003). Los estándares de referencia son elaborados por el Organismo Internacional de Energía Atómica OIEA en Viena, Austria y el Instituto Nacional de Tecnología y Estándares (ANDA) de Estados Unidos (Unkovich *et al.* 2013).

El océano, que es el reservorio de agua más grande y relativamente homogéneo, fue elegido como el estándar de referencia para la escala delta de isótopos de oxígeno e hidrógeno en muestras de agua (Gat 1996). Uno de los pioneros, Craig (1961), trabajando con diversas muestras, a nivel mundial, propuso e introdujo el estándar principal para aguas oceánicas (SMOW) como estándar para las mediciones de oxígeno y deuterio en los diferentes cuerpos de agua.

Subsecuentemente, el Organismo Internacional de Energía Atómica OIEA elaboró un nuevo estándar a partir de agua de mar destilada y modificada con una composición isotópica similar al SMOW. De tal modo que la nueva referencia fue denominada como estándar media del océano o VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) y ampliamente reconocido también como la Línea Meteórica Global para el agua del océano y sirve como una referencia fundamental para determinar desviaciones regionales y locales a partir de las mediciones de isótopos estables en una determinada región (Clark y Fritz 1997; Corrales *et al.* 2016).

#### **2.4.2 Fraccionamiento isotópico**

Conocido como una división de isótopos; es explicado como una variación en el número de electrones en un elemento contemplando las diferentes masas (peso atómico) del elemento y las moléculas que puede formar. Las moléculas con diferencias en la masa, a su vez, presentan diferentes velocidades de reacción y difusión (Clark y Fritz 1997; Yoshimura 2015).

El fraccionamiento isotópico es causado por varios procesos en la naturaleza, por ejemplo, actividad biológica, intercambio con otros materiales; desde el punto de vista meteorológico, hidrológico y glaciológicos, tomando en cuenta los isótopos más abundantes en la naturaleza, es de mayor interés el hecho de que la difusión de isótopos pesados  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , es más alta respecto a las moléculas más ligeras. Esto hace que el fraccionamiento se dé en todos los

procesos de condensación y también en la evaporación del agua líquida bien mezclada (Dansgaard 1964; Mazor 2003).

En el ciclo hidrológico, el fraccionamiento isotópico durante la evaporación del agua del océano y la posterior condensación de agua en las nubes conlleva al agotamiento en la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  en agua meteórica en comparación con las aguas oceánicas. Así, el fraccionamiento es el resultado de pequeñas diferencias en la presión de vapor de las moléculas de agua dependiendo de la masa de los isótopos. El agotamiento isotópico adicional del vapor de agua se genera por el transporte cinético de humedad desde la interface océano-aire a la atmósfera abierta mixta (Kortelainen 2007).

El principal impulsor de los patrones espaciales en la composición isotópica de la precipitación es el proceso de precipitación progresiva que, comúnmente, se modela como un proceso Rayleigh de vapor atmosférico; en la que se parte de una relación isotópica inicial en el vapor con variaciones dadas por cambios en la temperatura y la presión del aire, a través de su efecto sobre la presión de vapor de saturación, impulsada a su vez por procesos frontales, convectivos u orográficos. En conjunto, estos procesos conducen a patrones robustos de agotamiento de isótopos pesados con aumento de la latitud, la altitud, el continente y, en áreas tropicales de fuerte convección, la cantidad de precipitación (Dansgaard 1964; Bowen 2010).

A pesar de ello, los procesos que gobiernan las composiciones isotópicas de precipitación en la naturaleza son más complejos que las representadas por el modelo de Rayleigh. En primer lugar, el concepto del "punto de partida" para el proceso es impreciso porque, en la mayoría de los casos, la mayoría de los lugares de la Tierra tienen una reposición continua de agua de la superficie terrestre u oceánica a través de la evapotranspiración.

A grandes rasgos tres factores están involucrados en la determinación del fraccionamiento isotópico general:

- 1) el fraccionamiento de isótopos de equilibrio de la transición de líquido a fase de vapor,
- 2) un fraccionamiento resultante de la difusión a través de la capa límite aérea, y
- 3) el flujo de retorno de la humedad atmosférica (Gat 1996).

## **2.5 Línea Meteórica Global del Agua y la composición de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$**

El término de agua meteórica se refiere a las aguas que circulan a través de la atmósfera, en los diferentes procesos de precipitación, y que posteriormente forman parte del agua subterránea, agua superficial en ríos y lagos, agua de los poros, las capas de hielo y los glaciares (Kortelainen 2007). Una de las características clave que presentan los isótopos estables  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  contenidos en las aguas meteóricas es su fuerte colinearidad (observado y publicado por Craig, 1961). La línea de regresión resultante para estos datos es hoy conocida como la "Línea Global del Agua Meteórica" (GMWL, por sus siglas en inglés), definida por Craig (1961) como:

$$\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰}$$

Craig (1961), determinó la relación entre las composiciones de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  en aguas meteóricas naturales de muchas partes del mundo. Por lo que, los enriquecimientos isotópicos, relativos al agua del océano, muestran una correlación lineal en toda la gama de las aguas que no han experimentado una evaporación excesiva (Dansgaard 1964; Clark 2015). Lo interesante, es que la línea global del agua meteórica se convierte en un parámetro para hacer comparaciones en cuanto a la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas de diversos lugares del mundo; sabiendo que cada región o lugar cuenta con condiciones climáticas únicas.

### **2.5.1 Línea Meteórica Local o LMWL**

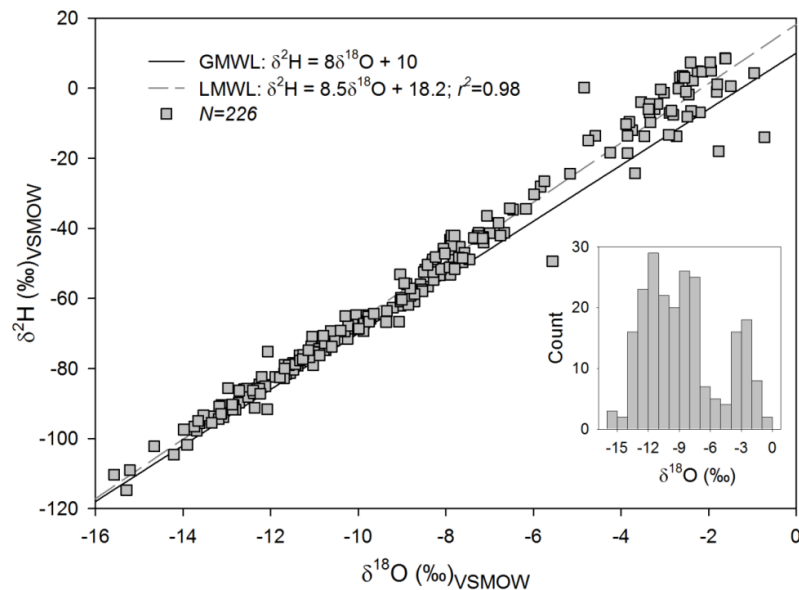
Esta es definida como la línea derivada de los datos isotópicos de la precipitación recolectados en un sitio en particular o en una serie de sitios correspondientes a una misma zona. Esta puede ser significativamente diferente a la línea meteórica global. En general, la pendiente de esta línea son de  $8 \pm 0.5$ , una pendiente con valores entre 5 a 9 no es considerada común (Kendall 1995).

La pendiente y la intersección de deuterio para la línea de agua meteórica pueden variar según las condiciones de humedad durante la evaporación primaria y debido a la evaporación secundaria durante la lluvia (al menos en las regiones áridas). Cualquier región dada tendrá entonces su propia línea de agua meteórica característica, que debería ser representativa de la superficie y las aguas subterráneas recargadas en esa región (Gat 1996).

La línea local versus la línea global generadas en un mismo gráfico como se ve en la figura 2, permite derivar información para un sitio en particular, como condiciones de recarga de acuíferos, pérdidas por evaporación y mezcla del recurso hídrico (Gat y Gonfiantini 1981b; Clark 2015).

Las líneas locales diferirán de la línea global, tanto en la pendiente como en el intercepto del deuterio ( $\delta\text{D}$  valor  $\delta^{18}\text{O} = 0$ ). La correlación entre  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  se debe al comportamiento similar de ambos isótopos durante la lluvia. La pendiente de esta regresión refleja el mayor fraccionamiento para  $\delta^2\text{H}$ , que es aproximadamente 8 veces mayor que para el  $^{18}\text{O}$  (Clark 2015).

**Figura 2.** Línea local del agua meteórica para la región montañosa del Norte del Valle Central de Costa Rica en 2013. La regresión resultó en una línea meteórica local altamente significativa:  $\delta^2\text{H} = 8.5 \delta^{18}\text{O} + 18.2$  ( $r^2 = 0,98$ ).



Fuente: Tomado de Sánchez-Murillo *et al.* (2016).

## 2.6 Deuterio en exceso

El exceso de deuterio o d-exceso es otro parámetro que define a las aguas meteóricas; debido a que el cambio proporcional en los valores de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  durante el fraccionamiento en equilibrio es  $\sim 8:1$ , respectivamente, en la mayoría de los casos la precipitación tiene un valor de exceso de deuterio igual a  $\delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O}$ ; (Dansgaard 1964) similar al vapor atmosférico. Su cálculo se resume:

$$\mathbf{d\text{-exceso} (\text{‰}) = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O}}$$

Para la línea meteórica global, este valor es igual a 10‰. Regionalmente, este parámetro varía de mucho menos de 10 a más de 20‰. De hecho, se podría pensar el por qué no es 0‰ considerando que el origen de la precipitación es agua de mar con  $\delta^{18}\text{O} = \delta^2\text{H} = 0$  ‰. La razón de este exceso se debe a la evaporación cinética o “no equilibrio” durante la formación de la masa de vapor primario. Este parámetro guarda una fuerte relación con la humedad relativa de la zona, así es que cuando menor es la humedad ambiental durante la evaporación primaria sobre el agua de mar, mayor es la evaporación cinética y genera un mayor exceso de deuterio (Gat y Gonfiantini 1981a).

Mientras que  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  se correlacionan con la temperatura y la precipitación, el d-exceso se correlaciona con las condiciones físicas (humedad, temperatura del aire y temperatura de la superficie del mar) de la fuente oceánica o de la precipitación. El d-exceso refleja las

condiciones prevalentes durante la evolución, interacción o mezcla de masas de aire que se dirigen al sitio de precipitación (Froehlich *et al.* 2001b).

Los valores de d-exceso serán significativamente diferentes del agua original cuando se presente una evaporación sobre la humedad generada en un sitio particular. De este modo la evaporación por debajo de la nube disminuye el exceso de d de precipitación mientras que el reciclado de humedad lo aumenta (Kong *et al.* 2013).

## **2.7 Aplicación del modelo HYSPLIT para estimar la dispersión de partículas y trazar las trayectorias de humedad atmosférica.**

El HYSPLIT o Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory es un sistema desarrollado en el Laboratorio de Recursos del Aire o ARL de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) para calcular trayectorias de masas de aire, así como complejas transformaciones de transporte, dispersión, transformación química y deposición en la atmosfera (Stein *et al.* 2015).

El programa HYSPLIT es útil para estimar la trayectoria adelantada o retrasada de una masa de aire. El análisis de trayectorias retrasadas ayuda a determinar los orígenes y fuentes de los contaminantes, algo que resulta útil para efectos de pronosticar la calidad del aire. Mientras que el análisis de trayectorias adelantadas ayuda a determinar la dispersión de los contaminantes (NOAA 2013), desastres nucleares en la evaluación de emisión, transporte, dispersión y deposición en radionúclidos, humo de incendios forestales, o incluso flujo de cenizas en erupciones volcánicas (Stein *et al.* 2015).

En Centroamérica, Sánchez-Murillo y Birkel (2016a) aplicaron el modelo para estimar las trayectorias retrasadas de masas de aire y las composiciones isotópicas enriquecidas en Turrialba y Monteverde, Costa Rica, evidenciando una relación con la humedad proveniente del Caribe central y con la intensidad de las precipitaciones en la zona.

## **2.8 La zona de estudio**

La zona de estudio pertenece a la planicie costera central entre La Libertad y la playa El Espino, se caracteriza por playas extendidas, estuarios de ríos de gran caudal y lagunas costeras de grandes extensiones. Fuera de la franja costera de 20 km, se localizan volcanes activos de reciente formación. En la parte sur, se encuentran lagunas costeras, cuerpos de aguas salobres de gran importancia socioeconómica y ambiental como el estero de Jaltepeque, y la bahía de Jiquilisco, con interés ecológico su declaratoria de sitio Ramsar poseen barras de arena y espejos de agua entre 100 y 200 km<sup>2</sup>, y grandes extensiones de bosques salados y humedales.

Pertenece a la región hidrográfica **F** Río Jiboa–Esteros de Jaltepeque, incluye los ríos comprendidos entre el Río Jiboa y el Río El Guayabo, los cuales drenan desde la cadena montañosa central hacia la planicie costera (MARN 2013b).

Sus aprovechamientos más relevantes son la extracción pesquera, de mariscos, ganadería, caña de azúcar y plantaciones de coco, estimándose que más de 10,000 personas subsisten de este sistema de manglar y de humedales, y del aprovechamiento turístico de la zona (MARN 2013a), representando un escenario esencial como zona de cría, alimentación, refugio y producción pesquera.



## **II ARTÍCULO.**

# **COMPOSICIÓN Y VARIACIÓN ESPACIAL DE ISÓTOPOS ESTABLES EN LA CUENCA EL GUAYABO, SAN VICENTE. EL SALVADOR.**

### **RESUMEN**

La disponibilidad de agua subterránea para el abastecimiento de la población es una preocupación cada vez más tangible. El análisis de la composición isotópica está ayudando a comprender de mejor forma los flujos y disponibilidad de agua. Este estudio evaluó la composición isotópica de pozos, ríos y lluvia en periodo seco para la cuenca El Guayabo, San Vicente, El Salvador.

La composición isotópica en lluvia se dio de -17.92‰ a 2.55‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  y de -82.96‰ a 30.01‰ para  $\delta^2\text{H}$ , con promedio de -5.38‰ y -24.61‰ respectivamente. La línea meteórica local, evidenció procesos de evaporación en la cuenca. Se encontró diferencias significativas entre la recta de lluvia y las de aguas subterráneas y superficiales. Las rectas de regresión de pozos ( $y=0.6237x -31.592$   $R^2=0.013$ ) y de ríos ( $y=1.44x -27.423$   $R^2=0.12$ ) también reflejan la influencia de evaporación en el ambiente. Dada la variación de la composición isotópica subterránea, se considera que el acuífero en la parte más baja no recibe una recarga considerable de la precipitación local, sino más bien esta se alimenta de la precipitación en la zona alta.

El análisis del desplazamiento de las fuentes de humedad refleja aportes principalmente de la parte Norte con valores enriquecidos en  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  con precipitaciones esporádicas de baja intensidad a finales del año. Durante la transición a la época lluviosa, el aporte de humedad es principalmente del Este dando una composición isotópica empobrecida probablemente por un efecto de destilación en la masa de aire que ha cruzado la parte más amplia del istmo centroamericano.

### **ABSTRAC**

The availability of groundwater for population supply is an increasingly tangible concern. The analysis of isotopic composition of water is helping to understand in a better way the flows and the water availability. This study assesses the isotopic composition of wells, rivers and rain by the dry season for El Guayabo basin, San Vicente, El Salvador.

The isotopic composition in rain was from -17.92‰ to 2.55‰ at  $\delta^{18}\text{O}$  and from 82.96‰ to 30.01‰ at  $\delta^2\text{H}$ , with an average of -5.38‰ and -24.61‰ respectively. The local meteoric line, shows evaporation process of the basin. Significant differences were found between the rain straight and the groundwater and surface water. The regression lines of wells ( $y=0.6237x -31.592$   $R^2=0.013$ ) and rivers ( $y=1.44x -27.423$   $R^2=0.12$ ) they also reflect the environment evaporation. The given variation of the isotopic groundwater composition, is can be considered that the aquifer of the low part of the basin doesn't receive a considerable recharge of local precipitation, but rather this got fed of the precipitation of high lands.

The analysis of the displacement of moisture sources shows mainly from the North part with enriched values of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$ , precipitations are sporadic at the end of the year with low intensity. During the transition to rainy season, the input of the humidity is mainly from the east produce an isotopic composition depleted, probably by distillation effect of the air mass that has crossed the widest part of Central America isthmus.

**Key words:** Isotopic composition, El Guayabo basin, moisture sources

## 2.1 Introducción

En El Salvador, el recurso hídrico se encuentra seriamente comprometido, la actual crisis del agua se expresa principalmente en la presión insostenible generada por la creciente demanda, la contaminación y su desigual disponibilidad entre la población (MARN 2016a). Según el último Informe de Calidad de Agua de ríos de El Salvador, generado por el Ministerio de Medio Ambiente, indica que solo el 5% tiene una "BUENA" calidad; el resto se catalogan entre "REGULAR", "MALA" y "PÉSIMA" (MARN 2010; MARN 2013b).

En el país, más de un ochenta por ciento de la población, se abastece con agua potable procedente de acuíferos mediante su explotación a través de pozos excavados (Losilla 2001). De acuerdo con el mapa hidrogeológico elaborado por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), el país cuenta con 6,155 millones de metros cúbicos de agua subterránea renovable cada año durante la época de invierno (ANDA 2015). La zona de regeneración más importante se distribuye principalmente a lo largo de la cordillera costera y los flancos del volcán de San Salvador, en el Boquerón. En el área urbana, la capa freática en los acuíferos se encuentra entre 30 y más de 200 m por debajo de la superficie (Schiaidt-thomé 1975).

Dada la dependencia de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, es muy importante prestar atención al comportamiento del ciclo hidrológico y como éste varía en disponibilidad en los ecosistemas y el aprovechamiento para la población (IPCC 2014). Actualmente, la alta necesidad y demanda ha impulsado el desarrollo de novedosas tecnologías para el estudio del recurso hídrico (Guzmán 2013). Por ejemplo, el uso de isótopos estables del agua ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ), ha generado valiosos aportes al conocimiento del ciclo hidrológico, aprovechando sus propiedades naturales de repartirse selectivamente en cada etapa del ciclo, variando su composición en los procesos de recarga subterránea y descarga como escorrentía.

La variación espacial y temporal de los isótopos estables en el ciclo hidrológico proporciona una huella química característica en cada fase del agua, generando una historia entre los cambios a partir de su origen (Gat 1996; Kortelainen 2007). Así, un evento de precipitación en particular puede interpretarse como un resultado de la "historia" anterior de la fuente de aire húmedo, que a su vez puede entenderse en términos de patrones de circulación atmosférica como parte de los mecanismos implicados en la evaporación y condensación de agua (Araguas-Araguas *et al.* 2000).

Se ha observado que para Centroamérica, la distribución espacial y temporal de los isótopos estables en la precipitación está regida por:

- a) los océanos Pacífico, Atlántico y Caribe,
- b) cadenas montañosas que liberan flujos de aire que conducen a una condensación de la humedad a lo largo de las laderas debido al levantamiento orográfico de las masas de aire,
- c) la presencia de la cuenca evaporativa más grande del mundo, y
- d) la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical o ZCIT (Guswa *et al.* 2007).

La composición isotópica del  $\delta^{18}\text{O}$ , varía dentro de un rango relativamente estrecho entre -2‰ y -7‰. Sus valores medios siguen de cerca la Línea de Agua Meteorológica Global (WML); aunque se pueden observar desviaciones localmente significativas (Rozanski y Araguás-Araguás 1995).

El complejo sistema de estacionalidad en Centroamérica indica valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  enriquecidos durante meses con menor precipitación, y valores más bajos o empobrecidos en  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  en época lluviosa (Dansgaard 1964; Scholl *et al.* 2009). En Costa Rica, Sánchez-Murillo *et al.* (2016) además, explican que las composiciones isotópicas presentan un comportamiento bimodal, el  $\delta^{18}\text{O}$ , se presenta con medias entre -5 y +1 (‰) asociado a lluvias convectivas fuertes del Caribe y entre -5 a -15 (‰) asociado a sistemas estratiformes más grandes principalmente en la zona del Pacífico.

En Centroamérica, el estudio de la línea meteórica del agua y el deuterio en exceso han contribuido a entender los mecanismos de transporte de vapor de agua, los gradientes de evapotranspiración junto con efectos orográficos (Corrales *et al.* 2016), a dilucidar los mecanismos de recarga de aguas subterráneas en zonas montañosas (Sánchez-Murillo y Birkel 2016a), a comprender el efecto que tiene la temperatura, el vapor, la altitud sobre los ciclos de precipitaciones y a conocer las principales fuentes dominantes de humedad (Lachniet y Patterson 2009; Sánchez-Murillo *et al.* 2016).

En El Salvador hasta donde se sabe, hay un registro de una línea meteórica local generada por Lachniet y Patterson (2009), con base en los registros isotópicos de la Red global de Isótopos en la Precipitación o GNIP; la cual se creó con la datos de precipitación, sus valores son de  $\delta\text{D} = 8.1 \times \delta^{18}\text{O} + 10.9$ . Sin embargo, para evaluar de mejor forma el recurso hidrológico y su disponibilidad en el país, es necesario contar con nuevas mediciones de precipitación y contrastar datos con cuerpos de agua subterráneos y superficiales.

Este estudio tiene como finalidad ayudar a conocer el proceso de recarga subterránea durante el periodo seco o de caudal base, por medio del estudio de la composición isotópica del agua subterránea, de ríos y de la precipitación en la cuenca El Guayabo perteneciente a la zona del Bajo Lempa, El Salvador. Además de conocer los principales aportes de fuentes de humedad en la zona durante el periodo seco.

## METODOLOGIA

### 3.1 Descripción de la zona de muestreo

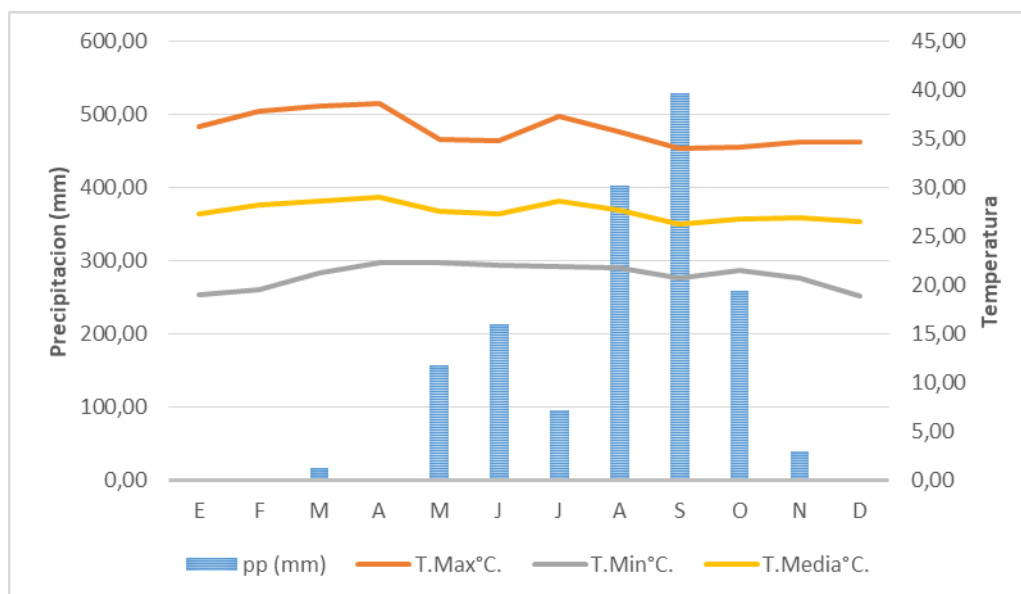
La cuenca El Guayabo se ubica entre los departamentos de La Paz y San Vicente, en la región costera central de El Salvador. Tiene una superficie de 413.83 Km<sup>2</sup>, en su mayoría abarca el municipio de Tecoluca, San Vicente, Guadalupe y Zacatecoluca. Según Losilla (2001), esta zona se caracteriza por contener acuíferos aluviales en sedimentos no consolidados. Estratos de grava y arena dominan en los arroyos de los valles y son muy comunes en las cuencas interiores y en las planicies costeras. Los acuíferos pueden estar confinados en las cuencas interiores y planicies costeras, mientras que en los valles pueden no estar confinados. Según el informe del proyecto WaterClima-LAC (2017), el acuífero es no confinado, con recarga proveniente en mayor parte de las cadenas volcánicas y presenta profundidad del nivel freático entre 5 y 80 m. El principal uso es para riego y abastecimiento.

#### 3.1.1 El clima de la zona

La temperatura media anual es de 28.3°C, con un máximo de 36°C y con temperatura media mensual superior a 20°C. La evapotranspiración media anual es de 1,944 mm. La humedad relativa media anual en el área es de 68%.

La época lluviosa inicia entre abril-mayo y se prolonga hasta final de noviembre, la época seca se da entre diciembre y abril, durante la cual se observan 2 máximos en junio y octubre, como respuesta a la migración de la ZCIT (Poveda *et al.* 2006). Las precipitaciones pueden oscilar entre 1,660 mm en Puerto Parada y 2,019 mm en Jiquilisco. El régimen de lluvias, su variabilidad y las condiciones del terreno hace que la zona sufra frecuentes inundaciones debido a la formación de numerosos ríos temporales (Molina O et al. 2008).

**Figura 3.** Climograma: estación Puente Cuscatlán y beneficio Acahuapa. Promedio del año 2014.

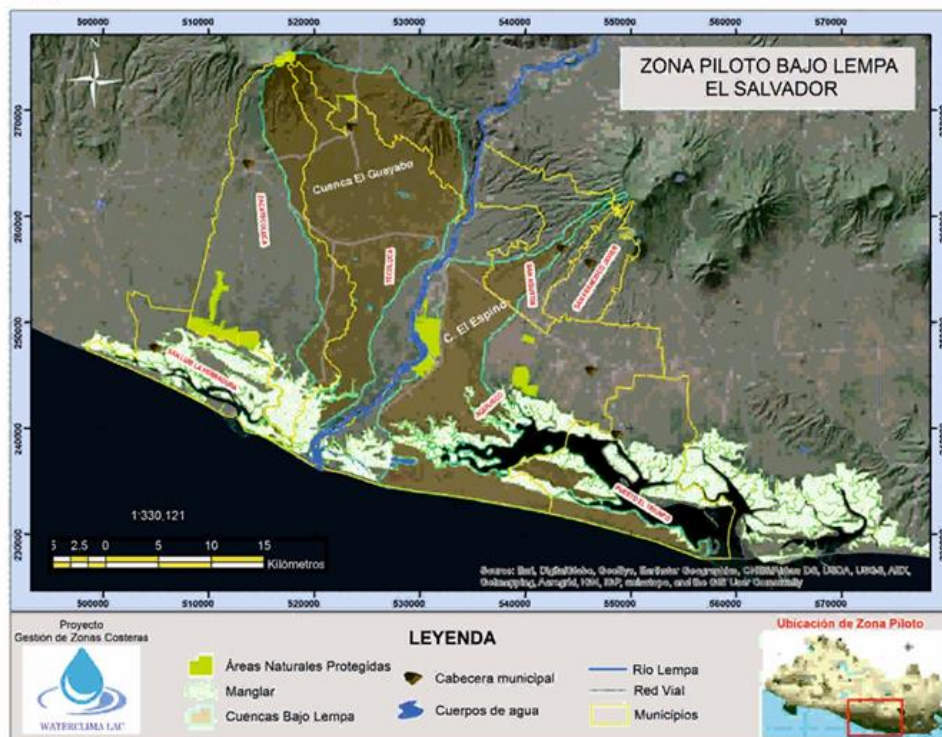


### 3.1.2 Hidrogeología de la zona

La zona de estudio pertenece a la Unidad de Acuífero Poroso de Gran Extensión; donde los materiales están conformados principalmente por piroclásticos aglomerados y re trabajados como pómez, lapilli, tobas; con distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Como consecuencia al grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituye, la conductividad hidráulica puede variar de mediana a baja. Esta unidad puede tener más de 50 m de espesor (ANDA 2015).

El acuífero es de tipo aluvial, cuenta con una superficie aproximada de 750 km<sup>2</sup>, su ubicación geográfica y el bosque de manglar al Sur, lo expone a la variación salina (PRISMA 2001). En 2015, un estudio del MARN realizó una caracterización físico-química en el acuífero, determinando en éste, una composición iónica del tipo bicarbonatada Cálcica (Ricardo Calles 2017).

**Figura 4:** Ubicación de la Cuenca El Guayabo, área de influencia del proyecto Water-Clima-LAC. Gestión de Zonas Costeras.



En la zona, la profundidad del agua es de 2 a 50 m, incrementando con la elevación sobre las corrientes perennes. El acceso es generalmente bueno. Depósitos de grava muy gruesa y material en forma de piedras redondas pueden causar pérdida excesiva de los fluidos de perforación. Intrusión de agua salada a lo largo de la costa aumenta a medida que avanza la estación seca (Buckalew et al. 1987).

Los pozos muestreados están distribuidos entre propiedades domiciliarias, propiedades comunales, terrenos privados, en su mayoría cuentan con alguna infraestructura y mantenimiento, mientras otros están totalmente expuestos. En los alrededores se observaron cultivos de caña, maíz, zacate, hortalizas e inclusive potreros ganaderos.

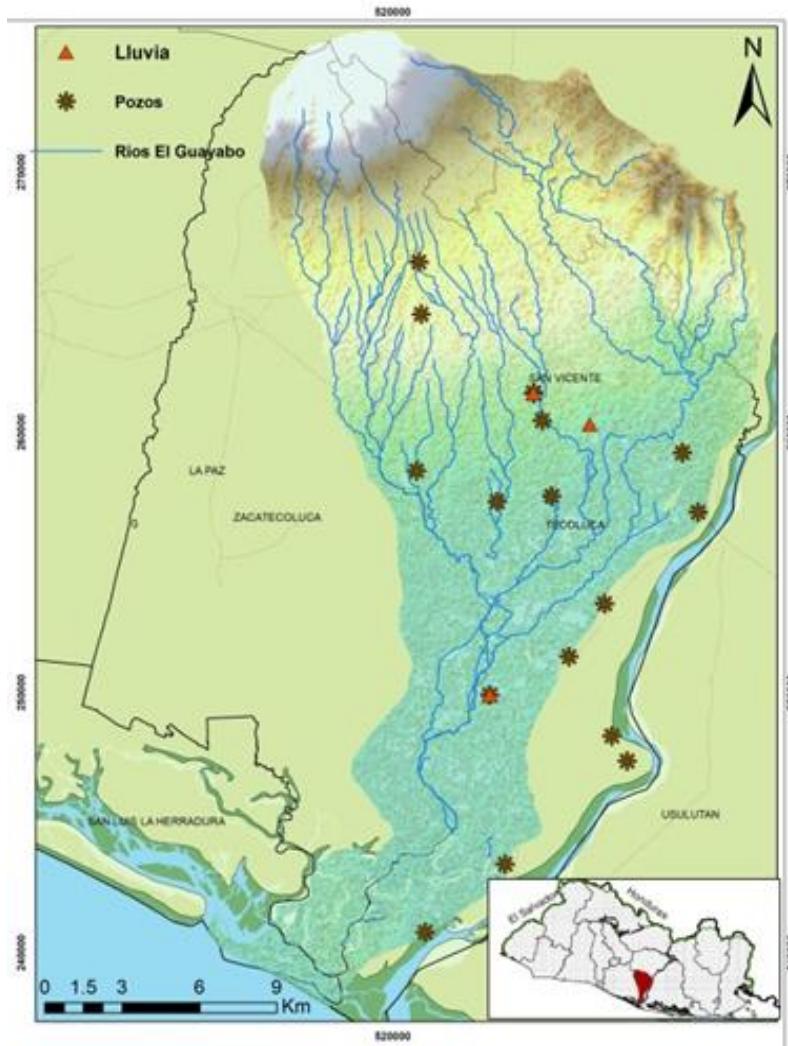
### **3.2.1 Recolecta de precipitación y agua superficial**

Entre noviembre del 2016 y junio del 2017 se tomó muestras de los eventos de precipitación ocurridos en 3 puntos de la parte alta y media de la cuenca. En cada punto también se ubicó el río más cercano para obtener una muestra simultánea al evento de precipitación registrado.

El primer punto se ubicó en la comunidad San Ramón Grifal, donde se usó un recolector de precipitación tipo Palmex RSB1, (Anexo 1), el cual es un sistema superficial instalado sobre un soporte de madera o metal que consta de un recipiente o botella de PVC 2L, con un embudo en la parte anterior que recolecta el agua lluvia a través de un tubo de goma que rodea toda la botella. El recubrimiento de la botella y el largo tubo de goma ayudan a minimizar los procesos de evaporación en el agua recolectada (GNIP/IAEA 2014).

Los otros dos puntos de recolección de lluvia se ubicaron en las comunidades El Carao y Las Anonas, donde se usó el método del totalizador enterrado (Anexo 1), que consta de una botella de plástico de 3.7 L enterrado bajo la superficie del suelo con la abertura conectada a un embudo plástico a través de un tubo PVC como recolector de agua lluvia. Para el almacenamiento de todas las muestras de agua se usó un frasco plástico de 30 ml de tapa rosca. Siempre y cuando el evento de lluvia era suficiente se tomó el total del frasco, procurando no dejar burbujas de aire entre el recipiente y la tapa rosca (GNIP/IAEA 2014).

**Figura 5.** Puntos de recolección de agua subterránea en la cuenca El Guayabo.



El agua superficial se tomó directamente de los ríos San Antonio, río Blanco y río La Bolsa, seleccionados por mantener un caudal no estancado en la época seca. Por lo que la muestra se tomó en una sección lejos de la orilla y con corriente fluida. Además, se tomó muestra de 2 nacientes en la parte alta.

### **3.2.2 Muestreo de agua subterránea**

Durante 3 visitas realizadas entre marzo y mayo del 2017, se muestrearon 16 pozos, y 2 nacientes, en distintos puntos de la parte media alta y baja de la cuenca. La altitud varía de 3 m en la zona más cercana a la costa, hasta los 260 m.s.n.m. La profundidad del espejo de agua se observó entre 4 y 60 metros. En total se tomaron 37 muestras.

En pozos con bombeo automático, se dejó fluir por unos minutos y se descartó el agua estancada en la tubería, en pozos artesanales se usó una cubeta. Luego, se tomó la muestra en un recipiente de 30 ml, con el especial cuidado de llenarlo por completo, para no dejar aire al

interior. Inmediatamente, se etiquetó y se guardó en una hielera procurando que todos los frascos se mantuvieran a temperatura ambiente para evitar un que sufrieran evaporación.

El análisis químico se realizó en el Centro del Agua para América Latina y el Caribe del Instituto Tecnológico de Monterrey, Nuevo León, donde fueron sometidas a un analizador de isótopos estables modelo: DLT-100 Los Gatos Inc.

El resultado de la composición isotópica se expresó como ‰ de diferencia con respecto al estándar de referencia mundial VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) o Línea Meteorica Global. Con la siguiente ecuación:

$$\delta = (R_{\text{muestra}} / R_{\text{standar}} - 1) * 1000 \text{ VSMOW}$$

En uno de los tres puntos de precipitación, se construyó la Línea Meteorica Local mediante regresión simple en los datos de la composición isotópica para  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , posteriormente, se comparó con la Línea meteorica global. Además se realizó un análisis de comparación de medias entre las muestras de lluvias, pozos y superficiales.

El análisis de la variación espacial de isótopos se realizó en un mapa donde se muestra la distribución de la composición isotópica del  $\delta^{18}\text{O}$  para las aguas superficiales y subterráneas a nivel de la cuenca.

### **3.2.3 Análisis de las masas de aire en la zona de estudio.**

Para reflejar las condiciones predominantes durante la evolución y la interacción o mezcla de masas de aire en su ruta al sitio de precipitación. Se consideró el estudio del origen de las masas de aire o fuente de humedad a partir de las simulaciones con el programa HYSPLIT o Modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única, en su versión en línea.

La simulación de las fuentes probables de humedad se realizó con base en las trayectorias retrasadas en 48 hrs para cada fecha con evento de precipitación registrado durante el estudio en uno de los 3 puntos de precipitación monitoreado. Las trayectorias calculadas contienen parámetros meteorológicos, basado en datos generados por el Sistema Global de Asimilación de Datos o GDASA; ellos son temperatura ambiente, presión atmosférica, la altura del terreno, cantidad de lluvia, profundidad de la capa de mezcla, humedad relativa y radiación solar.

## **4 RESULTADOS**

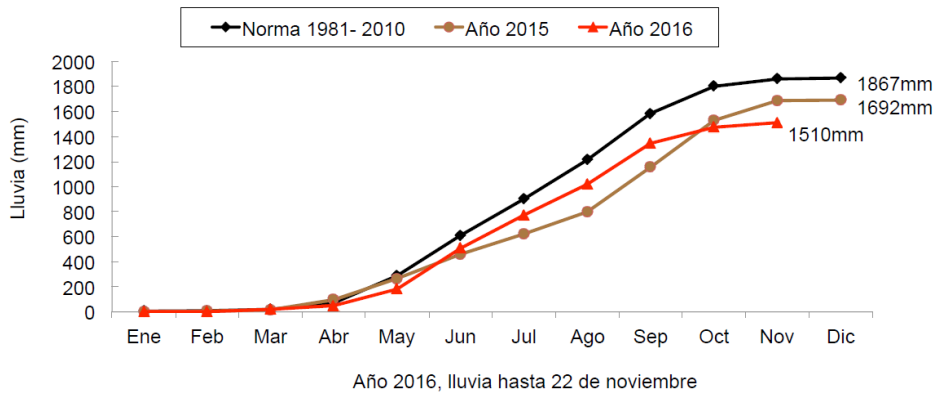
### **4.1 Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de precipitación y agua subterránea durante el periodo seco en la cuenca El Guayabo**

El registro de la precipitación y su composición isotópica en este estudio se dio entre octubre 2016 y junio 2017, en 3 puntos de precipitación ubicados en las comunidades de San Ramón Grifal (P1), EL Carao (P2) y Las Anonas (P3), (Tabla 1). Se analizaron un total de 92 muestras de precipitación, y 65 muestras de río del periodo seco del 2017.



El comportamiento de las lluvias en todo el país estuvo por debajo del normal registrado en las estaciones meteorológicas nacionales (Figura 6). El inicio del periodo de lluvias se dio con un retraso de dos semanas, llegando a 1,510 mm y con un déficit de 353 mm equivalente a 19% inferior a la media, según informó el Ministerio del Ambiente MARN (2016c).

**Figura 6.** Lluvia anual acumulada 2015 y 2016 comparado con el promedio (1981-2010).



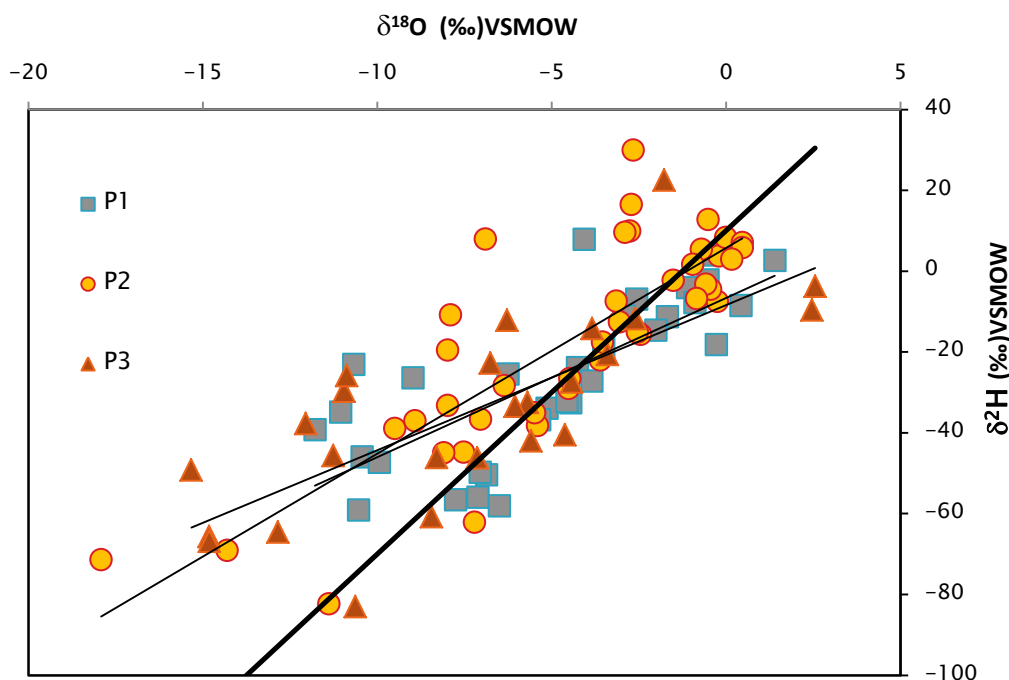
Fuente: MARN (2016c).

Debido al déficit de lluvia, el MARN estableció sequía meteorológica débil en agosto, además de reducciones de caudal promedio mensual en todo el periodo de lluvias del año hidrológico mayo 2016 – abril 2017 en el país. Tales reducciones de caudales superaron el 50% en relación con los datos históricos (MARN 2016b).

#### 4.1.2 Composición isotópica de la lluvia

Los valores de la composición isotópica para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  están expresados como ‰ de diferencia respecto al estándar V-SMOW. Debido a la relación lineal que naturalmente se da entre  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , la interpretación de su abundancia y distribución, en algunos casos, se hará en referencia al  $\delta^{18}\text{O}$ .

**Figura 7:** Composición isotópica de la precipitación durante el periodo seco 2016-2017 en la cuenca EL Guayabo, Bajo Lempa.



Se generó una recta de regresión para cada uno de los puntos de precipitación, el coeficiente de determinación evidencia que el grado de relación no es cercano a uno, por lo que no se considera una relación fuerte (tabla 1). Aunque el punto 2 presenta mayor pendiente, éste aún está bastante alejado del promedio mundial  $\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$ .

La composición isotópica de la precipitación en los tres puntos, según el análisis de la varianza y a una posterior prueba de comparación de Fisher, no estimó diferencia estadísticamente significativa en cuanto a sus promedios ( $p=0.431$ ).

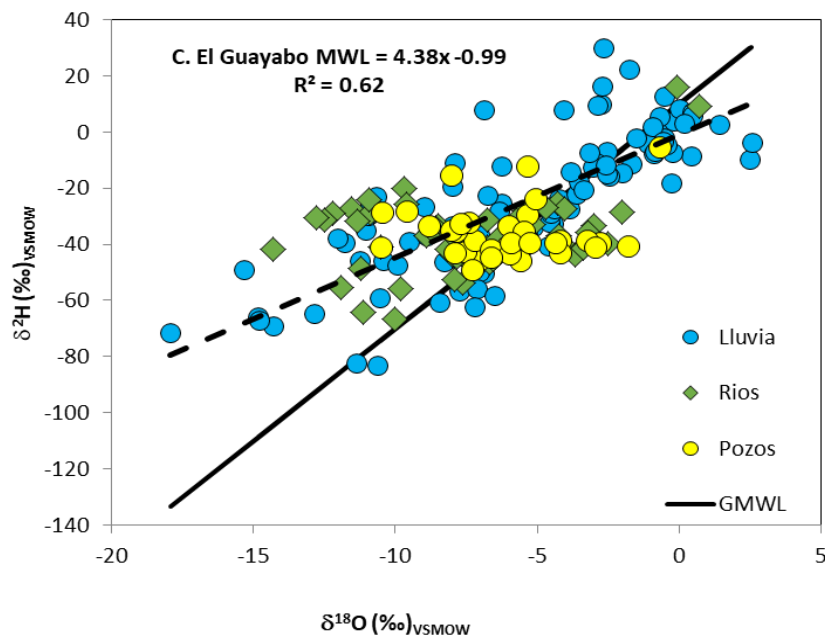
**Tabla 2.** Puntos de recolecta de lluvia Octubre 2016 a Junio 2017 en la cuenca EL Guayabo. Bajo Lempa.

Punto	Periodo de muestreo	Recta	Coef. De determinación	elevación m.s.n.m
<b>P1</b> San Ramón Grifal	octubre-2016 a julio-2017	$y = 3.9412x - 6.6395$	$R^2 = 0.56$	55
<b>P2</b> El Carao	noviembre-2016 a junio-2017	$y = 5.0896x + 5.7259$	$R^2 = 0.67$	10
<b>P3</b> Las Anonas	mayo a junio del 2017	$y = 3.5931x - 8.3715$	$R^2 = 0.56$	51

En la figura 8 se representa la relación lineal de la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) para los puntos de precipitación (El Guayabo MWL), agua subterránea y ríos, comparada con la Línea Meteórica Mundial (GMWL).

En general, la precipitación registrada en la zona marca una pendiente diferente a la del promedio, con característica de zonas áridas. El rango de la composición isotópica en lluvia para  $\delta^{18}\text{O}$  es de  $-17.92\text{‰}$  a  $2.55\text{‰}$  y de  $-82.96\text{‰}$  a  $30.01\text{‰}$  para  $\delta^2\text{H}$ . Su valor promedio es de  $-5.38\text{‰}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) y de  $-24.61\text{‰}$  ( $\delta^2\text{H}$ ).

**Figura 8:** Línea meteórica mundial o GMWL (línea sólida) y línea meteórica local (línea intermitente), composición isotópica de los ríos, pozos y puntos de lluvia de la cuenca El Guayabo durante Octubre 2016 a Julio 2017.



Las correspondientes rectas de regresión de pozos ( $y=0.6237x -31.592$   $R^2=0.013$ ) y de ríos ( $y=1.44x -27.423$   $R^2=0.12$ ), denotan una carencia de relación, mientras que sus pendientes bajas apuntan a que durante el periodo de muestreo ambos ambientes sufrieron considerablemente los efectos de evaporación, tanto en la precipitación como en el proceso de infiltración. Por lo que las correspondientes líneas de tendencia según la Figura 8, se ubican muy por debajo de la línea meteórica local.

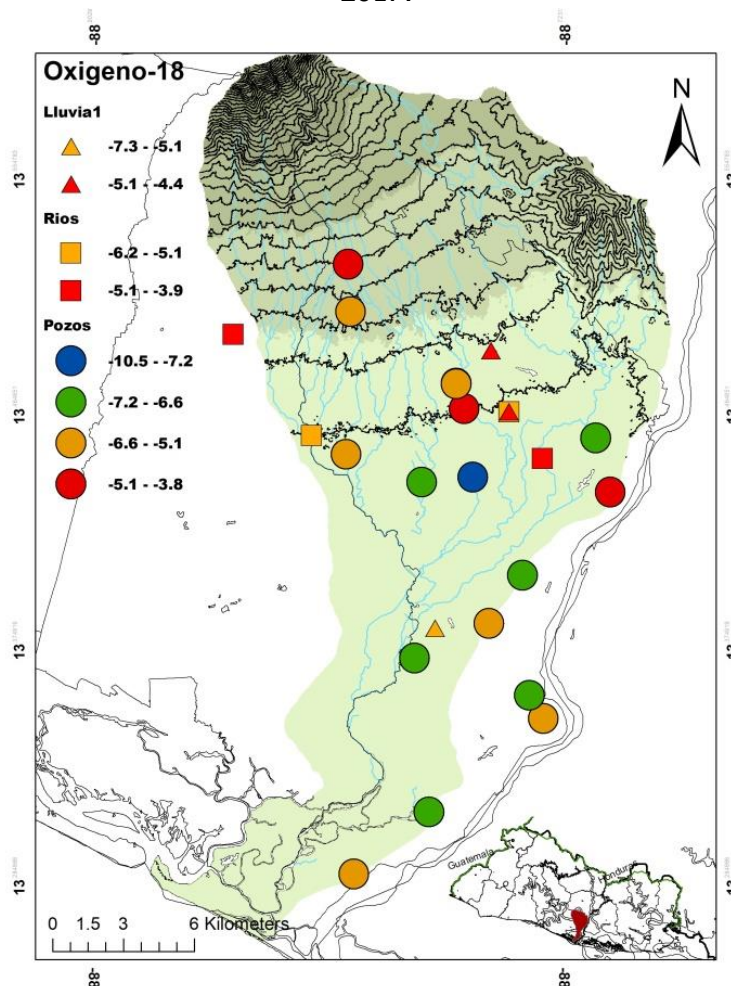
Los puntos que sobrepasan la línea meteórica global dan indicios de altos valores de deuterio en exceso (Anexo 3), que también corresponden con las fechas de mayor precipitación; se considera que el incremento de lluvia en la época de transición seca-lluviosa modificó las condiciones de humedad relativa local, que a su vez provoco una recirculación de esta.

#### 4.1.3 Composición isotópica subterránea

Según informes del MARN (2016c), en la zona oriental y costera del país, el comportamiento de las lluvias provocó que el nivel freático de los pozos también se presentara por debajo del promedio, registrando una disminución en la recarga de los acuíferos.

En general, la composición isotópica subterránea se presentó de  $-0.68\text{‰}$  a  $-10.52\text{‰}$ , para  $\delta^{18}\text{O}$ ; y de  $-5.11\text{‰}$  a  $-49.04\text{‰}$ , para  $\delta^2\text{H}$ , con promedios de  $-6.2\text{‰}$  y  $-36.1\text{‰}$  respectivamente. La Figura 9 muestra el valor promedio del muestreo para cada pozo, los representados en color rojo y naranja, reflejan una composición isotópica similar al de la precipitación, por lo que se considera que ha habido un aporte de lluvias en estos puntos.

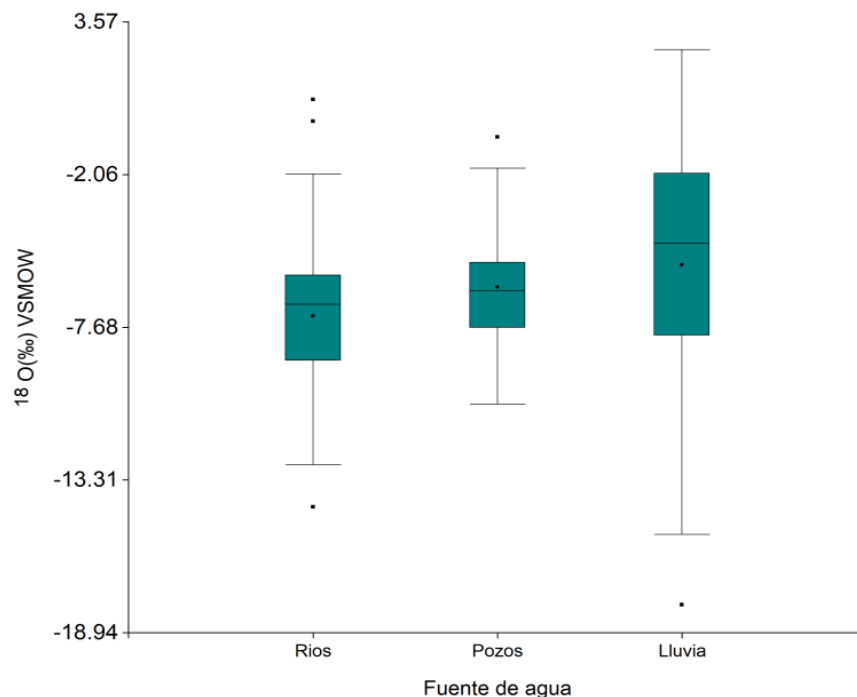
**Figura 9.** Composición isotópica subterránea promedio, cuenca EL Guayabo. Valores expresados como ‰ de diferencia respecto al estándar VSMOW, durante la época seca del 2017.



Los pozos representados en verde y azul tienen una composición isotópica más empobrecida que el registrado en lluvias, por lo que se descarta la contribución de lluvias en esos puntos. La distribución altitudinal de los pozos (Anexo 2) muestra que los de la zona baja son el reflejo de una contribución de la parte alta de la cuenca que no se registró en el presente estudio, ya que no se tuvieron recolectores de lluvia en la parte montañosa.

El rango de la composición isotópica de pozos y ríos es más corto comparado al rango de lluvias, estos mantienen un promedio más empobrecido (Figura 10). El análisis de covarianza para la comparación de las rectas de regresión de cada fuente de agua y una la prueba de comparación de Fisher evidenció que la recta de lluvias es significativamente diferente a la generada por ríos y pozos.

**Figura 10.** Composición isotópica, agua de precipitación y pozos o agua subterránea en la época seca 2017, cuenca EL Guayabo.



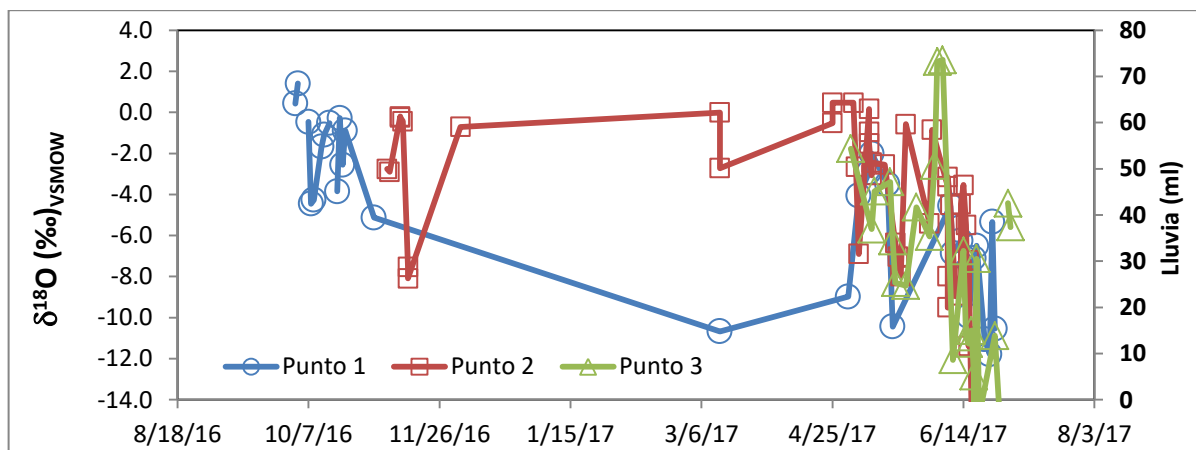
#### 4.2 Variación espacial de isótopos estables y el origen de las masas de aire en la cuenca El Guayabo

El origen de las masas de aire o fuente de humedad para la cuenca se representa como trayectorias anteriores en 48 horas a cada evento de precipitación calculadas con la ubicación del P1; estas se calcularon a una altura máxima de 850 m.

Durante octubre y noviembre 2016, las fuentes de humedad dominantes en la zona fueron las provenientes del Norte y en menor grado con circulación local (figura 11). En ese periodo es donde además se reflejan los valores más enriquecidos en  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  específicamente para los puntos uno y dos. Las precipitaciones se presentaron como esporádicas y de baja intensidad, características de la época seca. Las nuevas precipitaciones iniciaron a partir de marzo donde se registran los primeros aportes de la región caribeña.

La composición isotópica observada en inicios de mayo (Figura 11) coincide con los valores más empobrecidos registrados en la zona de estudio. En ese tiempo, se obtuvieron los valores más altos de lluvia y las fuentes de humedad en su mayoría provenían del Este, de la región del Caribe (Figura 12). El desplazamiento de estas fuentes de humedad a través de la parte más amplia del istmo centroamericano y regiones montañosas generan un efecto de destilación en la masa de aire, por lo que las últimas precipitaciones aportadas por esos flujos resultaron en una composición isotópica más empobrecida.

**Figura 11.** Composición isotópica en los tres puntos de precipitación contra la fecha de la precipitación.



A inicios del 2017, durante enero y febrero el país tuvo influencia de vientos Nortes catalogados como débiles a ocasionalmente moderados; mientras que en febrero, marzo y abril, los vientos se tornaron de moderados a débiles con influencia de sistemas de alta presión que mantuvieron el flujo del Este y Noreste del Caribe acelerado (MARN 2016c).

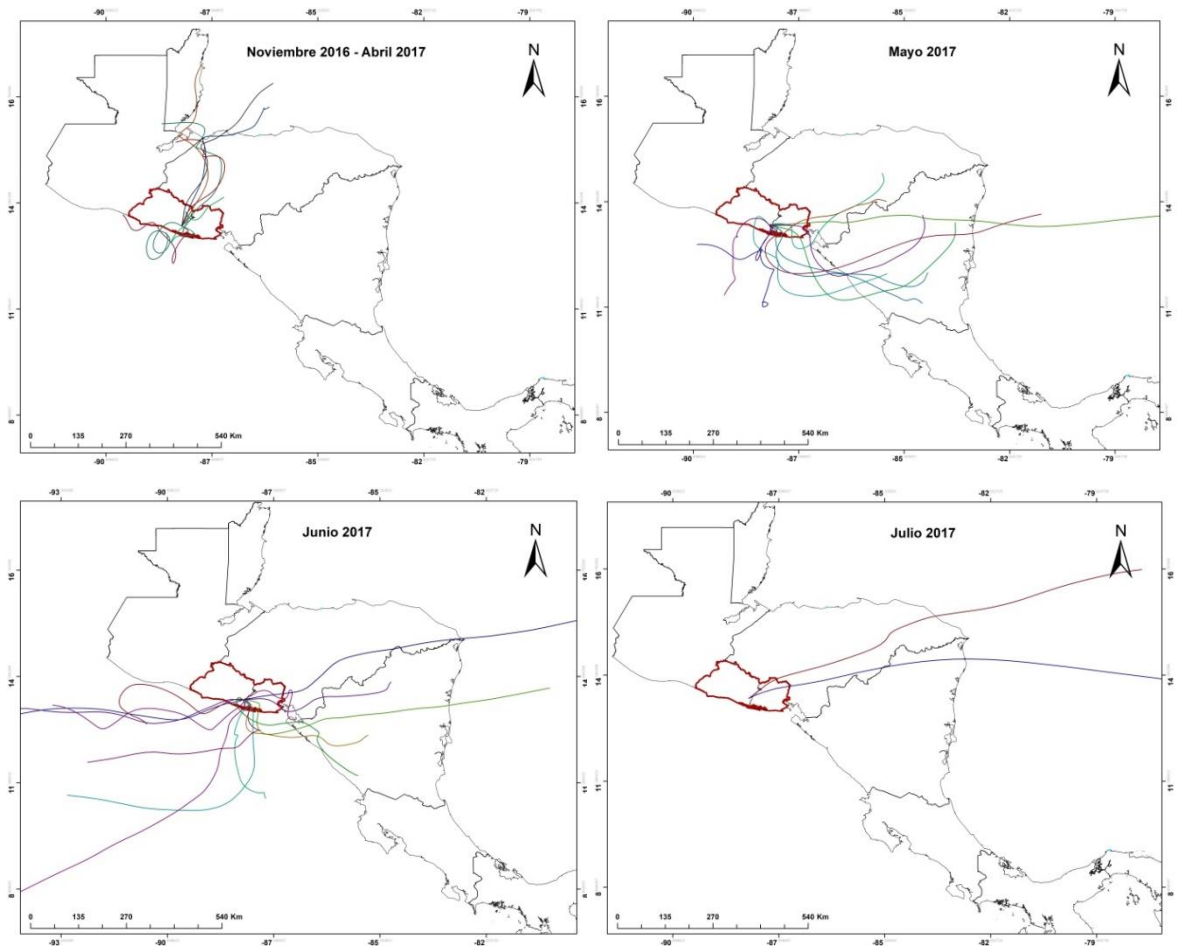
**Figura 12.** Fuentes de humedad durante la época de muestreo.

**1** (noviembre-2016 a abril-2017) humedad proviene del Norte.

**2** (mayo-2017) aporte de humedad de Este-Caribe.

**3** (junio-2017) mayoría desde Oeste, océano Pacífico y en menor desde el Este del Caribe.

**4** (julio-2017) únicamente del Este-Caribe.



Las últimas precipitaciones recolectadas abarcaron la transición de periodo seco a lluvioso, donde se tuvo la influencia de la depresión tropical Uno-E que aportó lluvias de moderadas a intensas. Luego ésta tuvo un desplazamiento hacia el noroeste de la región, evolucionando a tormenta tropical. Al mismo tiempo, se hacía efectivo el posicionamiento de la ZCIT frente a las costas de Centroamérica, dicha actividad en la región seguramente provocó que a partir de mayo se presentaran flujos provenientes tanto del Este como del Oeste de forma simultánea.

## 5 DISCUSIÓN

### 5.1 Composición isotópica subterránea

El estudio de la composición isotópica subterránea  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  se basa en el hecho de que, una vez el agua ha penetrado profundamente en el suelo, debajo de la zona no saturada, su composición isotópica permanece prácticamente sin cambios durante el movimiento y almacenamiento sub-superficial "excepto en condiciones de alta temperatura donde puede ocurrir el intercambio isotópico de oxígeno con la matriz de la roca" (Araguas-Araguas *et al.* 2000; Jasechko y Taylor 2015). De este modo, los sitios con altas tasas de recarga deben tener agua del suelo más similar a la firma isotópica de la precipitación entrante que sitios con menor recarga, mayor evaporación y, los que en consecuencia, presentan enriquecimiento isotópico del agua del suelo (Kendall y McDonnell 1998).

En El Salvador, hasta donde se conoce, únicamente Jasechko y Taylor (2015), han estudiado la composición isotópica subterránea en una zona de constitución volcánica, determinando valores de  $-7.39 \delta^{18}\text{O} \pm 0.26$ , dicho resultado es comparable con el valor promedio de  $\delta^{18}\text{O} - 7.9 \pm 1.1\text{‰}$  reportado para la vertiente Pacífica por Sánchez-Murillo y Birkel (2016b), quienes además determinaron que en la región del Pacífico Central de Costa Rica un patrón espacial donde las proporciones de agua subterránea se incrementa desde las cordilleras hasta la costa.

La humedad relativa de la zona en periodo seco se da entre 68% y 75% (SNET s.f.). Clark y Peter (1997) afirman que mientras menor es su valor, tanto el agua superficial como subterránea sufren fraccionamiento isotópico o evaporación secundaria, perdiendo su relación meteórica, y generando pendientes menores a 8. La pendiente de pozo generada en este estudio ( $y=0.6237x - 31.592$ ) considerablemente baja, cercana a la generada por Corrales et al. (2016a) ( $Y=3.79x - 9.62$ ), en un experimento de evaporación en la isla de Cocos del Pacífico de Costa Rica. Sin embargo, algunos pozos dan indicios de una zona diferenciada menor a los 50 m de altitud que no presenta un enriquecimiento muy alto, implicando recepción o aporte de la cuenca aguas arriba.

La evaporación superficial de pozos también se ha visto reflejada en ambientes someros (5 m de profundidad) en la región del Noroeste tibetano donde una composición isotópica más enriquecida comparada a la de precipitación, es explicada por un efecto de evaporación de la lluvia antes de la infiltración en el subsuelo (He y Richards 2015).

Es probable que los valores enriquecidos del agua subterránea sean el reflejo de las condiciones del suelo deforestado, altas temperaturas y poca humedad relativa, que según Dansgaard (1964) son determinantes para la composición isotópica. En tales condiciones, los suelos oponen resistencia a la infiltración de la recarga, como resultado de la evaporación cinética durante el flujo superficial (Werner 1996; Clark y Peter 1997).

La exposición de pozos a la atmósfera y la mezcla de aguas de riego, específicamente en pozos someros y con bajos niveles piezométricos, también son factores que favorecen el enriquecimiento isotópico según Gat y Gonfiantini (1981a). Tales condiciones han sido



reportadas en la cuenca, aunado a las características de un acuífero no confinado (WaterClima-LAC 2017).

La composición isotópica con valores agotados en la parte baja de la cuenca, probablemente sea el reflejo de una recarga proveniente la zona alta, recarga que no se visualizó en este estudio, ya que los recolectores de lluvia únicamente se ubicaron en la parte media baja de la cuenca.

## **5.2 Composición isotópica en agua superficial**

En la Cuenca únicamente se evaluaron 3 ríos, afluentes pertenecientes a la parte media de la cuenca. La recta de regresión ( $y=1.44x -27.423$   $R^2=0.12$ ) también generó una pendiente baja al igual que en pozos (Figura 8) reflejando procesos de evaporación. En la zona media baja, el principal uso de los ríos es para riego; según Alejandro Félix <sup>1</sup> hay otros tres ríos pequeños que son exclusivamente para riego, su cauce es desviado ilegalmente o utilizado en su totalidad para la caña de azúcar.

Como lo explica Kendall y McDonnell (1998), es probable que en la zona de estudio, el marcado efecto de evaporación en agua superficial sea el resultado del flujo de retorno del agua de riego evaporada, o de la contribución del agua tributaria enriquecida por evaporación, o derivada de la precipitación local que refleja el ambiente local.

## **5.3 Composición isotópica en la precipitación**

En zonas tropicales, donde no hay variaciones marcadas de temperatura durante el año, la relación entre la composición isotópica y la cantidad parece ser controlada por la variación isotópica del vapor de agua en la misma región donde se origina (Rozanski et al., 1993).

En el sitio de estudio, es probable que la temperatura cálida y el efecto de baja humedad relativa haya propiciado mayor intercambio de humedad, aumentando la probabilidad de evaporación a medida que el agua precipita (Clark y Peter 1997). Sin embargo los altos valores de deuterio en exceso encontrados pueden dar indicios que el inicio de las precipitaciones de la época lluviosa variaron las condiciones hacia un aumento de humedad relativa explicado por un reciclaje de humedad local que aumenta la fracción de evaporación (Kong *et al.* 2013)

Se considera que las condiciones climáticas de la época seca, y probablemente la manipulación de las muestras hacia el laboratorio hayan producido evaporación parcial de la muestra dando lugar a pendientes considerablemente bajas. Para los casos de su manipulación Gat y Gonfiantini (1981), recomiendan una recolección rápida, ya que la muestra queda expuesta a procesos evaporativos.

En El Salvador son escasos los registros isotópicos reportados, Lachniet y Patterson (2009), publicaron valores ponderados de  $-6.5\text{‰}$  de  $\delta^{18}\text{O}$  y una recta meteórica local  $\delta^2\text{H}= 8.1x +10.9$ , a partir de los datos de la estación GNIP, cabe destacar que dichos datos difieren mucho a los aquí reportados, ya que son promedios anuales de una serie de tiempo, mientras que los actuales datos provienen del periodo seco 2017 y específicamente de una cuenca costera. El

---

<sup>1</sup>Alejandro Félix 3 mar.2017.Riegos (entrevista).Unidad Ambiental, municipalidad de Tecoluca, San Vicente. El Salvador.

estudio mencionado concluye que para El Salvador la variación estacional en la composición isotópica refleja efectos de cantidad, con magnitud de  $-1.24 \text{ ‰}$  ( $r = -0.71$ ) por cada 100 mm de lluvia mensual en San Salvador.

## 6 CONCLUSIONES

La cuenca El Guayabo, durante el periodo seco, presentó una composición isotópica enriquecida. Las rectas de regresión de precipitación, ríos y pozos se desplazaron por debajo de la línea promedio mundial.

Se encontró diferencias significativas entre la recta de regresión de lluvia y las generadas por pozos y ríos. Por lo que se considera que en la cuenca, el agua de lluvia no genera un aporte significativo al agua subterránea durante el periodo seco.

Los valores enriquecidos de la composición isotópica subterránea refleja que este ambiente ha sufrido procesos de evaporación secundaria posterior a la precipitación. Tales valores se presentaron más atenuados en la parte alta de la cuenca. Los valores empobrecidos de la parte media baja, puede indicar recarga proveniente de la zona alta de la cuenca.

La composición isotópica de agua superficial y subterránea se vio influenciada por un ambiente de características áridas. Sumado a que en los cultivos de la zona recurren a quemas de terrenos, recirculación de aguas de ríos y pozos mediante el riego. Y las características de un ambiente aluvial somero condicionan en gran medida la composición isotópica final del agua.

Los principales aportes de humedad en la zona dentro del periodo de estudio fueron dos, los provenientes del Norte combinado con circulación local y lluvias aisladas, estas fuentes de humedad se vieron registradas con los valores más enriquecidos durante la etapa de muestreo. El segundo aporte de humedad importante fue el proveniente del Caribe o del Este, caracterizado por lluvias más frecuentes y por una composición isotópica más empobrecida.

## BIBLIOGRAFÍA

### Bibliografía

- Algeet Abarquero, N; Fernández Moya, J; Lianes Revilla, E; Marchamalo Sacristán, M; Martínez Marín, R; Rejas, JG; Alvarado, A; Abreu, A; Perez, A; Irias, A. 2012. Manejo Integral de Agua y Suelo en Centroamérica. Bases científicas para el desarrollo rural comunitario:
- ANDA, (Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados). 2015. Mapa Hidrogeológico de El Salvador (electrónico). San Salvador, Consultado Noviembre 2017. Disponible en <http://www.anda.gob.sv/mapa-hidrogeologico/>
- Araguas-Araguas, L; Froehlich, K; Rozanski, K. 2000. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture Hydrological Processes 14(8):1341-1355.
- Ballesteros, M. 2005. Planificación y administración hídrica en Centroamérica En: Administración del agua en América Latina: situación actual y perspectivas-LC/L. 2299-P-2005-p. 55-63:
- Bowen, GJ. 2010. Statistical and geostatistical mapping of precipitation water isotope ratios. *In* West, JB; Bowen, GJ; Dawson, TE; Tu, KP (eds.). Isoscapes. Understanding Movement, Pattern, and Process on Earth Through Isotope Mapping. New York, Springer. p. 139-160.
- CAAD. 1998. Estado del ambiente y los recursos naturales en Centroamérica. *In* Desarrollo, CCdAy (ed.). p. 28.
- Clark, I; Peter, F. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Florida, Lewis Publishers.
- Clark, I. 2015. Groundwater Geochemistry and Isotopes. CRC Press.
- Clark, ID; Fritz, P. 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. CRC press.
- Corrales, JL; Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Herrera, E; Boll, J. 2016. Tracking the water fingerprints of Cocos Island: a stable isotope analysis of precipitation, surface water, and groundwater *Revista de Biología Tropical/International Journal of Tropical Biology and Conservation* 64(1):105-120.
- Craig, H. 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters *Science* 133(3467):1833-1834.
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation *Tellus* 16(4):436-468.
- Froehlich, K; Gibson, J; Aggarwal, P. 2001a. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. *In*. Study of Environmental Change Using Isotope Techniques. Proc. Intern. Conf. Citeseer. p. 54-66.
- Froehlich, K; Gibson, J; Aggarwal, P. 2001b. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance *International Atomic Energy Agency, C&S Papers Series* 13:54-66.

- Gat, JR; Gonfiantini, R. 1981a. Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle:
- Gat, JR; Gonfiantini, R. 1981b. Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. Vienna. 339 p.
- Gat, JR. 1996. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 24(1):225-262.
- Guswa, AJ; Rhodes, AL; Newell, SE. 2007. Importance of orographic precipitation to the water resources of Monteverde, Costa Rica *Advances in Water Resources* 30(10):2098-2112.
- GWP-CA. 2005a. Centroamérica (GWP-CA), 2006, Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica: Hacia una Gestión Integrada, Ed Virginia Reyes G., 3ª Ed., San José, Costa Rica.. Artavia, I., Carvajal, K. y Guzmán, A:
- GWP-CA. 2005b. Centroamérica (GWP-CA), 2006, Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica: Hacia una Gestión Integrada, Ed. (Virginia Reyes G., 3ª Ed., San José, Costa Rica.. Artavia, I., Carvajal, K. y Guzmán, A).
- Harter, T. 2003. Basic concepts of groundwater hydrology. UCANR Publications.
- He, S; Richards, K. 2015. The role of dew in the monsoon season assessed via stable isotopes in an alpine meadow in Northern Tibet *Atmospheric research* 151:101-109.
- Hernández-Antonio, A; Mahlkecht, J; Tamez-Meléndez, C; Ramos-Leal, J; Ramírez-Orozco, A; Parra, R; Ornelas-Soto, N; Eastoe, C. 2015. Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: the case of Guadalajara (Mexico) *Hydrology and Earth System Sciences* 19(9):3937-3950.
- IAEA. 1992. Statistical Treatment of data on environmental isotopes in precipitation. Agency, IAE (ed.) Vienna, International Atomic Energy Agency. 793 p. (Technical Reports Series). No. 31.
- IPCC. 2014. Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* In Magrin, GO; J.A. Marengo; J.-P. Boulanger; M.S. Buckeridge; E. Castellanos; G. Poveda; F.R. Scarano; S. Vicuña (eds.). p.
- Jasechko, S; Taylor, RG. 2015. Intensive rainfall recharges tropical groundwaters *Environmental Research Letters* 10(12):124015.
- Kendall, C; McDonnell, JJ. 1998. Isotope tracers in catchment hydrology. Amsterdam, Elsevier. 847 p.
- Kendall, C, , (Servicio Geológico Estados Unidos). 1995. Resources on Isotopes (electronico). Kendall, C; Caldwell, E; Snyder, D (eds.). Estados Unidos de Norteamérica, Consultado 10 Octubre 2017. Disponible en [https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/isoig/period/o\\_iig.html](https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/isoig/period/o_iig.html)
- Kong, Y; Pang, Z; Froehlich, K. 2013. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 65(1):19251.
- Kortelainen, N. 2007. Isotopic fingerprints in surficial waters: stable isotope methods applied in hydrogeological studies *Erikoisjulkaisut*:

- Lachniet, MS; Patterson, WP. 2002. Stable isotope values of Costa Rican surface waters *Journal of Hydrology* 260(1):135-150.
- Lachniet, MS; Patterson, WP. 2009. Oxygen isotope values of precipitation and surface waters in northern Central America (Belize and Guatemala) are dominated by temperature and amount effects *Earth and Planetary Science Letters* 284(3-4):435-446.
- Losilla, M. 2001. Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central. Editorial Universidad de Costa Rica.
- Magaña, V; Amador, JA; Medina, S. 1999. The midsummer drought over Mexico and Central America *Journal of Climate* 12(6):1577-1588.
- Marfia, A; Krishnamurthy, R; Atekwana, EA; Panton, W. 2004. Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst dominated geological setting: a case study from Belize, Central America *Applied Geochemistry* 19(6):937-946.
- MARN. 2004. Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial. *In*, Gobierno de El Salvador. p. 50.
- MARN. 2013a. Estrategia y el Plan Ambiental Operativo para el humedal Complejo Jaltepeque. *In*. p. 21.
- MARN. 2013b. Informe de Calidad de Agua de los ríos de El Salvador 2013. 1 ed. Naturales, MdMAyR (ed.) San Salvador, No. 4. Consultado 21 Febrero 2017. Disponible en <http://www.marn.gob.sv/descarga/informe-de-calidad-de-agua-de-los-rios-de-el-salvador-2013/>
- MARN. 2016a. Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en Zonas Prioritarias. MARN, A (ed.) San Salvador, 331 p. No. 1.
- MARN, (Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2010. Informe de la Calidad del Agua de los Rios de El Salvador (2010). Salvador, OdaE (ed.) San Salvador, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Consultado 5 octubre 2016. Disponible en <http://agua.marn.gob.sv/Documentos/Estudios/Calidadagua/CalidadAgua2010.pdf>
- MARN, (Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2016b. Sequía meteorológica débil en el oriente del país del 9 al 15 de agosto de 2016. San Salvador, No. 2. Disponible en <http://www.marn.gob.sv/informe-2-sequia-meteorologica-debil-en-el-oriente-del-pais-del-9-al-15-de-agosto-de-2016/>
- MARN, (Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2016c. Clima y condiciones hidrológicas 2016. Perspectiva diciembre 2016 - marzo 2017. San Salvador, Disponible en [https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/SV\\_MARN-20161129\\_0.pdf](https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/SV_MARN-20161129_0.pdf)
- Mazor, E. 2003. Chemical and isotopic groundwater hydrology. CRC Press.
- Meyrat, A; Poveda, C; Picado, L; Van der Zee Arias, A; Van der Zee, J. 2012. Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano.(Países CA-4) Tomo I:
- NOAA. 2013. Web-based HYSPLIT Applications for Emergency Response. Viena, NOAA. Consultado 17 Enero 2017. Disponible en [http://www.arl.noaa.gov/documents/Summaries/Dispersion\\_HYSPLIT.pdf](http://www.arl.noaa.gov/documents/Summaries/Dispersion_HYSPLIT.pdf)

- Poveda, G; Waylen, PR; Pulwarty, RS. 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234(1):3-27.
- PRISMA. 2001. Estudio de Aguas Salinas en la Zona Costera de la Bahía de Jiquilisco. *In* FIAS-ANDA (ed.) 1 ed., Prisma. p. 27.
- Reyes-García, C; Andrade, JL. 2007. Los isótopos estables del hidrógeno y el oxígeno en los estudios ecofisiológicos de plantas *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 80:19-28.
- Rozanski, K; Sonntag, C; Münnich, K. 1982. Factors controlling stable isotope composition of European precipitation *Tellus* 34(2):142-150.
- Rozanski, K; Araguás-Araguás, L. 1995. Spatial and temporal variability of stable isotope composition of precipitation over the South American continent *Bull. Inst. fr. etudes andines* 24(3):379-390.
- Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Welsh, K; Brooks, ES; Boll, J; Alfaro-Solís, R; Valdés-González, J. 2013. Spatial and Temporal Variation of Stable Isotopes in Precipitation across Costa Rica: An Analysis of Historic GNIP Records *Open Journal of Modern Hydrology* 03(04):226-240. doi 10.4236/ojmh.2013.34027
- Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Sáenz-Rosales, O; Piedra-Marín, G; Fonseca-Sánchez, A; Madrigal-Solís, H; Ulloa-Chaverri, F; Rojas-Jiménez, LD; Vargas-Viquez, JA. 2016. Isotopic composition in precipitation and groundwater in the northern mountainous region of the Central Valley of Costa Rica *Isotopes in Environmental and Health Studies*:1-17.
- Sánchez-Murillo, R; Birkel, C. 2016a. Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region *Geophysical Research Letters*:
- Sánchez-Murillo, R; Birkel, C. 2016b. Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region *Geophysical Research Letters* 43(10):5060-5069.
- Sánchez-Murillo, R; Durán-Quesada, AM; Birkel, C; Esquivel-Hernández, G; Boll, J. 2016. Tropical precipitation anomalies and d-excess evolution during El Niño 2014-16 *Hydrological Processes*:
- Schiaidt-thomé, M. 1975. The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America), a basis for city development and planning:
- Scholl, MA; Shanley, JB; Zegarra, JP; Coplen, TB. 2009. The stable isotope amount effect: new insights from NEXRAD echo tops, Luquillo Mountains, Puerto Rico *Water Resources Research* 45(12):
- Sepúlveda López, CJ; Ibrahim, M. 2013. Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas: como una medida de adaptación al cambio climático en América Central.
- SNET, (Sistema Nacional de Estudios Territoriales EL Salvador). s.f. Perfil Climatológico, estaciones meteorológicas de EL Salvador San Salvador, Disponible en <http://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima/perfiles+climatologicos/>

- Stein, A; Draxler, R; Rolph, G; Stunder, B; Cohen, M; Ngan, F. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system Bulletin of the American Meteorological Society 96(12):2059-2077.
- Stumpp, C; Ekdal, A; Gönenc, I; Maloszewski, P. 2014. Hydrological dynamics of water sources in a Mediterranean lagoon Hydrology and Earth System Sciences 18(12):4825.
- Taylor, CJ; Alley, WM. 2001. Ground-water-level monitoring and the importance of long-term water-level data. Geological Survey (USGS).
- Unkovich, M; Pate, J; McNeill, A; Gibbs, J. 2013. Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems. Springer Science & Business Media.
- Van der Zee Arias; AmparoMeyrat; Alain Van der Zee; Jaap. 2012. Estudio de caracterizacion del Corredor Seco Centroamericano. FAO.
- Vargas, G. 1992. Estudio del uso actual y capacidad de uso de la tierra en América Central Anuario de Estudios Centroamericanos:7-23.
- WaterClima-LAC, (Gestion de Zonas Costeras). 2017. Diagnostico de los recursos hidricos subterranos en la zona del Bajo Lempa. Vilanova, E; Cornella, O (eds.). Barcelona, Amphos 21.
- Werner, J. 1996. Introducción a la Hidrogeología:
- Yoshimura, K. 2015. Stable Water Isotopes in Climatology, Meteorology, and Hydrology: A Review 気象集誌. 第 2 輯 93(5):513-533.

## Anexos

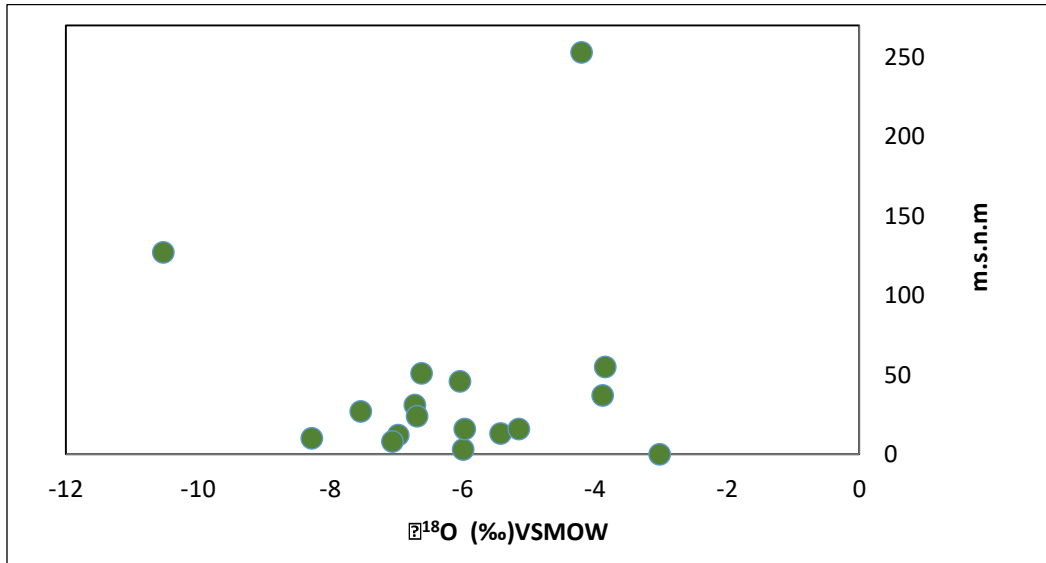
### Anexo 1 Tipos de colectores de precipitación utilizados en el presente estudio

	<p><b>Recolector de precipitaciones PALMER RS1B</b></p> <p>La disposición de la manguera de goma en el interior del recipiente permite que puedan recolectarse precipitaciones acumuladas de varios eventos sin sufrir evaporación.</p>
	<p><b>Totalizador enterrado (fuente: Guía OIEA/GNIP 2014).</b></p> <p>Embudo conectado por un tubo PVC a un recipiente enterrado, basándose en que la temperatura media debajo de la superficie permite reducir la tasa de evaporación.</p>



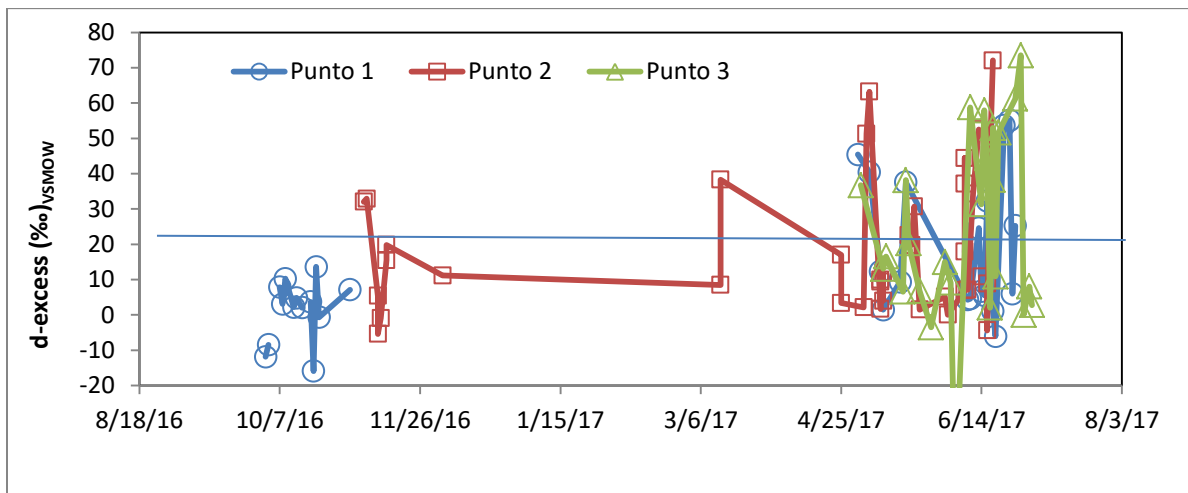
## Anexo 2

Diagrama de la composición isotópica subterránea contra la elevación altitudinal en el área de estudio cuenca El Guayabo, bajo lempa.



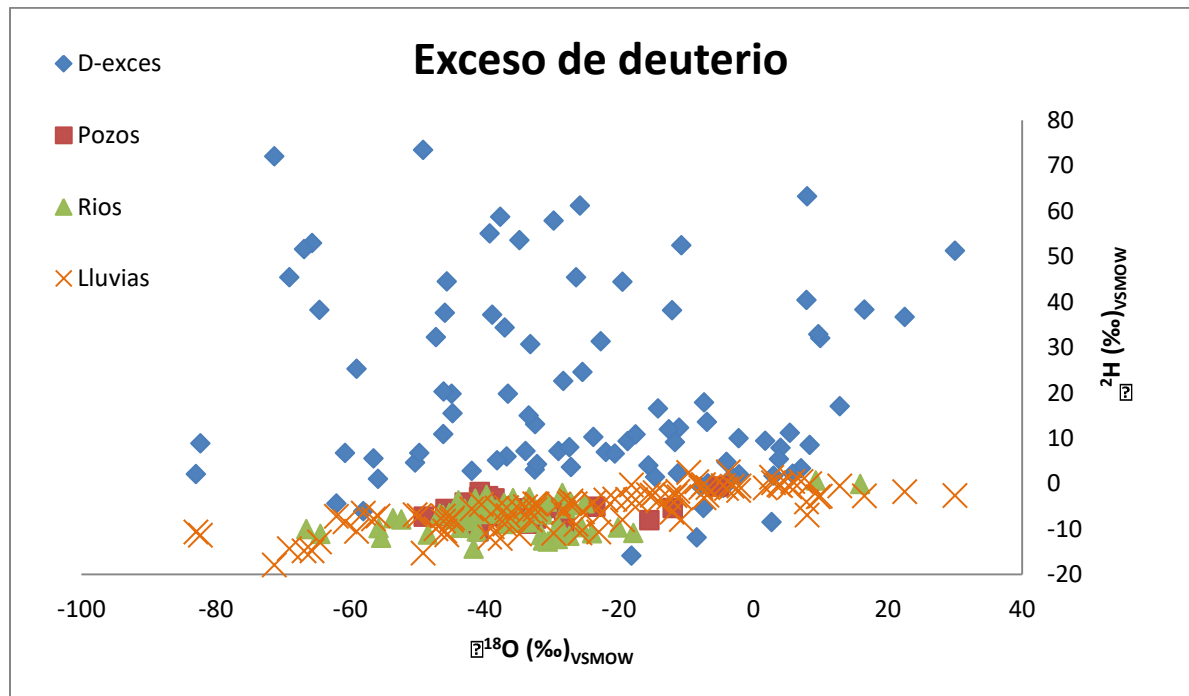
## Anexo 3

Variación del d-excess (deuterio en exceso) para cada punto de precipitación durante la etapa de muestreo.



## Anexo 4

Exceso de deuterio comparado con la composición isotópica del agua subterránea y ríos.



## Anexo 5

Origen de la fuente de humedad para cada evento de precipitación registrado durante el muestreo, Octubre 2016 a julio 2017.

Fecha	Origen	Fecha	Origen
10/2/2016	Norte	6/1/2017	Sur este
10/7/2016	Norte	6/2/2017	Este, Caribe
10/9/2016	Norte	6/3/2017	Sur
10/12/2016	Norte	6/4/2017	Sur
10/13/2016	Norte	6/6/2017	Sur
10/19/2016	Oeste	6/8/2017	Sur-oeste
10/21/2016	Norte	6/10/2017	Oeste

---

<b>11/1/2016</b>	Norte	<b>6/11/2017</b>	Sur-oeste
<b>11/6/2016</b>	Norte	<b>6/13/2017</b>	Este, Caribe
<b>11/7/2016</b>	Norte	<b>6/14/2017</b>	Este, Caribe
<b>11/11/2016</b>	Nor-este	<b>6/15/2017</b>	Este, Caribe
<b>11/12/2016</b>	Norte	<b>6/16/2017</b>	Sur-este
<b>11/14/2016</b>	Nor-este	<b>6/17/2017</b>	Sur-este
<b>12/4/2016</b>	Nor-este	<b>6/18/2017</b>	Sur-este
<b>3/13/2017</b>	Nor-oeste	<b>6/19/2017</b>	Este, Caribe
<b>4/25/2017</b>	Nor-oeste	<b>6/20/2017</b>	Este, Caribe
<b>5/1/2017</b>	Este, Caribe	<b>6/26/2017</b>	Nor-este
<b>5/2/2017</b>	Este, Caribe	<b>6/28/2017</b>	Este, Caribe
<b>5/3/2017</b>	Este, Caribe	<b>6/29/2017</b>	Nor-este
<b>5/9/2017</b>	Este, Caribe	<b>7/1/2017</b>	Este, Caribe
<b>5/10/2017</b>	Este, Caribe	<b>1/2/2017</b>	Este, Caribe
<b>5/11/2017</b>	Este, Caribe		
<b>5/15/2017</b>	Oeste		
<b>5/16/2017</b>	Oeste		
<b>5/17/2017</b>	Oeste		
<b>5/18/2017</b>	Oeste		
<b>5/19/2017</b>	Oeste		
<b>5/20/2017</b>	Sur		
<b>5/21/2017</b>	Este, Caribe		
<b>5/23/2017</b>	Este, Caribe		

---