

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE FÍSICA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA



TESIS

**RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHOLUTECA POR MEDIO DE
METODOLOGÍAS ISOTÓPICAS**

PRESENTA: SAÚL JOSÉ GARCÍA SANTOS

**PREVIA OPCIÓN AL GRADO DE MÁSTER EN:
RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA**

ASESORES: RICARDO SÁNCHEZ MURILLO (PRINCIPAL)

EDGAR JOSUÉ MEJÍA (CO-ASESOR)

TANIA MARÍA PEÑA PAZ (CO-ASESOR)

TEGUCIGALPA, M.D.C.

HONDURAS, C.A.

Marzo, 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE FÍSICA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA
Ciudad Universitaria, Tegucigalpa, Honduras.



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS:

DOCTOR: ODIR AARÓN FERNÁNDEZ FLORES
RECTOR

DOCTOR. JOSÉ ALEXANDER ÁVILA
SECRETARÍA GENERAL

DOCTOR: ARMANDO EUCEDA
DIRECTOR DE POSTGRADOS

DOCTORA: TANIA PEÑA
COORDINADOR DE LA MAESTRÍA

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA

Marzo, 2024

RESUMEN

La cuenca alta del Río Choluteca en Honduras alberga asentamientos humanos como El Distrito Central, con una población proyectada de 1.6 millones de habitantes, enfrentando una creciente dependencia de fuentes subterráneas sin regulación y amenazando su sostenibilidad hídrica. La investigación busca caracterizar la dinámica de los procesos de recarga y renovación del agua subterránea en el área de estudio mediante el análisis de isótopos estables (Oxígeno-18, Deuterio) y un isótopo radiactivo (Tritio), aplicando una metodología con enfoque cuantitativo y de tipo explicativo desarrollada por medio de una serie de actividades que dan inicio con las jornadas de recolección de muestras de agua subterránea y lluvia, observándose que la dinámica en la composición isotópica de la lluvia esta influenciada por factores climáticos como vientos alisios, ondas tropicales del este, canícula o veranillo, ciclones tropicales y la activación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), obteniendo una línea meteórica general con la siguiente relación: $\delta^2\text{H} = 7.77 \cdot \delta^{18}\text{O} + 9.14\text{‰}$ ($r^2 = 0.97$; $p < 0.001$; $N = 426$) y una notable relación como fuente directa de recarga en las fuentes de agua muestreadas en el periodo comprendido entre los años del 2018 al 2020. Aplicando el método de elevación inversa para estimar las elevaciones medias de recarga (EMR) se determinó una relación de la composición isotópica de Oxígeno 18 y las elevaciones del terreno natural expresada por la ecuación $\delta^{18}\text{O} = -0.0036 \cdot \text{Elevación} - 1.4$ ($r^2 = 0.82$, $p < 0.01$) con estaciones de monitoreo ubicadas entre los 1063 a 1643 msnm y un registro en la zona de estudio ubicado a una elevación de 1700 msnm, estimando las EMR en un rango 821 a 2018 msnm (con un valor medio de 1570 ± 150 msnm). También, se emplea un modelo de flujo base-tiempo de tránsito de aguas subterráneas para analizar patrones de flujo y renovación de aguas subterráneas aplicando una integral de convolución relacionando una función de distribución tipo Gamma con la función de decaimiento del Tritio, calculando tiempo de tránsito medio en un rango de 2.18 a 2.71 años para las fuentes evaluadas. De manera general, esta investigación revela pautas significativas que indican la influencia tanto del clima como de actividades humanas en la composición isotópica de la lluvia y en los procesos de recarga de los acuíferos. Los resultados resaltan la compleja interacción entre los fenómenos climáticos y la recarga del agua subterránea, así como la importancia de tener en cuenta las variaciones en el tiempo y el espacio para una gestión adecuada de los recursos hídricos, la capacidad de transporte de contaminantes y la dinámica de recarga, como lo indican las edades aparentes de las aguas subterráneas. Estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar estrategias de manejo y conservación del agua que sean integrales y adaptadas a las condiciones específicas de la región.

ABSTRACT

The upper basin of the Choluteca River in Honduras is home to human settlements such as the Central District, with a projected population of 1.6 million inhabitants, facing an increasing reliance on unregulated underground sources and threatening its water sustainability. This research aims to characterize the dynamics of groundwater recharge and renewal processes in the study area through the analysis of stable isotopes (Oxygen-18, Deuterium) and a radioactive isotope (Tritium), applying a quantitative and explanatory methodology developed through a series of activities beginning with the collection of groundwater and rainwater samples. It was observed that the isotopic composition dynamics of rain are influenced by climatic factors such as trade winds, eastern tropical waves, the mid-summer drought, tropical cyclones, and the activation of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), resulting in a general meteoric line with the following relationship: $\delta^2\text{H} = 7.77 \cdot \delta^{18}\text{O} + 9.14\text{‰}$ ($r^2 = 0.97$; $p < 0.001$; $N = 426$) and a notable relationship as a direct recharge source in the water sources sampled between 2018 and 2020. By applying the inverse elevation method to estimate the mean recharge elevations (MRE), a relationship between the Oxygen-18 isotopic composition and the natural terrain elevations was determined, expressed by the equation $\delta^{18}\text{O} = -0.0036 \cdot \text{Elevation} - 1.4$ ($r^2 = 0.82$, $p < 0.01$) with monitoring stations located between 1063 and 1643 meters above sea level (m asl) and a record in the study area located at an elevation of 1700 m asl, estimating the MRE in a range of 821 to 2018 m asl (with an average value of 1570 ± 150 m asl). Additionally, a base-flow transit time model for groundwater was used to analyze groundwater flow and renewal patterns by applying a convolution integral relating a Gamma distribution function to the Tritium decay function, calculating a mean transit time in a range of 2.18 to 2.71 years for the evaluated sources. Generally, this research reveals significant patterns indicating the influence of both climate and human activities on the isotopic composition of rain and aquifer recharge processes. The results highlight the complex interaction between climatic phenomena and groundwater recharge, as well as the importance of considering temporal and spatial variations for proper water resource management, contaminant transport capacity, and recharge dynamics, as indicated by the apparent ages of groundwater. These findings underscore the need to implement comprehensive water management and conservation strategies tailored to the specific conditions of the region.

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
Índice de Mapas	vii
Índice de Imágenes.....	vii
Índice de Gráficos	viii
Índice de tablas	ix
ABREVIATURAS.....	x
AGRADECIMIENTOS.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
1. CAPÍTULO I: Delimitación del problema.....	3
1.1 Descripción de la problemática:.....	3
1.2 Justificación de la investigación.	4
1.3 Límites de la investigación.....	5
A. Limitaciones de tiempo	5
B. Limitaciones de espacio o territorio.....	5
C. Limitaciones de recursos	5
1.4 Definición del problema:.....	6
2. CAPÍTULO II: Objetivos	7
2.1 Objetivo general:.....	7
2.2 Objetivos específicos:.....	7
3. CAPÍTULO III: Marco de referencia.....	8
3.1 Marco político	8
3.2 Marco histórico	13
4. CAPÍTULO IV: Marco de teórico.....	15
4.1 Ciclo hidrológico del agua	15
A. Precipitación.....	15

B.	Esorrentía superficial	15
C.	Esorrentía subterránea	15
D.	Transpiración y evaporación	15
E.	Condensación	16
F.	Humedad relativa	16
G.	Trasporte de humedad.....	16
H.	Fuentes de humedad.....	16
4.2	Aguas superficiales	17
4.3	Agua subterránea	18
A.	Formaciones acuíferas.....	18
B.	Recarga de acuíferos	19
C.	Parámetros hidrogeológicos	20
4.4	Hidrología isotópica.....	21
4.5	Trazadores isotópicos estables en hidrología	21
4.6	Líneas meteóricas.....	21
4.7	Fraccionamiento isotópico.....	23
4.8	Fraccionamiento isotópico en el ciclo hidrológico.....	23
4.9	Efectos que modifican la señal isotópica del agua atmosférica.....	23
A.	Efecto de la temperatura	23
B.	Efecto de la altitud	24
C.	Efecto de latitud	24
D.	Efecto de la continentalidad.....	24
E.	Efecto de la cantidad de lluvia.....	25
F.	Distribución espacial de la señal isotópica	25
4.10	Exceso de Deuterio.....	25
4.11	Reciclaje de humedad	26

4.12	Trazadores isotópicos radiactivos en hidrología (Tritio) y modelo de cálculo de edades aparentes	26
A.	Origen del tritio	26
B.	Decaimiento radioactivo del Tritio	27
C.	Modelamiento del comportamiento de tritio	28
D.	La integral de convolución.....	28
E.	Distribución Gamma.....	29
F.	Aplicación de modelos	29
4.13	Trayectorias de masas HYSPLIT	29
5.	CAPÍTULO V: Descripción del medio.....	31
5.1	Localización	31
5.2	Topografía	32
5.3	Clima.....	33
5.4	Red hídrica.....	35
5.5	Geología.....	37
5.6	Esquemas hidrogeológicos.....	39
5.7	Cobertura forestal y uso de suelos.....	40
6.	CAPÍTULO VI: Metodología.....	43
6.1	Tipo de estudio.....	43
6.2	Diseño de investigación.....	43
6.2.1	Datos.....	43
A.	Isótopos estables en precipitación.....	43
B.	Isótopos estables en fuentes de agua (manantiales, pozos malacate y pozos perforados)	47
6.2.2	Métodos analíticos	48
6.2.3	Trayectorias de masas de humedad (HYSPLIT)	50
6.2.4	Elevaciones medias de recarga (EMR) y conectividad lluvia-agua subterránea	50
6.2.5	Análisis edades aparentes por medio de Tritio (Tiempos de tránsito)	51

7.	CAPÍTULO VII: Análisis e interpretación de los datos	55
7.1	Variabilidad isotópica de las precipitaciones en la cuenca alta del río Choluteca	55
7.2	Variabilidad isotópica de manantiales, pozos perforados y sondeos en la cuenca alta del Río Choluteca.....	57
7.3	Trayectorias de retorno de masa de aire HYSPLIT y fuentes de humedad	60
7.4	Elevaciones medias de recarga (EMR) y conectividad de la lluvia con las aguas subterráneas dentro de la cuenca alta del Río Choluteca.....	62
7.5	Comportamiento de tritio en fuentes de agua (Tiempos de tránsito).....	66
8.	CAPÍTULO VIII: Discusión de resultados	70
9.	Conclusiones.....	73
10.	Recomendaciones	75
11.	Contribuciones científicas	77
11.1	Sección 1: Publicaciones.....	77
11.2	Sección 2: Congresos.....	79
12.	Bibliografía.....	80
13.	ANEXOS.....	92
13.1	Obtención de trayectorias de masa por medio de modelos online HYSPLIT	92
13.2	Código en lenguaje R del modelo de flujo base-tiempo de tránsito de aguas subterráneas	96
13.3	Corridas modelo de flujo base-tiempo de tránsito de aguas subterráneas.....	99

Índice de Mapas

Mapa 1 Mapa de ubicación y comunidades que se encuentran en el área de estudio.....	32
Mapa 2 Morfología de la cuenca alta del Río Choluteca.....	33
Mapa 3 Comportamiento de la red hídrica en la cuenca alta del río Choluteca.....	37
Mapa 4 Descripción litológica de la cuenca alta del río Choluteca.....	39
Mapa 5 Descripción general teórica de valores de transmisividad en la cuenca alta del río Choluteca y piezometría construida a partir de cotas de manantiales y pozos malacate.....	40
Mapa 6 Representación de las diferentes coberturas de suelos presentes en el área de estudio.	42
Mapa 7 Ubicación de los sitios de monitoreo de precipitación en la cuenca alta del río Choluteca.....	45
Mapa 8 Distribución espacial de las fuentes muestreadas en la cuenca alta del río Choluteca.....	48
Mapa 9 Representación de trayectorias de masas de aire para la estación de la UNAH y su composición isotópica de ¹⁸ O.	61
Mapa 10 Representación de trayectorias de masas de aire para la estación de la UNAH y el Exceso de deuterio.....	62
Mapa 11 Elevaciones de recarga considerando todas las fuentes de agua subterráneas.....	64
Mapa 12 Representación de elevaciones de recarga (pozos perforados) en la cuenca alta del Río Choluteca.	65
Mapa 13 Distribución espacial de fuentes analizadas para determinar la concentración de tritio.	67

Índice de Imágenes

Ilustración 1 Esquema de los componentes del ciclo hidrológico (USGS, 2019).....	17
Ilustración 2 Comportamiento de la Línea meteórica de acuerdo con diferentes factores característicos de las zonas de estudios. (Soler, Otero, Rossell, Carrey, & Domenech, 2015)	23
Ilustración 3 Evolución de la composición isotópica por efecto continental.....	25
Ilustración 4 Esquema y funcionamiento del colector de lluvia utilizado en los sitios de monitoreo.	44
Ilustración 5 Instalación de equipo de recolección de muestras de agua lluvia en la UNAH.	46
Ilustración 6 Revisión y mantenimiento a equipo en estación de monitoreo y recolección de agua lluvia en el Cerro de Hula.....	46
Ilustración 7 Preparación de muestras y equipo utilizado para la determinación de la concentración isotópica de las muestras.	49

Ilustración 8 Análisis preliminar de resultados de la concentración isotópica de las diferentes muestras junto con el asesor principal.....	49
Ilustración 9 Adaptación de modelos para distribución de tiempos de tránsito utilizando como función de entrada el tritio.	52
Ilustración 10 Código principal de modelo de flujo base/tiempo de tránsito de aguas subterráneas.	96
Ilustración 11 Código de función de probabilidad gamma integrada al modelo de flujo base/tiempo de tránsito de aguas subterráneas.....	97
Ilustración 12 Código integrado al modelo para obtención de datos de precipitación y tritio como función de entrada.	98

Índice de Gráficos

Gráfico 1 Comportamiento de la precipitación en el área de estudio, a representa la precipitación media mensual y b, la precipitación media anual de las diferentes estaciones determinadas.....	35
Gráfico 2 Distribución porcentual de las coberturas forestales y uso de suelos en el área de estudio.	41
Gráfico 3 Construcción del comportamiento de tritio en la precipitación a partir de series de tiempo registradas en la región.....	53
Gráfico 4 Comportamiento estacional de la composición isotópica de la lluvia en los sitios monitoreados.	56
Gráfico 5 Variación temporal del exceso de deuterio en el área de estudio.....	56
Gráfico 6 Representación del comportamiento de las fuentes de agua sobre la línea meteórica en la subcuenca Choluteca Alta.	58
Gráfico 7 Representación del comportamiento de las fuentes de agua sobre la línea meteórica en la subcuenca Guacerique Grande.	59
Gráfico 8 Representación del comportamiento de las fuentes de agua sobre la línea meteórica en la subcuenca Río del Hombre.....	59
Gráfico 9 Representación del comportamiento de las fuentes de agua sobre la línea meteórica en la subcuenca Yeguaré.....	60
Gráfico 10 Representación del gradiente isotópico para el área de estudio de la cuenca alta del Río Choluteca donde EP es El Picaho, CH, Cerro de Huya y RD, Rincón de Dolores.....	63
Gráfico 11 Distribución de fuentes de agua por su altura de recarga y comparación de elevación de bombeo frente a la elevación de recarga de las fuentes analizadas en el área de estudio.	65

Gráfico 12 Fuente: Comportamiento de tritio en las muestras de agua seleccionadas en el área de estudio.
..... 68

Índice de tablas

Tabla 1 Distribución de las diferentes coberturas forestales y usos de suelos en el área de estudio..... 41

Tabla 2 Ubicación y régimen de muestreo de las estaciones de recolección de muestras de lluvia ubicadas en la cuenca alta del río Choluteca. 45

Tabla 3 Número de análisis de fuentes de agua de acuerdo con la temporada que se realizaron los muestreos.
..... 47

Tabla 4 Líneas meteóricas locales de cada sitio de monitoreo de isótopos estables. 57

Tabla 5 Concentraciones de tritio analizado en las fuentes de agua seleccionadas en el área de estudio. . 66

Tabla 6 Resultados del modelo de tránsito de aguas subterráneas. 69

ABREVIATURAS

‰	Partes por mil
¹⁸ O	Isótopo oxígeno 18
¹⁸ O/ ¹⁶ O	Relación entre isótopos de oxígeno
² H, D	Isótopo deuterio
² H/ ¹ H	Relación entre isótopos de hidrógeno
AMCD	Alcaldía Municipal del Distrito central
ASTER	Radiómetro Avanzado de Reflexión y Emisión Térmica Espacial (por sus siglas en inglés)
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
cm/s	Centímetro por segundo
cm ² /s	Centímetro cuadrado por segundo
EMR	Elevaciones medias de recarga
ENEE	Empresa Nacional de Energía Eléctrica
ENSO	El Niño-Oscilación del Sur (por sus siglas en inglés)
FCIHS	Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea
GDAS1	Sistema global de asimilación de datos (por sus siglas en inglés)
GNIP	Red Mundial sobre Isótopos en la Precipitación (por sus siglas en inglés)
GWP	Asociación mundial para el agua (por sus siglas en inglés)
HDPE	Polietileno de alta densidad (por sus siglas en inglés)
HYSPLIT	Modelo híbrido de trayectoria integrada lagrangiana de partícula única (por sus siglas en inglés)
ICF	Instituto de Conservación Forestal
IGME	Instituto Geológico y Minas de España
IHCIT	Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra
INE	Instituto Nacional de Estadística
INRH	Instituto Nacional del Recurso hídrico
JICA	Agencia Japonesa de Cooperación Intente nacional (por sus siglas en inglés)
LMG	Línea meteórica global
LMGCC	Línea meteórica global Cuenca Choluteca Alta
LML	Línea meteórica local
m/d	Metro por día
m ² /d	Metro cuadrado por día
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NCAR	Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (por sus siglas en inglés)
NCEP	Centros Nacionales de Predicción Ambiental (por sus siglas en inglés)
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (por sus siglas en inglés)
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
SANAA	Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados
UNAH	Universidad Nacional Autónoma de Honduras
UT	Unidades de tritio

UTC	Hora universal coordinada (por sus siglas en inglés)
VSMOW	Estándar de Viena Agua media del océano (por sus siglas en inglés)
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical
$\delta^{18}\text{O}$	Composición isotópica de oxígeno 18
$\delta^2\text{H}$	Composición isotópica de deuterio

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios y la Virgen por ser mi guía constante y mi fuente de fortaleza en este viaje académico. Su gracia y sabiduría han sido mi luz en los momentos oscuros y mi fuerza en los momentos de desafío.

A mi amada esposa Gloria, agradezco su amor incondicional, paciencia y apoyo inquebrantable. Tu presencia ha sido mi mayor inspiración y motivación, tu apoyo constante ha sido el impulso detrás de este logro.

A mi querida familia, les agradezco por su amor incondicional y su constante aliento. Su fe en mí y su apoyo han sido un tesoro incomparable en este viaje académico.

A mis respetados asesores; Dr. Ricardo Sánchez Murillo cuya invaluable asesoría y orientación fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación, su profundo conocimiento y apoyo continuo fueron de mucha inspiración sumergiéndome en lo maravilloso que tiene la naturaleza a través de lo que en una ocasión me mencionó “aventuras isotópicas”. Dra. Tania Peña y MSc. Edgar Mejía por su mentoría, consejos y apoyo a lo largo de este proceso académico.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH) por brindarme las herramientas necesarias para destacar y fortalecer mis capacidades profesionales, a mis compañeros de maestría por compartir su motivación, dedicación y compañerismo fundamentales para alcanzar este logro.

Mi más sincero agradecimiento al Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT) de la UNAH, al Proyecto del Fondo de Adaptación, al Grupo de Investigación en Isótopos Estables de la Universidad Nacional en Heredia, Costa Rica, y al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) por su generoso apoyo financiero e institucional en el fortalecimiento de mis capacidades en la temática de la hidrología Isotópica. También, la Alcaldía Municipal del Distrito Central (AMDC) y el Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA) por su colaboración técnica y contribuciones.

INTRODUCCIÓN

En el panorama global, las metrópolis como el Distrito Federal en México, Barcelona en España, Nueva York en Estados Unidos y Tokio en Japón, enfrentan desafíos en su relación con la gestión de los recursos hídricos debido a la alta concentración poblacional. Esta situación conlleva a modelos urbanos que a menudo obligan a hacer mal uso los recursos, generando la necesidad de explorar en profundidad la influencia de la configuración urbana en la gestión del agua (Rojas, Zizumbo, Hernández, & Arriaga, 2018), siendo indispensable la aplicación de diferentes metodologías de investigación que ayuden a mejorar estas condiciones en favor de las poblaciones y sus entornos.

Por otro lado, en Centroamérica, ciudades como Managua, Ciudad de Guatemala y San José, se encuentran en zonas con bajas tasas de precipitación, lo que genera conflictos en la gestión de la oferta y la demanda de agua. En el caso del Distrito Central en Honduras, con una población proyectada de 1.6 millones de habitantes (INE, 2023) y ubicado en la cuenca alta del Río Choluteca, la dependencia creciente de fuentes subterráneas sin los procedimientos eficientes de regulación amenaza su sostenibilidad, requiriendo medidas urgentes para garantizar la disponibilidad de agua para la población a largo plazo sin comprometer el comportamiento natural de las aguas subterráneas.

La inadecuada aplicación de la legislación y los planes estratégicos, sumado al incremento de la demanda, afecta la cantidad y calidad del agua, con repercusiones en la salud humana y ambiental (Sanjuán, 2012), situaciones que se presentan en el Distrito Central, que además, se ha registrado en la última década una tasa de crecimiento poblacional anual del 2.2 %, lo que también conlleva a un crecimiento en el cambio en el uso del suelo del 4.4% anual (BID, 2015), factores que contribuyen en la degradación de los recursos naturales que pone en peligro el suministro de agua, tradicionalmente basado en fuentes superficiales. Ante esta limitación, la explotación de aguas subterráneas se vuelve esencial, aunque la información sobre su cantidad, calidad y flujo es limitada (IHCIT-UNAH, 2012). Las metodologías isotópicas emergen como herramientas cruciales para monitorear y proteger las áreas de recarga de acuíferos en un contexto de crecimiento poblacional y sus diversas actividades económicas.

Ante la importancia que ha adquirido el uso de agua subterránea, la presente investigación tiene como objetivo general caracterizar la dinámica de los procesos de recarga y renovación del agua subterránea en la cuenca alta del Río Choluteca mediante el análisis de isótopos estables (oxígeno-18, deuterio) y un isótopo radiactivo (tritio), considerando principalmente el análisis temporal de la composición isotópica de la lluvia en la cuenca, la determinación de las elevaciones medias de recarga potenciales de los acuíferos

explotados y la estimación de las edades aparentes de renovación de las aguas subterráneas mediante un modelo de tiempos de tránsito medio.

La investigación se desarrolla desde un enfoque cuantitativo explicativo, según Sousa y otros (2007), el rigor cuantitativo proporciona una estrategia sistemática, objetiva y rigurosa con el fin de crear y perfeccionar el conocimiento, basándose principalmente en el razonamiento deductivo y la generalización. La investigación explicativa se destaca por su enfoque en entender las relaciones de causa y efecto entre variables, así como en indagar sobre las razones detrás de la ocurrencia de determinados fenómenos, como lo menciona Babbie (2021) y Flick (2014), su objetivo es identificar los elementos fundamentales que impactan en un evento o situación, profundizando en la comprensión de los mecanismos que generan resultados específicos desarrollando explicaciones y teorías que faciliten la comprensión y predicción de los eventos investigados.

Para lograr los objetivos se implementa una serie de actividades y procesos que incluye la recolección de muestras de agua subterránea de diferentes fuentes (pozos perforados, pozos malacate y nacimientos), así como muestras de lluvia para determinar su composición isotópica y establecer relaciones entre ellas. Se emplean equipos especializados para medir la concentración de isótopos estables y tritio en las muestras con el apoyo del Grupo de Investigación de Isótopos Estables de la Universidad Nacional en Heredia, Costa Rica y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Además, se aplica el método de elevación inversa utilizando isótopos estables para estimar las elevaciones medias de recarga (EMR). Finalmente, se utiliza un modelo de flujo base-tiempo de tránsito de aguas subterráneas desarrollado en un software para el lenguaje de programación de acceso libre R, resultado de actividades asociadas con el OIEA para analizar y comprender los patrones de flujo y renovación del agua subterránea.

Con los resultados de esta investigación se pretende que autoridades y tomadores de decisiones a nivel técnico utilicen los mismos para mejorar la gestión de las áreas críticas de recarga hídrica. Superponer la información de elevaciones de recarga y tiempos medios de tránsito, obtenidos mediante isótopos para la construcción y aplicación de planes municipales de uso de la tierra, identificando áreas prioritarias para la conservación y aplicar regulaciones específicas como ser implementación de esquemas de Pago por Servicios Ecosistémicos, promoción de la regeneración natural de bosques y pastizales, mejoramiento en el ordenamiento territorial, entre otros, dentro del marco de gestión integrada de los recursos hídricos.

1. CAPÍTULO I: Delimitación del problema

1.1 Descripción de la problemática:

A lo largo de nuestro planeta se experimentan muchos escenarios debido a la alta concentración de la población en las denominadas metrópolis, grandes ciudades como el Distrito Federal en México, Barcelona en España, Nueva York en Estados Unidos y Tokio en Japón (con poblaciones que van desde los 1.6 a 14 millones de habitantes) se ven en una lucha y desafío respecto a la relación de convivencialidad con el agua, ante la configuración metropolitana que en muchos de los casos conlleva a modelos de sobre explotación de los recursos hídricos (Rojas, Zizumbo, Hernández, & Arriaga, 2018) requiriendo profundizar sobre la capacidad de influencia de la forma urbana en la gestión de los mismos (Martí & Armegol, 2022), por medio de metodologías de investigación dirigidas a determinar de manera eficiente las dinámicas que se presentan bajo estos escenarios.

En Centroamérica las ciudades más pobladas son Managua, Ciudad de Guatemala, San José, San Salvador, Ciudad de Panamá y el Distrito Central de Honduras, que según los institutos de estadística de cada país, la población se encuentra en el rango de 1.2 a 1.7 millones de habitantes con la particularidad que muchas de estas ciudades se encuentran en zonas donde se registran las menores tasas de precipitación, en relación con la dinámica en general de cada país, generando una alta conflictividad relacionada con el manejo de la oferta-demanda de dichas poblaciones y sobre todo, la búsqueda de soluciones de manera integral en temas de manejo de los recursos hídricos a nivel superficial y subterráneo (GWP, 2016).

El Distrito Central está formado por las denominadas ciudades gemelas de Comayagüela y Tegucigalpa, esta última, capital de Honduras y junto con los municipios aledaños que se encuentran dentro del área de la cuenca alta del Río Choluteca, poseen una población aproximada de 1.6 millones de habitantes proyectada al año 2023 (INE, 2023), lo que representa 16 % de la población del país. En esta área se encuentran ubicados un parque nacional (La Tigra), tres reservas biológicas (Yerba buena, Uyuca y El Chile) y dos refugios de vida silvestre (Corralitos y Suyapa) (ICF, 2023), lo que ha permitido en cierta manera poder ejercer un control en cuanto a la gestión de los recursos naturales en esta zona, sin embargo, y debido a las múltiples cambios que se han venido dando en nuestra región por efectos del cambio climático (BID, 2015) y la gestión de instituciones en la conservación de los recursos hídricos, estas poblaciones cada año están experimentando mayores problemas en cuanto a la disponibilidad del recurso agua que históricamente ha sido de fuentes superficiales, cada año también se incrementa la migración a uso de fuentes subterráneas, en su mayoría sin ningún control o regulación poniendo en riesgo la sostenibilidad de los mismos (IHCIT-UNAH, 2012).

Esta investigación va dirigida a brindar alternativas para identificar las acciones necesarias para comprender la relación y conectividad que existe en procesos relacionados al manejo y protección de los recursos hídricos subterráneos, de tal manera que se pueda establecer y satisfacer las necesidades que están presentando las poblaciones relacionadas a la oferta y demanda del recurso hídrico.

1.2 Justificación de la investigación.

La deficiente aplicación de la legislación y de los planes estratégicos relacionados a la protección de los recursos hídricos junto al aumento de la demanda provocan el deterioro en las condiciones de cantidad y calidad del agua. Esto contribuye principalmente a una disminución en la disponibilidad provocando que el acceso al agua no sea asequible generando efectos en la salud humana y ambiental (Sanjuán, 2012), como, por ejemplo; acceso al agua potable o cantidad de agua adecuada para la higiene personal desencadenando múltiples enfermedades, afectaciones de a flora y fauna locales o alterando los ciclos naturales de la dinámica del recurso hídrico en el área de estudio, entre otros.

El Distrito Central se encuentra ubicada en un valle intramontano totalmente urbanizado con una población de más de 1,600,000 personas incluyendo la zona periurbana en las partes altas (INE, 2023) experimentando en los últimos 10 años una tasa de crecimiento anual del 2.2 %, lo que también conlleva a un crecimiento en el cambio en el uso del suelo del 4.4% anual (BID, 2015) que sin los insumos y regulaciones necesarios podrían comprometerse de manera grave las diferentes fuentes de abastecimiento de agua.

Históricamente, el Distrito Central se ha abastecido principalmente de agua provenientes de fuentes de agua superficial utilizando tres grandes sistemas: San Juancito-Picacho ubicada en la subcuenca Choluteca Alta y dos reservorios (Concepción y Los Laureles) ubicados en la subcuenca de Guacerique Grande y otras fuentes de menor escala como pequeños embalses y pozos perforados, mismo comportamiento, pero a escala inferior se presentan en las comunidades aledañas. En estudios recientes se plantea que la capacidad de producción de agua para el Distrito Central es de 1.47 m³/s en temporadas lluviosas y de solo un 0.77 m³/s en las temporadas secas, estando muy por debajo de la demanda calculada para la población que debería de rondar en los 4.05 m³/s (JICA, 2021).

Debido a lo anterior, la explotación de aguas subterráneas ha venido a convertirse en una alternativa para dar una salida oportuna a la limitada producción de las fuentes superficiales. En el año 2012 se realizó una estimación de más de 1000 pozos perforados en el Distrito Central, de los cuales, sólo una parte se tiene censados con datos limitados en sus condiciones operativas, cantidad de explotación y calidad del agua extraída, sin embargo, esto ha generado las bases para estudios que nos ayuden a conocer la calidad del agua y sus patrones de flujo (IHCIT-UNAH, 2012).

El estudio de las aguas subterráneas cada vez tiene mayor atractivo, por lo que se han planteado diversidad de metodologías, muchas de las cuales ya se consideran como prácticas tradicionales (Gleeson, y otros, 2012). En esta investigación se plantea el uso de metodologías isotópicas, las que tienen como objetivo hacer un monitoreo de la composición natural del agua utilizando los isótopos estables de oxígeno e hidrógeno la cual nos permitirá determinar los patrones de conectividad en los procesos de definir alturas de recarga de los acuíferos, patrones de transporte de flujo y edades aparentes del agua en los acuíferos, información base para la gestión del territorio frente a los diversos procesos de crecimiento poblacional y actividades económicas que inciden en la protección de las áreas prioritarias productoras de agua y en este caso de recarga de los acuíferos que se han convertido en una fuente esencial para satisfacer las necesidades de la población.

1.3 Límites de la investigación

A. Limitaciones de tiempo

La investigación se desarrolla en el periodo de 2019 a 2023, mientras que las actividades de muestreos para la obtención de datos isotópicos para la construcción y análisis de series de tiempo del comportamiento isotópico en lluvia, como los barridos de fuentes de agua superficial y subterránea se desarrolla en las temporadas lluviosas y secas registradas en el periodo de 2018 a 2020.

B. Limitaciones de espacio o territorio

El estudio se enmarca en la cuenca alta del Río Choluteca, la cual está dividida en las subcuencas de Yeguaré, Río del Hombre, Choluteca Alta y Guacerique – Grande abarcando 16 municipios en los departamentos de Francisco Morazán con 12 municipios, El Paraíso con tres y uno en Comayagua.

C. Limitaciones de recursos

Los recursos financieros para el desarrollo de este estudio se proporcionan por parte del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT) de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), Proyecto del Fondo de adaptación: Adaptación basada en Ecosistemas en el Corredor Boscoso Central de Tegucigalpa; Grupo de Investigación en Isótopos Estables, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica; y el Organismo Internacional del Energía Atómica (OIEA), además de aportaciones propias.

Los recursos técnicos están conformados por el equipo técnico del IHCIT – UNAH, Grupo de Investigación de isótopos estables, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, además de colaboraciones técnicas de parte de la Alcaldía Municipal del Distrito Central (AMDC), el Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA) y aportaciones comunitarias.

1.4 Definición del problema:

Los procesos de recarga de los acuíferos representan el principal factor de disponibilidad de agua subterránea (Todd & Mays, 2005), en la cuenca alta de Río Choluteca existen diferentes procesos que interactúan entre sí, como elementos que contribuyen a la recarga, por ejemplo; infiltración directa de la precipitación, interconexión de diferentes fuentes superficiales (lagos, lagunas ríos y quebradas), además, procesos de recargas artificiales por medio de diferentes métodos.

En la actualidad, las zonas de recarga de los acuíferos han tenido poca o nula consideración frente a los procesos de expansión de las poblaciones y de los usos de tierra para diversas actividades económicas, para el año 2030 se espera que el 25% de la población esté concentrada en la metrópolis conformada por el Distrito Central (JICA, 2021), además, de una mayor incidencia de las poblaciones de los municipios aledaños que vendrán a modificar aún más estas zonas destinadas por sus características naturales a la recarga de los acuíferos.

Este crecimiento que se está experimentando debe de ir paralelo a la construcción y aplicación de normativas de ordenamiento territorial que den respuesta eficiente a la problemática de afectación de las zonas de recarga de acuíferos provocadas por el crecimiento de las manchas urbanas, migración y aumento de las actividades económicas que ayudan a los procesos de subsistencia de las poblaciones y establecer un régimen de crecimiento con enfoque de manejo integral de los recursos naturales.

Esta problemática sin duda alguna, debe de ir acompañada por procesos de investigación donde se apliquen diferentes instrumentos técnicos científicos con sistema de monitoreo, que determinen diferentes factores que intervienen en los procesos de recarga de los acuíferos , por tanto, surge la necesidad de aplicar ya sea con métodos tradicionales o con la introducción de nuevas técnicas (como las isotópicas), las diferentes características e interacciones que se dan en el medio, desde el comportamiento de la precipitación hasta la infiltración e interacción de los diferentes cuerpos de agua en los procesos de recarga de los acuíferos en la cuenca alta del Río Choluteca.

2. CAPÍTULO II: Objetivos

2.1 Objetivo general:

Caracterizar la dinámica de los procesos de recarga y renovación del agua subterránea en la cuenca alta del Río Choluteca, mediante el uso de isótopos estables contenidos en la molécula del agua (Oxígeno-18, Deuterio) e isótopo radiactivo (Tritio).

2.2 Objetivos específicos:

- Analizar el comportamiento temporal de la composición isotópica de la lluvia en la cuenca alta del Río Choluteca.
- Determinar las elevaciones medias de recarga potencial de los acuíferos que están siendo explotados en el área de estudio.
- Conocer las edades aparentes de renovación de las aguas subterránea en la cuenca alta del Río Choluteca.

3. CAPÍTULO III: Marco de referencia

3.1 Marco político

En el marco político, Honduras presenta un robusto andamiaje de leyes, políticas, planes y estrategias relacionadas al manejo de los recursos hídricos, sin embargo, la aplicabilidad de estas no ha sido muy claras para garantizar el bienestar y el uso de manera integrado de nuestros recursos hídricos. A continuación, se presenta un resumen que representa la situación actual del país.

Leyes	Descripción general
Constitución de la Republica de Honduras (Decreto No.131-1982)	<p>Establece la declaración de utilidad y necesidad pública para la explotación técnica y racional de los recursos naturales de la nación. Se asigna al Estado, a través de sus instituciones, la responsabilidad de regular la utilización de estos recursos en concordancia con el interés social, definiendo también las condiciones para otorgarlos a particulares. Además, destaca la importancia nacional y el interés colectivo en la reforestación del país y la conservación de los bosques.</p> <p>En el artículo 354, se especifica que los bienes fiscales o patrimoniales solo pueden ser transferidos o enajenados a personas según las leyes y condiciones determinadas por estas. El Estado reserva la facultad de establecer o modificar las demarcaciones de las zonas de control y protección de los recursos naturales en el territorio nacional. Este marco legal busca equilibrar la explotación de recursos con la preservación ambiental, asegurando un desarrollo sostenible y protegiendo el patrimonio natural para las generaciones futuras.</p>
Ley para el Establecimiento de una Visión de País y la Adopción de un Plan de Nación para Honduras, Decreto	Marco conceptual destinado a la creación de varios instrumentos, destacando un Plan de Nación que abarca los lineamientos estratégicos, objetivos e indicadores para abordar los desafíos nacionales. Este plan, formulado para períodos de 12 años, sirve como guía para la acción pública y privada, obligatoria para el Sector Público e indicativa para el Sector Privado, alineándose con los objetivos intermedios de la Visión de País.

<p>Legislativo No. 286-2009.</p>	<p>Se propone una matriz con 65 indicadores cuantitativos para medir el progreso hacia las metas del Plan de Nación, evaluando cada línea estratégica. Además, se establece la creación del Sistema Nacional de Planificación, destinado a ejecutar e institucionalizar la Visión de País, el Plan de Nación y los Planes de Gobierno. Para su implementación efectiva, se enfatiza la necesidad de un marco jurídico, una institucionalización clara y un esquema operativo funcional. Este enfoque integral busca garantizar la coherencia y el seguimiento en la planificación y ejecución de políticas a largo plazo, involucrando tanto al sector público como al privado en la consecución de los objetivos nacionales.</p>
<p>Ley General de Aguas (Decreto No. 181-2009).</p>	<p>Se establece un marco normativo para la gestión integral del recurso hídrico en una nación, buscando la protección, conservación, valorización y aprovechamiento adecuado del agua. En su artículo 10, se crea la Autoridad del Agua como un órgano vinculado a la Secretaría de Estado en los Despachos de Recursos Naturales y Ambiente, con la responsabilidad de ejecutar las políticas del sector hídrico.</p> <p>Las atribuciones de la Autoridad del Agua, detalladas en el artículo 11, incluyen la aprobación de instrumentos de ordenamiento territorial, reglamentos internos y normas técnicas aplicables al sector hídrico. Asimismo, se encarga de otorgar permisos, títulos de aprovechamiento y concesiones, aprobar proyectos hídricos y garantizar el derecho humano al agua como bien público. El Gobierno Central retiene la titularidad de la administración de las aguas, bienes y derechos asociados.</p> <p>El sistema se descentraliza con al menos ocho agencias regionales correspondientes a las cuencas principales del país. Además, se establece el Instituto Nacional del Recurso Hídrico (INRH) como una unidad técnica especializada, encargada de investigaciones y análisis técnicos sobre el recurso hídrico. El Servicio Meteorológico Nacional forma parte de este instituto.</p> <p>La participación ciudadana se fomenta mediante la creación de Consejos de Cuenca, destinados a empoderar a la comunidad en la implementación de la ley y políticas de gestión hídrica. Se identifican zonas con daños hídricos cíclicos o eventuales en instrumentos de ordenamiento territorial y se establece la</p>

	<p>necesidad de estudios e investigaciones para el aprovechamiento de aguas subterráneas.</p> <p>Se instituye un Registro Público de Aguas y se reconoce al Estado hondureño como soberano sobre las aguas continentales. Se destaca el uso general del agua por parte del Estado, pero se permite a los vecinos de fuentes de agua disponer de volúmenes para necesidades básicas y desarrollo económico local, recibiendo compensación por servicios ambientales.</p> <p>La ley contempla la inclusión de la sociedad civil en los Consejos de Cuenca, promueve el manejo responsable de vertidos de aguas y establece un Catastro de Agua que cataloga reservas para la conservación del recurso hídrico y la biodiversidad asociada. Este marco legal abarca tanto aguas superficiales como subterráneas, buscando un equilibrio entre el aprovechamiento humano y la preservación ambiental.</p>
Ley General del Ambiente, Decreto 104-93 y su reglamento.	<p>La ley establece la obligación del Estado y las municipalidades de proteger y conservar las cuencas y fuentes de agua, prohibiendo la contaminación mediante el vertimiento de desechos. Exige licencias ambientales para actividades con riesgo ambiental y promueve el ordenamiento territorial municipal. Define mecanismos para mantener el equilibrio ecológico, conservar recursos, preservar la diversidad genética y aprovechar racionalmente especies y recursos naturales. Se crea la Red Nacional de Cuencas Hidrográficas para coordinar la administración de los recursos hídricos, mejorando calidad y cantidad, garantizando a la población el uso permanente del recurso.</p>
Ley de Municipalidades (Decreto No. 134-90)	<p>La ley establece que las municipalidades tienen la responsabilidad de fomentar la preservación de los ecosistemas y del medio ambiente, así como de impulsar la reforestación dentro de sus áreas de influencia. Este marco legal otorga facultades a las municipalidades para llevar a cabo el ordenamiento territorial.</p>
Ley Marco del Sector Agua Potable y Saneamiento	<p>La legislación define las regulaciones para los servicios de suministro de agua potable y saneamiento en todo el país como una herramienta fundamental para mejorar la calidad de vida de la población y fortalecer el desarrollo sostenible como una herencia para las generaciones futuras. La provisión de estos servicios</p>

(Decreto No. 118-2003).	se basará en principios fundamentales como la calidad, equidad, solidaridad, continuidad, universalidad, respeto al medio ambiente y participación de la ciudadanía.
Código de Salud (Decreto No. 65-91)	Se define una clasificación del agua según su finalidad de uso, que incluye categorías como consumo humano, uso doméstico, preservación de la flora y fauna, uso agrícola, uso pecuario y uso industrial. Se especifica que, en caso de competir por su uso, el agua destinada al consumo humano prevalecerá sobre cualquier otra prioridad.
Ley de Ordenamiento Territorial, Decreto 180-2003.	El proceso de ordenamiento territorial abarca dos ámbitos: (i) Entidades o Áreas Bajo Régimen Especial, que comprenden espacios geoGráficos sujetos a la administración nacional según legislación específica, como Áreas Protegidas, Sistemas Regionales, Cuencas Hidrográficas, Zonas Turísticas, Fronterizas, Mar Territorial y Plataforma Continental; y (ii) Entidades de Integración, vinculadas al ámbito municipal y departamental, como Unidades de Gestión Regional, Zonas Metropolitanas, Mancomunidades de Municipios, Consejos de Cuencas, Subcuencas, Microcuencas, Entidades Étnicas, Patronatos, y similares, establecidas de acuerdo con la ley. Este enfoque busca organizar y gestionar territorialmente distintas entidades, asegurando una planificación adecuada y considerando las particularidades de cada área.
Ley Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre, Decreto 98-2007 y su reglamento.	Esta legislación compila una serie de normativas relacionadas con la propiedad, acceso y uso de los recursos forestales a nivel nacional, con el objetivo de gestionarlos y conservarlos. La ley también contempla incentivos para promover la reforestación y la gestión adecuada de los bosques. En los artículos 120 a 124, se aborda el manejo y protección de cuencas hidrográficas, así como de las fuentes y cursos de agua asociados. Esta ley otorga la autoridad para designar fuentes de agua como zonas de protección forestal. Además, en los artículos 148 al 151, se establecen incentivos para individuos o entidades que realicen actividades de protección en cuencas hidrográficas.
Otras leyes	

Agenda Nacional 2030 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Comisión Nacional de la Agenda 2030 (CN-ODS) en 2019. Decreto Ejecutivo PCM064-2018.

Ley de Pesca y acuicultura, Decreto 106- 2015.

Ley de Cambio Climático, Decreto No. 297-2013.

Ley de Promoción a la Generación de Energía Eléctrica Decretos Legislativos 70- 2007 y No. 138- 2013.

Ley de Fortalecimiento de la Camaricultura, Decreto Legislativo No. 335-2013.

Ley para la Modernización y Desarrollo del Sector Agrícola (DECRETO 31- 92), entre otras.

Políticas, Planes y Estrategias Relacionadas

Reglamento Especial de los Organismos de Cuenca (Acuerdo No. 0840-2019).

Normas Técnicas de Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores y Alcantarillado Sanitario (Acuerdo No.058, del 09 de abril de 1996).

Norma Técnica Nacional para la Calidad del Agua Potable. Acuerdo No. 084-1991 (vigencia 1995).

Reglamento de la Ley Marco del Sector Agua Potable y Saneamiento. Acuerdo No. 006-2004.

Política de Protección Social de Honduras 2014-2018 (Decreto Ejecutivo PCM 008- 2012).

Política de Estado para el Sector Agroalimentario y Medio Rural de Honduras, 2004-2021.

Política Ambiental, 2004.

Política Nacional Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre. 2013-2022 (Acuerdo ICF/DE013A-2013).

Programa Nacional Forestal (PRONAFOR), 2010- 2030.

Plan de Igualdad y Equidad de Género de Honduras 2010-2022 (Decreto Ejecutivo PCM -028-2010).

Plan Nacional de Reducción de Riesgos por Sequía. 2020-2038.

Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. 2018.

Plan Estratégico del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Honduras (PESINAPH 2010-2020).

Estrategia Nacional de Cambio Climático de Honduras (2014-2024).

Estrategia Nacional de Bienes y Servicios Ambientales (2006).

Estrategia Nacional para el manejo de cuencas hidrográficas de Honduras, 2020.

Entre otros.

Fuente: Elaboración propia a partir de documento Política Hídrica Nacional (SERNA, 2010).

3.2 Marco histórico

La aplicación de la hidrología isotópica comenzó a finales de la década de 1940 y principios de la década de 1950 con el desarrollo de técnicas analíticas para medir isótopos estables y radiactivos en muestras de agua. El tritio, un isótopo radiactivo del hidrógeno, fue uno de los primeros utilizados para rastrear movimientos y flujos de agua en sistemas hidrológicos (Clark & Fritz, 1997). En la década de 1960, se empezaron a utilizar isótopos estables como el Oxígeno-18 y Deuterio para estudiar la evapotranspiración, el ciclo del agua y la recarga de acuíferos, estos isótopos proporcionan información valiosa sobre la procedencia del agua y sus cambios durante los procesos hidrológicos (Cook & Bohlke, 2000).

En el contexto de Centroamérica, la aplicación de la hidrología isotópica ha sido fundamental para comprender la dinámica de los recursos hídricos en una región caracterizada por una gran diversidad climática y geográfica. Investigaciones recientes han utilizado técnicas isotópicas para estudiar la recarga de acuíferos, la interacción entre las aguas subterráneas y superficiales, y los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico (Kendall & McDonnell, 2012). Costa Rica es el único país que ha estudiado y aplicado con mayor tiempo la hidrología isotópica estableciendo un sistema de monitoreo que ha permitido adicionar insumos en la gestión del recurso hídrico.

Honduras es miembro de la OIEA desde 2003, y ha participado en proyectos en los sectores de salud humana, energía, agricultura y seguridad alimentaria, radiación en medicina, agua y medio ambiente. Sin embargo, es hasta el año 2005 cuando se iniciaron los estudios isotópicos de aguas meteóricas en Honduras, esto con el fortalecimiento de la cooperación técnica entre el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE) en la zona del Lago de Yojoa, donde se estimaron zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas, teniendo hasta ese momento el primer intento sobre el estudio isotópico en el país.

Posteriormente, en el año 2014, con apoyo de la OIEA ejecutado por medio del Servicio Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA) y la Secretaria de Ambiente, se realizó un proyecto análisis de

isótopos estables (deuterio y oxígeno 18), en pozos y fuentes superficiales para la zona de Tegucigalpa, que además contemplaba dos cosas: la capacitación técnica de instituciones afines al tema de la gestión de los recursos hídricos y el fortalecimiento de estaciones meteorológicas, incorporando instrumentos para la recolección de la lluvia para su posterior análisis isotópico, sentando las bases para la inducción al planteamiento de sistemas de monitoreo permanente de isótopos en la molécula de agua, como trazadores naturales para ser utilizados como herramientas esenciales para la comprensión de la dinámica de nuestro medio, que conlleve al aporte de insumos en los procesos de toma de decisiones eficientes.

4. CAPÍTULO IV: Marco de teórico

4.1 Ciclo hidrológico del agua

A. Precipitación

La precipitación se refiere a la deposición de agua, en forma líquida o sólida, desde la atmósfera a la superficie terrestre, y es fundamental para el ciclo hidrológico (Todd & Mays, 2005). Las lluvias representan la precipitación líquida y funcionan como el principal mecanismo de transporte del agua, surgiendo a partir del proceso de condensación del vapor de agua presente en la atmósfera alrededor de los núcleos de condensación. Cuando las gotas de agua, originadas por la condensación del vapor de agua en la atmósfera mediante alguno de los procesos previos, crecen y alcanzan un peso que las hace demasiado grandes para permanecer en la nube, se precipitan o caen hacia la superficie. Las diminutas gotas que conforman las nubes generalmente se forman alrededor de partículas de polvo muy pequeñas, humo, sulfatos y sal, conocidas como "núcleos de condensación". La cuantificación, comprensión y distribución espacial de la precipitación son aspectos cruciales en el ámbito de la hidrología (Segeer & Villodas, 2006).

B. Escorrentía superficial

La contribución de un río en un punto específico de análisis, se define como la cantidad de agua que atraviesa dicho punto durante un período determinado. Esta aportación se conoce como escorrentía directa, la cual se manifiesta poco tiempo después de la lluvia o la fusión de la nieve. La escorrentía superficial, en cambio, se refiere al flujo constante que ha circulado en la superficie terrestre (Custodio & Llamas, 1983).

C. Escorrentía subterránea

Se refiere al agua que se filtra y alcanza la zona saturada, integrándose a los depósitos de los acuíferos. Este proceso es fundamental en la zona saturada, ya que influye en los volúmenes y la disponibilidad del recurso subterráneo. No se considera como una masa estática, sino que se desplaza a través del denominado flujo subterráneo. Sus fuentes de recarga están directamente relacionadas con la precipitación, además de interactuar con los cuerpos de agua superficial, como ríos y lagos (FCIHS, 2009).

D. Evaporación y transpiración

La evaporación se da cuando el agua experimenta un proceso mediante el cual cambia de su estado líquido a gaseoso. Aproximadamente el 80 % de la evaporación total proviene de los océanos, mientras que el 20 % restante se origina en fuentes continentales, los vientos se encargan de transportar el agua evaporada por todo el globo, afectando la humedad del aire en distintas ubicaciones, y tiende a combinarse con la

transpiración, que implica la evaporación de agua desde las hojas y tallos de las plantas hacia la atmósfera, absorbiendo el agua subterránea a través de sus raíces. (Vera & Camilloni, 2007).

E. Condensación

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la condensación se define como proceso mediante el cual el vapor de agua en la atmósfera se transforma en líquido. Este ocurre cuando el aire saturado de vapor de agua se enfría lo suficiente como para alcanzar su punto de rocío, momento en el cual el vapor de agua se convierte en pequeñas gotas de agua (en el caso de la condensación líquida). La condensación es el proceso que rige la formación de nubes y precipitación en la atmósfera.

F. Humedad relativa

Es la cantidad de agua en forma gaseosa presente en el aire. A cada temperatura le corresponde una cantidad máxima de vapor de agua, y esta cantidad aumenta con el aumento de la temperatura. Si intentamos agregar más vapor de agua, este se condensaría para convertirse en agua líquida. La humedad relativa se define como la comparación entre la humedad presente y la máxima posible a esa temperatura. Cuando el aire alcanza un nivel de humedad tan elevado que ya no puede retener más vapor de agua, se considera saturado y la humedad relativa es del 100% (Vera & Camilloni, 2007).

G. Transporte de humedad

El desplazamiento del vapor de agua en la atmósfera, específicamente desde los océanos hacia el interior de las regiones continentales, se denomina transporte de humedad. Una porción del transporte de aire húmedo es perceptible debajo de las nubes, conformada por cristales de hielo y/o agua. Las nubes se trasladan de un área a otra debido a corrientes de aire, la circulación atmosférica en la superficie, como la brisa terrestre y marina, o por diversos mecanismos (Tejeda-Martínez, 2018).

En realidad, la mayor proporción del agua no se encuentra en su estado líquido, sino en forma de vapor de agua. Este último es el tercer gas más prevalente en la atmósfera. A pesar de ser invisible a simple vista, resulta detectable por sensores remotos, los cuales pueden recolectar datos acerca del contenido de humedad presente en la atmósfera (Vera & Camilloni, 2007).

H. Fuentes de humedad

La precipitación en una región tiene tres posibles fuentes generalmente aceptadas: la humedad preexistente en la atmósfera sobre la región, la humedad transportada por los vientos hacia la región y el reciclaje. Estos factores combinados desempeñan un papel crucial en los patrones climáticos y la distribución de la precipitación (Gomez-Hernández, 2014).



Ilustración 1 Esquema de los componentes del ciclo hidrológico (USGS, 2019)

4.2 Aguas superficiales

Es el agua que fluye sobre la superficie del terreno, aunque representan una fracción mínima del total del agua en el planeta, son vitales para la vida. Su importancia radica en su baja concentración de sales, en marcado contraste con las aguas marinas, lo que las clasifica como agua dulce. Estas aguas suelen originarse directamente de las precipitaciones atmosféricas o de los depósitos formados por estas. Guiadas por la gravedad, forman los ríos que siguen su curso hasta desembocar en el mar o en áreas sin salida, como los lagos (Villón-Béar, 2004) que también comenta las siguientes tres clasificaciones:

Cauces permanentes

Estos afluentes se componen de corrientes de agua situadas en zonas caracterizadas por lluvias copiosas y variaciones climáticas limitadas a lo largo del año. Aunque en áreas con precipitaciones escasas, puede haber ríos con flujo constante gracias a la presencia adecuada de agua subterránea.

Cauces estacionales

Estos cursos de agua se encuentran en regiones con un clima en donde se caracteriza por estaciones claramente marcadas, con inviernos húmedos y veranos secos, o viceversa. Por lo general, son más comunes en áreas montañosas que en llanuras y la circulación de agua por el cauce se da solamente en temporadas húmedas.

Cauces efímeros

Los ríos en regiones desérticas en zonas que por sus características no tienen aportes de agua subterránea exhiben caudales intermitentes, a menudo sin precipitaciones durante años o por tiempos muy cortos debido a la baja frecuencia de tormentas. Sin embargo, cuando ocurren, las descargas pueden ser torrenciales, generando rápidos y violentos flujos de agua en los cauces.

4.3 Agua subterránea

Son todas aquellas aguas que se infiltran y penetran en el suelo y subsuelo, saturando los poros o grietas de las rocas y que eventualmente se acumulan encima de capas impermeables formando un reservorio subterráneo con diferentes capacidades y características que determinan el grado de facilidad para su explotación (Ley General de Aguas, 2009).

El agua subterránea tiene su origen en la lluvia, parte de la cual se infiltra directamente a través del suelo, o desde ríos y lagos, por grietas y poros de la roca, hasta alcanzar un nivel impermeable que no la deja descender más. Allí se va acumulando con los años, llenando los acuíferos, y poco a poco circula a favor del gradiente, hasta encontrar un nivel de salida a la superficie en puntos definidos que se convierten en manantiales o fuentes, o de forma difusa, en áreas tales como los lechos de los ríos, cuyo caudal es mantenido por las aguas subterráneas especialmente en los estiajes (IGME, 2002).

A. Formaciones acuíferas

Considerados como sistemas físicos con un funcionamiento específico (almacenamiento y transmisión de agua subterránea), los acuíferos están regulados por recargas, extracciones y otros factores que requieren ciertas características fundamentales. Estas, como la porosidad, permeabilidad (la transmisividad es su resultado por un espesor saturado) y el coeficiente de almacenamiento, definen y en algunos casos predicen la respuesta del acuífero ante determinadas acciones externas. (Custodio & Llamas, 1983).

De acuerdo con sus capacidades de transmitir y almacenar el agua se pueden definir de la siguiente manera (FCIHS, 2009):

Acuífero

Se refiere a una estructura geológica que almacena y permite la transmisión de agua para su aprovechamiento como recurso. El agua subterránea puede emerger de forma natural, como en manantiales o fuentes, o puede extraerse mediante pozos u otras instalaciones de captación mediante sistemas de bombeo.

Acuífero libre

Acuífero sin restricciones en la parte superior, presentando un nivel freático a profundidad en equilibrio con la presión atmosférica. Estos acuíferos pueden recargarse mediante precipitaciones, sistemas de riego o transporte de agua desde la superficie.

Acuífero confinado

Se trata de un acuífero cuya parte superior está restringida por una capa impermeable, resultando en una presión del agua en todos los puntos superior a la atmosférica. Este fenómeno garantiza que el agua dentro del acuífero se encuentre bajo una presión constante.

Acuífero semiconfinado

Formación geológica de tipo confinado con la diferencia que su capa confinante es semi impermeable. Esta capa tiene la capacidad de permitir la recarga, al mismo tiempo que provoca un cambio de presión hacia la atmósfera.

Acuífero artesiano

Se refiere a un acuífero confinado en el cual, al perforar la capa superior confinante, el agua emerge a la superficie sin requerir sistemas externos de bombeo.

B. Recarga de acuíferos

La recarga se define en un sentido general como el flujo descendente de agua que llega al nivel freático, formando una adición al depósito de agua subterránea. Un mecanismo es la percolación hacia abajo por el agua del suelo en exceso del déficit de humedad del suelo y la evapotranspiración (exceso de infiltración). Esta definición es bastante sencilla, pero existen varios problemas conceptuales. La recarga de agua subterránea sobre cierta área normalmente se considera igual al exceso de infiltración en la misma área.

Sin embargo, no toda esta agua llega necesariamente al nivel freático. Puede comportarse debido a horizontes de baja conductividad y desaparecer como un desbordamiento hacia depresiones locales cercanas, donde fluye o se evapora en lugar de unirse al sistema de aguas subterráneas regionales (De Vries & Simmers, 2002).

C. Parámetros hidrogeológicos

De acuerdo con el supuesto que las formaciones hidrogeológicas son medios físicos que poseen determinado comportamiento, se han determinado características que nos permiten conocer o calcular un comportamiento futuro en su régimen natural o por la aplicación de acciones externas, estas características son principalmente la porosidad, permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento (Custodio & Llamas, 1983).

Porosidad

La porosidad de un material se establece mediante la proporción entre el volumen ocupado por aire o agua y su volumen total. En laboratorios, se mide a través del análisis de granulometría mediante tamizado y sedimentación. No obstante, determinar la porosidad a partir de estos métodos es complicado, ya que factores como el empaquetamiento no quedan completamente reflejados. Por consiguiente, los valores obtenidos en ensayos de este tipo deben interpretarse con precaución debido a la falta de uniformidad en los granos y la complejidad de los factores determinantes (Custodio & Llamas, 1983; FCIHS, 2009).

Permeabilidad

Se llama permeabilidad a la capacidad de las rocas para permitir el flujo de líquidos, gases y sus combinaciones bajo la influencia de cambios de presión o cargas hidráulicas. Esta propiedad está vinculada a las dimensiones de los poros y grietas interconectados en las rocas, y se describe mediante el coeficiente de filtración, expresado en unidades de velocidad por ejemplo como centímetros por segundo (cm/s) o metros por día (m/d) (Férrandez, 2012).

Transmisividad

En 1933, Theis introdujo el concepto de "transmisividad", que hace referencia al flujo que se filtra a través de una franja vertical de terreno con ancho unitario y altura igual a la del manto permeable saturado. Su medida se expresa en unidades de velocidad por longitud, como $m^2/día$ o cm^2/seg (Custodio & Llamas, 1983).

Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento, siendo adimensional, indica la cantidad de agua liberada por unidad de volumen de suelo durante una disminución unitaria del nivel freático en un acuífero no confinado. En acuíferos no confinados, este coeficiente es igual a la porosidad efectiva, que representa la cantidad de agua gravitacional extraída de una unidad de acuífero saturado. En acuíferos confinados, se incorporan los efectos mecánicos de compresión (Garrancho & Tocho, 2020; Custodio & Llamas, 1983).

4.4 Hidrología isotópica

La aplicación de técnicas isotópicas al estudio de sistemas hidrogeológicos es de gran interés ya que permite complementar o contrastar hipótesis establecidas mediante otro tipo de métodos referentes a la dinámica de los recursos hídricos subterráneos. Dentro de los isótopos estables, la utilización de oxígeno-18 (^{18}O) y deuterio (D ó ^2H) es muy común, ya que al formar parte de la molécula de agua son muy buenos trazadores del movimiento de esta y de algunos de los procesos que la afectan (Lambán & Custodio, 1999).

La composición isotópica de las aguas sufre ciertas variaciones a las cuales se les denomina enriquecimiento y empobrecimiento isotópico, que son resultado del fraccionamiento o modificaciones en la molécula de agua en los diferentes procesos de formación de lluvia en el ciclo hidrológico y que marcan unas características isotópicas únicas que será lo que nos ayudará a determinar y comprender el comportamiento de nuestros recursos.

4.5 Trazadores isotópicos estables en hidrología

Los elementos hidrógeno (H) y oxígeno (O) que conforman la molécula del agua en su estado natural, están formados por una mezcla de isótopos. Los isótopos son átomos cuyo núcleo contiene el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones; en la naturaleza estos isótopos se manifiestan como especies estables e inestables (Sharp, 2017), los isótopos estables más utilizados del oxígeno son el oxígeno-16 y el oxígeno-18, mientras que los isótopos más usados del hidrógeno son el protio y el deuterio.

4.6 Líneas meteóricas

La línea meteórica nos describe el margen de alteraciones que puede sufrir el agua desde su formación en los océanos o en el continente dándonos a conocer su comportamiento y la relación que se da entre las diferentes fuentes, tanto superficiales como subterráneas (Craig H. , 1961).

En 1961, Harmon Craig encuentra una relación lineal entre el ^{18}O y ^2H para las aguas superficiales a escala global y la denomina “Craig’s global meteoric water line” (Línea de Agua Meteórica Global de Craig), expuesto por (Vélez & Rhenals, 2008) de la siguiente manera:

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

Donde, $\delta^2\text{H}$ es la composición isotópica de deuterio y $\delta^{18}\text{O}$ es la composición isotópica de oxígeno 18. Siendo el estado líquido del agua en el mar uno de los pasos del ciclo hidrológico, y que este contiene el 98% del agua líquida presente en la superficie de la tierra, su composición promedio se ha tomado como el estándar o patrón internacional (SMOW, Standard Mean Ocean Water) para el análisis de información isotópica.

Toda concentración de isótopos estables en la molécula de agua se presenta entonces como la desviación delta (δ) con referencia al patrón antes mencionado, de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} * 1000 \text{‰}$$

Donde R es la llamada relación isotópica y representa el cociente entre los isótopos estables, ya sea del hidrógeno ($^2\text{H}/^1\text{H}$) o del oxígeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de la muestra y estándar de comparación.

Diez años después, se presenta el estándar VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water), el cual es el estándar vigente en la actualidad. Este estándar fue desarrollado a partir del monitoreo isotópico subsiguiente de la precipitación mundial llevado a cabo por la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA), a través de la Red Global para Isótopos en la Precipitación (GNIP, por sus siglas en inglés). Este proceso implicó un ajuste en la relación isotópica y condujo a la obtención de la expresión siguiente (GNIP, 2019):

$$\delta^2H = 8.13\delta^{18}O + 10.8\text{‰ VSMOW}$$

La composición isotópica del agua es como una huella dactilar, pues aguas de distintos orígenes poseen diferentes composiciones proporcionándonos esas características únicas que nos permitirán correlacionar e identificar la dinámica de nuestros recursos hídricos (Custodio & Llamas, 1983).

En la ilustración 2 se observa el comportamiento de la línea meteórica y su comportamiento debido a diferentes factores y condiciones de acuerdo a múltiples factores ambientales.

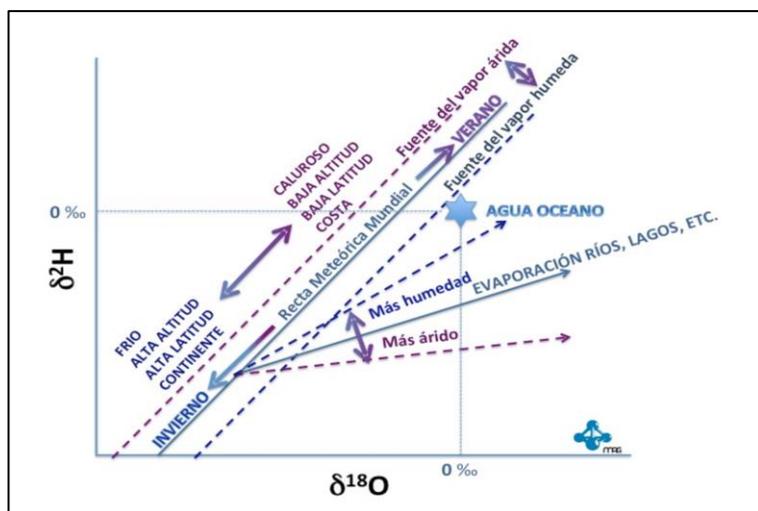


Ilustración 2 Comportamiento de la Línea meteórica de acuerdo con diferentes factores característicos de las zonas de estudios. (Soler, Otero, Rossell, Carrey, & Domenech, 2015)

4.7 Fraccionamiento isotópico.

El fraccionamiento isotópico es el fenómeno mediante el cual la composición o señal isotópicas de una sustancia varía (Ampuero, 2016; Mook, 2002). Se puede distinguir entre fraccionamiento dependiente e independiente de la masa, mencionando tres procesos principales; termodinámicos dados en sistemas de equilibrio físico o químico, cinético, dado en reacciones bioquímicas unidireccionales y el fraccionamiento provocado en el transporte por procesos de difusión (Gat, Mook, & Meijer, 2001).

4.8 Fraccionamiento isotópico en el ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico describe el movimiento continuo del agua a través de la atmósfera, la superficie de los continentes y el subsuelo, cambiando continuamente de estado. Durante los cambios de fase que acompañan este ciclo ocurren variaciones en el contenido de isótopos debido a procesos de fraccionamiento en equilibrio y cinético (Clark & Fritz, 1997; Craig & Gordon, 1965).

4.9 Efectos que modifican la señal isotópica del agua atmosférica.

A. Efecto de la temperatura

El efecto de la temperatura se refiere a la relación observada entre la temperatura anual en un lugar y la señal isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ (Dansgaard, 1964; Fricke & O'Neil, 1999). Este efecto es el principal control de la señal isotópica en altas latitudes, donde a menores temperaturas se esperan menores concentraciones de isótopos pesados en las precipitaciones. Esto se debe a que, en estas regiones, la temperatura en superficie refleja la temperatura de condensación asociada a la formación de nubes.

B. Efecto de la altitud

El efecto de la altitud se refiere a la disminución observada de $\delta^{18}\text{O}$ con el incremento de altitud (Clark & Fritz, 1997). Este efecto está relacionado tanto con la disminución de la temperatura de condensación a mayor altitud como a procesos progresivos de destilación Rayleigh a medida que las masas de humedad son elevadas sobre una barrera orográfica (Lachniet, 2009).

En ciertos casos ha puesto de manifiesto que la recarga local es poco o nada relevante respecto a la recarga en las zonas altas más lejanas, o viceversa. En otros ha ayudado a identificar y discriminar las zonas de recarga de acuíferos multicapa, o de líneas de flujo individuales en acuíferos de gran espesor. En algunas zonas el gradiente isotópico de las lluvias de verano es distinto al de las lluvias de invierno (en general debido a la distinta procedencia de los frentes nubosos que ocasionan las lluvias de ambas estaciones), y esto ha podido ser utilizado para trazar la recarga de verano y de invierno en distintas zonas del acuífero o distintos acuíferos (Lambán & Custodio, 1999).

C. Efecto de latitud

Los contenidos de ^2H y ^{18}O en lluvia disminuyen al aumentar la latitud. Se trata de un efecto aparente pues en realidad se debe a la temperatura a la cual se generan las masas de vapor y de lluvia o nieve a escala mundial, compuesto además con una mezcla escaza de las masas de aire (nubes) moviéndose a diferentes latitudes (Soler y otros, 2015).

D. Efecto de la continentalidad

Los contenidos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en lluvia disminuyen tierra adentro desde la costa. La explicación principal radica en la historia anterior de las masas de vapor, las cuales se vuelven gradualmente más livianas a medida que se desplazan tierra adentro debido a la pérdida de humedad y de isótopos pesados como resultado del desgaste cinético en las nubes (Ilustración 3). El efecto continental aparece con frecuencia enmascarado por los efectos de temperatura/estacional y altitud (Soler y otros, 2015).

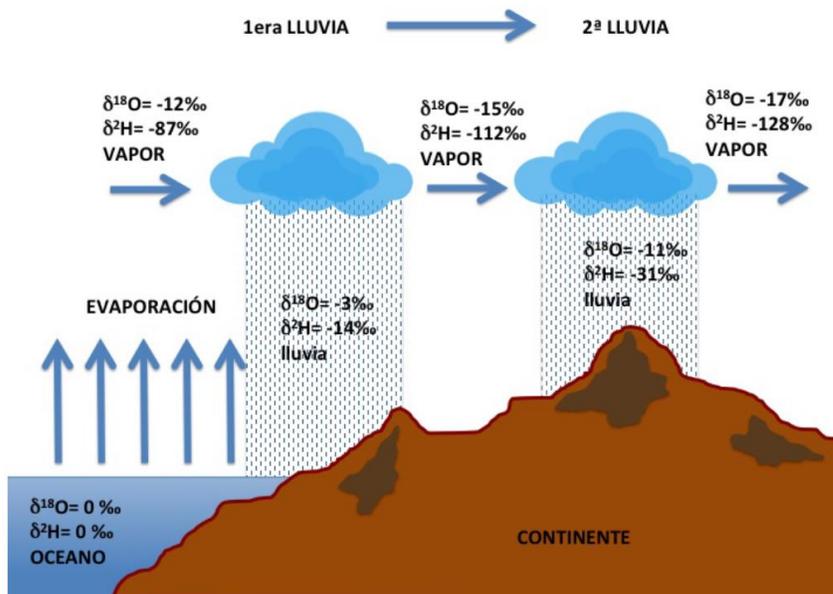


Ilustración 3 Evolución de la composición isotópica por efecto continental.
Fuente: (Soler y otros, 2015)

E. Efecto de la cantidad de lluvia

Las lluvias más abundantes son más ligeras. Esto se debe a que la lluvia se va haciendo más ligera conforme va condensando la humedad residual del aire, previamente empobrecida en isótopos pesados durante los episodios anteriores de lluvia (Dansgaard, 1964). Además, la evaporación de las propias gotas de lluvia hace más pesada la lluvia de episodios pequeños que la de episodios grandes, pues si el ambiente está muy seco la evaporación es mayor que cuando está más húmedo (Bony, Risi, & Vimeux, 2008).

F. Distribución espacial de la señal isotópica

La distribución espacial de $\delta^{18}\text{O}$ de la lluvia está relacionada principalmente con la latitud, altitud y la fuente de humedad. En general los valores más bajos se encuentran en latitudes altas, mientras que los más altos se encuentran en las regiones tropicales y subtropicales. Sin embargo, los valores anuales y estacionales de $\delta^{18}\text{O}$ en una región específica generalmente resultan de varios efectos isotópicos (mencionados anteriormente) combinados que caracterizan esa región (Grootes, 2013).

4.10 Exceso de Deuterio

El término "exceso de deuterio" se calcula mediante la fórmula **Exceso $^2\text{H} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$** , donde $\delta^2\text{H}$ es la concentración isotópica de deuterio y $\delta^{18}\text{O}$ es la composición isotópica de oxígeno 18. Estos valores se determinan durante la evaporación y generalmente permanecen estables durante la evolución subsiguiente de la masa nubosa, excepto por la influencia de la evaporación. El parámetro de exceso ^2H se calcula

utilizando los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de una misma muestra de agua, y no valores promedio, para evitar posibles errores. (Jiménez-Martínez & Custodio, 2008; Craig & Gordon, 1965).

4.11 Reciclaje de humedad

El reciclaje de humedad es la contribución de la evaporación y transpiración de las coberturas vegetales en una región a la precipitación sobre la misma, donde las masas de aire que cruzan el bosque capturando la humedad reciclada y la transportan hacia diferentes partes del continente (Ampuero, 2016). Spracklen, Arnold & Taylor (2012) sugiere que el aire que pasa sobre extensiva vegetación, posteriormente libera por lo menos el doble de lluvia unos días después, en comparación con aire que pasa sobre áreas menos vegetada evidenciando el proceso de recolección de humedad que se da en zonas con condiciones de vegetación diferentes o característicamente más densas.

4.12 Trazadores isotópicos radiactivos en hidrología (Tritio) y modelo de cálculo de edades aparentes

El hidrógeno presenta un isótopo radiactivo de masa 3 (^3H , o tritio) el cual presenta una vida media de aproximadamente 12.13 años, tiempo que va acorde a muchos procesos hidrológicos que se dan en los diferentes sistemas de cuencas en donde se puede utilizar para obtener edades aparentes del agua extraída o consumida (Gat, Mook, & Meijer, 2001).

Las aguas subterráneas pueden considerarse como jóvenes, viejas o muy viejas de acuerdo con el rango de edad que tienen en el sistema evaluado y que se exponen a continuación: (Kazemi, Lehr, & Perrochet, 2006).

Aguas jóvenes que se han infiltrado en el ámbito subterráneo hace menos de 50-60 años, considerándose una recarga muy reciente que pueden ser datadas por lo tanto con métodos como el ^3H , aguas con edades entre 60 y 50,000 años son consideradas como aguas viejas y finalmente aguas que oscilan entre 50,000 y 100,000 como muy viejas y que se tiene que hacer uso de técnicas más avanzadas y complejas para determinar dichas edades.

A. Origen del tritio

Los procesos de origen del ^3H se da naturalmente en las capas superiores de la atmósfera por interacción entre nucleídos livianos y neutrones secundarios que son producidos por la radiación cósmica que se incorporan a la molécula de agua y comienza su ciclo de decaimiento radiactivo (Romero, Simón, & Larena, 2000). Las aportaciones de tritio a la molécula de agua también se pueden dar de forma natural por la exposición de material rocoso derivada de la radiactividad de torio y uranio, presentes en cantidades

elevadas en rocas graníticas, las que pueden aportar hasta 2.5 UT (UT significa Unidades de Tritio) en los fluidos presentes en sus fracturas (Adrews & Kay, 1982).

Uno de los grandes aportes en cantidad de H^3 inyectada de forma artificial en la atmósfera se produjo con las pruebas nucleares entre 1954 y 1963, la cual ha dado lugar a un pico en la concentración de este isótopo en las precipitaciones, con valores de más de 3,000 UT durante 1963 en el hemisferio norte (Gat, Mook, & Meijer, 2001). Con posterioridad a estas pruebas nucleares, se observa en el agua una disminución de los niveles naturales, tanto por decaimiento como por dilución, actuando los océanos como grandes atenuadores.

B. Decaimiento radioactivo del Tritio

Una gran cantidad de isotopos radioactivos se desintegran prácticamente por completo en cuestión de segundos o menos lo que implica que no es posible que se encuentran en la naturaleza. El H^3 en cambio, se desintegra con cierta lentitud y más allá de su inestabilidad este puede ser encontrado en la naturaleza (Cabrera y otros, 2014).

De manera general (Calzada & Cerecetto, 2019) expone un proceso de desintegración del radio nucleído X con una velocidad de decaimiento definida por la constante cinética λ de la siguiente manera:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 dt$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Donde N_0 representa el número de núcleos en $t=0$ y $N(t)$ son los núcleos radioactivos que quedan después del tiempo t . Por otro lado, el período de semidesintegración o vida media, $t_{1/2}$: es el tiempo en el cual la actividad de la muestra o el número de átomos de esta disminuye a la mitad. Las unidades del período de semidesintegración son unidades de tiempo, al final deduciendo que:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Donde λ es la constante de decaimiento del núcleo en cuestión.

Lucas & Unterweger (2000) realizó una revisión de varios métodos para el cálculo de la vida media del tritio el cual dio como resultado de 4,500 días lo que se traduce a 12.32 años aproximadamente permitiéndonos usar dicho isótopo para la determinación de edades aparentes del agua que se encuentra en los sistemas subterráneos.

C. Modelamiento del comportamiento de tritio

Un modelamiento es una simplificación que supone organización y aplicación del conocimiento para describir el desempeño de un sistema real para lograr ciertos objetivos por medio de la ampliación de métodos para analizar problemas complejos que se dan en los sistemas reales con registros de entradas y salidas para hacer predicciones sobre lo que podría suceder con varias acciones en el medio (Ziegler y otros, 2019).

Los modelos matemáticos están clasificados como modelos de caja blanca (definidos) y modelos de caja negra (su funcionamiento se da mediante relaciones empíricas). Un modelo matemático de caja blanca se utilizan teorías y principios fundamentales que gobiernan el sistema que junto con los supuestos simplificadores se utilizan para derivar relaciones matemáticas entre las variables que se sabe son significativas, resultando un modelo que puede ser calibrado con datos históricos del sistema real y se puede validar con datos adicionales (Cardona y otros, 2020). Un modelo matemático de caja negra o empírico utiliza a menudo herramientas estadísticas para garantizar la validez de las predicciones para el sistema real reflejando sólo los cambios que podrían esperarse en el rendimiento del sistema debido a cambios en las entradas (Stella & Warner, 2020).

El objetivo de la modelación será determinar el Tiempo de Transito el cual es considerado como la edad del agua en un punto específico de estudio (Cabrera, Blarasin, & Maldonado, 2014). Existen muchos enfoques de modelado para obtener estas estimaciones, pero nos encontramos con la carencia de datos obligando a utilizar modelos con enfoques de parámetros agrupados que proporcionen estimaciones de parámetros hidrológicos a escala de cuenca, a través de un procedimiento inverso en el que los parámetros de una distribución de tiempos de tránsito se estiman calibrando simulaciones para ajustarse a la composición de salida del trazador medido, que normalmente se logra integrando numéricamente la integral de convolución en el dominio del tiempo (McGuire & McDonnell, 2006).

D. La integral de convolución

Para muchas ramas de las ciencias, la convolución entre dos funciones es un concepto físico muy importante. Sin embargo, comprender sus alcances e implicaciones no es sencillo, para el caso de sistemas lineales e invariantes en el tiempo, la integral de convolución permite determinar la respuesta del sistema ante cualquier entrada, a partir del conocimiento de la respuesta del sistema (Seeger & Weiler, 2014).

Si la respuesta del sistema ante un impulso (la respuesta impulsiva del sistema) se nota como $h(t)$, la salida de un sistema lineal e invariante en el tiempo (SLIT) excitado con una entrada cualquiera $x(t)$ está dada por la expresión:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau)h(\tau)d\tau$$

y se dice que la función $y(t)$ es la convolución de las funciones $x(t)$ y $h(t)$, que se nota $x(t)*h(t)$.

E. Distribución Gamma

Se le conoce también como una generalización de la distribución exponencial, además de la distribución de Erlang y la distribución Ji-cuadrada, adecuada para modelizar el comportamiento de variables aleatorias continuas con asimetría positiva. Es decir, variables que presentan una mayor densidad de sucesos a la izquierda de la media que a la derecha. En su expresión se encuentran dos parámetros, siempre positivos, y de los que depende su forma y alcance por la derecha, y también la función gamma, responsable de la convergencia de la distribución (Arroyo y otros, 2014).

$$f(x, \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, & \text{para } x > 0; \alpha, \beta > 0; \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$$

Donde x es la variable aleatoria, α y β son los parámetros de forma y escala respectivamente y $\Gamma(\alpha)$ es una función que extiende el concepto de factorial a los números complejos, si α es un número entero positivo entonces $\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)!$.

En la realidad, la distribución Gamma se considera el modelo estándar para variables continuas y positivas, tales como el flujo de agua, la cantidad de productos vendidos al por mayor, los ingresos, la recolección de residuos urbanos, entre otros. Esta distribución es altamente versátil gracias a sus dos parámetros: uno que controla la forma (α) y otro que controla la escala (β). De hecho, la distribución Gamma incluye como casos especiales otros modelos de distribución ampliamente conocidos, como la distribución exponencial y la distribución chi-cuadrado (Troncoso, 2021).

F. Aplicación de modelos

Para aplicación de los modelos existen muchos códigos informáticos de fuente abierta o libre que realizan la combinación de estos procesos, además de la disponibilidad de varios softwares técnicos informáticos realizando ajustes de manera manual o automatizados por medio de una gran variedad de algoritmos de búsquedas que minimizan una o varias funciones objetivas (McGuire & McDonnell, 2006).

4.13 Trayectorias de masas HYSPLIT

Es un modelo que se utiliza para simular el transporte de masas de aire. Fue elaborado por el Laboratorio de Recursos Atmosféricos (Air Resources Laboratory–ARL) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Atmospheric and Oceanic Administration–NOAA) de Estados Unidos. Bajo la

aproximación euleriana, la concentración en cada celda de la malla se calcula integrando el flujo de contaminantes correspondiente a cada interfaz de cada celda proveniente de la dispersión y advección de dicho contaminante (Draxler & Rolph, 2015). Cuando se utiliza la metodología lagrangiana, las concentraciones se calculan sumando la contribución de cada “puff” de contaminantes que se transporta a través de la malla siguiendo su trayectoria. Un modelo lagrangiano puede simular la dispersión de contaminantes basándose en el crecimiento de “puffs” de contaminantes mediante la utilización de los segundos momentos, o modelizando explícitamente la evolución de un grupo de partículas. Contrariamente a lo que su sigla HYSPLIT significa, puede simular una distribución de contaminantes a partir de una partícula simple o “puff”, o siguiendo el movimiento dispersivo de un gran número de partículas (Draxler & Glenn, 2003). La trayectoria integrada supone que una partícula se deja llevar por el viento pasivamente, entonces su trayectoria estará representada por la integral en tiempo y espacio del vector de posición. Se puede utilizar HYSPLIT para estimar la trayectoria progresiva o regresiva de una masa de aire, algo muy útil para interpretar un evento que afecta la calidad del aire.

5. CAPÍTULO V: Descripción del medio

5.1 Localización

La zona de estudio ubicada en el centro-sur del país, pertenece a una región climática de transición del bosque seco, con vegetación que tiene las características de un clima seco. Delimitada por la parte alta de la cuenca del Río Choluteca que comprende las subcuencas: Guacerique – Grande, Río del Hombre, Choluteca Alta y Yeguaré, abarcando un área de 2,949.25 km² (Mapa 1). Dentro de la cuenca alta del Río Choluteca se encuentra la capital de Honduras; Tegucigalpa, que pertenece al municipio del Distrito Central totalmente urbanizado con más de 1,600,000 personas (INE, 2023) incluyendo la zona periurbana en las partes altas. Presenta una topografía montañosa y valles profundos, impregnada de una historia cultural y arquitectónica diversa, visible en sus construcciones antiguas y contemporáneas. No obstante, se ve confrontada por problemas como el congestionamiento vehicular, la pobreza urbana y la contaminación ambiental (BID, 2015). En esta misma área, se encuentran 11 municipios adicionales en los departamentos de Francisco Morazán (Lepaterique, Ojojona, Santa Lucía, Santa Ana, San Buenaventura, Tatumbla, Santa Lucía, Valle de Ángeles, San Juan de Flores, Talanga, San Antonio de Oriente, Villa de San Francisco), cuatro municipios en el departamento de El Paraíso (Morocelí, Güinope, Maraita, Yuscarán) y un municipio que corresponde al municipio de Comayagua (Villa de San Antonio).



Mapa 1 Mapa de ubicación y comunidades que se encuentran en el área de estudio.
(Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de SINIT, Modelo de elevación de 15m de resolución, áreas protegidas extraída del geoportal de ICF.

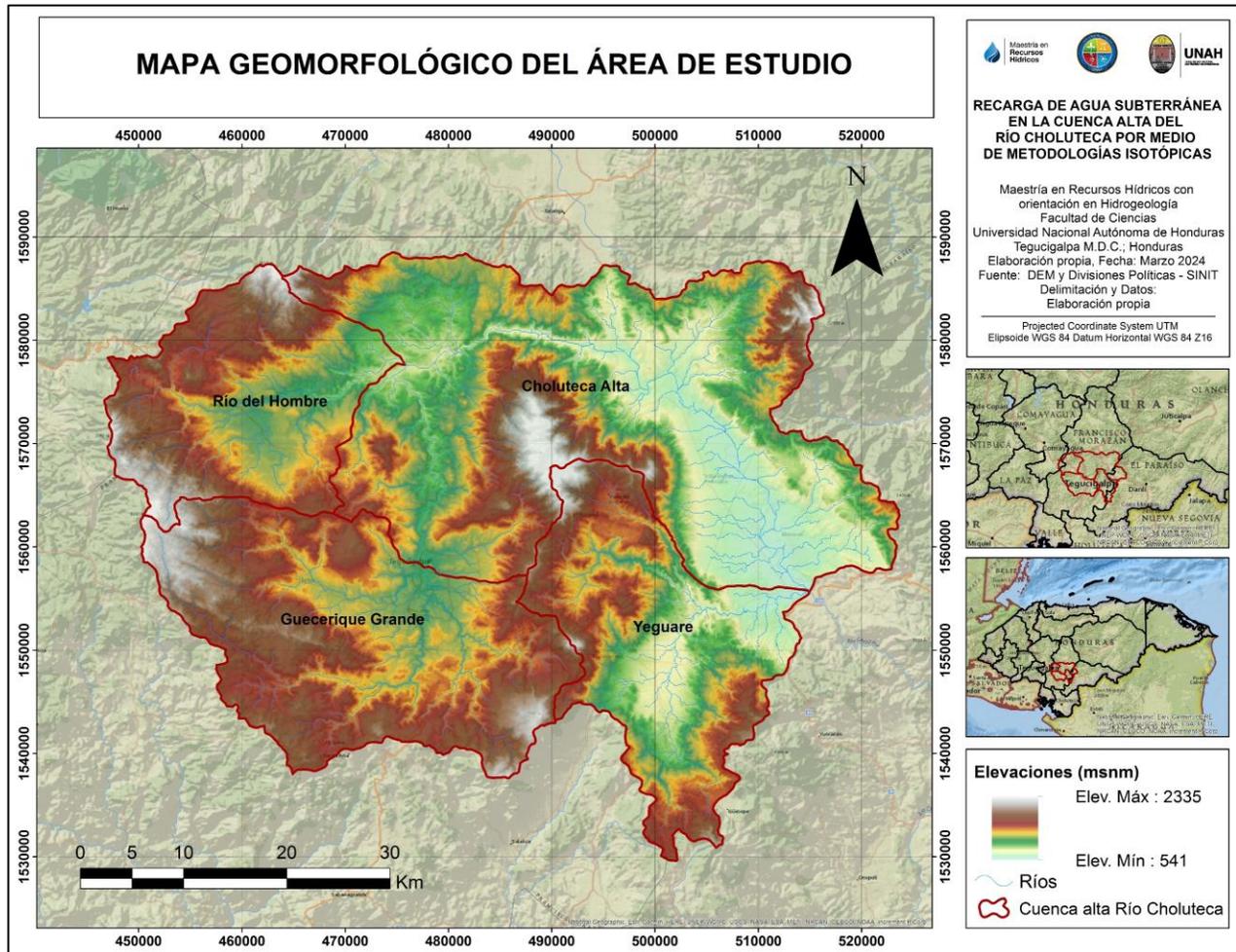
5.2 Topografía

La configuración del terreno en la zona de análisis exhibe una diversidad notable, desde el prominente Cerro La Peña de Andino, que alcanza los 2,335 msnm en la Montaña de San Juancito, hasta las áreas más bajas, alrededor de 541 msnm, entre las aldeas de Guadalajara y El Suyate en el municipio de Morocelí. Esta variabilidad en el relieve genera una red compleja de subcuencas y microcuencas, siendo las más destacadas las de Guacerique Grande, Río del Hombre, Choluteca Alta, y Yeguare (IHCIT-UNAH, 2012).

El Mapa 2, muestra el comportamiento geomorfológico del área de estudio donde incluye una serie de formaciones montañosas y cerros de gran importancia ecológica y geográfica, como la Montaña de San Juancito, Montaña Corralitos, Montaña Yerba Buena, Montaña de Azacualpa, Montaña del Izopo, y Montañita de Las Pitás, así como Cerro El Picacho, Cerro de Hula, Cerro de Uyuca, Cerro Canta Gallo, Cerro El Suyatal, Cerro Los Monos, y Cerro Los Coyotes, entre otros. Estas elevaciones no solo dan forma al paisaje

y al clima, sino que también son cruciales para los patrones de flujo de agua, influyendo en la recarga de acuíferos y en la biodiversidad local.

La diversidad del terreno facilita una amplia variedad de hábitats y ecosistemas, desde bosques nubosos hasta áreas secas, creando una variedad de condiciones ambientales que sustentan una amplia diversidad de flora y fauna (Kopec & Zarzycki, 2010). Esta complejidad del relieve, junto con las variaciones en altitud, resalta la importancia de un enfoque multidisciplinario para la gestión de recursos hídricos, la conservación ecológica y el desarrollo sostenible en la cuenca alta del Río Choluteca.



Mapa 2 Morfología de la cuenca alta del Río Choluteca.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de SINIT, Modelo de elevación de 15m de resolución

5.3 Clima

La precipitación en Honduras está influenciada principalmente por la interacción de los vientos alisios (dirección predominante E-O), la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), ondas tropicales del este, masas de aire y frentes fríos, vaguadas en alturas (es decir, sistemas de baja presión), el efecto indirecto y directo

de los ciclones tropicales y El Niño Oscilación del Sur (ENSO) (Westerberg, y otros, 2009; Alfaro y otros, 2017) El gráfico 1b muestra un patrón representativo de incremento de la precipitación directamente proporcional a la elevación presentando mayores montos de precipitación en la estación La Brea (1610 msnm) y menores cantidades en el valle de Tegucigalpa (estación UNAH; 1063 msnm) dentro de la cuenca alta del río Choluteca. El régimen de precipitaciones exhibe un patrón bimodal reflejado en el Gráfico 1a y que es común para la región de Centroamérica (Durán-Quesada y otros, 2017) (Gouirand y otros, 2020). La precipitación media mensual oscila entre 4.6 y 167.4 mm en las zonas bajas urbanas (estación de la UNAH) y 9.0 y 285.0 mm en las zonas altas.

La temporada de lluvias se extiende de mayo a noviembre, entre mayo y junio las precipitaciones son causadas principalmente por la entrada de humedad transportada por vientos provenientes del Pacífico, los cuales se ven potenciados primero por el gradiente térmico oceánico-terrestre y la confluencia con los vientos alisios, y segundo por la migración de las primeras ondas tropicales del año desde el mar Caribe.

Durante la temporada lluviosa, se observa una disminución en las cantidades de precipitación entre julio y agosto conocido como canícula o veranillo (Magaña y otros, 1999; Small y otros, 2007).

La influencia de la ZCIT y el efecto indirecto/directo de los ciclones tropicales dan como resultado un aumento de las precipitaciones durante septiembre y noviembre. Durante la fase cálida de ENOS se observa una disminución de las precipitaciones durante la mayor parte del año. Del análisis de las series históricas de las estaciones obtenidas para el área de estudio se observa que los períodos de sequía extrema en la región dan como resultado una reducción neta de las precipitaciones de hasta el 31 %, equivalente a unos 368 mm de la precipitación media anual. Por el contrario, durante eventos de lluvias extremas relacionadas con la fase negativa de ENSO (La Niña), la precipitación anual puede aumentar un 35 % (lo que corresponde a aproximadamente 434 mm).

La temperatura media mensual oscila entre 17.9 °C y 25.8 °C para las estaciones lluviosa y seca, respectivamente. La temperatura media anual es de 22 °C, alcanzando valores máximos entre marzo y mayo. Entre diciembre y febrero se observan temperaturas mínimas medias que oscilan entre 17.9 °C y 18.4 °C.

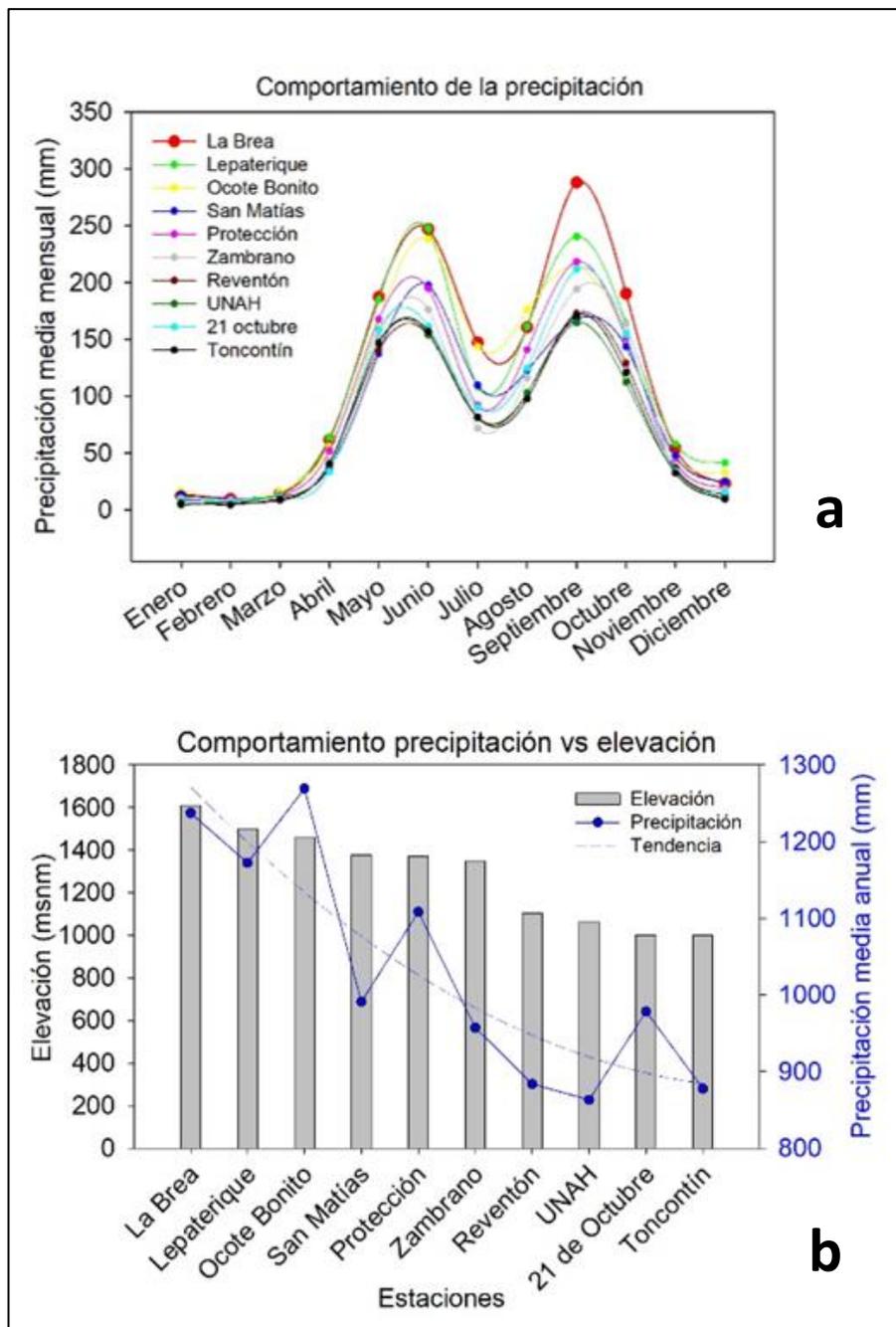


Gráfico 1 Comportamiento de la precipitación en el área de estudio, a representa la precipitación media mensual y b, la precipitación media anual de las diferentes estaciones determinadas.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UNAH y DGRH-SERNA

5.4 Red hídrica

El origen del Río Choluteca se ubica en la región montañosa cercana a Tegucigalpa, en el centro del país. Su curso atraviesa los departamentos de Francisco Morazán, El Paraíso y Choluteca, desembocando finalmente en el Golfo de Fonseca. La zona de investigación abarca las subcuencas Guacerique Grande, Río del Hombre,

Choloteca Alta y Yeguaré, situadas en la parte superior de la Cuenca del Río Choloteca, según la delimitación oficial de cuencas en el país (Moserrate y otros, 2017) y los nombres de ríos de las hojas cartográficas disponibles.

En general, la cuenca alta del Río Choloteca cuenta con un área de 2949.25 km² formando su cauce más largo desde la Montaña de Yerba Buena sobre los 2135 msnm hasta la región de Guadalajara en la cuenca Choloteca Alta en los 541.00 msnm con una longitud aproximada de 147.81 km.

En el Mapa 3 se presenta de manera más específica la distribución y el comportamiento de la red hídrica describiéndola de la siguiente manera:

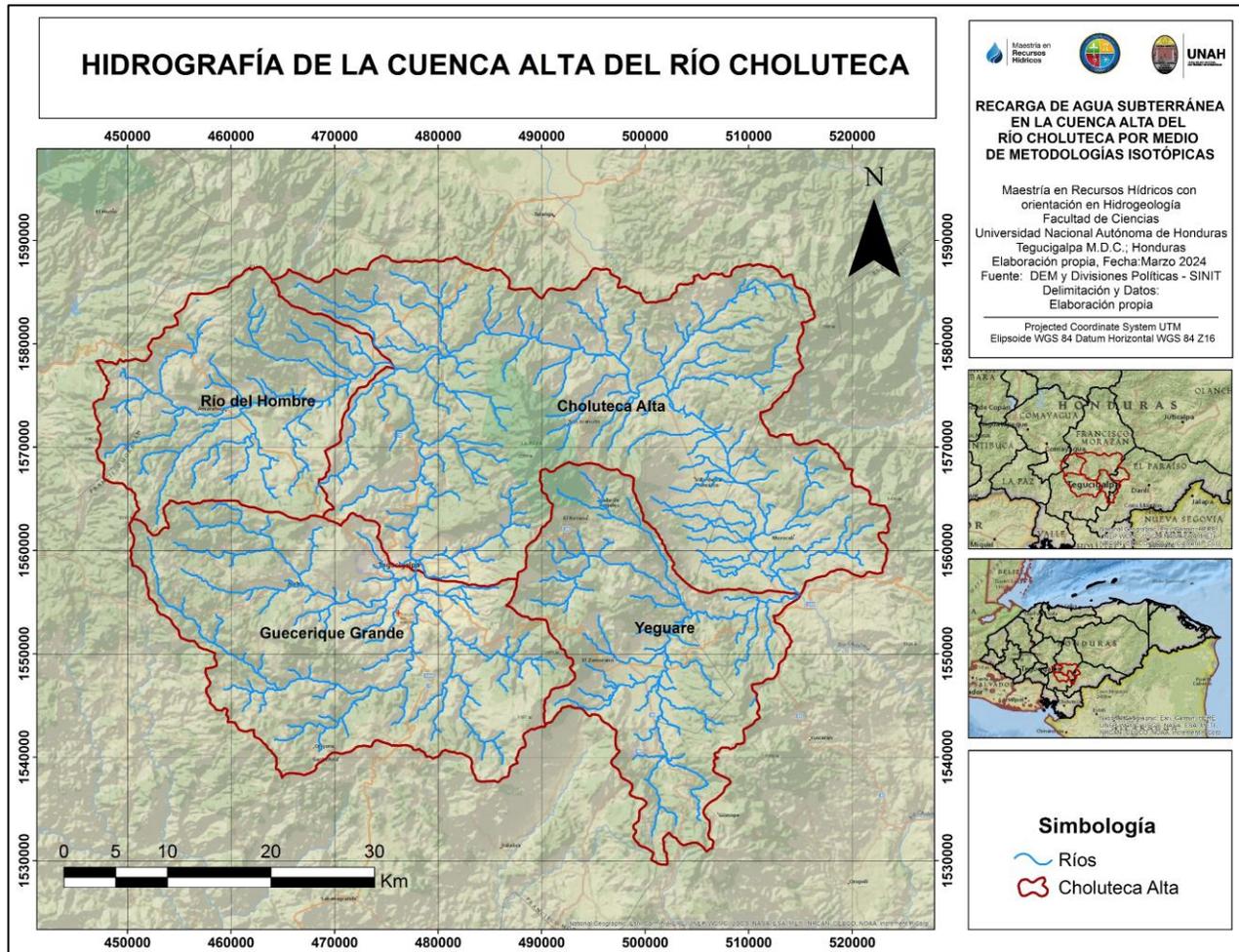
Guacerique Grande se inicia en las Montañas Rincón de Dolores y Montaña de Azacualpa, donde tienen origen los afluentes principales del Río Guacerique. Este río adquiere su denominación después de la confluencia de los ríos Guaralalao, Quiscamote y Guajire. Además, se le suman el Río Mateo y otras quebradas que nacen en la Montaña de Upare, fluyendo hacia el río antes de llegar al Embalse Federico Boquín o Los Laureles.

Río del Hombre presenta varios afluentes, muchos de los cuales tienen su origen entre las Montañas de Yerba Buena, la Montaña Rincón de Dolores y la Montaña La Chorrera. Estos incluyen el Río del Jilguero, Río Helado, Río La Chorrera, Río de Plancha y Río Frío. Además, afluentes significativos como Quebrada Honda, Río Zambrano, y numerosos arroyos nacen en la Montaña de Corralitos, como la Quebrada Masarca, Quebrada El Aguacate, Quebrada del Terrero, Quebrada El Ocotil, entre otros.

La subcuenca Choloteca Alta tiene como su principal afluente al Río Grande o Choloteca, originado por la confluencia de los ríos formados en la subcuenca de Guacerique Grande. Muchos de sus afluentes tienen su origen en la Montaña de San Juancito, donde nace el Río Chiquito, que recibe su nombre tras la unión de los afluentes Quebrada las Trojas, Quebrada Las Cañas, Quebrada Dulce y Quebrada Cañales. También se le suman la Quebrada de Guangololo, Río del Hombre, Río de Ilamapa, Quebrada Cuyametepe, Quebrada El Jicarito, Río Liquitimaya, Quebrada Grande, entre otros.

Por último, la subcuenca Yeguaré cuenta con el Río Yeguaré como su principal afluente, el cual se origina en la unión del Río Leotuna y el Río Santa Inés. El primero surge de la confluencia de las Quebradas Las Lajas, Quebrada Río Las Montañas y Quebrada Cañas Bravas, mientras que el segundo nace en la Montaña Las Granadillas, generando varios afluentes como Quebrada Seca, Quebrada Santa Clara, Quebrada El Chupadero, Quebrada de La Jagua, entre otros. Además, se incorporan a la subcuenca la Quebrada El Zapote

y numerosos afluentes provenientes de la Montaña de San Juancito, tales como Quebrada Agua Amarilla, Río La Soledad, Río El Carrizal y Río Matahambre.



Mapa 3 Comportamiento de la red hídrica en la cuenca alta del río Choluteca. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del SINIT, Cuenca e hidrografía generada a partir del modelo de elevación ASTER con resolución 15 m.

5.5 Geología

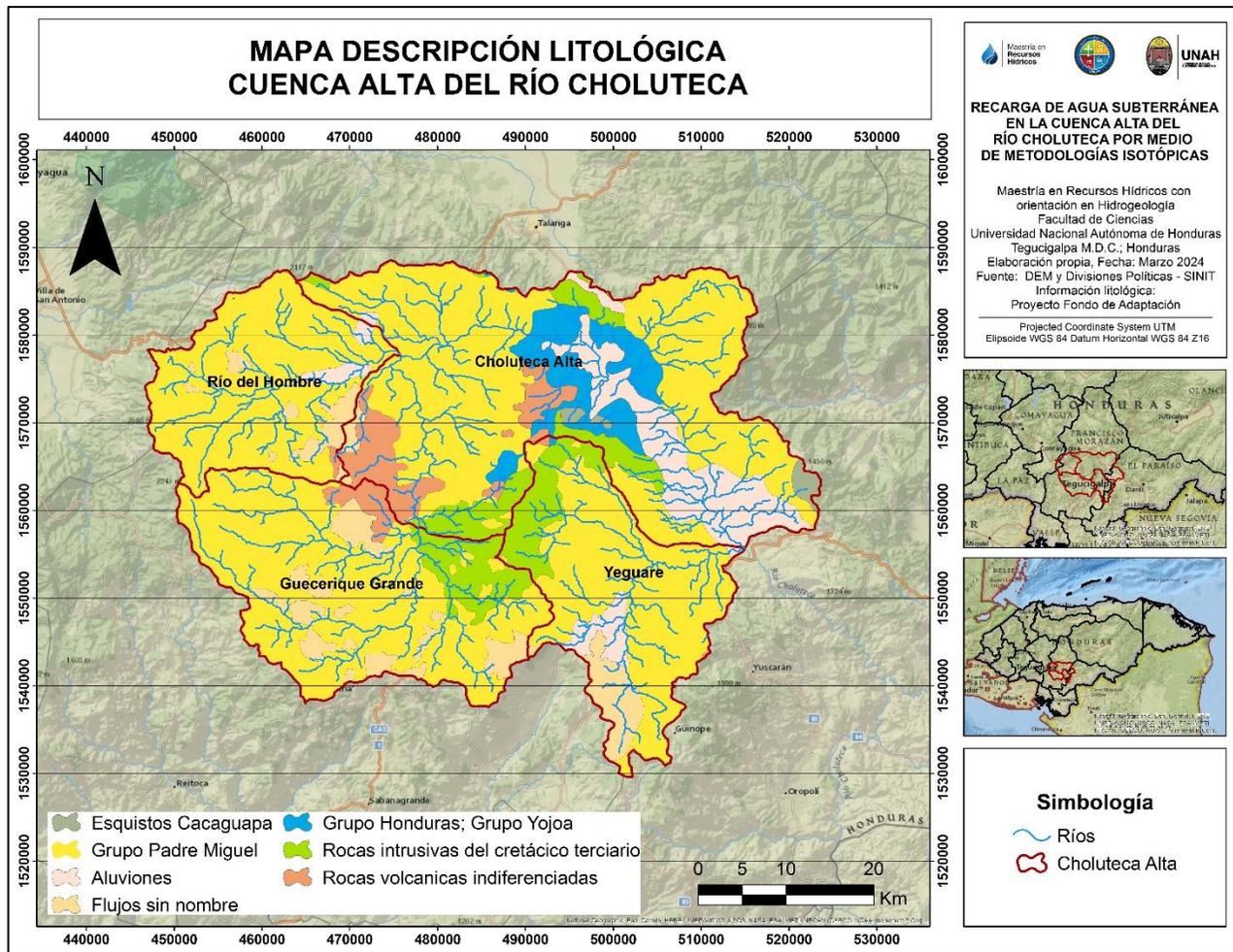
De manera general y como lo representa el Mapa 4, la geología para el área de estudio está definida por los grupos conocidos como Grupo Padre Miguel, Grupo Valle de Ángeles, Grupo Yojoa y Grupo Honduras, de igual manera se encuentra la Formaciones Río Chiquito, Villanueva y Matagalpa, deposiciones de sedimentos cuaternarios además de coladas y conos volcánicos cuaternarios. Dicha geología se encuentra enmarcada en las eras Paleozoico, Mesozoico (periodos Jurásico y Cretácico) y Cenozoico (periodos Paleógeno, Neógeno y Cuaternario).

En la zona de investigación, las principales exposiciones geológicas corresponden al Grupo Valle de Ángeles y al Grupo Padre Miguel. El Grupo Valle de Ángeles (Rogers & O'Conner, 1993; Rogers y otros, 2007) engloba la Formación Río Chiquito, la cual está compuesta mayormente por estratos de textura fina de tonalidades rojas. En estos estratos se encuentran capas que contienen lutitas, limonitas, areniscas y algunas capas de conglomerado de cuarzo, con un espesor que varía entre 400 y 800 metros. Sobre esta unidad de rocas sedimentarias se sitúan delgadas capas de rocas volcánicas conocidas como Formación Matagalpa (Williams y otros, 1969), caracterizadas por flujos de lava calco-alkalina con composiciones andesíticas y basálticas, así como capas piroclásticas menores (Barberi y otros, 2013).

El Grupo Padre Miguel cubre un área de aproximadamente 70.000 km² en Honduras y está bien expuesto en la cuenca alta del Río Choluteca (Molina-Garza y otros, 2012) Este grupo se describe como una secuencia volcánica silícica (ca. ~2000 m de espesor) que forma parte del arco volcánico del Mioceno Centroamericano construido sobre el fragmento continental Chortis (McBirney & Williams, 1969; Barberi, y otros, 2013).

Las rocas están constituidas por tobas riolíticas, dacíticas y andesíticas blancas, rojas, rosadas y verdes con cuarzo, feldespatos, sanidina, biotita y cristales líticos de hielo pómez y clastos del Grupo Valle de Ángeles y Formación Matagalpa. También incluyen algunas rocas sedimentarias que contienen clastos volcánicos y tobas de tipo sillar bien estratificadas. Luego del depósito de las principales rocas ignimbritas, hubo un tiempo de relativa calma, donde la presencia de lluvias y la formación de cuerpos de agua permitieron que las rocas se alteraran y debilitaran, creando movimientos de material piroclástico, que originaron los llamados Lahares.

Los afloramientos de materiales de conglomerado lahárico ampliamente distribuidos en el cuadrángulo de Tegucigalpa consisten en clastos de grava gruesa altamente angulares, subangulares y redondeados provenientes de escorrentías, tobas y clastos del Grupo Valle de Ángeles. El depósito no está bien ordenado y aparece depositado caóticamente en un paleovalle del Grupo Valle de Ángeles (McBirney & Williams, 1969; Barberi y otros, 2013; Braun y otros, 2018).



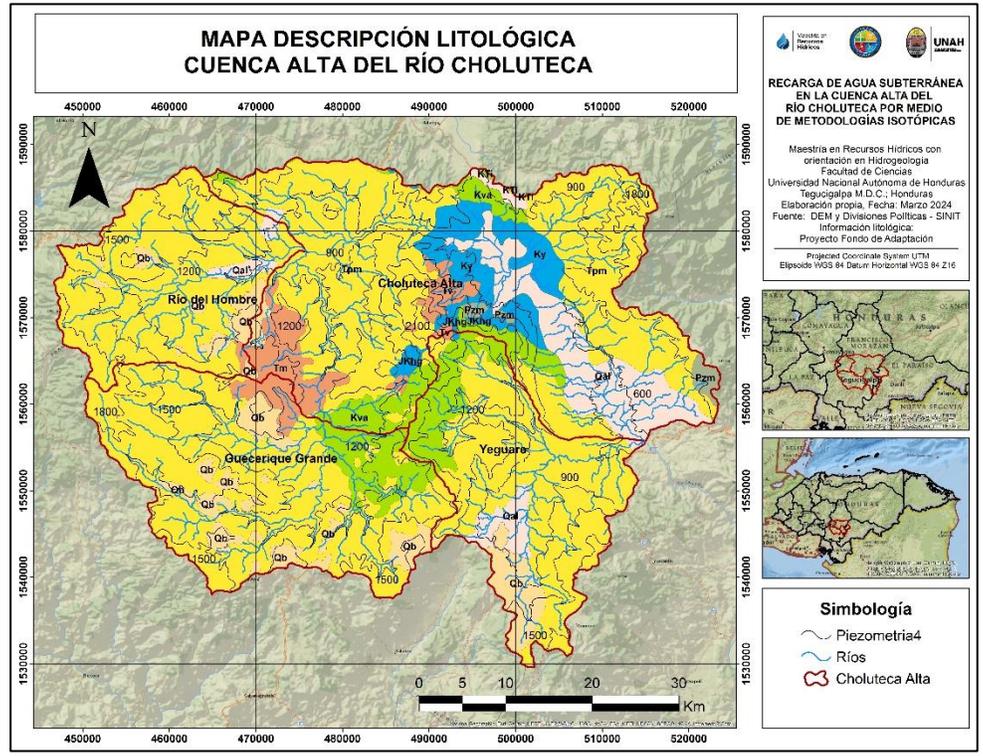
Mapa 4 Descripción litológica de la cuenca alta del río Choluteca.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la geología regional del país, Cuenca e hidrografía generada a partir del modelo de elevación ASTER con resolución 15 m.

5.6 Esquemas hidrogeológicos

La zona de la cuenca alta del río Choluteca no cuenta con estudios específicos para identificar los acuíferos que se están explotando. A menudo no existen registros de perforación y las mediciones hidrométricas o las redes de monitoreo han sido esporádicas o intermitentes. Sin embargo, estudios previos en la región (Lotti, 1987; JICA, 2002; Krásný, 2003) han determinado valores de transmisividad (ver Mapa 5) dentro de las principales ignimbritas y flujos de lava del S-SO (de 100 a 1000 m²/d), en las principales ignimbritas del norte, piroclastos, y caliza (de 1 a 500 m²/d), en el E-SE donde se encuentran depósitos aluviales recientes y principales ignimbritas (de 60 a 500 m²/d), y en la parte central dentro de las formaciones Padre Miguel y Matagalpa, y principales ignimbritas (de 10 a 1000 m²/d).

Era	Periodo	Símbolo	Transmisividad (m ² /d)	
Cenozoico	Cuaternario	Qal	60 - 290	Grupo Padre Miguel
		Qb	10 - 100	
	Neógeno	Tpm	100 - 1000	
Paleógeno	Tm	100 - 1000	Formación Matagalpa	
	Tv	100 - 1000		
Mesozoico	Cretáceo	KTI	0.1 - 1	Grupo Valle de Ángeles
		Kva	10 - 500	
Jurásico		Ky	1 - 5	Grupo Yojoa
		Jkhg	1 - 5	Grupo Honduras
Paleozoico		Pzm	1 - 5	



Mapa 5 Descripción general teórica de valores de transmisividad en la cuenca alta del río Choluteca y piezometría construida a partir de cotas de manantiales y pozos malacate. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la geología regional del país, Cuenca e hidrografía generada a partir del modelo de elevación ASTER con resolución 15 m.

5.7 Cobertura forestal y uso de suelos

Tomando como referencia el trabajo de coberturas forestales elaborado por Instituto de Conservación Forestal (ICF) en el año 2018 y reflejado en el Mapa 6, se evidencia una variedad de paisajes que reflejan la complejidad ambiental de la región. Entre los principales tipos de cobertura identificados se encuentran extensas áreas boscosas, que abarcan una diversidad de ecosistemas, como el bosque latifoliado húmedo, bosque latifoliado deciduo, bosque mixto y bosque conífero denso y ralo. Estos bosques, tanto densos como dispersos, representan una parte significativa del territorio (63.26% del área de estudio) desempeñando un papel crucial en la conservación de la biodiversidad y la regulación hidrológica.

En contraste, la presencia de áreas destinadas a la agricultura tecnificada (4.20%) es notable especialmente en la zona baja de la subcuenca Choluteca Alta y Yeguaré. También, se observa una amplia distribución de en toda el área de estudio de pastos y cultivos (17.26%), evidenciando la intensa actividad agrícola con mayor asocio al sistema de agricultura tradicional. Esta expansión agrícola, aunque vital para la economía local, plantea desafíos en términos de conservación ambiental y gestión sostenible de los recursos

naturales. Las afectaciones de pino plagado (9.81%) están amenazando en la reducción de la cobertura del suelo provocando un potencial aumento en la erosión y alterar el ciclo del agua, afectando la infiltración y recarga de acuíferos.

Asimismo, se detecta la presencia de zonas urbanas (4.84%), tanto continuas como discontinuas, destacando especialmente en el área correspondiente al Distrito Central. Estas áreas urbanas reflejan la presión demográfica y el proceso de urbanización en la región, lo que conlleva a desafíos adicionales en términos de gestión ambiental, calidad del agua y planificación del uso del suelo. Por último, se identifican áreas de suelo desnudo continental (0.63%), que pueden estar asociadas con actividades de deforestación, erosión u otros impactos ambientales (ver Tabla 1 y Gráfico 2).

Tabla 1 Distribución de las diferentes coberturas forestales y usos de suelos en el área de estudio.

Cobertura y usos de suelos	Área (km2)
Área boscosa	1478.30
Vegetación secundaria	387.57
Pastos y cultivos	508.97
Agricultura tecnificada	123.79
Pino plagado	289.35
Zona urbana	142.76
Suelo desnudo continental	18.51
Total	2949.25

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de cobertura forestal y usos de suelos elaborado por el ICF, 2018.

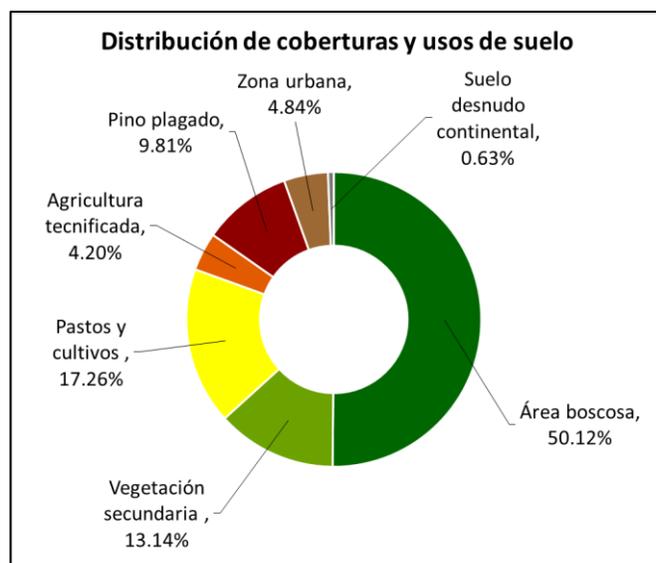
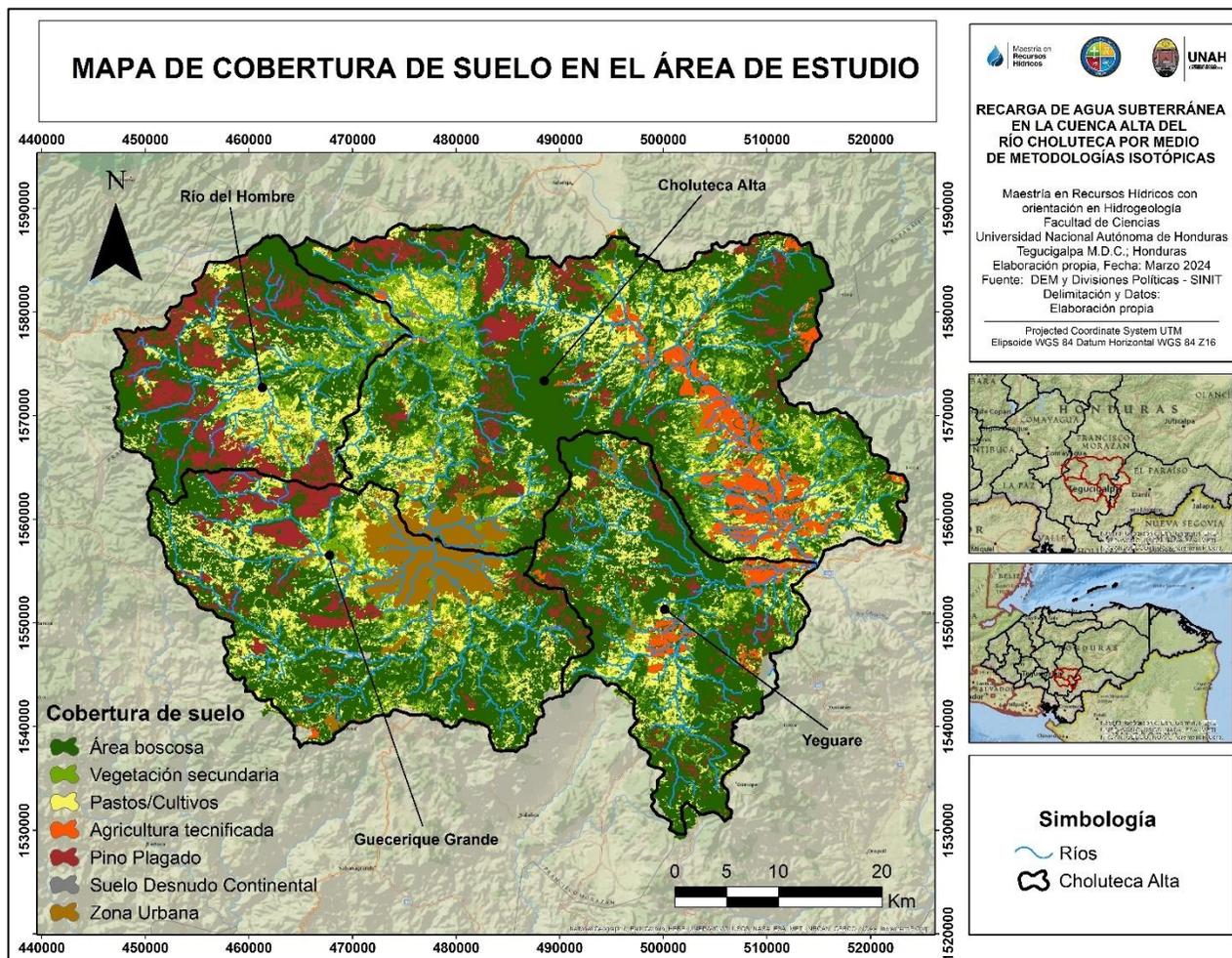


Gráfico 2 Distribución porcentual de las coberturas forestales y uso de suelos en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de cobertura de suelos elaborado por el ICF, 2018.



Mapa 6 Representación de las diferentes coberturas de suelos presentes en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de cobertura de suelos elaborado por el ICF, 2018, Cuenca e hidrografía generada a partir del modelo de elevación ASTER con resolución 15 m.

6. CAPÍTULO VI: Metodología

6.1 Tipo de estudio

Investigación cuantitativa tipo explicativa

Según Sousa y otros (2007), la investigación cuantitativa sigue una estrategia sistemática, objetiva y rigurosa con el fin de crear y perfeccionar el conocimiento. En este enfoque, se emplea principalmente el razonamiento deductivo y la generalización. El razonamiento deductivo implica que el investigador parte de una teoría o estructura predefinida, en la cual los conceptos han sido previamente reducidos a variables. A través de la recolección de evidencia, se busca evaluar o comprobar la validez de la teoría.

La investigación explicativa se caracteriza por su enfoque en entender las relaciones de causa y efecto entre variables, así como en indagar sobre las razones detrás de la ocurrencia de determinados fenómenos. Su objetivo es identificar los elementos fundamentales que impactan en un evento o situación, profundizando en la comprensión de los mecanismos que generan resultados específicos. Este tipo de investigación va más allá de la mera descripción de los fenómenos, ya que busca desarrollar explicaciones y teorías que faciliten la comprensión y predicción de los eventos investigados (Babbie, 2021; Flick, 2014).

6.2 Diseño de investigación

A continuación, se presenta la metodología empleada en las distintas etapas de la presente investigación, detallando el enfoque y las técnicas utilizadas para recopilar y analizar datos con el objetivo de obtener resultados significativos y concluyentes.

6.2.1 Datos

A. **Isótopos estables en precipitación**

La recopilación de información sobre la composición isotópica en la precipitación se realizó durante el periodo comprendido entre mayo de 2018 y diciembre de 2020. Este lapso abarca momentos cruciales en el comportamiento de las precipitaciones, destacando los procesos de recarga e interacciones con el agua subterránea en el área de estudio. Se incluyen tres estaciones secas (diciembre a mayo), tres períodos de la canícula o veranillo (julio a agosto), así como las temporadas lluviosas (mayo a junio y de septiembre a noviembre). Los datos se recolectaron mediante un régimen de muestreo diario y semanal.

Se estableció una red de monitoreo de isótopos estables en la precipitación usando dos colectores pasivos Palmex (Cerro de Hula y El Picacho con elevaciones de 1572 msnm y 1317 msnm respectivamente y

obtención de muestra de agua semanal) y un colector pasivo construido bajo el mismo concepto de trabajo de los colectores tipo Palmex (UNAH, elevación de 1055 msnm y recolección de muestras de agua diaria) con embudos de recolección de 13.5 cm a 18.0 cm y recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE) de 2.3 a 3.0 litros respectivamente, el esquema y diseño de los colectores se representa en la Ilustración 4.

En ambos regímenes de recolección de muestras se obtiene una mezcla de las diferentes lluvias que se presentan en el correspondiente periodo, por tanto, se obtiene para el caso del monitoreo diario, una muestra con las precipitaciones que se dan en el transcurso de las 24 horas del día y en el monitoreo semanal, una mezcla de las lluvias que se presentan en el transcurso de 7 días.

Para evitar la evaporación, el colector utiliza el principio de exposición mínima de la superficie del agua recolectada a la atmósfera usando un tubo delgado de plástico de polipropileno suave desde el embudo de recolección hasta el fondo del recipiente de almacenamiento y otro tubo adicional para regular la presión del aire interna con la externa (Gröning, y otros, 2012).

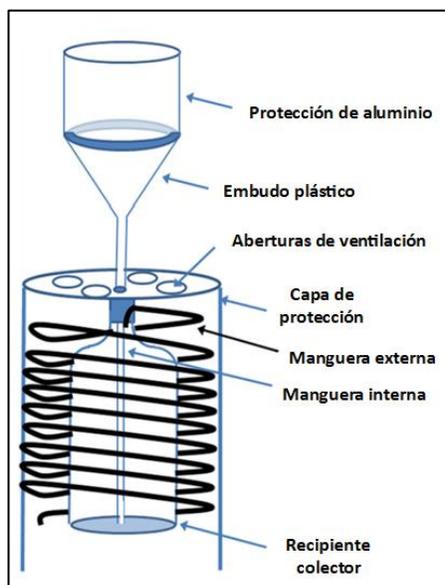


Ilustración 4 Esquema y funcionamiento del colector de lluvia utilizado en los sitios de monitoreo.
Fuente: (Gröning, y otros, 2012)

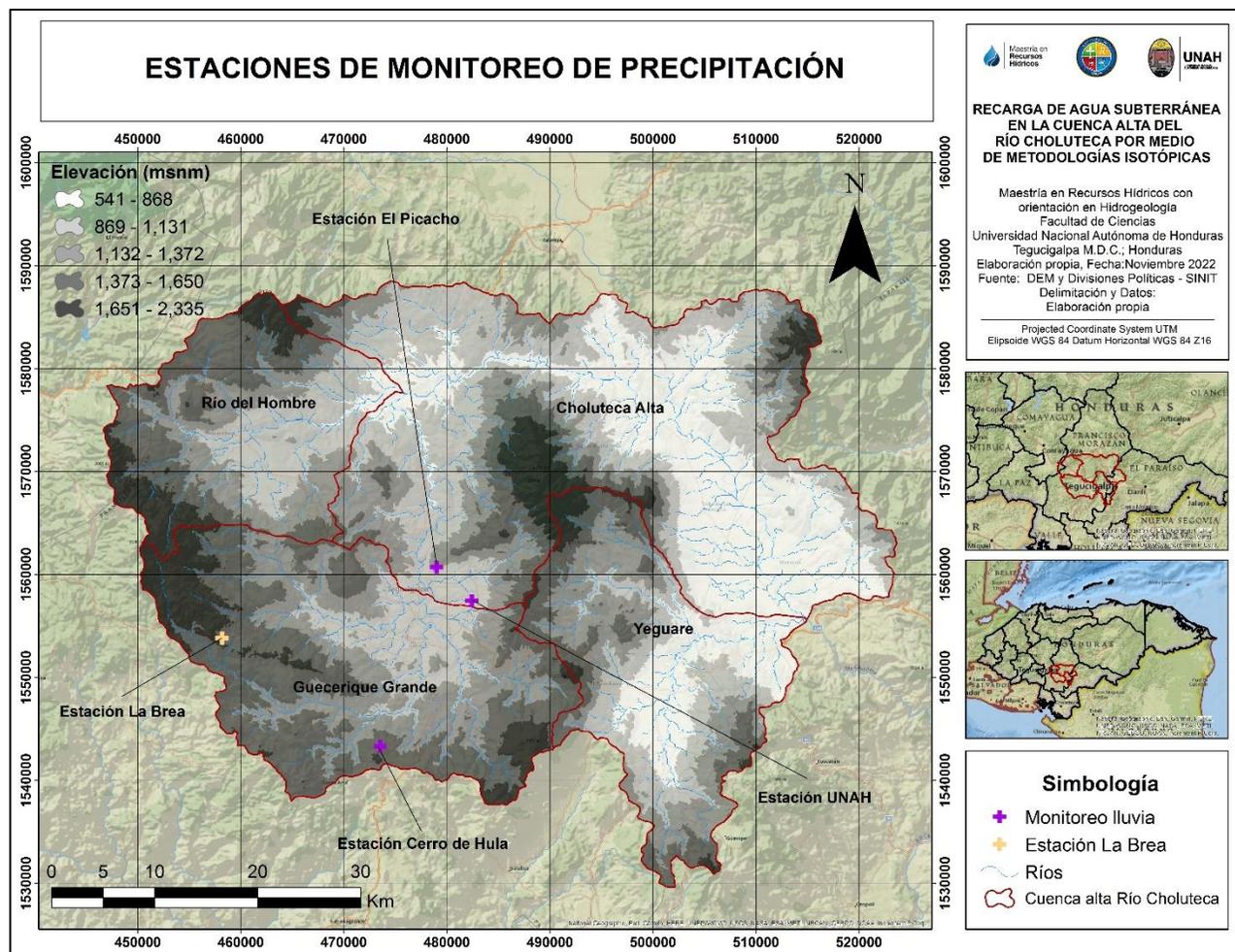
Los colectores de lluvia se instalaron considerando el gradiente de elevación, las fuentes de humedad de lluvia y el acceso para el mantenimiento y protección de los colectores durante todo el año hidrológico. Es importante resaltar que las condiciones de accesibilidad y seguridad del sitio dentro de la cuenca alta del Río Choluteca impidieron la recolección de lluvia en elevaciones más altas de los 1572 msnm), estableciendo el gradiente altitudinal de la composición isotópica para el área de estudio en el rango de elevación de 1050 a 1700 msnm (ver Tabla 2 y Mapa 7). Todas las muestras fueron recolectadas en botellas de polietileno de

alta densidad (HDPE) con capacidad de 15 a 30 ml, selladas con tapas de rosca y almacenadas a 4°C para evitar fraccionamiento por evaporación.

Tabla 2 Ubicación y régimen de muestreo de las estaciones de recolección de muestras de lluvia ubicadas en la cuenca alta del río Choluteca.

Sitio	UTM X	UTM Y	Elevación (m.s.n.m.)	Frecuencia de muestreo
UNAH	482441	1557446	1063	Diaria
Cerro de Hula	473475	1543378	1572	Semanal
El Picacho	479013	1560703	1317	Semanal

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de gradiente altitudinal y factores de seguridad y manejo de los regímenes de muestreo.



Mapa 7 Ubicación de los sitios de monitoreo de precipitación en la cuenca alta del río Choluteca.

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de gradiente altitudinal y factores de seguridad y manejo de los regímenes de muestreo, Cuenca e hidrografía generada a partir del modelo de elevación ASTER con resolución 15 m.



*Ilustración 5 Instalación de equipo de recolección de muestras de agua lluvia en la UNAH.
Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 6 Revisión y mantenimiento a equipo en estación de monitoreo y recolección de agua lluvia en el Cerro de Hula.
Fuente: Elaboración propia*

B. Isótopos en fuentes de agua (manantiales, pozos malacate y pozos perforados)

De acuerdo con las condiciones logísticas del equipo de campo, fue posible recolectar muestras de fuentes de agua subterránea durante tres estaciones secas (2018, 2019 y 2020) y durante la canícula de 2018. Las muestras se recolectaron teniendo como objetivo los períodos de flujo base para representar mejor la recarga anual media y valores isotópicos de descarga (Ricardo & Birkel, 2016; Sánchez-Murillo y otros, 2020a; Sánchez-Murillo y otros, 2020b). Las muestras se clasificaron en pozos perforados (N=166) con profundidades hasta 300 m, pozos malacate (N=70) con profundidades entre 4 y 12 m y manantiales (N=128) en su mayoría en estado natural y los demás con estructuras de captación como parte del sistema de agua potable, todas las muestras se consideran barridos isotópicos, sin puntos de monitoreo. En total, se muestrearon 364 fuentes de agua con una tasa de repetición de muestra por fuente de 29% para manantiales, 36% para pozos malacate y 52% para pozos perforados, motivados por la accesibilidad de las fuentes (dos o tres muestras por sitio, utilizando una media de la composición isotópica como dato final), realizando un levantamiento de muestras de 555 en total (ver Tabla 3 y Mapa 8). Todas las muestras fueron recolectadas en botellas de HDPE (15 a 30 ml), selladas con tapas de rosca y almacenadas a 4°C para evitar fraccionamiento por evaporación.

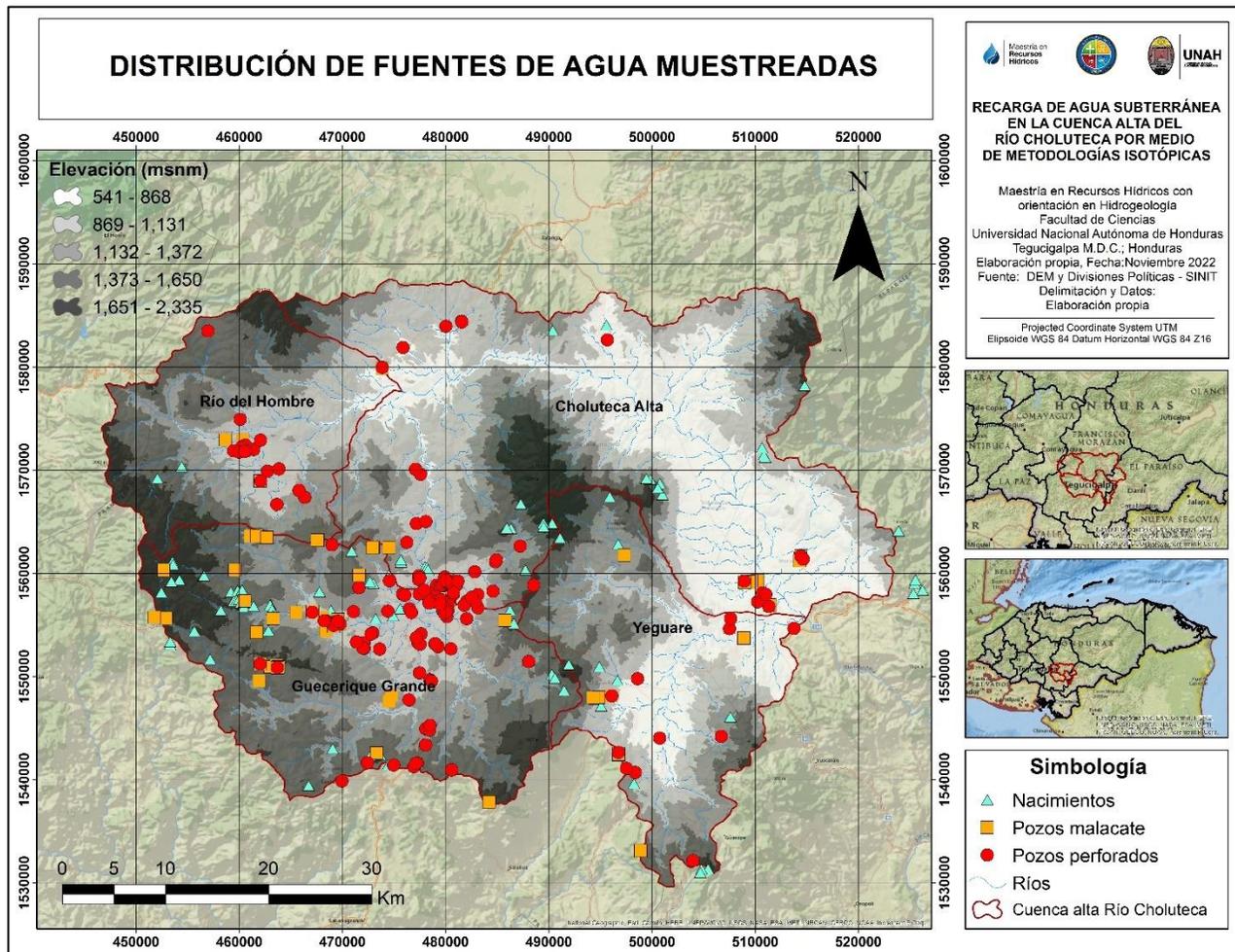
Tabla 3 Número de análisis de fuentes de agua de acuerdo con la temporada que se realizaron los muestreos.

Tipo de fuentes	Periodos de muestreo				Total (N)
	Verano 2018	Canícula 2018	Verano 2019	Verano 2020	
Manantial	38	79	46	10	173
Pozo perforado	68	98	85	36	287
Pozo malacate	33	30	28	4	95
Total	139	207	159	50	555

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo generados.

Las muestras de tritio fueron recolectadas en la temporada seca del año 2020 entre los meses de abril y mayo, fueron un total de 20 muestras las cuales mayoritariamente son de fuente tipo pozo perforado (16), tres tipos nacimiento y una muestra tipo superficial. Para su almacenamiento se utilizaron recipientes de plástico HDPE con una capacidad de un litro para luego ser etiquetadas, selladas con tapas de rosca y almacenadas a 4°C para evitar fraccionamiento por evaporación hasta su envío a los laboratorios especializados en análisis de dicho isótopo radioactivo.

Cada una de las muestras se etiqueta con los datos de nomenclatura correspondiente a las iniciales del sitio de muestreo o tipo de fuente y número correlativo, además de la fecha y hora de recolección de las mismas.



Mapa 8 Distribución espacial de las fuentes muestreadas en la cuenca alta del río Choluteca.

Fuente: Ubicación de fuentes elaboración propia a partir de datos recolectados en campo, cuenca e hidrografía generada a partir del modelo de elevación ASTER con resolución 15 m.

6.2.2 Métodos analíticos

A. Isótopos estables

Los análisis de isótopos estables se realizaron en las instalaciones del Grupo de Investigación de Isótopos Estables de la Universidad Nacional (Heredia, Costa Rica) utilizando un analizador de isótopos de agua LWIA-45-EP (Los Gatos, EE. UU.) (ver Ilustraciones 7 y 8). Se utilizaron patrones secundarios calibrados para normalizar los resultados, así como para evaluar la calidad y los procedimientos de control de deriva. Las relaciones $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^2\text{H}/^1\text{H}$ se presentan en notación delta δ (‰), con referencia a la escala VSMOW-SLAP. La incertidumbre analítica a largo plazo fue de $\pm 0,5$ ‰ para $\delta^2\text{H}$ y $\pm 0,1$ ‰ para $\delta^{18}\text{O}$. El exceso de deuterio se calculó como d-exceso = $\delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ (Dansgaard, 1964).



Ilustración 7 Preparación de muestras y equipo utilizado para la determinación de la concentración isotópica de las muestras.

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 8 Análisis preliminar de resultados de la concentración isotópica de las diferentes muestras junto con el asesor principal.

Fuente: Elaboración propia

B. Tritio

El análisis de las muestras de tritio se desarrolló para un total de 20 muestras distribuidas mayoritariamente para los pozos perforados (17, ya que representa una mejor muestra de mezcla de recarga de agua), tres manantiales y una fuente superficial. Los análisis se desarrollaron en el Laboratorio Internacional de Isótopos del Organismo de Energía Atómica (OIEA) en Austria, Viena. Las muestras de las diferentes fuentes de agua pasaron por un proceso de enriquecimiento electrolítico (entre 67 y 70 veces) antes de contarlas con un contador de centelleo líquido durante varias semanas. El límite de la cuantificación fue de 0.07 unidades de tritio (UT) para todas las muestras y la precisión analítica estuvo entre ± 0.03 y ± 0.06 UT.

6.2.3 Trayectorias de masas de humedad (HYSPLIT)

Para evaluar el control sobre la estacionalidad y distribución de la lluvia como resultado de las interacciones entre cuencas, el transporte de humedad está modulado en gran medida por la ZCIT, las ondas tropicales del este, la variación de la temperatura de la superficie del mar (TSM) y el efecto indirecto/directo de la temperatura tropical y ciclones (Pan y otros, 2018) con variabilidad influenciada por el ENSO a escalas interanuales (Yun y otros, 2021), el transporte de humedad se analizó utilizando el modelo Lagrangiano HYSPLIT (Stein y otros, 2015; Rolph y otros, 2017).

Este modelo utiliza un algoritmo tridimensional de velocidad vertical de la masa de aire de Lagrange para determinar la posición promedio de la masa de aire, que se informa con una resolución de tiempo por hora sobre la trayectoria (Soderberg, y otros, 2013). Las trayectorias de los paquetes aéreos (hora de inicio 12:00 p. m. UTC) se modelaron 48 horas hacia atrás en el tiempo en función de la proximidad del Mar Caribe y el Océano Pacífico. En total, se crearon 270 trayectorias (estación diaria UNAH, y se dividieron por a) temporada seca: diciembre a abril; lluviosa: mayo a noviembre), b) composiciones de $\delta^{18}\text{O}$ y c) variabilidad en el exceso de deuterio.

El modelo HYSPLIT se usa en línea en la dirección https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php es sumamente intuitivo y para su uso se deben especificar los siguientes datos:

- a. Ubicación de sitio de monitoreo, estación de la UNAH
- b. Selección de archivo meteorológico disponible por el USGS, en este caso el GDAS1 (Global Data Assimilation System).
- c. Seleccionar el periodo que en el que se dio el evento de lluvia muestreado.
- d. Detallar el tipo de simulación requerida (trayectoria hacia atrás).
- e. Especificar datos exactos del evento (hora, día, mes y año), horas de trayectoria (48 horas) y elevación base de las nubes (800 m).
- f. Por último, especificar las opciones de salida que nos sea de mayor interés para nuestro análisis y generamos la trayectoria.

6.2.4 Elevaciones medias de recarga (EMR) y conectividad lluvia-agua subterránea

Las áreas críticas de recarga dentro de la cuenca alta del Río Choluteca se evaluaron utilizando una tasa de caída isotópica, bajo el supuesto de que las proporciones de isótopos del agua subterránea en condiciones de flujo base son representativas de las condiciones de recarga anual media durante la estación húmeda (Yamanaca & Yamada, 2017; Sánchez-Murillo y otros, 2016; Sánchez-Murillo y otros, 2020a; Sánchez-Murillo y otros, 2020b).

Esto último se sustenta en la cantidad de lluvia generada en la época húmeda con respecto al volumen anual (UNAH=98%, Cerro de Hula=97%). Se llevó a cabo un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952) de varianza en los rangos para diagnosticar diferencias significativas entre los cuatro sitios. Las diferencias en los valores medianos entre los sitios son mayores de lo que cabría esperar por casualidad; por lo tanto, existe una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,001$).

Para contextualizar la relevancia para la gestión de recursos hídricos de los EMR inferidos por isótopos dentro de la cuenca alta del Río Choluteca, se utiliza el Mapa de uso de la tierra más reciente (2018) (resolución 10x10 m basado en imágenes satelitales de la misión Copernicus Sentinel-2) (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>) obtenido del Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal (<http://www.geoportal.icf.gob.hn/geoportal/main>). El uso del suelo incluye 19 clasificaciones que denotan el alto grado de fragmentación del suelo dentro del área de estudio.

El análisis estadístico y gráficos se realizó utilizando el lenguaje y los paquetes estadísticos R de código abierto (R Development Core Team, 2021). Todos los Mapas se desarrollaron en ArcGIS 10.5 (ESRI, EE. UU.).

6.2.5 Análisis edades aparentes por medio de Tritio (Tiempos de tránsito)

Para el análisis de las edades aparentes de agua subterránea se aplicó un modelo de flujo base/tiempo de tránsito, involucrando una integral de la convolución concentrada simple basada en las señales de tritio registradas en la precipitación (función de entrada) y en las fuentes de agua subterráneas muestreadas (función de salida) con base en una función probabilística tipo distribución gamma que representa las posibles rutas que puede tomar una partícula de agua en el medio subterráneo, dicho modelo fue construido para aplicaciones en la región centroamericana en el marco del proyecto “RLA7024: Integración de la hidrología isotópica en la evaluación integral de los recursos hídricos ” liderado por el PhD Christian Birkel, profesor de la Universidad de Costa Rica y un grupo de expertos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Para llevar a cabo lo anterior, el procedimiento se basa en una adaptación del modelo de tiempo de tránsito usando una integral de convolución concentrada (ver Ilustración 9), como método matemático para transformación de datos de entrada (datos conocidos o registrados) a datos de salida (datos medidos) desarrollado por (McGuire & McDonnell, 2006) donde se plantea una diferencia de estadística entre la entrada y la salida provocada por los diferentes procesos hidrológicos que se dan en las áreas de estudio, que inducen a una mezcla en donde influyen muchos factores propios de los regímenes de precipitación y condiciones físico-químicas que se dan en la transición de coberturas de suelo (intercepción), diferentes características de suelo y tipos de formaciones acuíferas.

El modelo se basa en transformar esa variabilidad que presenta la señal de isótopos estables en los registros de precipitación en relación con los valores atenuados que son registrados en los puntos de control o monitoreo de áreas de estudio (Ilustración 9a), en el caso de uso de tritio, el modelo usa la variabilidad registrada en la precipitación en conjunto con el decaimiento radiactivo ajustándolo a los valores observados a través de un modelo tipo caja negra (Ilustración 9b).

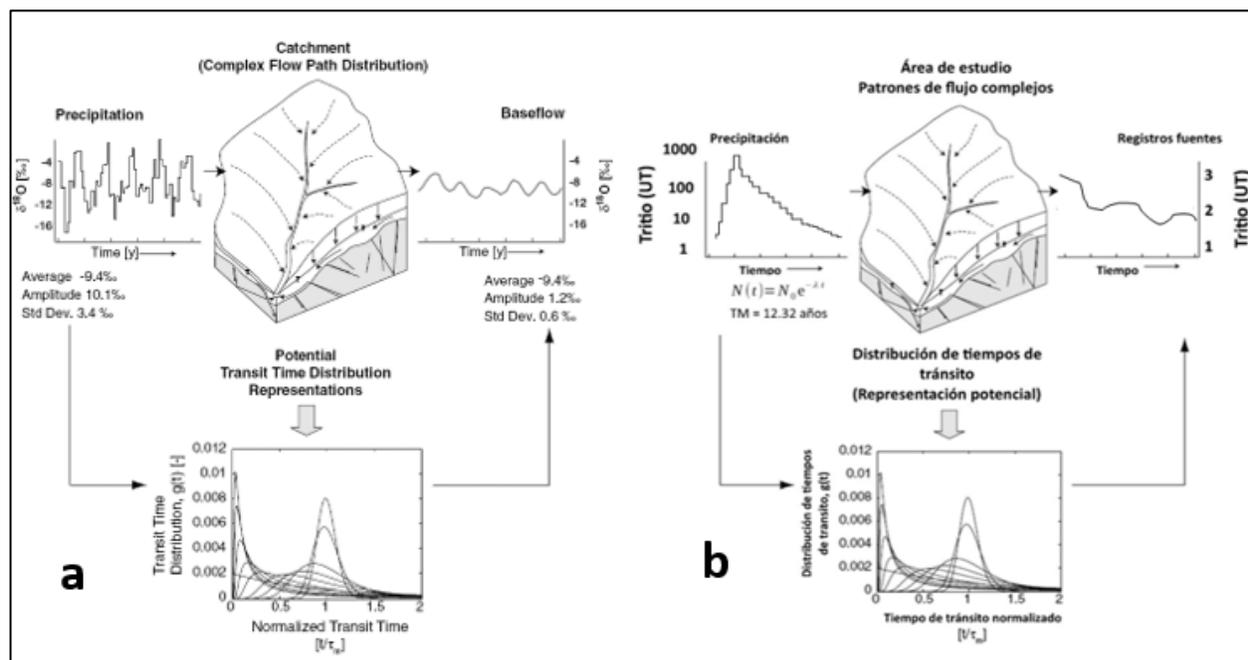


Ilustración 9 Adaptación de modelos para distribución de tiempos de tránsito utilizando como función de entrada el tritio.

Fuente: Elaboración propia a partir del trabajo expuesto por (McGuire & McDonnell, 2006).

La función entrada de la señal de tritio en la precipitación fue construida tomando en cuenta múltiples registros de diferentes estaciones de monitoreo cubriendo toda la región centroamericana, 11 estaciones ubicadas desde Estados Unidos en el norte hasta Colombia en el sur (ver Gráfico 3), con periodos de monitoreo que inician antes del pico provocado por los ensayos nucleares e inferir de manera espacial una serie de tiempo ajustada a los datos existentes en la región centroamericana y determinar esa función de entrada de la señal de tritio para la región, la precipitación es obtenida del proyecto NCEP/NCAR Reanálisis 1 (este proyecto abarca registros de precipitación anterior a los picos de tritio provocados por los ensayos nucleares) que utiliza un sistema de análisis/pronóstico de última generación para realizar la asimilación utilizando datos pasados desde 1948 hasta el presente, considerando el periodo de 1961 a 2020 (<https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.html>). La función de salida estará sujeta a las señales de tritio determinadas de los análisis hechos a las muestras seleccionadas en la zona de estudio.

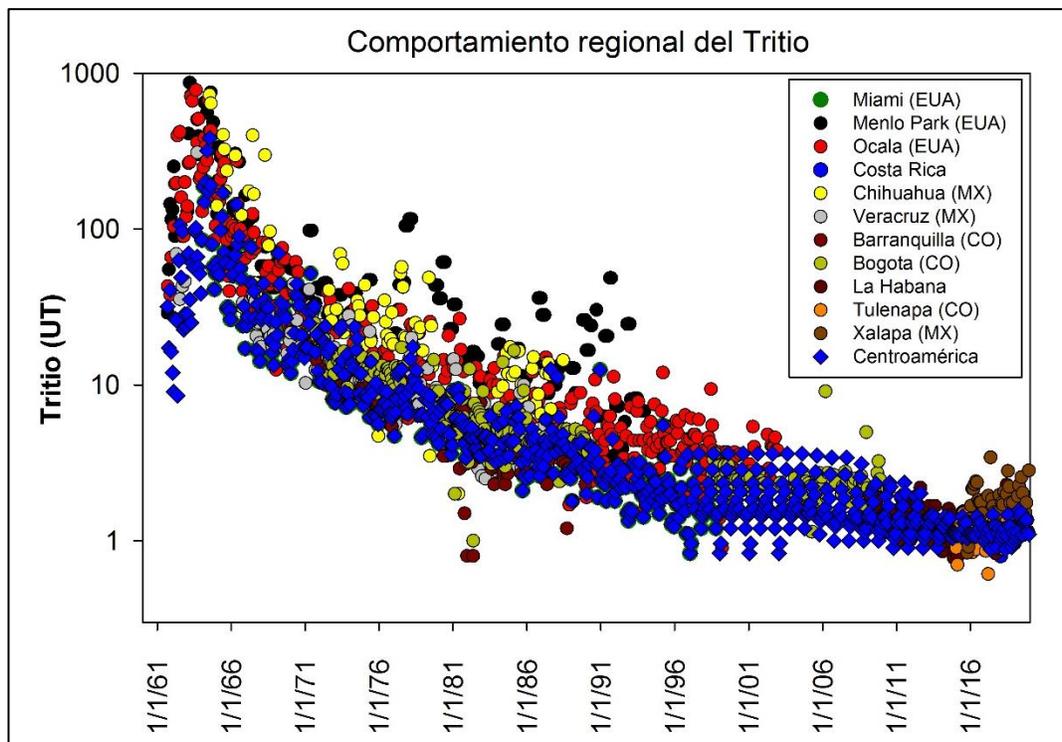


Gráfico 3 Construcción del comportamiento de tritio en la precipitación a partir de series de tiempo registradas en la región.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados en el marco del proyecto Integración de la hidrología isotópica en la evaluación de los recursos hídricos – OIEA.

El modelo está compuesto por una serie de códigos programáticos ejecutados en el software estadístico de acceso libre R en donde se involucra a la función de entrada (serie de precipitación correspondiente al punto de muestreo y su respectiva señal de tritio a una escala mensual).

La aplicación de la integral de convolución se hizo en base a la función de distribución gamma y la función que representa el decaimiento radiactivo del tritio.

El parámetro α de la función gamma representa la forma de la distribución (parámetro adimensional) y el parámetro β representa la escala de tiempo (sujeto a la escala de la función de entrada de precipitación que en este caso es mensual).

Los parámetros iniciales para la función gamma corresponden a 0.01 (con un máximo de 3) para α y de 1 (con un máximo 1000) para β el cual abarca un tiempo cercano posterior al pico de los ensayos nucleares.

Con dichas condiciones el modelo realiza miles de combinaciones utilizando paquetes disponibles en las librerías de R con el fin de simular las múltiples soluciones que puede calcular o asociar entre el valor

observado y la función de precipitación-tritio. Para efectos de las simulaciones se utilizó 100000 (cien mil) iteraciones.

Luego se obtienen los resultados generales que fueron analizados y filtrados tomando el criterio estadístico de error absoluto entre el valor simulado y el valor observado en cada una de las iteraciones realizadas por el modelo, el valor de error absoluto utilizado en el proceso de simulaciones estuvo en el rango de 0.2 a 0.8 UT.

7. CAPÍTULO VII: Análisis e interpretación de los datos

7.1 Variabilidad isotópica de las precipitaciones en la cuenca alta del río Choluteca

La variabilidad de las precipitaciones desde la estación seca (diciembre-abril) hasta la estación húmeda (mayo-noviembre) se caracterizó por mostrar patrones con forma tipo W (Gráfico 4). Esto es consistente con la variabilidad intraestacional de las precipitaciones en América Central (Alfaro E. J., 1990), que por lo general resulta en dos o tres temporadas con concentraciones isotópicas empobrecidas durante la estación húmeda y que son coincidentes con los vientos provenientes del este (mayo-junio), la activación de la temporada ciclónica y la ZCIT (septiembre – noviembre) además de dos pulsos enriquecidos durante el período de vientos alisios más fuertes (diciembre – febrero) y durante la canícula o veranillo (julio – agosto).

En general características climáticas principales presentadas en el área de estudio y que están relacionadas con la dinámica en la composición de la lluvia son vientos alisios E-O, olas del este, afectación por la canícula o veranillo, temporada de ciclones tropicales y activación de ZCIT.

En la zona urbana del Distrito Central (estación UNAH) la $\delta^{18}\text{O}$ varió de -18.67 a $+2.13$ ‰, con una media de -5.11 ‰; mientras que $\delta^2\text{H}$ varió de -136.2 a $+19.8$ ‰, con una media de -32.5 ‰. En la estación El Picacho $\delta^{18}\text{O}$ varió de -14.91 a $+0.39$ ‰ y $\delta^2\text{H}$ varió de -109.1 a $+14.6$ ‰; mientras que en la estación ubicada en El Cerro de Hula los valores de la $\delta^{18}\text{O}$ varió de -20.32 a -0.13 ‰ y los valores de $\delta^2\text{H}$ variaron de -148.0 a $+15.8$ ‰ (Gráfico 3). Los valores medios ponderados por precipitación de $\delta^{18}\text{O}$ oscilaron entre -8.39 ‰ (UNAH, estación más baja) y -9.23 ‰ (Cerro de Hula, estación más alta), mientras que los valores ponderados por precipitación de $\delta^2\text{H}$ variaron entre -56.6 ‰ y -59.0 ‰, respectivamente. Estos valores representan el comportamiento local de cada una de las zonas de monitoreo reflejando la incidencia de las características climáticas de acuerdo a la ubicación geográfica en el área de estudio.

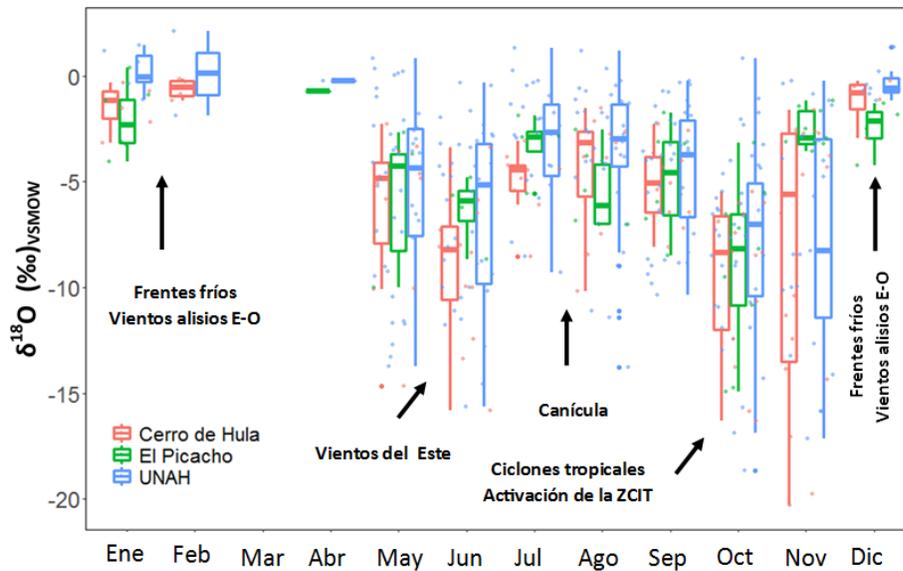


Gráfico 4 Comportamiento estacional de la composición isotópica de la lluvia en los sitios monitoreados. Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de resultados de laboratorio.

El gráfico 5 muestra la variación temporal del Exceso de deuterio en las precipitaciones a lo largo de la cuenca alta del Río Choluteca, parámetro que indica los procesos de evaporación o influencia de adición de humedad por los procesos de reciclaje. Los valores relativamente altos de exceso de deuterio (>20 ‰) en las estaciones El Cerro de Hula y El Picacho durante los meses de la estación seca (diciembre a abril) indican un fuerte reciclaje de humedad y la influencia de eventos de frente frío del Golfo de México. Después del inicio de la temporada de lluvias a mediados de mayo, el exceso de deuterio promedio varió entre 10 y 15 ‰ en ambas estaciones de mayor cota de elevación.

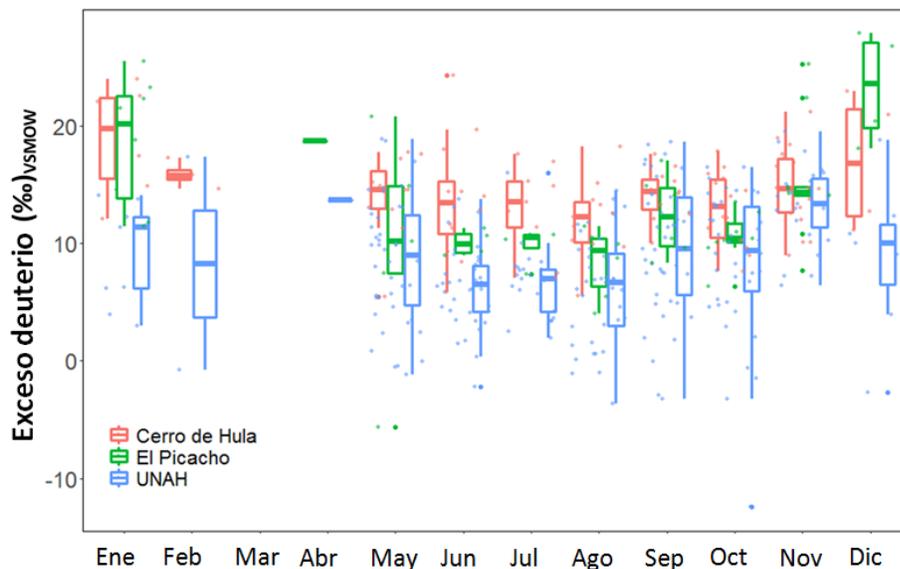


Gráfico 5 Variación temporal del exceso de deuterio en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de resultados de laboratorio.

Los valores medios ponderados de Exceso de deuterio en la precipitación oscilaron entre 10.6 ‰ (UNAH, estación más baja) y 14.8 ‰ (Cerro de Hula, estación más alta). Sin embargo, en las tierras bajas urbanas, los valores medianos de exceso de deuterio estuvieron constantemente por debajo de 10 ‰ entre mayo y agosto, principalmente debido a la combinación de una fuerte evaporación debajo de la nube y altas temperaturas ambientales. Durante septiembre y octubre los valores medios fueron >10 ‰ (efecto asociado a la presencia a la intensificación de los ciclones tropicales) y los eventos de lluvia esporádicos de la estación seca (reciclaje de humedad).

Las líneas meteóricas locales de los puntos de monitoreo de lluvia se muestran a continuación:

Tabla 4 Líneas meteóricas locales de cada sitio de monitoreo de isótopos estables.

Sitio de monitoreo	Línea meteórica
UNAH	$\delta^2\text{H} = 7.8064\delta^{18}\text{O} + 6.3744\text{‰}$ $R^2 = 0.9807$
Cerro de Hula	$\delta^2\text{H} = 8.0409\delta^{18}\text{O} + 14.226\text{‰}$ $R^2 = 0.9842$
El Picacho	$\delta^2\text{H} = 7.6957\delta^{18}\text{O} + 10.463\text{‰}$ $R^2 = 0.9117$

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de resultados de laboratorio.

La composición de isótopos estables resultaron en una línea de agua meteórica altamente significativa para la cuenca alta del Río Choluteca (LMGCC): $\delta^2\text{H} = 7.77 \cdot \delta^{18}\text{O} + 9.14\text{‰}$ ($R^2 = 0.97$; $p < 0.001$; $N = 426$), la cual se asemeja al comportamiento de la línea meteórica de la vertiente del Pacífico de América Central (Sánchez-Murillo R. , y otros, 2020); donde podemos observar como ejemplo la línea meteórica para la vertiente del Pacífico de Costa Rica, $\delta^2\text{H} = 7,88 \cdot \delta^{18}\text{O} + 8,42\text{‰}$.

7.2 Variabilidad isotópica de manantiales, pozos perforados y sondeos en la cuenca alta del Río Choluteca

En general, el agua subterránea estuvo estrechamente relacionada con el agua meteórica relativamente reciente (muy probablemente <1 año), sin embargo, según los valores de exceso de deuterio de lluvia, hay indicaciones de evaporación progresiva.

En la subcuenca Choluteca Alta (Gráfico 6), los pozos malacate mostraron una clara evolución de la evaporación en comparación con los manantiales y los pozos perforados. Estas fuentes son pozos poco

profundos y excavados artesanalmente (ubicados en las elevaciones más bajas) que pueden verse afectados por la evaporación. Los pozos perforados exhibieron una distribución bimodal en el exceso de deuterio. Si bien la ausencia de profundidades de pozo consistentes impidió un análisis más detallado de la relación de las proporciones de isótopos versus la profundidad del agua, esta separación bimodal puede denotar la existencia de dos depósitos de agua subterránea: un acuífero poco profundo y más joven que refleja el enriquecimiento isotópico y un segundo sistema acuífero con agua presumiblemente más antigua y bien mezclada centrado alrededor de los valores de exceso de deuterio de las estaciones pluviométricas de la UNAH y Cerro de Hula. Las muestras de manantial también se ubicaron dentro de los valores de exceso de deuterio de la lluvia.

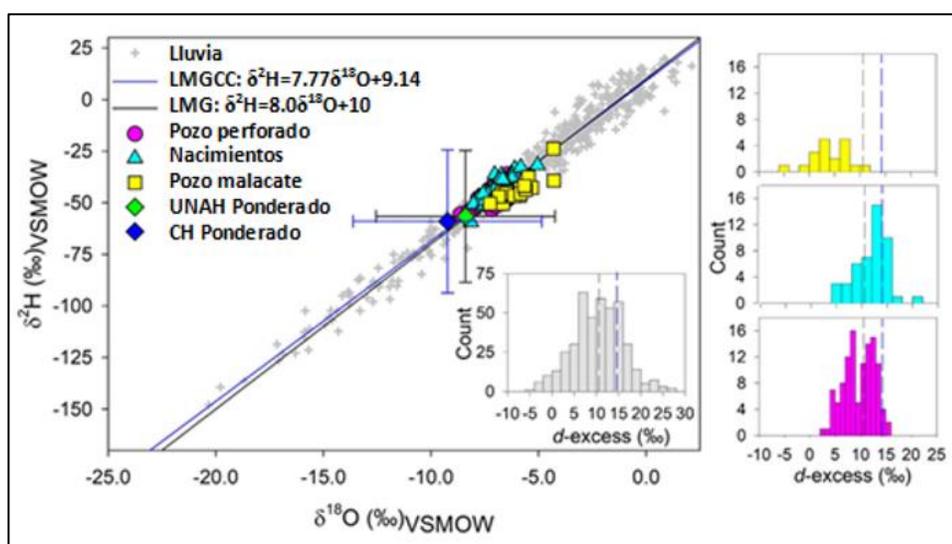


Gráfico 6 Representación del comportamiento de las fuentes de agua sobre la línea meteórica en la subcuenca Choluteca Alta.

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de resultados de laboratorio.

En la subcuenca Guacerique-Grande (Gráfico 7), los pozos se centraron cerca de los valores de exceso de deuterio de la lluvia. En esta región, con un gradiente de elevación más pronunciado, los pozos evidenciaron una conectividad más directa con los eventos de lluvia que los de la parte inferior de la subcuenca Choluteca Alta. Los manantiales captados denotaron una clara tendencia a la evaporación, mientras que los pozos perforados presentaron una distribución sesgada hacia relaciones más enriquecidas.

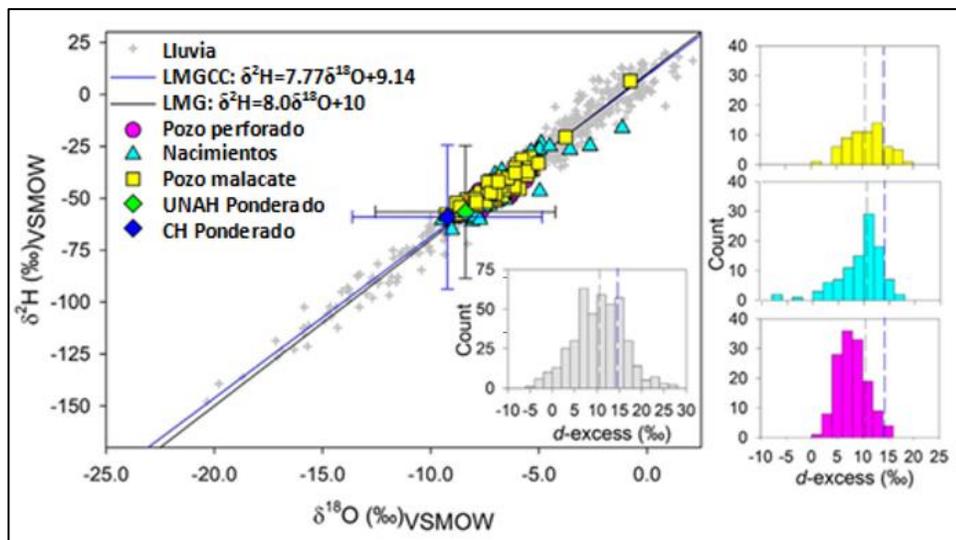


Gráfico 7 Representación del comportamiento de las fuentes de agua sobre la línea meteórica en la subcuenca Guacerique Grande.

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de resultados de laboratorio.

Por condiciones de accesibilidad y seguridad, las subcuencas Río del Hombre y Yeguaré (Gráfico 8 y 9) fueron muestreadas menos que las subcuencas anteriores. Los pozos perforados en Río del Hombre exhibieron una tendencia similar de exceso de deuterio hacia aguas más enriquecidas (~7.5 ‰ en exceso de deuterio), mientras que en Yeguaré los pozos perforados se ubicaron dentro de los límites de exceso de deuterio de lluvia. En ambas subcuencas, las muestras de pozos y manantiales también denotaron un claro origen meteórico con ligera evidencia de evaporación secundaria.

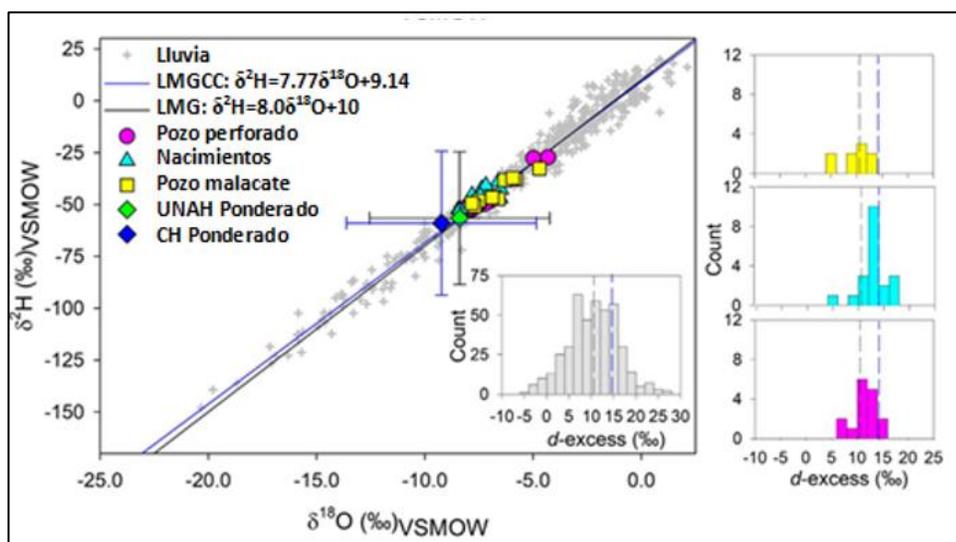


Gráfico 8 Representación del comportamiento de las fuentes de agua sobre la línea meteórica en la subcuenca Río del Hombre.

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de resultados de laboratorio.

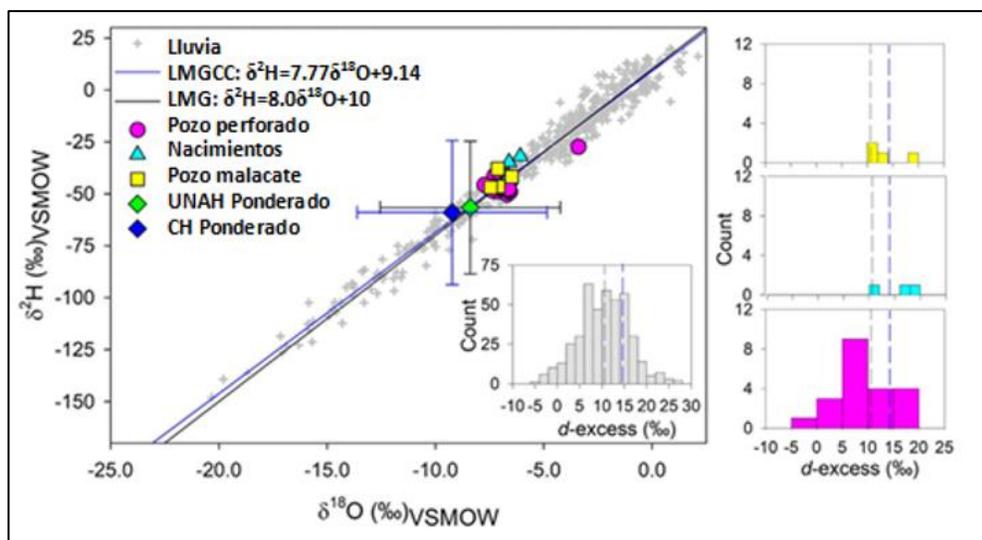


Gráfico 9 Representación del comportamiento de las fuentes de agua sobre la línea meteórica en la subcuenca Yeguaré.

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de resultados de laboratorio.

7.3 Trayectorias de retorno de masa de aire HYSPLIT y fuentes de humedad

El Istmo de América Central que corresponde al 0.4 % de la superficie terrestre total de la Tierra (Marshall, 2007), representa un puente atmosférico entre el Océano Pacífico oriental y la cuenca semicerrada del Mar Caribe. Los procesos atmosféricos junto con un paisaje dinámico de barreras topográficas juegan un papel notable en el control de los pulsos isotópicos de lluvia, que luego se traducen en depósitos de agua superficial y subterránea. De 270 trayectorias simuladas de parcelas de aire, el 93 % (N = 250) y el 7 % (N = 20) correspondieron a las estaciones húmeda y seca, respectivamente.

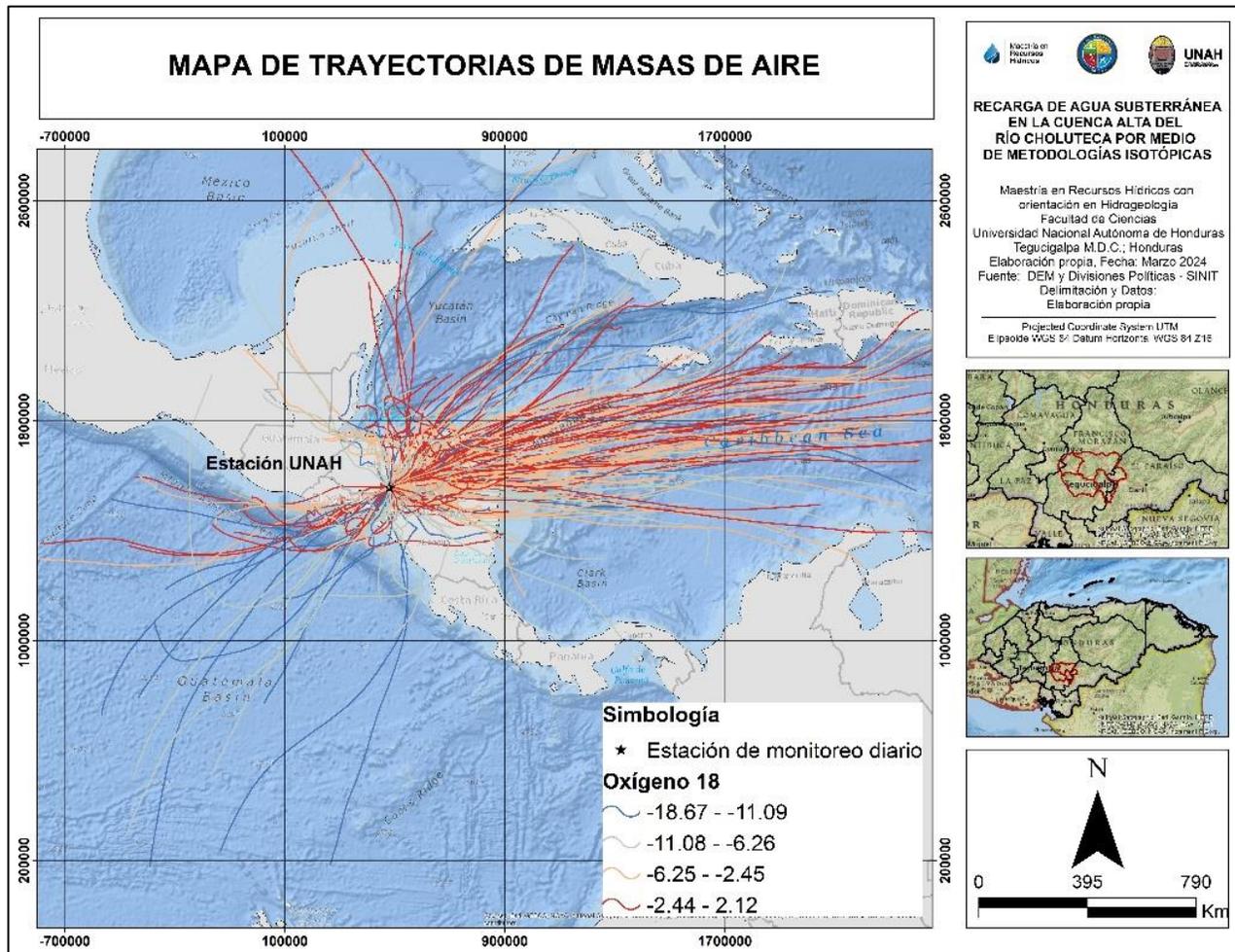
Con base en la dirección de la trayectoria principal (cuadrángulo centrado en Tegucigalpa), el origen del transporte de humedad se puede dividir de la siguiente manera: 73 % proveniente del este (Mar Caribe), 17 % de suroeste (Océano Pacífico) y 10 % del norte (Golfo de México).

En el caso de $\delta^{18}\text{O}$, los eventos enriquecidos entre -2.13 y -6.26 ‰ se originaron principalmente en el Mar Caribe, con algunos eventos tempranos provenientes del Océano Pacífico oriental (principalmente en abril-mayo-junio). Eventos empobrecidos (hasta -18.67 ‰ en $\delta^{18}\text{O}$) ocurren principalmente durante la segunda etapa de la temporada lluviosa originados en el suroeste y la cuenca del Caribe durante la activación de la temporada ciclónica (Mapa 9) (Welsh & Sánchez-Murillo, 2020).

Los eventos de frente frío del Golfo de México a menudo resultaron en lluvias ligeras enriquecidas, como lo informaron previamente (Sánchez-Murillo y otros, 2019). De manera similar, los eventos de lluvia con exceso de deuterio (>12.6 ‰) ocurrieron principalmente en las regiones nororiental y suroeste del Mar

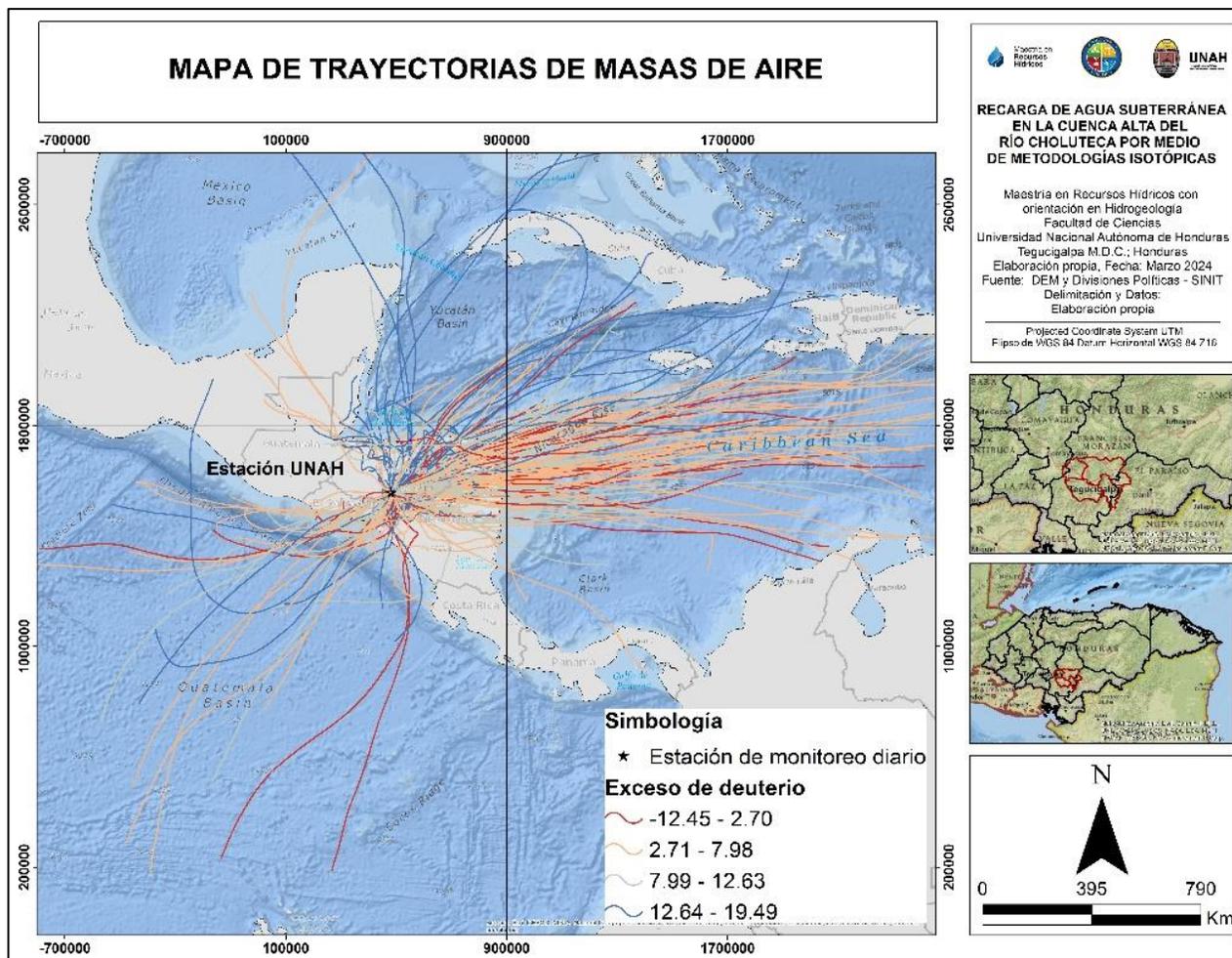
Caribe y el Océano Pacífico, respectivamente. Los eventos de lluvia cercanos al valor medio global de exceso de deuterio (10 ‰) se originaron principalmente en el Mar Caribe y en menor grado en el Océano Pacífico (Golfo de Fonseca, entre El Salvador, Honduras y Nicaragua).

Los eventos de lluvia pequeños con un exceso de deuterio relativamente bajo se generaron indistintamente en ambas cuencas oceánicas (Mapa 10) y están relacionados con la evaporación debajo de las nubes en el valle de Tegucigalpa (Managave y otros, 2016; Salamalikis y otros, 2016).



Mapa 9 Representación de trayectorias de masas de aire para la estación de la UNAH y su composición isotópica de ^{18}O .

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos por el modelo de trayectorias HYSPLIT y resultados de laboratorios.



Mapa 10 Representación de trayectorias de masas de aire para la estación de la UNAH y el Exceso de deuterio.

Fuente: Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos por el modelo de trayectorias HYSPLIT y resultados de laboratorios.

7.4 Elevaciones medias de recarga (EMR) y conectividad de la lluvia con las aguas subterráneas dentro de la cuenca alta del Río Choluteca

Se calcularon las composiciones medias anuales de $\delta^{18}\text{O}$ en cuatro estaciones dentro del área de estudio: UNAH (-5.50 ‰), El Picacho (-5.41 ‰), Cerro de Hula (-7.13 ‰) y Rincón de Dolores (archivo de datos del OIEA; longitud = - 87.3997, latitud = 14.1401) (-7.42 ‰), lo que resulta en una regresión lineal significativa con la siguiente expresión $\delta^{18}\text{O} = -0.0036 * \text{Elevación} - 1.4$ ($r^2 = 0.82$, $p < 0.01$) entre 1063 y 1643 msnm (Gráfico 10). Es importante resaltar que las condiciones de accesibilidad y seguridad impidieron la instalación de instrumentación para mantener un registro de precipitación constante en todos los sitios de lluvia.

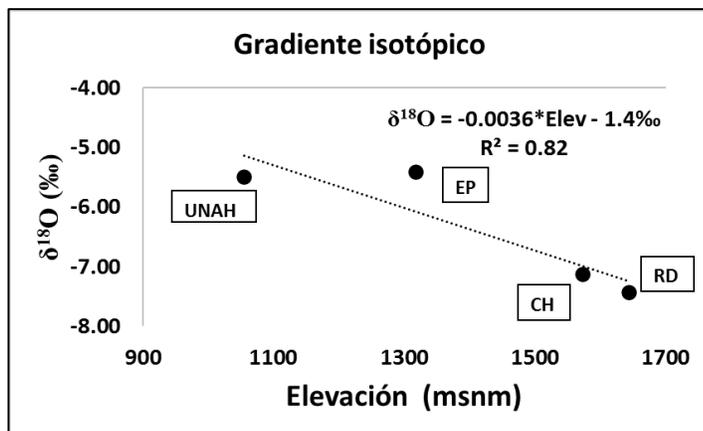
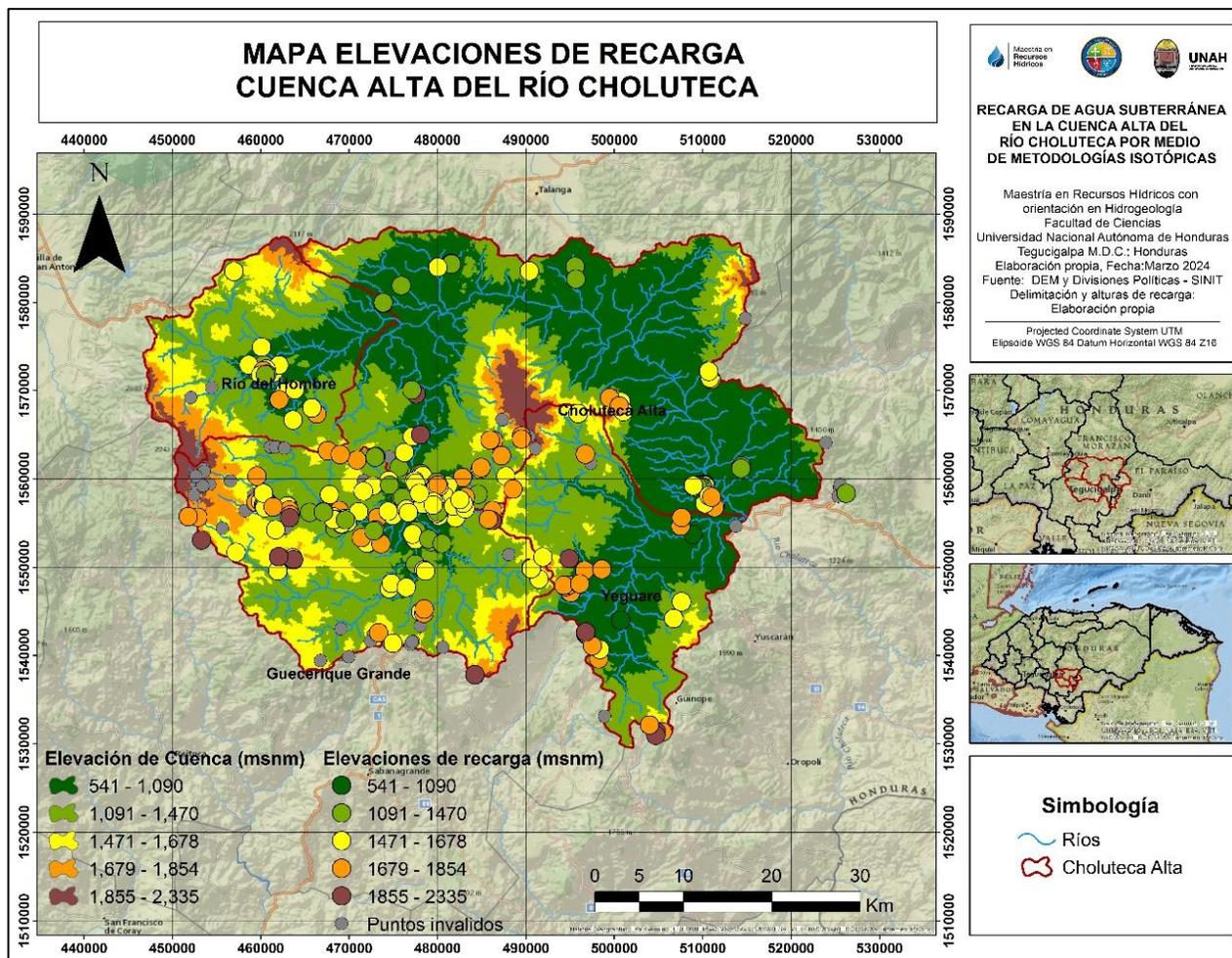


Gráfico 10 Representación del gradiente isotópico para el área de estudio de la cuenca alta del Río Choluteca donde EP es El Picaho, CH, Cerro de Huya y RD, Rincón de Dolores.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos en campo y análisis de laboratorio.

Recientemente, (Sánchez-Murillo y otros, 2020) informaron de un espectro pantropical de tasas de caída isotópicas que oscilan entre -3.5 y -0.5 ‰/km, con una media de -2.2 ‰/km. De manera similar, (Poage & Chamberlain, 2001) reportaron una tasa de caída isotópica global de -2.8 ‰/km.

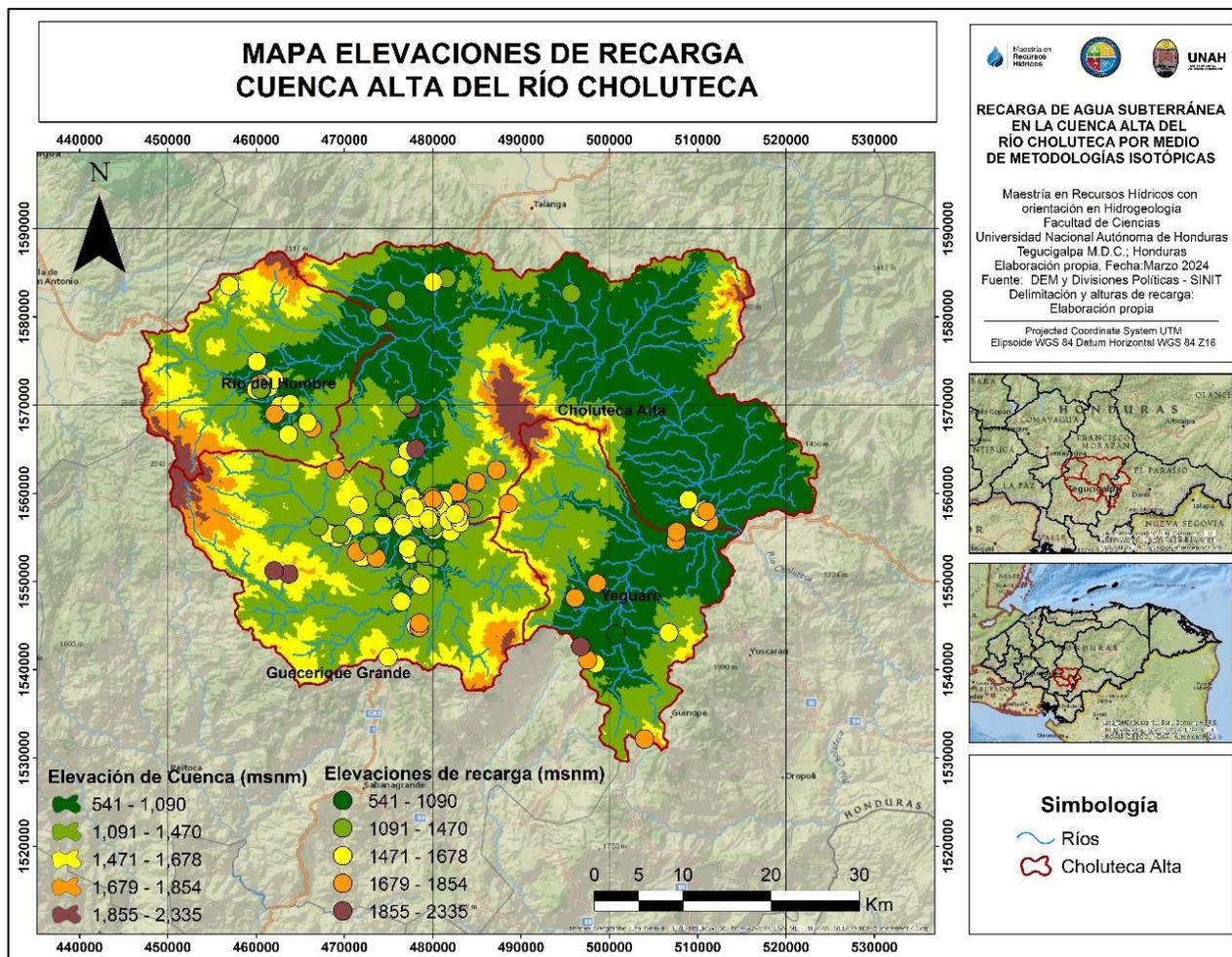
Utilizado la ecuación generada con el análisis de gradiente altitudinal se procedió al cálculo de las elevaciones de recarga inversa de cada una de las fuentes de agua visualizando que para muchos de los sitios las alturas calculadas fueron inferiores a la altura de ubicación de la fuente de agua o la altura que sobrepasaba la cota máxima del área de estudio (puntos inválidos) y que se representan en el Mapa 11. Estos sitios obedecen mayoritariamente a nacimiento de agua y pozos malacate por lo que el análisis final de EMR se desarrolló únicamente con los pozos perforados y evitar la incidencia de la variabilidad isotópica estacional y el impacto de la infiltración cercana a la superficie.



*Mapa 11 Elevaciones de recarga considerando todas las fuentes de agua subterráneas.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio y análisis del gradiente altitudinal.*

En el área de estudio, las EMR oscilaron entre 821 y 2018 msnm con un valor medio de 1570 ± 150 msnm (Mapa 12). El Gráfico 11b muestra una clara desproporcionalidad entre las ubicaciones de muestreo (es decir, la elevación de bombeo) y las elevaciones medias de recarga, donde se obtienen una EMR general >1500 msnm y unas ubicaciones de bombeo concentrada en aproximadamente 1000 msnm.

Las EMR y las diferencias de elevación de bombeo pueden alcanzar hasta 1 km de elevación, lo que indica una serie compleja de trayectorias de flujo de agua subterránea cortas y distantes. El Gráfico 11a muestra un histograma de EMR vinculado a las mismas clases de elevación representadas en el Mapa 12. Las EMR por encima de la estación de monitoreo de precipitaciones más alta deben analizarse como posibles elevaciones de recarga.



**RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA
EN LA CUENCA ALTA DEL
RÍO CHOLUTECA POR MEDIO
DE METODOLOGÍAS ISOTÓPICAS**

Maestría en Recursos Hídricos con
orientación en Hidrogeología
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de Honduras
Tegucigalpa M.D.C.; Honduras
Elaboración propia, Fecha: Marzo 2024
Fuente: DEM y Divisiones Políticas - SINIT
Delimitación y alturas de recarga:
Elaboración propia

Projected Coordinate System UTM
Elipsoide WGS 84 Datum Horizontal WGS 84 Z16

Mapa 12 Representación de elevaciones de recarga (pozos perforados) en la cuenca alta del Río Choluteca. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de laboratorio y análisis del gradiente altitudinal.

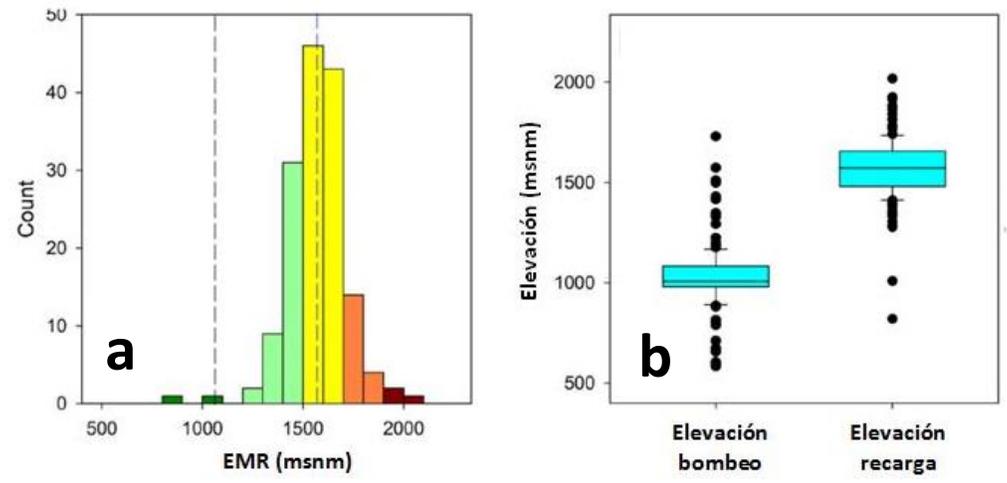


Gráfico 11 Distribución de fuentes de agua por su altura de recarga y comparación de elevación de bombeo frente a la elevación de recarga de las fuentes analizadas en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por el análisis de gradiente isotópico en la cuenca alta del Río Choluteca.

7.5 Comportamiento de tritio en fuentes de agua (Tiempos de tránsito).

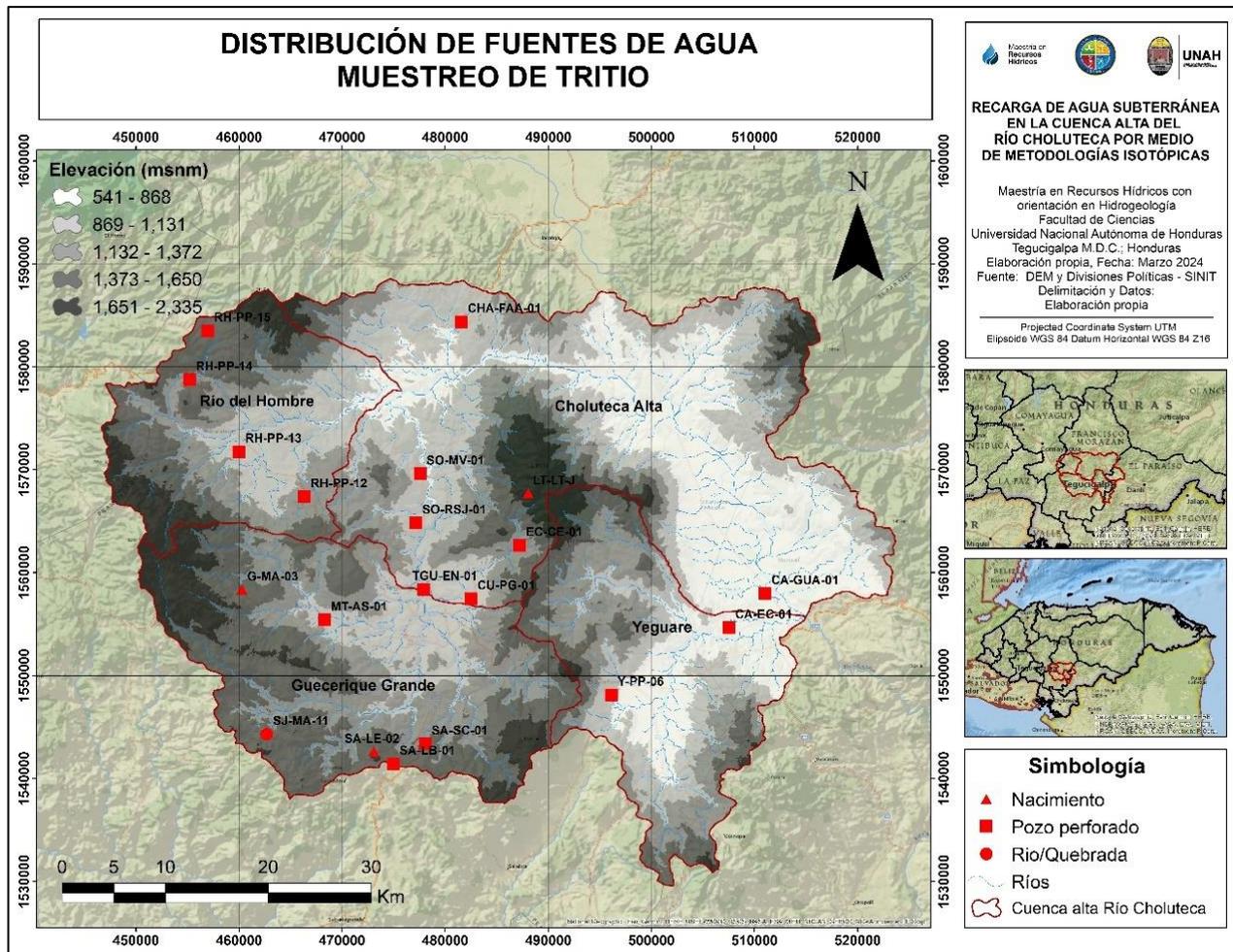
Luego de la evaluación y análisis de las muestras para determinar la concertación de tritio en las fuentes seleccionadas se determinaron valores en un rango de 0.08 a 1.45 UT, agrupando las muestras en tres rangos, el grupo uno con valores de 0.08 UT – 0.50 UT y que corresponden a los sitios CA-GUA-01, CA-EC-01, SA-SC-01, CU-PG-01, RH-PP-13, RH-PP-14, SO-MV-01 y SO-RSJ-01. En el segundo rango y que cuentan con valores de 0.51 UT – 1.22 UT se encuentran los sitios SJ-MA-11, RH-PP-12, G-MA-03, TGU-EN-01, Y-PP-06, SA-LB-01, CHA-FAA-01, SA-LE-02, LT-LT-J y EC-CE-01. Para el último rango se consideran los sitios mayores a 1.22 UT que corresponde únicamente al sitio RH-PP-15. La Tabla 5 muestra los datos individuales y tipo de fuente de cada una de las muestras seleccionadas.

Tabla 5 Concentraciones de tritio analizado en las fuentes de agua seleccionadas en el área de estudio.

Código de muestra	Tipo de fuente	³H (UT)	Código de muestra	Tipo de fuente	³H (UT)
CA-GUA-01	Pozo perforado	0.08	RH-PP-12	Pozo perforado	0.61
CA-EC-01	Pozo perforado	0.19	G-MA-03	Nacimiento	0.62
SA-SC-01	Pozo perforado	0.24	TGU-EN-01	Pozo perforado	0.70
CU-PG-01	Pozo perforado	0.29	Y-PP-06	Pozo perforado	0.73
RH-PP-13	Pozo perforado	0.36	SA-LB-01	Pozo perforado	0.76
RH-PP-14	Pozo perforado	0.44	CHA-FAA-01	Pozo perforado	0.86
MT-AS-01	Pozo perforado	0.48	SA-LE-02	Nacimiento	0.93
SO-MV-01	Pozo perforado	0.48	LT-LT-J	Nacimiento	1.17
SO-RSJ-01	Pozo perforado	0.48	EC-CE-01	Pozo perforado	1.22
SJ-MA-11	Nacimiento	0.55	RH-PP-15	Pozo perforado	1.45

Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por laboratorios gestionados por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

De acuerdo al comportamiento de la función de entrada de tritio para Centroamérica Los rangos 1 y 3 presentan valores que se encuentran en los rangos de ambigüedad lo que significa que sólo utilizando el isótopo radioactivo de tritio se hace complejo intentar contestar la interrogante de datación de agua ya que esos valores podrían ser para aguas con edades de tiempos antes del pico de los ensayos nucleares (valores por debajo de 0.55 UT) o en su defecto edades que coincidan con los eventos de ensayos nucleares (valores por encima de 1.2 UT).



Mapa 13 Distribución espacial de fuentes analizadas para determinar la concentración de tritio.
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo, cuenca e hidrografía generada a partir del modelo de elevación ASTER con resolución 15 m.

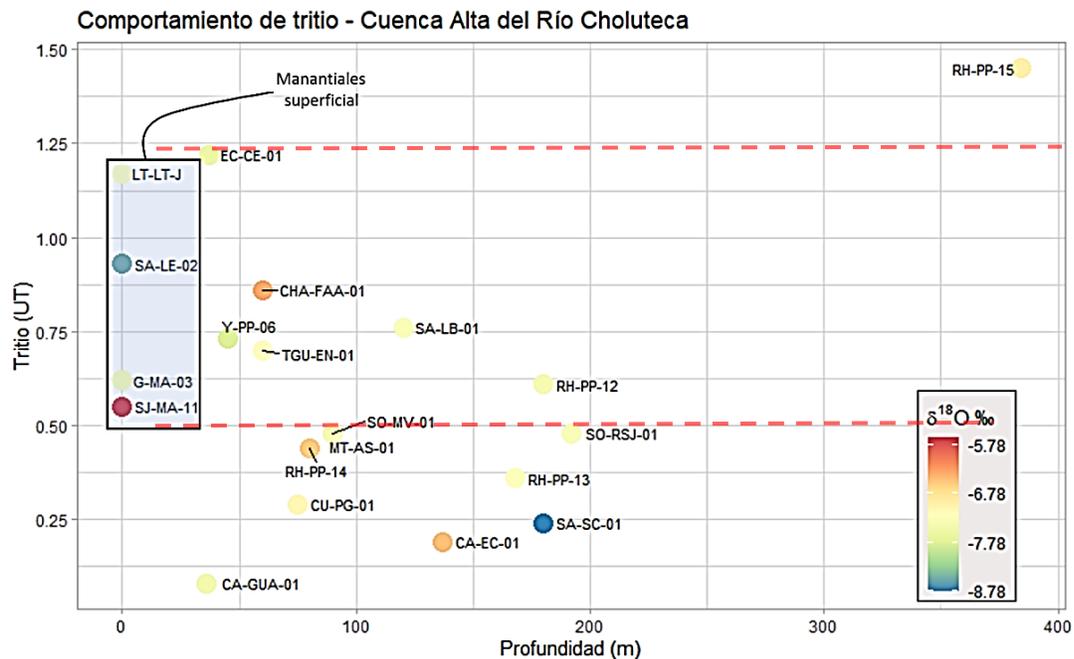


Gráfico 12 Comportamiento de tritio en las muestras de agua seleccionadas en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio.

Evaluando el Mapa 13 y Gráfico 12 todas las muestras que se encuentran en el rango estipulado fuera de ambigüedad (0.50 UT – 1.22 UT) presentan características particulares por ejemplo los sitios LT-LT-J, SA-LE-02, G-MA-11 son nacimientos y el sitio SJ-MA-11 una fuente superficial, ubicadas en las cotas altas del área de estudio (1373 msnm a 2335 msnm) y de acuerdo a su tipología están más expuestas a recargas modernas ya que presentan respuestas mayores a los eventos de precipitación en sus zonas de recarga. Las muestras CHA-FAA-01, Y-PP-06, TGU-EN-01, SA-LB-01, RH-PP-12 y EC-CE-01 pozos perforados ubicados en las cotas medias altas del área de estudio (869 a 1372 msnm) con profundidades que van de los 37 a 180 m con posible conexión de recargas modernas por el posible potencial de infiltración y recarga en esa zona del área de estudio.

En el caso de las muestras que están por debajo de los 0.50 UT, mayoritariamente se encuentran en la zona baja media de la cuenca (sitios SO-MV-01, CA-GUA-01, CA-EC-01, MT-AS-01, CU-PG-01, RH-PP-13, y SO-RSJ-01) entre las elevaciones 869 a 1131 msnm, todas fuentes tipo pozos perforados con profundidades que van desde los 36 m a los 192 m, suponiéndose que se puedan dar procesos de recarga y transporte de agua mucho más lentos que las fuentes descritas anteriormente. La fuente de agua RH-PP-15 pozo perforado revela una serie de características que podría suponerse contrarias a los descrito anteriormente ya que presenta los valores más altos en la concentración de tritio (1.45 UT) ubicado en las cotas altas (1373 a 1650 msnm).

Luego del análisis de los datos obtenidos se procedió con la aplicación del modelo de flujo base-tiempo de tránsito de aguas subterráneas desarrollando una integral de convolución combinando la función de decaimiento del tritio y la función de transferencia de distribución gamma, los resultados son mostrados en la Tabla 6. El cálculo del tiempo de tránsito medio determino un rango de 2.18 a 2.71 años para todas las fuentes consideradas con un Error Medio Absoluto (EMA) que va de 0.01 a 0.67 UT.

Tabla 6 Resultados del modelo de tránsito de aguas subterráneas.

Código	^3H (TU)	EMA Filtro (UT)	α	β	EMA (UT)	TTM (Mes)	TTM (Años)
SJ-MA-11	0.55	0.80	1.00	45.41	0.67	26.12	2.18
RH-PP-12	0.61	0.80	0.99	56.61	0.64	30.89	2.57
G-MA-03	0.62	0.80	1.00	53.10	0.63	31.18	2.60
TGU-EN-01	0.70	0.80	1.02	50.52	0.54	30.37	2.53
Y-PP-06	0.73	0.80	0.97	61.25	0.52	32.54	2.71
SA-LB-01	0.76	0.60	1.01	46.01	0.47	27.40	2.28
CHA-FAA-01	0.86	0.50	0.97	49.18	0.37	27.19	2.27
SA-LE-02	0.93	0.45	1.00	49.03	0.30	28.20	2.35
LT-LT-J	1.17	0.20	0.97	48.53	0.08	27.39	2.28
EC-CE-01	1.22	0.20	1.00	54.59	0.01	31.59	2.63

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de laboratorio y aplicación de modelo de tránsito de aguas subterráneas elaborado bajo programa RLA7024 del OIEA.

8. CAPÍTULO VIII: Discusión de resultados

La migración de las primeras ondas tropicales del este junto con el gradiente térmico entre el Océano Pacífico y la masa de tierra continental, resultó en eventos convectivos empobrecidos en mayo-junio del periodo evaluado (2018-2020) iguales características de eventos se presentan en el segundo pico de las precipitaciones causados por la intensificación de la temporada ciclónica y afectación de ZCIT. Investigaciones sobre el comportamiento de la composición isotópica en la lluvia han demostrado patrones similares en Costa Rica, Nicaragua, Veracruz (México) y Guatemala y que han sido mencionados por (Wassenaar y otros, 2009; Lachniet, 2009; Pérez-Quezadas y otros, 2015; Ricardo & Birkel, 2016; Sánchez-Murillo y otros, 2019; Sánchez-Murillo y otros, 2020) y que denota un patrón clave para la relación de recarga de fuentes subterráneas por efectos de las precipitaciones en el área de la cuenca alta del Río Choluteca.

El trabajo expuesto por (Vignola y otros, 2023) establece que el área de estudio se encuentra en una de las regiones más alteradas del centro de Honduras. En la cuenca alta del Río Choluteca entre 500 y 1100 msnm (tierras bajas) se puede observar una gran prevalencia de actividades antropogénicas y degradación del suelo, como pastos y cultivos, agricultura tecnificada y áreas urbanas, sin embargo, sólo el 1.3 % de las EMR potenciales se encuentran en las tierras bajas (Gráfico 11a), además, estas áreas se caracterizan por valores de transmisividad bajos a moderados (Mapa 5, Grupo Valle de Ángeles).

En términos de calidad del agua, la baja prevalencia de la recarga urbana puede resultar en un beneficio neto a largo plazo para los reservorios de agua subterránea, sin embargo, en un detrimento neto de las condiciones actuales de calidad del agua superficial (es decir, alta concentración de múltiples patógenos y sedimentos) no deja de ser un problema sensible para las diferentes fuentes de agua subterránea de profundidades más someras y que por ende significa que poseen una conexión más directa (Lee, 2009).

En general, el agua subterránea en los asentamientos urbanos depende en gran medida de la recarga a gran altura como también se ha evidenciado en los trabajos propuestos por (Viviroli y otros, 2007; Immerzeel y otros, 2020). El 57% de las fuentes de agua que se encuentran en las tierras bajas están relacionadas a alturas de recarga cercanas a la altura media presentada en el Gráfico 11b, lo que indica un sesgo de infiltración hacia elevaciones de recarga más altas con eventos de lluvia empobrecidos en el área de estudio (Jasechko & Taylor, 2015; Sánchez-Murillo & Birkel, 2016). Este rango de elevación comprende pastos, cultivos y bosques de coníferas afectados por la plaga del descortezador del pino (Mapa 6) información que también es validada por el trabajo de (Valdez et al., 2017).

Las EMR por encima de la estación de monitoreo de mayor elevación (aproximadamente 1600 msnm) representaron el 42.1 %. Esta región está cubierta principalmente por pinares afectados por la plaga del descortezador, bosques de coníferas, pastos y cultivos (Mapa 6). Las elevaciones de recarga superiores a 1100 msnm correspondieron a zonas con valores de transmisividad de moderados a altos, que van desde 500 a 1000 m²/d (Mapa 5), lo que también refleja una capacidad potencial y mayor para transmitir agua subterránea.

La recarga a gran altura ha sido estudiada previamente a lo largo de la vertiente del Pacífico del Corredor Seco de Centroamérica. En toda esta región, la recarga de aguas subterráneas basada en la proporción media anual de precipitación/agua subterránea (P/AS) favoreció la recarga en las subcuencas (72.3 %) frente a la recarga preferencial rápida (13.1 %) y la recarga controlada por matriz localizada (14.5 %) según lo establecido por (Sánchez-Murillo y otros, 2020).

La circulación de agua desde las partes altas hasta las tierras bajas es consistente con los contornos piezométricos a través del área de drenaje y con regiones que exhiben una transmisividad de moderada a grande (mapa 5) Esfuerzos previos de balance hídrico en Honduras informaron una recarga anual media que oscilaba entre 100 mm (7.5% de la precipitación total) y 325 mm (24.4% de la precipitación total) en la cuenca del río Choluteca (1970-2002) (Pérez y otros, 2003).

La conversación sobre la calidad del agua y su relación con las prácticas de recarga en entornos urbanos presenta un dilema complejo: aunque la recarga en áreas urbanas podría tener ventajas a largo plazo para los acuíferos, existen desafíos inmediatos relacionados con la contaminación de fuentes superficiales. Esta situación subraya la importancia de implementar enfoques integrales de gestión del agua que consideren tanto la recarga de los acuíferos como la preservación de la calidad del agua.

De manera general, los resultados de los análisis de tritio en los diferentes sitios estudiados presentan un comportamiento acorde a la dinámica de flujo en el área de estudio presentando los valores más cercanos a las concentraciones registradas en la región (0.64 – 1.61 UT, registrados en Costa Rica en el periodo de 2015-2020) en las fuentes que están sujetas a presentar una respuesta más rápida ante los eventos de precipitación (manantiales y fuentes superficiales) y que se encuentran en las zonas más altas. En cambio, los pozos perforados evidenciaron valores que en su mayoría las concentraciones de tritio van decreciendo de acuerdo con su ubicación en el área de estudio (de tierras altas a tierras bajas) y la profundidad de los mismo, sin embargo, también hay algunos puntos que se salen del análisis tradicional de flujo y deben de analizarse con el apoyo de otras técnicas, como también, validación de la información propia del sitio de estudio.

Los valores de tritio que fueron obtenidos son concentraciones que a menudo son relacionadas con las cantidades producidas de manera natural y que se encuentran cerca o por debajo de los límites de detección analítica de la mayoría de los laboratorios que realizan análisis de tritio, lo que supone dificultades significativas para utilizar el tritio como un trazador natural en la hidrología en regiones como Centroamérica (Terzer-Wassmuth y otros, 2022).

9. Conclusiones

1. La investigación ha revelado patrones de comportamiento de la composición isotópica en la precipitación que presenta similitudes con los patrones isotópicos regionales (tipo W), influenciados significativamente por características climáticas específicas como los vientos alisios E-O, olas del este, la canícula, la temporada de ciclones tropicales y la activación de la ZCIT. Esto indica una dependencia significativa de la humedad caribeña en los eventos de lluvia del área de estudio, con interrupciones durante eventos cálidos de ENOS que reducen la contribución de humedad y resultan en un déficit de precipitaciones, mostrando, además, una estrecha relación e interacción con las fuentes de agua analizadas estableciendo patrones de conectividad y reacción de acuerdo a condiciones de cobertura forestal, condiciones geológicas y profundidad de las mismas.
2. Las Elevaciones Medias de Recarga (EMR) derivadas de la elevación inversa revelaron una variación considerable, con un rango entre 821 y 2018 msnm (con una media de 1570 ± 150 msnm). Estas EMR reflejan principalmente áreas impactadas por actividades humanas como la alteración de bosques de coníferas, la agricultura y, en menor medida, áreas urbanas en las zonas más bajas del área de estudio. Se destaca la influencia significativa de la rápida infiltración de pulsos isotópicos, especialmente durante los períodos de flujo base. Esta influencia limitó la precisión de los cálculos de elevación inversa en manantiales y pozos malacates, conduciendo a la preferencia por utilizar pozos perforados, considerados más representativos de la composición media anual de la recarga isotópica.
3. El uso de tritio como indicador de la edad de recarga mostró que las fuentes de agua subterránea muestreadas tienen edades de recarga que oscilan entre 2.18 y 2.71 años con un EMA que va de 0.01 a 0.67 UT. Este rango de edad, junto con la variabilidad observada en las concentraciones de tritio entre las muestras, sugiere una recarga dinámica y relativamente rápida en la región estudiada, aunque con limitaciones en la precisión de datación cuando se usa el tritio por sí solo obligándonos a uso de nuevos métodos de análisis para contrarrestar los focos de ambigüedad que el método contiene.

De manera general, la caracterización de la dinámica de recarga y renovación del agua subterránea en la cuenca alta del Río Choluteca, mediante el análisis de isótopos estables (Oxígeno-18, Deuterio) y el isótopo radiactivo (Tritio), ha permitido identificar patrones significativos de influencia climática y antropogénica en la composición isotópica de la lluvia y en los procesos de recarga de los acuíferos. Los hallazgos destacan la complejidad de la interacción entre los eventos climáticos y la recarga de agua subterránea, así como la

importancia de considerar las variaciones espaciales y temporales en la gestión de los recursos hídricos, la capacidad de transporte de contaminantes y la recarga dinámica, evidenciada por las edades aparentes de las aguas subterráneas, subrayan la necesidad de estrategias integradas de manejo y conservación del agua en la región.

.

10. Recomendaciones

1. Ampliación y profundización de la recolección de datos hidrometeorológicos: Se sugiere implementar una red de monitoreo hidrometeorológico más densa y tecnológicamente avanzada en toda la cuenca. Esto incluye estaciones meteorológicas automáticas y sensores de nivel de agua que permitan recopilar datos en tiempo real. La creación de series temporales robustas de datos de precipitación y flujos de aguas superficiales y subterráneas facilitará el análisis detallado de la variabilidad isotópica y mejorará la comprensión de los patrones de recarga en diferentes escalas temporales y espaciales.
2. Investigación geoquímica y de edades de aguas subterráneas: Es imprescindible profundizar en el estudio de la geoquímica del agua subterránea y las edades aparentes mediante el muestreo sistemático y el análisis en laboratorios especializados. Esto debería incluir la identificación de trazadores geoquímicos adicionales que puedan ofrecer nuevas perspectivas sobre los procesos de mezcla, recarga y flujo del agua subterránea. La integración de estos datos con modelos hidrogeológicos conceptualizados proporcionará una base sólida para la calibración y validación de modelos numéricos que simulan la dinámica del agua subterránea.
3. Uso de técnicas nucleares avanzadas: Se recomienda la adopción de un enfoque multidisciplinario que incluya técnicas nucleares avanzadas, como el análisis de isótopos tritio-helio, radón, carbono, nitrógeno y gases nobles, para complementar los estudios de isótopos estables y tritio. La combinación de estas técnicas mejorará significativamente la capacidad para trazar el origen, la edad y los procesos de recarga del agua subterránea, contribuyendo a un entendimiento más profundo de la dinámica hídrica subterránea.
4. Colaboración para la gestión de recursos hídricos: Es crucial fomentar la colaboración entre instituciones académicas, organismos gubernamentales, comunidades locales y sectores privados. Estas alianzas deben enfocarse en el uso de los resultados de la investigación para informar y mejorar las políticas de gestión del agua, la planificación del uso del suelo y la conservación de áreas de recarga clave. La incorporación de los hallazgos de la investigación en los planes municipales de uso de la tierra facilitará la identificación de zonas prioritarias para la conservación y la implementación de regulaciones y permisos de extracción de agua subterránea más informados.
5. Implementación de Esquemas de Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE): Se recomienda desarrollar e implementar esquemas de PSE que incentiven la conservación y regeneración de ecosistemas clave para la recarga de acuíferos, como bosques y pastizales. Esto puede incluir programas de reforestación, protección de manantiales y restauración de ecosistemas degradados. Los PSE

pueden ofrecer una herramienta económica viable para promover prácticas sostenibles de manejo del suelo y del agua que benefician tanto a las comunidades locales como a los ecosistemas.

6. Educación y sensibilización comunitaria: Finalmente, se sugiere implementar programas de educación y sensibilización dirigidos a comunidades locales, autoridades y socios estratégicos sobre la importancia de la conservación del agua y los ecosistemas de recarga. Estos programas pueden ayudar a fomentar prácticas sostenibles de uso del suelo y gestión del agua, aumentando la resiliencia de las comunidades frente a la variabilidad climática y asegurando la sostenibilidad de los recursos hídricos para futuras generaciones.

11. Contribuciones científicas

11.1 Sección 1: Publicaciones

Estado de la Publicación: Publicada.

Autores: **Saúl José García Santos** (Autor principal), Ricardo Sánchez Murillo, Tania María Peña Paz, Marcio Josué Chirinos Escobar, Junior Omar Hernández Ortiz, Edgar Josué Mejía Escobar, Lucia Ortega.

Revista: Science of the Total Environment

Título del Artículo: Water stable isotopes reveal a complex rainfall to groundwater connectivity in central Honduras

Fecha de Publicación/Aceptación/Envío: 20 de octubre, 2022

Resumen: The inter-mountainous region of central Honduras has been experiencing abrupt urban drinking water shortages during the last decade. Land use fragmentation and rainfall deficits have rapidly reduced surface water quality and quantity in this region. Here we present a 3-yr (2018–2020) tracer study within the headwaters of the Choluteca River basin (2949 km²). We sampled rainfall (weekly N = 156; daily N = 270), drilled wells (N = 166; up to ~300 m depth), boreholes (N = 70; ~4–12 m depth), and springs (N = 128) to assess the spatiotemporal connectivity between rainfall and mean groundwater recharge elevations (MREs). Clear W-shaped incursions characterized rainfall isotopic seasonality from the dry to the wet season. Air mass back trajectory analysis revealed three primary moisture sources: 73 % (east, Caribbean Sea), 17 % (southwest, Pacific Ocean), and 10 % (north; Gulf of Mexico). Groundwater sources exhibited a strong meteoric origin with evidence of secondary evaporation evolution, characterized by low d-excess values. MREs for the drilled wells ranged from 821 to 2018 m asl with a mean value of 1570 ± 150 m asl. Seasonal isotopic variability during dry-wet transitions and the influence of rapid infiltration limited the performance of the MRE method in springs and boreholes. MREs coincided primarily with coniferous forests, pasture, and crop areas, within regions of moderate to high transmissivity. These results are intended to guide the mapping and delineation of critical recharge areas in central Honduras to enhance municipal water regulations, effective environmental protection, and long-term conservation practices.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156941>

Estado de la Publicación: Publicada.

Autores: Ricardo Sánchez Murillo, Germain Esquivel Hernández, José L. Corrales-Salazar, Laura Castro Chacón, Ana M. Durán Quesada, Manuel Guerrero Hernández, Valeria Delgado, Javier Barberena, Katia Montenegro-Rayó, Heyddy Calderón, Carlos Chevez, Tania Peña Paz, **Saúl García Santos**, Pedro Ortiz Roque, Yaneth Alvarado Callejas, Laura Benegas, Antonio Hernández Antonio, Marcela Matamoros Ortega, Lucia Ortega, Stefan Terzer Wassmuth Ricardo Sánchez Murillo

Revista: Hydrological Processes

Título del Artículo: Tracer hydrology of the data-scarce and heterogeneous Central American Isthmus

Fecha de Publicación/Aceptación/Envío: 08 de abril, 2020

Resumen: Numerous socio-economic activities depend on the seasonal rainfall and groundwater recharge cycle across the Central American Isthmus. Population growth and unregulated land use changes resulted in extensive surface water pollution and a large dependency on groundwater resources. This work combines stable isotope variations in rainfall, surface water, and groundwater of Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, and Honduras to develop a regionalized rainfall isoscape, isotopic lapse rates, spatial–temporal isotopic variations, and air mass back trajectories determining potential mean recharge elevations, moisture circulation patterns, and surface water–groundwater interactions. Intra-seasonal rainfall modes resulted in two isotopically depleted incursions (W-shaped isotopic pattern) during the wet season and two enriched pulses during the mid-summer drought and the months of the strongest trade winds. Notable isotopic sub-cloud fractionation and near-surface secondary evaporation were identified as common denominators within the Central American Dry Corridor. Groundwater and surface water isotope ratios depicted the strong orographic separation into the Caribbean and Pacific domains, mainly induced by the governing moisture transport from the Caribbean Sea, complex rainfall producing systems across the N-S mountain range, and the subsequent mixing with local evapotranspiration, and, to a lesser degree, the eastern Pacific Ocean fluxes. Groundwater recharge was characterized by (a) depleted recharge in highland areas (72.3%), (b) rapid recharge via preferential flow paths (13.1%), and enriched recharge due to near-surface secondary fractionation (14.6%). Median recharge elevation ranged from 1,104 to 1,979 m a.s.l. These results are intended to enhance forest conservation practices, inform water protection regulations, and facilitate water security and sustainability planning in the Central American Isthmus.

DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.13758>

11.2 Sección 2: Congresos

Nombre del Congreso: Encuentro Bienal de Investigación y Posgrado Centroamérica y el Caribe

Autor(es): Autores: **Saúl José García Santos** (Autor principal), Ricardo Sánchez Murillo, Tania María Peña Paz, Marcio Josué Chirinos Escobar, Junior Omar Hernández Ortiz, Edgar Josué Mejía Escobar, Lucia Ortega

Título de la Ponencia/Póster: 17 de noviembre, 2023

Fecha del Evento: Proporciona la fecha completa (día, mes y año) en que se llevó a cabo el congreso o la presentación.

Resumen: La región intermontañosa del centro de Honduras ha estado experimentando una abrupta escasez de agua potable urbana durante la última década. La fragmentación del uso de la tierra y los déficits de precipitaciones han reducido rápidamente la calidad y cantidad del agua superficial en esta región. Aquí presentamos un estudio de seguimiento de 3 años (2018–2020) dentro de la cuenca alta del Río Choluteca (2949 km²). Tomamos muestras de lluvia (N = 156 por semana; N = 270 por día), pozos perforados (N = 166; hasta ~300 m de profundidad), perforaciones (N = 70; ~4–12 m de profundidad) y manantiales (N = 128) para evaluar la conectividad espaciotemporal entre la lluvia y las elevaciones medias de recarga de agua subterránea (EMR). Incursiones claras en forma de W caracterizaron la estacionalidad isotópica de la lluvia desde la estación seca hasta la húmeda. El análisis de la trayectoria de retorno de la masa de aire reveló tres fuentes primarias de humedad: 73 % (este, Mar Caribe), 17 % (suroeste, Océano Pacífico) y 10 % (norte; Golfo de México). Las fuentes de agua subterránea exhibieron un fuerte origen meteórico con evidencia de evolución de evaporación secundaria, caracterizada por bajos valores de exceso de d. Los EMR para los pozos perforados oscilaron entre 821 y 2018 msnm con un valor medio de 1570 ± 150 msnm.

12. Bibliografía

- Adrews, J. N., & Kay, R. L. (1982). Natural production of tritium in permeable rocks. *Nature*, 361-363. doi:10.1038/298361a0
- Alfaro, E. J. (1990). Análisis de las Anomalías en el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y su relación con los océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *TOPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS*, 1-13.
- Alfaro, E., Hidalgo, H., & Pérez-Briceño, P. (2017). Mapping environmental and socioeconomic impacts of hydrometeorological hazards across Central America. Study case: Honduras. *Revistas de Política Económica y Desarrollo Sostenible*, 20-43.
- Ampuero, A. G. (2016). *Evaluación de los indicadores isotópicos en las precipitaciones de la cuenca Alto Mayo para su aplicación en la hidrología*. Lima, Perú.
- Arellano-Monterrosas, J. L., & Ruiz, L. E. (04 de Diciembre de 2017). Evaluación y tendencias de los servicios ecosistémicos hidrológicos de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*, 2448-7279. doi:10.14350/rig.59467
- Argeñal, J. (2012). *Priorización de Áreas para la Inversión en Conservación de Recursos Naturales. "Modelo Retención de Sedimentación"*. Tegucigalpa: UNAH. Obtenido de https://acchonduras.files.wordpress.com/2014/07/sistematizacion_final_jaau.pdf
- Argeñal, J., & Urtecho, G. (2013). *Modelación Hidrológica para la Sub cuenca de Río Guacerique por medio de la Herramienta ArcSwat, bajo escenarios de cambios en el uso de suelos y precipitación*. Tegucigalpa: UNAH. Obtenido de <https://acchonduras.files.wordpress.com/2014/08/modelac3b3n-hidro3b3gica-para-la-sub-cuenca-de-rc3ado-guacerique-por-medio-de-la-herramienta-arcsWat.pdf>
- Arroyo, I., Bravo, L. C., Llinás, H., & Muñoz, F. L. (2014). Distribuciones Poisson y Gamma: Una Discreta y Continua Relación. *Prospect*, 99-107.
- Babbie, E. R. (2021). *The Practice of Social*. 15th Edición, Cengage Learning.
- Barberi, F., Carapezza, M. L., Cioni, R., Lelli, M., Menichini, M., Ranaldi, M., . . . Tarchini, L. (2013). New geochemical investigations in Platanares and Azacualpa geothermal sites (Honduras). *Journal of*

- BID. (2015). *Plan de Acción Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles de Tegucigalpa y Comayagua*. Tegucigalpa: BID. Obtenido de <https://webimages.iadb.org/PDF/Plan+de+Accion++Tegucigalpa.pdf>
- Bony, S., Risi, C., & Vimeux, F. (2008). Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation and water vapor in the tropics: 1. Radiative-convective equilibrium and Tropical Ocean–Global Atmosphere–Coupled Ocean–Atmosphere Response Experiment (TOGA-COARE). *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2008JD009942
- Braun, A., Garcia-Urquia, E. L., Momcada, R., & Yamaguishi, H. (2018). Landslide Susceptibility Mapping in Tegucigalpa, Honduras, Using Data Mining Methods. *IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018. Vol. 1. Springer*, 207-215. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-93124-1_25.
- Cabrera, A., Blarasin, M., & Maldonado, L. (2014). *Edad del agua subterránea*. Argentina: UniRío. doi:ISBN 978-987-688-106-7
- Calzada, V., & Cerecetto, H. (2019). *Una introducción a la Química Nuclear*. Montevideo: Universidad de la República.
- Cardona, J. P., Leal, J. J., & Ustariz, J. E. (2020). Modelado matemático de caja blanca y negra en educación en ingeniería. *Formación Universitaria*, 105-118. doi:10.4067/S0718-50062020000600105
- Clark, I., & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York: Lewis Publishers.
- Cole, J. E., Rind, D., Webb, R. S., Jouzel, J., & Healy, R. (1999). Climatic controls on interannual variability of precipitation $\delta^{18}\text{O}$: Simulated influence of temperature, precipitation amount, and vapor source region. *Journal of Geophysical Research*, 14223-14235. doi:10.1029/1999JD900182
- Cook, P., & Bohlke, J. (2000). Determining Timescales for Groundwater Flow and Solute Transport. *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*, 1-30. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4557-6_1
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *American Association for the Advancement of Science*, 1702-1703.

- Craig, H., & Gordon, L. (1965). Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: Tongiorgi, E. (Ed.), *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleo temperatures*. *Consiglio Nazionale delle Ricerche Laboratoria di – Pisa, Spoleto*, 9-130.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea*. Barcelona, España: Ediciones Omega S. A.
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16, 438-468.
- De Vries, J. T., & Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10, 5-17. doi:DOI 10.1007/s10040-001-0171-7
- Draxler, R. R., & Glenn, D. R. (2003). *Draxler, R. R., & Rolph, G. D. (2003). HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model access*. Silver Spring: NOAA Air Resources Laboratory. Obtenido de <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>
- Draxler, R., & Rolph, G. (2015). *NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system*, *Bull.* Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>^{this link opens in a new window}
- Durán-Quesada, A., Gimeno, L., & Amador, J. (2017). Role of moisture transport for Central American precipitation. *Earth System Dynamics*, 147-161.
- FCIHS, F. C. (2009). *Hidrogeología*. Barcelona: Artes Gráficas Torres .
- Fernández, C. d. (2012). *Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales*. Moa, Holguín, Cuba: Editorial Universitaria de Moa.
- Flick, U. (2014). *Introducing Research Methodology: A Beginner's Guide to Doing a Research Project*. . Reino Unido: SAGE Publications.
- Fricke, H. C., & O'Neil, J. R. (1999). The correlation between 18O/16O ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time. *Earth and Planetary Science Letters*, 181-196. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X99001053>
- Garrancho, L., & Tocho, C. N. (2020). Determinación de coeficiente de almacenamiento o porosidad drenable mediante mediciones de gravedad in situ. *Agua subterránea recurso estratégico*.
- Gat, J. R., Mook, W. G., & Meijer, H. A. (2001). *Environmental isotopes in the hydrological cycle, principles and applications. Volume II: Atmospheric water*. Vienna: IAEA. Recuperado el 7 de marzo de 2021,

de http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/global_cycle/Environmental%20Isotopes%20in%20the%20Hydrological%20Cycle%20Vol%202.pdf

Gleeson, T., Alley, W. M., Allen, D. M., Sophocleus, M. A., Zhou, Y., Taniguchi, M., & VanderSteen, J. (2012). Towards sustainable groundwater use: setting long-term goals, backcasting, and managing adaptively. *Ground Water*, 16-26. doi:10.1111/j.1745-6584.2011.00825.x

GNIP, R. M. (24 de Junio de 2019). *WISER – Water Isotope System for data analysis, visualization and Electronic Retrieval*. Obtenido de <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>

Gomez-Hernández, M. (2014). *Análisis de las fuentes de humedad en la cuenca mediterránea en el periodo 1980-2000*. Madrid.

Gouirand, I., Moron, V., & Sing, B. (2020). Seasonal atmospheric transitions in the Caribbean basin and Central America. *Climate Dynamics*, 1809-1828.

Gröning, M., Lutz, H., Roller-Lutz, Z., Kralik, M., Gourcy, L., & Pölsenstein, L. (2012). A simple rain collector preventing water re-evaporation for ^{18}O and ^2H analysis of cumulative precipitation samples. *Journal of Hydrology*, 195-200.

Grootes, P. M. (2013). Interpreting Continental Oxygen Isotope Records. *Geophysical Monograph Series*, 37-46. doi:10.1029/GM078p0037

GWP, G. W. (2016). *Gestión integrada de los recursos hídricos*. AEPres.

IAEA. (1970). *Isotopes in Hydrology*. Obtenido de www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/025/45025950.pdf

ICF, I. d. (01 de Junio de 2023). *Geoportal del Sector Forestal de Honduras*. Obtenido de <https://geoportal.icf.gob.hn/geoportal/main>

IGME. (2002). *Los sistemas acuíferos*. Obtenido de Instituto Geológico y Minero de España: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro20/pdf/lib20/los_s_a_1.pdf

IHCIT-UNAH. (2012). *Estudio hidrogeoquímico de la parte alta de la cuenca del Río Choluteca*. Tegucigalpa, Honduras.: Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra.

- Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., . . . Emmer, A. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 364-369. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1822-y>
- INE, I. N. (20 de Febrero de 2023). *INE - Instituto Nacional de Estadísticas*. Obtenido de [ine.gob.hn: https://www.ine.gob.hn/V3/baseine/](https://www.ine.gob.hn/V3/baseine/)
- Instituto Nacional de Estadística. (2013). *XVII Censo de población y VI de vivienda 2013*. Tegucigalpa. Recuperado el 22 de Marzo de 2020, de <https://www.ine.gob.hn/V3/imag-doc/2018/08/22-Francisco-Moraz%C3%A1n-Santa-Ana.pdf>
- Jasechko, S., & Taylor, R. (2015). Intensive rainfall recharges tropical groundwaters. *Environmental Research*, 10(12), 124015. doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124015>.
- JICA. (2002). *Informe de apoyo hidrogeológico: Estudio de control de inundaciones y prevención de deslizamientos de tierra en el área metropolitana de Tegucigalpa*. Tegucigalpa.
- JICA. (2021). *Estudio de recolección de datos sobre abastecimiento de agua en Tegucigalpa*. Tegucigalpa: Agencia de Cooperación Internacional del Japón.
- Jiménez-Martínez, J., & Custodio, E. (2008). El exceso de deuterio en la lluvia y en la recarga a los acuíferos en el área circum-mediterránea y en la costamediterránea española. *Boletín Geológico y Minero*, 119(2), 21-32. Obtenido de http://www.igme.es/boletin/2008/119_1_2008/ARTICULO%202.pdf
- Kazemi, G. A., Lehr, J. H., & Perrochet, P. (2006). *Groundwater age*. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc.
- Kendall, C., & McDonnell, J. J. (2012). *Isotope tracer in catchment hydrology*. Elsevier.
- Kopec, M., & Zarzycki, J. (2010). Species diversity of submontane grasslands: effects of topographic and soil factors. *POLISH JOURNAL OF ECOLOGY*, 285-295.
- Krásný, J. (2003). Hydraulic parameter spatial distribution in distinct hydrogeologic environments. *Boletín Geología y Minas*, 171-182. doi:ISSN: 0366-0176.
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *ournal of the American Statistical Association*, 583-621. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>

- Lachniet, M. S. (2009). Sea surface temperature control on the stable isotopic composition of rainfall in Panama. *Geophysical Research Letters*. doi:10.1029/2008GL036625
- Lambán, J., & Custodio, E. (1999). Estudio isotópico ambiental (O18 - D) en a Unidad Anoia: Principales zonas de recarga e implicaciones en el funcionamiento hidrogeológico del sistema. *Ingeniería del agua*, 139-150. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/2863/62article2.pdf?sequence=1>
- Lee, M. D. (2009). Watershed Protection Challenges in Rapidly Urbanizing Regions: The Case of Tegucigalpa, Honduras. *Water International*, 214-221. doi:<https://doi.org/10.1080/02508060008686821>
- Ley General de Aguas. (14 de Diciembre de 2009). *Congreso Nacional de honduras*. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/ley-general-de-aguas-2009.pdf
- Lotti. (1987). *Proyecto de incorporación de aguas subterráneas y de las fuentes de la montaña El Chile para el abastecimiento hídrico de Tegucigalpa*. . Tegucigalpa.
- Lucas, L. L., & Unterweger, M. P. (2000). Comprehensive Review and Critical Evaluation of the Half-Life of Tritium. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 541-549. doi:10.6028/jres.105.043
- Magaña, V., Amador, J., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Climate*, 1577-1588.
- Managave, S. R., Jani, R. A., Narayana, R. T., Sunilkumar, K., Satheeshkumar, S., & Ramesh, R. (2016). Intra-event isotope and raindrop size data of tropical rain reveal effects concealed by event averaged data. *Springer link*, 981-987. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-015-2884-7>
- Marshall, J. S. (2007). Marshall, J. S. (20The geomorphology and physiographic provinces of Central America. *Central America: geology, resources and hazards*, 75-121.
- Martí, J. M., & Armegol, C. C. (2022). Morfología urbana y ciclo del agua en la metrópolis contemporánea. Potencial de las condiciones hidrográficas en fragmentos del Área Metropolitana de Barcelona. *VI Seminario ISUF-H*, (págs. 40-58). doi:10.20868/ciur.2022.142.4886
- McBirney, A., & Williams, H. (1969). Geology And Petrology of the Galapagos Islands. *Geological Society of America*., Vol. 118.

- McGuire, K. J., & McDonnell, J. J. (2006). A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology*, 543-563. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.04.020
- Molina-Garza, R. S., van Hinsbergen, D. J., Rogers, R. D., Ganerod, M., & Deers, M. J. (2012). The Padre Miguel Ignimbrite Suite, central Honduras: Paleomagnetism, geochronology, and tectonic implications. *Tectonophysics*, 144-157. doi:https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.013
- Mook, W. G. (2002). *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico*. Madrid: IGME. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/73748243/Isotopos-Ambient-Ales-Del-Ciclo-Hidrologico>
- Moserrate, F., Valencia, J., Leverón, S., Cartagena, C., & Pineda, J. (2017). *Generación de los mapas oficiales de cuencas, subcuencas y microcuencas para el territorio hondureño (Memoria técnica)*. Tegucigalpa: United States Agency for International Development (USAID); Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Dirección General de Recursos Hídricos (DGRH).
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). *Cartilla Técnica - Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. LIMA, Perú: GWP. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
- Ortega, L., & Gil, L. (20 de Septiembre de 2019). *Panorama de la hidrología isotópica*. Obtenido de Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA): <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/panorama-de-la-hidrologia-isotopica>
- Pan, Y., Zeng, N., Mariotti, A., Wang, H., Kumar, A., Lobato, R., & Jha, B. (2018). Covariability of Central America/Mexico winter precipitation and tropical sea surface temperatures. *Climate Dynamics*, 4335-4346. doi:https://doi.org/10.1007/s00382-017-3878-4
- Pérez, L., Rodríguez, J., Brito, E., & Sánchez, M. (2003). Balance Hídrico en Honduras. *Revista Digital del Cedex*, 131.
- Pérez-Quezadas, J., Cortés Silva, A., Inguaggiato, S., Salas-Ortega, M., Cervantes-Pérez, J., & Heiweil, V. (2015). Meteoric isotopic gradient on the windward side of the Sierra Madre Oriental area, Veracruz - Mexico. *Geofísica Internacional*, 267-276. doi:https://doi.org/10.1016/j.gi.2015.04.021.

- Poage, M. A., & Chamberlain, p. C. (2001). Empirical Relationships Between Elevation and the Stable Isotope Composition of Precipitation and Surface Waters: Considerations for Studies of Paleoelevation Change. *American Journal of Science*, 1-15. doi:<https://doi.org/10.2475/ajs.301.1.1>
- Ricardo, S.-M., & Birkel, C. (2016). Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. *AGU Advancing Earth and Space Sciences*, 5060-5069. doi:<https://doi.org/10.1002/2016GL068888>
- Rogers, R., & O'Conner, E. (1993). *Mapa Geológico de Honduras: Hoja de Tegucigalpa, Geográfico Nacional 1:50000*. Tegucigalpa, Honduras: Instituto Geográfico Nacioanl.
- Rogers, R., Mann, P., Emmet, P., & Venable, M. (2007). Colon fold-thrust belt of Honduras: Evidence for late Cretaceous collision between the continental Chortis block. *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate in Northern Central America, Geological Society of America Special Paper*, 129-150.
- Rojas, A., Zizumbo, L., Hernández, O., & Arriaga, E. (2018). Convivencialidad con el agua y metrópolis. Una relación antagonica. *Bajo el Volcán*, 61-79.
- Rolph, G., Stein, A., & Stunder, B. (2017). Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. *Environmental Modelling & Software*, 210-228. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>
- Romero, ..., Simón, M. A., & Larena, P. (2000). *Evaluación de los niveles de tritio ambiental en aire y lluvia en el áreas de Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)*. Madrid.
- Rozanski, K. L., Araguás-Araguás, L., & Conginatini, R. (1993). Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. In: Swart, P.K., Lohmann, K.C., Mckenzie, J. and Savin, S., Eds., *Climate Change in Continental Isotopic Records. Geophysical Monograph Series*, 1-36. Obtenido de [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?Referen ceID=1894546](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?Referen ceID=1894546)
- Salamalikis, V., Argiriou, A. A., & Dotsika, E. (2016). Isotopic modeling of the sub-cloud evaporation effect in precipitation. *Science of The Total Environment*, 1059-1072. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.072>

- Sánchez-Murillo, R., & Birkel, C. (2016). Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. *Geophysical Research Letters*, 5060-5069. doi:<https://doi.org/10.1002/2016GL068888>
- Sánchez-Murillo, R., Durán-Quesada, A. M., Birkel, C., Esquivel-Hernández, G., & Boll, J. (2016). Tropical precipitation anomalies and d-excess evolution during El Niño 2014-16. *Hydrological Processes*, 956-967. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.11088>
- Sánchez-Murillo, R., Durán-Quesada, A. M., Esquivel-Hernández, G., Rojas-Cantillo, D., Birkel, C., Welsh, K., & al., e. (2019). Deciphering key processes controlling rainfall isotopic variability during extreme tropical cyclones. *Nature Communications*, 10, 4221. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12062-3>
- Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, Corrales-Salazar, J. I., Castro-Chacón, L., Duran-Quesada, A. M., Guerrero-Hernández, M., & Otros, y. (2020). Tracer hydrology of the data-scarce and heterogeneous Central American Isthmus. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2660-2675. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.13758>
- Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, G., Birkel, C., Correa, A., Welsh, k., Durán-Quesada, A. M., . . . Poca, M. (2020). Tracing Water Sources and Fluxes in a Dynamic Tropical Environment: From Observations to Modeling. *Frontiers*, Volumen 8. doi:<https://doi.org/10.3389/feart.2020.571477>
- Sanjuán, M. (2012). *Guía para la planificación municipal en agua y saneamiento*. San Salvador: Alianza por el Agua. Obtenido de <http://conasa.hn/wp-content/uploads/2018/06/GuiaPlanificaci%C3%B3n-AXA.pdf>
- Seeger, S., & Weiler, M. (2014). Lumped convolution integral models revisited: on the meaningfulness of inter catchment comparisons. *Hydrology Earth System Sciences*. doi:10.5194/hessd-11-6753-2014
- Segerer, C. D., & Villodas, R. (2006). *Hidrología I: Las Precipitaciones*. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo.
- SERNA. (2010). *Política Hídrica Nacional*. Tegucigalpa.
- Sharp, S. (2017). *Principles of Stable Isotope Geochemistry* (Segunda ed.). Obtenido de https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=unm_oer

- Small, R., De Szoeker, S., & Xie, S. (2007). The Central American midsummer drought: regional aspects and large-scale forcing. *Journal of Climate*, 4853-4873.
- Soderberg, K., Good, S. P., O'Conor, M., Wang, L., Ryan, K., & Caylor, K. K. (2013). Using atmospheric trajectories to model the isotopic composition of rainfall in central Kenya. *Ecosphere*, 1-18. doi:<https://doi.org/10.1890/ES12-00160.1>
- Soler, A., Otero, N., Rossell, M., Carrey, R., & Domenech, C. (Octubre de 2015). *Isótopos en la molécula de agua*. Obtenido de Departamento de Minerología Petrología y Geología, Universidad de Barcelona: http://www.ub.edu/minegeo/images/IL3/Tema2_Link2_Isotopos_agua.pdf
- Sousa, V. D., Driessnack, M., & Costa, I. A. (2007). Revisión de diseños de investigación resaltantes para enfermería. Parte 1: diseños de investigación cuantitativa. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*. doi:<https://doi.org/10.1590/S0104-11692007000300022>
- Spracklen, D. V., Arnold, S. R., & Taylor, C. M. (2012). Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, 282-285.
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *American Meteorological Society*, 2059-2077. doi:<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Stella, J. M., & Warner, G. S. (2020). Modelando una caja-negra aplicada a la hidrología. *Tecnología y ciencias del agua*. doi:10.24850/j-tyca-2018-01-07
- Tejeda-Martínez, A. (2018). *La humedad en la atmósfera: Bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Colima, México: Universidad de Colima. Obtenido de http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/La-humedad-en-la-atmosfera_466.pdf
- Terzer-Wassmuth, S., Araguás-Araguás, L. J., Copia, L., & Wassenaar, L. I. (2022). High spatial resolution prediction of tritium (^3H) in contemporary global precipitation. *Nature*, Rep 12, 10271. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-022-14227-5>
- Todd, D., & Mays, L. (2005). *Groundwater Hydrology*. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc.
- Troncoso, R. d. (2021). *La Distribución Gamma*. Galicia, España: Universidad de Santiago de Compostela.

- USGS. (7 de Octubre de 2019). *El Ciclo Natural del Agua - The Natural Water Cycle, Spanish*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/media/images/el-ciclo-natural-del-agua-natural-water-cycle-spanish>
- Vélez, M., & Rhenals, R. L. (2008). *DETERMINACIÓN DE LA RECARGA CON ISÓTOPOS AMBIENTALES EN LOS ACUÍFEROS DE SANTA FE DE ANTIOQUIA*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Vera, C., & Camilloni, I. (2007). *Ciencias Naturales: Ciclo hidrológico*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Vignola, R., Proctor, A., McDaniels, T., Diaz Briones, A. A., Rafanoharana, S., Locatelli, B., & Russell, A. J. (15 de 08 de 2023). *Honduras: Changing Land Use Today for a More Resilient Tomorrow, 2015*. Obtenido de <https://agritrop.cirad.fr/584526/1/Vignola%202015%20Honduras%20-%20Changing%20Land%20Use%20Today%20for%20a%20More%20Resilient%20Tomorrow%20-%20PROFOR.pdf>
- Villón-Béar, M. (2004). *Hidrología*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Viviroli, D., Durr, H. H., Messereli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*. doi:<https://doi.org/10.1029/2006WR005653>
- Wassenaar, L., Van Wilgenburg, S., Larson, K., & Hobson, K. (2009). A groundwater isoscape (δD , $\delta^{18}O$) for Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 123-136. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.01.001>
- Welsh, K., & Sánchez-Murillo, R. (2020). Rainfall, groundwater, and surface water isotope data from extreme tropical cyclones (2016-2019) within the Caribbean Sea and Atlantic Ocean basins. *Data in Brief*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105633>
- Westerberg, I., Guerrero, J., Beven, K., Seibert, J., Halldin, S., Lundin, L., & Xu, C. (2009). Water-balance uncertainty in Honduras: a limits-of-acceptability approach to model evaluation using a time-variant rating curve. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 907.
- Williams, H. a. (1969). Volcanic History of Honduras. *University of California, Publications in Geological Sciences*, 85.
- Williams, H., McBirney, A., & Aoki, K. (1969). Volcanic History of Honduras. *University of*, 101.

- Yamanaca, T., & Yamada, Y. (2017). Regional Assessment of Recharge Elevation of Tap Water Sources Using the Isoscape Approach. *BioOne*, 198-205. doi:<https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00066.1>
- Yun, K.-S., Lee, J.-Y., Timmermann, A., Karl, S., Stuecker, M. F., Fyfe, J. C., & Chung, E.-S. (2021). Increasing ENSO–rainfall variability due to changes in future tropical temperature–rainfall relationship. *Communications earth and environment*, 43.
- Ziegler, B., Muzy, A., & Kofman, E. (2019). Theory of Modeling and Simulation. *Academic Press*, 29-35.

Meteorology File

Meteorology: Archived GDAS1
Source Location: Lat: 14.087714 Lon: -87.162577

Choose an archived meteorological file

Archive File:

[Next>>](#)

Model Run Details

[Request trajectory](#)

The archived data file (GDAS1) has data beginning at [02/29/24 0000 UTC](#).

Model Parameters

Trajectory direction:	<input type="radio"/> Forward				More info
	<input checked="" type="radio"/> Backward (Change the default start time!)				
Vertical Motion:	<input checked="" type="radio"/> Model vertical velocity				More info
	<input type="radio"/> Isobaric				
	<input type="radio"/> Isentropic				More info
Start time (UTC): Current time: 09:48	year: <input type="text" value="24"/>	month: <input type="text" value="02"/>	day: <input type="text" value="29"/>	hour: <input type="text" value="9"/>	More info
Total run time (hours):	<input type="text" value="48"/>				More info
Start a new trajectory every:	<input type="text" value="0"/> hrs	Maximum number of trajectories:	<input type="text" value="48"/>		More info
Start 1 latitude (degrees):	<input type="text" value="14.087714"/>				More info
Start 1 longitude (degrees):	<input type="text" value="-87.162577"/>				More info
Start 2 latitude (degrees):	<input type="text"/>				
Start 2 longitude (degrees):	<input type="text"/>				
Start 3 latitude (degrees):	<input type="text"/>				
Start 3 longitude (degrees):	<input type="text"/>				
Automatic mid-boundary layer height? Will override selections below.	<input type="radio"/> Yes	<input checked="" type="radio"/> No			More info
Level 1 height:	<input type="text" value="800"/>	<input checked="" type="radio"/> meters AGL	<input type="radio"/> meters AMSL		More info
Level 2 height:	<input type="text" value="0"/>				
Level 3 height:	<input type="text" value="0"/>				

Display Options

GIS output of contours? None Google Earth (kmz) GIS Shapefile [More info](#) ▶

The following options apply only to the GIF, PDF, and PS results (not Google Earth)

Plot resolution (dpi): [More info](#) ▶

Zoom factor: [More info](#) ▶

Plot projection: Default Polar Lambert Mercator [More info](#) ▶

Vertical plot height units: Pressure Meters AGL Theta [More info](#) ▶

Label Interval: No labels 1 hour 6 hours 12 hours 24 hours [More info](#) ▶

Plot color trajectories? Yes No

Use same colors for each source location? Yes No [More info](#) ▶

Plot source location symbol? Yes No

Distance circle overlay: None Auto [More info](#) ▶

U.S. county borders? Yes No [More info](#) ▶

Postscript file? Yes No [More info](#) ▶

PDF file? Yes No

Plot meteorological field along trajectory? Yes No [More info](#) ▶

Note: Only choose one meteorological variable from below to plot

Dump meteorological data along trajectory: Terrain Height (m) Potential Temperature (K) Ambient Temperature (K) Rainfall (mm per hr) Mixed Layer Depth (m) Relative Humidity (%) Downward Solar Radiation Flux (W/m**2) [More info](#) ▶

[Request trajectory \(only press once!\)](#)

HYSPLIT MODEL RESULTS FOR JOB NUMBER 18766

Model Status: Fri Mar 22 05:51:02 EDT 2024
The model and graphics are now complete.
Finished generating graphics for job 18766.
Creating traj PDF file
Complete Trajplot

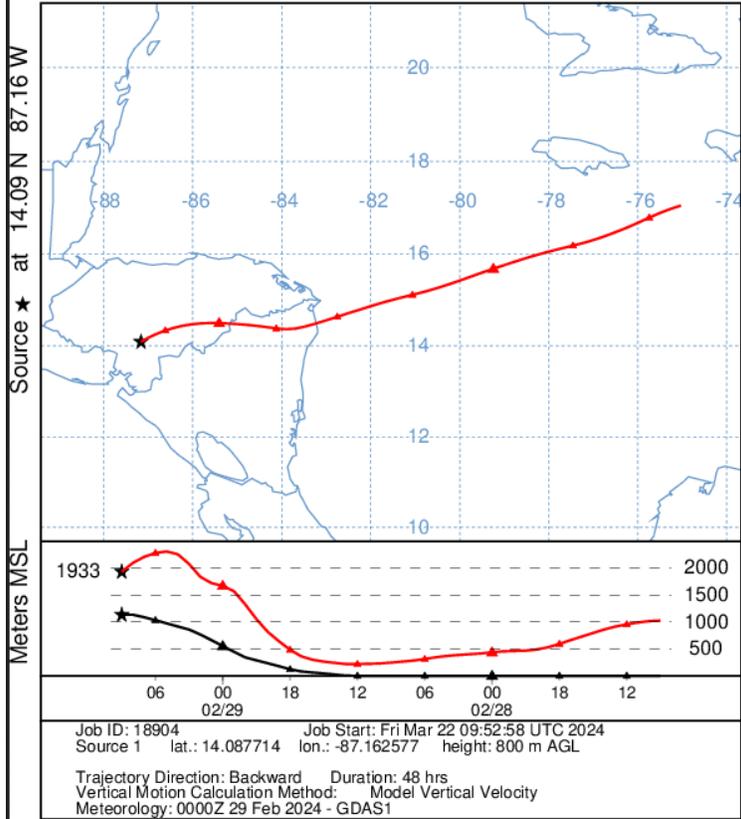
RESULTS	Click on text link to view images in a new window.	
	GIF Plots	PDF Plots
Trajectories	.gif	.pdf

- [Modify the trajectory plot without rerunning the model.](#)
- [Trajectory endpoints file.](#)
 - [Trajectory endpoints format help.](#)
- [HYSPLIT SETUP file.](#)
- [HYSPLIT CONTROL file.](#)
- [HYSPLIT MESSAGE \(diagnostics\) file.](#)
 - [MESSAGE file format help \(pdf\)](#)

[Return to main menu \(keep user inputs\)](#)

[Return to main menu \(clear user inputs\)](#)

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectory ending at 0900 UTC 29 Feb 24
 GDAS Meteorological Data



13.2 Código en lenguaje R del modelo de flujo base-tiempo de tránsito de aguas subterráneas

```
### Tritium-based simple lumped convolution integral (gamma distribution
transfer function)
### baseflow/groundwater transit time model for Central America
## IAEA workshop 27-29 July 2021
# Christian Birkel, OACG-University of Costa Rica:
christian.birkel@ucr.ac.cr

##### load required packages and functions, if necessary
install.packages()
require(FME) # package used for calibration and uncertainty estimations
library(tidyverse) # package used for data manipulation
require(gridExtra) # package used for graphics with ggplot2

source("Gamma_TTDdecay_CALtest.r") # TT model code called for execution

#### read input function with monthly precipitation in mm (P), tritium in
rainfall in tritium units (P_TU), tritium in streamflow (Q_TU) under baseflow
conditions or groundwater samples
inp <- read.csv("3H_CA_inp.csv",na.strings="") # read input into
dataframe
names(inp) <-
c("Id", "Date", "P_CR", "P_TU_CR", "Q_TU_CR", "P_ELS", "P_TU_ELS", "Q_TU_ELS", "P", "P_TU", "Q_TU",
"P_TU_NIC", "Q_TU_NIC", "P_PAN", "P_TU_PAN", "Q_TU_PAN")
# define column names for direct use in model code
attach(inp, warn.conflicts = F)

### model application
parRange<-data.frame(min=c(0.01,1),max=c(3,1000)) # specify parameter
ranges from min to max for alpha and beta parameters of the gamma df
rownames(parRange) <- c("a", "b") # parameter names, needs to be consistent
with your model and names

LH<-Latinhyper(parRange,100000) # Latin Hypercube MC sampling
pairs(Latinhyper(parRange, 1000), main = "Latin hypercube") # check this in
a pairwise matrix plot

Q_DE <- function(pa){GM(a=pa[1], b=pa[2])} # call and execute gamma model

Modelsim <- sensRange(func = Q_DE, parInput = LH, map=NULL,num=100000)
### can directly use the matrix of parameters in the function "sensRange" that
applies the model "Q_DE" to calculate performance measures or in simulation...

write.csv(data.frame(Modelsim), file = "GMout_Hon.csv") # write model
output

# analyze results
inpR <- read.csv("GMout_Hon.csv",na.strings="") # read model output
into dataframe
head(inpR) # view first 5 rows of data frame
names(inpR) <- c("Id", "a", "b", "MAE1", "gmtt1") # define column
names for direct use in model code
attach(inpR, warn.conflicts = F)

summary(inpR) # generate summary statistics
```

Ilustración 10 Código principal de modelo de flujo base/tiempo de tránsito de aguas subterráneas.

Fuente: Proyecto RLA7020: Integración de la hidrología isotópica en la evaluación integral de los recursos hídricos, OIEA, 2021.

```

GM <- function (a = 0.5, b = 40) {

  nrun <- nrow(inp)
  Din <- rep(0, nrun)
  Dsto <- rep(0, nrun)
  Vsto <- rep(0, nrun)
  Peff <- rep(0, nrun)
  Dsim <- rep(0, nrun)
  gmtt <- a * b          # MTT for gamma df
  half_life <- 12.32

  gpdf <- dgamma (1:nrun, shape = a, scale = b)      # gamma distribution
over sampling period
  gpdf_decayed <- gpdf * exp(-log(2)/(half_life/(12*nrun)))      # gpdf with
tritium decay term
  ngpdf <- gpdf_decayed/sum(gpdf_decayed)           # normalize to sum = 1;
needed for convolution

  for (i in 1:nrun) {      # convolution integral...
    if (P[i] != 0) {      # calc tracer amount if there is input
P
      Din[i] <- P[i]*P_TU[i]          # amount (in case of tritium this
is TUs rather than a concentration)
      Drec <- Din[i] * sum(gpdf_decayed)      # recovery amount over time
series length
      Ddis <- Drec * ngpdf            # distribute recovery on gamma
distribution
      Dsto[i:nrun] <- Dsto[i:nrun] + Ddis[1:(nrun-(i-1))] # convolution
onto existing simulation series
      Vrec <- P[i] * sum(gpdf_decayed)
      Vdis <- Vrec * ngpdf
      Vsto[i:nrun] <- Vsto[i:nrun] + Vdis[1:(nrun-(i-1))]
      Dsim[i] <- Dsto[i] / Vsto[i]      # simulated tracer output
    }
  }
  Qtemp <- na.omit(data.frame(Dsim, Q_TU))
  MAE <- abs(Qtemp$Dsim - Qtemp$Q_TU)      # absolute error AE criterion
  return <- cbind(MAE, gmtt)              # return AE and MTT for post-
processing
}

```

Ilustración 11 Código de función de probabilidad gamma integrada al modelo de flujo base/tiempo de tránsito de aguas subterráneas.

Fuente: Proyecto RLA7020: Integración de la hidrología isotópica en la evaluación integral de los recursos hídricos, OIEA, 2021.

```

#####
# Retrieve precipitation data from
# NCEP monthly re-analysis precipitation data http://www.psl.noaa.gov/data/
gridded/data.ncep.reanalysis.derived.html
#####

library("ncdf4") # library needs to be
installed to read the netcdf file format

#data in prate.mon.mean.nc netcdf file
ncep.prec <- nc_open("NCEP_PCP_1948-2020.nc")
lons <- ncvar_get(ncep.prec,"lon")
lats <- ncvar_get(ncep.prec,"lat")
time <- ncvar_get(ncep.prec,"time")
prate <-ncvar_get(ncep.prec,"prate") #units Kg/m2/s # prate =
precipitation rate (mean monthly)
prate <- 2629800*prate #convert units
mm/month
#dimensions
prate.dim <- dim(prate)
Nx <- prate.dim[1]
Ny <- prate.dim[2]
Nt <- prate.dim[3]
#flip upside-down Netcdf files
prate <- prate[,Ny:1,]
lats <- rev(lats)

# select location
#####
longitude <- 87.1182 # range 0, 360 # careful here, longitude without
negative sign! This is only used for latitude (southern hemisphere)
latitude <- 14.1349 # range -90,90
#####
#find data closest grid cell
pdata1 <- prate[which.min((lons-longitude)^2),which.min((lats-latitude)^2),]
write.csv(data.frame(time, pdata1), file = "NCEP_LS6_PAN.csv") # write
output file

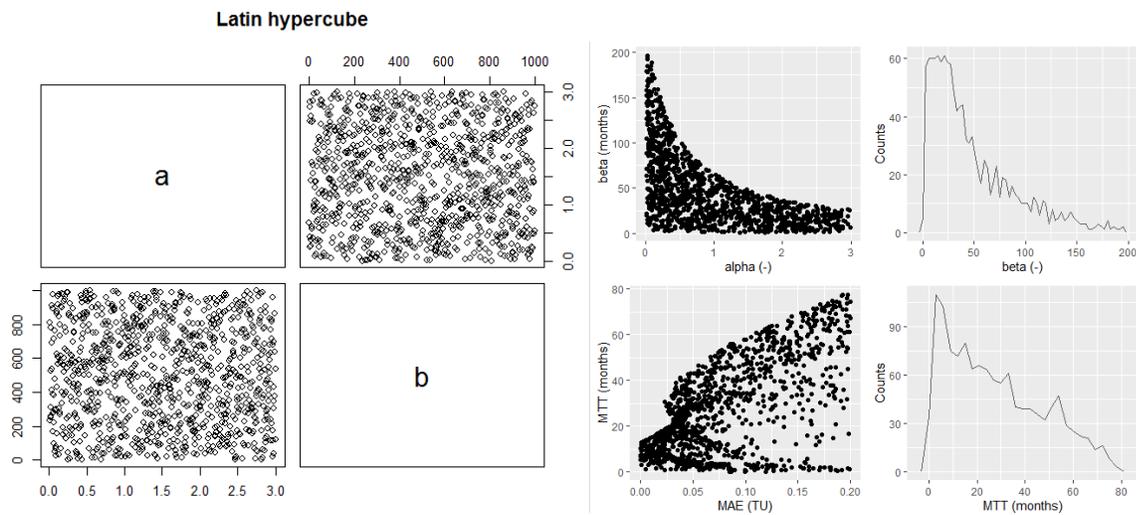
```

Ilustración 12 Código integrado al modelo para obtención de datos de precipitación y tritio como función de entrada.

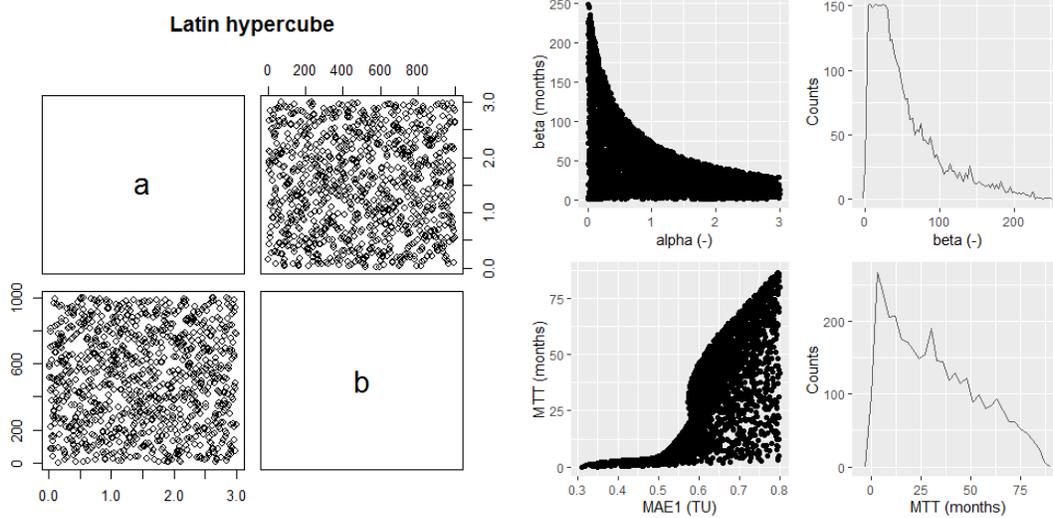
Fuente: Proyecto RLA7020: Integración de la hidrología isotópica en la evaluación integral de los recursos hídricos, OIEA, 2021

13.3 Corridas modelo de flujo base-tiempo de tránsito de aguas subterráneas

LT-LT-J

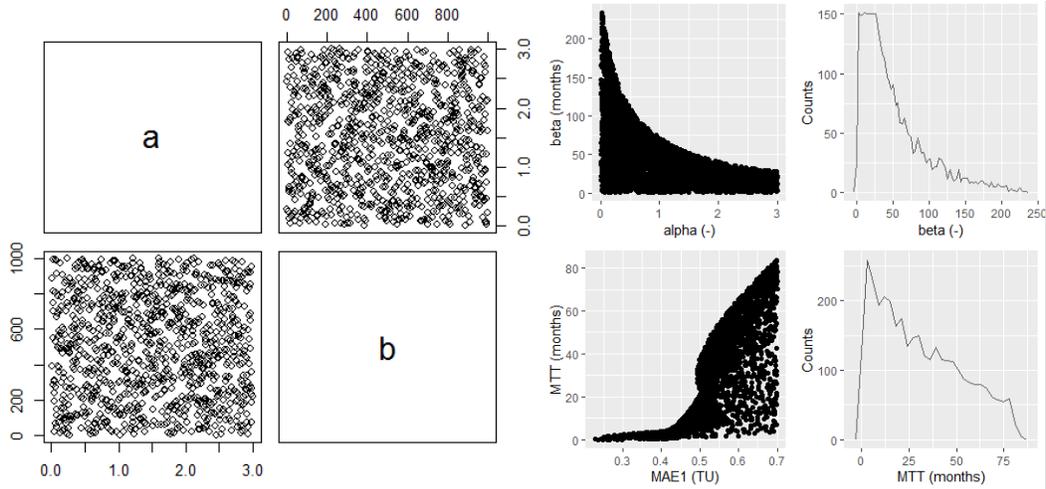


G-MA-03



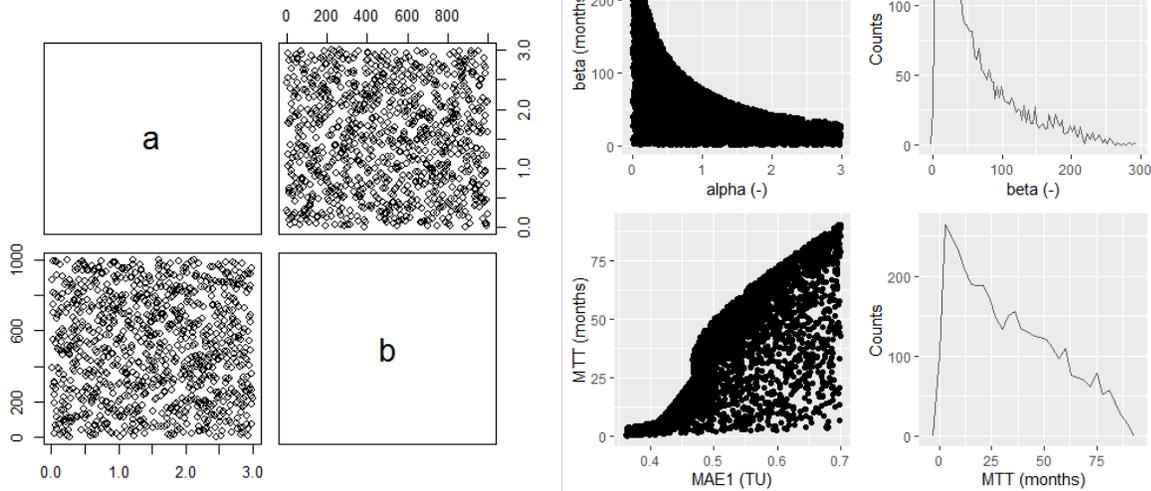
TGU-EN-01

Latin hypercube



Y-PP-06, Honduras

Latin hypercube



Latin hypercube

