



2-2025

BOLETÍN NACIONAL DE **HIDROLOGÍA** **ISOTÓPICA**

Presidencia de la República de Colombia

GUSTAVO FRANCISCO PETRO URREGO
Presidente de Colombia

FRANCIA MÁRQUEZ
Vicepresidenta de Colombia

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

IRENE VÉLEZ TORRES
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

EDITH BASTIDAS CALDERÓN
Viceministro de Políticas y Normalización Ambiental

LILIA TATIANA ROA AVENDAÑO
Viceministra de Ordenamiento Ambiental del Territorio

CARMEN STIBEL DUARTE TORRES
Directora de Cambio Climático y Gestión del riesgo

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

GHISLIANE ECHEVERRY PRIETO
Directora general

JUAN FERNANDO ACOSTA MIRKOW
Secretario general

ELIZABETH PATIÑO CORREA
Subdirectora de Estudios Ambientales

RAYMOND ALEXÁNDER JIMÉNEZ ARTEAGA
Subdirector de Ecosistemas e Información Ambiental

FABIO ANDRÉS BERNAL QUIROGA
Subdirector de Hidrología

DIANA CAROLINA RUEDA DIMATE
Subdirectora de Meteorología (E)

RODNEY POVEDA FERNANDEZ
Jefe de Oficina del Servicio de Pronóstico y Alertas

OLGA MARCELA VARGAS VALENZUELA
Jefe de Oficina Asesora de Planeación

WÍLMER ESPITIA MUÑOZ
Jefe de Oficina de Informática

GILBERTO ANTONIO RAMOS SUÁREZ
Jefe de Oficina Asesora Jurídica

ADRIANA MARÍA OCAMPO LOAIZA
Jefe de Oficina de Control Interno

MIGUEL ÁNGEL AYALA TOVAR
Coordinador del Grupo de Comunicaciones y Prensa

Subdirección de Hidrología Grupo de Evaluación Hidrológica

Autores

ANA MARÍA VESGA GÜIZA
Subdirección de Hidrología- Grupo de Evaluación.

Sistema de Gestión Integrado

ANA MILENA VELÁSQUEZ
Dirección de Asuntos Nucleares del SGC.

JIMMY ALEJANDRO MUÑOZ ROCHA
Dirección de Asuntos Nucleares del SGC.

Equipo Editorial Coordinación editorial

ANDRÉS FELIPE TAPIERO RÍOS

Grupo de Comunicaciones y

Prensa - Ideam

Edición y corrección de estilo

DIVA MARCELA PIAMBA TULCÁN

Grupo de Comunicaciones y

Prensa - Ideam

Diagramación y diseño editorial

NATALIA NORIEGA GÓMEZ

Diseñadora Convenio Ideam - Fonvida

Cítese como:

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam. (2025). Boletín nacional de hidrología isotópica. N.º 2 - 2025. Ideam.

ISSN (digital): 3028-600X

Publicación aprobada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

Distribución gratuita.

Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.



© Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.
Calle 25 D No. 96 B - 70 - Bogotá, D. C.
PBX: +57 (601) 352 7160
contacto@ideam.gov.co

CONTENIDO

01

Presentación.

PAG.07

02

Caracterización del estado actual del monitoreo isotópico a nivel regional.

PAG.08

03

Avances en investigación en el Servicio Geológico Colombiano para el estudio del agua por medio de herramientas isotópicas.

PAG.17

04

Uso de isótopos aplicados en el marco de la normatividad hídrica nacional.

PAG.25

Normas legales a nivel nacional que exigen el monitoreo de isótopos para evaluaciones de recursos hídricos

PAG.26

05

La presencia de tritio en la precipitación. Reporte de la estación isotópica de Bogotá

PAG.30

06

Referencias.

PAG.33

LISTA DE SIGLAS

- AMVA: Área Metropolitana del Valle de Aburrá
- ANLA: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
- Carder: Corporación Autónoma Regional de Risaralda
- Corpocaldas: Corporación Autónoma Regional de Caldas
- Corpochivor: Corporación Autónoma Regional de Chivor
- CRQ: Corporación Autónoma de Risaralda-
- DAN: Dirección de Asuntos Nucleares
- EIA: Estudios de Impacto Ambiental
- FH-PH: Fracturamiento Hidráulico Multietapa-Perforación Horizontal
- GIANC: Grupo de Investigación y Aplicaciones Nucleares y Geocronológicas
- GNIP: Red Global de Isótopos en la Precipitación
- LAIE: Laboratorio de Isótopos Estables en Agua Líquida
- MHC: Modelo Hidrogeológico Conceptual
- OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica
- PPII: Proyectos Piloto de Investigación Integral
- QNIP: Red Quindiana de Isótopos en la Precipitación
- SGC: Servicio Geológico Colombiano
- SIRH: Sistema de Información del Recurso Hídrico
- TdR: Términos de referencia
- UTP: Universidad Tecnológica de Pereira
- YNC: Yacimientos no convencionales



Foto tomada por: Paola Vasquez

Estación Vivero Torrecitas de Vivocuencia,
Manizales- Corppcaldas

Este boletín es una iniciativa del Grupo de Evaluación de la Subdirección de Hidrología, y tiene como propósito principal difundir la información técnica y científica relacionada con el avance de la hidrología isotópica en Colombia.

01

PRESENTACIÓN

En esta edición se presenta una caracterización del estado actual del monitoreo isotópico a nivel regional y se destacan las redes implementadas por diversas autoridades ambientales en distintas regiones del país.



Foto tomada por: Ana Milena Velázquez

Figura 1. Monitoreo de isótopos en Quebrada XXX- Paramo xxx-

Asimismo, se reportan avances importantes en la investigación liderada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), especialmente en el estudio del ciclo del agua mediante herramientas isotópicas, y se resalta el fortalecimiento del Laboratorio de Isótopos Estables en Agua Líquida (LAIE), adscrito al Grupo de Investigación y Aplicaciones Nucleares y Geocronológicas (GIANG) de la Dirección de Asuntos Nucleares (DAN), con la incorporación de nuevas capacidades analíticas.

Adicionalmente, se presentan estudios de caso que aplican estas herramientas en diferentes regiones del país, como Bogotá, donde se analiza la variación isotópica de la precipitación ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ y d-exceso) junto con datos climáticos. Otros proyectos se desarrollan en regiones como el río Mocoa (Putumayo), el Macizo de Santurbán, Jericó (Antioquia), el páramo de Chingaza, los abanicos

aluviales del Quindío e Ibagué, y la cuenca baja del río Bogotá. En todos ellos, el objetivo es establecer líneas meteóricas locales y caracterizar las aguas subterráneas y superficiales mediante análisis fisicoquímico e isotópico, con el fin de entender procesos como la recarga, la dinámica de evaporación y la interacción entre componentes del ciclo hidrológico.

Por último, se destacan los usos recientes de las técnicas isotópicas en estudios ambientales aplicados en el marco de la normatividad hídrica nacional, y se evidencia cómo estas herramientas están siendo incorporadas progresivamente en procesos de evaluación y toma de decisiones. Se incluye, además, el reporte de datos de tritio (^3H) provenientes de la estación isotópica de Bogotá, que es un indicador clave para estimar la edad del agua y evaluar los procesos de recarga de acuíferos.

02

CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL MONITOREO ISOTÓPICO A NIVEL REGIONAL

En Colombia, en los últimos años se ha venido presentando un creciente interés en el uso de técnicas isotópicas como herramienta para estudiar el ciclo del agua. Se han incorporado mediciones isotópicas en las evaluaciones de los recursos hídricos, las cuales incluyen el análisis de isótopos estables como el oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) y el deuterio ($\delta^2\text{H}$), así como de isótopos radiactivos como el tritio (^3H), el carbono-14 (^{14}C) y el nitrógeno-15 (^{15}N). Algunas autoridades ambientales han implementado redes de monitoreo de isótopos con el objetivo de poder contar con datos que permitan ampliar el conocimiento de los sistemas acuíferos identificados en cada región. Así mismo, a nivel normativo, en los últimos años se ha incluido como requerimiento el análisis de isótopos en ciertos proyectos, especialmente en aquellos relacionados con la exploración minera, de hidrocarburos y geotérmica.

La Corporación Autónoma de Risaralda (CRQ) ha implementado desde el 2018 una red de monitoreo de agua lluvia denominada “Red Quindiana de Isótopos en la Precipitación (QNIP)”, la cual está conformada por cinco colectores. Estos están ubicados en la estación meteorológica CRQ, la estación meteorológica La Montaña, la estación meteorológica Centro de la Guadua, la estación meteorológica El Ocaso y en la estación meteorológica Bremen, que monitorean isótopos estables de deuterio y oxígeno 18. El tritio se analiza solamente en el colector (Bremen). Esta red cubre un rango altitudinal de 1.865 metros. El colector más bajo está en la cota a 995 m s. n. m. (La Española-El Ocaso) y el más alto a 2.860 m s. n. m. (La Montaña).



Figura 2. Estación isotópica La Española-CRQ



Figura 2. Estación isotópica Bremen-CRQ



Figura 4. Estación isotópica Sede CRQ



Figura 5. Estación isotópica Centro de Guadua-CRQ

Con estos resultados se ha podido establecer la recta meteórica local para el departamento del Quindío.

La Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas) ha implementado una red de monitoreo en los acuíferos del río Risaralda, río Grande de la Magdalena y Santágueda – Km 41, con el objetivo de levantar información que contribuya a mejorar los modelos hidrogeológicos conceptuales y establecer lineamientos para la gestión y conservación del recurso hídrico subterráneo en la región.

En el acuífero del río Risaralda hay dos estaciones de monitoreo ubicadas en los municipios de Anserma y Viterbo, las cuales hacen parte de la Red Nacional de Isotopía. Estas estaciones son resultado de la articulación establecida entre el Ideam y la Corporación para fortalecer el monitoreo isotópico a nivel nacional y contar con información representativa del comportamiento del agua en diferentes regiones. Estas estaciones aportan información continua desde el año 2021.



Figura 6. Izquierda: estación Anserma, Derecha: estación Viterbo- Corpocaldas

En los acuíferos de Santágueda - Km 41 y río Grande de la Magdalena, el muestreo inició en mayo de 2024. Las muestras recolectadas desde esa fecha han sido analizadas en el laboratorio del Servicio Geológico Colombiano (SGC), en el marco del proyecto COL7005, desarrollado en conjunto con EL Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la CRQ, el SGC y la Universidad de Antioquia.

Como parte de este mismo proyecto, se han realizado análisis adicionales de isótopos como Carbono-14 en muestras de agua subterránea tomadas en puntos seleccionados de la red de monitoreo de Corpocaldas.

Asimismo, mediante el contrato 081-2024, suscrito entre Corpocaldas y la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), se llevó a cabo el análisis e interpretación de los datos isotópicos disponibles, con el apoyo técnico de un hidrogeólogo de la Universidad de Mar del Plata (Argentina).



Figura 7. Izquierda: colector tipo Palmex estación Victoria Caldas – Acuífero Grande de la Magdalena. Derecha: colector artesanal construido por la UTP estación Vivero Torrecitas de Vivocuencia, Manizales – Caldas. Corpocaldas

También, la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (Carder) cuenta con una red de monitoreo de isótopos en agua lluvia, implementada en conjunto con la empresa Aguas y Aguas de Pereira (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira SAS ESP). Esta red se originó en el año 2019 a partir de un proyecto liderado por Aguas y Aguas de Pereira, el cual contempló la instalación de seis colectores. Posteriormente, en 2023, la Carder fortaleció la red mediante un contrato suscrito con la UTP, que permitió aumentar la densidad de puntos de monitoreo con la incorporación de cuatro estaciones adicionales.



Figura 8. Colector tipo Palmex estación Alegrias

El objetivo principal de esta red es caracterizar isotópicamente el agua lluvia en la región y contribuir a la identificación de zonas de recarga del acuífero asociado al abanico del Quindío. En complemento de esta iniciativa, en el año 2022 se llevó a cabo una campaña de muestreo isotópico en aljibes y pozos del mencionado acuífero, con el fin de avanzar en su monitoreo hidrogeoquímico y en la comprensión de su dinámica de recarga.



Figura 9. Estación isotópica Sede Carder



Figura 10. Estación La Virginia- Carder



Figura 11. Estación Aguas y Aguas- Pereira-Carder



Figura 12. Estación isotópica Las Hortensias-Carder

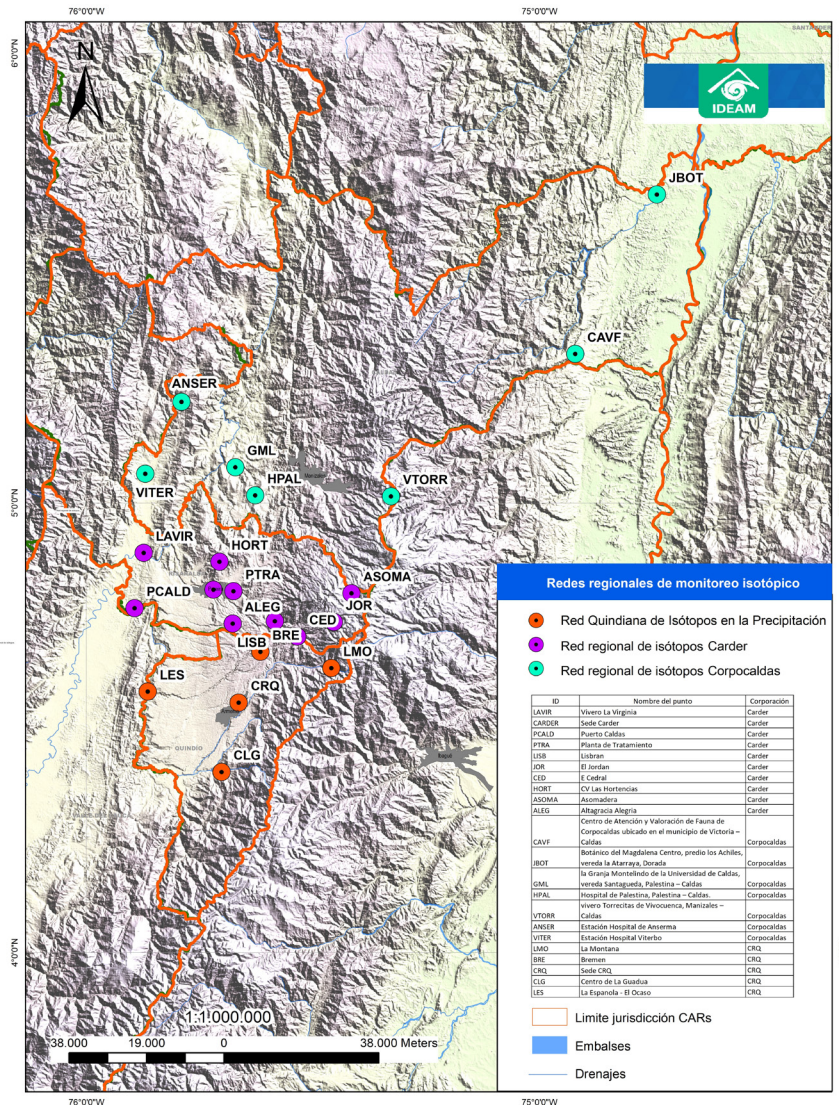


Figura 13. Redes regionales de monitoreo isotópico de CRQ, Carder y Corporcaldas



Figura 14. Estación de monitoreo de la Red Nacional de Isotopía ubicada en Canelos, Bolívar.

El Ideam ha desempeñado un papel clave en estos avances, mediante la implementación de una red de monitoreo de isótopos ambientales, que incluye mediciones de isótopos estables en el agua de lluvia ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) a nivel nacional. Como estrategia, se ha implementado la adopción de algunas estaciones de redes regionales dentro de la red nacional.

Otra de las corporaciones que ha adelantado actividades de monitoreo isotópico es la Corporación Autónoma Regional de Chivor (Corpochivor), en el marco de la formulación e implementación de los Planes de Manejo Ambiental de los acuíferos Súnuba y Teatinos. En el caso del acuífero Súnuba, se implementó una red de monitoreo con el objetivo de determinar las alturas de recarga y aportar al entendimiento integral de su funcionamiento. Esta red, establecida desde el año 2020 mediante el Convenio Interadministrativo 021-2020 con el Servicio Geológico Colombiano (SGC), incluye cuatro colectores de agua lluvia, dos pozos, dos piezómetros y dos fuentes superficiales (la quebrada La Guaya y el río Súnuba). Gracias al análisis de las relaciones isotópicas de deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) en las muestras recolectadas, fue posible construir la línea meteórica local de la zona y estimar las cotas de mayor potencial de recarga del acuífero (Corpochivor, 2023). Esta red operó de manera continua hasta el año 2024 y completó su ciclo de monitoreo útil para los fines del plan de manejo ambiental.

Posteriormente, en el marco del proceso de formulación del Plan de Manejo Ambiental del Sistema Acuífero Teatinos, también liderado por Corpochivor en 2023, se identificó la necesidad de implementar una nueva red de monitoreo isotópico en esta zona, que concentra el mayor número de concesiones de aguas subterráneas dentro de la jurisdicción.



Figura 15. Estación isotópica PT3C-Sutatenza- Corpochivor



Figura 16. Estación isotópica perteneciente al acuífero de Sunuba- Corpochivoe

En este contexto, se instaló una red conformada por seis colectores de aguas lluvias, dos puntos de monitoreo de aguas superficiales y cinco pozos profundos. Los colectores fueron instalados el 30 de agosto de 2023 y el monitoreo comenzó en septiembre del mismo año. Esta red se encuentra actualmente en operación como parte del segundo año de ejecución del Plan de Manejo Ambiental del Sistema Acuífero Teatinos (Corpochivor, 2024).



Figura 17. Pozo de monitoreo red de Corpochivor
Fuente: <https://www.facebook.com/share/p/ICSMZpWNxZ/>

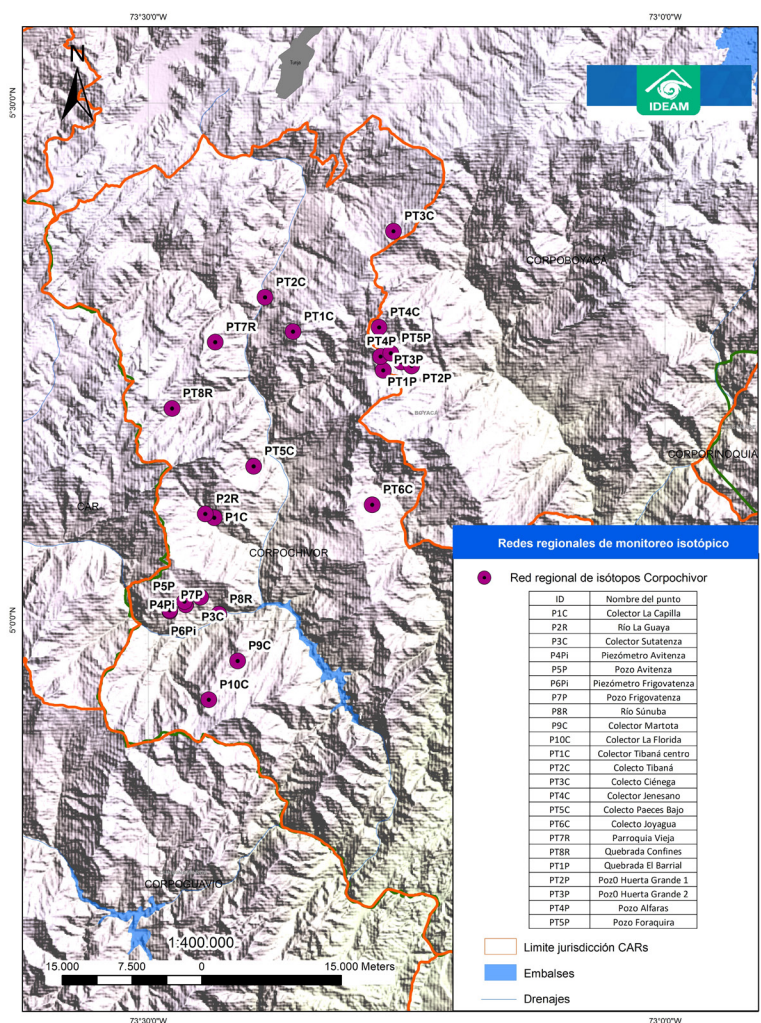


Figura 18. Red de monitoreo regional de Corpochivor

De igual manera, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) ha avanzado en el desarrollo de una red de monitoreo de isótopos con el objetivo de mejorar el conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero del Valle de Aburrá. Esta red está conformada por un total de 37 puntos de monitoreo, distribuidos en cinco estaciones para la recolección de agua lluvia y 32 puntos para el muestreo de aguas subterráneas. A través de estos puntos se analizan isótopos estables como oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) y deuterio ($\delta^2\text{H}$), lo que ha permitido validar zonas y estimar tasas de recarga del acuífero.

Dado que la operación de la red depende en gran medida de la disposición de los usuarios del territorio, se ha identificado la importancia de avanzar hacia una red de propiedad institucional que garantice mayor autonomía técnica, continuidad en la generación de datos y confiabilidad en la información. Esta información resulta clave para validar el modelo conceptual del acuífero del Valle de Aburrá y delimitar con mayor precisión las zonas de recarga. En respuesta a esta necesidad, el AMVA inició en 2024 la construcción de puntos de monitoreo propios y habilitó ese año dos nuevos piezómetros. Para 2025 se proyecta la construcción de otros dos, los cuales estarán integrados a los programas de monitoreo hidrogeoquímico, de calidad del agua e isotópico de la red, lo que fortalecerá su representatividad y sostenibilidad a largo plazo.



Figura 19. Estación (SPR_03)- Medellín- Red de monitoreo AMVA



Figura 20. Estación (SPR_5)- Caldas- Red de monitoreo AMVA



Figura 21. Estación (SPR_01)- Medellín- Red de monitoreo AMVA

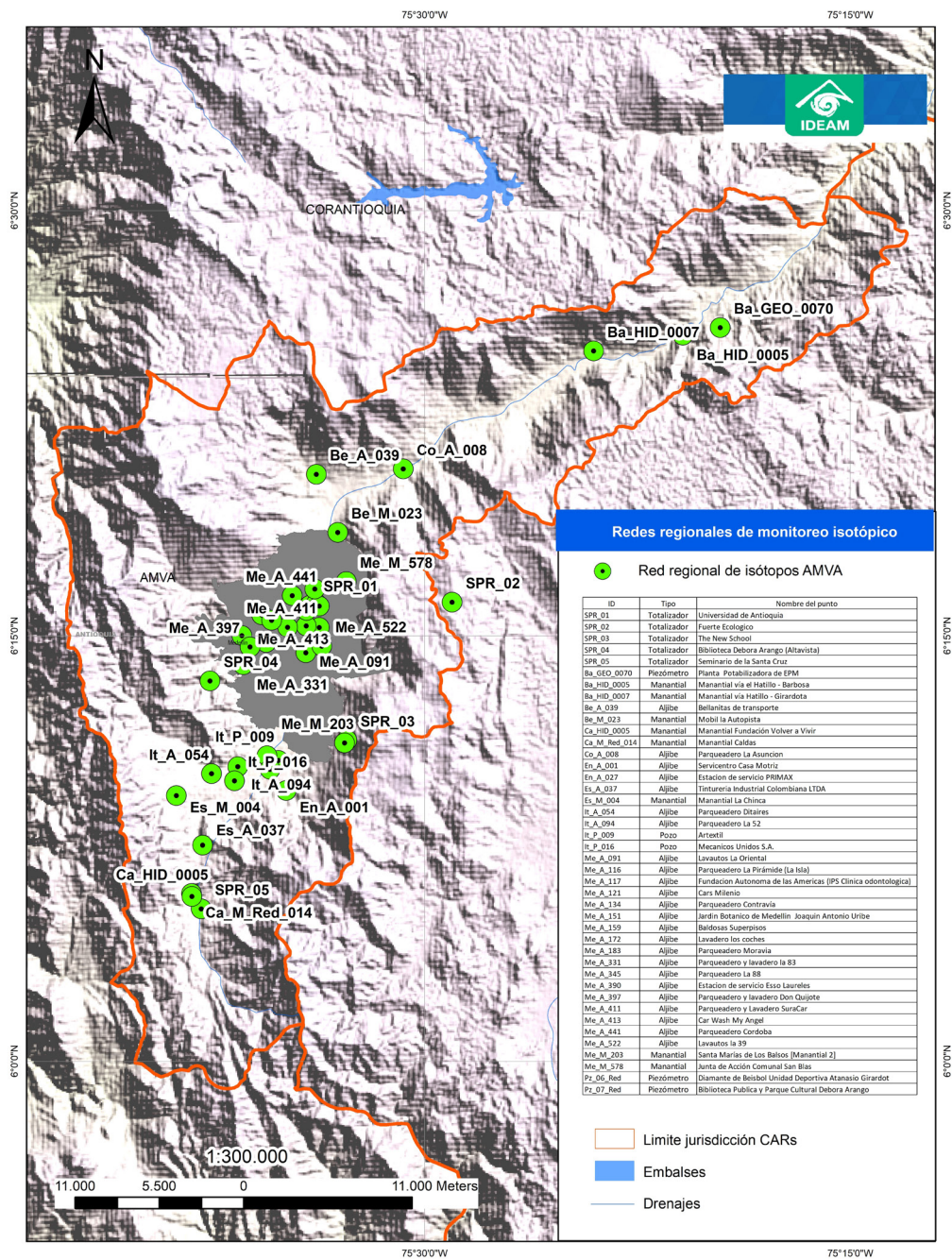


Figura 22. Red regiones de monitoreo isotópico de AMVA

03

AVANCES EN INVESTIGACIÓN EN EL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO PARA EL ESTUDIO DEL AGUA POR MEDIO DE HERRAMIENTAS ISOTÓPICAS

El SGC cuenta con un nuevo analizador triple de isótopos estables en agua.



Figura 23. Entrenamiento básico del personal del LAIE

El Grupo de Investigación y Aplicaciones Nucleares y Geocronológicas (GIANG), de la Dirección de Asuntos Nucleares (DAN), cuenta con laboratorios destinados a la investigación científica. Entre ellos, se encuentra el Laboratorio de Isótopos Estables en agua líquida (LAIE) acreditado en la norma ISO/IEC 17025 - 2017, donde se realiza la determinación de la relación isotópica de deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) en muestras de agua lluvia, superficial y subterránea.

La relación isotópica es una huella única que permite determinar la procedencia y movimiento del agua dentro del ciclo natural. Estas medidas son usadas para determinar puntos de recarga de acuíferos, cambio climático, gradientes altitudinales y cambios isotópicos por cantidad de lluvia, lo cual facilita el ordenamiento territorial en torno al agua y la validación de modelos hidrogeológicos a nivel nacional.

Antes, el laboratorio solo contaba con un analizador láser de isótopos estables LWIA-45-EP de la marca ABB Ltd., que proporciona medidas de la relación isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en las muestras de agua en estado líquido con una alta precisión. Sin embargo, recientemente, el LAIE adquirió un analizador triple de isótopos estables modelo L2140-i de la marca Picarro (ver figura 24), el cual proporciona medidas de la relación isotópica de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, oxígeno-17 ($\delta^{17}\text{O}$) y exceso de $\text{O}17$ en las muestras de agua en estado líquido, lo que permitirá ampliar la capacidad analítica existente.

Los analizadores Picarro utilizan la espectroscopia de absorción óptica basada en el tiempo de los gases objetivo para determinar la concentración en una muestra. Se basan en la espectroscopia de anillo de cavidad de barrido en longitud de onda (WS-CRDS), una tecnología en la que la luz infrarroja cercana viaja muchas veces a través de la muestra y crea una longitud de camino efectiva muy larga para que la luz interactúe con el gas objetivo. Esto permite una excelente sensibilidad de detección en un instrumento compacto y resistente (ver figuras 21 y 22).



Figura 24. Analizador de isótopos estables en agua L2140-i.

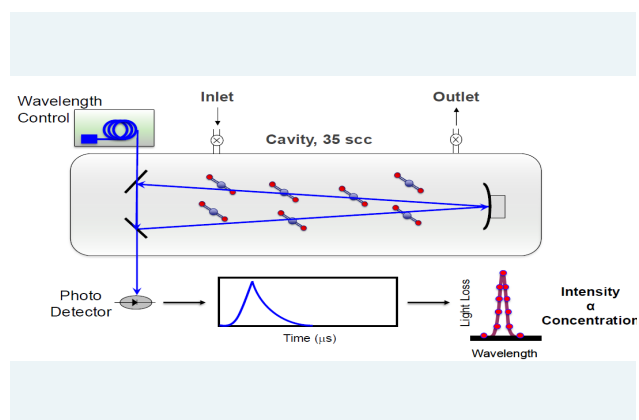


Figura 25. Espectroscopia de anillo de cavidad

El nuevo analizador isotópico de agua líquida L2140-i de Picarro permite la determinación del $\delta^{17}\text{O}$ y exceso de O^{17} en muestras líquidas, lo cual permitirá ampliar y fortalecer las aplicaciones y estudios realizados en las instituciones a nivel nacional.

El análisis del $\delta^{17}\text{O}$ y exceso de O^{17} es de gran utilidad para CITATION Luz09/19226 (Luz, 2009):

- a. Comprender y cuantificar el equilibrio entre los efectos cinéticos y de equilibrio durante los eventos de precipitación.
- b. Reconstruir trayectorias atmosféricas, origen de la humedad de los sitios de precipitación y variaciones a gran escala en la humedad relativa sobre el océano: los registros de exceso de O^{17} de los núcleos de hielo proporcionan información valiosa sobre los cambios pasados en el ciclo hidrológico global.
- c. Reconstruir la humedad pasada: es posible utilizar la dependencia del exceso de O^{17} de la humedad relativa para determinar las condiciones atmosféricas pasadas.
- d. Paleoclima: rastrear la relación isotópica de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{17}\text{O}$ en el agua de goteo activo presentes en cavernas y relacionarla con el registro almacenado en las estalagmitas. (Luz, 2009)

La investigación y el conocimiento geocientífico generado por las técnicas isotópicas en el Servicio Geológico Colombiano son de gran importancia, ya que permiten proveer información básica y sustento técnico robusto para la toma de decisiones en pro de la conservación del agua y el medio ambiente.

Entre algunos de los estudios isotópicos realizados por el SGC durante los últimos años, con el uso de sus capacidades analíticas, se encuentra:

- **Línea meteórica Bogotá y fuentes de humedad (Colector LAIE - DAN)**

En la sede CAN del Servicio Geológico Colombiano (SGC) se han venido recolectando muestras de la precipitación mensual desde junio de 2022 y semanal desde marzo de 2024, utilizando un colector bajo costo. Con los datos de la relación isotópica de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ y d-exceso en la precipitación se pretende analizar las variaciones isotópicas interanuales y estacionales en la ciudad de Bogotá en combinación con datos pluviométricos. Lo anterior con el objetivo de:

- entender el cambio isotópico en la precipitación en temporadas secas y húmedas.
- conocer la variación en la línea meteórica local por anomalías climatológicas.
- comprender los posibles mecanismos de transporte de humedad atmosférica involucrados en los cambios isotópicos.

La línea meteórica local para Bogotá se establece con los datos de agua lluvia muestreados hasta abril de 2025, cuya relación se presenta en la ecuación (1).

$$\delta^2\text{H} = (8,28)\delta^{18}\text{O} + (13,89) \text{ ‰} \quad (1)$$

Se puede observar que la pendiente de la ecuación (1) es similar a la pendiente de la línea meteórica de GNIP-Bogotá ($\delta^2\text{H} = 8,22 \cdot \delta^{18}\text{O} + 13,21$), publicada en el Estudio Nacional del Agua (ENA) 2022 (Ideam, 2022). Lo anterior evidencia la calidad de los resultados obtenidos con el colector de bajo costo usado en este estudio.

En la figura 26 se presentan los resultados preliminares de la procedencia de humedad en Bogotá y su relación con la isotopía del agua.

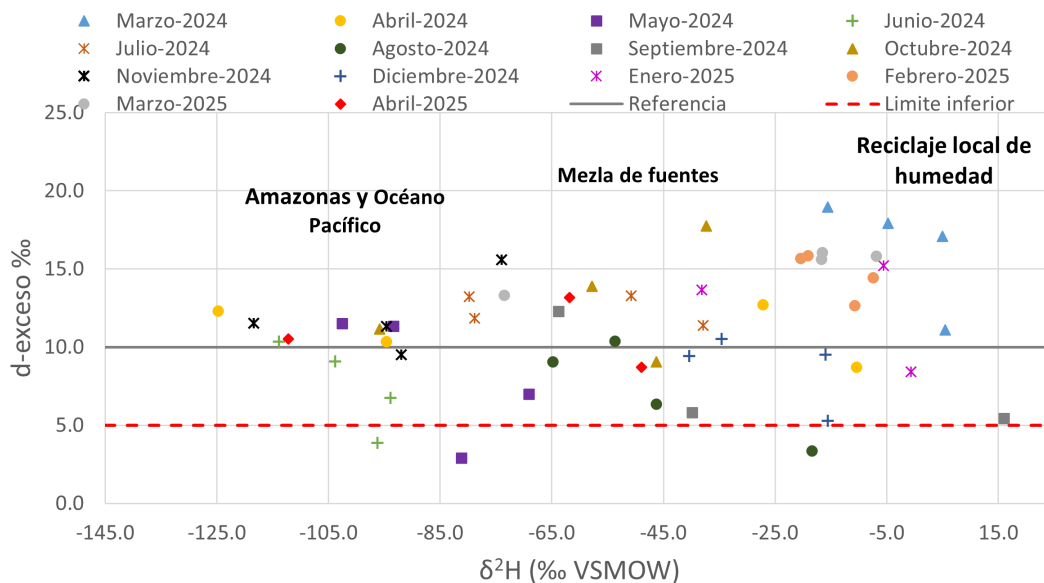


Figura 26. Procedencia de humedad vs. relación isotópica de deuterio – Colector LAIE

Se observaron tres fuentes de humedad principales: Orinoquía, Amazonas-Pacífico y Reciclaje local de humedad. Se observan valores isotópicos más empobrecidos de la humedad del Amazonas-Pacífico y más enriquecido de la humedad de la Orinoquía. Adicionalmente, se presenta un grupo de muestras con valores isotópicos intermedios, relacionados con mezclas de fuentes de humedad. Los resultados preliminares obtenidos corresponden en gran medida al año 2024, caracterizado por un fuerte fenómeno de El Niño, por lo cual es necesario continuar con el muestreo durante el año 2025 para una mayor comprensión de los cambios isotópicos del agua lluvia.

- **Estudios del ciclo del agua en zonas estratégicas del país para suministro de agua por medio de herramientas isotópicas**

La Dirección de Asuntos Nucleares se encuentra desarrollando proyectos en el río Mocoa (Putumayo), en el costado occidental del Macizo de Santurbán sobre la microcuenca de la quebrada La Baja, en el municipio de Jericó (Antioquia) sobre la cuenca del río Piedras, en el páramo de Chingaza, en los abanicos aluviales del Quindío y de Ibagué, y en la cuenca baja del río Bogotá.

El objetivo de estos proyectos es establecer la línea meteórica local de las principales microcuencas y cuencas de la zona de estudio mediante el análisis isotópico de precipitaciones del agua lluvia y de aguas subterráneas y superficiales para determinar las características isotópicas y fisicoquímicas de las aguas muestreadas de las diferentes microcuencas. Esto con el fin de comprender los procesos de recarga, los tiempos de residencia, la dinámica de evaporación, la proveniencia y las interacciones entre los diferentes componentes del ciclo hidrológico local, y, además, poder determinar la variabilidad espacial y temporal de la composición y relación isotópica de la región. Estos trabajos buscan la generación de información del ciclo del agua y su interacción con las actividades antrópicas de la zona, cuyos datos científicos sólidos permitirán respaldar las políticas de conservación y preservación de estos vitales ecosistemas.

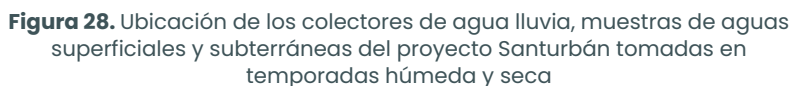
a) Estudios del ciclo del agua en Mocoa

En abril de 2025, en el río Mocoa se instalaron seis colectores de agua para captación de lluvias de forma mensual. Los colectores de agua lluvia están distribuidos a lo largo de gradientes topográficos que abarcan la zona de estudio con elevaciones entre 370 y 2.000 m s. n. m. (ver figura 27). Adicionalmente, se realizó el primer muestreo de aguas superficiales y subterráneas de la zona en temporada húmeda, con un total de 50 muestras para su análisis isotópico. Se proyecta una segunda campaña en octubre 2025 durante la temporada seca.



b) Estudio del ciclo del agua en el páramo de Santurbán

En la microcuenca de la quebrada La Baja en el páramo de Santurbán se instalaron tres colectores de agua lluvia de bajo costo a una altura de 3.529, 2.456 y 2.043 m s. n. m. respectivamente (ver figura 28). En lo corrido del proyecto, se recolectaron un total de 56 muestras de agua lluvia de febrero de 2023 a diciembre de 2024. Se realizó la recolección de 81 muestras de agua entre las que se encuentran 22 muestras de infiltración de minas, 4 surgencias antrópicas, 17 manantiales y 38 superficiales cercanos a los colectores de lluvia, muestreados en las cinco comisiones en varias temporadas húmedas y secas de 2022 a 2024.



c) Estudio del ciclo del agua en el municipio de Jericó (Antioquia)

En la cuenca del río Piedras en Jericó se instalarán tres colectores de agua lluvia en mayo de 2025. Allí se recogerán las muestras de manera mensual. Los colectores se instalarán a diferentes elevaciones (574, 1.105, 2.200 m s. n. m.), distribuidas en los flancos occidental y oriental de la zona de estudio (ver figura 29). En cuanto a las muestras de agua superficial y subterráneas, estas serán tomadas durante dos temporadas con niveles de precipitación contrastante: mayo de 2025 para temporada húmeda y mediados de enero de 2026 para temporada seca.

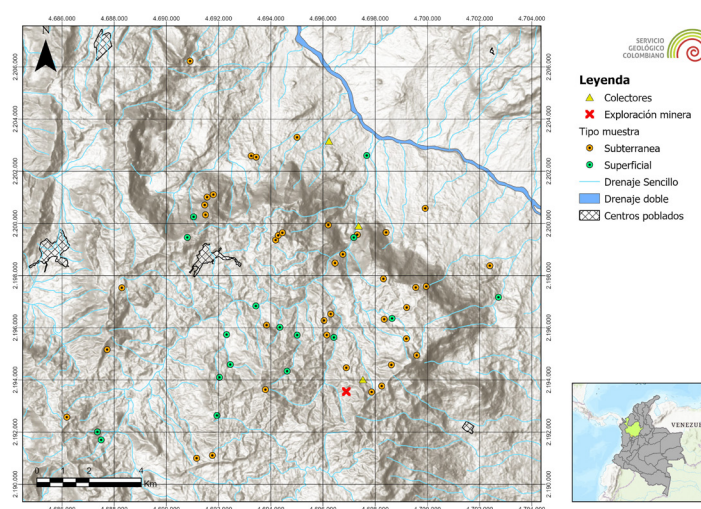


Figura 29. Zona de estudio Jericó-Antioquia

d) Estudio del ciclo del agua en el páramo de Chingaza

El proyecto del páramo de Chingaza se desarrolla en conjunto con el personal de Parques Nacionales Chingaza. En el mes de noviembre de 2024 se llevó a cabo el muestreo de aguas superficiales-subterráneas y la instalación de 11 colectores de agua lluvia. Los colectores se instalaron a alturas entre los 2.000 m s. n. m. y 3.700 m s. n. m., y Parques Nacionales Chingaza los muestreará de forma mensual por dos años.

Se realizaron tres campañas de recolección de muestras de aguas superficiales y subterráneas para el análisis isotópico y fisicoquímico. Una primera comisión fue realizada entre junio 23 y 26 de 2024 en temporada húmeda, la segunda del 23 de septiembre al 4 de octubre de 2024 en temporada seca, y una tercera entre el 16 y el 28 de junio de 2025. En esta última comisión se recolectaron 96 muestras de agua para su análisis isotópico y 22 muestras de aguas subterráneas para el análisis fisicoquímico (ver figura 30).

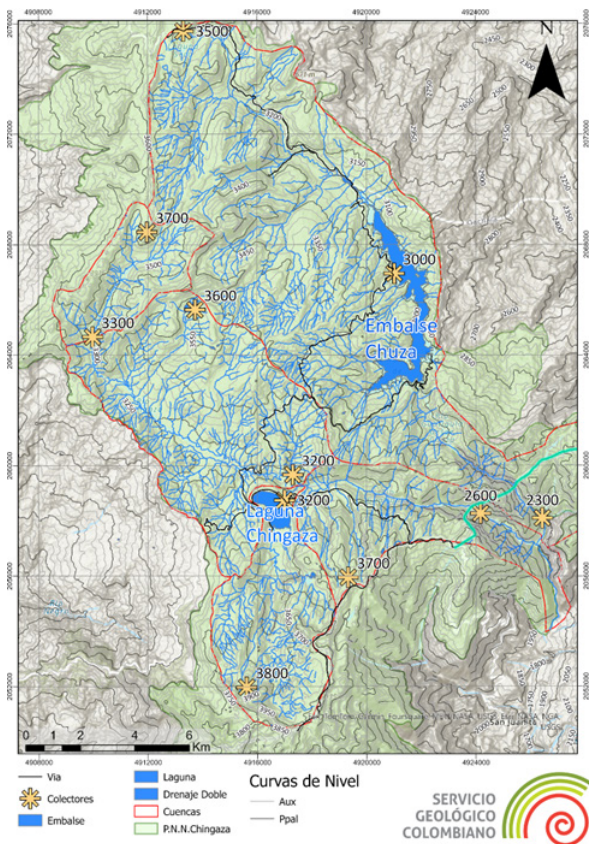


Figura 30. Izquierda, mapa de distribución de colectores de agua lluvia; derecha, mapa de muestreo de aguas subterráneas y superficiales

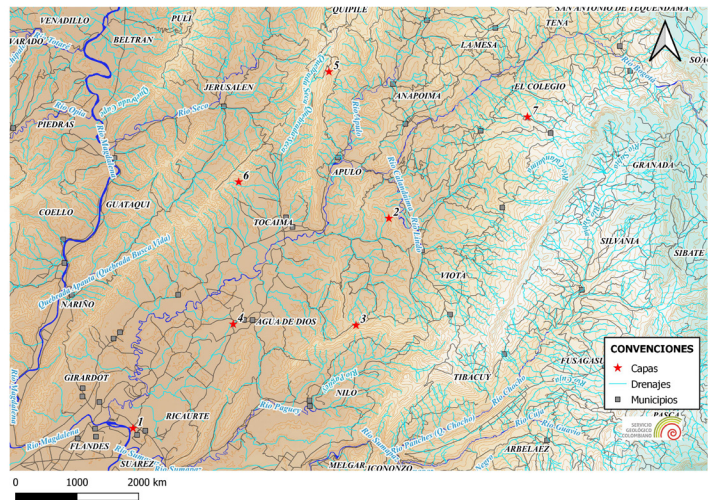


Figura 31. Mapa de distribución de instalación de colectores

d) Estudio del ciclo del agua en la cuenca baja del río Bogotá

Adicionalmente, la Dirección de Asuntos Nucleares, en conjunto con el Grupo de Aguas Subterráneas, se encuentra en la construcción de la línea meteórica local de la cuenca baja del río Bogotá. Se realizó la instalación de siete colectores de agua lluvia desde el municipio de La Mesa hasta Ricaurte (Cundinamarca), para su muestreo mensual y análisis isotópico (ver figura 31).

Esta información isotópica es un insumo fundamental para el proceso de construcción del modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca que desarrollará el Grupo de Aguas Subterráneas.

04

USO DE ISÓTOPOS APLICADOS EN EL MARCO DE LA NORMATIVIDAD HÍDRICA NACIONAL

En los últimos años, el uso de herramientas de hidrología isotópica ha sido incorporado progresivamente en la normatividad ambiental e hídrica de Colombia, y se ha reconocido su valor en la evaluación integral del recurso hídrico subterráneo y superficial.

Tanto el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) como la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) han incorporado el análisis de isótopos estables del agua (deuterio ^2H , oxígeno-18 ^{18}O y tritio ^3H) como requisito en los términos de referencia (TdR) para la elaboración de estudios ambientales, especialmente en proyectos que puedan tener un impacto significativo sobre acuíferos o cuerpos de agua estratégicos.

Por ejemplo:

- El Decreto 1076 de 2015 establece que las autoridades ambientales deben implementar redes regionales de monitoreo del recurso hídrico articuladas con el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH). En este marco, los análisis isotópicos se reconocen como parte de las metodologías avanzadas para la caracterización de la dinámica del agua subterránea.
- En los TdR para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) en proyectos como hidroeléctricas, minería, hidrocarburos, se exige la aplicación de estudios isotópicos para caracterizar el componente hidrogeológico. Esto incluye la identificación de zonas de recarga, tránsito y descarga de acuíferos, edad del agua, la evaluación de flujos de agua subterránea y su interacción con cuerpos de agua superficial y ecosistemas asociados.

NORMAS LEGALES A NIVEL NACIONAL QUE EXIGEN EL MONITOREO DE ISÓTOPOS PARA EVALUACIONES DE RECURSOS HÍDRICOS

1

Resolución 0561 del 27 de mayo de 2022.

Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), requerido para el trámite de licencia ambiental en proyectos de exploración de fuentes de energía geotérmica, y se toman otras determinaciones.

Resolución 0821 del 24 de septiembre de 2020.

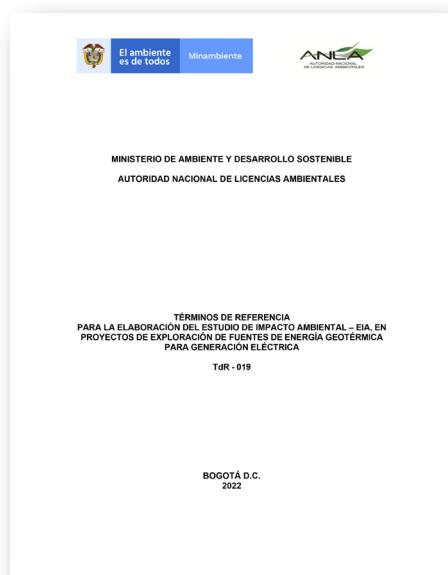
Por la cual se expiden los TdR para la elaboración del EIA de Proyectos Piloto de Investigación Integral (PPII) en yacimientos no convencionales (YNC) de hidrocarburos con la utilización de la técnica de fracturamiento hidráulico multietapa-perforación horizontal (FH-PH).

2

3

Resolución 2206 del 27 de diciembre del 2016.

Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del EIA requerido para el trámite de licencia ambiental en proyectos de exploración de fuentes de energía geotérmica, y se toman otras determinaciones.



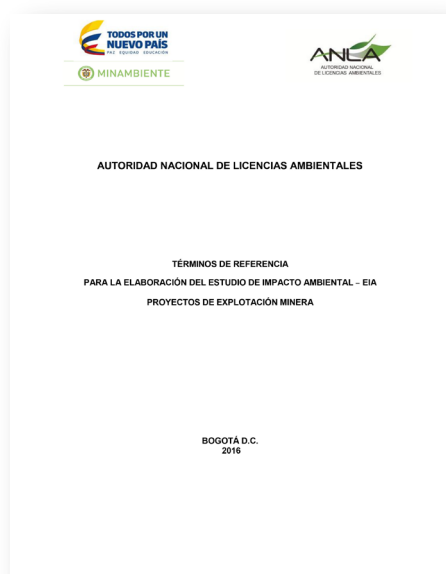
1. Los TdR para este tipo de proyectos incluyen el uso de isótopos en la caracterización del componente hidrogeológico, específicamente en la identificación y caracterización de los flujos de agua, tanto en los sistemas acuíferos locales como en el sistema geotermal y sus posibles interacciones, así como la relación de estos con las aguas superficiales. Se debe efectuar un análisis de isótopos ambientales deuterio (^2H), oxígeno 18 (^{18}O) y radiactivos tritio (^3H) en cuerpos de agua superficial y subterránea (aguas del reservorio y de acuíferos superficiales) y agua meteórica (mediante totalizadores de agua lluvia).

2. Los TdR para este tipo de proyectos incluyen el uso de isótopos en la caracterización del componente hidrogeológico, específicamente en la identificación de las zonas de recarga, tránsito y descarga; la caracterización de los flujos locales, semirregionales y regionales; la determinación de las características hidrogeoquímicas y de calidad del agua, así como las interconexiones con cuerpos de agua superficial y ecosistemas conexos. Para las etapas de determinación de las principales direcciones de flujo del agua subterránea, se incluye la identificación de posibles zonas de recarga y descarga naturales de los acuíferos y posibles conexiones hidráulicas entre acuíferos y cuerpos de agua superficiales.

Se plantea una caracterización isotópica con el monitoreo de agua lluvia, la cual debe iniciarse con el desarrollo del EIA y continuará de acuerdo con el programa de monitoreo que se establezca para el PPII, hasta completarse por lo menos un año hidrológico. Cuando haya a lugar, se deberán localizar recolectores de agua lluvia (totalizadores) a diferentes alturas en las cuales se presume una recarga del acuífero en el área de influencia del PPII, con objeto de determinar la firma isotópica de la lluvia local.



Asimismo, deberán monitorearse las aguas superficiales y puntos de agua subterránea (a menos que capten de una sola unidad hidrogeológica). De existir manantiales, deben monitorearse mensualmente. En la etapa concomitante se deberán caracterizar y monitorear las unidades intervenidas para explotación de aguas subterráneas o inyección, a medida que se avance en la perforación.



3.

Los TdR para este tipo de proyectos incluyen el uso de isótopos en la caracterización del componente hidrogeológico, el cual está enfocado en la identificación y caracterización del agua subterránea y los acuíferos presentes en la zona. Incluye una evaluación isotópica, en la que se debe efectuar monitoreo de deuterio (^2H), oxígeno 18 (^{18}O) y tritio (^3H) en agua lluvia, cuerpos de agua superficial (ríos y lagos) y en los acuíferos en puntos representativos del área de influencia del proyecto (pozos, manantiales, aljibes y piezómetros), durante mínimo un año hidrológico. Con base en los resultados, se deben establecer las relaciones existentes entre aguas lluvias, superficiales y subterráneas, y emplear los

resultados para la identificación de las zonas de recarga, tránsito y descarga, los tiempos aproximados de tránsito, la comparación con la línea meteórica mundial y local, y determinar por datación la edad promedio de la muestra.

Estos monitoreos se deben efectuar antes, durante y después de la explotación minera, con el fin de determinar posibles fluctuaciones en los resultados como consecuencia del proyecto.

En la Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos, en la fase de diagnóstico, donde se busca la caracterización del sistema acuífero a través de un modelo hidrogeológico conceptual, se plantea el uso de isótopos para interpretar los sistemas de flujo subterráneo, identificar zonas de recarga, patrones de circulación de aguas subterráneas, tiempo de residencia del agua subterránea o edad del agua, verificar balances hídricos e identificar posibles fuentes de contaminantes en acuíferos contaminados.



Actualmente, está en curso la transición hacia una nueva metodología, más robusta, para la elaboración y presentación de estudios ambientales, que actualiza la metodología establecida en el Decreto 1402 de 2018. En este documento se contempla la caracterización del componente hidrogeológico en el marco de la construcción de un Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), orientado a representar el conocimiento sobre el funcionamiento de las unidades hidrogeológicas susceptibles de intervención o afectación por un proyecto, obra o actividad. Asimismo, se incluyen actividades de monitoreo isotópico como parte de este componente.

05

LA PRESENCIA DE TRITIO EN LA PRECIPITACIÓN. REPORTE DE LA ESTACIÓN ISOTÓPICA DE BOGOTÁ

El tritio es un isótopo radiactivo del hidrógeno; posee el mismo número de protones y electrones que el hidrógeno convencional, pero tiene dos neutrones adicionales, lo que lo hace inestable y, por tanto, radiactivo. Se produce de forma natural por la interacción de los rayos cósmicos —que contienen neutrones y protones de alta energía— con los gases de la atmósfera superior, principalmente nitrógeno y en menor medida oxígeno, a través de las siguientes reacciones nucleares (Plata Bedmar, 2006):



La actividad del tritio se expresa en unidades de tritio (UT o TU, por sus siglas en inglés), donde 1 TU equivale a un átomo de tritio por cada 10^{18} átomos de hidrógeno (incluyendo ^1H , ^2H y ^3H) (Solomon y Gilmore, 2024)

Además, el tritio se produce como subproducto de actividades nucleares como la operación de reactores nucleares, pruebas de armas y el reprocesamiento de combustible nuclear. Estas actividades contribuyeron de manera significativa al aumento de su concentración en la atmósfera, especialmente durante las décadas de 1950 y 1960, periodo en el que se realizaron numerosas pruebas nucleares (Solomon y Gilmore, 2024). Como resultado, las concentraciones de tritio en la precipitación aumentaron en casi tres órdenes de magnitud en esa región y alcanzaron valores cercanos a 10.000 unidades de tritio (UT) en zonas como el centro de Canadá. En contraste, el incremento en el hemisferio sur fue mucho menor, con aumentos de aproximadamente un factor de 10 (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1991; Plata Bedmar, 2006; Solomon y Gilmore, 2024)

Desde 1963, este contenido extremo de ^3H ha disminuido progresivamente tras la entrada en vigor de la prohibición de ensayos nucleares atmosféricos, hasta alcanzar valores normales. En condiciones de equilibrio natural, se estima que la concentración de tritio en la precipitación es de aproximadamente 5 UT (Mook, 2000). En zonas tropicales, las concentraciones medias anuales de tritio en la precipitación están comprendidas en 2 unidades de tritio (UT); en Europa y América del Norte, entre 3 y 6 unidades de tritio (UT); en Australia, entre 1 y 3 UT; y en las regiones polares, de 20 a 15 UT (Plata Bedmar, 2006; Solomon y Gilmore, 2024).

El tritio tiene una vida media de 12,32 años (equivalente a 4.500 ± 8 días) (Unterweger et al., 1980, como se cita en Mook, 2000), lo que significa que tarda poco más de 12 años en desintegrarse a la mitad de su cantidad original.

Al desintegrarse, el tritio se transforma en helio (Figura 32).

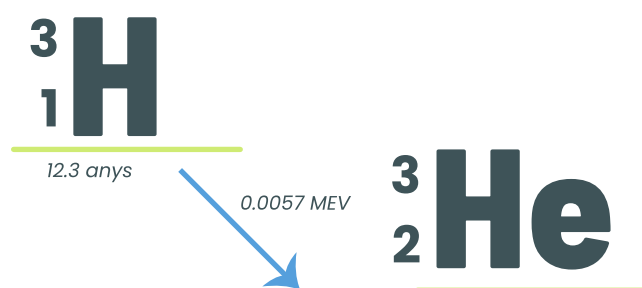


Figura 32. Esquema de desintegración de hidrógeno a helio

El tritio se ha consolidado como un excelente trazador para datar procesos hidrológicos recientes, generalmente en escalas de tiempo de hasta 60 años, lo que resulta en una evaluación cualitativa de la edad del agua (Figura 33). Hoy en día hay menos tritio

en la atmósfera, ya que ha ido decayendo y transformándose en helio-3. Por ello, la relación entre tritio y helio-3 se ha convertido en una herramienta más robusta y directa para determinar la edad del agua subterránea, lo que ofrece una ventana temporal más amplia (Solomon y Gilmore, 2024).

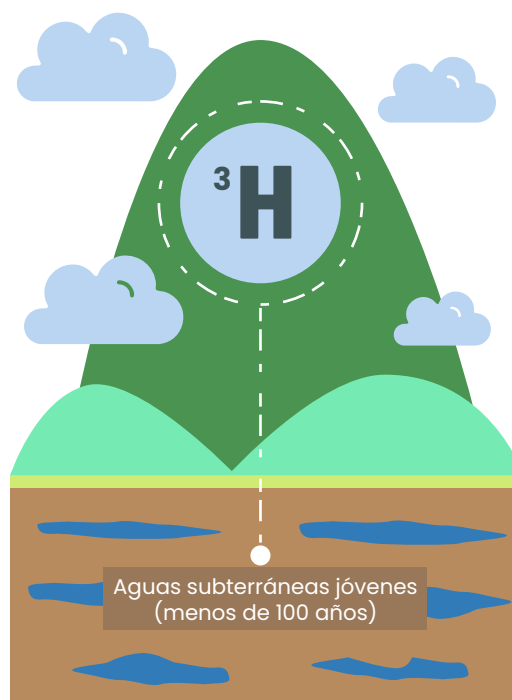


Figura 33. Gestión del balance hidrológico mediante la técnica del tritio/helio 3

Durante más de cuatro décadas se ha venido monitoreando el tritio en Colombia en la estación isotópica de Bogotá. Esta estación, que forma parte de la Red Global de Isótopos en la Precipitación (GNIP), con el apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), ha permitido la recolección continua de datos de tritio en el país.

La estación monitorea mensualmente la lluvia y recolecta entre 500 y 1.000 mililitros de muestra, la cual es enviada al Laboratorio de Hidrología Isotópica del OIEA en Viena (Austria) para su análisis. Anualmente, se reciben los resultados de tritio y son integrados a la Base de Datos de la Red Nacional de Isotopía.

Se presenta a continuación un reporte actualizado de los resultados de tritio para la estación de Bogotá.

En los datos se observa una disminución progresiva en las concentraciones de tritio. A partir del año 2000, los valores en la precipitación se han mantenido relativamente constantes, con un valor máximo de 2,44 UT y un mínimo de 1,58 UT.

Puede considerarse que el tritio actualmente presente en la precipitación se debe exclusivamente a fuentes naturales.

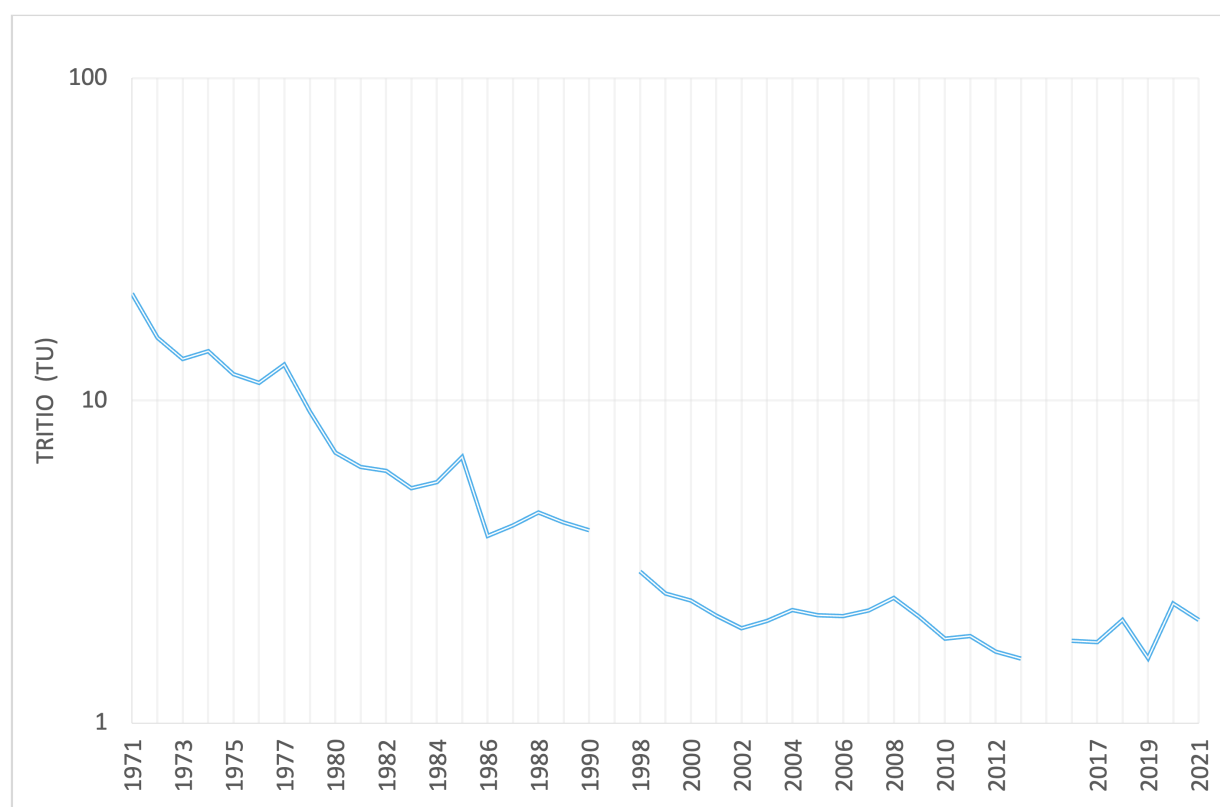


Figura 34. Variación temporal del tritio en la precipitación para Bogotá.

06

REFERENCIAS

- Carder-Utp. (2023). Informe técnico final # 5. Formulación de medidas de manejo ambiental -FMMAA del acuífero abanico Quindío-Risaralda-Valle Del Cauca, fase II, en el marco de los Pomcas priorizados Otún y La Vieja. Pereira.
- Corpochivor. (2023). Análisis de isotopía y caracterización hidrogeoquímica del agua en el sistema acuífero de Sunuba. Subdirección de Gestión Ambiental.
- Corpochivor. (2024). Informe anual red de monitoreo isotópico de Corpochivor. Proyecto administración y manejo adecuado del recurso hídrico, Subdirección de Gestión Ambiental.
- Corpochivor. (2022). Desde Corpochivor, a través del proyecto Administración y Manejo Adecuado del Recurso Hídrico, seguimos comprometidos con el bienestar hídrico de nuestras comunidades rurales [publicación en Facebook]. Facebook.
<https://www.facebook.com/Corpochivor/posts/5614507315277640/>
- Dengra, X. (2015, 7 de febrero). Esquema de desintegració d'hidrogen a heli [ilustración]. Wikimedia Commons.
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38263826>
- Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico. (Enero de 2025). Descifrando la edad del agua: la datación con tritio al servicio de la hidrogeología. Nota Técnica.
<https://www.fii.gob.ve/descifrando-la-edad-del-agua-la-datacion-con-tritio-al-servicio-de-la-hidrogeologia/>
- Ideam. (2022). Estudio Nacional Del Agua 2022. Ideam.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. (1991). Aplicación de técnicas especiales al estudio hidrogeológico de zonas de baja permeabilidad [informe técnico].
https://info.igme.es/SidPDF/021000/843/Medidas%20de%20permeabilidad%20y%20parametros%20geoqu%C3%ADmicos.%20Instalaciones%20permanentes%20de%20control%20y%20seguimientos/21843_0003.pdf

Jawerth, N. (2019). *Gestión del balance hidrológico mediante la técnica del tritio/helio 3*. Boletín Agua OIEA, 20-21.

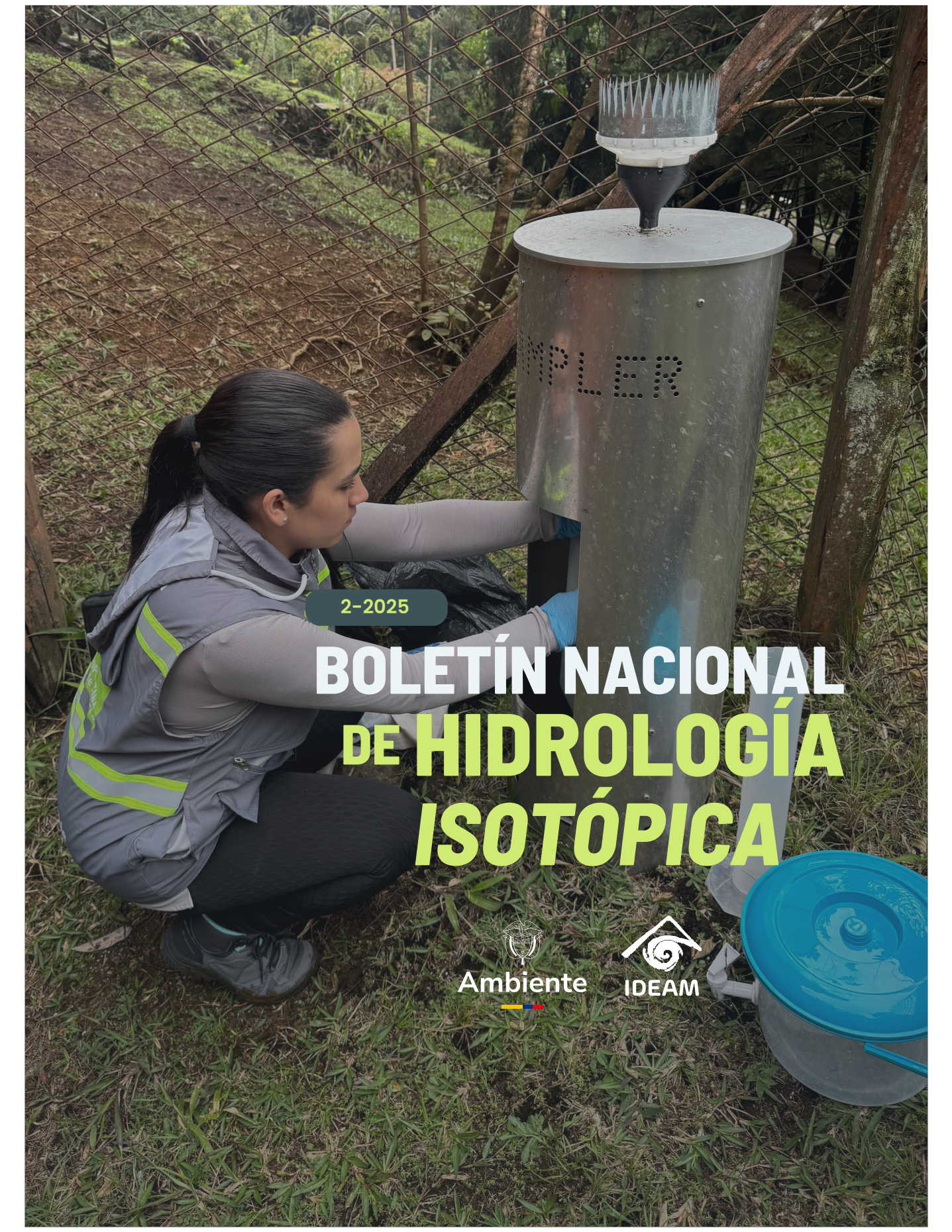
Luz, B. B. (2009). *Fractionation of Oxygen and Hydrogen Isotopes in Evaporating Water*. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 73(22), 6697-6703.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.08.008>

Mook, W. G. (2000). *Isotopos ambientales en el ciclo hidrológico*. Centro de Investigación Isotópica.

Ortiz, D., Sanabria, L., Romero, H., Moreno, C., Porras, A., Peña, M., . . . Muñoz, J. (2023). *Determinación de la línea meteórica local del sur oriente del departamento de Boyacá a través de isotopos estables en agua*. Congreso Colombiano de Hidrogeología- Agua Subterránea para el Desarrollo Sostenible. Medellín. Consultado en junio de 2025, de
https://irp.cdn-website.com/9b3ee170/files/uploaded/memorias_vii_cch.pdf

Plata Bedmar, A. (2006). *Presente y futuro del tritio natural como herramienta de investigación hidrológica*. *Revista Digital del Cedex* (143).

Solomon, D. K. y Gilmore, T. E. (2024). *Age Dating Young Groundwater: How to Determine Groundwater Age from Environmental Tracer Data*. *The Groundwater Project*.
<https://doi.org/10.21083/liiu2727>



2-2025

BOLETÍN NACIONAL DE **HIDROLOGÍA** **ISOTÓPICA**



Ambiente



IDEAM