



MINISTERIO DE HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS

COMPENDIO CIENTÍFICO EN HIDROLOGÍA ISOTÓPICA











Resultados FASE I Proyecto científico 'Prospección y mapeo de la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos en zonas transfronterizas piloto de las tres regiones hidrográficas del Estado Plurinacional de Bolivia mediante la aplicación de la hidrología isotópica, 2022-2025'



PRESENTACIÓN

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) viene impulsando el Programa Nacional en el área de la Ciencia y Tecnología Nucleares con fines pacíficos, mediante el desarrollo de proyectos científicos aplicativos de corto, mediano y largo plazo que contribuyan eficazmente a los sectores del desarrollo nacional.

En el sector de los recursos ambientales, en particular, en el ámbito de los recursos hídricos se encuentra en desarrollo el proyecto científico 'Prospección y mapeo de la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos en zonas transfronterizas piloto de las tres regiones hidrográficas del Estado Plurinacional de Bolivia, mediante la aplicación de la hidrología isotópica, 2022-2025', cuyo objetivo es generar una base de datos/ información científica que permita, en línea con lo establecido en el Plan de Desarrollo Económico Social – PDES 2021-2025, contribuir al fortalecimiento de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y al establecimiento de Mecanismos de Cooperación en Materia de Aguas Transfronterizas para alcanzar la Seguridad Hídrica en el Estado Plurinacional de Bolivia.

En este contexto, demostrando el compromiso institucional a través del desarrollo de la investigación científica aplicativa, el presente documento tiene por objetivo presentar los resultados de la implementación de la Fase I del proyecto científico.

Ing. Hortensia Jiménez Rivera
DIRECTORA GENERAL EJECUTIVA
AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

© AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

DIRECCIÓN GENERAL EJECUTIVA

Ing. Hortensia Jiménez Rivera **Directora General Ejecutiva de la ABEN**

CONCEPTUALIZACIÓN, METODOLOGÍA, INVESTIGACIÓN, ANÁLISIS FORMAL, REDACCIÓN Y VISUALIZACIÓN CIENTÍFICA PhD. Ing. Gabriela Patricia Flores Avilés

PERSONAL AUXILIAR
Estudiantes de Pasantía
Univ. Enoe Eloisa Gonzáles Córdova
Univ. Lizet Lorena Quispe Quisbert

DEPÓSITO LEGAL: 4-1-99-2023 P.O. **PRIMERA EDICIÓN**

LA PAZ - BOLIVIA

ÍNDICE

Ficha de identificación del proyecto científico	1
Introducción	2
Resultados	
1. Línea de base de datos científicos de isótopos estables e inestables en el Estado Plurinacional de Bolivia	4
2. Etapa preliminar proyectos piloto en zonas transfronterizas de las tres regiones hidrográficas de Bolivia	13
3. Conclusión proyecto piloto en la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez	27
Agradecimientos	39
Referencias	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Áreas de intervención del proyecto científico de la ABEN.	•
Figura 2 Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo Tierra de los Lípez (Perfil E-O Mapa N°23).	

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa N° 1.	Variación espacial y temporal de Oxígeno-18 (δ^{18} O) correspondiente a estaciones representativas de las tres regiones hidrográficas de Bolivia	ć
Mapa N° 2.	$Variación \ espacial \ y \ temporal \ de \ Deuterio \ (\pmb{\delta}^2 H) \ correspondiente \ a \ estaciones \ representativas \ de \ las \ tres \ regiones \ hidrográficas \ de \ Bolivia \$	7
Mapa N° 3.	Variación espacial y temporal de Tritio (³ H) correspondiente a la Estación de Laicacota de la región hidrográfica del Altiplano	{
Mapa N° 4.	Variación espacial de Oxígeno-18 (δ^{18} O) con base en los registros reportados en estudios científicos realizados en las tres regiones hidrográficas de Bolivia	?
Mapa N° 5.	$Variación \ espacial \ de \ Deuterio \ (\pmb{\delta}^2 H) \ con \ base \ en \ los \ registros \ reportados \ en \ estudios \ científicos \ realizados \ en \ las \ tres \ regiones \ hidrográficas \ de \ Bolivia \$. 1(
Mapa N° 6.	Variación espacial de Tritio (3H) con base en los registros reportados en estudios científicos realizados en las tres regiones hidrográficas de Bolivia	. 11
Mapa N°7.	Variación espacial del Nitrógeno-15 y Oxígeno-18 de la molécula de nitrato ($\delta^{15}N_{NO3}$; $\delta^{18}O_{NO3}$) con base en los registros reportados en estudios científicos	
	realizados en la región hidrográfica del Altiplano	. 12
Mapa N°8.	Ubicación, rutas de acceso y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de Chacaltaya (El Alto), ubicado	
	dentro del sistema hídrico TDPS	.16
Mapa N°9.	Ubicación, rutas de acceso y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de Laicacota (La Paz), ubicado	
	dentro del sistema hídrico TDPS	. 17

Mapa N° 10	D. Ubicación, rutas de acceso y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de Oruro, ubicado dentro del	
	sistema hídrico TDPS	18
Mapa Nº 11	I. Ubicación, rutas de acceso y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de Cobija-Universidad, ubicado	
	dentro del sistema Acuífero Amazónico	19
Mapa N° 12	2. Ubicación, rutas de acceso y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de Cobija-Aeropuerto, ubicado	
	dentro del sistema Acuífero Amazónico	20
Mapa N°13.	. Ubicación, rutas de acceso y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de INIAF-Cobija, ubicado dentro	
	del sistema Acuífero Amazónico	21
Mapa N°14.	. Ubicación de los sitios de monitoreo a ser inspeccionados por la ABEN en los municipios de Yacuiba y Villamontes, ubicados dentro del Sistema Acuífero Yrendá-Toba-	
	Tarijeño	22
Mapa N°15.	. Contexto geográfico de las unidades hidrológicas de estudio (superior izquierdo) en Sudamérica y en el Sistema Acuífero Amazónico (superior derecho) dentro	
	del municipio de Cobija. (Inferior) Ubicación de los sitios de investigación en los cuales la ABEN realizó las tareas de: i) validación y mapeo integrado, ii) mediciones	
	in-situ, iii) recolección de muestras y iv) mediciones de Radón-222	25
Mapa N° 16	6. Variación espacial de: (arriba) la Conductividad eléctrica (CE) y (abajo) de las concentraciones de actividades de Radón-222 (222Rn) en el Sistemas Acuífero	

	Amazónico (sector municipio de Cobija)	26
Mapa Nº 17	.Contexto geográfico de la unidad hidrológica de estudio. (superior izquierdo) Sudamérica y región hidrográfica del Altiplano, (superior derecho) dentro de los	
	municipios de la Mancomunidad Gran Tierra de los Lípez. (Inferior) Ubicación de los sitios de investigación con información científica de isótopos estables e inestables	
	de: i) estudios realizados antes de 2019 (transparencia al 50 %) y aquellos ii) generados por la ABEN durante 2019 y 2021	31
Mapa N°18.	Variación espacial de las composiciones isotópicas de Oxígeno-18 (δ¹8O): (izquierda) al final de la época lluviosa de 2019 y (derecha) durante la época de	
	estiaje de 2021	32
Mapa N°19.	Variación espacial de las composiciones isotópicas de Deuterio (δ²H): (izquierda) al final de la época lluviosa de 2019 y (derecha) durante la época de estiaje de 2021	33
Mapa N°20.	Variación espacial de las fracciones relativas de mezcla durante el flujo de aguas subterráneas en el sistema acuífero	34
Mapa N°21.	Variación espacial de: (izquierda) la Conductividad eléctrica (CE) y (derecha) de las concentraciones de actividades de Radón-222 (222Rn) durante la época de	
	estiaje de 2021	35
Mapa N° 22	. Variación espacial de: (izquierda) las composiciones isotópicas de Carbono-13 (δ¹³C) y (derecha) de las actividades de Carbono Moderno (¹⁴C) durante la época de	
	estiaje de 2021	36
Mapa N°23.	Mapa mostrando la ubicación del perfil E-O y los límites del sistema acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez, nferidos en base a la evidencia científica generada por la	
	ABEN. En transparencia se presentan los sitios de investigación de la línea de base de datos científicos construida por la ABEN	37



FICHA DE IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO CIENTÍFICO

Título de proyecto:

PROSPECCIÓN Y MAPEO DE LA DISPONIBILIDAD Y SOSTENIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ZONAS TRANSFRONTERIZAS PILOTO DE LAS TRES REGIONES HIDROGRÁFICAS DEL ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA MEDIANTE MEDIANT LA APLICACIÓN DE LA HIDROLOGÍA ISOTÓPICA, 2022-2025.

Nombres y detalles de contacto del responsable del proyecto científico:

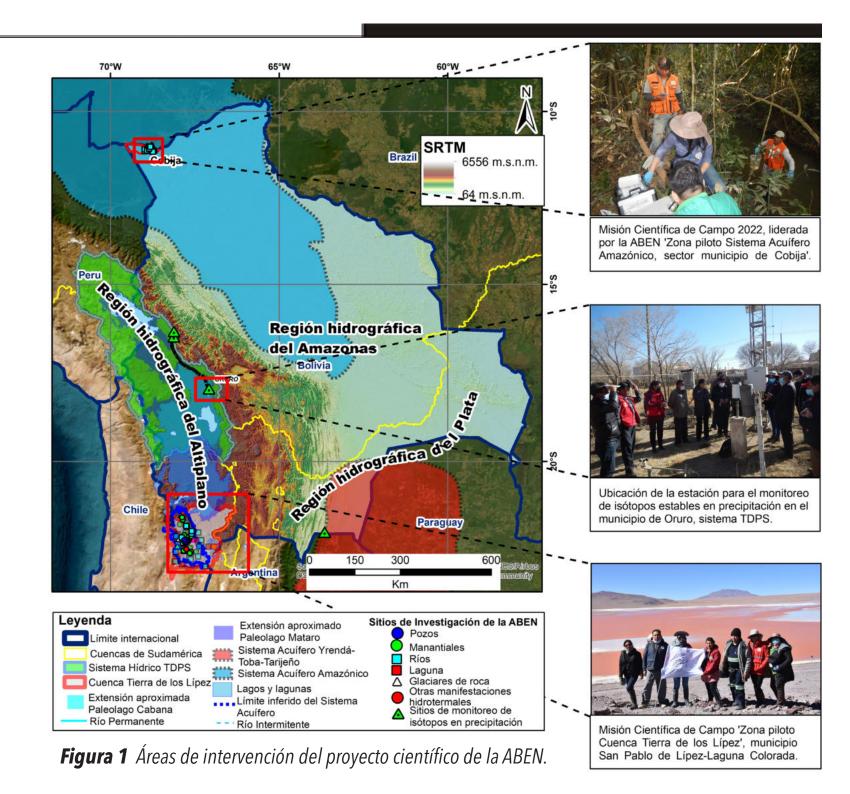
Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) PhD. Ing. Gabriela Patricia Flores Avilés Especialista en Análisis y Desarrollo de Proyectos Científicos. gflores@aben.gob.bo

Duración del proyecto científico:

Enero 2022 - Diciembre 2025.

Áreas de intervención:

- Región Hidrográfica del Altiplano
 Cuenca Tierra de los Lípez (municipio San Pablo de Lípez, Departamento de Potosí).
 Sistema Hídrico: Lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y Salar de Coipasa TDPS (municipios de La Paz y Oruro).
- Región Hidrográfica del Amazonas
 Sistema Acuífero Amazónico (municipio de Cobija, departamento de Pando).
- Región Hidrográfica del Plata
 Sistema Acuífero Yrenda-Toba-Tarijeño (municipio de Yacuiba, departamento de Tarija).





INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el 58% de la superficie de las cuencas transfronterizas cuenta con acuerdos operativos para la cooperación en materia de aguas transfronterizas; sin embargo, en América Latina y el Caribe estos índices de cobertura son bajos (~24 %) U.N.E.C.E & U.N.E.S.C.O (2021).

En 2020, la U.N.E.C.E y la U.N.E.S.C.O evidenciaron que uno de los principales factores que limita la cobertura de acuerdos operativos en las cuencas transfronterizas de América Latina y el Caribe es la ausencia de datos e información científica, siendo un reto importante la gestión de conocimiento científico, de manera particular, en los acuíferos transfronterizos.

En este contexto, en el marco de la ciencia y tecnología nuclear con fines pacíficos, con el propósito de generar una base de datos/información científica que permita, en línea con lo establecido en el Plan de Desarrollo Económico Social – PDES 2021-2025, contribuir al fortalecimiento de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y al establecimiento de Mecanismos de Cooperación en Materia de Aguas Transfronterizas en el Estado Plurinacional de Bolivia, durante la gestión 2022 la ABEN implementó con éxito la Fase I del proyecto científico 'Prospección y mapeo de la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos en zonas transfronterizas piloto de las tres regiones hidrográficas del Estado Plurinacional de Bolivia mediante la aplicación de la hidrología isotópica, 2022-2025'.



RESULTADOS

Los resultados de la implementación de la Fase I – Gestión 2022 del proyecto científico de prospección y mapeo de la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos mediante la aplicación de la hidrología isotópica fueron:

- 1. La construcción de una línea de base de datos científicos de isótopos estables e inestables en el Estado Plurinacional de Bolivia.
- 2. La implementación de la etapa preliminar de dos proyectos piloto en zonas transfronterizas de las tres regiones hidrográficas de Bolivia: Sistema Hídrico lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y Salar de Coipasa TDPS, Sistema Acuífero Amazónico, Sistema Acuífero Yrenda-Toba-Tarijeño.
- 3. La conclusión de un proyecto piloto en la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez.

Asimismo, se dio inicio a la gestión de suscripción de un Convenio de Cooperación Interinstitucional con el Ministerio de Relaciones Exteriores (MRE), institución que dispondrá de los datos e información científica generados por la ABEN, con el propósito de establecer mecanismos de cooperación y la negociación en materia de Recursos Hídricos Transfronterizos y su Gestión Integrada.



1. LÍNEA DE BASE DE DATOS CIENTÍFICOS DE ISÓTOPOS ESTABLES E INESTABLES EN EL ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

Durante la gestión 2022, la ABEN priorizó la construcción de una línea de base de datos científicos de isótopos estables e inestables de estudios científicos realizados a escala nacional y en zonas trasfronterizas de las tres regiones hidrográficas de Bolivia, con el propósito de formular iniciativas, estudios y/o proyectos de investigación para la generación de información científica, en el marco de la tecnología nuclear con fines pacíficos que permita su uso como herramienta eficaz y eficiente en la evaluación y gestión integrada de los recursos hídricos transfronterizos en el Estado Plurinacional de Bolivia.

Resumen de los resultados obtenidos

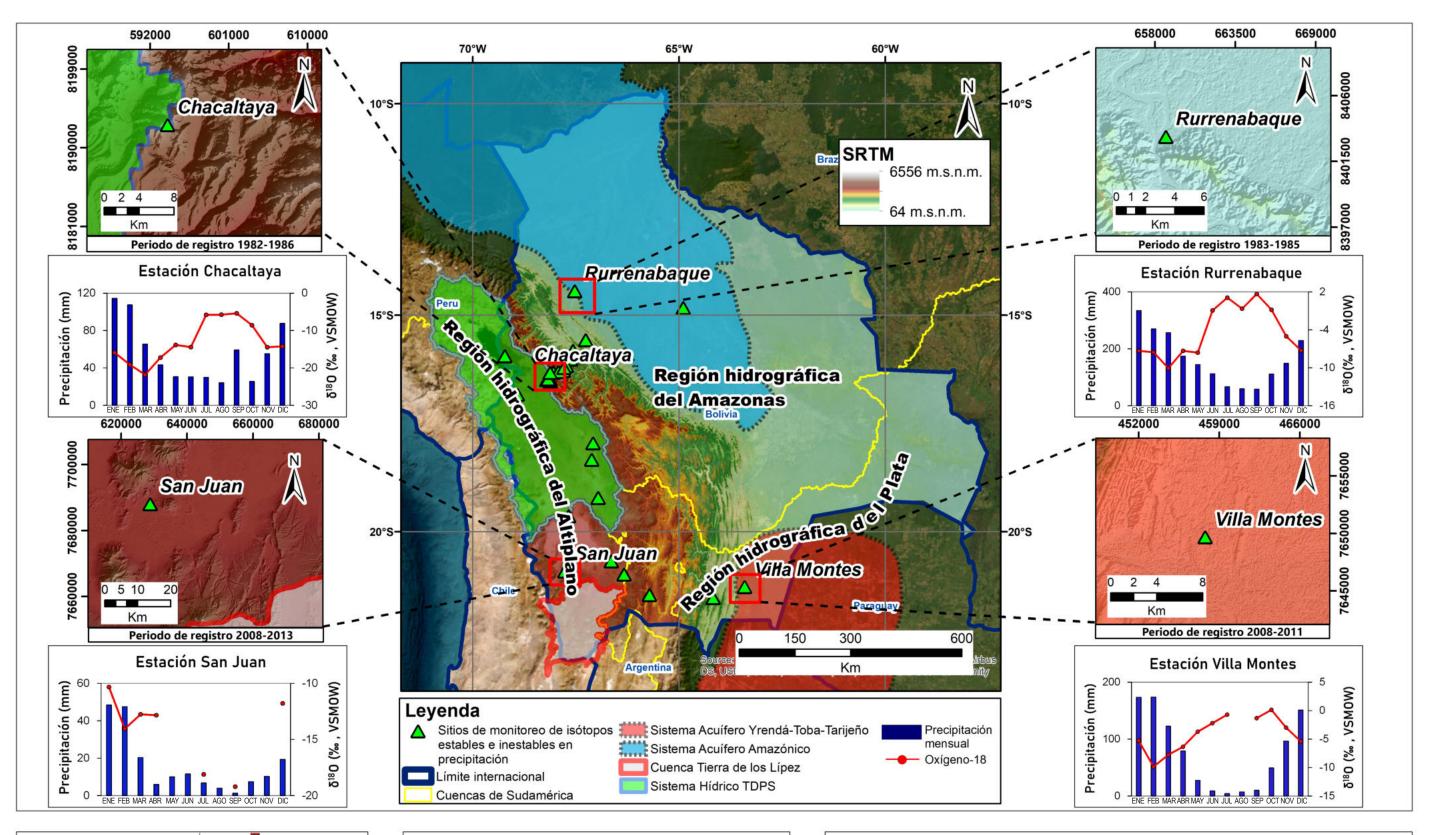
Entre los principales resultados obtenidos se destacan los siguientes:

- Se estructuró y creó una base de datos científicos geoespaciales (SIG) de 1.520 datos de isótopos estables e inestables en precipitación: 803 datos de Oxígeno-18 (δ¹8O), 624 datos de Deuterio (δ²H), 93 datos de Tritio (³H), de información recopilada y sistematizada de la plataforma de la Red Mundial sobre Isótopos en Precipitación (Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP por sus siglas en inglés I.A.E.A/W. M. O, 2021).
- Se generó la cartografía de la variación espacial y temporal de isótopos de δ¹8O, δ²H, y ³H en precipitación (Mapa N°1; Mapa N°2; Mapa N°3), identificándose un total de 26 sitios de monitoreo que eran operados de forma continua, entre 1982 y 2013, por diferentes instituciones internacionales, y que actualmente se encuentran inactivos.
- Se estructuró y creó una base de datos científicos geoespaciales (SIG) de 941 datos de isótopos estables e inestables: 367 datos de Oxígeno-18 (δ¹8O), 361 datos de Deuterio (δ²H), 63 datos de Nitrógeno-15 de la molécula de nitrato (δ¹5N_{NO3}), 63 datos de Oxígeno-18 de la molécula de Nitrato (δ¹5O_{NO3}), y 93 datos de Tritio (³H), recopilada y sistematizada de estudios, proyectos



e investigaciones científicas sobre recursos hídricos superficiales y subterráneos realizados a escala nacional y en zonas trasfronterizas de las tres regiones hidrográficas de Bolivia, en los últimos 20 años (Scandiffio & Álvarez, 1990; Chaffaut, 1998; Pasig et al. 2000; Abbott et al., 2003; Houston, 2007; Toro, 2018; Figueroa, 2018; Risacher et al., 1999; M.M.A.Y.A, 2016; Flores Avilés et al., 2022; Valdivieso et al., 2022).

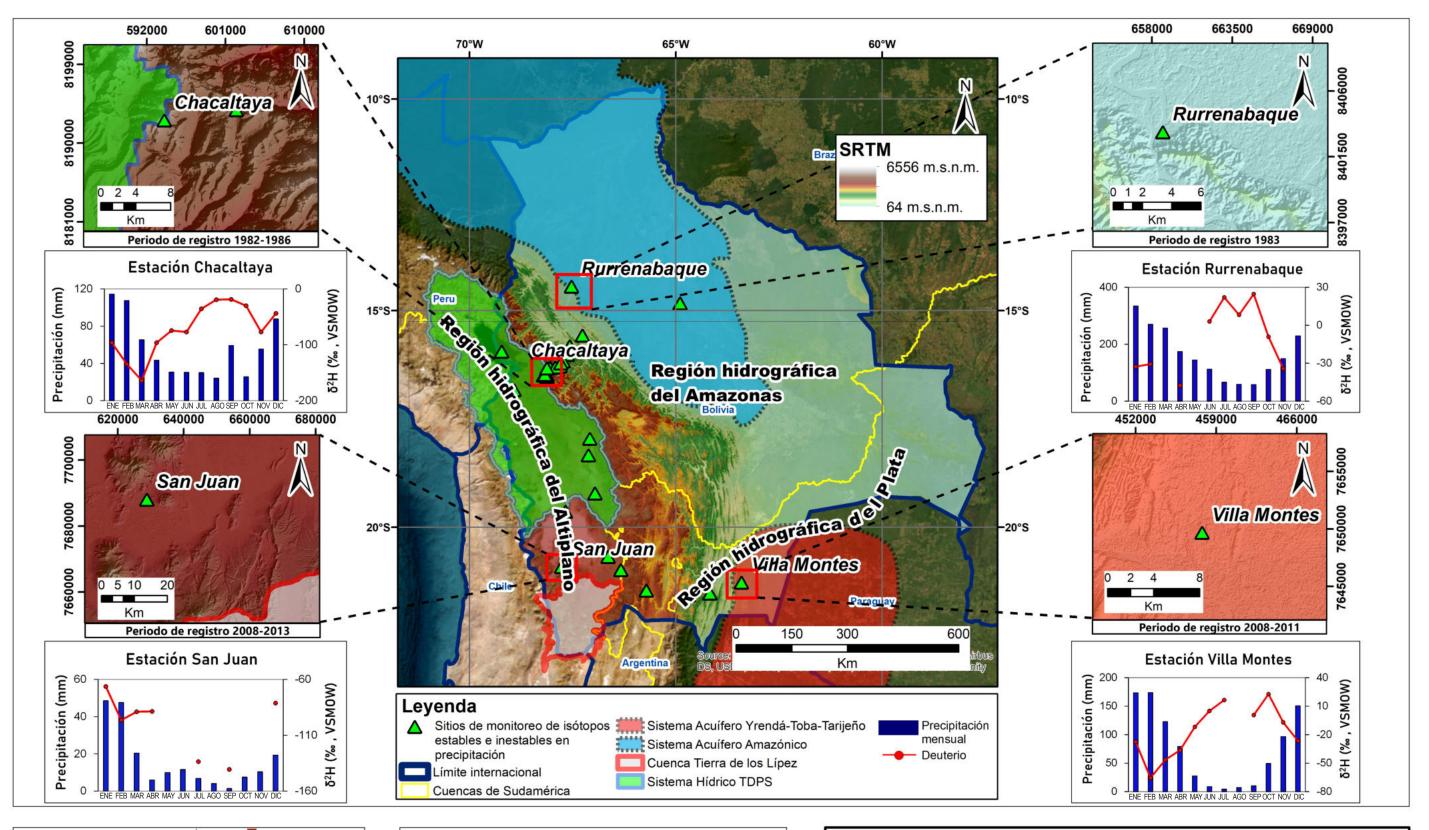
- Se generó la cartografía de la variación espacial y temporal de isótopos estables e inestables aplicados a la investigación de recursos hídricos superficiales y subterráneos, a escala nacional y en zonas transfronterizas de las tres regiones hidrográficas de Bolivia, con un enfoque en el Sistema Hídrico lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y Salar de Coipasa (TDPS), Cuenca Tierra de los Lípez, Sistema Acuífero Amazónico, y Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño (Mapa N° 4; Mapa N° 5; Mapa N° 7).





Línea de base de datos científicos de isótopos estables en Precipitación en el Estado Plurinacional de Bolivia.

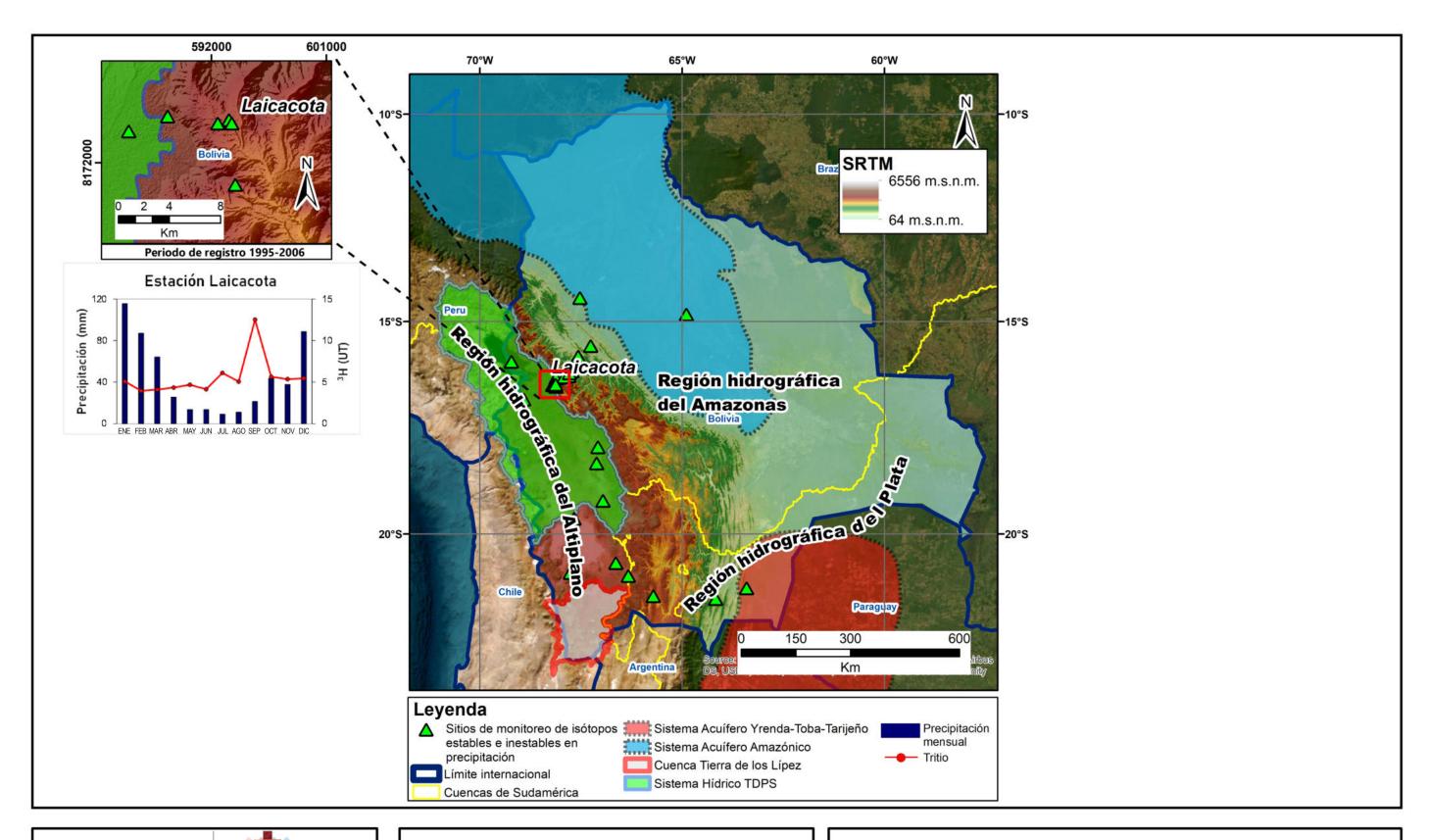
Mapa N°1. Variación espacial y temporal de Oxígeno-18 $(\delta^{18}O)$ correspondiente a estaciones representativas de las tres regiones hidrográficas de Bolivia.





Línea de base de datos científicos de isótopos estables en Precipitación en el Estado Plurinacional de Bolivia.

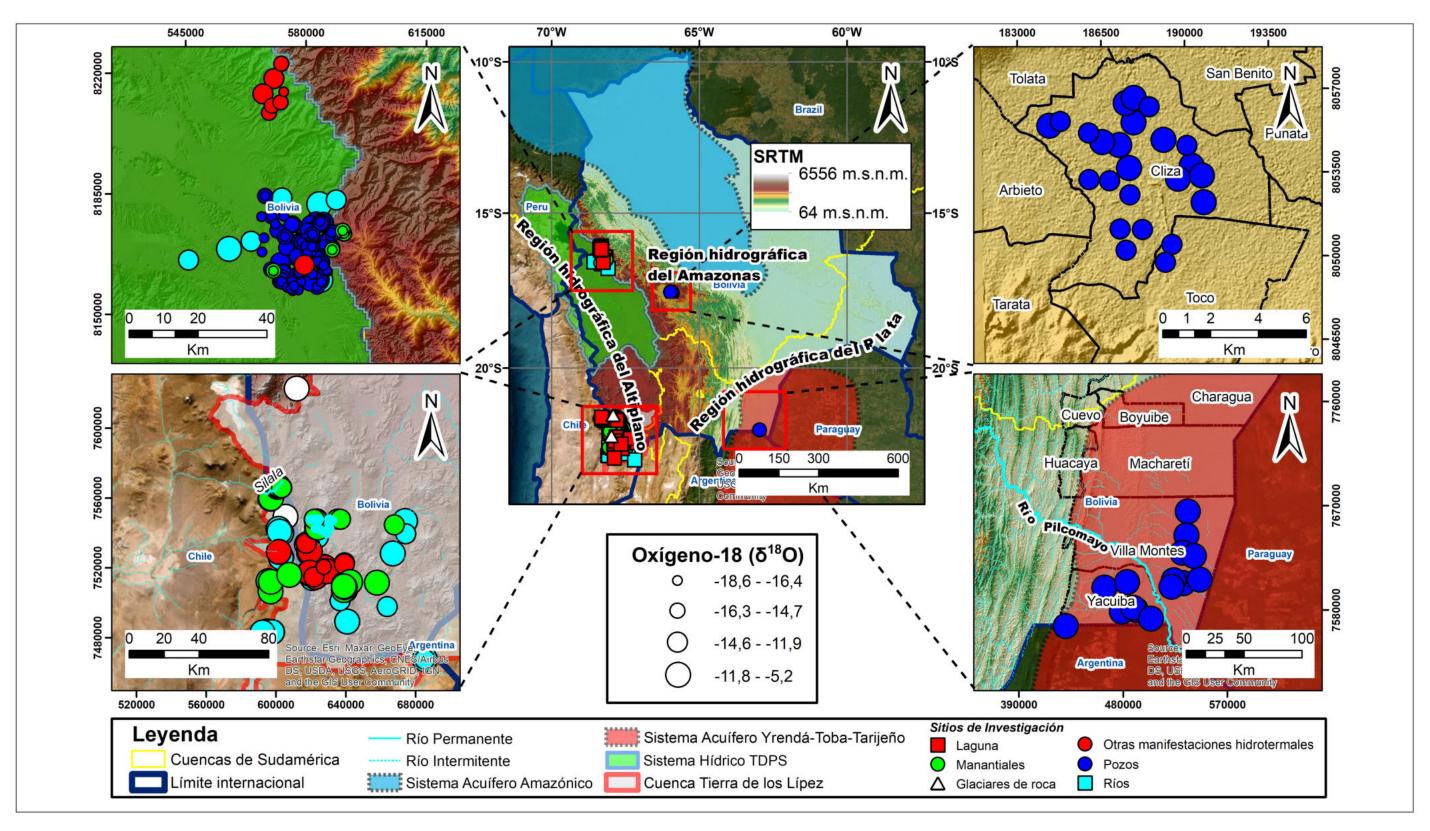
Mapa N°2. Variación espacial y temporal de Deuterio $(\delta^2 H)$ correspondiente a estaciones representativas de las tres regiones hidrográficas de Bolivia.





Línea de base de datos científicos de isótopos estables en Precipitación en el Estado Plurinacional de Bolivia.

Mapa N°3. Variación espacial y temporal de Tritio (³H) correspondiente a la Estación de Laicacota de la región hidrográfica del Altiplano.

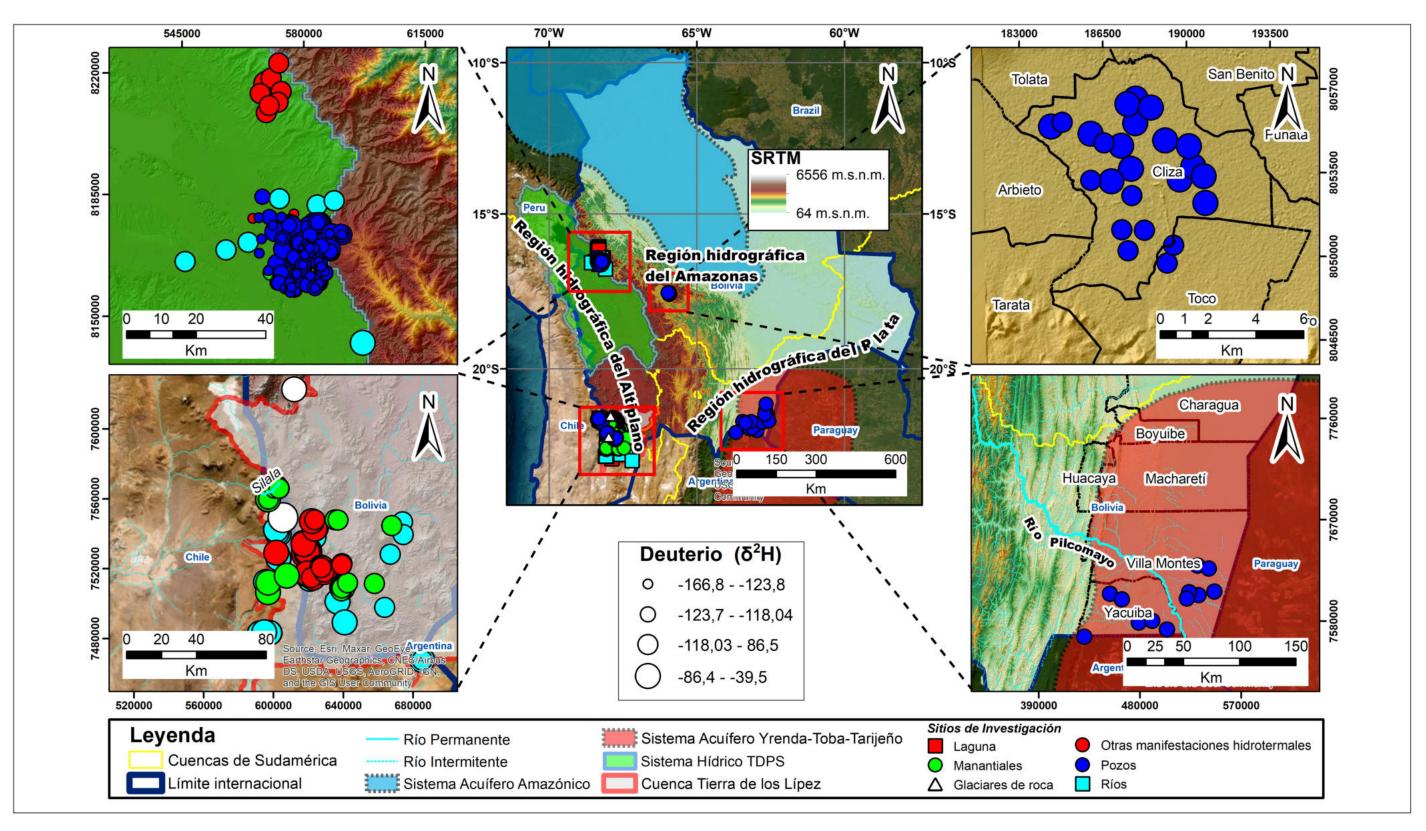






Línea de base de datos científicos de isótopos aplicados a la investigación de recursos hídricos, en el Estado Plurinacional de Bolivia.

Mapa N°4. Variación espacial de Oxígeno-18 (δ^{18} O) con base en los registros reportados en estudios científicos realizados en las tres regiones hidrográficas de Bolivia.

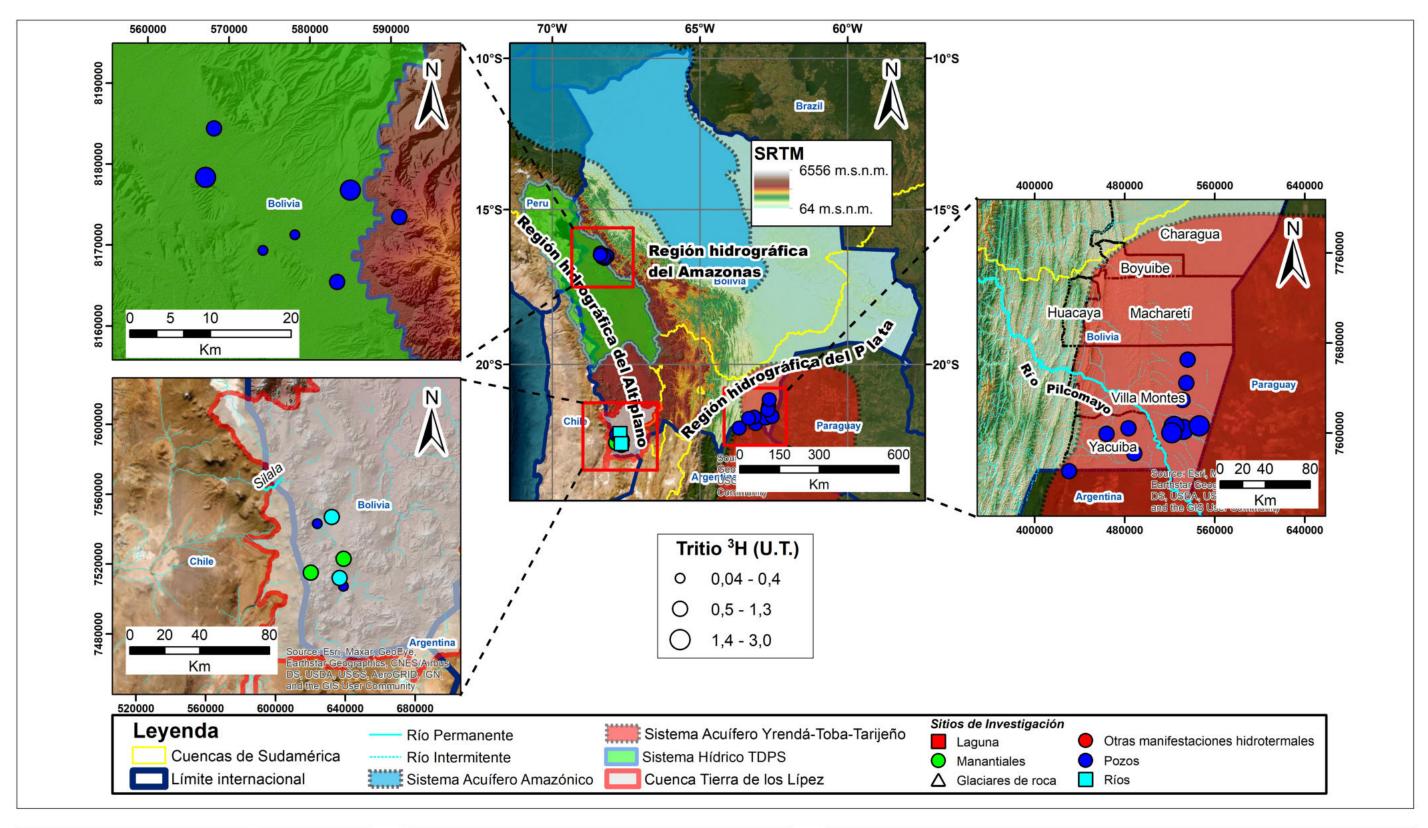






Línea de base de datos científicos de isótopos aplicados a la investigación de recursos hídricos, en el Estado Plurinacional de Bolivia.

Mapa N°5. Variación espacial de Deuterio (δ^2 H) con base en los registros reportados en estudios científicos realizados en las tres regiones hidrográficas de Bolivia.

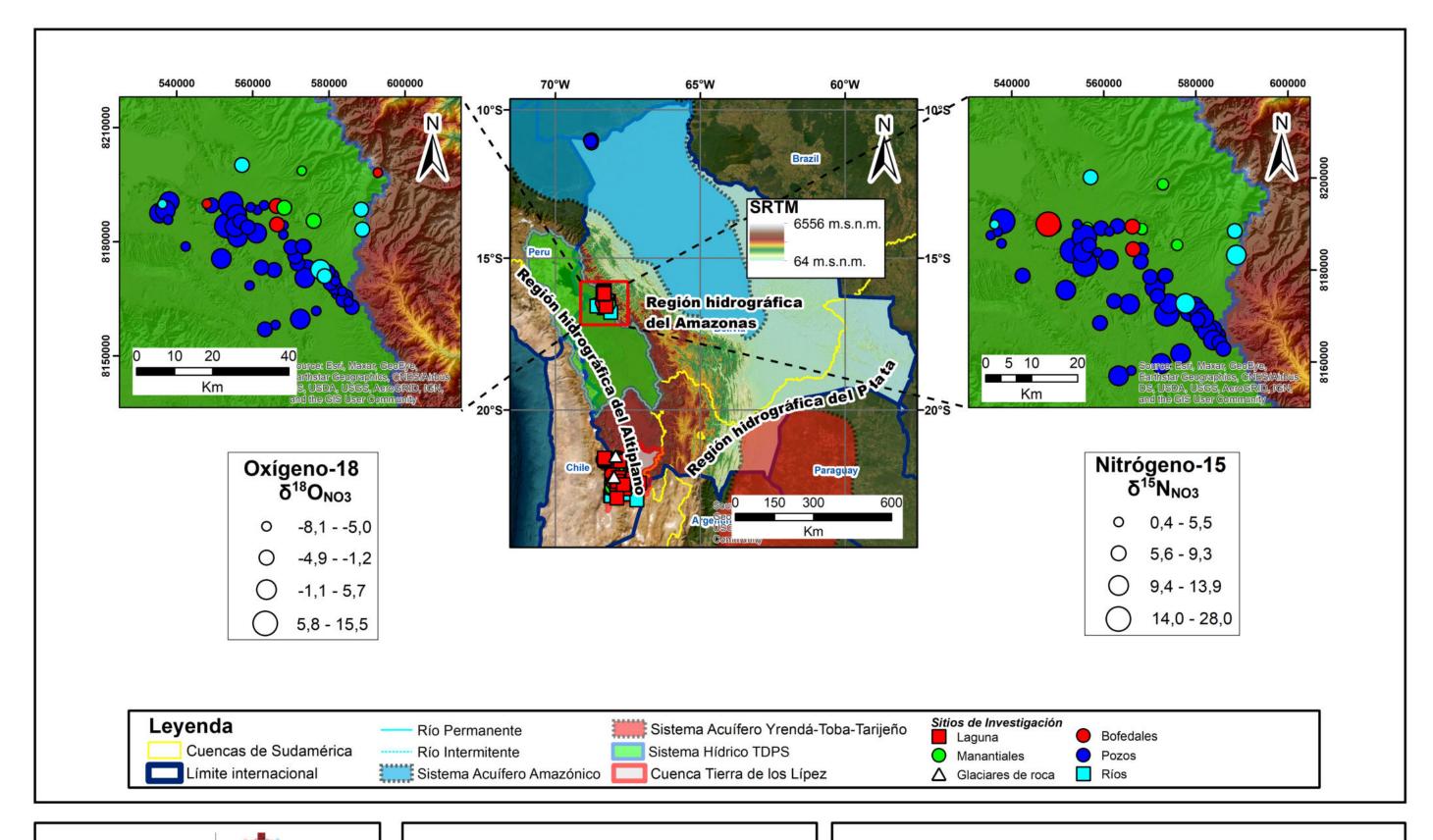






Línea de base de datos científicos de Isótopos aplicados a la investigación de recursos hídricos, en el Estado Plurinacional de Bolivia.

Mapa N°6. Variación espacial de Tritio (³H) con base en los registros reportados en estudios científicos realizados de las tres regiones hidrográficas de Bolivia.





Línea de base de datos científicos de isótopos aplicados a la investigación de recursos hídricos, en el Estado Plurinacional de Bolivia.

Mapa N°7. Variación espacial del Nitrogeno-15 y Oxígeno 18 de la molecula de nitrato $(\delta^{15}N_{NO3}; \delta^{18}O_{NO3})$ con base en los registros reportados en estudios científicos realizados en la región hidrográfica del Altiplano.



2. ETAPA PRELIMINAR PROYECTOS PILOTO EN ZONAS TRANSFRONTERIZAS DE LAS TRES REGIONES HIDROGRÁFICAS DE BOLIVIA

Durante la gestión 2022, la ABEN implementó con éxito la etapa preliminar de los proyectos piloto que se detallan a continuación.

Proyecto Piloto 1

'Implementación de colectores de precipitación para el Monitoreo de Isótopos Estables en Precipitación, en las tres regiones hidrográficas de Bolivia'.

Áreas de intervención

- Región Hidrográfica del Altiplano Sistema Hídrico Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó y Salar de Coipasa TDPS (sector: municipios de La Paz y Oruro).
- Región Hidrográfica del Amazonas Sistema Acuífero Amazónico (sector: municipio de Cobija).
- Región Hidrográfica del Plata Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño (sector: municipios de Yacuiba y Villamontes, Mapa N°14).

Relevancia del proyecto piloto

En el Estado Plurinacional de Bolivia, de acuerdo con la base de datos de la Red Mundial sobre Isótopos en Precipitación –Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP por sus siglas en inglés – se cuentan con registros de isótopos estables de Deuterio y Oxígeno-18, y de Tritio, de un total de 26 sitios de monitoreo (colectores de precipitación) que eran operados de forma continua, entre 1982 y 2013, resultando importante dar continuidad a la generación de información científica sobre las variaciones temporales y espaciales de isótopos en precipitación para el desarrollo y optimización de estudios de disponibilidad de los recursos hídricos mediante la aplicación de la hidrología isotópica.



Por lo que, en una etapa preliminar, se realizó un diagnóstico sobre el estado de la generación de datos científicos de isótopos estables en la precipitación, en sitios de monitoreo localizados en zonas transfronterizas de las tres regiones hidrográficas de Bolivia para el posterior desarrollo de una propuesta de implementación de colectores de precipitación para el Monitoreo de Isótopos Estables en Precipitación.

Resumen de los resultados obtenidos

En el marco de este proyecto piloto, durante la gestión 2022, se lograron los siguientes resultados:

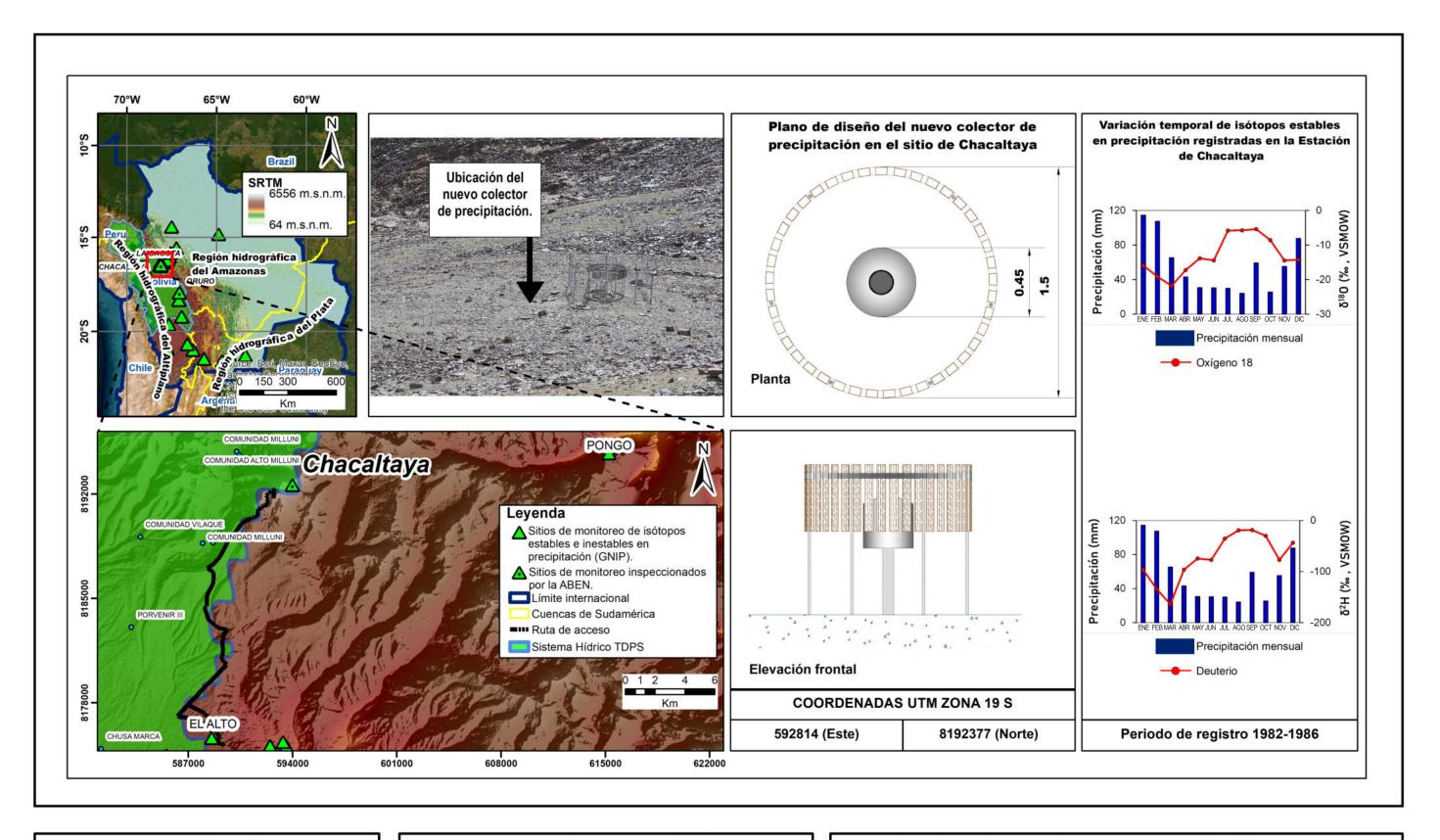
- Se realizaron visitas de inspección a estaciones GNIP y sititos de monitoreo meteorológico localizados dentro del Sistema Hídrico TDPS y el Sistema Acuífero Amazónico para la verificación de: i) la ubicación física del colector de precipitación, ii) el estado del colector de precipitación, iii) la protección contra la evaporación y iv) los aspectos logísticos y de seguridad (accesibilidad o disponibilidad de personal en la estación).
- Se estructuró y creó una geodatabase (SIG) con la ubicación, rutas de acceso y el tipo de los nuevos colectores de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación, en los sitios de: a) Chacaltaya (Mapa N° 8), b) Laicacota (Mapa N° 9), c) Oruro (Mapa N° 10), del Sistema Hídrico TDPS, y d) Cobija-Universidad (Mapa N° 11), e) Cobija-Aeropuerto (Mapa N°12), f) Cobija-INIAF (Mapa N°13), del Sistema Acuífero Amazónico.
- Se generó la cartografía (Mapas Nº 8 al 13) para el desarrollo de una Propuesta de Implementación de colectores de precipitación para el monitorie de isótopos en precipitación, en los sitios definidos dentro del Sistema hídrico TDPS y del Sistema Acuífero Amazónico.



Perspectivas futuras

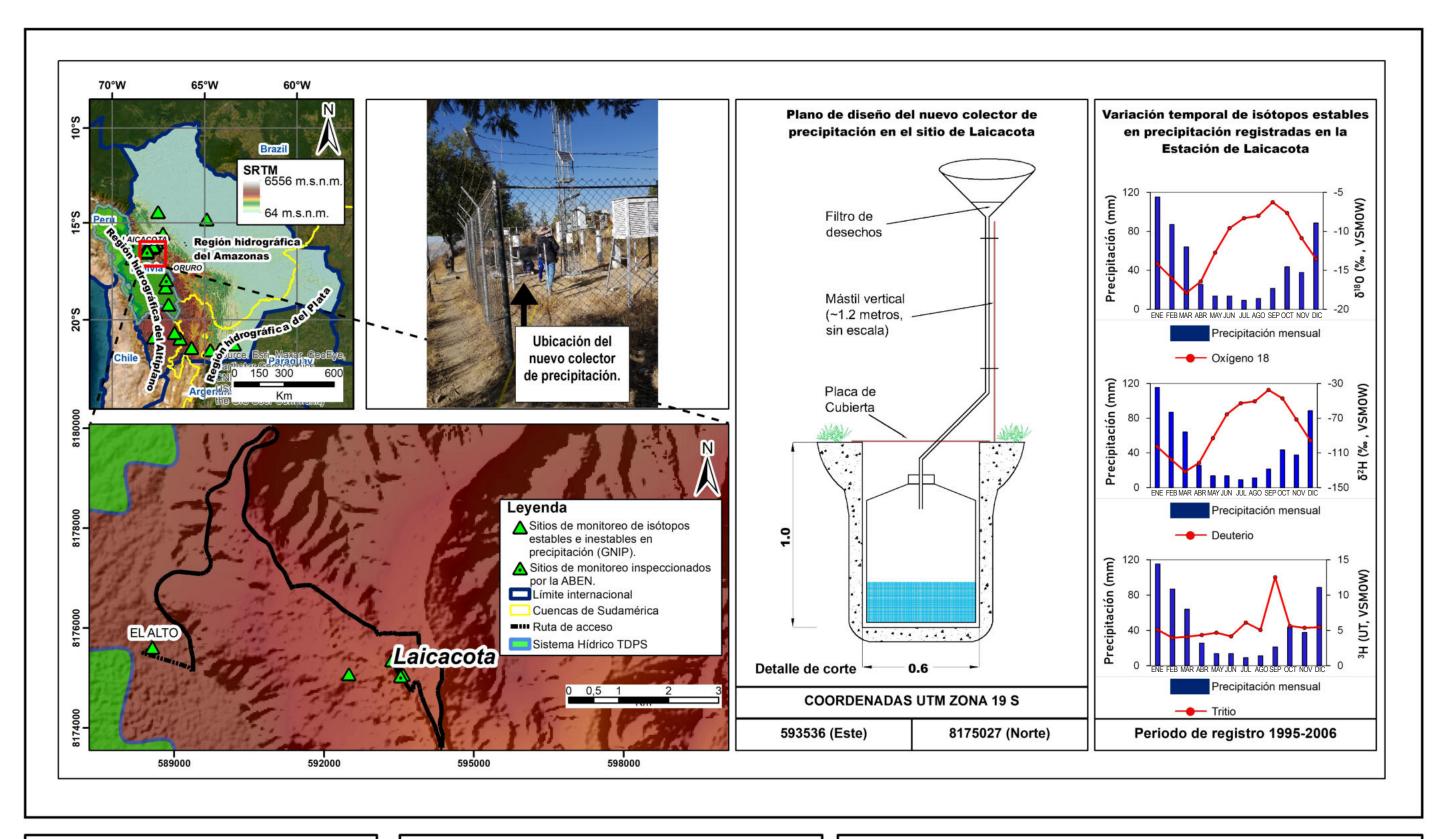
Para la gestión 2023, la ABEN prevé:

- Realizar las gestiones para llevar a cabo la Implementación de colectores de precipitación para el monitoreo de isótopos estables en precipitación, principalmente Oxígeno -18 y Deuterio, en los sitios definidos dentro de las zonas transfronterizas de las tres regiones hidrográficas del Estado Plurinacional de Bolivia: Sistema Hídrico TDPS, Sistema Acuífero Amazónico y Sistema Yrendá-Toba-Tarijeño.
- Fortalecer las competencias de las instancias correspondientes (Entidades de Coordinación), a través de talleres de capacitación en la recolección de muestras de lluvia para la medición de isótopos estables de Oxígeno-18 y Deuterio, con la finalidad de coadyuvar a la sostenibilidad en el tiempo del monitoreo de isótopos en precipitación en los sitios definidos.



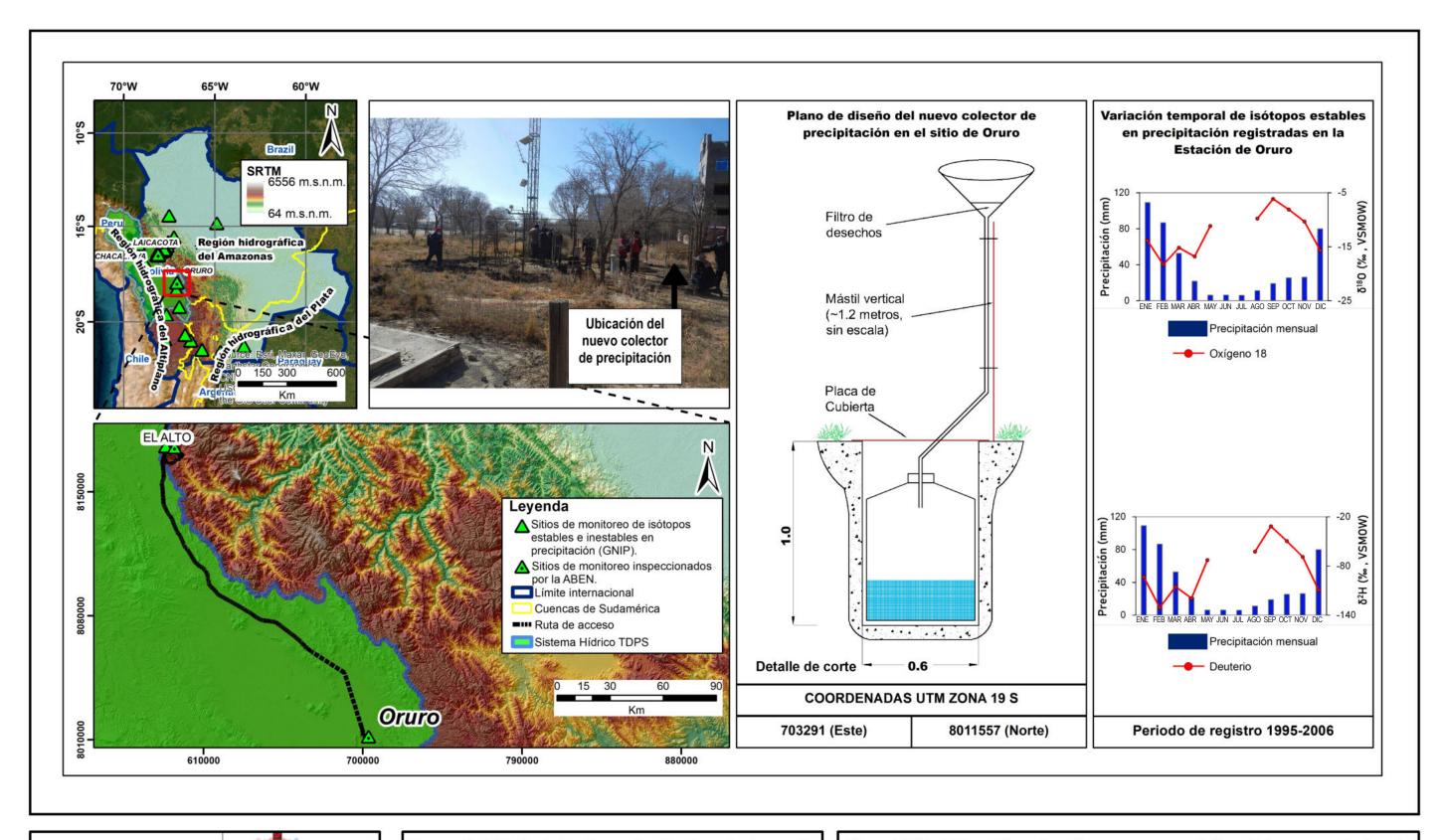


Mapa N°8. Ubicación, rutas de acceso, y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de Chacaltaya (La Paz), ubicado dentro del sistema hídrico TDPS.



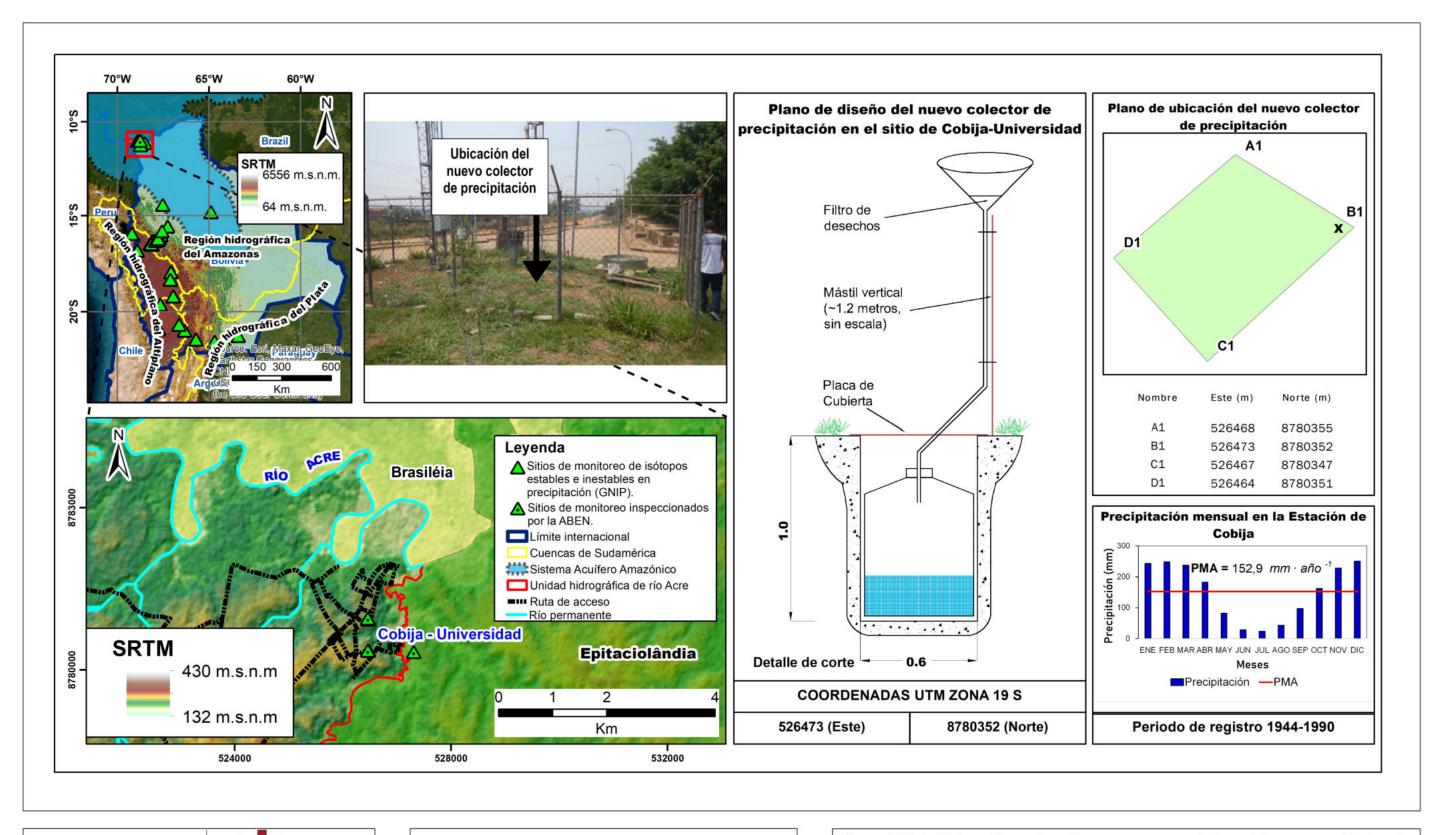


Mapa N°9. Ubicación, rutas de acceso, y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de Laicacota (La Paz), ubicado dentro del Sistema Hídrico TDPS.





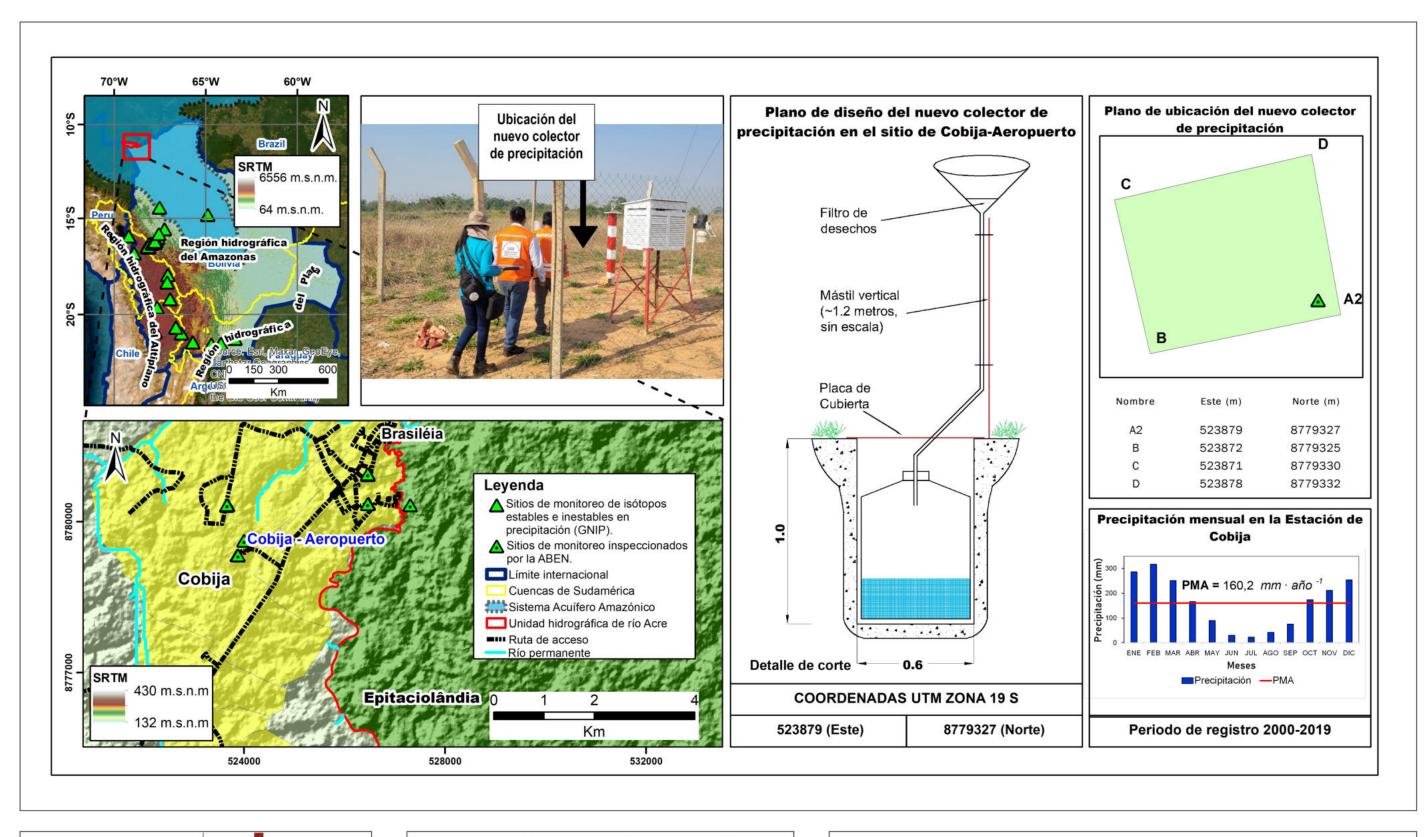
Mapa N°10. Ubicación, rutas de acceso, y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de Oruro, ubicado dentro del Sistema Hídrico TDPS.





Proyecto Piloto 1: Implementación de colectores de precipitación para el Monitoreo de Isótopos Estables en Precipitación, en las tres regiones hidrográficas de Bolivia.

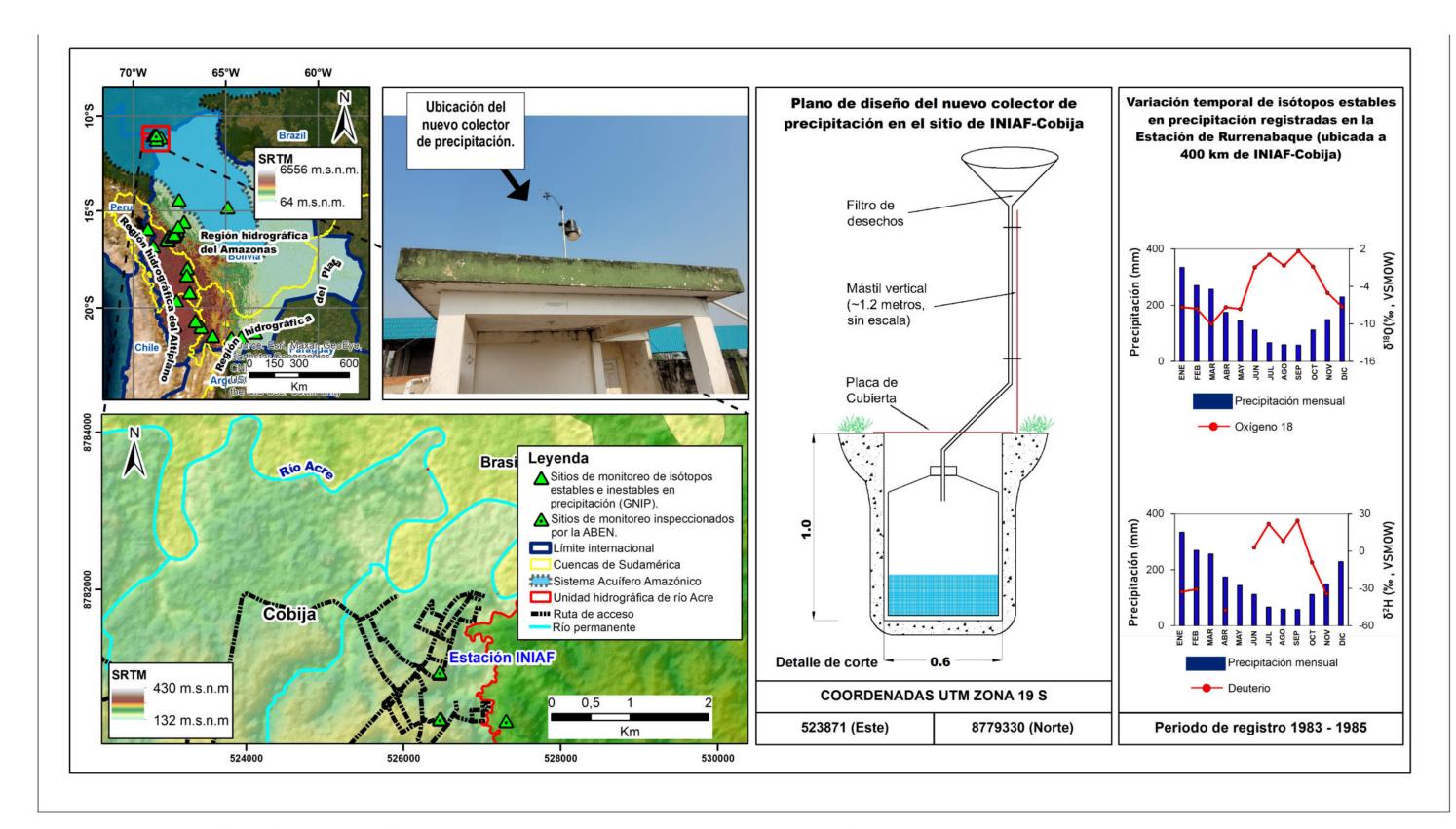
Mapa N°11. Ubicación, rutas de acceso, y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de Cobija-Universidad, ubicado dentro del Sistema Acuífero Amazónico.





Proyecto Piloto 1: Implementación de colectores de precipitación para el Monitoreo de Isótopos Estables en Precipitación, en las tres regiones hidrográficas de Bolivia.

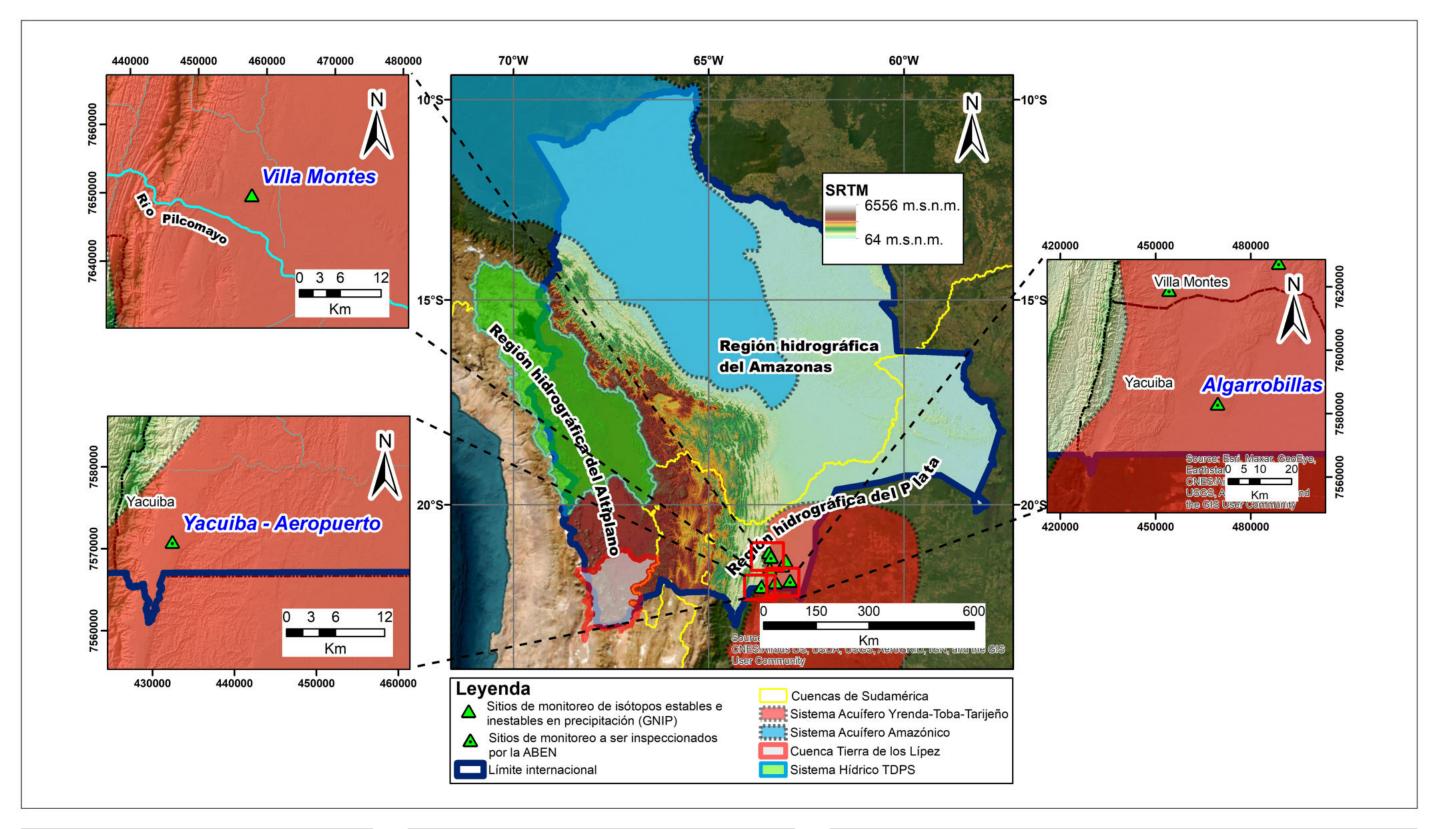
Mapa N°12. Ubicación, rutas de acceso, y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de Cobija-Aeropuerto, ubicado dentro del Sistema Acuífero Amazónico.





Proyecto Piloto 1: Implementación de colectores de precipitación para el Monitoreo de Isótopos Estables en Precipitación, en las tres regiones hidrográficas de Bolivia.

Mapa N°13. Ubicación, rutas de acceso, y prototipo del nuevo colector de precipitación para el monitoreo de isótopos en precipitación en el sitio de INIAF-Cobija, ubicado dentro del Sistema Acuífero Amazónico.







Mapa N°14.Ubicación de los sitios de monitoreo a ser inspeccionados por la ABEN en los municipios de Yacuiba y Villamontes, ubicados dentro del Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño.



Proyecto Piloto 2

'Estudio de Interacción Agua Superficial - Subterránea del Acuífero de la Cuenca Amazónica, en el Estado Plurinacional de Bolivia, utilizando un enfoque multidisciplinario de trazadores Isotópicos (222Rn, δ18O, δ2H) e hidroquímicos'.

Área de intervención

- Región Hidrográfica del Amazonas - Sistema Acuífero Amazónico (sector municipio de Cobija).

Relevancia del proyecto piloto

La ausencia de información científica sobre las interconexiones hidráulicas entre las reservas hídricas superficiales y subterráneas del Sistema Acuífero Amazónico, localizado entre el municipio de Cobija y las ciudades brasileñas de Brasiléia y Epitaciolândia, limita el intercambio de información y compatibilización de datos entre el Estado Plurinacional de Bolivia y Brasil, resultando importante la identificación y cuantificación de los mecanismos de interacción agua superficial-subterránea y su rol en los ciclos hidrológicos, mediante trazadores isotópicos de Radón-222 (222Rn), Oxígeno-18 (δ¹⁸O) y Deuterio (δ²H), especialmente durante la época seca. Por lo que en una etapa preliminar se realizó la prospección y mapeo integrado de fuentes de aguas superficiales y subterráneas mediante la aplicación de la hidrología isotópica con la meta de definir una red de monitoreo y el posterior diseño de misiones científicas que se efectuarán tomando como parámetro un año hidrológico.



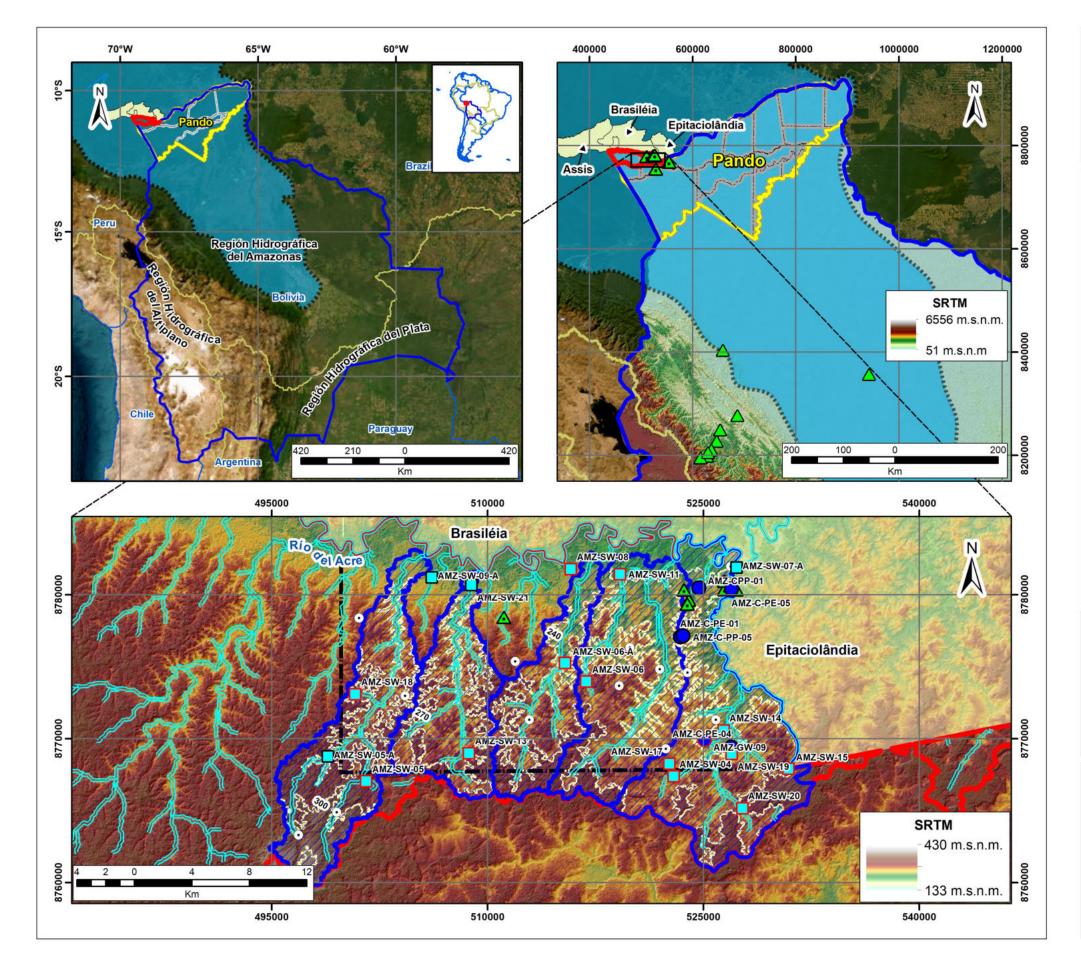
Resumen de los resultados obtenidos

En el marco de este proyecto piloto, durante la gestión 2022, se lograron los siguientes resultados:

- Se realizaron visitas de inspección de campo para la validación y mapeo integrado, mediante la aplicación de la hidrología isotópica, de 24 sitios (fuentes de aguas superficiales y subterráneas), definiéndose sobre la base de un diseño y análisis técnico-científico 14 sitios de investigación estratégicos (sitios de investigación inspeccionados), donde se realizaron las tareas de: a) mediciones in-situ de parámetros físico-químicos, b) recolección de muestras, y c) mediciones de Radón-222.
- Se estructuró y creó una geodatabase (SIG) con la ubicación, rutas de acceso y la información científica generada en cada sitio de investigación del Sistema Acuífero Amazónico (sector municipio de Cobija).
- Se generó la cartografía de la variación espacial de Radón-222 en el Sistema Acuífero Amazónico (sector municipio de Cobija).
- Se contribuyó a la consolidación del Project Identification Form (PIF) del Acuífero Amazónico "Hacia una mejor comprensión de los sistemas de acuíferos amazónicos para su protección y gestión sostenible" que el Ministerio de Relaciones Exteriores (MRE) viene gestionando, como miembro de la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica, a través del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM).

Perspectivas futuras

- El presupuesto requerido para la ejecución de este proyecto piloto será incluido en la Propuesta Formal del Proyecto "Hacia una mejor comprensión de los sistemas de acuíferos amazónicos para su protección y gestión sostenible" que el MRE viene gestionando a través del FMAM.



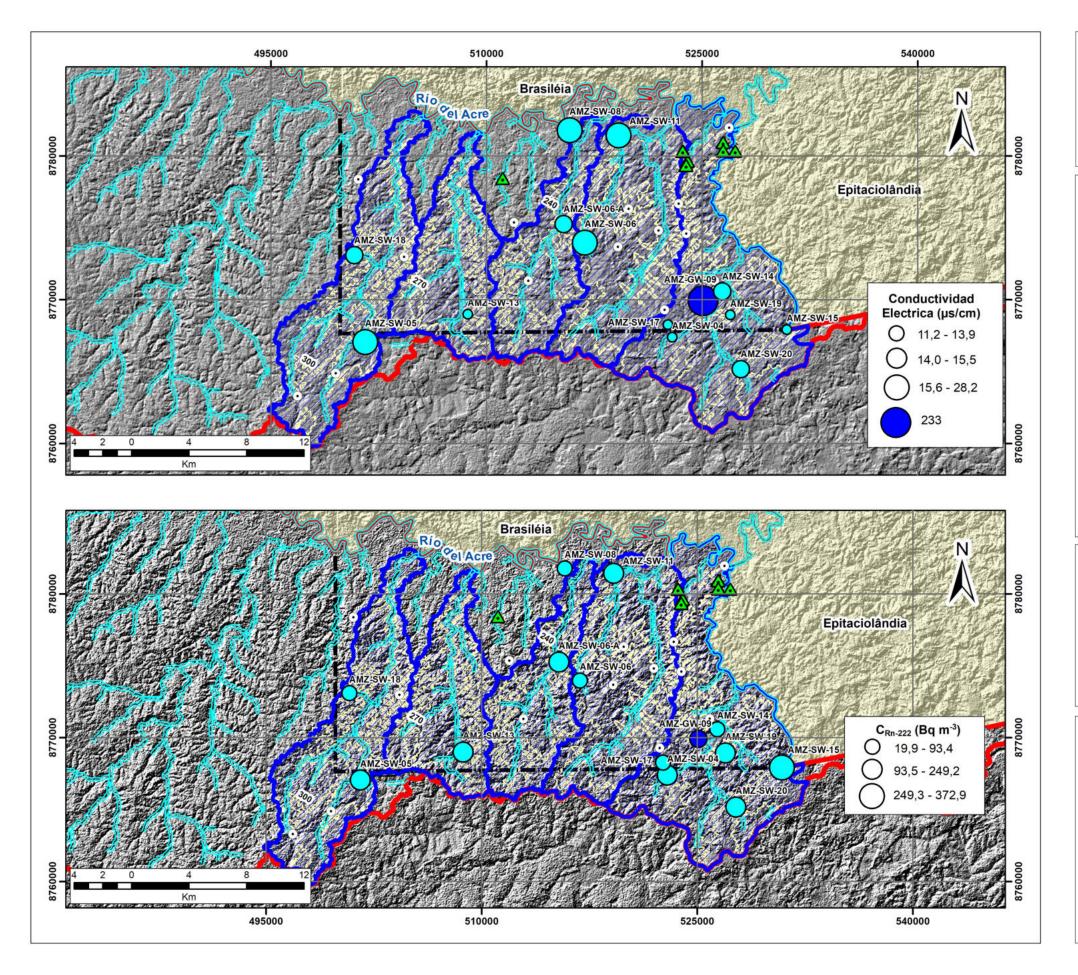






Proyecto Piloto 2:Estudio de Interacción Agua Superficial - Subterránea del Acuífero de la Cuenca Amazónica, en el Estado Plurinacional de Bolivia, utilizando un enfoque multidisciplinario de trazadores Isotópicos (222 Rn, δ^{18} O, δ^{2} H) e hidroquímicos.

Mapa N°15. Contexto geográfico de las unidades hidrológicas de estudio (superior izquierdo) en Sudamérica y en el Sistema Acuífero Amazónico, (superior derecho) dentro del municipio de Cobija. (Inferior) Ubicación de los sitios de investigación en los cuales la ABEN realizó las tareas de: i) validación y mapeo integrado, ii) mediciones in-situ, iii) recolección de muestras, y iv) mediciones de Radón-222.







Leyenda

Microcuenca del Río Acre

Municipio de Cobija

Ciudades de Brasil

Unidades hidrológicas de estudio

Curvas de nivel c/30

- Río Intermitente

Río Permanente

Centros Poblados

Sitios de monitoreo inspeccionados por

Sitios de monitoreo de isótopos estables e inestables en precipitación (GNIP)

Sitios de Investigación inspeccionados

Ríos

Pozos

Proyecto Piloto 2: Estudio de Interacción Agua Superficial - Subterránea del Acuífero de la Cuenca Amazónica, en el Estado Plurinacional de Bolivia, utilizando un enfoque multidisciplinario de trazadores Isotópicos (222 Rn, δ^{18} O, δ^{2} H) e hidroquímicos.

Mapa N°16. Variación espacial de: (arriba) la Conductividad eléctrica (CE) y (abajo) de las concentraciones de actividades de Radón-222 (²²²Rn) en el Sistemas Acuífero Amazónico (sector Municipio de Cobija).



3. CONCLUSIÓN PROYECTO PILOTO EN LA CUENCA TRANSFRONTERIZA TIERRA DE LOS LÍPEZ

Durante la gestión 2022, la ABEN implementó con éxito la etapa preliminar de los proyectos piloto que se detallan a continuación.

Proyecto Piloto 3

'Modelo del funcionamiento hidrogeológico del Acuífero Transfronterizo de la Cuenca Tierra de los Lípez mediante la aplicación de la Hidrología Isotópica: Proyecto de Cooperación Técnica BOL 7005 del Estado Plurinacional de Bolivia'.

Área de intervención

- Región Hidrográfica del Altiplano - Cuenca Tierra de los Lípez (sector Laguna Colorada).

Relevancia del proyecto piloto

La Cuenca Tierra de los Lípez es un importante reservorio de agua dulce transfronteriza compartida entre el Estado Plurinacional de Bolivia, Chile y Argentina (Mapa N°17). La comprensión limitada sobre el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas acuíferos es uno de los principales factores que limita la cobertura de acuerdos operativos específicos en esta cuenca, siendo un reto importante la gestión de conocimiento científico entre Bolivia, Chile y Argentina.

En particular, este proyecto piloto tuvo por objetivo desarrollar un modelo hidrogeológico sobre los procesos hidrológicos clave que controlan la cantidad de las aguas subterráneas en la Cuenca Tierra de los Lípez (zona piloto Laguna Colorada), en el Estado Plurinacional de Bolivia, basado en evidencia científica de isótopos estables de: Oxígeno-18 (δ^{18} O), Deuterio (δ^{2} H), Carbono-13 (δ^{13} C)



y de isótopos inestables de: Tritio (³H), Radiocarbono (¹⁴C) y Radón-222 (²²²Rn) generada al final de la época lluviosa de 2019 y durante la época de estiaje de 2021, y combinada con información hidrogeológica, hidrológica, litológica, geofísica y topográfica.

Resumen de los resultados obtenidos

En el marco de este proyecto piloto, el análisis formal de la evidencia científica isotópica, a través de modelos matemáticos, permitió determinar que:

- El sistema acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez (zona piloto Laguna Colorada) consiste en: i) un subdominio poroso compuesto por arenas, gravas y arcillas y un ii) subdominio fracturado controlado por la presencia de sistemas estructurales (fallas).
- La recarga de las aguas subterráneas del sistema acuífero se origina en la cadena montañosa de la Cordillera Occidental, a una altitud de 4.750 a 6.000 m.s.n.m.
- La recarga media anual por precipitación en el subdominio poroso del sistema acuífero es de 7 a 8 mm·año-1, con un efecto de evaporación fuerte.
- El 58% del volumen de aguas subterráneas del subdominio poroso que descarga hacia la Laguna Colorada se evapora, estimándose una descarga de 165.950 921.945 m³ año-1

Por otra parte, desde la zona de recarga y en la trayectoria de flujo de las aguas subterráneas hacia la Laguna Colorada, se evidenció que:

- En el Sudoeste del sistema acuífero, las aguas subterráneas presentan una mezcla del 39 al 76 % de aguas meteóricas producto del deshielo de glaciares (f_{GR2}), del 21 al 58 % de aguas de precipitación reciente (f_{FLTatio}), y una mínima influencia, del 3 al 5 %, de fluidos geotermales (f_{SM-1}) (Mapa N°20).
- En el Noreste y Noroeste del sistema acuífero, las aguas subterráneas presentan una mezcla del 6 al 94 % de aguas correspondientes a manifestaciones hidrotermales (f_{M-118-A}), del 5 al 91 % de aguas meteóricas producto del deshielo de glaciares de roca (f_{GR2}), y una mínima influencia, del 1 al 4 %, de fluidos geotermales (f_{SM-1}) (Mapa N° 20).



Finalmente:

- Se determinó que las concentraciones de ²²²Rn detectadas en las aguas subterráneas del subdominio fracturado (6,4 a 38,1 kBq·m-3) están relacionadas con las actividades de ²²⁶Ra preferencialmente distribuidas a lo largo del sistema estructural (fallas) (Mapa N° 21).
- Se observaron aguas subterráneas con edades aparentes de 4.612 a 21.603 años, lo cual implica que la recarga del sistema acuífero está asociada con el último evento glacial-interglaciar del Altiplano boliviano caracterizado por la fase lacustre Tauca.
- En base a la evidencia científica isotópica generada y al análisis formal científico de datos hidrológicos, litológicos, geofísicos hidrogeológicos y topográficos, se determinó que el sistema acuífero limita: i) en su frontera norte con los afloramientos rocosos ubicados en el Municipio de San Pedro de Quemes, ii) en su frontera oriental con los afloramientos rocosos ubicados al este del municipio de Colcha K y dentro del Municipio de San Pablo de Lípez, iii) en su frontera occidental con los afloramientos rocosos mayormente ubicados en Chile, y iv) en su frontera sur con los afloramientos rocosos ubicados al sur del Municipio de San Pablo de Lípez.
- Se generó la cartografía (Mapas N°17 al 23) y consolidó una base organizada de datos geoespaciales SIG para el desarrollo de futuras investigaciones sobre recursos hídricos subterráneos y/o para el apoyo de acciones a nivel local, regional, nacional, lo cual favorecerá el intercambio de información/datos científicos entre Bolivia, Chile y Argentina, coadyuvando al establecimiento de acuerdos operativos específicos en la Cuenca Transfronteriza Tierra de los Lípez.

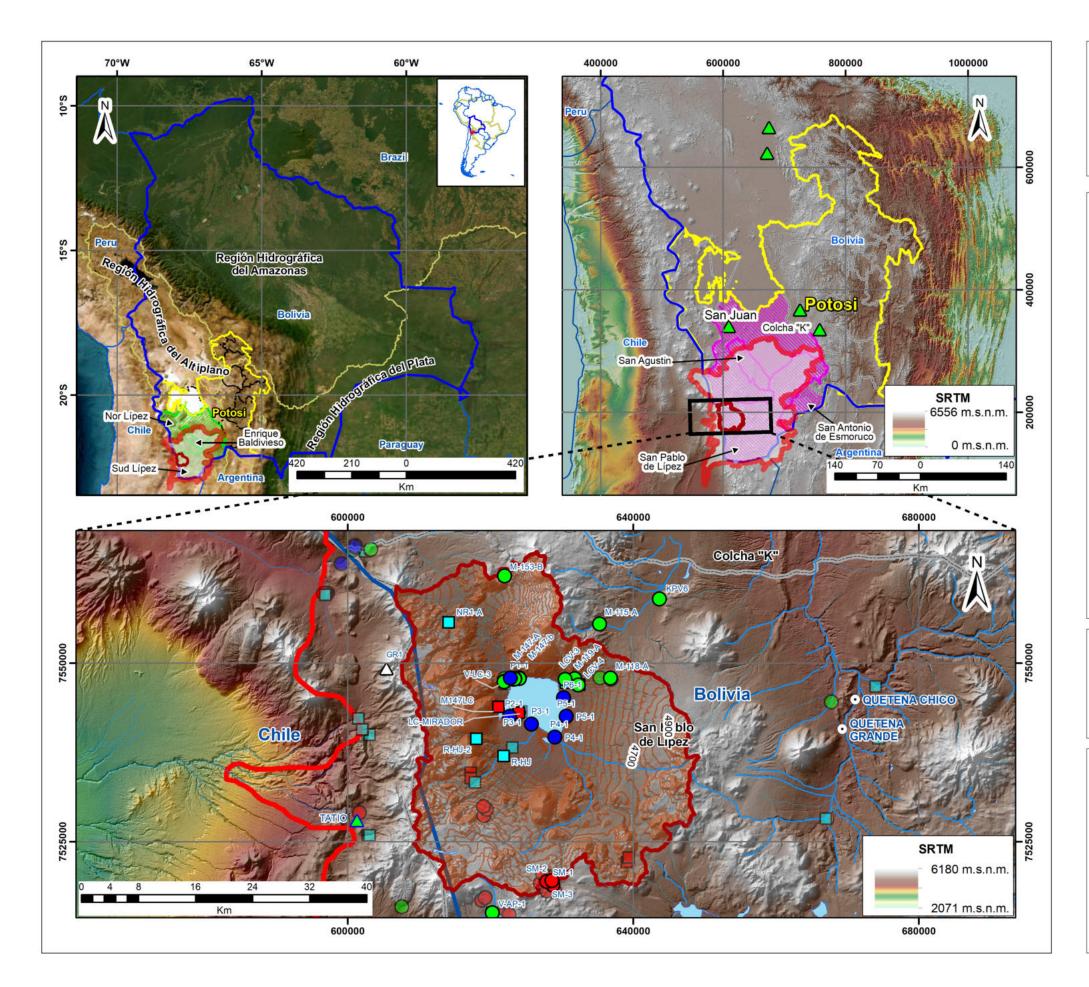
Perspectivas futuras

- En el marco del Convenio de Cooperación Interinstitucional entre la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) y el Ministerio de Relaciones Exteriores (MRE), el MRE dispondrá de los datos e información científica generada por la ABEN, con el propósito de establecer mecanismos de cooperación y la negociación en materia de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos



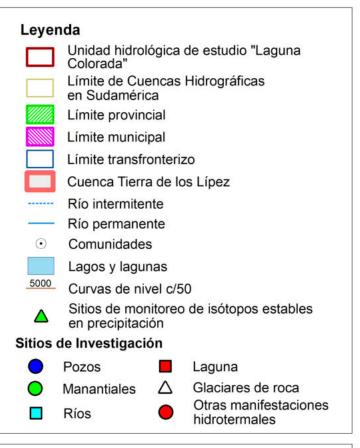
Transfronterizos, ante el Comité Intergubernamental Coordinador de la Cuenca Tierra de los Lípez.

- Se prevé gestionar cooperación externa para dar continuidad al desarrollo de la investigación científica mediante la aplicación de la hidrología isotópica, con el propósito de mejorar la robustez del modelo del funcionamiento hidrogeológico del sistema acuífero tomando en cuenta los límites del Sistema Acuífero Transfronterizo de la Cuenca Tierra de los Lípez (Mapa N°23).

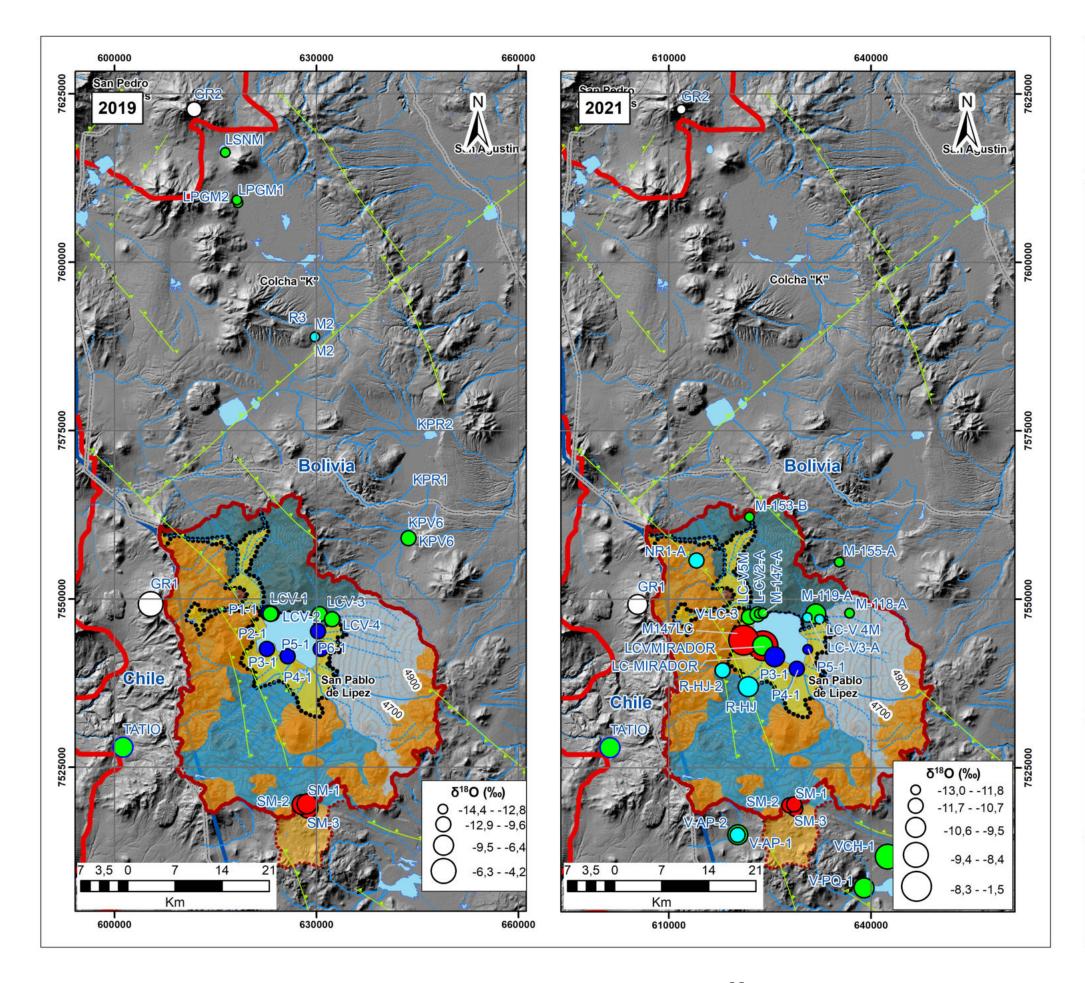






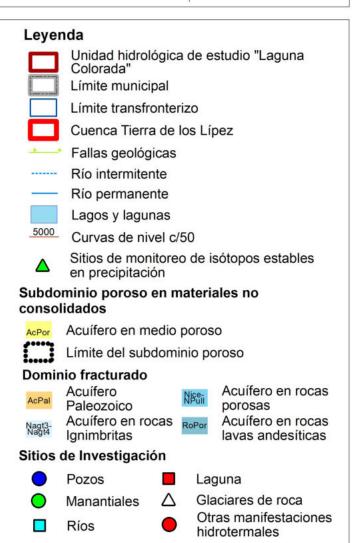


Mapa N°17. Contexto geográfico de la unidad hidrológica de estudio. (superior izquierdo) Sud América y región hidrográfica del Altiplano, (superior derecho) dentro de los municipios de la Mancomunidad Gran Tierra de los Lípez. (Inferior) Ubicación de los sitios de investigación con información científica de isótopos de: i) estudios realizados antes de 2019 (transparencia al 50%) y aquellos ii) generados por la ABEN durante 2019 y 2021.

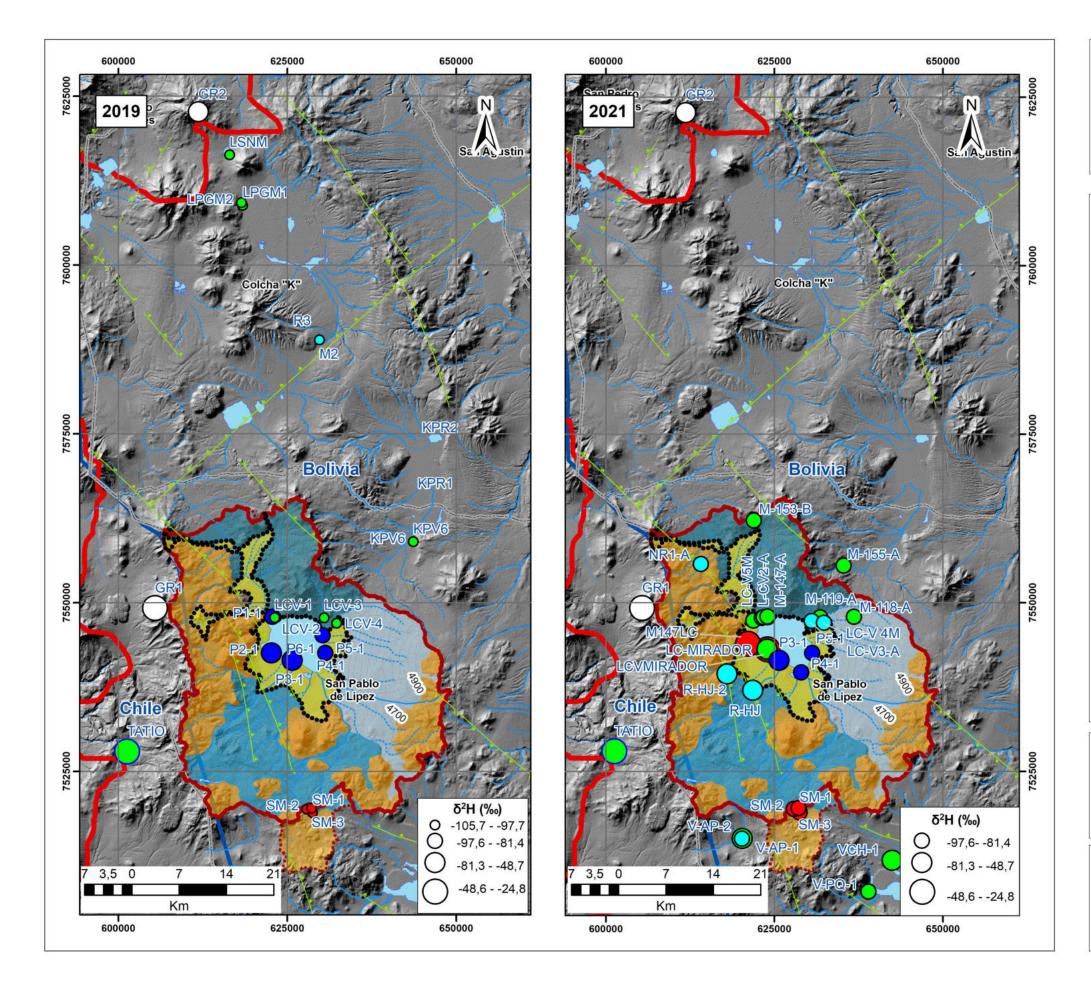






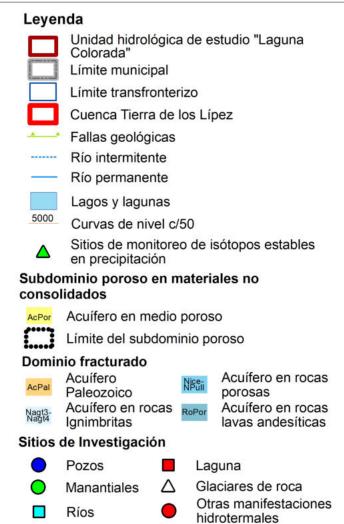


Mapa N°18. Variación espacial de las composiciones isotópicas de Oxígeno-18 (δ^{18} O): (izquierda) al final de la época lluviosa de 2019 y (derecha) durante la época de estiaje de 2021.

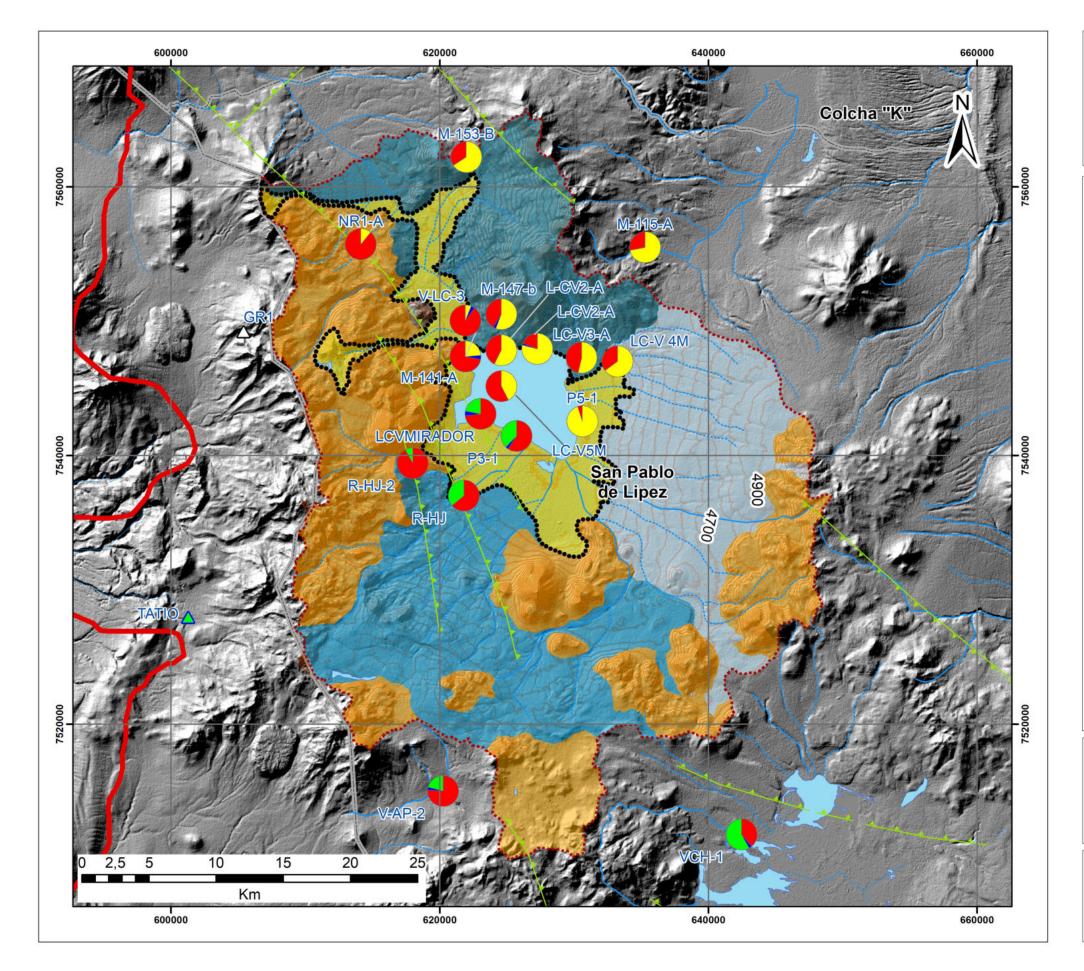








Mapa N°19. Variación espacial de las composiciones isotópicas de Deuterio $(δ^2$ H): (izquierda) al final de la época lluviosa de 2019 y (derecha) durante la época de estiaje de 2021.

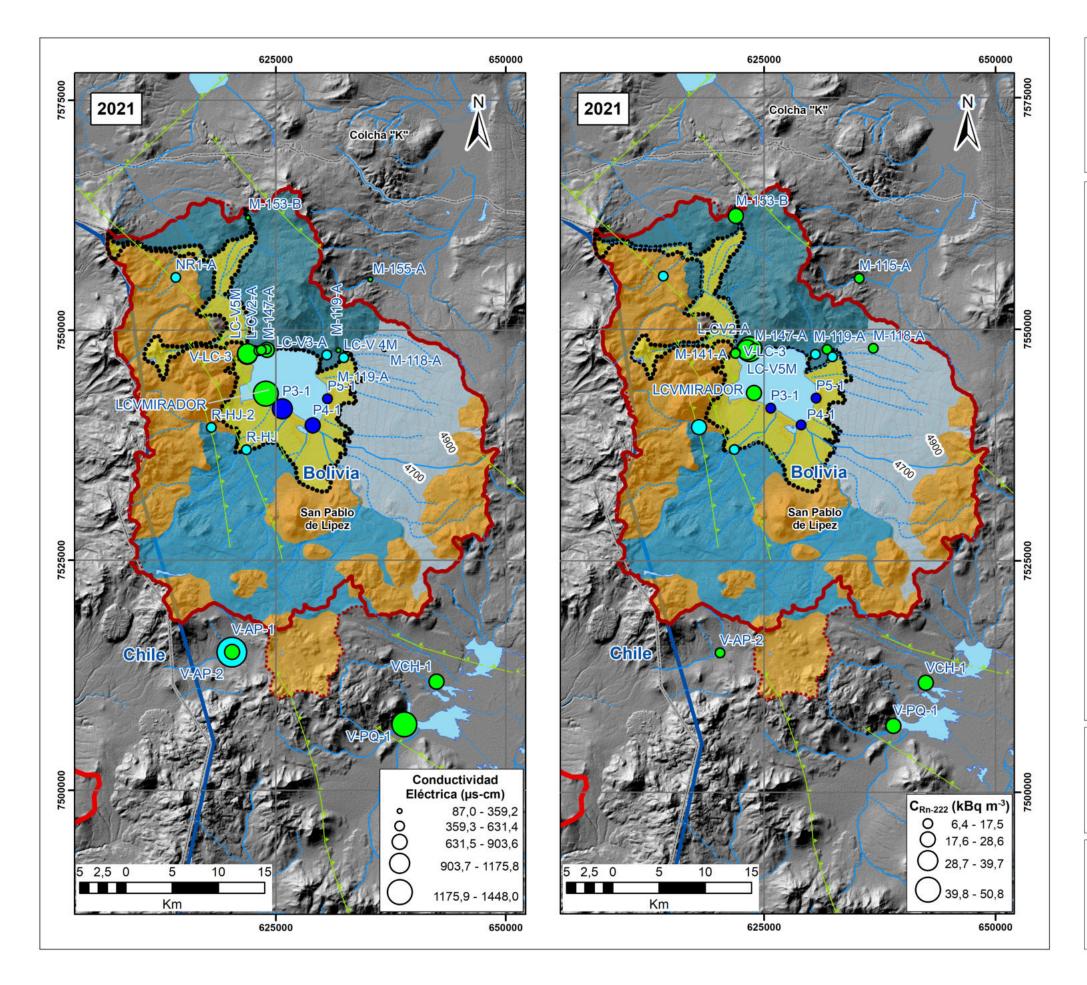






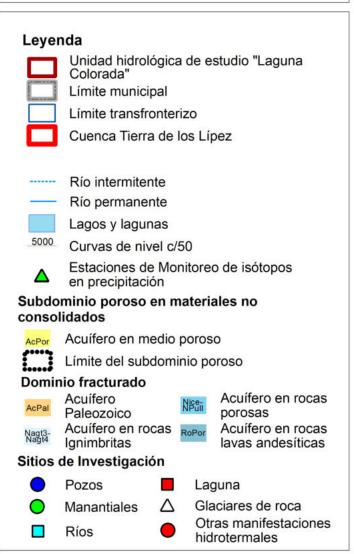


Mapa N°20. Variación espacial de las fracciones relativas de mezcla durante el flujo de aguas subterráneas en el sistema acuífero.

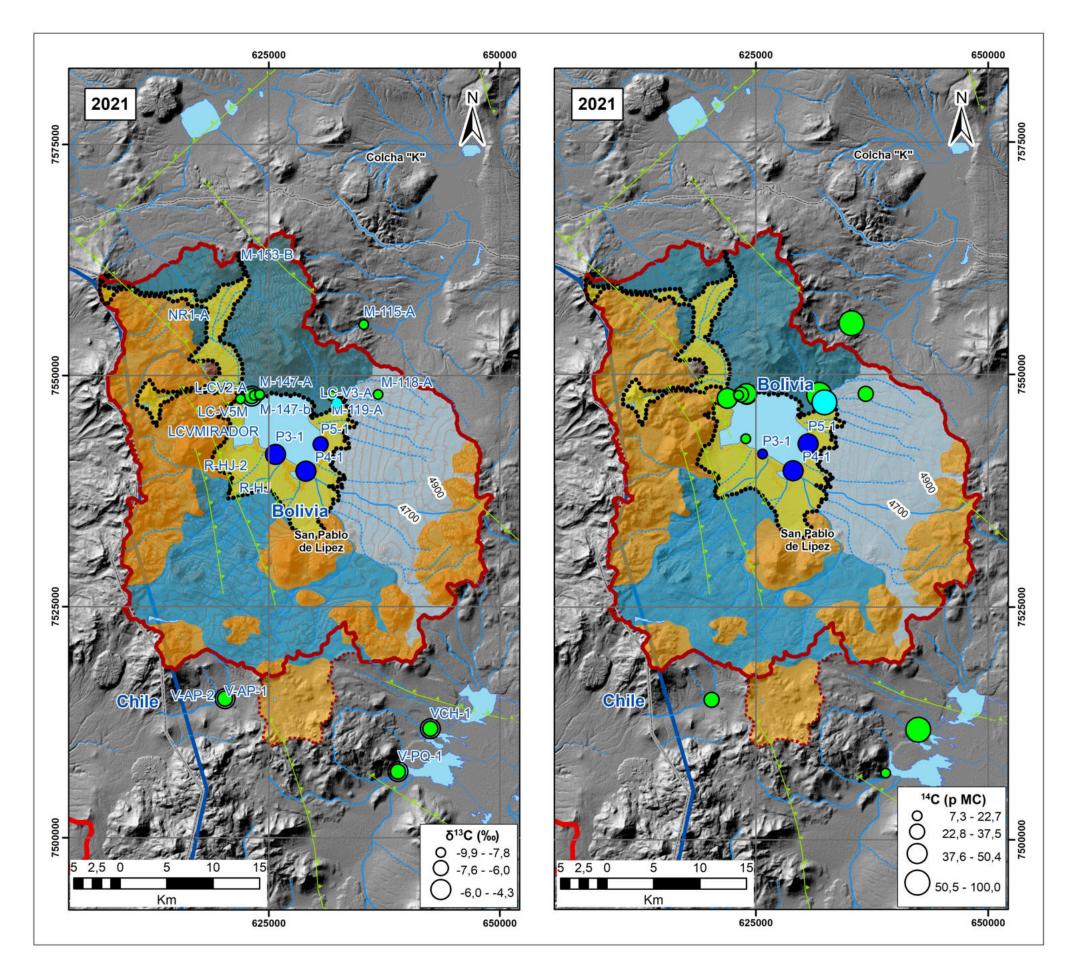






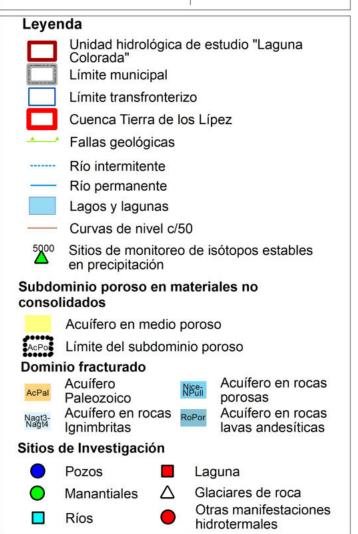


Mapa N°21. Variación espacial de: (izquierda) la Conductividad eléctrica (CE) y (derecha) de las concentraciones de actividades de Radón-222 (²²²Rn) durante la época de estiaje de 2021.

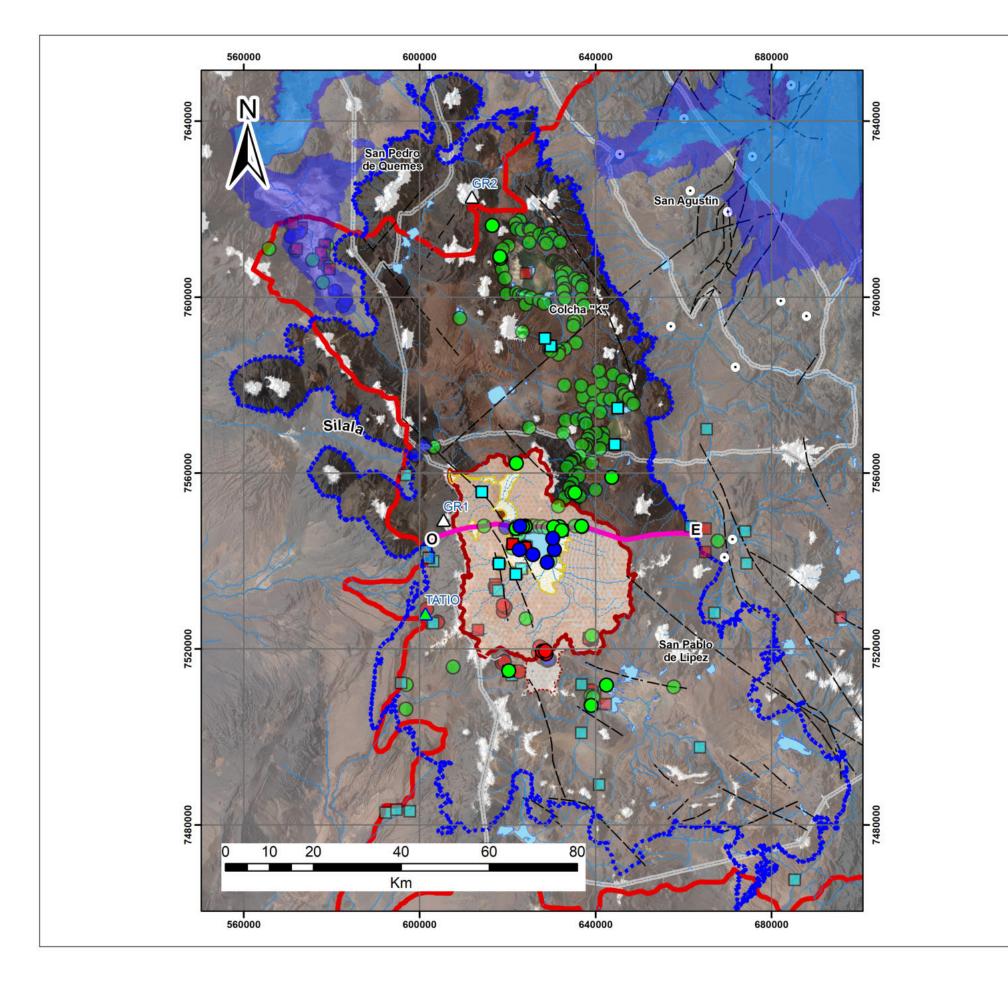








Mapa N°22. Variación espacial de: (izquierda) las composiciones isotópicas de Carbono-13 (δ ¹³C) y (derecha) de las actividades de Carbono Moderno (¹⁴C) durante la época de estiaje de 2021.









Mapa N°23. Mapa mostrando la ubicación del perfil E-O y los límites del sistema acuífero de la Cuenca Tierra de los Lípez, inferidos en base a la evidencia científica generada por la ABEN. En transparencia se presentan los sitios de investigación de la línea de base de datos científicos construida por la ABEN.



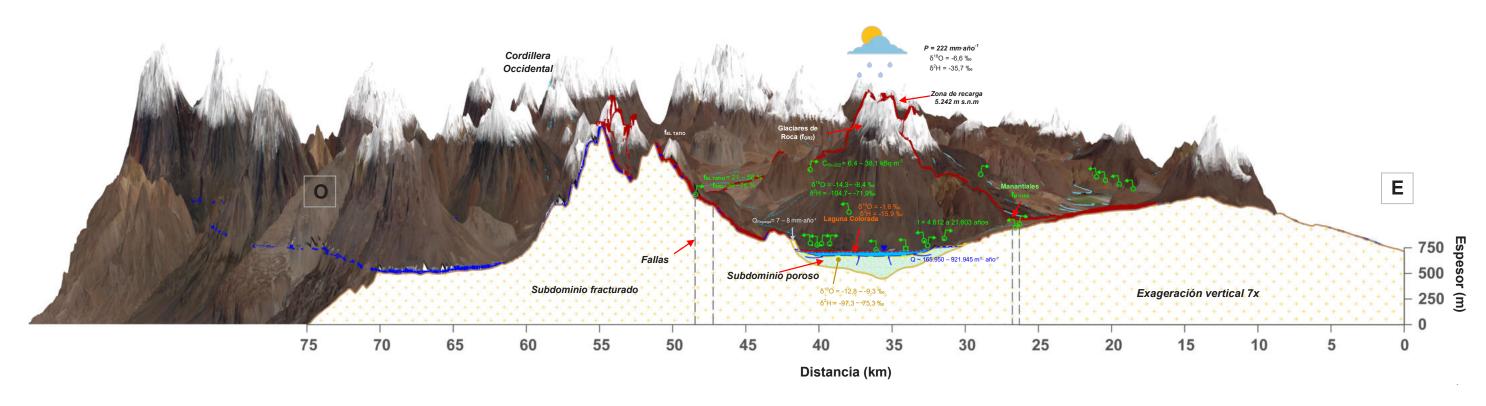


Figura 2 Modelo conceptual del funcionamiento Hidrológico del Acuífero Transfronterizo de los Lípez (Perfil E-O Mapa Nº 23).



AGRADECIMIENTOS

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear agradece a todas las instituciones que contribuyeron en la implementación de la FASE I del proyecto científico de 'Prospección y mapeo de la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos en zonas transfronterizas piloto de las tres regiones hidrográficas del Estado Plurinacional de Bolivia mediante la aplicación de la Hidrología isotópica, 2022-2025´.

Estas instituciones abarcaron ministerios, organismos internacionales, instituciones académicas, gobiernos autónomos departamentales, gobiernos autónomos municipales, entre otros, que se mencionan a continuación.

- Ministerio de Relaciones Exteriores (MRE) Dirección General de Límites, Fronteras y Aguas Internacionales (DGLFAIT).
- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).
- Carrera de Ciencias Químicas (CCQ) Facultad de Ciencias Puras y Naturales (FCPN) Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz.
- Carrera de Ingeniería Civil Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz.
- Carrera de Arquitectura- Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz.
- Carrera de Ciencias Químicas Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF), Potosí.
- Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca (ALT).
- Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD).



- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).
- Laboratorio de Física Atmosférica (LFA) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA).
- Gobierno Autónomo Departamental de Oruro (GADOR).
- Oficina Técnica ALT-Oruro.
- SENAMHI-Oruro.
- Gobierno Autónomo Municipal de Cobija (GAM Cobija).
- SENAMHI Regional Pando.
- Universidad Amazónica de Pando (UAP).
- Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF Cobija).



REFERENCIAS

- Abbott M, Wolfe B, Wolfe A, Seltzer G, Aravena R, Mark B, Polissar P, Rodbell D, Rowe H, Vuille M (2003). Holocene paleohydrology and glacial history of the central Andes using multiproxy lake sediment, 194 (2003) 123-138, doi 10.1016/S0031-0182(03)00274-8.
- ABEN (2022). Aplicación de la Hidrología Isotópica en la Gestión de las Aguas Transfronterizas. CONCLUSIÓN PROYECTO PILOTO EN LA CUENCATRANSFRONTERIZA TIERRA DE LOS LÍPEZ: Proyecto de Cooperación Técnica BOL 7005 del Estado Plurinacional de Bolivia. Agencia Boliviana de Energía Nuclear del Estado Plurinacional de Bolivia. Nº de Depósito Legal: 4-1-637-2022 P.O.
- Chaffaut I (1998). Precipitations D'Altitude, Eaux Souterraines et Changements Climatiqites de L'Altiplano Nord-Chilien. París, Francia. Anexo II 1 4.
- Figueroa Y (2018). Geochemical and Isotopic Characteristics of the Laguna Colorada Geothermal Area SW Bolivia. Report 16 in: Geothermal training in Iceland 2018. UNU-GTP, Iceland, 229-256.
- Flores Avilés GP, Spadini L, Sacchi E et al. (2022). Hydrogeochemical and nitrate isotopic evolution of a semiarid mountainous basin aquifer of glacial-fluvial and paleolacustrine origin (Lake Titicaca, Bolivia): the effects of natural processes and anthropogenic activities. Hydrogeol J 30, 181–201. https://doi.org/10.1007/s10040-021-02434-9.
- Flores Avilés GP (2022) Procesos hidrológicos y origen de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero de la Cuenca de la Laguna Colorada mediante aplicaciones de la hidrología isotópica. Revista Científica Nuclear Bolivianamente. Agencia Boliviana de Energía Nuclear. 1,2022: 17-28.
- Fiorella R, Poulsen C, Pillco R, Barnes J, Tabor C, Ehlers T (2015). Spatiotemporal variability of modern precipitation δ180 in the central Andes and implications for paleoclimate and paleoaltimetry estimates. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 120, 4630–4656, doi 10.1002/2014JD022893.
- Gonfiantini R, Roche M, Olivry J, Fontes J, Zuppi G (2001). The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. Chemical Geology. 181 (2001): 147–167, doi 10.1016/S0009-



2541(01)00279-0.

- Houston J (2007). Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: An evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques, Journal of Hydrology. 334: 534-544, doi 10.1016/j.jhydrol.2006.10.030.
- I.A.E.A/W.M.O (2022). Global Network of Isotopes in Precipitation. International Atomic Energy Agency/ World Meteorological Organization. The GNIP Database. Disponible en: https://nucleus.iaea.org/wiser.
- U.N.E.C.E & U.N.E.S.C.O (2021). Indicator | SDG 6 Data [Internet]. Sdg6data.org. 2022 [cited 31 March 2022]. Disponible en: https://sdg6data.org/indicator/6.5.2. United Nations Economic Commission for Europe & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Pasig R, Villena H, Bustamante M, Neumann-Redlin C, Renner S (1998). Informe Técnico N°48: Estudio Hidrogeológico del Chaco Tarijeño de Bolivia. Stárkung der Leistungsfhigkeit bolivianis-cher Institutionen bei der Erkundung von Grundwasserressourcen. Cochabamba, Bolivia; p 68.
- Risacher F, Alonso H, Salazar C (1999). Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones Chile. 1(51): II 1-55.
- Scandiffio G & Alvarez M (1990). Estudios geotérmicos con técnicas isotópicas y geoquímicas en América Latina. Actas de una Reunión final de coordinación de investigaciones celebrada en San José, Costa Rica, 12-16 de noviembre de 1990. Organismo Internacional de Energía Atómica; p. 77-114.
- S.E.N.A.M.H.I (2022). Sistemas de Información. Disponible en: http://senamhi.gob.bo/index.php/inicio. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Estado Plurinacional de Bolivia.
- U.S.G.S (2021). Landsat 8 L1 TP. Project from the U.S. Geological Survey Earth Explorer Available at: https://earthexplorer.usgs.gov/.
- Toro LE (2018). Developing Integral Management of Water Resources in the South Lipez Province Using Isotope Hydrology. Informe técnico complementario; p. 8-17, 26-27.
- Valdivieso S et al. (2022). Characterization of precipitation and recharge in the peripheral aquifer of the Salar de Atacama. Science of the Total Environment. 806 (2022) 150271: 1-14, doi 10.1016/j.scitotenv.2021.150271.



Calle 22 de Calacoto, Nro. 8232, entre Av. Montenegro y Adrián Patiño.
Edificio "Centro Empresarial Calacoto"
Telfs. 2127178 - 2127160 - Fax: (+591) 2 2129754
La Paz - Bolivia

www.aben.gob.bo



facebook.com/abeninforma @ABENinforma Aben.comunica



