CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

Contribución de obras de cosecha de agua a la recarga acuífera en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua

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

MAGISTER SCIENTIAE

en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Cecilia María Guerra Rosa

Turrialba, Costa Rica

2022

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

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

FIRMANTES:

Laura A. Benegas Negri, Ph.D.
Codirectora de tesis

Mario E. Arias Salguero, Mag.
Codirector de tesis

RICARDO ALONSO SANCHEZ MURILLO (FIRMA)
Firmado digitalmente por RICARDO ALONSO SANCHEZ MURILLO (FIRMA)
Fecha: 2022.02.25 08:29:36 -06'00'

Ricardo Sánchez Murillo, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

Néstor U. Castéllón Pineda, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Decano, Escuela de Posgrado

Cecilia María Guerra Rosa
Candidata

Dedicatoria

A mis padres, Elsa Marina Rosa Valle y Juan Miguel Guerra Aguilar, por su gran esfuerzo en todos los aspectos de la vida para apoyarme en mi formación académica.

A mi familia, tía Irma del Carmen Rosa, Ernestina Rosa, Consuelo Rosa, Eneyda Moreno y mi abuelita Blanca Aguilar por siempre estar pendiente y motivarme para hacer realidad mis sueños.

A los que ahora son ángeles, familiares y amistades (Q.E.P.D.), por cuidarme desde el cielo, acogerme y levantarme con sus alas cada vez que se desvanecían mis fuerzas.

Este logro también es de ustedes, gracias por compartir mi alegría.

Agradecimientos

A Dios, por responder mis oraciones y las de mis seres queridos, bendecirme con salud, fortaleza y sabiduría para hacer realidad uno de mis sueños, permitirme conocer personas con amor y temor a ÉL que son como ángeles que me guían y por enseñarme que sus planes son mejores que los míos y que todo es a su tiempo.

A mis padres, por inculcarme valores morales desde mi niñez, por el apoyo incondicional, emocional y económico durante la trayectoria de mi formación académica, por enseñarme a valorar y agradecer hasta las más mínimas acciones de bien y por siempre recordarme que con esfuerzo y ayuda de Dios todo es posible.

A mis familias por lealtad, la sangre nos hace parientes, pero la lealtad nos vuelve familia, Velásquez-Moreno, Rodríguez-Moreno y Ferrufino-David, por considerarme parte de su familia, el constante apoyo moral, la confianza, las conversaciones de reflexión y agradecimiento a Dios por las bendiciones que hemos recibido y recordarme que también se debe de aprender y disfrutar del proceso, que debemos de ir despacio, pero sin pausa.

A mis asesores, Laura Andrea Benegas Negri Ph.D, Mario Enrique Arias Salguero Mag, Ricardo Sánchez-Murillo Ph.D y Néstor Ulises Castellón Pineda M.Sc, por la disposición, compromiso, sugerencias, consejos, por el aporte valioso de sus conocimientos en cada fase de la investigación, gracias por introducirme al mundo de la investigación a este grado académico. Dios continúe bendiciendo sus vidas con fortaleza y sabiduría para su desempeño en tan importante labor.

Al Programa Presidencial de Becas "Honduras 20/20", a las autoridades civiles por otorgarme el apoyo económico para hacer realidad este sueño, para que en su debido momento contribuya con los conocimientos en las mejoras de los temas de manejo y gestión del recurso hídrico en nuestro hermoso país.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), a las autoridades, personal administrativo y docentes de tan prestigiosa institución, por acogernos y hacernos sentir privilegiados de formar parte de la familia-CATIE. Un agradecimiento especial a los

docentes de la maestría en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas (MGICH), por su excelente desempeño al compartir sus conocimientos y por realmente tener como objetivo principal nuestro aprendizaje.

A mis compañeras (os) de estudio, especialmente a Venuz Pérez, Madeline Llanos, Nelson Arriaga, Juan Arias y Samuel Aybar por el apoyo incondicional durante el proceso académico, compartir el aprendizaje de sus experiencias laborales, fortalecimiento e intercambio de conocimientos, por hacer más grata mi estadía en CATIE y por ser ejemplo de un equipo de trabajo comprometido.

A todas las amistades CATIE, especialmente a Yolanny Rojas, Mabel Arcos, Carolina Guatusmal, Carolina Rodríguez, Lilliam Castellón, María J. Borda, Aurorita Espinal, Ana Franco, Tatiana Carmona, Patty Gálvez, Sandra Murillo, Andrea Barrientos, Heber Orellana, Félix Cercas, Jason Gómez, Oscar Ramírez, Wilton Acosta, Leonel Ríos, Jairo Durán, Rony Aguilar, Jean C. Polanco, Daniel Borrero, Leonel Salas, Johnny Patal, Yefrin Valladares y José D. Hernández por el apoyo moral, intercambio de conocimientos, permitirme formar parte de este capítulo tan importante de sus vidas y por hacer más agradable mi estadía en CATIE. Un especial agradecimiento Alberto Iraheta y Javier Barberena, por sus consejos, sugerencias y por esas amenas conversaciones sobre los isótopos estables del agua.

A todas las amistades de vida, especialmente a Fanny Velásquez, Abigail Velásquez, Brenda Moreno, Leonela Gudiel, Andrea Castro, Esmeralda Mánchame, Riccy Aparicio, Dariana Ávila, Eva M. Amador, Odalma Serrano, Samantha Corrales, Francis Sabillon, Kenia Villalobos, Katherine Zambrano, Maudy Urbina, Marissa Chavarria, Enmanuel Destephen, Carlos E. Destephen, Wuilmer Urbina y Jean C. Santamaria a pesar de la distancia expresaron su apoyo y cariño, motivándome y recordándome que cada logro requiere de mucho esfuerzo, pero que es recompensado por Dios; y por alegrar mis días en esta hermosa aventura llamada vida.

A los colaboradores, Fidel Ruíz, Leonel Báez y Carlos Martínez por el apoyo con el transporte al área de estudio. Un agradecimiento especial a doña Trinidad Alfaro por acogerme con hospitalidad en Somoto y expreso mi agradecimiento también al personal de la Unidad de Cuencas CATIE por el apoyo requerido para el transporte de las muestras de agua y al personal del laboratorio de química de la UNA-Heredia por el apoyo con el análisis de las muestras de agua.

A Kathy Bryson representante de SIFAT y Omar Romagnoli representante de Global Water Watch por compartir sus conocimientos a través de talleres y prácticas sobre la calidad del agua, lo cual me incentivó a continuar mis estudios en el manejo y gestión del recurso hídrico.

Autoridades administrativas y técnicas del proyecto "Adaptación de la agricultura al cambio climático a través de la cosecha de agua en Nicaragua", por incentivar y disponer del apoyo económico en temas de investigación de suma importancia como lo es el manejo y gestión del recurso hídrico, gracias por el apoyo en la asesoría técnica en la fase de campo, y un especial agradecimiento a los colaboradores de las diferentes comunidades.

Gracias a todas (os), por ser ejemplo de que los conocimientos se deben de compartir.
El mundo está en las manos de aquellos que tienen el coraje de soñar y correr el riesgo de vivir sus sueños -Paulo Coelho.

Contenido

Resumen IX
Abstract X
1. Introducción 1
2. Metodología 5
2.1 Ubicación y descripción del área de estudio 5
2.2 Procedimiento metodológico 9
2.2.1 Diseño de muestreo 9
2.2.2 Clasificación de pozos para la toma de muestras 10
2.2.3 Procesos de selección de los puntos de muestreo 10
2.2.4 Procedimiento para elaborar las líneas equipotenciales 10
2.2.5 Diseño de selección para muestreo de pozos excavados 11
2.2.6 Diseño de selección de monitoreo directo de pozos excavados 11
2.3 Diseño de selección para muestreo de pozos perforados 12
2.3.1 Muestreo en campo 13
2.3.2 Análisis de la composición isotópica en el laboratorio 15
2.3.3 Procesamiento y análisis de datos 15
2.3.4 Análisis fisicoquímico del agua *in situ* 15
2.3.5 Análisis químico del agua *ex situ* 15
2.3.6 Muestreo de cationes y aniones 15
2.3.7 Diagrama de Piper 16
2.3.8 Medición del NEA en pozos excavados 19
2.3.9 Medición del NEA en pozos perforados 20
2.3.10 Análisis de datos con modelo de mezcla IsoSource 21
2.3.11 Análisis de datos con modelo de mezcla bayesiana SIMMR 22
3. Resultados 24
3.1 Naturaleza de la recarga hídrica en la subcuenca Aguas Calientes 24
3.2 Monitoreo del Nivel Estático del Agua 27
3.3 Composición Hidrogeoquímica 32
3.4 Contribución de las obras de cosecha de agua a la recarga hídrica en los pozos adyacentes 33
4. Discusión 38
4.1 Composición isotópica 38
4.2 Nivel Estático del Agua 40
4.3 Composición hidrogeoquímica 41
4.4 Contribución porcentual de la recarga hídrica inducida 42
5. Conclusiones 44
6. Recomendaciones 45
7. Bibliografía 47
8. Anexos 53

Lista de figuras

Figura 1. Efecto de la continentalidad en la composición isotópica de la precipitación (tomado IAEA 2017)..... 3
Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio, subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. 5
Figura 3. Órdenes de suelo en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. 6
Figura 4. Porcentaje de pendiente subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. 7
Figura 5. Tipo de suelo y cobertura vegetal en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. 9
Figura 6. Diseño de muestreo de pozos excavados, obras de cosecha de agua, cauces y colectores de precipitación en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. 11
Figura 7. Diseño de muestreo de monitoreo directo de pozos excavados, obras de cosecha de agua, cauces y colectores de precipitación en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. 12
Figura 8. Diseño de muestreo de pozos perforados, obras de cosecha de agua, cauces y colectores de precipitación en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. 13
Figura 9. Diseño de muestreo para el análisis de cationes y aniones de pozos excavados, pozos perforados, obras de cosecha de agua y cauces en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. 16
Figura 10. Esquema del diagrama de Piper. 17
Figura 11. Localización de aniones y cationes. 18
Figura 12. Proyección de los puntos de cationes y aniones al rombo central (tomado de Custodio 1995). 18
Figura 13. Proyección de los puntos de cationes y aniones en el rombo central..... 19
Figura 14. Proceso para el análisis de la composición isotópica y iones mayoritarios. 21
Figura 15. Proceso para el análisis de la composición isotópica con los programas IsoSource y SIMMR. 23
Figura 16. a) relación $\delta^{18}O$ (‰) con época seca y principios de la época lluviosa y b) relación *d-excess* (‰) con época seca y principios de la época lluviosa..... 25
Figura 17. LMWL de la subcuenca Aguas Calientes, mostrando como referencia la LMWL de Nicaragua. 26
Figura 18. Relación de los valores isotópicos por tipos de aguas. 27
Figura 19. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 01 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio. 28
Figura 20. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 02 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio. 28
Figura 21. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 03 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio. 29
Figura 22. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 09 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio. 30
Figura 23. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 10 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio. 30
Figura 24. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 11 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio. 31
Figura 25. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 12 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio. 32
Figura 26. Diagrama de Piper composición iónica de agua superficial y subterránea. 33

Figura 27. Contribuciones porcentuales de las fuentes de recarga hídrica al agua subterránea a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo IsoSource. 34
Figura 28. Contribuciones porcentuales de las fuentes de recarga hídrica al agua subterránea nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo SIMMR. 35
Figura 29. Contribuciones porcentuales de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo IsoSource. 36
Figura 30. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo SIMMR. 36
Figura 31. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos perforados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo IsoSource. 37
Figura 32. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos perforados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo SIMMR. 38

Lista de cuadros

Cuadro 1. Posibilidad de recarga hídrica por tipo de suelo en la subcuenca Aguas Calientes. 6
Cuadro 2. Posibilidad de recarga hídrica según rango de pendiente en la subcuenca Aguas Calientes..... 7
Cuadro 3. Posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal en la subcuenca Aguas Calientes..... 8
Cuadro 4. Parámetros fisicoquímicos analizados in situ. 15
Cuadro 5. Contribuciones porcentuales como aporte de las fuentes de recarga hídrica a los pozos (agua subterránea) a nivel de la subcuenca y por diseño de muestreo. 33

Lista de anexos

Anexo A. Monitoreo del Nivel Estático del Agua en pozos excavados. 53
Anexo B. Información de todos los puntos de muestreo. 56
Anexo C. Contribuciones proporcionales como aporte de las fuentes de recarga hídrica a los pozos (agua subterránea) por diseño de monitoreo directo e influencia local fuentes de recarga y pozos adyacentes..... 57
Anexo D. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los mantos acuíferos a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, análisis del modelo SIMMR. 57
Anexo E. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, con el modelo SIMMR. 58
Anexo F. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos perforados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, con modelo SIMMR. 58
Anexo G. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los mantos acuíferos a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, análisis del modelo IsoSource. 58
Anexo H. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, con el modelo IsoSource. 58
Anexo I. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos perforados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, con modelo IsoSource. 58
Anexo J. Fase de campos y laboratorio de la investigación de tesis en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua..... 64

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Porcentaje de parámetros para iones mayoritarios..... 17

Acrónimos y abreviaturas

CSC	Corredor Seco Centroamericano
COSUDE	Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación*****
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*
GWP	Asociación Mundial del Agua*
GNIP	Red Mundial de Isótopos en la Precipitación*****
GMWL	Línea Meteórica Global*****
HDPE	Polietileno de alta densidad*****
IAEA	Organismo Internacional de Energía Atómica*
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
IRC	Índice de Riesgo Climático Global
LAQUISA	Laboratorio Químico S.A
LMWL	Línea Meteórica Local*****
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
NEA	Nivel Estático del Agua
OCAS	Obras de Cosecha de Agua
SIG	Sistemas de Información Geográfica
UNEP	Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas*
UNA	Universidad Nacional de Costa Rica
VSMOW-SLAP	Agua Oceánica Media Estándar de Viena-Estándar de Ligera Precipitación Antártica*****
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical*****

Por sus siglas en inglés*

Contribución de obras de cosecha de agua a la recarga acuífera en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua

Guerra-Rosa, Cecilia María (cecilia.guerra@catie.ac.cr)
Benegas-Negri, Laura Andrea (laura.benegas@catie.ac.cr)
Arias-Salguero, Mario Enrique (mariogeologo@gmail.com)
Sánchez-Murillo, Ricardo (ricardo.sanchezmurrillo@uta.edu)
Castellón-Pineda, Néstor Ulises (ncastel@catie.ac.cr)

Resumen

Las aguas subterráneas se han aprovechado, desde la antigüedad, para abastecimiento de poblaciones y riego, su extracción constante ha requerido la inducción de agua superficial de reservorios u obras de cosecha de agua, como una alternativa para mantener el nivel de la capa freática de los acuíferos. En este estudio se estimó la contribución de obras de cosecha de agua a la recarga acuífera en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua. Para el análisis del agua superficial, subterránea y precipitación, se utilizó la metodología de la composición isotópica $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ como trazadores naturales, para determinar las posibles fuentes de recarga hídrica a las aguas subterráneas. La composición isotópica del agua se complementó con la identificación de las propiedades hidrogeoquímicas, mediante el estudio de iones mayoritarios. Se empleó el método de modelos de mezcla comparando las herramientas IsoSource y SIMMR, donde se obtuvo un aporte de 90,7 % de agua proveniente de los cauces, 7,5 % de la precipitación y 1,8 % de las obras de cosecha de agua con IsoSource. Los resultados del modelo SIMMR indicaron que los cauces aportan un 95,9 % a la recarga de agua subterránea, las obras de cosecha de agua contribuyen con 1,7 % y la precipitación un 2,4 %. La composición hidrogeoquímica del agua subterránea, es principalmente del tipo HCO_{3-} Ca^{2+} Mg^{2+}, y en cuanto al agua superficial, se determinaron dos tipos HCO_{3-} Ca^{2+} Mg^{2+}, seguida del tipo HCO_{3-} Na^{+}. La contribución de las obras de cosecha de agua a la recarga hídrica de las aguas subterráneas es limitada, pero se ha comprobado que estas obras están contribuyendo a la recarga del agua subterránea, a pesar de que el estudio se realizó en un corto tiempo y en su mayoría, fueron meses secos con pocos eventos de precipitación.

Palabras claves: obras de cosecha de agua, recarga hídrica inducida, composición isotópica, hidrogeoquímica, modelo de mezcla IsoSource y SIMMR.

Contribution of water harvesting to aquifer recharge in the Aguas Calientes sub-basin, Somoto, Nicaragua

Abstract

Groundwater has been used since ancient times for drinking supply and irrigation. However, continuous groundwater extraction has required the augmentation of surface water either from reservoirs or water harvesting, as an alternative to maintain the replenishment of groundwater levels. This study estimated the contribution of water harvesting to aquifer recharge in the Aguas Calientes sub-basin, Somoto, Nicaragua. Rainfall and surface water connectivity to groundwater was assessed using the isotopic composition $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ of multiple endmembers (rainfall, wells, boreholes, streams, and water harvesting reservoirs). The isotopic composition of multiple endmembers was complemented with the analysis of major ions in groundwater and surface water. We used two mixing models (IsoSource and SIMMR) to evaluate different contributions to groundwater recharge. Based on IsoSource, recharge contributions were estimated as follows: 90,7 % (streams), 7,5 % (precipitation), and 1,8 % (water harvesting reservoirs). Similar results were obtained from the SIMMR model: 95,9 % (streams), 2,4 % (precipitation), and 1,7 % (water harvesting reservoirs). Groundwater hydrogeochemical composition indicated the prevalence of HCO_{3-} Ca^{2+} Mg^{2+} type water, whereas surface water was dominated by HCO_{3-} Ca^{2+} Mg^{2+} in less degree by HCO_{3-} Na^{+} type waters. The contribution of water harvesting reservoirs to groundwater recharge is limited, but these water harvesting reservoirs have been shown to be contributing to groundwater recharge, even though the study was conducted over a short time and mostly dry months with few precipitation events.

Key words: water harvesting reservoirs, induced water recharge, isotopic composition, hydrogeochemistry, mixing models IsoSource and SIMMR.

1. Introducción

Centroamérica es una región de alta incidencia de eventos hidrometereológicos que, normalmente, provocan alteraciones de gran magnitud, debido a su ubicación geográfica en el istmo centroamericano. Posee una amplia variabilidad climática con la consiguiente pérdida en las actividades agropecuarias. Esta ha tenido efectos adversos de distinta índole en la región denominada Corredor Seco Centroamericano (CSC) (Figueroa 2018). Este corredor inicia en Chiapas, México, abarca las zonas bajas de la vertiente del Pacífico y gran parte de la región central premontano (0-800 msnm) de Guatemala, desciende a la costa caribe en Honduras, cubre gran parte del territorio de El Salvador y Nicaragua, continua en la provincia de Guanacaste en Costa Rica hasta llegar Panamá (FAO 2012)**.**

En el litoral pacífico de Centroamérica, la estación seca se presenta de octubre a mayo (duración de seis a siete meses), con gran probabilidad de un latente riesgo a sequias recurrentes, esta se relaciona estrechamente con el período El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), y los meses lluviosos inician en junio (Figueroa 2018). En las últimas décadas se han elevado los efectos negativos en los medios de vida de las familias, especialmente, en la agricultura de subsistencia. Siendo los mayores impactos en granos básicos con pérdidas de 50-60 %, por la combinación de ambos eventos y otros de origen socioeconómico (Calvo *et al*. 2018).

El CSC en Nicaragua representa el 47 % de su superficie y corresponde a zonas áridas y secas. La sequía afecta una considerable área: 39 000 km^2, equivalente al 30,1 % del territorio nacional. Haciendo énfasis en la sequía severa, ésta afecta el 11,5 % del territorio (FAO 2012). De acuerdo con GWP (2017), el Índice de Riesgo Climático Global (IRC) en el 2013, posiciona al país en el puesto 4$^{\underline{to}}$ a nivel mundial como una región vulnerable al cambio climático. La ocurrencia más severa de este fenómeno se manifiesta en los departamentos del norte (Bendaña 2018).

La variación del ciclo hidrológico y la distribución irregular del recurso hídrico ha generado la necesidad de incrementar estudios y el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de aguas subterráneas (Boulanger *et al*. 2008). Las mediciones sistemáticas a largo plazo de los niveles de agua proporcionan datos esenciales para evaluar los cambios en el recurso, así como desarrollar modelos de aguas subterráneas, pronosticar tendencias, diseñar, implementar y monitorear la efectividad de los programas de manejo y protección del agua subterránea (Charles y William 2001).

Ante esta situación, desde el año 2 015, se ha desarrollado el proyecto "Adaptación de la agricultura al cambio climático a través de la cosecha de agua en Nicaragua", enfocado en 10 municipios, implementando soluciones técnicas de formación de capacidades y recursos financieros en una población de 5 000 personas. La principal solución implementada para la adaptación a la variabilidad climática es la región nicaragüense del CSC es la construcción de 1 250 obras de cosecha de agua para captar y amanecer el recurso en época seca y disponer del mismo en tiempos prolongados de sequía, y así poder brindar una alternativa a las familias productores de la zona (Gobierno Nacional de Reconciliación y Unidad 2014). Las obras de cosecha de agua están distribuidas en algunas comunidades del municipio de Somoto y San Lucas, del departamento de Madriz, dentro del área de estudio "Subcuenca Aguas Calientes". Como un co-beneficio se ha observado, en algunos casos, que los pozos adyacentes a las obras de cosecha de agua mantienen o han aumentado su Nivel Estático del Agua (NEA), inferencia que requiere ser verificada.

En 2 013, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de Nicaragua, elaboró el mapa a nivel nacional del potencial de recarga hídrica, que definió las áreas con mayor y menor disponibilidad de retener y favorecer la infiltración de agua para recarga subterránea. Las zonas con mayor potencial de recarga hídrica se ubican en las partes altas de la cuenca del río Coco y del río Grande de Matagalpa. Aproximadamente 45 209 hectáreas clasificadas con alto potencial de recarga hídrica y 465 057 hectáreas con potencial de recarga baja (GWP 2017).

La recarga inducida de acuíferos se ha considerado en los últimos años, en varios países, como una herramienta de gestión hídrica económica y de gran efectividad con respecto a las grandes obras hidráulicas (Fernández 2005). El almacenamiento y recuperación de agua en los acuíferos es un tipo específico de recarga artificial, utilizado con el propósito de aumentar la disponibilidad de aguas subterráneas (Dassi *et al*. 2005).

Este tipo de medidas de recarga inducida de acuíferos o también denominada de siembra y cosecha de agua en latitudes, como la andina (Ochoa-Tocachi *et al*. 2019), es una respuesta al cambio climático como un fenómeno determinante para la gestión del agua ya que modifica el régimen hidrológico y la forma de distribución de la precipitación (Pita 2008). De acuerdo con estudios de (IAEA 2017), la época lluviosa ni la seca se definen claramente en la actualidad, creando impacto de déficit en el desarrollo local, lo cual impulsa a promover la implementación de medidas de adaptación que reduzcan los daños.

Altieri y Nicholls (2008), refieren que el problema, a nivel global, es que grandes volúmenes de agua se están perdiendo por escorrentía del agua superficial, evaporación y percolación profunda. Aunque, la cantidad de precipitación que puede utilizarse efectivamente para el crecimiento de los cultivos en estas tierras es baja, muchos agricultores han creado innovadores sistemas de cosecha de agua. Se reconoce la importancia de implementar estas tecnologías apropiadas en zonas áridas, según las cuales tanto los rendimientos como la rentabilidad de la producción pueden mejorar significativamente con la captación de agua lluvia. Por lo tanto, es una técnica para recuperar o mantener el nivel de la capa freática de los acuíferos (UNEP 2000).

Para estas investigaciones, Hernández *et al.* (2015), sugieren el estudio de la composición de los isótopos estables del agua (oxigeno $\delta\,^{18}O$ y deuterio δ^2H), por su uso como trazadores naturales en los procesos del ciclo hidrológico, su dinámica y el recorrido de sus interrelaciones. Los isótopos estables son muy útiles para identificar las diferentes fuentes de recarga de agua subterráneas y determinar su origen (meteórico, agua marina, fósil, magmática y metamórfica), porque permiten relacionar aguas con una composición isotópica similar. Además, son indicadores ideales porque forman parte de la molécula de agua y no reaccionan como otros elementos disueltos en el agua. Para complementar estos estudios, también es importante el análisis de iones mayoritarios, ya que en su concentración absoluta reflejan los procesos de interacción agua, suelo y roca (Valenzuela *et al*. 2013).

Gat (1996), considera que el proceso de evaporación tiene un efecto directo sobre la variación existente en la composición isotópica del agua. Esto radica en que las partículas con moléculas ligeras son más rápidas para volatizarse que las de un isótopo pesado. Por lo que las aguas que se evaporan del océano contienen menos ($\delta^{18}O$) y (δ^2H) (Figura. 1). A nivel mundial, la variación espacial de los isótopos estables en el ciclo del agua se produce debido al movimiento de las masas de aire y el fraccionamiento durante los cambios de fase, como la condensación y

la evaporación, creando un patrón espacial direccional a través de las regiones y los continentes (Sánchez-Murillo *et al*. 2013).

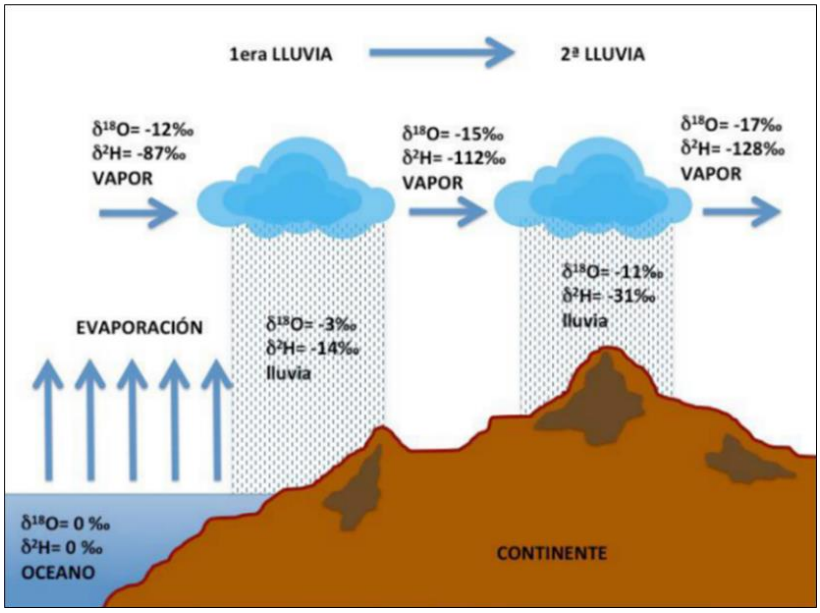


Figura 1. Efecto de la continentalidad en la composición isotópica de la precipitación (tomado IAEA 2017).

Hay cuatro procesos de circulación de aire que regulan el clima: vientos alisios, la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), vientos continentales provenientes del norte, y la influencia esporádica de los ciclones caribeños (Sánchez-Murillo *et al.* 2016).

Sánchez-Murillo *et al.* (2016), explican que las trayectorias de retorno de las masas de aire en Centroamérica indican una combinación de las fuentes provenientes del Mar Caribe y el Océano Pacífico, lo que se ve reflejado claramente en el paisaje isotópico de las aguas subterráneas. Los acuíferos que dependen de la recarga proveniente del Océano Pacífico presentan un patrón de valores isotópicos más empobrecidos, en comparación a los patrones provenientes del Caribe que son más enriquecidos.

Sánchez-Murillo y Birkel (2016), han encontrado que, desde el punto de vista espacial, las relaciones isotópicas de las aguas subterráneas y superficiales describen la fuerte separación orográfica en las vertientes de Caribe y el Pacífico. En cuanto a los cambios de la ZCIT y la prevalencia del periodo de canícula sobre Centroamérica, se observa que estos producen una mayor variabilidad isotópica e inestabilidad atmosférica dentro de la temporada lluviosa, aunque en general, esta temporada presenta valores más empobrecidos que los valores de la temporada seca (Sánchez-Murillo *et al.* 2016; Sánchez-Murillo *et al*. 2020b), Además, Sánchez-Murillo *et al.* (2020c), identificaron un fraccionamiento isotópico subnube y una evaporación secundaria cercana a la superficie como fenómenos comunes en todo el CSC.

Estudios que se han realizado usando isótopos para identificar la naturaleza o las fuentes de recarga de las aguas subterráneas en Nicaragua (Corrales 2008; Corrales y Delgado 2009; Calderón y Flores 2010; Delgado 2014; Delgado y Flores 2017; Barberena-Moncada *et al.* 2021), y así como en otros países de Centroamérica (Duarte 1999; Barrera de Calderón 2010; Contreras *et al.* 2011; Sánchez-Murillo *et al.* 2020a; Ordóñez-Olivares y Beita-Sandí 2020;

Salas-Navarro *et al*. 2018), muchos de los cuales abordan la dinámica entre las aguas subterráneas, superficiales y mecanismos de transporte de humedad. No obstante, en la región son pocos los estudios que han abordado sobre la contribución de recarga inducida a los acuíferos analizando estas fuentes de recarga. Esta información es de vital importancia para evaluar la efectividad de estas alternativas y para el adecuado manejo y gestión del recurso hídrico.

De lo anterior deriva la necesidad de cumplir con los siguientes objetivos, establecer la naturaleza de la recarga hídrica en los pozos a partir de características hidrogeoquímicas y firma isotópica del agua en muestras de precipitación, obras de cosecha de agua, agua superficial y subterránea, así como también cuantificar la contribución de las fuentes de recarga hídrica a los acuíferos.

2. Metodología

2.1 Ubicación y descripción del área de estudio

La investigación se realizó en la subcuenca Aguas Calientes, localizada entre el municipio de Somoto y San Lucas, Nicaragua. Está conformada por cuatro afluentes: Aguas Calientes, La Sierpe, Los Copales y La Susuba. La subcuenca limita al norte con un sector del río Coco y parte del municipio de Somoto, al sur con el municipio de San Lucas, al este con la subcuenca del río Somoto y ciudad de Somoto y al oeste con la subcuenca del río Inalí. Se encuentra ubicada en el istmo Centroamericano entre 13°24'10" y 13°29'28" de latitud norte y 86°34'12" y 86°39'39" de longitud oeste.

La subcuenca Aguas Calientes está integrada por ocho comunidades del municipio de Somoto (Aguas Calientes, Quebrada de Agua, Mansico, Los Copales, Santa Rosa, Rodeo No. 2, Santa Isabel, Uniles) y dos del municipio de San Lucas (El Volcán y El Porcal) (Alcaldía de Somoto 2001). De acuerdo con (Pérez 2006), la subcuenca Aguas Calientes tiene un área de (47,36 km^2 – 4 736 ha), donde el 84,53 % corresponde a las ocho comunidades del municipio de Somoto (40,04 km^2 – 4 004 ha), y el 15,47 % a las dos comunidades del municipio de San Lucas (7,32 km^2 – 732 ha). El relieve es accidentado con laderas muy escarpadas en las partes altas, con altitudes que varían desde 620-1 730 msnm.

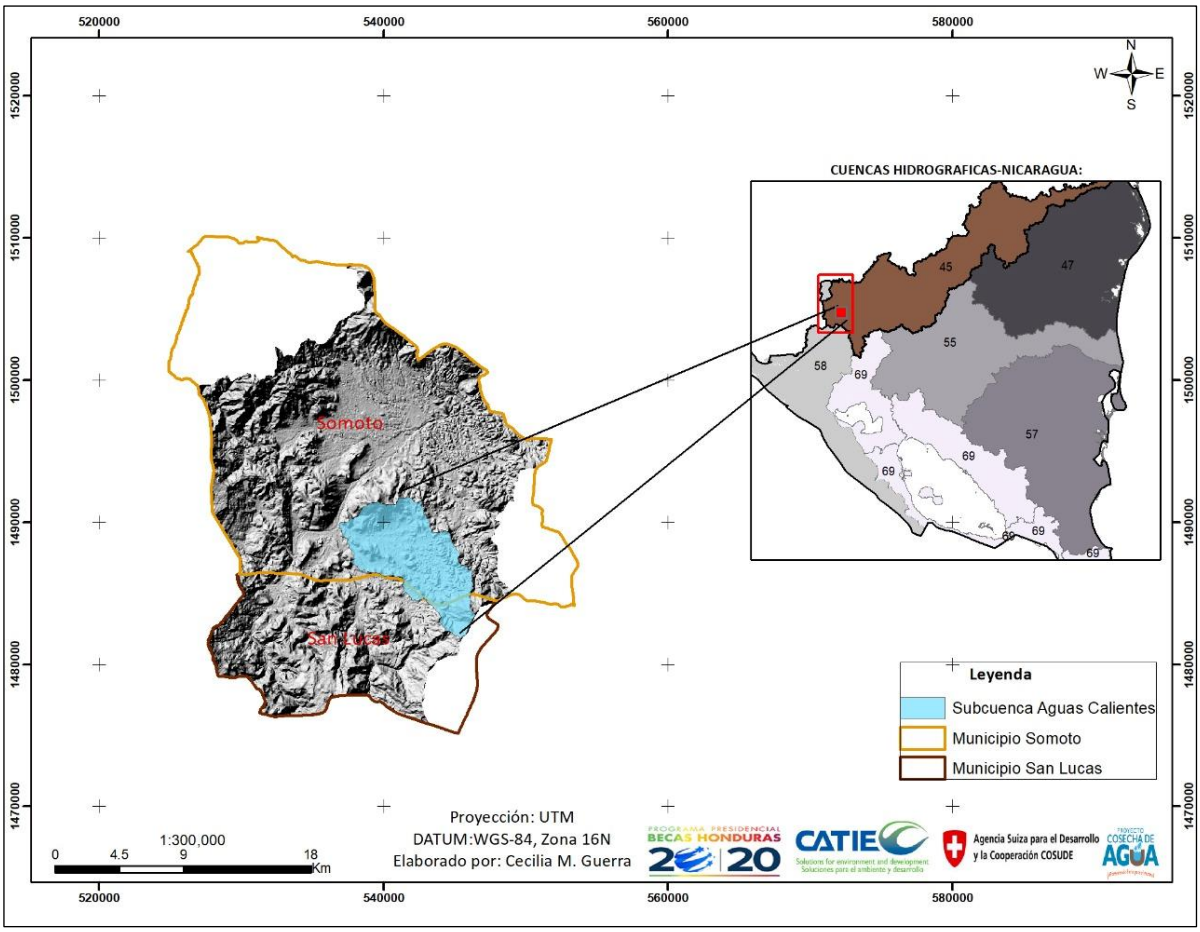


Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio, subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua.

A partir de la información proporcionada por el proyecto “Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático a través de la cosecha de agua en Nicaragua” se elaboró el mapa de órdenes de suelos (Figura. 3). En la subcuenca Aguas Calientes taxonómicamente se identifican dos órdenes de suelos: molisoles e inceptisoles. Los suelos molisoles representan la mayor proporción, ocupando 44,52 km^2 de la superficie y representando el 94,11 % del área total (Cuadro. 1), los suelos molisoles se encuentra en áreas con pendiente < 15 % de inclinación (Cuadro. 2), con una posibilidad de recarga desde muy alta a alta, con un microrelieve de plano a moderadamente ondulado/cóncavo.

Los suelos inceptisoles representan la menor proporción, ubicados en la división alta de la subcuenca en la comunidad El Volcán, ocupando 2,79 km^2 de la superficie y representando sólo el 5,89 % del área total (Cuadro. 1), los suelos inceptisoles se encuentra en un área con pendiente de 45 > 65 % de inclinación (Cuadro. 2), con una posibilidad de recarga de baja a muy baja, con un microrelieve escarpado a fuertemente escarpado.

Cuadro 1. Posibilidad de recarga hídrica por tipo de suelo en la subcuenca Aguas Calientes.

Subgrupo	Orden de suelo	Textura predominante	Ponderación	Posibilidad de recarga	Área (km^2)	%
	Molisoles	Franco	2	Baja	44,52	94,11
	Inceptisoles	Franco arcilloso	2	Baja	2,79	5,89
Total					47,31	100

Fuente: (Matus 2007)

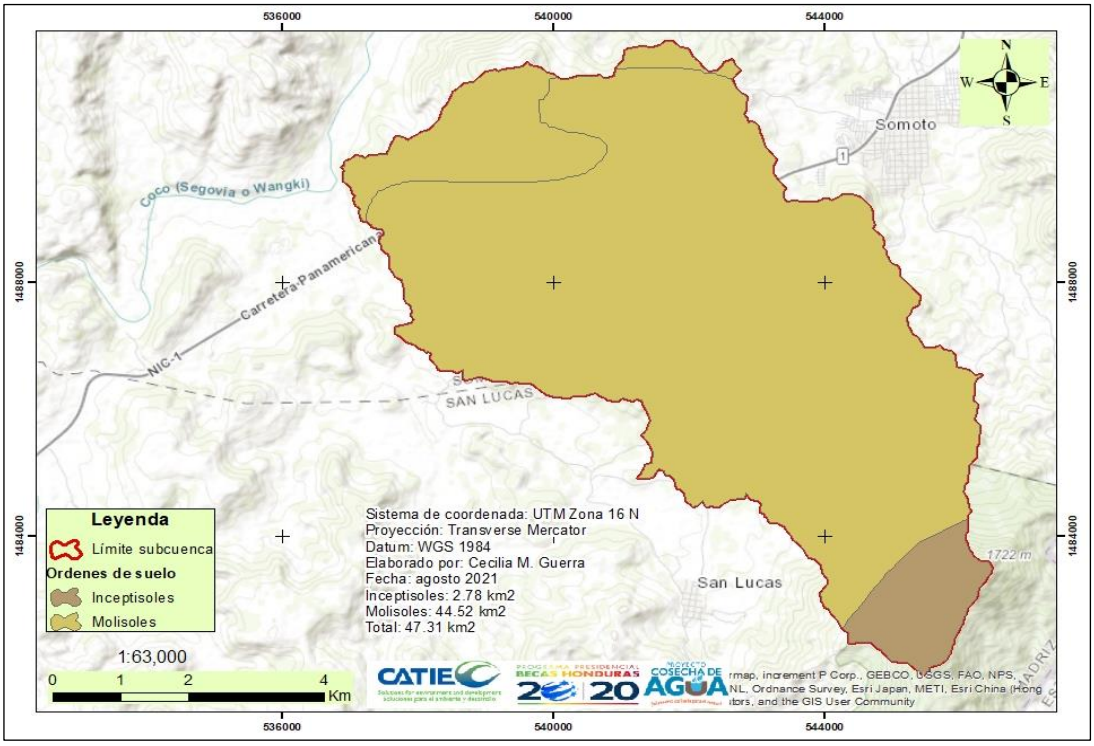


Figura 3. Órdenes de suelo en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua.

A partir de la información proporcionada por el proyecto “Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático a través de la cosecha de agua en Nicaragua” se elaboró el mapa de pendientes de la subcuenca (Figura. 4). El mapa clasifica siete rangos de pendiente y demuestra que hay aproximadamente 29,14 km^2 (61,59 % del área total), sumatoria de la ponderación 3-5 (Cuadro. 2), que permiten desde una muy alta a moderada posibilidad de recarga, considerando el porcentaje de pendiente de 0-45 % (Cuadro. 2). Sin embargo, el 18,17 km^2 (37,81 % del área total), sumatoria de ponderación 1-2 (Cuadro. 2), tiene de baja a muy baja posibilidad de recarga en el suelo, debido a que las pendientes son > 45 % de inclinación (Cuadro. 2), lo que permite y favorece el escurrimiento superficial y con ello acelera los procesos erosivos en los suelos de la subcuenca.

Cuadro 2. Posibilidad de recarga hídrica según rango de pendiente en la subcuenca Aguas Calientes.

Pendiente %	**Microrelieve**	**Posibilidad de recarga**	**Ponderación**	**Área (km^2)**	**%**
> 65	Fuertemente escarpado	Muy baja	1	1,37	2,30
45-65	Escarpado	Baja	2	16,80	35,51
15-45	Ondulado/cóncavo	Moderada	3	8,57	18,11
6-15	Moderadamente ondulado o cóncavo	Alta	4	10,20	21,56
0-6	Plano a casi plano, con o sin rugosidad	Muy alta	5	10,37	21,92
Total				47,31	99,40

Fuente: (Matus 2007)

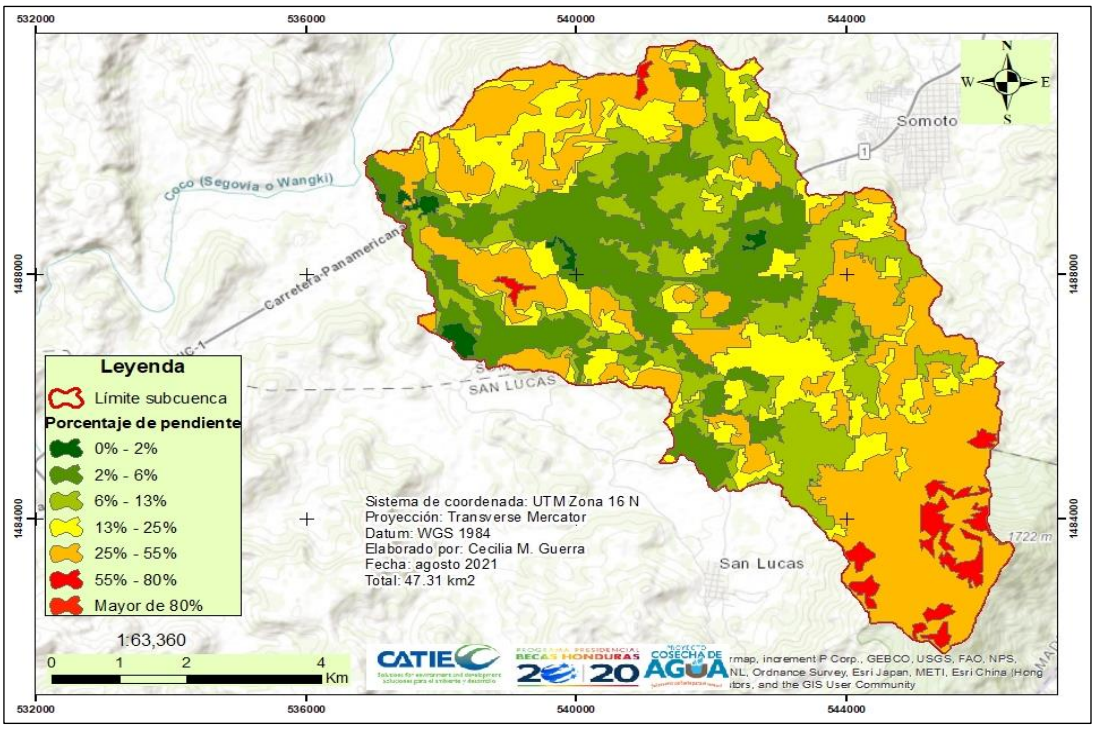


Figura 4. Porcentaje de pendiente subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua.

Con información proporcionada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER 2015), se elaboró el mapa de tipo de suelo y cobertura vegetal (Figura. 5). El mapa clasifica 10 categorías de uso y cobertura del suelo en la subcuenca. Los porcentajes de cobertura, que predominan en el área de la subcuenca, están en la categoría de tipos de cobertura como pasto (33,10 %), vegetación arbustiva (30,39 %) y cultivo anual (20,34 %), representando el 83,83 % total del área.

Los tipos de cobertura, como bosque latifoliado ralo y sin vegetación, se encuentran muy degradados, lo cual afecta a la recarga hídrica de los acuíferos (Sastre *et al.* 2016). Esto se debe a que el agua que precipita tiene menos posibilidad de ser interceptada por la vegetación, por el bajo o nulo porcentaje de cobertura, teniendo mayor impacto en las zonas con pendientes más inclinadas.

La posibilidad de recarga baja corresponde a áreas con 30-50 % de cobertura vegetal (Cuadro. 3), en esta categoría se encuentran los pastos y la vegetación arbustiva. La posibilidad de recarga muy baja < 30 % (Cuadro. 3), corresponden con las categorías de cultivo anual (20,34 %), bosque latifoliado ralo (4,47 %), tacotal (4,14 %), cultivo permanente (2,75 %), bosque latifoliado denso (2,45 %), ciudades (2,30 %), suelo sin vegetación (0,02 %) y agua (0,04 %).

Los suelos no están completamente desnudos, sin embargo, la cobertura que presenta es relativamente baja y en consecuencia también la infiltración. El sistema radicular de los tipos de vegetación que se desarrollan en esta área es menos profundo, en comparación a las áreas boscosas en los que el sistema radicular generalmente es más profundo, favoreciendo el proceso de infiltración (Sastre *et al*. 2016).

Cuadro 3. Posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal en la subcuenca Aguas Calientes.

Categoría de uso	**Posibilidad de recarga**	**Ponderación**	**Área (km^2)**	**%**
< 30 %	Muy baja	1	17,27	36,51
30-50 %	Baja	2	30,04	63,49
50-70 %	Moderada	3	0	0
> 80 %	Muy alta	4	0	0
Total			47,31	100

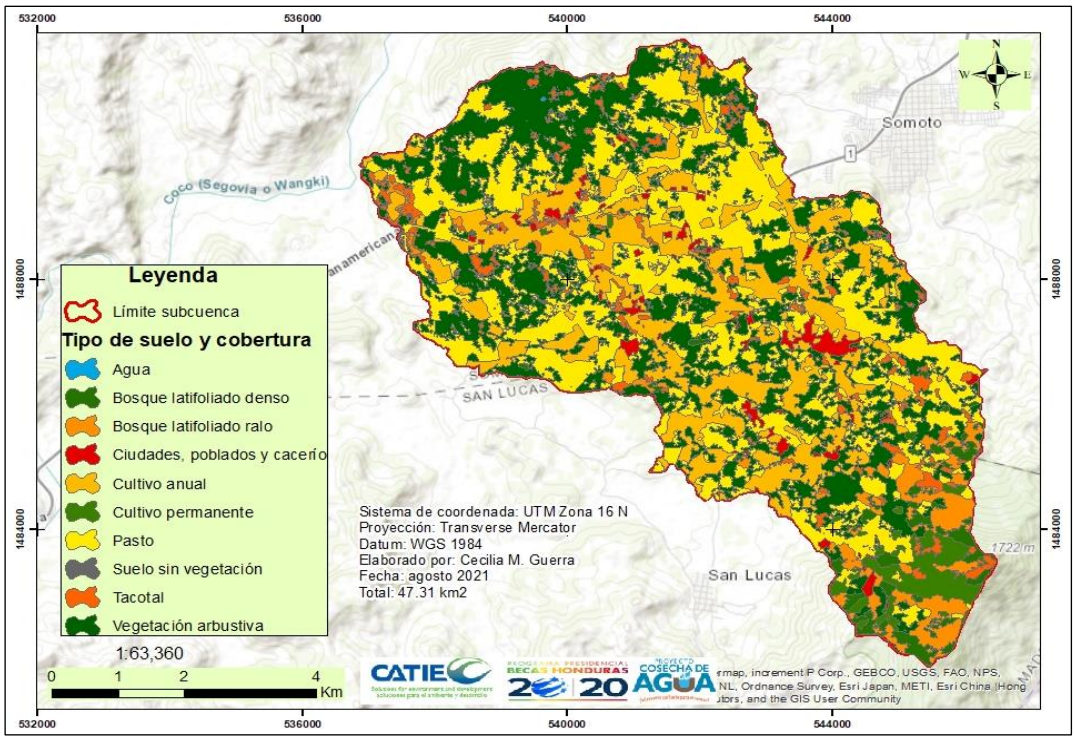


Figura 5. Tipo de suelo y cobertura vegetal en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua.

2.2 Procedimiento metodológico

2.2.1 Diseño de muestreo

Se utilizó un diseño de muestreo no probabilístico por conveniencia, elaborado a partir del análisis de información previa de topografía, ubicación de las obras de cosecha de agua, geomorfología, geología e información de pozos existentes en la subcuenca: elevación topográfica donde se construyó en pozo, el NEA y la profundidad total de las perforaciones, datos reportados por (Obando 2005).

Este modelo hidrogeológico establecido en esta investigación conceptualiza la existencia de dos acuíferos en la subcuenca Aguas Calientes. El primero es de tipo aluvial, originado por la erosión y depósito de materiales acarreados por los cauces Los Copales y La Susuba. Se considera un acuífero somero, con profundidades máximas de 30 m y una orientación de la red del flujo del agua subterránea hacia el noroeste. Este acuífero es captado principalmente por medio de pozos excavados que reportan altos valores de transmisibilidad hidráulica de hasta 546 m^2/día, debido a que muchos de ellos están ubicados en las zonas ribereñas, evidenciando una posible y fuerte comunicación hidráulica entre el cauce y el acuífero.

El segundo acuífero se considera de tipo volcánico, constituido por coladas de lava fracturadas y de depósitos de tobas e ignimbritas, que se encuentran en las partes altas de la subcuenca. Este acuífero es captado por medio de pozos perforados, con profundidades de hasta 125 m, con niveles del agua subterránea hasta los 50 m de profundidad y en algunos casos mucho menor, posiblemente por mezcla de diferentes niveles o por algún grado de confinamiento hidráulico.

Se evidencian dos direcciones preferenciales de la red del flujo de agua subterránea, las cuales están condicionadas por la morfología del sitio. En un sector de la cuenca el flujo es hacia el noroeste y en otro sector hacia el suroeste, la mayoría de las obras de cosecha de agua están ubicadas en esta última zona.

2.2.2 Clasificación de pozos para la toma de muestras

Los pozos se clasificaron de acuerdo con la profundidad total, donde pozos menores o iguales a 30 m se consideran pozos excavados y los mayores a 30 m pozos perforados. Se elaboró una base de datos con un total de 49 pozos en el área de estudio, 11 obras de cosecha de agua tipo escorrentia y cuatro afluentes.

2.2.3 Procesos de selección de los puntos de muestreo

Con el uso de información geoespacial (polígono de la subcuenca, coordenadas de pozos excavados, perforados, obras de cosecha de agua y la red hídrica (cauces Los Copales y La Susuba), se procedió a elaborar las curvas isofreáticas para los pozos excavados en el acuífero libre, este constituye el límite superior de la parte saturada del acuífero, y las líneas equipotenciales para los pozos perforados acuíferos confinados, esto determina que las superficies equipoteciales estan dentro del acuífero, la diferencia entre curvas y líneas es el tipo de acuífero (profundidad) (Román 2017).

Se midió la elevación del nivel del agua subterránea en el área de estudio (valor que se obtuvo del de la elevación topográfica donde se construyó el pozo, menos la profundidad del NEA del pozo. Este valor permite la elaboración del mapa con líneas equipotenciales, siendo necesario para determinar la dirección de la red del flujo, los gradientes hidráulicos y el comportamiento dinámico general del agua subterránea (Auge 2009).

2.2.4 Procedimiento para elaborar las líneas equipotenciales

Para este procedimiento, apoyado con un programa de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ArcMap, versión 10,5, se siguieron los pasos descritos a continuación:

Paso 1. Con la información disponible se creó la tabla de atributos que forma parte del archivo shapefile, con el que se obtuvo la capa de puntos de los pozos perforados.

Paso 2. A partir del shapefile de puntos con la ayuda de la caja de herramientas 3D análisis se graficó una red irregular de triángulos (TIN), el cual es un medio digital para representar la morfología del NEA.

Paso 3. Con la red irregular de triángulos se utilizó la herramienta de superficies trianguladas (curvas del nivel de superficie), ubicada en la caja de herramientas de 3D análisis, y se extrajo las líneas equipotenciales con un distanciamiento de 20 m.

Paso 4. Para mejorar el diseño de las líneas equipotenciales, se procedió a realizar la suavización de las mismas, mediante la utilización de la herramienta suavizar líneas que se ubica en la caja herramienta cartografía, en la cual se implementó una tolerancia del suavizado de 500 m.

2.2.5 Diseño de selección para muestreo de pozos excavados

Las líneas equipotenciales y curvas isofreáticas permiten identificar la posición de zonas de recarga y descarga del agua subterránea y establecer las direcciones preferenciales de la red del flujo de las aguas (Auge 2009). Considerando estos criterios se procedió a identificar y seleccionar los pozos, obras de cosecha de agua y cauces. Luego se procedió a determinar las zonas donde se instalaron los colectores de precipitación (Figuras. 6 y 8).

Se seleccionaron siete pozos excavados del total de 21 (Obando 2005), cuatro obras de cosecha de agua (tipo escorrentía) de las 11 totales, dos puntos de muestreo en el cauce La Susuba y 12 colectores de precipitación, este es un diseño de selección a nivel de subcuenca (Figura. 6).

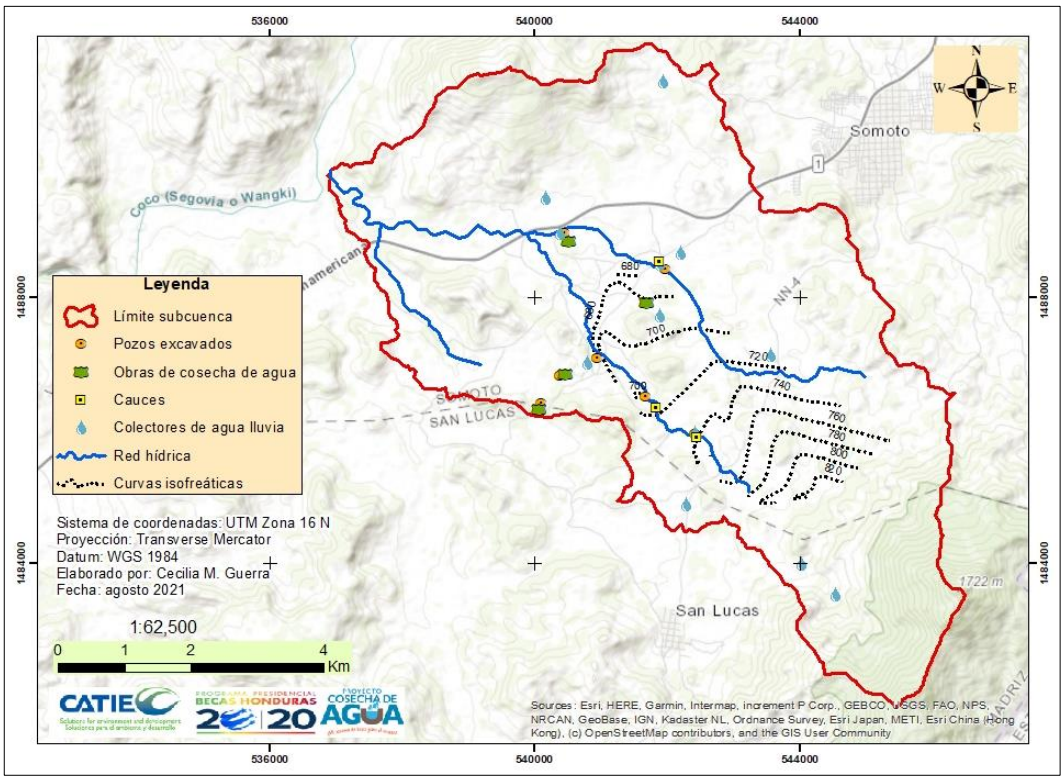


Figura 6. Diseño de muestreo de pozos excavados, obras de cosecha de agua, cauces y colectores de precipitación en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua.

2.2.6 Diseño de selección de monitoreo directo de pozos excavados

Se identificó un grupo de pozos excavados y obras de cosecha de agua que se localizan en la misma propiedad, con características ideales para un monitoreo directo, considerando la diferencia de altitud, dirección de la red del flujo de las aguas subterráneas entre otras. En total son tres ejemplos de monitoreo directo (Figura. 7).

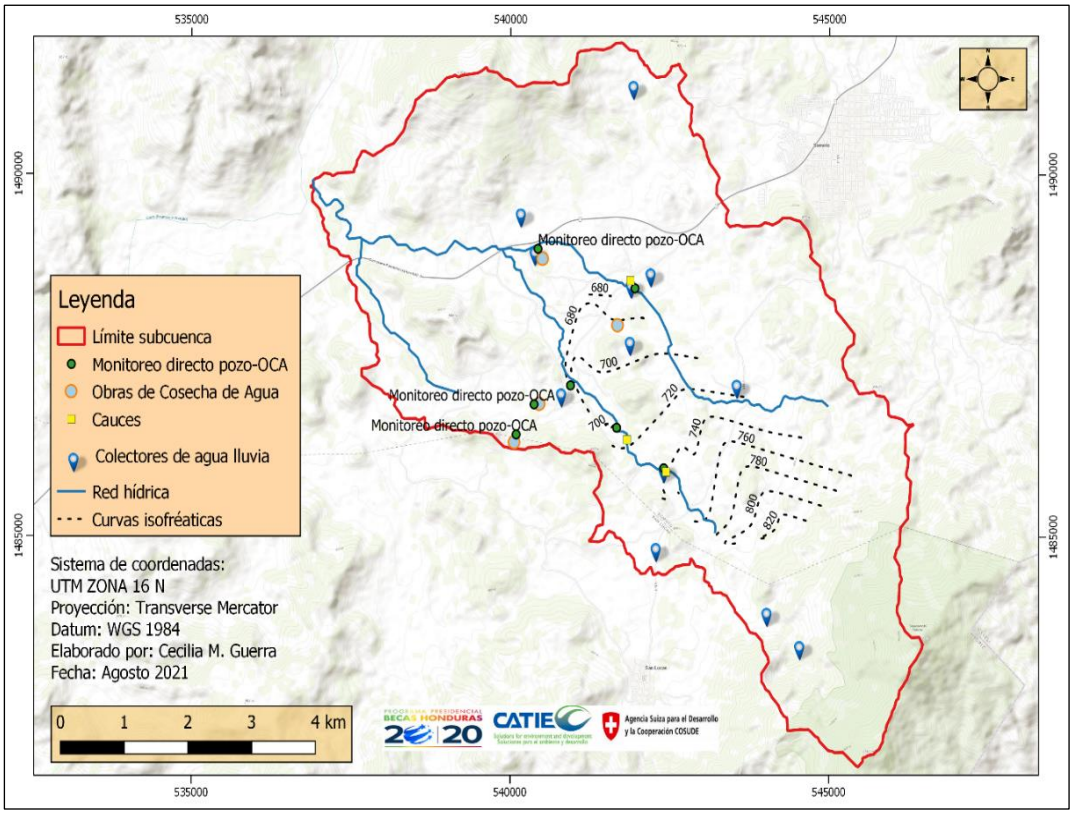


Figura 7. Diseño de muestreo de monitoreo directo de pozos excavados, obras de cosecha de agua, cauces y colectores de precipitación en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua.

2.3 Diseño de selección para muestreo de pozos perforados

Se consideraron cinco pozos perforados del total de 28 (Obando 2005), cinco obras de cosecha de agua (tipo escorrentía) de las 11 totales, uno punto de muestreo en el cauce Los Copales y 12 colectores de precipitación, este es un diseño de selección a nivel de subcuenca (Figura. 8).

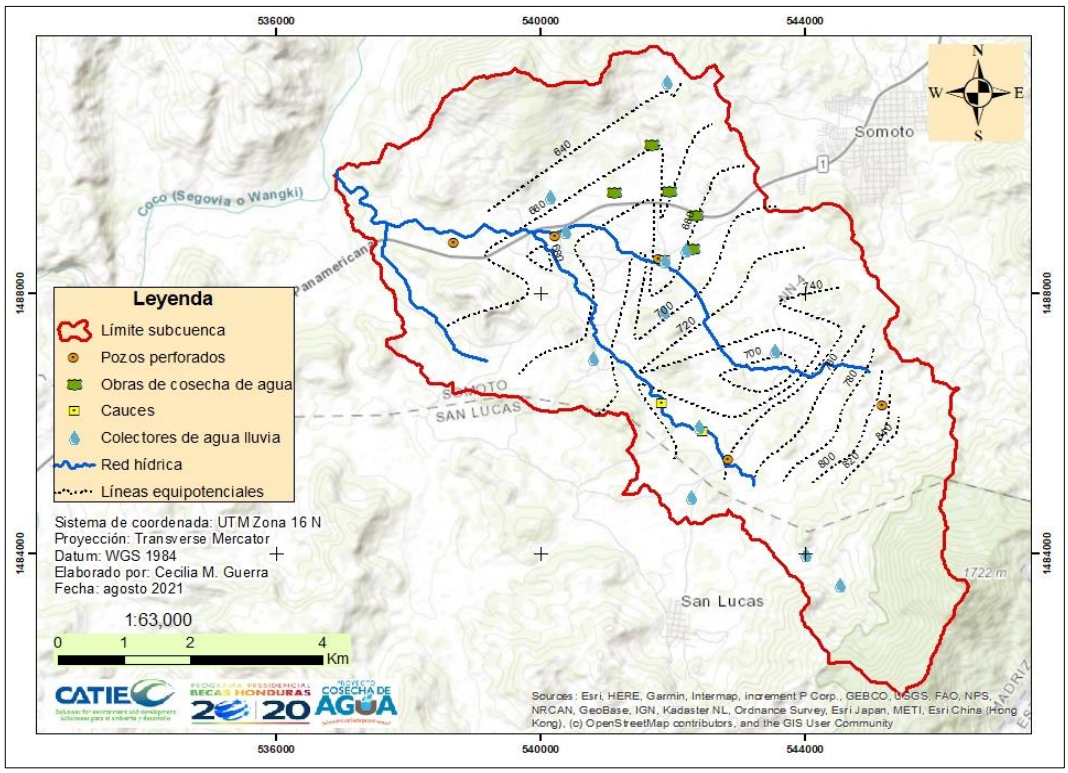


Figura 8. Diseño de muestreo de pozos perforados, obras de cosecha de agua, cauces y colectores de precipitación en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua.

2.3.1 Muestreo en campo

2.3.1.1 Muestreo de fuentes de recarga y pozos

Para el cumplimiento del primer objetivo se tomaron muestras de las siguientes fuentes potenciales de recarga hídrica y pozos: pozos excavados y perforados, obras de cosecha de agua y los cauces Los Copales y La Susuba y precipitación. La frecuencia del muestreo para el análisis isotópico fue semanal. A continuación, se detalla el número de muestras recolectadas: pozos excavados (N=85), pozos perforados (N=65), obras de cosecha de agua (N=71), Los Copales (N=11), La Susuba (N=22) y para la precipitación (N=150). Para el análisis de las propiedades hidrogeoquímicas se realizó un muestreo en pozos excavados (N=3), pozos perforados (N=3), obras de cosecha de agua (N=2) y cauce (N=1).

2.3.1.2 Consideraciones para la toma de muestras de agua en campo

Con el uso respectivo de guantes clínicos, se tomaron las muestras de agua directamente de la fuente en recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE) (30 mL), las muestras fueron almacenadas en una hielera para transporte y custodia, minimizando el riesgo de evaporación. Adicionalmente, los frascos se sellaron con papel parafina y se etiquetaron apropiadamente. Las etiquetas registraron la siguiente información: número de muestra, fecha, código interno y duración del evento de precipitación (colectores de precipitación), fuente (obras de cosecha de agua, cauces y precipitación) o mezcla (pozo). Las muestras de agua se conservaron boca abajo a una temperatura de 5 °C hasta su análisis.

2.3.1.3 Muestreo de precipitación

Para la toma de muestras de precipitación se elaboró un colector, basado en el modelo de un totalizador enterrado. Este diseño consiste en un colador/malla (para evitar la contaminación externa como insectos y material vegetal), ajustado a un embudo con un diámetro de 18 cm, el cual va conectado mediante una manguera (está protegida por un tubo PVC de ½") a un recipiente de polietileno de alta densidad (HDPE) (1 000 mL). Este recipiente se conserva en un agujero bajo suelo, aproximadamente a 80 cm de profundidad cubierto con una pieza de madera y material vegetal, para evitar la evaporación del agua recolectada, y con ello, evitar el fraccionamiento isotópico (OIEA/GNIP 2014). En total se elaboraron e instalaron 12 colectores de precipitación en la subcuenca, considerando las diferentes altitudes que permitan recolectar muestras más representativas en las tres divisiones del área de estudio.

2.3.1.4 Muestreo de cauces

Las muestras de agua superficial se tomaron directamente de la corriente de los cauces La Susuba y Los Copales, mismos que se han priorizado por su cercanía a los pozos.

2.3.1.5 Muestreo de obras de cosecha de agua

En el área de estudio se han construido 11 obras de cosecha de agua de tipo escorrentía, las cuales han sido priorizadas por el proyecto COSUDE para la investigación. Se tomaron muestras de cuatro obras de cosecha de agua en el diseño de muestreo de pozos excavados, y cinco obras de cosecha de agua en el diseño de muestreo de pozos perforados.

2.3.1.6 Muestreo de pozos

Se tomaron muestras de agua de siete pozos en el diseño de selección de muestreo de pozos excavados, y de cinco pozos en el diseño de selección de muestreo de pozos perforados.

De acuerdo con los siguientes criterios:

Acceso a la información: se priorizaron los pozos que contaban con información de estudios previos (por ejemplo: el tipo de suelo, material de construcción e indicios de que están siendo recargados por alguna de las fuentes, principalmente de las obras de cosecha de agua), inferencia percibida por la población, o bien, por observaciones de los técnicos de campo del proyecto).

Tiempo: la investigación es de carácter exploratorio, debido a que la fase de campo tiene una duración de seis meses, y por ende, no se considera el muestreo del total de los pozos.

Costo: el presupuesto asignado para la investigación es limitado para cubrir gastos de tomas de muestras y análisis de agua en laboratorio que permitan contar con series de tiempo de datos, o al menos un ciclo hidrológico completo.

Profundidad: menores o iguales a 30 m se consideran pozos excavados y los mayores a 30 m pozos perforados.

2.3.2 Análisis de la composición isotópica en el laboratorio

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

2.3.3 Procesamiento y análisis de datos

Se determinó la Línea Meteórica Local (LMWL) para la subcuenca Aguas Calientes, por medio de una regresión lineal a partir de los valores obtenidos del análisis de la composición isotópica de la precipitación (δ ^{18}O ‰ y δ ^{2}H ‰). Posteriormente, se comparó con la Línea Meteórica Global (GMWL) y la Línea Meteórica de Nicaragua a nivel nacional, esta última con información obtenida de la base de datos de precipitación (IAEA-GNIP 2022), gráficas generadas en RStudio.

2.3.4 Análisis fisicoquímico del agua *in situ*

Se tomó una muestra de agua de cada punto en un recipiente (HDPE) (1 galón), para medir los parámetros fisicoquímico, utilizando un medidor multiparámetro modelo Orion Star A329, el cual fue calibrado previamente. Los parámetros fueron determinados por el personal técnico del Laboratorio Químico S.A (LAQUISA) (Cuadro. 4).

Cuadro 4. Parámetros fisicoquímicos analizados *in situ*.

Parámetro de calidad de agua	**Unidad**
pH	Escala gradual de pH
Conductividad Eléctrica	Micro Siemens por centímetro (µS/cm)
Temperatura	Grados Celsius o centígrados (°C)

2.3.5 Análisis químico del agua *ex situ*

Muestras de agua de cada punto de muestreo fueron trasladadas al Laboratorio LAQUISA para el respectivo análisis de parámetros fisicoquímicos y iones mayoritarios.

2.3.6 Muestreo de cationes y aniones

Para el análisis de cationes y aniones se elaboró un diseño de selección, considerando como criterios, las diferentes profundidades en los pozos y la cercanía de las fuentes de recarga a los pozos. Se tomaron muestras de agua de tres pozos excavados, tres pozos perforados, dos obras de cosecha de agua y un cauce.

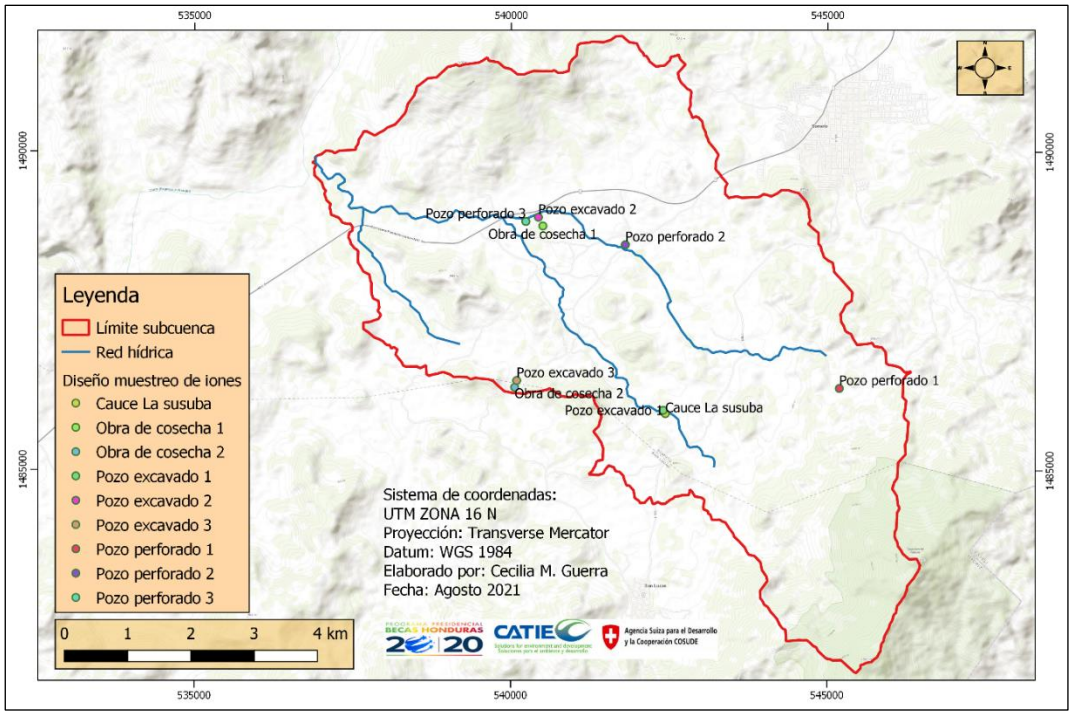


Figura 9. Diseño de muestreo para el análisis de cationes y aniones de pozos excavados, pozos perforados, obras de cosecha de agua y cauces en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua.

2.3.7 Diagrama de Piper

Se elaboró el diagrama de Piper, formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son: Ca^{2+}, Mg^{2+} y Na^{+} + K^{+}, y los vértices del triángulo de aniones son: SO_4^{2-}, Cl^{-}, CO_3-^{2} y HCO_3^{-}. Los datos de los diagramas triangulares se proyectaron en un rombo central en el que se representó la composición del agua deducida a partir de cationes y aniones (Piper 1944).

Las concentraciones de los iones dadas en meq/L se expresan como porcentaje con respecto a la suma de cationes y aniones. En cada triángulo se representan solo tres cationes y tres aniones. A cada vértice le corresponde el 100 % de un catión y anión (Figura. 10).

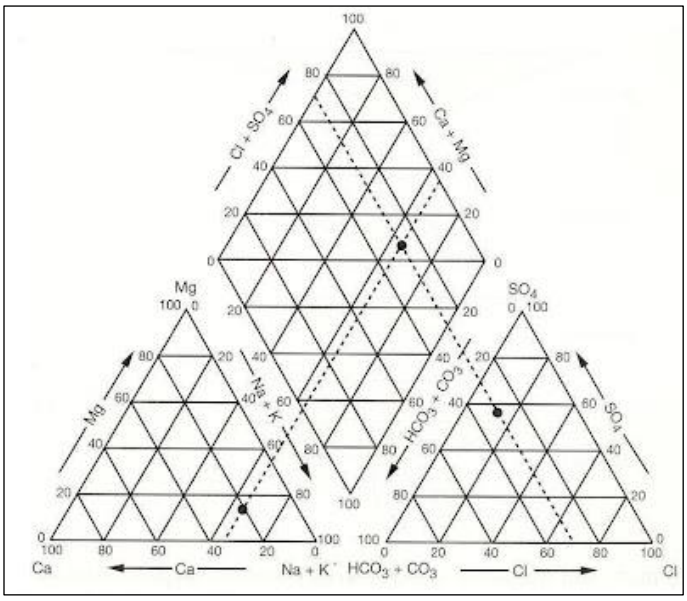


Figura 10. Esquema del diagrama de Piper.

Para construir el diagrama de Piper se siguieron cinco pasos consecutivos:

Paso 1. Las concentraciones en mg/L se convirtieron dividiendo mg/L de cada parámetro por el peso del miliequivalente correspondiente.

Paso 2. Se expresó como porcentaje los meq/L de cada parámetro, primero se sumó los valores de cationes y aniones presentes en la muestra. Luego se dividieron las concentraciones de cada parámetro por la suma de cationes o aniones según corresponde.

Ecuación 1. Porcentaje de parámetros para iones mayoritarios

$$\% \, Ca^{2+} \text{ (muestra)} = \frac{\text{concentración meq/l}}{\text{suma de cationes}} * 100 = \% \, Ca^{2+}$$

Paso 3. Se marcaron las proporciones en los gráficos triangulares. Teniendo en cuenta que esos triángulos muestran solo las proporciones entre los cationes y aniones. Luego se graficó el punto correspondiente tanto para catión como para anión, marcando los porcentajes de cada parámetro, utilizando líneas auxiliares paralelas a la recta opuesta del vértice. Se utilizan tres colores diferentes para cada parámetro (verde, azul y roja), en el sitio donde se cortaron las tres rectas, se colocó el punto correspondiente para catión y anión (Figura. 11).

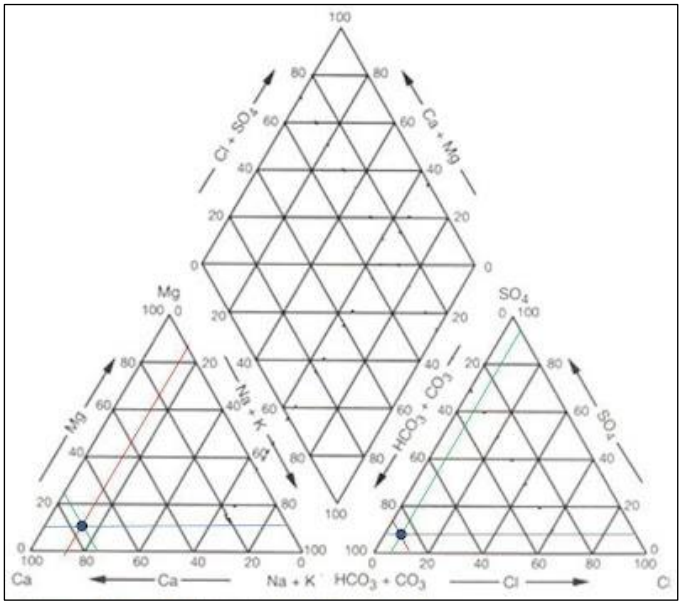


Figura 11. Localización de aniones y cationes.

Paso 4. Se proyectaron ambos puntos (catión y anión) en el rombo central, para ello se prolongaron las líneas rojas de ambos triángulos. Donde se cortaron dichas líneas se localiza el punto que caracteriza las muestras, clasificando el tipo de agua (Figura. 12).

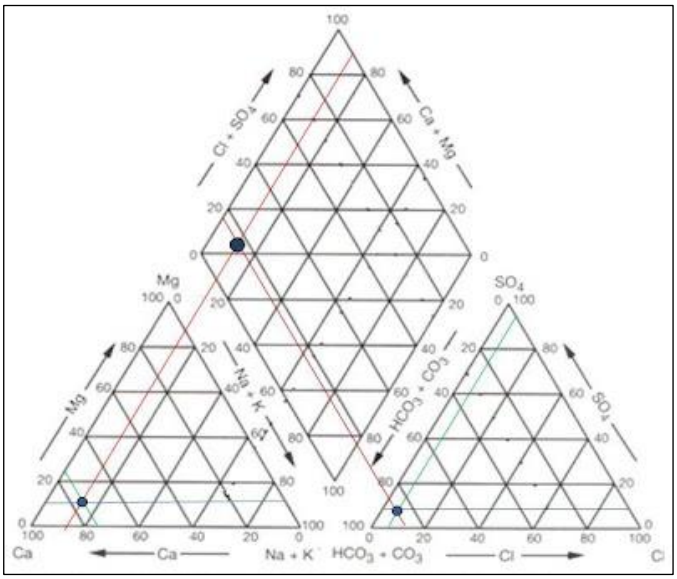


Figura 12. Proyección de los puntos de cationes y aniones al rombo central (tomado de Custodio 1995).

Se presentan algunos tipos de agua, su clasificación y los procesos agua, suelo y roca relacionados con las mismas (Figura. 13).

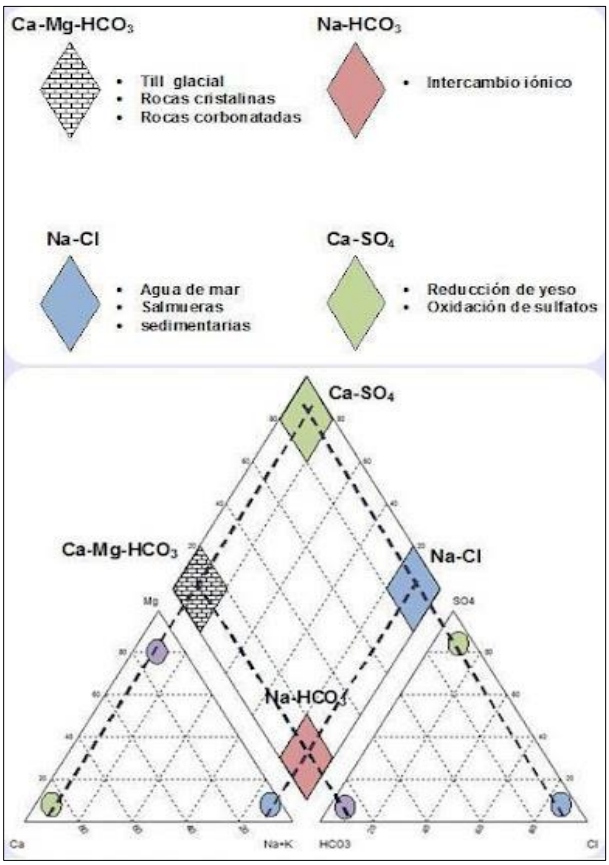


Figura 13. Proyección de los puntos de cationes y aniones en el rombo central.

El diagrama de Piper se elaboró con el software EASY_QUIM v5.0 (2012). Como datos de entrada se introdujeron los resultados de pH, conductividad eléctrica y el valor en mg/L de los iones mayoritarios, luego el mismo software lo conviertea a meq/L, hasta el valor de porcentaje. Dando como resultado el diagrama de Piper y la clasificación de las aguas.

2.3.8 Medición del NEA en pozos excavados

Se realizó un monitoreo semanal del NEA en los pozos excavados, para conocer de manera general la accesibilidad y dinámica de la recarga hídrica en los acuíferos, y a su vez determinar el comportamiento del NEA en meses secos y principios de los meses lluviosos.

Se introdujo una cinta métrica con un recipiente pesado dentro del pozo, desde la parte más alta del brocal hasta el espejo del agua, y se tomó la medida de la profundidad en metros. Se midió la altura del brocal desde la parte más alta hasta la superficie del suelo, se tomó la medida en centímetros. Finalmente, se restó la medida en centímetros del brocal a la medida que se tomó desde la parte más alta del brocal hasta el espejo del agua dentro del pozo, esa medida corresponde al NEA.

Se repitió tres veces el proceso en cada pozo para obtener un valor promedio con mayor precisión. Se relacionó el comportamiento del NEA de cada pozo con los resultados obtenidos del programa IsoSource y SIMMR, para relacionar la estabilidad, descenso o posible recarga hídrica lateral de alguna fuente, en su proceso de recuperación, luego se comparó la matriz de rangos porcentuales de los programas respecto al porcentaje de aportación de cada fuente de

recarga y la hidrogeoquímica del agua de cada punto de muestreo para determinar la procedencia de las aguas y responder si existe una relación positiva entre los niveles de agua de pozos y las aportaciones de las obras de cosecha de agua. Finalmente, se confirmó si existía una relación entre las aguas de los pozos y las obras de cosecha de agua.

2.3.9 Medición del NEA en pozos perforados

Se midió el NEA en los pozos perforados utilizando un medidor Testwell Instruments®, compuesto por una cinta métrica de polietileno y un sensor con una sonda de acero.

Se introdujo la sonda del Testwell Instruments® por el tubo piezométrico, descendiendo dentro del pozo hasta activarse el sensor por el contacto con el agua, se tomó medida en metros.

Se midió la altura del brocal desde la parte más alta hasta la superficie del suelo, se tomó la medida en centímetros.

Se restó la medida en centímetros del brocal a la medida que se tomó desde la parte más alta del brocal hasta el espejo del agua dentro del pozo, esa medida corresponde al NEA.

Resumen del procedimiento para cumplir con el Objetivo Especifico OE 1, se realizó un monitoreo de muestras de agua para el análisis de la composición isotópica de las fuentes de recarga y pozos. Con los resultados del laboratorio ($\delta^{18}O$ ‰ y $\delta^{2}H$ ‰), se procedió a elaborar la Línea Meteórica Local de la subcuenca Aguas Calientes, con los datos de la precipitación colectada en el sitio de estudio, la cual se comparó con la Línea Meteórica Local de Nicaragua y la Línea Meteórica Global. Posteriormente, se medió el NEA de los pozos excavados y perforados, luego se realizó un análisis hidrogeoquímico de iones mayoritarios, con los resultados del laboratorio se procedió a elaborar el diagrama de Piper (Figura. 14).

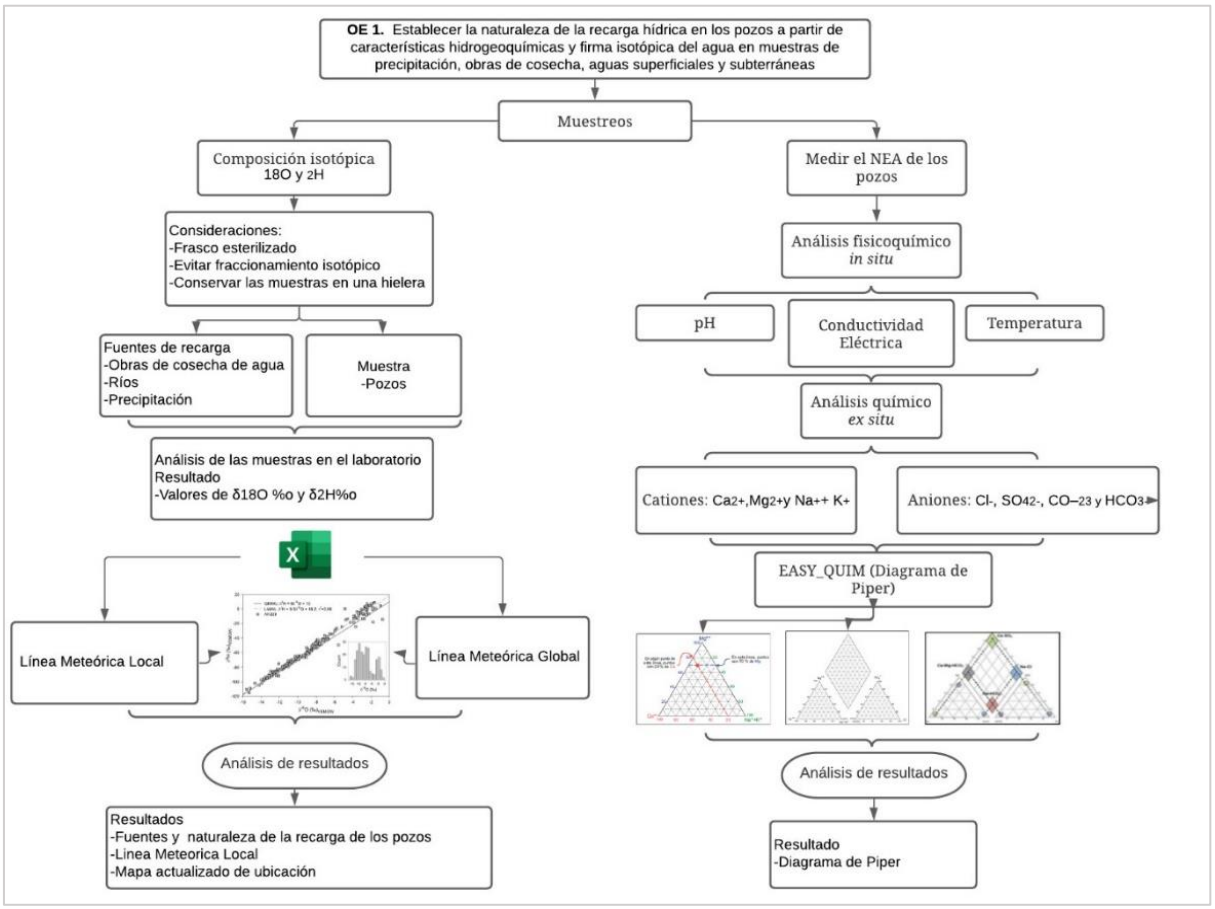


Figura 14. Proceso para el análisis de la composición isotópica y iones mayoritarios.

2.3.10 Análisis de datos con modelo de mezcla IsoSource

Para calcular el rango de contribuciones proporcionales de las fuentes de recarga a los pozos, se analizaron las firmas isotópicas $\delta^{18}O$ (‰) en el modelo IsoSource, versión 1,3,1. Se proporcionaron las firmas isotópicas (ej. relaciones isotópicas o valores de $\delta^{18}O$ (‰) para la mezcla y cada una de las fuentes. Para el procedimiento se manejó un incremento del 1 % y una tolerancia del balance de masa de 0,05 ‰. IsoSource crea, iterativamente, todas las posibles combinaciones de las proporciones de las fuentes que sumen 100 %, usando incrementos ej. 1 %, en los valores de las proporciones (Phillips y Gregg 2003).

Se utilizó el modelo IsoSource (modelo de mezcla de isótopos estables que permite particionar un número de fuentes mayor al modelo dual clásico, que considera “solo tres fuentes”) para analizar y representar la información de la composición isotópica de las muestras de agua comparando las diferentes fuentes (precipitación, cauces, obras de cosecha de agua) con el receptor de la recarga hídrica mezcla (pozos). IsoSource proporcionó archivos de salida que enumeran cada solución factible. Además, el histograma resumido y la estadísticas descriptivas sobre la distribución de estas soluciones (número de soluciones, media, mínimo, máximo 1 % percentiles, 50 % percentiles, 99 % percentiles y desviación estándar, para cada fuente). IsoSource presenta la desviación estándar como una aproximación del error del modelo, se reporta para cada fuente (Phillips y Gregg 2003).

Cada una de las soluciones individuales representan una combinación de proporciones de fuente que satisface el balance de masa isotópico en el modelo de mezcla. En las estadísticas descriptivas se proporciona simplemente como una forma de caracterizar toda esta distribución de soluciones factibles. Para evitar alterar los resultados, se debe informar sobre la distribución de soluciones factibles en lugar de centrarse en un sólo valor como la media (Phillips y Gregg 2003).

2.3.11 Análisis de datos con modelo de mezcla bayesiana SIMMR

Para el análisis de la composición isotópica se utilizó también el modelo de mezcla bayesiano de isótopos estables R (SIMMR), con el objetivo de determinar las contribuciones porcentuales referentes de cada fuente de recarga (obras de cosecha de agua, cauces y precipitación), al agua de los pozos (agua subterránea), a partir de un análisis estadístico bayesiano. SIMMR requiere un mínimo de tres datos de entrada para determinar las contribuciones porcentuales del agua subterránea. El modelo genera un valor de la contribución de cada fuente, desde el más probable al menos probable como una proporción de uno. SIMMR informa sobre la desviación estándar residual, que es la aproximación del error del modelo. Se reporta para cada isótopo, esta representa la distancia media por mil entre las predicciones del modelo y los datos. Un valor alto (aunque lo que alto depende de los datos), indica que el modelo no está funcionado muy bien (Parnell y Inger 2016).

En la primera ejecución del modelo se analizaron los datos de todas las fuentes de recarga con todos los pozos (a nivel de subcuenca), en la segunda ejecución sólo las fuentes de recarga que pertenecen al diseño de muestreo de pozos excavados y luego al diseño de muestreo de pozos perforados (por diseño de muestreo) y la última ejecución por influencia local (pozos adyacentes a las fuentes de recarga). Luego se representaron los valores porcentuales en gráficos y se procedió al respectivo análisis con ambos modelos para determinar cuáles fuentes aportan más a la recarga hídrica del agua subterránea.

Para cumplir con el Objetivo Especifico OE 2, se analizaron los valores de $\delta\,^{18}O$ ‰ de las fuentes de recarga y mezcla (pozos), con el modelo IsoSource y los valores de $\delta\,^{18}O$ ‰ y $\delta\,^{2}H$ ‰ con el modelo de mezcla bayesiano SIMMR. Se obtuvo como resultado una matriz con rangos de contribuciones proporcionales de las diferentes fuentes.

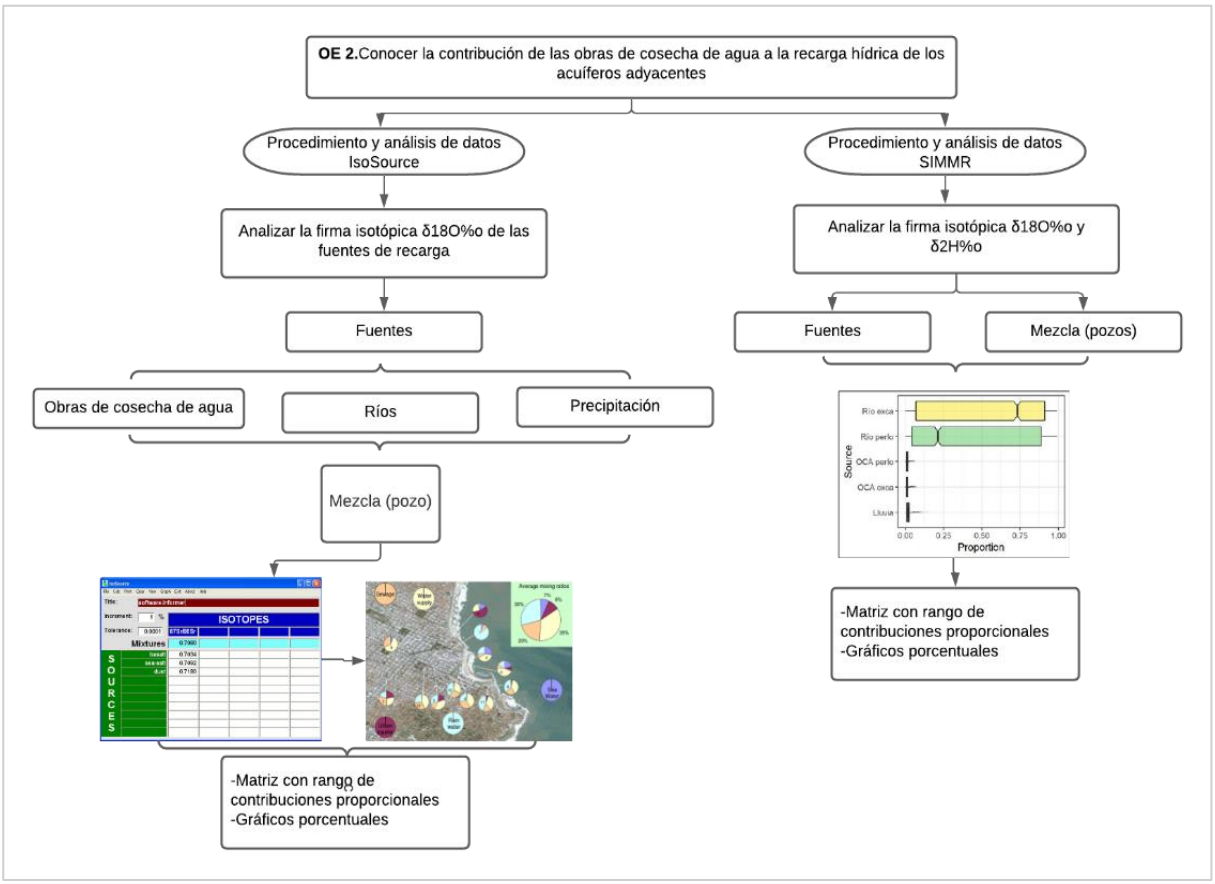


Figura 15. Proceso para el análisis de la composición isotópica con los programas IsoSource y SIMMR.

3. Resultados

3.1 Naturaleza de la recarga hídrica en la subcuenca Aguas Calientes

Los valores mensuales de los eventos de precipitación más enriquecidos por evaporación se dieron en los primeros meses del año 2021 entre enero y principios de mayo, oscilan en el rango de (0,98 a 5,00 ‰ $\delta^{18}O$). Los meses secos presentaron alta temperatura (27 a 34 °C) y baja humedad relativa (20 a 25 %). Por lo tanto, estos eventos de precipitación se clasifican como lluvias de intensidad baja o lluvias esporádicas de poca precipitación entre (0,01-8,53 mm/día y 24-106 mm/mes) (Figura. 16a).

También se observan valores negativos más cercanos a cero en los meses entre enero y principios de mayo entre un rango de (-0,98 a -6,00 ‰ $\delta^{18}O$), en comparación con los valores más empobrecidos o negativos que se presentan a inicios de los meses de la época lluviosa a finales de mayo a principios de junio entre rangos de (-6,00 a -15,00 ‰ $\delta^{18}O$), con precipitación de (0,01-12,81mm/día y 188-257 mm/mes), la cual trae consigo alta humedad relativa (80-85%) y baja temperatura (18-21°C), combinado con el efecto de cantidad y frecuencia de eventos continuos de precipitación abundante (Figura. 16a).

El *d-excess* (‰) indica la procedencia de la precipitación y la fuente de humedad que interviene en ella, restringe tanto la fuente de precipitación como las condiciones durante el transporte de las nubes, de acuerdo por donde entra la humedad si viene del Océano Pacífico o del Mar Caribe, así podría disminuir o aumentar.

La mayoría de los valores de *d-excess* (‰) en los meses secos enero a principios de mayo se presentan entre (10 a 20 ‰), por encima de la línea de tendencia de 10 ‰; que es el punto de equilibrio como intercepto de la fórmula de GMWL, esto es característico de la contribución del reciclaje de vapor local. Por lo tanto, el aumento en los valores en *d-excess* (‰), probablemente implique un proceso de evaporación, condiciones orográficas de la zona, mayor influencia de los vientos alisios procedentes del noreste del Mar Caribe y pocos eventos de precipitación (Sánchez-Murillo *et al.* 2016). Cuando más fraccionamiento cinético se produce, mayor es el *d-excess* (‰) observado en el vapor, se observan valores de *d-excess* (‰) más altos en la precipitación cuando la humedad relativa es baja sobre los cuerpos de agua en la evaporación (Cappa *et al*. 2003). Los valores de *d-excess* (‰) en los meses secos (< 8 ‰), indican una evaporación secundaria de las gotas de lluvia que caen en una atmosfera cálida y seca (Bronić *et al.* 2020). Lo que implica procesos más lentos de recarga de la matriz del suelo (Sánchez-Murillo y Birkel 2016) (Figura. 16b).

También se observó un patrón similar de distribución mensual de *d-excess* (‰) en los meses de enero-mayo (> 10 ‰). Sin embrago, los altos valores de *d-excess* (‰) encontrados pueden dar indicios que el inicio de las precipitaciones de la época lluviosa varió las condiciones hacia un aumento de humedad relativa explicado por un reciclaje de humedad local que aumenta la fracción de evaporación (Kong *et al.* 2013). Los valores mensuales más bajos de *d-excess* (‰) se observaron en los meses lluviosos junio a julio (< 10 ‰), con excepción de algunos valores desde finales de enero-abril, probablemente por el efecto de transporte de humedad, masas de aire provenientes del Océano Pacífico y más eventos de precipitación. Estos valores de *d-excess* (< 5 ‰), corresponden a meses con poca precipitación con casos excepcionales en época lluviosa (Bronić *et al.* 2020) (Figura. 16b).

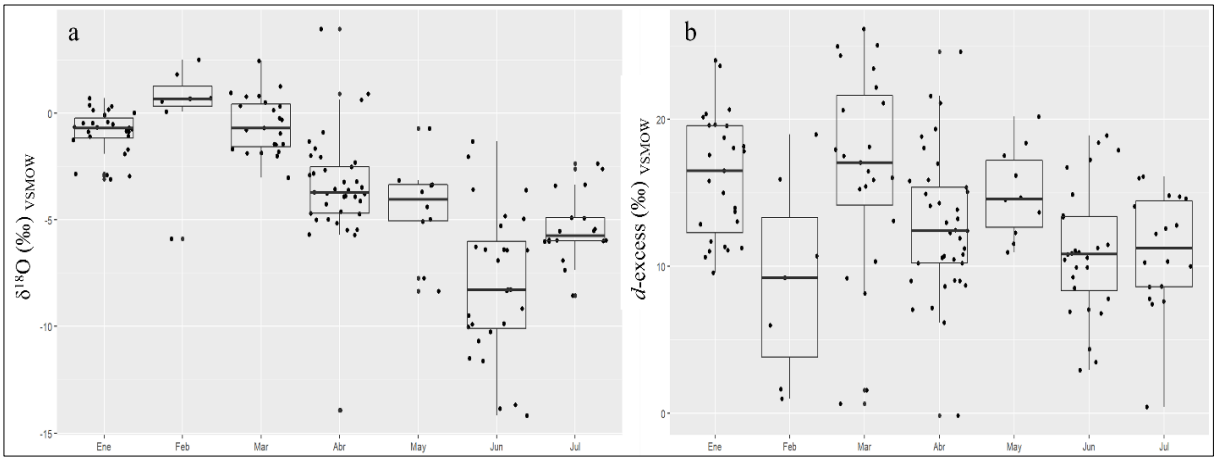


Figura 16. a) relación $\delta^{18}O$ (‰) con época seca y principios de la época lluviosa y b) relación *d-excess* (‰) con época seca y principios de la época lluviosa.

La Línea Meteórica Local (LMWL de la subcuenca Aguas Calientes), presenta la siguiente ecuación ($\delta^2H = 8{,}14\ \delta^{18}O + 13{,}88$), mostrando correlación lineal correspondiente a la ecuación ($\delta^2H = 8{,}70\ \delta^{18}O + 11{,}53$) de la LMWL de Nicaragua. Las pendientes altas en comparación con GMWL son un artefacto introducido por las muestras de la estación seca que presentaron alto valores de *d-excess* (‰) como resultado de evaporación (Sánchez-Murillo *et al.* 2016).

De acuerdo con los datos descriptivos de los valores de la LMWL de la subcuenca Aguas Calientes, en época seca el valor máximo ponderado de $\delta^{18}O$ es +3,94 ‰ y la composición de la desviación estándar mostró sistemáticamente valores ± 0,19, el valor mínimo ponderado es -13,92 ‰ y ± 0,01 y el valor medio ponderado es de -2,01 ‰ y ± 0,07. Siendo el valor máximo ponderado de δ^2H es +31,40 ‰ y ± 0,57, el valor mínimo ponderado es -102,35 ‰ y ± 0,12 y el valor medio ponderado es de -1,65 ‰ y ± 0,3. El valor máximo ponderado de *d-excess* (‰) es +26,12 ‰, el valor mínimo ponderado es -0,15 ‰ y el valor medio ponderado es 14,43 ‰.

Para principios de la época lluviosa el valor máximo ponderado de $\delta^{18}O$ es -2,04 ‰ y la composición de la desviación estándar mostró sistemáticamente valores ± 0,13, el valor mínimo ponderado es -14,18 ‰ y ± 0,02 y el valor medio ponderado es de -7,08 ‰ y ± 0,06. Siendo el valor máximo ponderado de δ^2H es -6,15 ‰ y ± 0,50, el valor mínimo ponderado es -103,53 ‰ y ± 0,10 y el valor medio ponderado es de -45,66 ‰ y ± 0,30. El valor máximo ponderado de *d-excess* (‰) es +18,88 ‰, el valor mínimo ponderado es -0,45 ‰ y el valor medio ponderado es 10,99 ‰.

Para la LMWL de Nicaragua, el valor máximo ponderado de $\delta^{18}O$ es -2.9 ‰, el valor mínimo ponderado es -8.2 ‰ y el valor medio ponderado es de -5.3 ‰. Y el valor máximo ponderado de δ^2H es -12.2 ‰, el valor mínimo ponderado es -57.8 ‰ y el valor medio ponderado es de -34.7‰.

Los valores empobrecidos o negativos de la LMWL de la subcuenca Aguas Calientes, se encuentran entre (-0,98 a -15 ‰ $\delta^{18}O$) y (-0,98 a -100 ‰ δ^2H), en zonas con características de alta altitud (900-1 730 msnm), alta humedad relativa (80%), climas fríos (18-21 °C), mayores eventos de lluvia de procedencia local. Los valores enriquecidos o positivos oscilan entre los rangos de (0,98 a 10 ‰ $\delta^{18}O$) y (0,98 a 50 ‰ δ^2H), en zonas que presentan las siguientes

características (620-700 msnm), alta humedad relativa (25%), climas cálidos (27-34 °C), pocos eventos de precipitación.

Considerando también que a mediados de mayo, cuando la ZCIT se desplaza sobre Costa Rica y la prevalencia de las condiciones de la sequía a mediados del verano a lo largo de Centroamérica resultan una mayor variabilidad isotópica durante la estación húmeda, aunque las proporciones isotópicas están más agotadas durante esta estación en comparación con la estación seca, lo que repercute en el empobrecimiento de isótopos (Sánchez-Murillo *et al*. 2016).

Un conjunto de muestras de precipitación que se presentan por debajo de la GMWL es indicativo de la re-evaporación de las gotas de lluvia durante eventos de precipitación (Banda *et al*. 2021). Aunque, la mayoría de las muestras de precipitación local se dispersaron a lo largo de la LMWL de la subcuenca Aguas Calientes, esto corrobora que hubo influencias evaporativas insignificantes, lo cual también indica un exceso $\delta^{18}O$ lo que podría indicar una evaporación secundaria de las gotas de agua lluvia (representado por un aumento en los valores de *d-excess* ‰), con lo que se puede inferir que la precipitación se estaría originando por la humedad del aire reciclado.

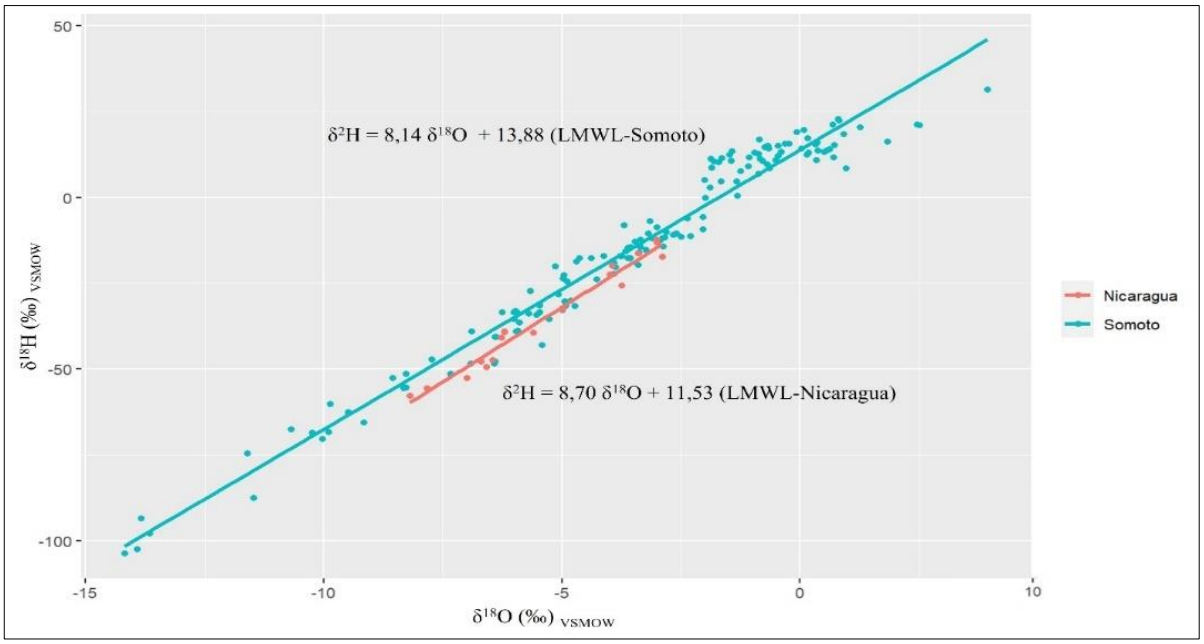


Figura 17. LMWL de la subcuenca Aguas Calientes, mostrando como referencia la LMWL de Nicaragua.

En la Figura. 18, se representa la composición isotópica de los diferentes tipos de agua, precipitación, subterránea (pozos excavados y perforados) y superficial (obras de cosecha de agua y cauces). Existe enriquecimiento en la composición isotópica del agua de las obras de cosecha, probablemente, por un proceso de evaporación, los rangos de valores isotópicos enriquecidos se presentan entre (0,98 a 15 ‰ $\delta^{18}O$) y (0,98 a 60 ‰ $\delta^{2}H$), y valores empobrecidos se presentan entre el rango de (-0,98 a -7 ‰ $\delta^{18}O$) y (-0,98 a -55 ‰ $\delta^{2}H$), siendo estos valores isotópicos los que más similitud presentan con la signatura isotópica del agua subterránea.

Por otra parte, la composición isotópica del agua subterránea y los cauces es similar, sus valores se observan entre dos rangos (-5,0 a -10 ‰ $\delta^{18}O$) y (-40 a -60 ‰ $\delta^{2}H$), por lo tanto, se considera que los cauces son la fuente que estaría contribuyendo en mayor medida a la recarga del agua subterránea. También existe una recarga directa y esta corresponde al aporte de la precipitación, los valores enriquecidos de la precipitación están entre los rangos de (0,98 a 5,00 ‰ $\delta^{18}O$) y (0,98 a 45 ‰ $\delta^{2}H$) y sus valores empobrecidos están dentro del rango de (-0,98 a -15 ‰ $\delta^{18}O$) y (-0,98 a -105 ‰ $\delta^{2}H$), son los valores isotópicos que más similitud tienen con el agua subterránea.

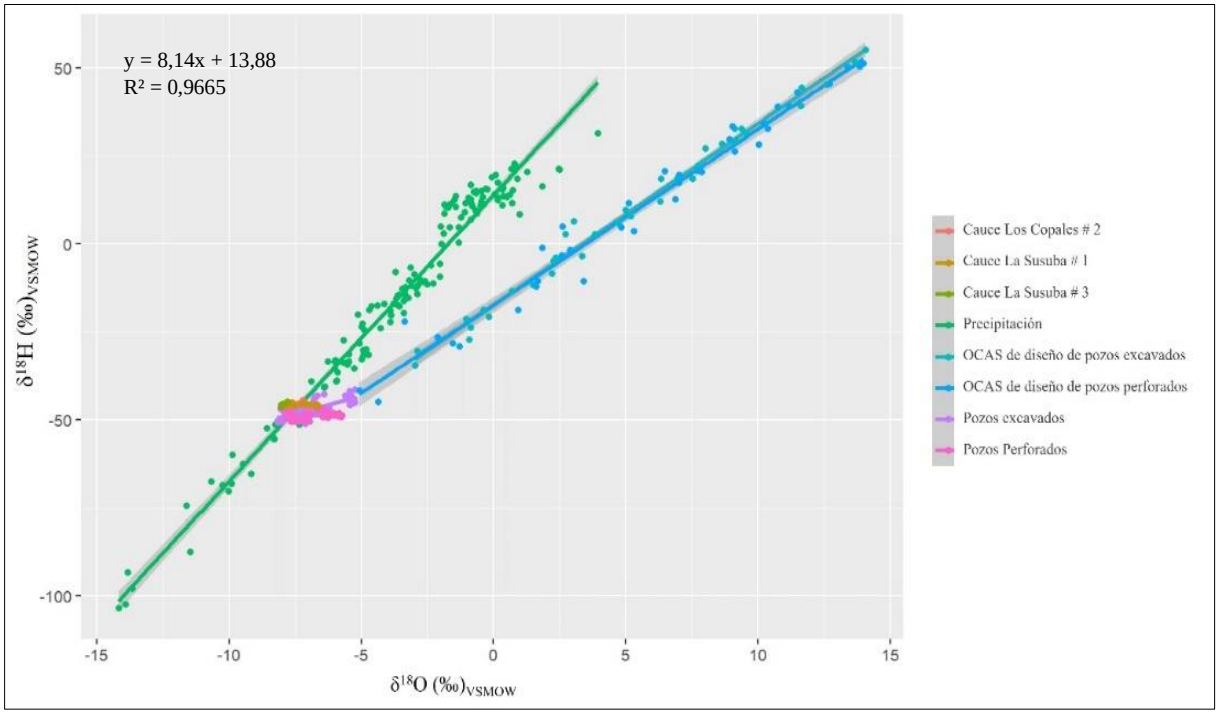


Figura 18. Relación de los valores isotópicos por tipos de aguas.

3.2 Monitoreo del Nivel Estático del Agua

Se evaluaron las variaciones estacionales del NEA en siete pozos excavados, desde diciembre del 2020 a julio del 2021 con una frecuencia semanal. Se observó que los mayores gradientes piezométricos se encuentran en las fronteras del acuífero, disminuyendo en el centro de la subcuenca, en concordancia con el desnivel del terreno en la zona.

El pozo excavado 01, ubicado en la comunidad Los Copales, en la ribera del cauce Los Copales estaría influenciado por este cauce, sin embargo, este tramo permaneció sin agua superficial en el cauce durante todo el periodo de muestreo. Este pozo tuvo una tendencia de descenso del NEA de 4,41 m desde la primera semana de febrero a la primera semana de julio. Presentando en febrero un descenso de la primera a la última semana de sólo 0,48 cm con influencia de precipitación relativamente baja, en comparación con una contribución de recarga hídrica muy rápida de la segunda a la tercera semana de marzo de -7,81, m a -7,63 m recuperando en una semana 0,18 cm, con una precipitación de 2,8 mm a la fecha, en abril muestra un descenso de 0,59 cm de la primera a la última semana con una influencia de precipitación relativamente alta de 8 mm en la tercera semana, desde mayo-julio continuo el descenso del NEA representando el mayor valor de precipitación 4,98 mm en junio (Figura. 19).

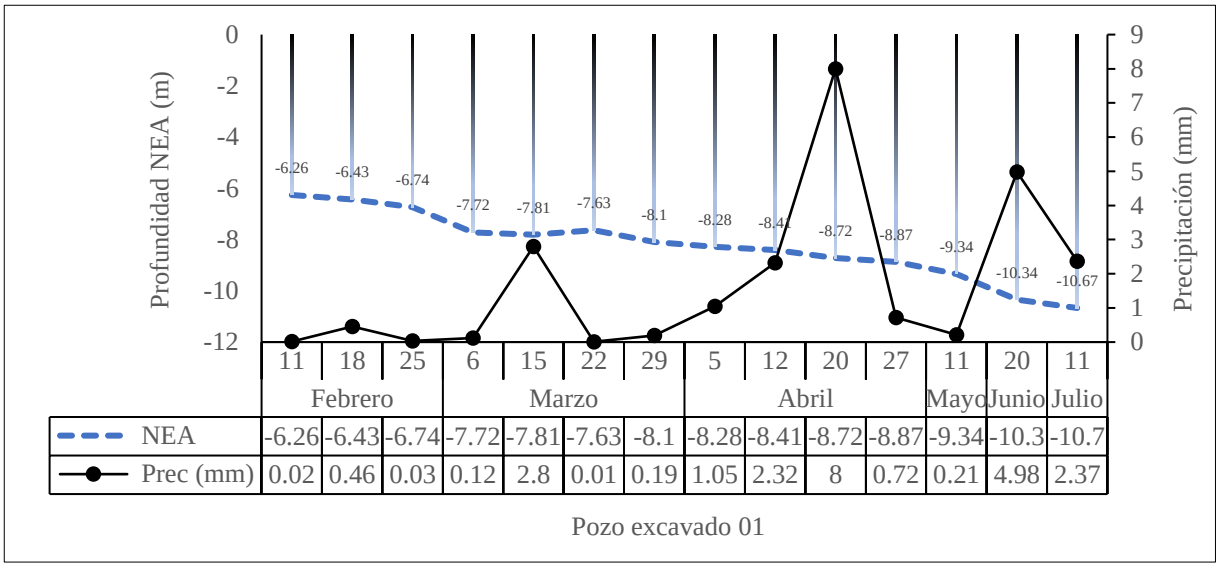


Figura 19. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 01 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio.

El pozo excavado 02, ubicado en la comunidad Santa Rosa, en la ribera del cauce La Susuba con abundante agua superficial en el cauce desde enero-mayo, disminuyendo en junio. Este pozo tuvo una tendencia de descenso relativamente estable del NEA de 1,45 m desde la primera semana de febrero a la primera semana de julio. Presentando en febrero un descenso mínimo de la primera semana a la última de sólo 0,08 cm con una influencia muy baja de precipitación recuperando 0,02 cm en la recarga hídrica de la segunda-tercera semana de febrero. En comparación con una contribución de recarga hídrica de 0,02 cm también de la primera-segunda semana de marzo con una relación significativa de 2,8 mm de precipitación a la fecha, recuperó 0,01 cm de contribución a la recarga hídrica de la primera-segunda semana de abril con una influencia de precipitación relativamente alta de 8 mm en la tercera semana, mostrando un descenso significativo en el NEA de mayo-julio paralelo con el descenso del cauce (Figura. 20).

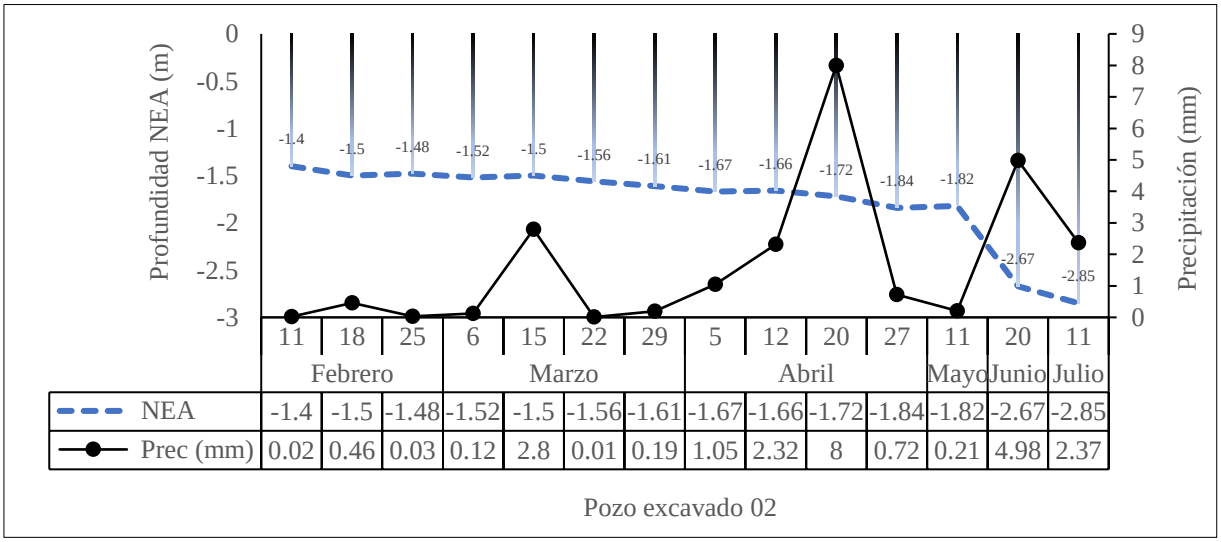


Figura 20. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 02 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio.

El pozo excavado 03, ubicado en la comunidad Aguas Calientes, en la ribera del cauce Aguas Caliente, el cual podría estar influenciado por este cauce, sin embargo, este tramo se mantuvo sin agua superficial en el cauce durante todo el periodo de muestreo. Este pozo estuvo en monitoreo directo a nivel de terreno con la obra de cosecha de agua 03, considerando la orientación de la red de flujo del agua subterránea de noroeste hacia dicho reservorio. Este pozo tuvo una tendencia de descenso del NEA de 1,05 m desde la última semana de enero a la primera semana de julio. En febrero hubo una contribución a la recarga hídrica de 0,07 cm con poca precipitación, en marzo recuperó 0,07 cm en la primera-segunda semana, y recuperando 0,12 cm de la tercera-cuarta semana de marzo con influencia de precipitación baja de 2,08 mm en la segunda semana de marzo.

En abril una contribución a la recarga hídrica muy significativa de 0,46 cm de la segunda-tercera semana con influencia de precipitación relativamente alta de 8 mm entre este periodo de lluvia, y se evidencia un descenso del NEA de mayo-julio, representando el mayor valor de precipitación 4,98 mm en junio (Figura. 21).

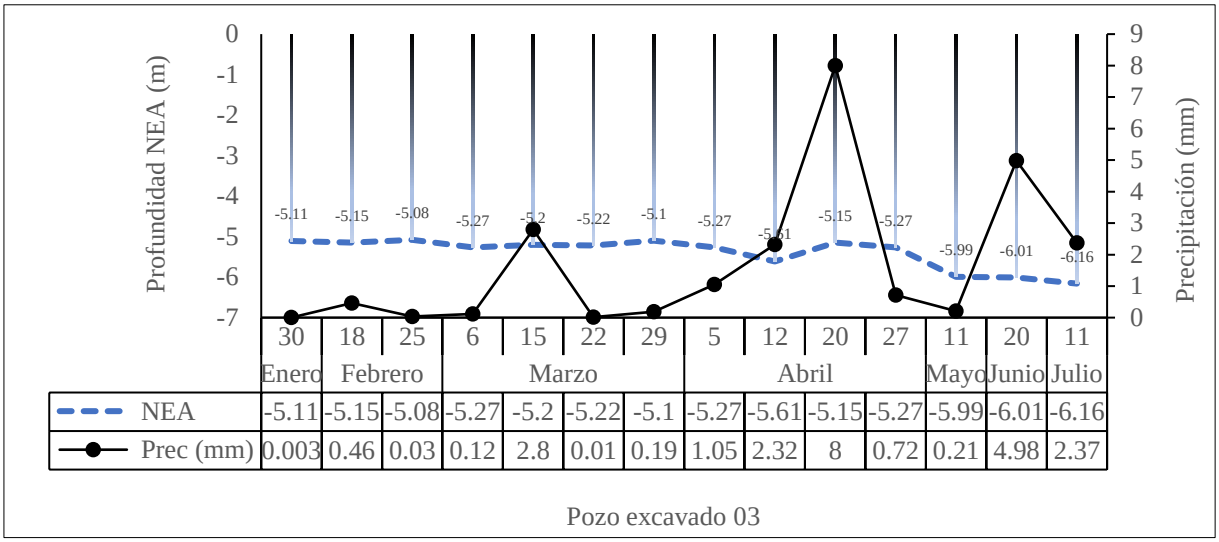


Figura 21. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 03 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio.

El pozo excavado 09, ubicado en la comunidad Santa Rosa en monitoreo directo a nivel de terreno con la obra de cosecha de agua 04, considerando la orientación de la red del flujo del agua subterránea hacia noroeste a dicho reservorio. Este pozo tuvo una tendencia de descenso del NEA de 2,35 m desde la primera semana de febrero a la última semana de julio. Presentando en febrero un descenso de la primera a la última semana de sólo 0,28 cm con influencia de precipitación relativamente baja, en comparación con una contribución a la recarga hídrica de 0,09 cm en la última semana de marzo a la primera semana de abril, evidenciando un descenso del NEA desde la segunda semana de abril-julio, representando los mayores valores de precipitación 8 mm en la tercera semana de abril y 4,98 mm en junio (Figura. 22).

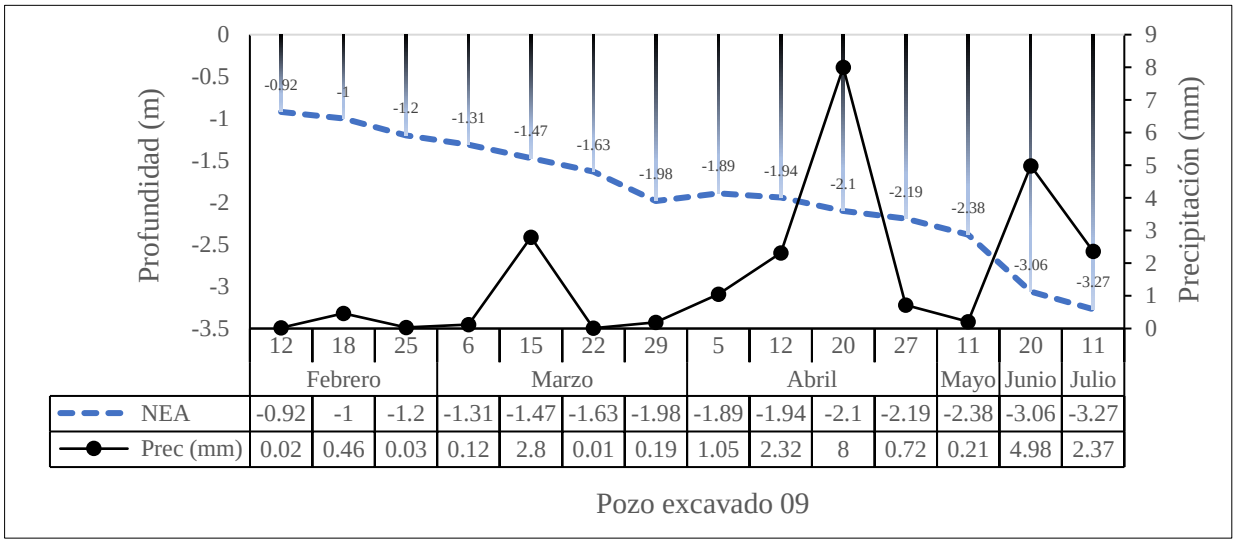


Figura 22. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 09 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio.

El pozo excavado 10, ubicado en la comunidad Santa Rosa, en la ribera del cauce La Susuba estaría influenciado por este cauce, sin embargo, este tramo permaneció sin agua superficial en el cauce durante todo el periodo de muestreo. Este pozo tuvo una tendencia de descenso del NEA de 1,54 m desde la última semana de febrero a la primera semana de julio, en la tercera-cuarta semana de marzo se observa una recarga hídrica de 0,02 cm con una influencia relativamente baja de 2,8 mm de precipitación. En este pozo, en abril se mantiene estable el NEA durante las primeras dos semanas, luego se muestra una contribución a la recarga hídrica de 0,17 cm de la segunda-tercera semana, se presenta el mayor valor de precipitación de 8 mm en la tercera y en la última semana de abril, posteriormente en la primera semana de mayo, mostrándose también una contribución a la recarga hídrica de 0,05 cm. En comparación con los meses de junio y julio donde se observa un descenso del NEA (Figura. 23).

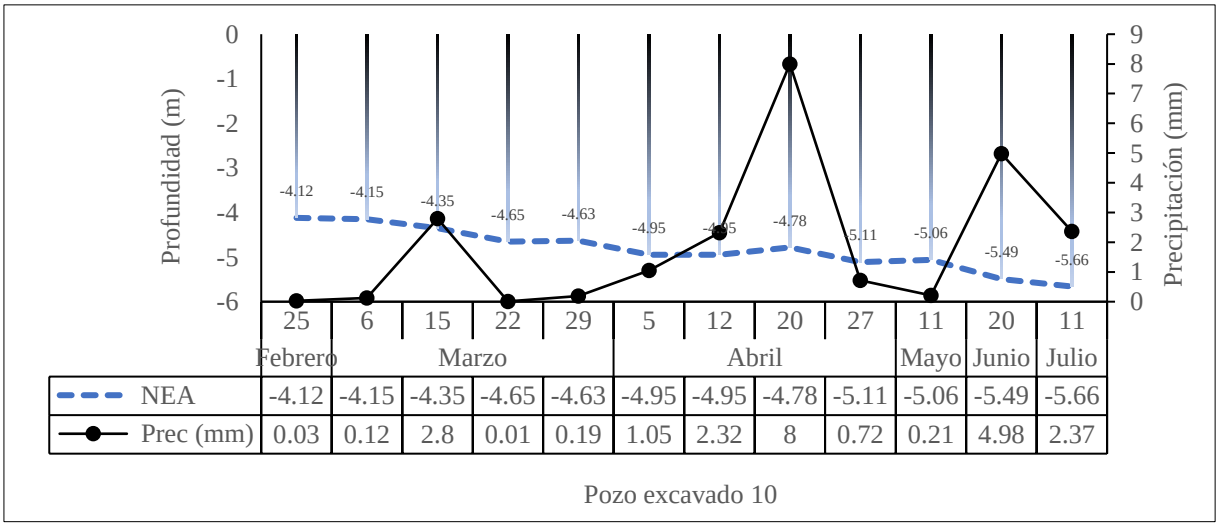


Figura 23. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 10 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio.

El pozo excavado 11, ubicado en la comunidad Uniles de Suyapa, en la ribera del cauce La Susuba estaría influenciado por este cauce, pues este se mantuvo con abundante agua superficial desde enero-mayo, disminuyendo en junio. Este pozo tuvo un descenso del NEA de 1,65 cm desde la última semana de febrero a la primera semana de julio, manteniendo una tendencia estable desde febrero-abril. Se puede observar una recuperación de 0,01 cm entre la última semana de febrero a la primera semana de marzo, luego se observa otra contribución a la recarga hídrica de la segunda-tercera semana de marzo de 0,06 cm con una influencia de 2,8 mm de precipitación durante la segunda semana de marzo.

Asimismo, se observa una contribución a la recarga hídrica significativa de 0,27 cm entre la última semana de abril a la primera semana de mayo con una influencia de 8 mm de precipitación en la tercera semana de abril y luego se observa un descenso significativo en el NEA de mayo-julio paralelo con el descenso del cauce (Figura. 24).

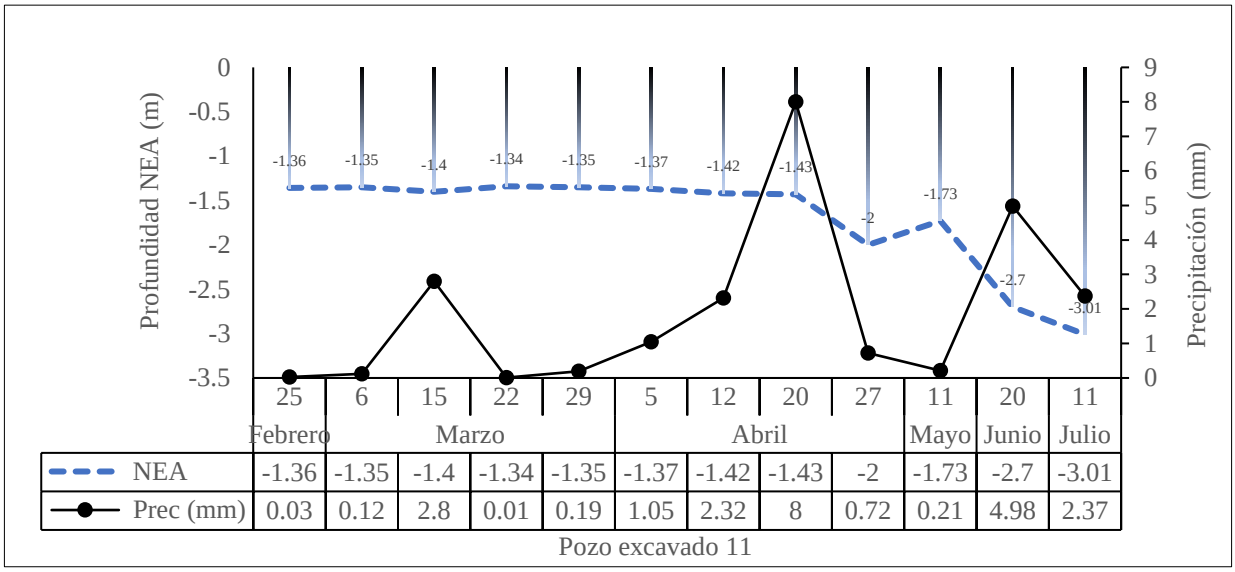


Figura 24. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 11 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio.

El pozo excavado 12, ubicado en la comunidad Santa Rosa fue monitoreado a nivel de terreno en una propiedad que también contaba con la obra de cosecha de agua 02, considerando la orientación de la red del flujo del agua subterránea hacia noroeste de dicho reservorio. Este pozo tuvo una tendencia de descenso del NEA muy significativo de 8,17 m desde la última semana de enero a la última semana de julio. Así también se puede observar un descenso muy significativo de 4,96 m de la última semana de febrero a la primera semana de marzo con 2,8 mm de precipitación en la segunda semana, se observa una contribución a la recarga hídrica de 0,6 cm la primera-segunda semana de marzo, mientras que se observa un nuevo descenso de 3,15 m del NEA entre la segunda y tercera semana de marzo.

En comparación a la primera-segunda semana de abril, este pozo muestra una recuperación del NEA de 0,61 cm, observándose igualmente una nueva recuperación de 0,19 cm entre mayo a junio con influencia de 4,8 mm de precipitación en junio; posteriormente, se observa un descenso significativo de 0,99 cm de junio a julio (Figura. 25).

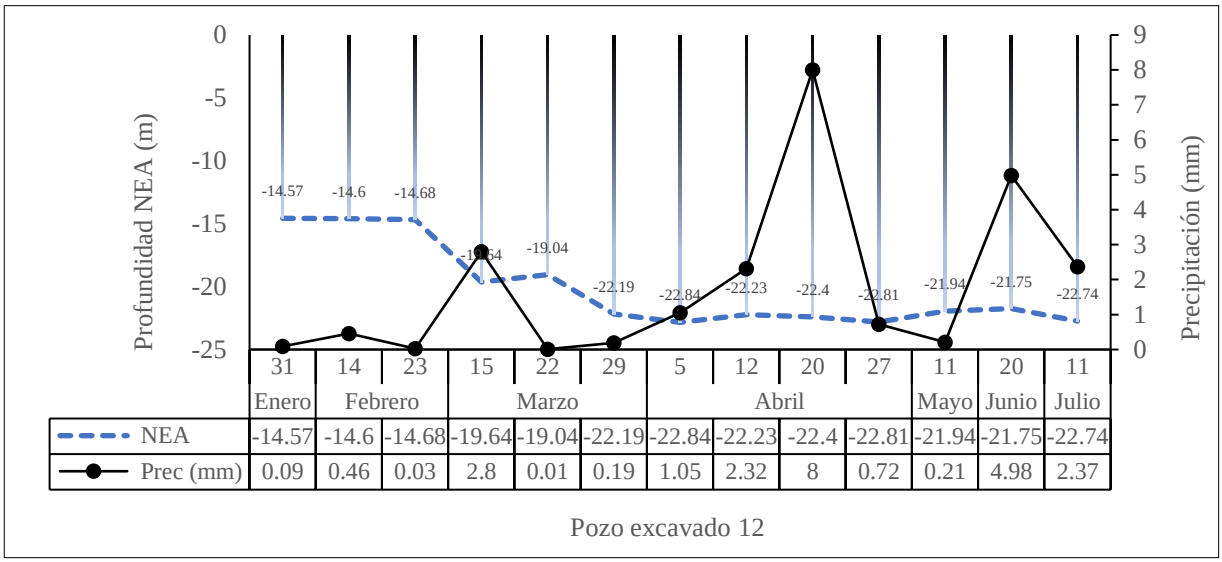


Figura 25. Representación de la tendencia temporal del NEA en el pozo excavado 12 en la subcuenca Aguas Calientes durante el periodo de estudio.

3.3 Composición Hidrogeoquímica

El análisis de la composición iónica, clasificación y disoluciones del agua para este estudio se representa a través del diagrama de Piper. Se analizó agua superficial de cauces y obras de cosecha de agua y agua subterránea de pozos excavados y perforados. La composición hidrogeoquímica del agua subterránea y manantiales, es principalmente del tipo HCO_3^- Ca^{2+} Mg^{2+} (Bicarbonatada cálcica magnésica). En cuanto al agua superficial, se determinaron dos tipos HCO_3^- Ca^{2+} Mg^{2+} (Bicarbonatada cálcica magnésica): seguida del tipo HCO_3^- Na^+ (Bicarbonatada sódica). Clasificándose en los siguientes grupos:

Grupo 1: Obras de cosecha de agua: empobrecidas en calcio y magnesio (10 %), pero muy ricas en sodio y potasio (90 %) y en cloruro (30 %) (delimitación color verde).

Grupo 2: Agua de pozos perforados: se evidencia enriquecimiento de minerales (magnesio, sodio y potasio) (delimitación color azul).

Grupo 3: Corresponde al agua de los pozos excavados en aluviones y del agua en cauces, aguas típicamente bicarbonatadas cálcicas (delimitación color rojo).

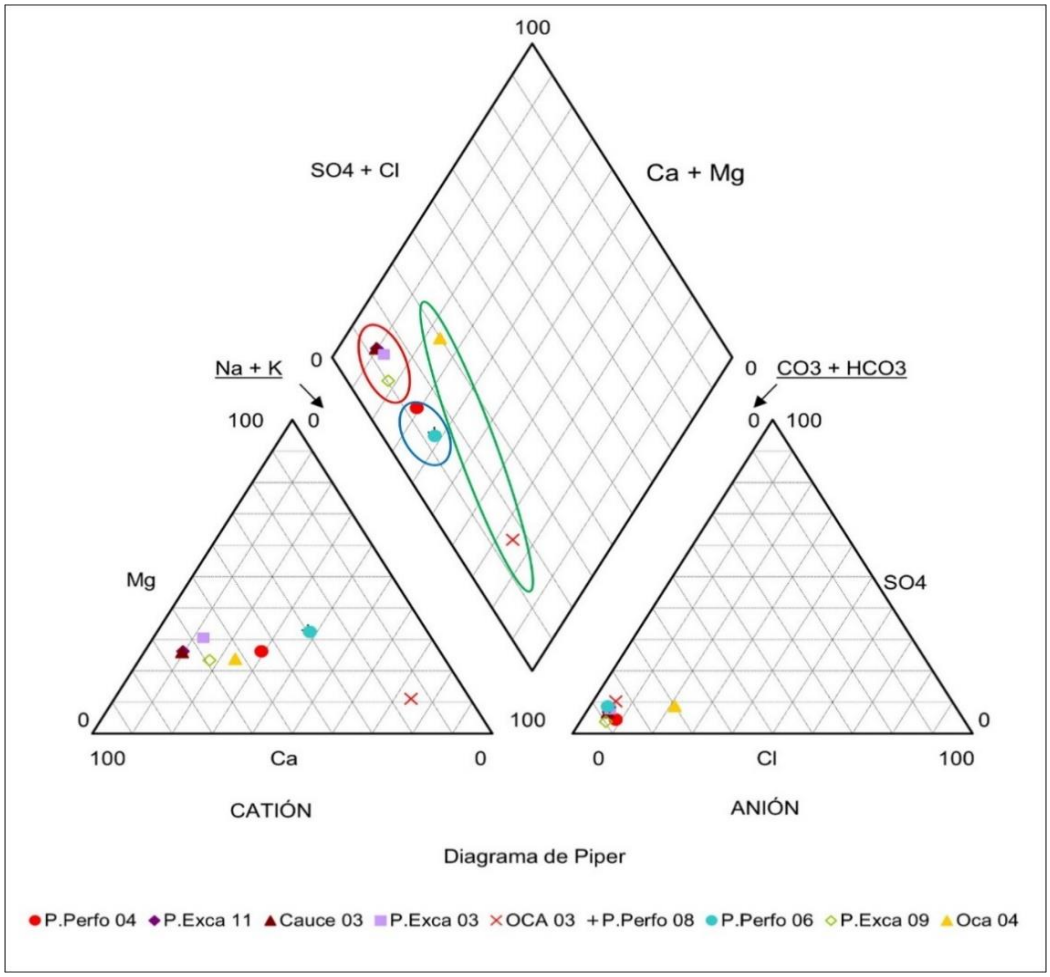


Figura 26. Diagrama de Piper composición iónica de agua superficial y subterránea.

3.4 Contribución de las obras de cosecha de agua a la recarga hídrica en los pozos adyacentes

De acuerdo con los resultados de los modelos de mezcla utilizados en este análisis (IsoSource y SIMMR), las fuentes de agua que estarían contribuyendo a la mezcla (pozos o agua subterránea) fueron la precipitación, las obras de cosecha de agua y los cauces. Los datos porcentuales se representan a nivel de toda la subcuenca y por diseño de muestreo (pozos excavados y pozos perforados) (Figura. 6 y 8) (Cuadro. 5).

Cuadro 5. Contribuciones porcentuales como aporte de las fuentes de recarga hídrica a los pozos (agua subterránea) a nivel de la subcuenca y por diseño de muestreo.

Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados y perforados (agua subterránea) con todas las obras de cosecha, tanto del diseño de pozos excavadas como pozos perforados, análisis a nivel de subcuenca				
		Fuentes		
	Mezcla	**Precipitación %**	**Obras de cosecha de agua %**	**Cauces %**
IsoSource	Agua subterránea	7,5	1,8	90,7
SIMMR		2,4	1,7	95,9
Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados sólo con las obras de cosecha de agua y cauce del diseño de pozos excavados, análisis a nivel de subcuenca				

		Fuentes		
	Mezcla	**Precipitación %**	**Obras de cosecha de agua %**	**Cauce %**
IsoSource	Pozos excavados	7,2	2,4	90,4
SIMMR		3,7	2,6	93,7
Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos perforados sólo con las obras de cosecha de agua y cauce del diseño de pozos perforados, análisis a nivel de subcuenca				
		Fuentes		
	Mezcla	**Precipitación %**	**Obras de cosecha de agua %**	**Cauce %**
IsoSource	Pozos perforados	5,3	1,4	93,3
SIMMR		5,2	3,6	91,2

La Figura. 27, representa el porcentaje de contribución de las fuentes de recarga hídrica consideradas en este estudio, todos los pozos excavados y perforados (agua subterránea), con las obras de cosecha de agua y cauces de ambos diseños, que corresponde a una representación a nivel de subcuenca. De acuerdo con el análisis del modelo IsoSource, los cauces: Los Copales y La Susuba son las fuentes de mayor aporte a la contribución de la recarga hídrica al agua subterránea en el área de estudio, representando el 90,7 %, considerándose una contribución lateral o por infiltración de los cauces al acuífero aluvial y volcánico, seguida por la precipitación, con pocos eventos tanto en los meses secos como meses lluviosos, la cual representanta el 7,5 % de aporte por recarga directa. Las obras de cosecha de agua tienen un aporte a la recarga hídrica del agua subterránea por infiltración de 1,8 %.

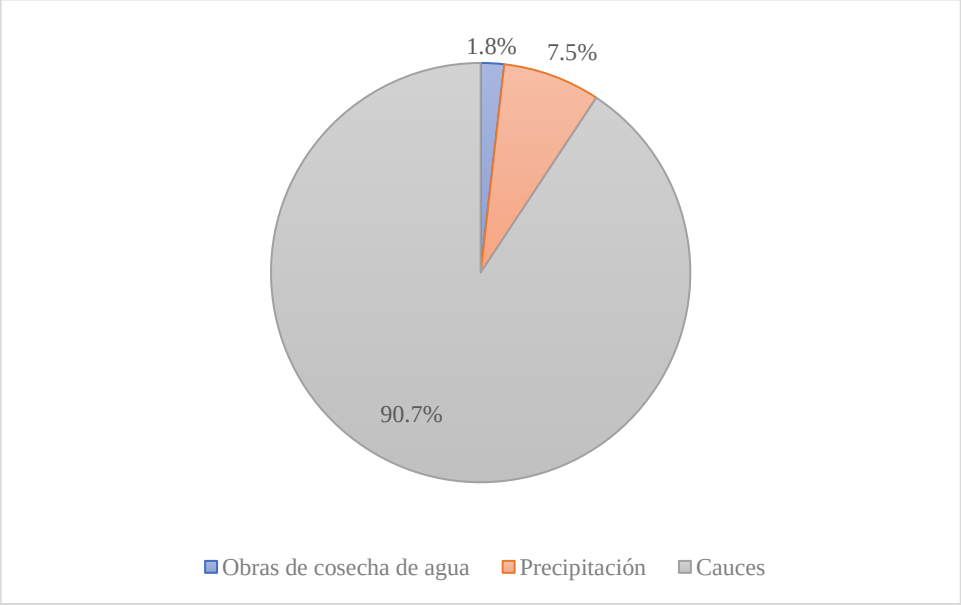


Figura 27. Contribuciones porcentuales de las fuentes de recarga hídrica al agua subterránea a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo IsoSource.

De acuerdo con los resultados del modelo SIMMR, los cauces: Los Copales y La Susuba son la fuente de mayor aporte a la contribución hídrica de las aguas subterráneas en el área de estudio, representando el 95,9 %, lo que podría indicar la presencia de infiltración del agua de los cauces

al acuífero aluvial y volcánico; esta contribución fue 5,2 % mayor a la estimada con el modelo IsoSource.

Las obras de cosecha de agua contribuyen con 1,7 % a la recarga hídrica subterránea, considerándose por infiltración, en comparación con el resultado del modelo IsoSource el aporte fue menor por 0,1 %. La tercera fuente de contribución a la recarga es la precipitación, al haberse presentado, pocos eventos tanto en época seca y lluviosa, se observa un 2,4 % de contribución de la precipitación a la recarga hídrica subterránea, considerándose una recarga directa, y este valor fue 5,1 % menor al estimado con el modelo IsoSource (Figura. 28).

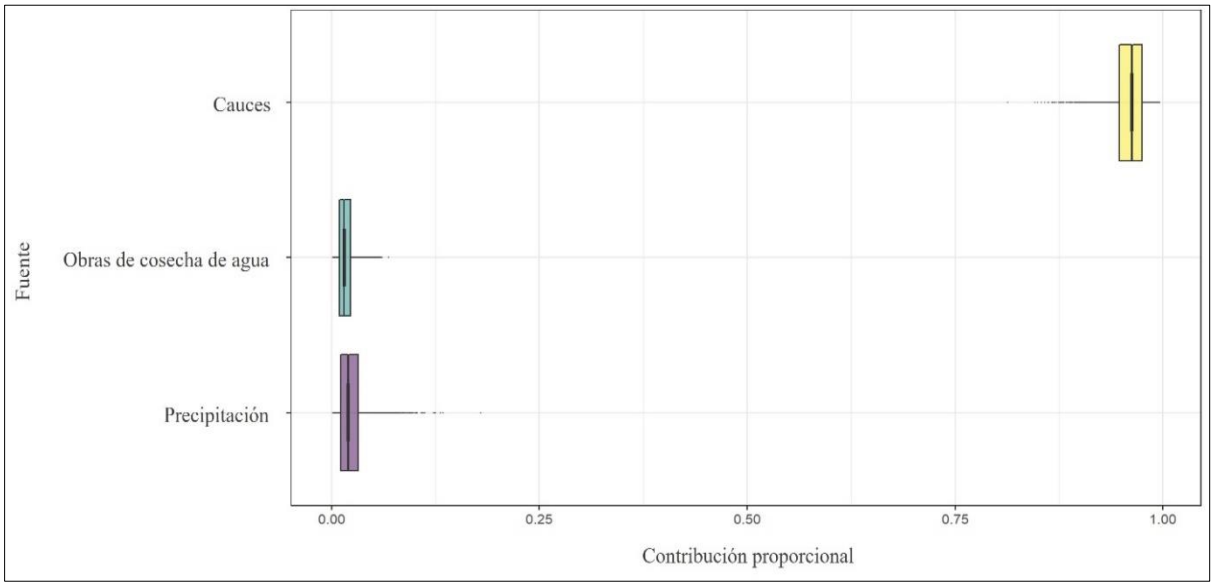


Figura 28. Contribuciones porcentuales de las fuentes de recarga hídrica al agua subterránea nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo SIMMR.

De igual manera, se representa el porcentaje de contribución de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados sólo con las obras de cosecha de agua y cauce que pertenecen a este diseño de muestreo, es decir, aquellos casos donde las obras de cosecha de aguas se sitúan en las adyacencias de los pozos excavados, donde se agrupan dichos casos resultando en un análisis a nivel de subcuenca. De acuerdo con el análisis del modelo IsoSource, el cauce La Susuba es la fuente de mayor aporte a la contribución de la recarga hídrica, representando el 90,4 %, considerándose una infiltración del cauce al acuífero aluvial, seguida por la precipitación, con los pocos eventos tanto en los meses secos como principios de meses lluviosos, representando una contribución de 7,2 % por recarga directa y finalmente, las obras de cosecha de agua, con un aporte 2,4 % (Figura. 29).

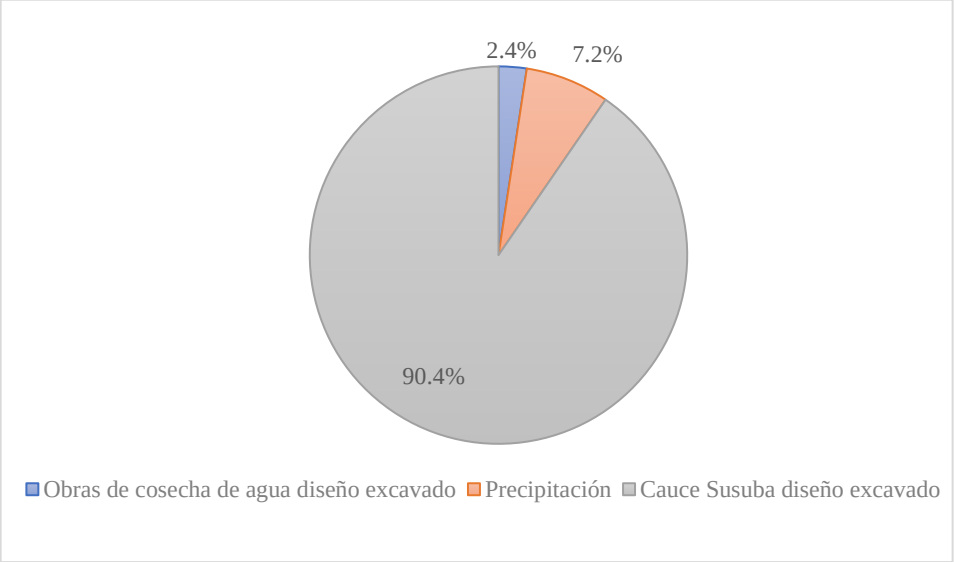


Figura 29. Contribuciones porcentuales de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo IsoSource.

De acuerdo con el análisis del modelo SIMMR, el cauce La Susuba es la fuente de mayor aporte con una contribución a la recarga hídrica, que representa el 93,7 %, considerándose una recarga lateral del cauce al acuífero aluvial, valor que, en comparación con el resultado del modelo IsoSource fue mayor por 3,3 %.

La siguiente fuente de recarga es la precipitación, donde a partir de los pocos eventos tanto en los meses secos como principios de meses lluviosos, se observa una contribución de 3,7 % a la recarga directa, el cual fue 3,5 % menor al valor estimado con IsoSource. Las obras de cosecha de agua aportan 2,6 % a la contribución de la recarga hídrica al acuífero por infiltración, siendo 0,2 % mayor al valor reportado por IsoSource (Figura. 30).

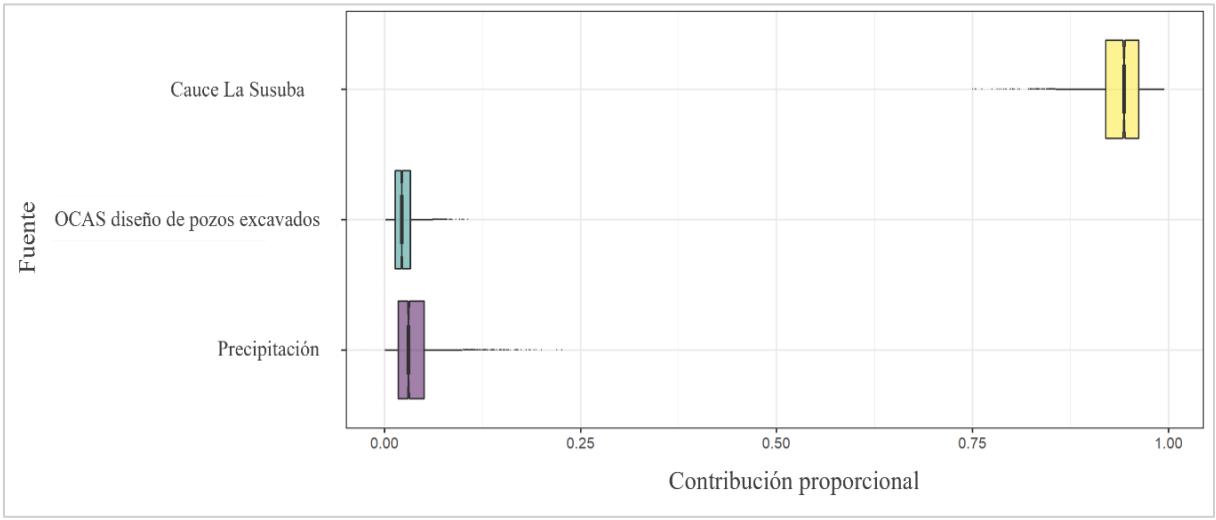


Figura 30. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo SIMMR.

De igual manera, se representa el porcentaje de contribución de las fuentes de recarga hídrica a los pozos perforados sólo con las obras de cosecha de agua y cauce que pertenecen a este diseño de muestreo. De acuerdo con el análisis del modelo IsoSource, el cauce Los Copales es la fuente de mayor aporte de contribución a la recarga hídrica, representando el 93,3 %, considerándose una recarga lateral del cauce al acuífero volcánico, seguida por la precipitación, con los pocos tanto en los meses de secos como principios de meses lluviosos, la cual represento el 5,3 % de la contribución a la recarga hídrica subterránea por recarga directa, las obras de cosecha de agua aportan el 1,4 % por infiltración (Figura. 31).

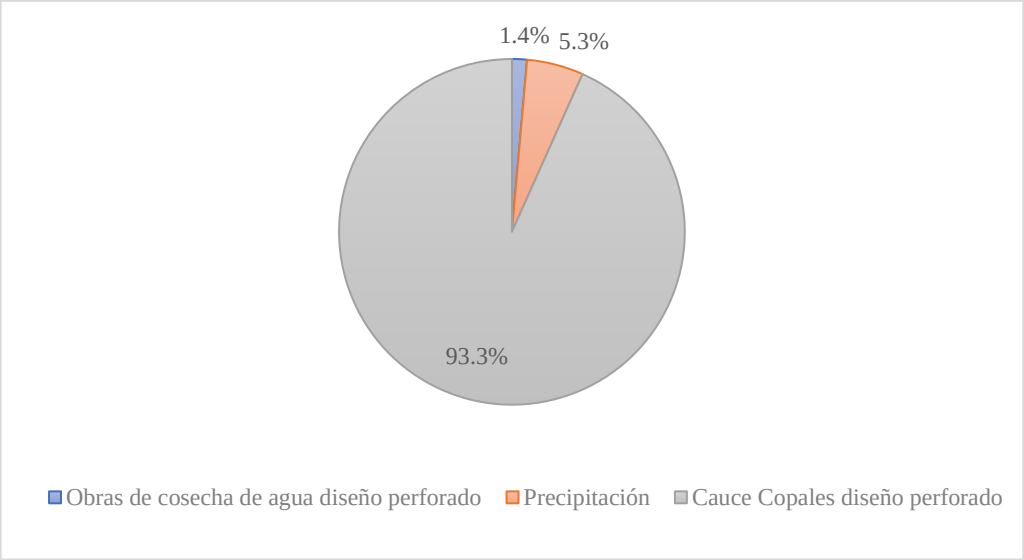


Figura 31. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos perforados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo IsoSource.

De acuerdo con el análisis del modelo SIMMR, el cauce los Copales es la fuente de mayor aporte a la contribución de la recarga hídrica, representando el 91,2 %, considerándose una recarga lateral del cauce al acuífero volcánico, en comparación con el resultado del modelo IsoSource, esta contribución fue inferior por 2,1 %. Seguida por la precipitación, con los pocos eventos tanto en los meses secos como principios de meses lluviosos, representando el 5,2 % de la contribución a las aguas subterráneas por recarga directa, en comparación con el resultado del modelo IsoSource fue inferior por 0,1 %, luego las obras de cosecha de agua, con un aporte de 3,6 % por infiltración, este porcentaje en comparación con el resultado del modelo mencionado anteriormente fue superior por 2,2 % (Figura. 32).

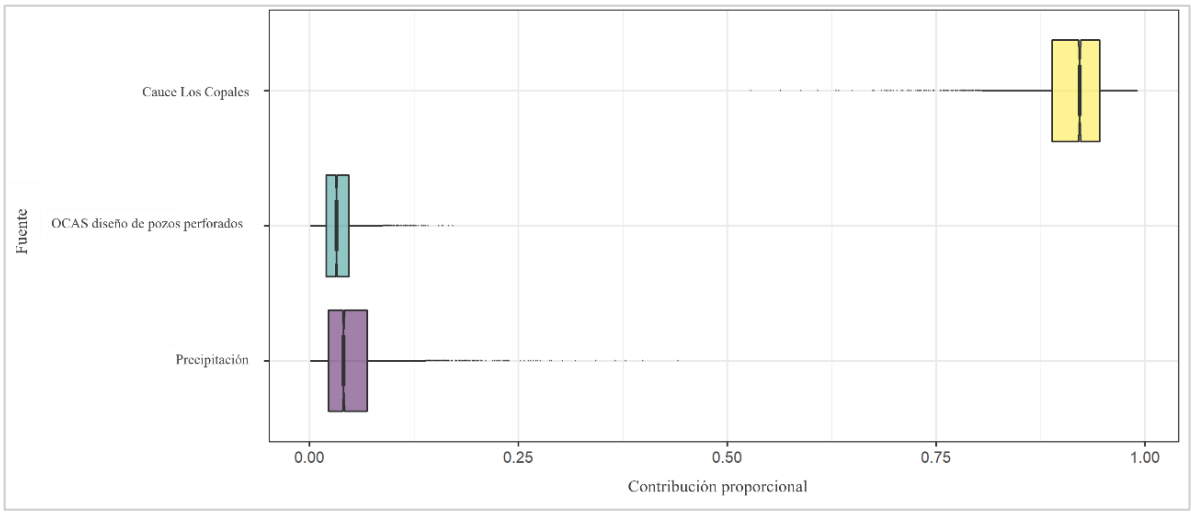


Figura 32. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos perforados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, analizado con el modelo SIMMR.

4. Discusión

4.1 Composición isotópica

Con respecto a la representación temporal de los eventos de precipitación, los primeros meses del año desde enero-mayo de 2021, en la subcuenca Aguas Calientes se presentan los valores isotópicos más enriquecidos, probablemente por evaporación, esto se debe en gran medida a las condiciones climáticas por altas temperaturas (27-34 °C) y baja humedad relativa (20-25 %). En mayo-junio inician los meses lluviosos donde la mayoría de los valores de la composición isotópica indican un empobrecimiento, influenciada por baja temperatura (18-21°C) y alta humedad relativa (80-85 %), también se observa un pequeño grupo de valores enriquecidos de $\delta^{18}O$ en los meses lluviosos (Figura. 16) durante el periodo de los últimos días de junio y principios de julio, probablemente por el periodo de canícula (julio-agosto). Estos resultados son similares a los obtenidos por Corrales (2008) en Estelí, Nicaragua, durante el periodo lluvioso en julio, donde la precipitación presentó valores en la composición isotópica bastante enriquecida, probablemente por las elevadas temperaturas en ese mes debido al periodo de canícula, resultando en un proceso de evaporación en las muestras de agua.

Por otra parte, se registraron valores bajos de *d-excess* (‰) en los meses secos (enero a abril). El *d-excess* es un indicador de la procedencia de la precipitación y la fuente de humedad que interviene en las lluvias. Sánchez-Murillo *et al*. (2013) en una investigación, también registraron valores empobrecidos esporádicos entre finales de enero y abril, probablemente por el efecto de transporte de humedad, masas de aire provenientes del Océano Pacífico y por más eventos de precipitación.

De acuerdo con algunos estudios de Dansgaard (1964), los valores enriquecidos del agua subterránea probablemente se deben a las condiciones de los suelos deforestados, altas temperaturas y poca humedad relativa, situación que se observó ampliamente en la zona de estudio. Los suelos áridos no facilitan la infiltración de la recarga hídrica como resultado de la

evaporación cinética durante el flujo superficial (Clark y Peter 1997). La ecuación de la línea de aguas subterráneas en este estudio es y = 1,42x – 38,023, similar a la línea de las aguas subterraneas obtenida por Alvarado (2018), en otra región del CSC ubicada en la cuenca El Guayabo, Bajo Lempa, El Salvador, correspondiendo a una pendiente relativamente baja de y=0,6237x -31,592, lo que representa un proceso de evaporación favorecido por altas temperaturas y baja humedad relativa en zonas áridas.

Estudios anteriores sobre la relación de las aguas superficiales (lagos o lagunas) con el agua subterránea en Nicaragua reportan valores enriquecidos del agua subterránea por el aporte de las aguas superficiales. Por ejemplo, en el sistema hidrológico de la Laguna de Tiscapa, Managua, Nicaragua, Barberena-Moncada *et al*. (2021), observaron que los puntos próximos a la laguna en la zona oeste presentan composición media de -6,7 ‰ en $\delta^{18}O$ y los ubicados en zona la noreste una composición media de -5,6 ‰ en $\delta^{18}O$, lo que se considera una probable interacción entre el agua de la Laguna de Tiscapa y el agua subterránea, ocasionando que el agua subterránea se esté enriqueciendo isotópicamente hasta -1,1 ‰ en $\delta^{18}O$. Por otro lado, Sánchez-Murillo *et al.* (2020), reportó que la alta conectividad entre el agua de lagos y agua subterránea en Nicaragua, producen enriquecimiento del agua subterránea aproximadamente en -1,74 ‰ en $\delta^{18}O$. En nuestros resultados un pequeño grupo de las aguas subterráneas presentan valores de la composición isotópica más enriquecidos en comparación al resto, con una diferencia aproximada de -1,15 ‰ $\delta^{18}O$, lo que se podría considerar una posible influencia reciente de contribución de aguas superficiales a las aguas subterráneas, sin embargo, se estima una mayor participación de las aguas superficiales de los cauces en los procesos de recarga hídrica.

En este estudio, los valores de la composición isotópica de las aguas subterráneas y de los cauces son similares, valores empobrecidos. En contraste, los valores isotópicos de la precipitación y las obras de cosecha de agua presentan tanto valores enriquecidos como empobrecidos. Se puede decir, que hay una contribución marginal de estas fuentes de precipitación y obras de cosecha de agua al agua subterránea por su similitud con los valores empobrecidos o negativos que se presentan en las épocas lluviosas. De la misma manera, se observó en el Acuífero Aluvial del Valle de Estelí, Nicaragua, que son los valores negativos de la precipitación los que representan un aporte a la recarga del acuífero durante los meses lluviosos (Corrales y Delgado 2009).

Se comparó la tendencia de la Línea Meteórica Local (LMWL de la subcuenca Aguas Calientes), la cual presenta la siguiente ecuación ($\delta^2H = 8,14\ \delta^{18}O + 13,88$), mostrando similitud a la ecuación ($\delta^2H = 8,70\ \delta^{18}O + 11,53$) de la LMWL de Nicaragua. La Línea Meteórica Local de la subcuenca Aguas Calientes está estrechamente relacionada con las condiciones de la Línea Meteórica de Nicaragua, es decir, presenta las mismas procedencia y condiciones del agua lluvia. Al compararlas con la GMWL, las pendientes de las LMWL tanto de la subcuenca de Aguas Calientes como Nicaragua están sobre la línea de tenencia de la GMWL, presentando diferentes cambios en los valores de la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δ^2H por aspectos espaciales y temporales.

Igualmente, la LML de la subcuenca Aguas Calientes es similar a la reportada por (Corrales 2008), en el Valle de Estelí (δ^2H (‰) = 8,7167 $\delta^{18}O$ (‰) + 11,538), entre un rango de altitud de 991-1 232 msnm, probablemente esto se debe a efectos orográficos similares de las zonas de estudio y condiciones climáticas. En la investigación del Valle de Estelí reportan julio y setiembre como los meses más lluviosos con 129 mm y 246 mm. Condiciones similares a las de

nuestro estudio en un rango de altitud entre 643-976 msnm, y los meses de mayor precipitación junio y julio respectivamente. Valores contrastantes a nuestro estudio se reportan en la pendiente de la Línea Meteórica Local obtenido por Sánchez-Murillo *et al*. (2020b), en la precipitación media anual a largo plazo, presentó una fuerte diferencia orográfica entre el área urbana (cuidad de Heredia aproximadamente 1 168 msnm) y la cabecera (edificio del volcán Barva aproximadamente 1 500-2 906 msnm), resultados similares encontrados por (Barberena-Moncada *et al.* 2021), en su investigación en Laguna de Tiscapa, Managua Nicaragua, ubicada en un rango de altitud de 48-941 msnm. En ambos estudios, las líneas de tendencia mostraron valores isotópicos de la precipitación por debajo de la GMWL, asociados a procesos de evaporación.

Con respecto a la pendiente de la LMWL de la subcuenca Aguas Calientes y la LMWL de Nicaragua, ésta es superior a la línea de equilibrio de la GMWL, donde algunos de los valores de la composición isotópica son más negativos o empobrecidos en la división más alta de la subcuenca, ya que han pasado por procesos de baja temperatura, alta humedad relativa, el clima es relativamente más frío, tienen una elevada altitud y reciben lluvia de origen continental. Estos valores también se explican probablemente por un proceso de reciclado de humedad, mayores eventos de precipitación y masas de aire provenientes del Océano Pacífico. Por otro lado, los valores enriquecidos pasaron por un proceso de evaporación, pocos eventos de precipitación, vientos alisios provenientes del Mar Caribe en la dirección noreste al sureste. En relación con la línea de tendencia de la GMWL, los valores de la precipitación más positivos o enriquecidos se presentan en la división media y baja de la subcuenca, agrupándose en condiciones de clima cálido, baja altitud y fuentes de vapores áridos.

4.2 Nivel Estático del Agua

En cuanto al monitoreo del NEA de los pozos excavados en un periodo de seis meses, se puede comparar la línea de tendencia de recuperación o descenso (de 1,05 a 8,17 m) obtenida en el área de estudio, son similares en la dirección del cambio (descenso) del NEA (14,80 a 20,23 m) a partir del monitoreo de un año hidrológico en el acuífero del Valle de Sébaco (Delgado y Flores 2017). Las magnitudes respecto a las tendencias de descenso se deben a que le presente estudio no se monitoreó por un año hidrológico completo.

Los niveles de agua de los pozos excavados en las riberas de los cauces en zonas de acuífero aluvial representan una línea de tendencia del NEA relativamente estable desde febrero-abril. A pesar de que se extraía agua con regularidad para actividades agropecuarias, su tiempo de recarga hídrica era evidentemente rápida. Sin embargo, se evidenció el descenso simultáneo del NEA de los pozos y el descenso del cauce, esto implica una conexión directa por recarga e infiltración rápida. Toro *et al*. (2009), también observó que las aguas subterráneas estaban siendo recargadas por el río Carraipia, Maico, Colombia, además observó que la conductividad hidráulica era rápida. Un ejemplo similar se presentó en el acuífero Guaraní, donde la composición isotópica de las aguas subterráneas y superficiales son similares, así como las mismas variaciones temporales en el *d-excess* (‰) denota la fuerte conectividad entre estos dos depósitos durante periodos de recesión del flujo de base (Batista *et al*. 2018).

En las comunidades de Uniles de Suyapa, Los Copales, Santa Rosa y Aguas Calientes ubicadas en la división media y baja de la subcuenca, se localizan siete pozos excavados con profundidad

total menor de 30 m en las zonas del acuífero aluvial. El nivel promedio del agua de estos pozos oscila entre 6-7 m de profundidad. En contraste, el resultado de Corrales (2008), en las zonas del acuífero aluvial del Valle de Estelí, Nicaragua, con alta influencia de tabacaleras, se obtuvo el nivel de agua localizados hasta los 29 m de profundidad, debido a la influencia de los conos de abatimiento, producto de la explotación intensiva del agua subterránea en esa zona. Las diferencias del NEA en los pozos de nuestro estudio en relación con el valle de Estelí pueden atribuirse a la irrigación para actividades tabacaleras que realizan en dicha zona o que en el estudio de Corrales (2008), se reportan niveles dinámicos de agua, en lugar de los niveles estáticos.

4.3 Composición hidrogeoquímica

Con respecto a la composición hidrogeoquímica del agua, este análisis permite determinar la relación de recarga de las aguas superficiales a subterráneas por medio del intercambio iónico. De manera global en la subcuenca Aguas Calientes se ha evidenciado el enriquecimiento por un proceso de disolución de agua, suelo y roca. La composición de los iones mayoritarios se presenta en un diagrama de Piper, y este permitió clasificar las aguas en tres grupos.

El primer grupo corresponde a: agua de obras de cosecha, presentan un enriquecimiento de Na^+, K^+, Cl^-, debido posiblemente a procesos de salinización de suelos que lixivian hacia las obras de captación, sobre todo la obra de cosecha de agua 03. No es normal que el agua presente alta concentración de sodio, potasio y cloruro, por lo que se infiere que el uso de agroquímicos en las actividades agrícolas está alterando la composición iónica del agua en esta obra de cosecha y con respectos a los valores de la composición isotópica de las obras de cosecha de agua presentan en su mayoría valores enriquecidos, probablemente por procesos de evaporación. De manera similar Toro *et al*. (2009), ha encontrado este mismo efecto antrópico que altera la composición iónica en las aguas. Es posible que el agua de las obras de cosecha esté presentando alto contenido de los iones mencionados anteriormente por un proceso de evaporación de las aguas, esto se refuerza con el resultado de los valores isotópicos enriquecidos de las obras de cosecha de agua.

El segundo grupo corresponde a: agua de pozos perforados, presentan un enriquecimiento de minerales, lo que indica una mayor evolución hidrogeoquímica por mayor tiempo de residencia en el acuífero y enriquecimiento de la roca volcánica que alberga el agua. Al existir mayor tiempo de tránsito o residencia en el acuífero, podría indicar incluso una zona de recarga externa, es decir, en otro sitio fuera de la cuenca hidrográfica, pues estaría condicionada a la estructura de las coladas de lava que están en profundidad.

El agua de pozos excavados y cauces, correspondientes al grupo tres posee una composición hidrogeoquímica que indica una relación estrecha con el agua de la precipitación, lo que implicaría la presencia de una recarga directa. Complementando la evidencia con el resultado de los modelos de mezcla isotópica, se refuerza el hecho de que algunos pozos excavados 09,10 y 12 están siendo recargados en gran porcentaje por aguas meteóricas en mayor proporción que los demás pozos, coincidiendo esto con el hecho de que son pozos expuestos a la recarga directa por la precipitación (no tienen cobertura) (Anexo. 3). El ion que más predomina en estas aguas es el HCO_3^-, estudios realizados por (Freeze y Cherry 1979), evidenciaron que las aguas de los manantiales se clasifican principalmente como bicarbonatadas sódicas y cálcicas, por lo que se

puede inferir dada la predominancia de bicarbonato que éstas corresponden a aguas que tienen un corto tiempo de tránsito.

Tal y como se preveía en el diseño del muestreo, se evidenció una clara comunicación hidráulica entre los pozos excavados y los cauces de los ríos, considerando una posible recarga lateral Toro *et al*. (2009), en un estudio en el río Carraipia, Maico, Colombia, también observó que las aguas subterráneas estaban siendo recargadas en un gran porcentaje por agua de los ríos.

Los resultados del análisis hidrogeoquímico, en relación con la profundidad y el tipo de acuífero (pozos excavados < 30 m de profundidad, correspondiente al acuífero aluvial y los pozos perforados > 30 m, corresponde al acuífero volcánico), evidencian una posible mezcla de aguas de ambos tipos de acuífero, por una posible comunicación hidráulica desde el acuífero aluvial hasta el volcánico, que incluso podría ser favorecida por estructuras tectónicas en los cauces de los ríos Los Copales y La Susuba, que explicaría dicha mezcla y aporte significativo en la recarga del acuífero volcánico por parte del agua de ambos ríos, evidenciada partir de los modelos IsoSource y SIMMR.

Esto está sustentado también por los valores promedio de la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ tanto de los pozos excavados (-7,00 ‰ y -47,24 ‰) como perforados (-6,99 ‰ y -48,86 ‰) que están entre el mismo rango, a pesar de que se recargan de diferentes acuíferos y de estar a diferentes profundidades. Similarmente, en el acuífero en el valle de Estelí, Nicaragua, se observó que la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ del agua, no varía mucho con la profundidad de la toma de la muestra; debido a que es un acuífero multicapas, conformado por estratos permeables por porosidad y estratos permeables por grietas y fisuras, provocando la mezcla de aguas del acuífero somero con el acuífero profundo (Corrales 2008).

4.4 Contribución porcentual de la recarga hídrica inducida

Se identificó una relación entre las aguas superficiales y las subterráneas, a través del modelo de mezcla lineal IsoSource y el modelo de mezcla bayesiano SIMMR, la fuente que mayor aporta a la recarga de los acuíferos corresponde a los cauces (90,7 % y 95,9 %), seguido de la precipitación (7,5 % y 2,4 %) y las obras de cosecha de agua (1,8 % y 1,7 %).

El modelo IsoSource se encuentra entre los modelos de mezcla lineal propuestos para analizar las contribuciones proporcionales de *n* fuentes a una mezcla (Phillips y Gregg 2003), y por sus características y supuestos es más fácil de evaluar, ya que si la firma isotópica de una fuente está fuera del polígono de mezcla que limita las fuentes (en este caso tipos de agua) propuestas, no se puede establecer el equilibrio de masas y no hay una solución lógica (Smith *et al.* 2013). Por tanto, este modelo puede utilizarse para identificar a las fuentes para su exclusión o para rechazar directamente un modelo.

En los modelos de mezcla bayesianos como el SIMMR, esta suposición de punto en el polígono no existe, porque los datos de las fuentes son distribuciones, no valores medios, y estos modelos cuantificarán las contribuciones de las fuentes incluso cuando la solución sea muy improbable (Smith *et al*. 2013). Por tanto, contar con los resultados comparativos de ambos modelos permite combinar las fortalezas de ambos, balanceando sus debilidades, y se puede inferir con mayor

seguridad que los casos que presentan resultados de mayor similitud entre los modelos comparados, estarían representando mejor la contribución de las fuentes a la mezcla (acuífero).

Se presentan dos casos de monitoreo directo en dos pozos excavados (09 y 12) en cercanías de obras de cosecha (102 y 76 m) donde se registró una mayor influencia de las aguas procedentes de las obras de cosecha (anexo. 3). Estos dos pozos estaban en dirección de la red del flujo de las aguas subterráneas, y más cerca de las obras de cosecha en relación con el resto de los pozos. Se puede inferir que, la distancia es una variable muy importante a considerar, para que las obras de cosecha de agua contribuyan en mayor medida la recarga de los pozos. Esto refuerza que las obras de cosecha de agua podrían ser no sólo un co-beneficio por medio de la infiltración, resaltando la importancia de analizar variables como las características del suelo (porosidad, permeabilidad, espesores, entre otros) direcciones de flujo del agua subterránea, y la distancia para la construcción de obras de cosecha de agua, en caso de que recargar los acuíferos sea la finalidad.

En contraste con los datos del presente estudio, el análisis de las fuentes de recarga en el acuífero del valle de Estelí, Nicaragua, se observó que la contribución más significativa al acuífero es el ascenso de aguas profundas a través de fallas locales (68 %) y las precipitaciones no tuvieron ningún efecto (Corrales 2008). Por otro lado, en el valle de Sébaco se registró un aporte procedente, en su mayoría, de la recarga de los ríos (92,7 %), la cual es mucho mayor que la recarga potencial por infiltración de precipitación (7,3 %), que es influida notablemente por la evapotranspiración y el tipo de suelo en el valle (Delgado y Flores 2017). Los estudios anteriores sólo han observado recarga natural.

En Centroamérica no se han realizado muchos estudios específicamente sobre la contribución de las obras de cosecha de agua como recarga inducida a las aguas subterráneas; una excepción es el estudio de Corrales y Delgado (2009), quienes estimaron que la mayor contribución al acuífero del valle proviene de retornos por riegos y fugas de la red de agua potable (95 %); mientras la recarga natural es muy baja (5 %), pues se ve afectada por las altas tasas de escorrentía y evapotranspiración. Por tanto, para ampliar la interpretación sobre este tema, se han comparado los resultados obtenidos en este estudio con otras investigaciones que han medido las contribuciones de recarga inducida en otras regiones del mundo y con otros tipos de estructuras de recarga artificial usando isótopos estables del agua como trazadores naturales.

Por ejemplo, en el área urbana de Ranchi, India, se encontró que los reservorios y lagos excavados contribuyen a la recarga de agua subterránea, aunque de manera marginal, pues la principal fuente es el agua meteórica (Saha *et al.* 2013). También en la India, en la cuenca del río Wakal, se reveló que la contribución de presas filtrantes a la recarga en los pozos evaluados variaba entre 0 y 75 %, pues no todos los pozos recibían recarga artificial (Stiefel *et al.* 2009), y en Maharashtra, implementando canales de cosecha de agua se encontró que el porcentaje de la contribución artificial en la recarga subterránea variaba de 10 a 100 dependiendo de la época (Kumar *et al.* 2009). También en la región del Deccan se evaluó la eficiencia de recarga de obras como tanques de percolación y presas filtrantes, encontrándose diferencias promedio de 1,15 m de nivel freático entre los pozos influidos por obras de cosecha de agua versus pozos sin obras (Adhikari *et al*. 2013).

Con respecto a estructuras como presas o embalses, se ha evaluado su contribución a la recarga artificial de aguas subterráneas en Emiratos Árabes Unidos, donde se ha demostrado su

significativa contribución a la recarga que va de 20 a 40 % (IAEA 2007), mientras en Túnez el embalse Haouareb contribuye un 80 % a la recarga del acuífero (Dassi *et al.* 2005) y la represa de Sidi Saad aporta una notable contribución de agua de hasta a 10 km de distancia; la contribución se ha estimado de un 39 % en las cercanías de la represa, y en promedio de 13 % hasta 20 km de distancia (Bel Hadj Salem *et al*. 2012).

Por último, también se ha evaluado la recarga de canales de irrigación en zonas agrícolas, por ejemplo, en el acuífero de Crau en el sur de Francia se ha estimado que la recarga se debe en un 69 % gracias a la densa red de canales de irrigación, mientras el 31 % de la recarga restante proviene de la precipitación (Séraphin *et al.* 2016).

5. Conclusiones

Los porcentajes generados por ambos modelos IsoSource y SIMMR indican que los cauces de los ríos La Susuba y Los Copales aportan la mayor contribución de recarga hídrica a las aguas subterráneas de ambos acuíferos de origen y profundidad diferente; seguida la precipitación y las obras de cosecha de agua. La contribución de las obras de cosecha de agua a la recarga hídrica de las aguas subterráneas es limitada, pero se ha comprobado que esta tiene lugar a pesar de que este estudio se realizó en un periodo de tiempo reducido, en su mayor parte durante la época seca y con pocos eventos de precipitación, y aunque la finalidad de estas obras de cosecha de agua fue la retención para fines agropecuarios. Por tanto, los resultados obtenidos permiten inferir que, de presentarse una fuerte temporada lluviosa, esas obras estarían generando el co-beneficio de contribución de recarga hídrica en un mayor porcentaje.

Además, se pueden observar cambios en la composición isotópica en las diferentes fuentes, que permitan describir la naturaleza de la recarga hídrica. Estas variaciones se dan en respuesta a condiciones climáticas y efectos orográficos, valores enriquecidos por evaporación, corrientes de vientos alisios en dirección del noreste al sureste y masas de aire provenientes del Mar Caribe. Asimismo, durante el pequeño lapso en que se realizaron mediciones durante la época lluviosa, se pueden inferir condiciones de reciclado de humedad, influenciadas por las masas de aire provenientes del Océano Pacífico y mayores eventos de precipitación.

Por consiguiente, en la composición isotópica del agua subterránea, algunos valores se observan enriquecidos, probablemente han sufrido un proceso de evaporación durante o posterior a la precipitación, en su mayoría, en el caso de los pozos excavados correspondiente al acuífero aluvial. Igualmente, estos valores enriquecidos podrían indicar que existe una contribución a la recarga hídrica del agua subterránea más reciente proveniente de la precipitación y de las obras de cosecha de agua.

Es necesario recalcar, que dos de los pozos excavados (02 y 11), que se localizan en las riberas de los cauces mantuvieron la línea de tendencia del NEA relativamente estable, mientras el cauce mantenía su caudal, una vez este descendió también disminuyó el NEA de estos pozos. Lo que se considera una contribución de recarga hídrica rápida y directa de los cauces a los pozos. Dentro del análisis, algunos tramos del cauce, en la parte baja de la subcuenca, donde no había agua superficial, correspondiente a una zona somera, por el caso de un pozo excavado 03, ubicado precisamente en este tramo mantuvo el NEA en casi toda la fase de monitoreo.

Adicionalmente, el resultado del análisis de los iones mayoritarios en el grupo 1, correspondiente a obras de cosecha de agua permiten inferir que existe influencia de las actividades agropecuarias, como recirculación del agua de riego, quema de cobertura vegetal a los alrededores y proceso de lixiviados en el transporte de la fase acuosa a las aguas subterráneas, que junto con los procesos naturales como la precipitación, deposito atmosférico de sales, evapotranspiración, interacción de agua, suelo y roca, aportan a la determinación de la naturaleza de la recarga hídrica, y esta es dada por la composición hidrogeoquímica de la precipitación y los cauces tienen una relación común con el agua subterránea (pozos excavados), donde se presenta la huella química del agua de lluvia, como bicarbonatada cálcica y la presencia de otros iones ya rigen procesos de disolución de material geológico y no meteórico.

Con respecto a la composición hidrogeoquímica de las obras de cosecha de agua, éstas no presentan una relación estrecha con el agua subterránea, puesto que esta presenta minerales como sodio, potasio y cloruro, los cuales no están presentes en las aguas de los pozos excavados. Esta diferencia, probablemente se da por procesos de evaporación del agua en las obras de cosecha de agua. Además, la mayoría de los valores de la composición isotópica de las obras de cosecha de agua son valores enriquecidos, en comparación con los valores de las aguas subterráneas que en su mayoría son empobrecidos.

Se estableció la LML de la subcuenca de Aguas Calientes, la cual se inició como un registro de los eventos de precipitación, para luego analizar sus valores isotópicos, y así determinar su procedencia y formación a través de condiciones climáticas, espaciales, orográficas entre otras, y poder relacionar la contribución por recarga directa del agua lluvia a las aguas subterráneas, tanto como para comparar con otras Líneas Meteóricas tanto nacionales o global y determinar si son lluvias locales o de otra procedencia.

Se estableció, por primera vez, un modelo hidrogeológico de la subcuenca Aguas Calientes, para obtener información acerca de las condiciones geológicas, hidrológicas, hidráulicas, niveles piezométricos, comportamiento de los acuíferos, zonas de descarga y recarga disponible, condiciones de la red del flujo de las aguas subterráneas entre otras, este modelo fue importante para la toma de decisiones y planteamiento de los diseños de muestreo, ayudando a establecer la relación de las aguas superficiales con las subterráneas.

6. Recomendaciones

Es necesario, en futuras iniciativas, que busquen escalar los beneficios de las obras de cosecha de agua a realizar, conocer y analizar investigaciones previas de temas hidrogeológicos en general, por ejemplo, características de los suelos, hidrología, geología, tipos de acuíferos entre otros, para el diseño y construcción de las obras de cosecha de agua, si su finalidad es contribuir con la recarga hídrica inducida a los acuíferos.

Promover el monitoreo de las aguas subterráneas por medio de la instalación de tubos piezométricos durante la construcción de pozos perforados que permita el ingreso de la sonda con sensor para medir el NEA en los pozos en futuras investigaciones y para la puesta en práctica de una red de monitoreo del recurso hídrico.

Es crucial proteger los pozos excavados (cubiertas con tapas seguras), para evitar el ingreso a animales roedores, y así no condicionar y/o restringir el uso del agua para actividades domésticas.

La reforestación del área de la subcuenca con árboles y arbustos endémicos del sitio, principalmente las zonas ribereñas de los cauces, es una práctica altamente deseable, con la finalidad de facilitar el flujo de las aguas subterráneas dado el efecto de las raíces en la generación de macroporosidad, vías para la infiltración y mayor contenido de materia orgánica que favorece una mejor estructura de los suelos, e igualmente, para controlar la entrada de la radiación solar directa al espejo del agua.

Evitar que el ganado ingrese directamente a beber agua a las obras de cosecha, tanto en sus alrededores, instalando abrevaderos a varios metros de distancia y cercando el área perimetral de las obras de cosecha de agua.

Evitar el uso de suelos para actividades agrícolas en las cercanías de las obras de cosecha de agua, para prevenir la posible contaminación al agua subterránea por el lixiviado de agroquímicos.

Para las personas que se dedican a las actividades agropecuarias y que están extendiendo la frontera agrícola llegando hasta la zona ribereña de los cauces tanto en la parte alta, media y baja de la subcuenca, con el fin de obtener más ingresos económicos, es importante el diseño de un plan estratégico o de ordenamiento territorial que permita el desarrollo de estas actividades, por ejemplo con sistemas diversificados y autosostenibles de producción a pequeña escala, disminuyendo la incidencia de deforestación.

Debido a la relación hidráulica identificada entre cauces de los ríos La Susuba y Los Copales, con los acuíferos, tanto aluvial como lávico, es necesario establecer un monitoreo constante para el control de la calidad del agua de ambos cauces.

El estudio debería ser un año hidrológico para contar con una mejor representatividad en los datos, para la zona se comprende desde octubre a mayo los meses secos y junio a setiembre los meses lluviosos, esto ayudaría a determinar el comportamiento, relación y dinámica entre las aguas superficiales y subterráneas durante el periodo del Niño o la Niña.

Explorar con otros tipos de recarga hídrica inducida que contribuyan a las aguas subterráneas, si esta es su finalidad. Una de las opciones podría ser: mejorar y adaptar el diseño de las obras de cosecha de agua, más profundas y considerar otros factores, en función a las características de los suelos (permeabilidad).

7. Bibliografía

Adhikari, RN; Singh, AK; Math, SKN; Raizada, A; Mishra, PK; Reddy, KK. 2013. Augmentation of groundwater recharge and water quality improvement by water harvesting structures in the semi-arid Deccan. Current Science 104(11):1534-1542.

Altieri, M; Nicholls, C. 2008. Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y agricultores tradicionales y sus repuestas adaptativas. Agroecología (3):7-28.

(ADS) Alcandía de Somoto. 2001. Plan Rector de Producción y Conservación de la subcuenca del río Aguas Calientes. Somoto, NI. 85 p

Alvarado, Y. 2018. Análisis de los procesos de formación y renovación de aguas de recarga subterránea en la cuenca El Guayabo, Bajo Lempa , El Salvador. :51.

Auge, M. 2009. Hidrogeología de llanuras (en línea). Buenos Aires, s.e. 91 p. Disponible en http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/HidrogeoLlanuras.pdf.

Banda, LC; Rivett, MO; Zavison, ASK; Kamtukule, S; Kalin, RM. 2021. National stable isotope baseline for precipitation in malawi to underpin integrated water resources management. Water (Switzerland) 13(14):1-16. DOI: https://doi.org/10.3390/w13141927.

Barberena-Moncada, J; Hurtado-García, I; Sirias-Silva, M. 2021. Aplicación de Isótopos estables e hidroquímica para la comprensión del sistema hidrológico en Laguna de Tiscapa. Managua, Nicaragua. Revista Científica de FAREM-Estelí :19.

Barrera de Calderón, ML. 2010. Caracterización Hidrogeoquimíca e Isotópica de Áreas De Recarga en el Acuífero de San Salvador. :165.

Batista, LV; Gastmans, D; Sánchez-Murillo, R; Farinha, BS; dos Santos, SMR; Kiang, CH. 2018. Groundwater and surface water connectivity within the recharge area of Guarani aquifer system during El Niño 2014–2016. Hydrological Processes 32(16):2483-2495. DOI: https://doi.org/10.1002/hyp.13211.

Bendaña, G. 2018. Breve Caracterización de la Situación Agropecuaria e Hidrológica del Norte del Corredor Seco de Nicaragua. s.l., s.e., vol.118 (2). p. 188-213.

Bel Hadj Salem, S; Chkir, N; Zouari, K; Cognard-Plancq, AL; Valles, V; Marc, V. 2012. Natural and artificial recharge investigation in the Zéroud Basin, Central Tunisia: Impact of Sidi Saad Dam storage. Environmental Earth Sciences 66(4):1099-1110. DOI: https://doi.org/10.1007/s12665-011-1316-1.

Boulanger, Jean-Phillipe; Buckeridge, Marcos; Castellanos, Edwin; Poveda, Germán, Scaramo, Fabio; Vicuña, S. 2008. IPCC--Intergovernmental Panel on Climate Change. Choice Reviews Online 45(09):45-5008-45-5008. DOI: https://doi.org/10.5860/choice.45-5008.

Bronić, IK; Barešić, J; Borković, D; Sironić, A; Mikelić, IL; Vreča, P. 2020. Long-Term isotope records of precipitation in Zagreb, Croatia. Water (Switzerland) 12(1). DOI: https://doi.org/10.3390/w12010226.

Calvo, O; Quesada, L; Hidalgo, H; Gotlieb, Y. 2018. Impactos de las sequías en el sector

agropecuario del Corredor Seco Centroamericano. Agronomía Mesoamericana 29(3):695. DOI: https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.30828.

Calderón, H; Flores, Y. 2010. Evaluación de la Dinámica de la Laguna de Apoyo mediante Trazadores Isotópicos y Geoquímicos. Universidad y Ciencia 5(8):22-26. DOI: https://doi.org/10.5377/uyc.v5i8.315.

Contreras, T; Vargas, I; Badilla, E. 2011. Propiedades Hidrogeoquímicas e isotópicas del agua subterránea en la parte media de la cuenca del río Tulián, Puerto Cortés, Honduras. Revista Geológica de América Central (46):179-188. DOI: https://doi.org/10.15517/rgac.v0i46.1839.

Corrales, D. 2008. Estudio Hidrogeológico Del Funcionamiento del Acuífero del Valle de Estelí, Nicaragua. La Calera 8(10):56-62. DOI: https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3751.2720.

Corrales, D; Delgado, V. 2009. Estudio del Acuífero Aluvial del Valle de Estelí, Nicaragua (en línea). Estelí, Nicaragua, s.e. 127 p. Disponible en http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1611s_web.pdf.

Cappa, CD; Hendricks, MB; DePaolo, DJ; Cohen, RC. 2003. Isotopic fractionation of water during evaporation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 108(16). DOI: https://doi.org/10.1029/2003jd003597.

Charles, Taylor; William, A. 2001. Ground-water-level monitoring and the importance of long-term water-level data. Geological Survey (USCG). (en línea). US Geological Survey Circular (1217):1-68. Disponible en https://pubs.usgs.gov/circ/circ1217/pdf/pt1.pdf.

Clark, ID y Fritz, P. (1997). Isótopos ambientales en hidrogeología (1ª ed.). Prensa CRC. https://doi.org/10.1201/9781482242911

Dassi, L; Zouari, K; Faye, S. 2005. Identifying sources of groundwater recharge in the Merguellil basin (Tunisia) using isotopic methods: Implication of dam reservoir water accounting. Environmental Geology 49(1):114-123. DOI: https://doi.org/10.1007/s00254-005-0069-0.

Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. Dansgaard,Tellus 16(4):436-468. DOI: https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993.

Delgado, V; Flores, Y. 2017. ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE SÉBACO, NICARAGUA Hydrogeological update and availability of the Sébaco Valley aquifer in Nicaragua Resumen Keywords : Nicaragua , Valley of Sébaco , availability , aquifer , Hydroge. 10:61-74.

Delgado, V. 2014. Empleo de Isótopos en la Evaluación Hidrogeológica del Acuífero del Valle de Sébaco, Nicaragua. (en línea). Revista Científica Agua Y Conocimiento 1(1):1-14. Disponible en https://revistacira.unan.edu.ni/index.php/AyC/article/view/9.

Duarte. 1999. Resúmenes de tesis ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO DE GULUCHAPA,. :117-121.

(FAO), O de las NU para la A y la A. 2012. Estudio de caracterización del Corredor Seco

Centroamericano (en línea). Tegucigalpa, Honduras, s.e. p. 70. Disponible en https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/tomo_i_corredor_seco.pdf.

Fernández, A. 2005. Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales: aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia). Ecosistemas: Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente 14(3):16. DOI: https://doi.org/10.7818/re.2014.14-3.00.

Figueroa, A. 2018. Marco Estratégico Regional para la Gestión de Riesgos Climáticos en el Sector Agrícola del Corredor Sco Centroamericano. Tegucigalpa, Honduras, s.e. 66 p.

Freeze, A; Cherry, J. 1979. Groundwater (en línea). New Jersey, s.e. 604 p. Disponible en https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Groundwater book - English.pdf.

Gat. 1996. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 24:225-262. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.earth.24.1.225.

Gobierno Nacional de Reconciliación y Unidad. 2014. PROYECTO: Adaptación de la Agricultura al Cambio Climático a través de la Cosecha de Agua en Nicaragua 2014 - 2017. (505):80.

Global Water Partnership (GWP). 2017. Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada. Global Water Partnership Central America :100.

Hernández-Antonio; Mahlknecht, J; Tamez-Meléndez, C; Ramos-Leal, J; Ramírez-Orozco, A; Parra, R; Ornelas-Soto, N; Eastoe, CJ. 2015. Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: The case of Guadalajara (Mexico) (en línea). Hydrology and Earth System Sciences 19(9):3937-3950. DOI: https://doi.org/10.5194/hess-19-3937-2015.

IAEA. 2007. Advances in Isotope Hydrology and its Role in Sustainable Water Resources Management. Proceedings of a Symposium 1(May):21-25.

Kong, Y; Pang, Z; Froehlich, K. 2013. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess. Tellus, Series B; Chemical and Physical Meteorology 65(1). DOI: https://doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.19251.

Kumar, B; Rao, MS; Navada, S V.; Verma, SK; Shrivastava, S. 2009. Evaluation of effectiveness of artificial recharge measures in parts of Maharashtra using environmental isotopes. Current Science 97(9):1321-1330.

Matus, O. 2007. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua (en línea). Magister S:121. Disponible en http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5392/Participatory_development_of_a_methodology.pdf;jsessionid=C76CC5E2FFFD8EBE36B483EB5BC0F6B2?sequence=1.

Obando, F. 2005. Situación del recurso hídrico subterráneo de la subcuenca del río Aguas Calientes, Nicaragua (en línea). s.l., Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 111 p. Disponible en

http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0662e/A0662e.html.

Ochoa-Tocachi, BF; Bardales, JD; Antiporta, J; Pérez, K; Acosta, L; Mao, F; Zulkafli, Z; Gil-Ríos, J; Angulo, O; Grainger, S; Gammie, G; De Bièvre, B; Buytaert, W. 2019. Potential contributions of pre-Inca infiltration infrastructure to Andean water security. Nature Sustainability 2(7):584-593. DOI: https://doi.org/10.1038/s41893-019-0307-1.

OIEA/GNIP. 2014. Guía para el muestreo de la precipitación OIEA/GNIP (en línea). :20. Disponible en http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_es_hq.pdf.

Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA). 2017. Hidrología a base de isótopos ambientales (en línea). Organismo Internacional de Energía Atómica :42-48. Disponible en https://www.iaea.org/sites/default/files/15305904248_es.pdf.

Ordóñez-Olivares, A; Beita-Sandí, W. 2020. Caracterización fisicoquímica e isotópica (18O y 2H) de la región norte del acuífero Tempisque, Costa Rica. UNED Research Journal 12(1): e2588. DOI: https://doi.org/10.22458/urj.v12i1.2588.

Parnell, A y Inger, R. 2016. A stable isotope mixing model, R package version 0.3. R. s.l., s.e.

Pérez, R. 2006. Análisis del proceso hacia la cogestión en la subcuenca del río Aguas Calientes, departamento de Madriz, Nicaragua (en línea). Magister Scientiae :1-103. Disponible en http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2242E/A2242E.PDF.

Piper, A. 1944. 914 TRANSACTIONS, A M E R I C A N G E O P H Y S I C A L UNION t i m e s a s g r e a t a s it should h a v e been. And in t h i s c a s e. American geophysical union :914-928.

Pita, M. 2008. LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL RIESGO DE SEQUÍA EN ESPAÑA. :126-139.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). 2000. MANUAL DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA EXPERIENCIAS EN AMÉRICA LATINA SERIE: Santiago, Chile, s.e. 235 p.

Phillips, DL; Gregg, JW. 2003. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources. Oecologia 136(2):261-269. DOI: https://doi.org/10.1007/s00442-003-1218-3.

Román, FSJ. 2017. Hidráulica Subterránea : Principios Básicos Régimen Permanente y Régimen Variable (en línea). :1-14. Disponible en http://hidrologia.usal.es.

Salas-Navarro, J; Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Corrales-Salazar, JL. 2018. Hydrogeological responses in tropical mountainous springs (en línea). Isotopes in Environmental and Health Studies 55(1):25-40. DOI: https://doi.org/10.1080/10256016.2018.1546701.

Sastre, B; Bienes, R; García-Díaz, A. 2016. Efecto de las cubiertas vegetales en un olivar sobre la humedad del suelo. Estudios en la Zona No Saturada XII (November):93-96.

Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Welsh, K; Brooks, ES; Boll, J; Alfaro-Solís, R; Valdés-González, J. 2013. Spatial and Temporal Variation of Stable Isotopes in Precipitation across Costa Rica: An Analysis of Historic GNIP Records. Open Journal

of Modern Hydrology 03(04):226-240. DOI: https://doi.org/10.4236/ojmh.2013.34027.

Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Sáenz-Rosales, O; Piedra-Marín, G; Fonseca-Sánchez, A; Madrigal-Solís, H; Ulloa-Chaverri, F; Rojas-Jiménez, LD; Vargas-Víquez, JA. 2016. Isotopic composition in precipitation and groundwater in the northern mountainous region of the Central Valley of Costa Rica. Isotopes in Environmental and Health Studies 53(1):1-17. DOI: https://doi.org/10.1080/10256016.2016.1193503.

Sánchez-Murillo, R; Birkel, C. 2016. Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. Geophysical Research Letters 43(10):5060-5069. DOI: https://doi.org/10.1002/2016GL068888.

Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Birkel, C; Correa, A; Welsh, K; Durán-Quesada, AM; Sánchez-Gutiérrez, R; Poca, M. 2020a. Tracing Water Sources and Fluxes in a Dynamic Tropical Environment: From Observations to Modeling. Frontiers in Earth Science 8(November):1-25. DOI: https://doi.org/10.3389/feart.2020.571477

Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Birkel, C; Ortega, L; Sánchez-Guerrero, M; Rojas-Jiménez, LD; Vargas-Víquez, J; Castro-Chacón, L. 2020b. From mountains to cities: a novel isotope hydrological assessment of a tropical water distribution system (en línea). Isotopes in Environmental and Health Studies 56(5-6):606-623. DOI: https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1809390.

Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Corrales-Salazar, JL; Castro-Chacón, L; Durán-Quesada, AM; Guerrero-Hernández, M; Delgado, V; Barberena, J; Montenegro-Rayo, K; Calderón, H; Chevez, C; Peña-Paz, T; Saúl, G-S; Ortiz-Roque, P; Alvarado-Callejas, Y; Benegas, L; Hernández-Antonio, A; Matamoros-Ortega, M; Ortega, L; Terzer-Wassmuth, S. 2020c. Tracer hydrology of the data-scarce and heterogeneous Central American Isthmus. Hydrological Processes 34(11):2660-2675. DOI: https://doi.org/10.1002/hyp.13758.

Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Corrales-Salazar, JL; Castro-Chacón, L; Durán-Quesada, AM; Guerrero-Hernández, M; Delgado, V; Barberena, J; Montenegro-Rayo, K; Calderón, H; Chevez, C; Peña-Paz, T; Saúl, G-S; Ortiz-Roque, P; Alvarado-Callejas, Y; Benegas, L; Hernández-Antonio, A; Matamoros-Ortega, M; Ortega, L; Terzer-Wassmuth, S. 2020. Tracer hydrology of the data-scarce and heterogeneous Central American Isthmus. Hydrological Processes 34(11):2660-2675. DOI: https://doi.org/10.1002/hyp.13758.

Saha, D; Dwivedi, SN; Roy, GK; Reddy, D V. 2013. Investigation sur le flux de nappe et sur le mécanisme de recharge d'un système aquifère du socle basée sur les isotopes: Cas de la zone urbaine de Ranchi, Inde. Hydrogeology Journal 21(5):1101-1115. DOI: https://doi.org/10.1007/s10040-013-0974-3.

Séraphin, P; Vallet-Coulomb, C; Gonçalvès, J. 2016. Partitioning groundwater recharge between rainfall infiltration and irrigation return flow using stable isotopes: The Crau aquifer. Journal of Hydrology 542:241-253. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.005.

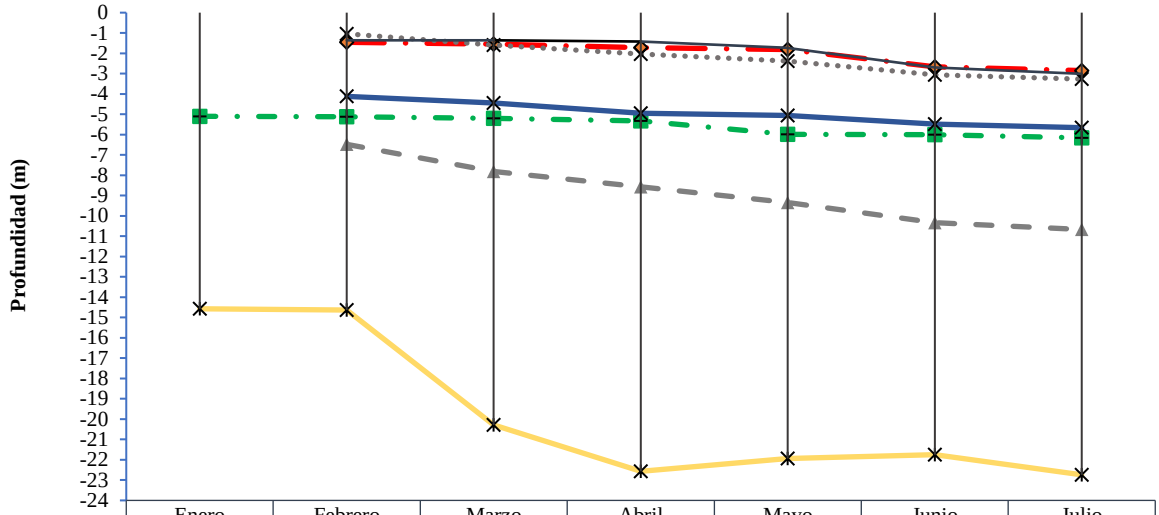
Smith, JA; Mazumder, D; Suthers, IM; Taylor, MD. 2013. To fit or not to fit: Evaluating stable isotope mixing models using simulated mixing polygons. Methods in Ecology and Evolution 4(7):612-618. DOI: https://doi.org/10.1111/2041-210X.12048.

Stiefel, JM; Melesse, AM; McClain, ME; Price, RM; Anderson, EP; Chauhan, NK. 2009. Effects of rainwater-harvesting-induced artificial recharge on the groundwater of wells in Rajasthan, India. Hydrogeology Journal 17(8):2061-2073. DOI: https://doi.org/10.1007/s10040-009-0491-6.

Toro, LE; Calderón, J; Taupin, JD; Vargas Quintero, M. 2009. Exploración de Aguas Subterráneas en Maicao (Colombia), mediante Técicas Hidroquímicas e Isotópicas (en línea). Maicao, Colombia, s.e. 67 p. Disponible en http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1611s_web.pdf.

Valenzuela, L; Ramírez, J; Palomares, R. 2013. Composición isotópica del agua subterránea y su relación con la salinidad en el valle de San Luis río colorado en Sonora, México. Información Tecnológica 24(2):57-66. DOI: https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200008.

8. Anexos



	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
# 1		-6.48	-7.82	-8.57	-9.34	-10.34	-10.67
# 2		-1.46	-1.54	-1.72	-1.82	-2.67	-2.85
# 3	-5.10	-5.12	-5.20	-5.32	-5.99	-6.01	-6.16
# 9		-1.04	-1.6	-2.03	-2.38	-3.06	-3.27
# 10		-4.12	-4.45	-4.95	-5.06	-5.49	-5.66
# 11		-1.36	-1.36	-1.42	-1.73	-2.70	-3.01
# 12	-14.57	-14.64	-20.29	-22.57	-21.94	-21.75	-22.74

Anexo A. Monitoreo del Nivel Estático del Agua en pozos excavados.

Ubicación de todos los colectores de precipitación y base de datos actualizada de todos los puntos de muestreo, obras de cosecha de agua, pozos excavados, pozos perforados y cauces (Anexo. B).

Fuentes de recarga	Comunidad	División de la subcuenca	Propietario	Elevación (m)	Coordenada X	Coordenada Y
Colectores de precipitación						
Colector de precipitación N°1	El Volcán	Parte alta	Don Lázaro Vásquez	976	544532	1483530
Colector de precipitación N°2	Uniles de Suyapa	Parte media	Don Alexis Gracia	732	542400	1485969
Colector de precipitación N°3	El Porcal	Parte alta	Don Celan Beltrán	767	542169	1484224
Colector de precipitación N°4	Agua Caliente	Parte baja	Don Alex Ramón Martínez	643	540376	1488966

Colector de precipitación N°5	Agua Caliente	Parte baja	Srta. Cesia Lea Hernández	659	540157	1489496
Colector de precipitación N°6	Santa Rosa	Parte baja	Don Santiago Rivera	703	540792	1487014
Colector de precipitación N°7	El Porcal	Parte alta	Don Luis Enrique Obando	844	543479	1483781
Colector de precipitación N°8	Los Copales	Parte baja	Don Evelio Hernández	699	541885	1488515
Colector de precipitación N°9	Los Copales	Parte baja	Don José Santos Tercero	682	542193	1488673
Colector de precipitación N°10	Santa Rosa	Parte baja	Don Carlos Martínez	692	541869	1487726
Colector de precipitación N°11	El Melonar	Parte baja	Doña Olga Osorio	710	541921	1491259
Colector de precipitación N°12	Santa Isabel	Parte media	Don Asunción Vásquez	723	543545	1487136
Obras de cosecha de agua						
Obra de cosecha de agua N°1	Santa Rosa	Parte baja	Don Carlos Martínez	709	541679	1487916
Obra de cosecha de agua N°2	Santa Rosa	Parte baja	Don Walter Estrada	697	540451	1486830
Obra de cosecha de agua N°3	Aguas Calientes	Parte baja	Don Alex Ramón Martínez	668	540502	1488833
Obra de cosecha de agua N°4	Santa Rosa	Parte baja	Don Miguel Ángel Obando	709	540060	1486301
Obra de cosecha de agua N°5	Los Copales	Parte baja	Don Rafael Lobo	713	542352	1489208
Obra de cosecha de agua N°6	Los Copales	Parte baja	Don Evelio Hernández	718	541688	1490297
Obra de cosecha de agua N°7	Las Lomas	Parte baja	Doña Zoila Esperanza Santander	689	541108	1489568

Obra de cosecha de agua N°8	Los Copales	Parte baja	Don José Santos Tercero	700	542304	1488699
Obra de cosecha de agua N°9	Aguas Calientes	Parte baja	Don Cristóbal	705	541950	1489585
Pozos						
Pozo excavado N°1	Los Copales	Parte baja	Don Francisco Hernández	699	541952	1488426
Pozo excavado N°2	Santa Rosa	Parte baja	Don José Valentín Pérez	725	541668	1486501
Pozo excavado N°3	Aguas Calientes	Parte baja	Don Alex Ramon Martínez	611	540432	1488970
Pozo perforado N°4	Quebrada de Agua	Parte alta	Comunal	844	545190	1486290
Pozo perforado N°5	Uniles de Suyapa	Parte media	FISE	767	542857	1485469
Pozo perforado N°6	Los Copales	Parte baja	ENACAL #2	695	541806	1488542
Pozo perforado N°7	Aguas Calientes	Parte baja	Don José Benito Mendoza	642	538696	1488803
Pozo perforado N°8	Aguas Calientes	Parte baja	Don Ervin Olivas	661	540233	1488903
Pozo excavado N°9	Santa Rosa	Parte baja	Don Miguel Ángel Obando	704	540092	1486407
Pozo excavado N°10	Santa Rosa	Parte baja	Don Santiago Rivera	699	540942	1487084
Pozo excavado N°11	Uniles de Suyapa	Parte media	Don Marvin Valladares	734	542406	1485943
Pozo excavado N°12	Santa Rosa	Parte baja	Don Walter Estrada	695	540372	1486823

Cauces						
Cauce La Susuba N°1	Santa Rosa	Parte baja	Don José Valentín Pérez	719	541829	1486337
Cauce Los Copales N°2	Santa Rosa	Parte baja	Comunal	688	541883	1488534
Cauce La Susuba N°3	Santa Rosa	Parte media	Don Alexis Gracia	743	542443	1485891

Anexo B. Información de todos los puntos de muestreo.

Rangos de contribuciones proporcionales de los modelos de mezcla utilizados en este análisis (IsoSource y SIMMR). En este caso las fuentes de agua que estarían contribuyendo a la mezcla (pozos o agua subterránea) fueron la precipitación, las obras de cosecha de agua y los cauces. Los datos porcentuales se representan por un diseño de monitoreo directo (obra de cosecha de agua y pozo excavado en la misma propiedad, pozo 03, 09 y 12), y un agrupamiento por influencia local fuentes de recarga y pozos adyacentes (Anexo. C).

	Grupos	**Fuentes**		
	Recarga directa	**Precipitación %**	**Obras de cosecha de agua %**	**Cauce %**
IsoSource	Pozo perforado 05 FISE	17,1	No se determinó	82,9
SIMMR		10,1	No se determinó	89,9
IsoSource	Pozo excavado 11	1,6	No se determinó	98,4
SIMMR		0,8	No se determinó	99,2
IsoSource	Pozo excavado 09	40,7	14,3	45,0
SIMMR		86,2	9,2	4,6
IsoSource	Pozo excavado 10	34,1	6	59,9
SIMMR		81,6	1	17,4
IsoSource	Pozo excavado 12	28,2	4,7	67,0
SIMMR		34,4	5,4	60,2
IsoSource	Pozo perforado 06 ENACAL #2	21,9	3,5	74,6
SIMMR		0,4	3,2	96,4
IsoSource	Pozo excavado 03	2.6	0,4	97,0

SIMMR		1,3	0,9	97,8
IsoSource	Pozo perforado 08	11,1	3,3	85,6
SIMMR		3,2	3,3	93,5
IsoSource	Pozo perforado 04 comunal	6,2	No se determinó	93,8
SIMMR		0,6	No se determinó	99,4
IsoSource	Pozo excavado 02	30,4	No se determinó	69,6
SIMMR		7,1	No se determinó	92,9
IsoSource	Pozo perforado 07	1,5	0,3	98,2
SIMMR		1,4	0,9	97,7
			Fuentes	
	Mezcla	**Precipitación %**	**Obras de cosecha de agua %**	**Cauce %**
IsoSource	Pozo excavado 03	1,3	0,7	97,9
SIMMR		0,5	1,7	97,8
			Fuentes	
	Mezcla	**Precipitación %**	**Obras de cosecha de agua %**	**Cauce %**
IsoSource	Pozo perforado 08	4,5	5,3	90,2
SIMMR		1,3	5,3	93,4

Anexo C. Contribuciones proporcionales como aporte de las fuentes de recarga hídrica a los pozos (agua subterránea) por diseño de monitoreo directo e influencia local fuentes de recarga y pozos adyacentes.

Análisis de la media y desviación estándar con el modelo SIMMR, estudio a nivel de la subcuenca y por diseño de muestreo (Anexo. D, E y F).

	Media	**Desviación estándar**
Desviación	105,343	3,822
Precipitación	0,024	0,019
OCAS	0,017	0,010
Cauces	0,959	0,022
sd [$\delta^{18}O$]	0,985	0,240
sd [$\delta^{2}H$]	5,574	1,573

Anexo D. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los mantos acuíferos a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, análisis del modelo SIMMR.

	Media	Desviación estándar
Desviación	61,597	4,004
Precipitación	0,037	0,028
OCA excavado	0,026	0,016
Cauce La Susuba	0,937	0,033
sd [$\delta^{18}O$]	1,130	0,420
sd [$\delta^{2}H$]	5,535	2,383

Anexo E. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, con el modelo SIMMR.

	Media	Desviación estándar
Desviación	47,284	4,313
Precipitación	0,052	0,043
OCA perforado	0,036	0,022
Cauce Los Copales	0,912	0,049
sd [$\delta^{18}O$]	0,928	0,602
sd [$\delta^{2}H$]	9,262	5,044

Anexo F. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos perforados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, con modelo SIMMR.

Análisis de la media y desviación estándar con el modelo IsoSource, estudio a nivel de la subcuenca y por diseño de muestreo (Anexo. G, H y I).

	Media	Desviación estándar- sd [$\delta^{18}O$]
Precipitación	0,075	0,047
OCAS	0,018	0,015
Cauces	0,907	0,033

Anexo G. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los mantos acuíferos a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, análisis del modelo IsoSource.

	Media	Desviación estándar- sd [$\delta^{18}O$]
Precipitación	0,072	0,051
OCA excavado	0,024	0,017
Cauce La Susuba	0,904	0,035

Anexo H. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos excavados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, con el modelo IsoSource.

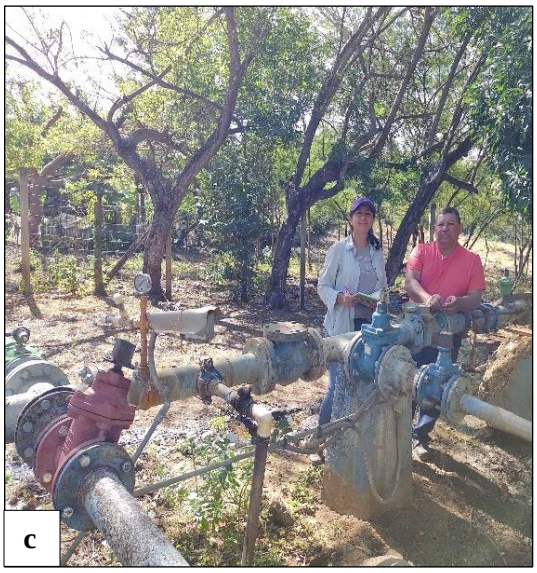
	Media	Desviación estándar- sd [$\delta^{18}O$]
Precipitación	0,053	0,039
OCA perforado	0,014	0,012
Cauce Los Copales	0,933	0,028

Anexo I. Contribución porcentual de las fuentes de recarga hídrica a los pozos perforados a nivel de la subcuenca Aguas Calientes, con modelo IsoSource.

Resumen de las actividades de la fase de campo en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto Nicaragua.

Fotografía a. Reconocimiento del área de estudio subcuenca Aguas Calientes.

Fotografía b. Marcando coordenadas en puntos de muestreo.



Fotografía c. Socializando la investigación con las personas de las comunidades.

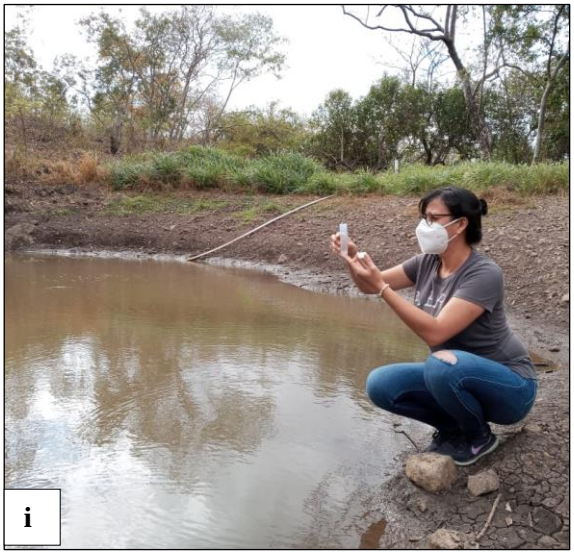
Fotografía d. Elaborando los colectores de precipitación.

Fotografía e. Instalando los colectores de precipitación en la comunidad Uniles de Suyapa.

Fotografía f. Recolectando muestras de agua de los eventos de precipitación.

Fotografía g. Muestras de agua de los eventos de precipitación.

Fotografía h. Tomando muestra de agua de las obras de cosecha de agua en la comunidad de Santa Rosa.



Fotografía i. Tomando muestra de agua de las obras de cosecha de agua en la comunidad Aguas Calientes.

Fotografía j. Tomando muestra de agua de los pozos excavados en la comunidad Los Copales.

Fotografía k. Tomando muestra de agua en el cauce La Susuba parte media.

Fotografía l. Determinando pH *in situ* en el cauce Los Copales.

Fotografía m. Determinando pH, CE, TDS y Salt en todos los puntos de muestreo.

Fotografía n. Midiendo el NEA en pozos excavados en la comunidad Santa Rosa.

Fotografía o. Midiendo el NEA en pozos excavados en la comunidad Santa Rosa.

Fotografía p. Preparando muestras de agua para refrigerar.

Fotografía q. Personal del laboratorio LAQUISA para el análisis de iones mayoritarios.

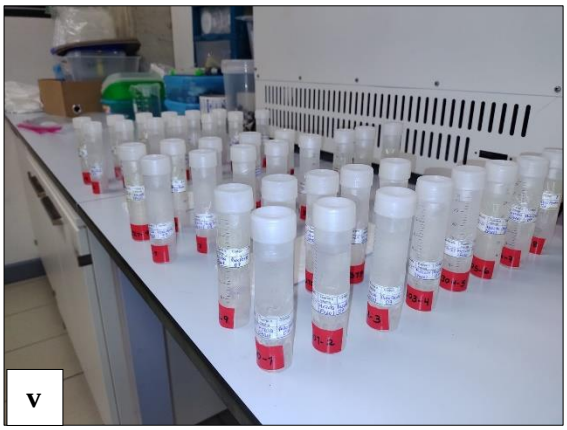
Fotografía r. Personal del laboratorio LAQUISA para el análisis de iones mayoritarios.

Fotografía s. Intercambio de experiencias con los productores.

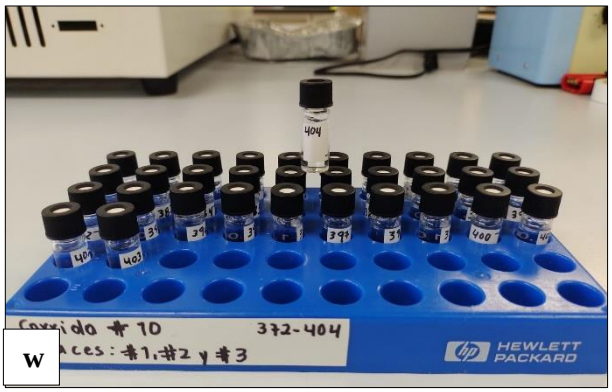
Fotografía t. Visita de campo con un técnico del proyecto, obras de cosecha de agua en el mes de junio.

Análisis de las muestras de agua para determinar la composición isotópica en el laboratorio químico de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

Fotografía u. Preparando las muestras de agua para el análisis isotópico.



Fotografía v. Muestras de agua recolectadas en campo.



Fotografía w. Muestras de agua en frasco de viales listo para el análisis.

Fotografía x. Equipo analizador de isótopos del agua modelo LWIA-45-EP.

Anexo J. Fase de campos y laboratorio de la investigación de tesis en la subcuenca Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua.