



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CARRERA QUÍMICA AMBIENTAL



MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN QUÍMICA AMBIENTAL.

TÍTULO: Aporte de las aguas de Laguna Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Autor:

Br. Jonathan Javier Zeas Vivas

Tutor:

Ing. Javier Antonio Barberena Moncada

Asesor:

MSc. Jairo López Velázquez

Managua, noviembre, 2021

ASPECTOS GENERALES

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Dedicatoria

A Dios.

La presente tesis es una obra de Dios, por lo que se la dedico totalmente a él, por haberme brindado la sabiduría e inspiración en tocar las puertas, y perseverar, hubo momentos en los que dudaba y flaqueaba, pero siempre fue Dios la motivación de seguir adelante, hubo momentos difíciles, tanto personal como familiar, por lo que mi santo padre fue él y será el pilar de mi vida.

Mi familia.

Una vez más, doy gracias a Dios por darme una maravillosa familia, para apoyarme, inspirarme a seguir adelante, y que no me detenga, los valores que me han ensañado cada uno, mi madre, que desde el inicio de mi vida académica a estado conmigo e igual sigue hasta el día de hoy, porque sin su ayuda nada habría sido posible; mi padre, por ser el que siempre me alentaba cuando me desmotivaba, siempre me hizo abrir los ojos y desear más, y mi hermano, más que mi sangre, hasta hoy es también mi mejor amigo que siempre confía en mí y yo en él.

Profesores.

Desde la primera profesora de preescolar hasta el último de la universidad, cada uno como un eslabón, para formar al alumno y que sean su orgullo, es difícil enumerar a cada profesional de la educación, que no en todos los casos enseñan lo académico, si no también, las cosas de la vida, un gracias a todos aquellos maestros que me formaron para llegar hasta aquí el día de hoy.

Agradecimientos

Un agradecimiento inmenso a Dios, por haberme dado la salud, y la sabiduría para lograr mis objetivos y poner las personas adecuadas para asistirme en esta tesis que, sin ellas, ni Dios no fuera sido posible llegar hasta el final.

A mi padre y mi madre, por haberme ensañado e inculcado principios, humildad, respeto, ante todo, saber escuchar y hablar con honestidad. A mi hermano, por aconsejarme siempre, e inculcarme en creer más en mí mismo y mis capacidades.

A la docente Ing. Iris Hurtado García, quien me ayudo, cuando muchas puertas se me cerraron, ella fue la que me dio la mano y me recomendó para esta tesis, al que es mi tutor, al Ing. Javier Antonio Barberena Moncada, especialista hidrogeólogo del CIRA/UNAN-Managua le doy mi especial agradecimiento, por apoyarme en todo momento, motivarme a seguir estudiando, tenerme paciencia, confiar en mí, y hacer un tiempo para enseñarme.

Al CIRA/UNAN-Managua, por darme la oportunidad en realizar la presente investigación y proveer una serie de bases de datos que facilito llevar a cabo el estudio, así como el apoyo correspondiente en la tutoría.

A los diferentes docentes de la UNAN-Managua, que me formaron para ser un profesional, a mi primer docente y mi asesor metodológico Msc. Jairo López Velázquez, quien siempre busco la oportunidad para corregirme e ilustrarme metodológicamente, a la Msc. Indira Mejía Cruz coordinadora de la carrera de química ambiental, que siempre me apoyo y me aconsejaba amablemente.

A mis diferentes compañeros de la Universidad, que estuvieron ahí, y me dieron palabras de aliento para seguir adelante.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

Carta aval del tutor



Managua 28 de octubre de 2021

La presente monografía titulada “**Aporte de las aguas de Laguna Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019**”, realizado por el bachiller Jonathan Javier Zeas Vivas, quien esta bajo mi dirección **Ing. Javier Antonio Barberena Moncada**, doy fe de que la presente investigación es propiedad intelectual fidedigna y original de Br. Zeas, además que han cumplido con todas las disposiciones y requisitos académicos según el Capítulo III del Título IV del Reglamento del Régimen Académico Estudiantil.

Tutor

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-MANAGUA)

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-MANAGUA).

Resumen

Definir el comportamiento y el mecanismo de recarga-descarga en los acuíferos, es indispensable en la gestión sostenible de los recursos hídricos, por ello, se genera información vital en el presente estudio por medio de técnicas isotópicas, con ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, con el objetivo de determinar el aporte de aguas de Laguna de Tiscapa, hacia el acuífero Las Sierras en el periodo de 2018-2019 en la ciudad de Managua.

Se contó con la base de datos del proyecto mapa isotópico de Nicaragua, que coordina CIRA/UNAN-Managua desde 2016 y datos históricos de OIEA, con un total de 322 resultados en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, en las matrices de agua precipitada, aguas subterráneas, Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán, para indagar quien ejerce influencia en el acuífero Las Sierras, específicamente en la zona entre los Lagos de Tiscapa y Lago Xolotlán.

Los resultados indican que, las aguas subterráneas se dividen en dos grupos con diferencias significativas ($p < 0.05$), empobrecidos al sur de Tiscapa ($\delta^{18}\text{O} = -7.10\text{‰}$, $n = 18$), relacionadas con las precipitaciones en invierno como fuente de recarga ($\delta^{18}\text{O} = -8.90\text{‰}$, $n = 9$), y en la zona entre Lagos, los pozos que presentan un enriquecimiento isotópico ($\delta^{18}\text{O} = -5.93\text{‰}$, $n = 6$) están agrupados con Tiscapa ($\delta^{18}\text{O} = -4.53\text{‰}$, $n = 76$), lo que demuestra que existe un aporte de Laguna de Tiscapa al acuífero las Sierras ($\delta^{18}\text{O} = +1.17\text{‰}$) al norte y noreste.

El Lago Xolotlán enriquecido isotópicamente ($\delta^{18}\text{O} = -0.48\text{‰}$) presenta diferencia significativa respecto a los dos grupos anteriores, demostrando que no ejerce influencia en las aguas subterráneas.

Palabras claves: Isótopo, ^{18}O , ^2H , Acuífero Las Sierras, Laguna de Tiscapa.

ÍNDICE

ASPECTOS GENERALES	i
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Carta aval del tutor	v
Resumen	vi
CAPÍTULO I	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN.....	5
1.4.1 Objetivo general.	5
1.4.2 Objetivos específicos.	5
CAPÍTULO II	6
2.1 MARCO TEÓRICO	7
2.1.1 Hidrología isotópica.....	7
2.1.1.1 Trazadores ambientales.....	7
2.1.1.2 Isótopos estables.	8
2.1.1.3 Fraccionamiento isotópico.....	9
2.1.1.4 Línea de agua meteorica global (GMWL).....	11
2.1.1.5 Línea de agua meteórica local (LMWL).....	11
2.1.1.6 Exceso de deuterio (d-exceso).....	12
2.1.1.7 Exceso condicionado por la línea.....	12
2.1.2 Hidrogeología.....	13
2.1.2.1 Acuíferos.	13

2.1.2.2 Hidrodinamica del Acuífero Las Sierras	14
2.1.3 Prueba no paramétrica de kruskal-Wallis.....	15
2.1.4 Isoscape.....	15
2.2 ANTECEDENTES.....	16
2.3 HIPÓTESIS.....	19
CAPÍTULO III.....	20
3.1 DISEÑO METODOLÓGICO	21
3.1.1 Descripción del ámbito de estudio.....	21
3.1.1.1 Zona entre Laguna Tiscapa y Lago Xolotlán.....	22
3.1.1.2 Laguna de Tiscapa.....	22
3.1.1.3 Acuífero Las Sierras.....	22
3.1.1.4 Lago Xolotlán	23
3.1.2 Tipo de estudio.....	23
3.1.3 Población y muestra.....	24
3.1.3.1 Población.	24
3.1.3.2 Muestra.	24
3.2 VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN	25
3.2.1 Variables independientes.....	25
3.2.2 Variables dependientes.....	26
3.2.3 Operacionalización de las variables.....	26
3.3 MATERIAL Y MÉTODO.....	28
3.3.1 Materiales para recolectar información.	28
3.3.2 Materiales para procesar la información.	29
3.3.3 Metodología isotópica.	31
3.2.3.1 Metodología de muestreo.....	31

3.2.3.2 Metodología de análisis de datos isotópico.....	33
CAPÍTULO IV	36
4.1 ANALISIS DE LOS RESULTADOS	37
4.1.1 Caracterización isotópica.	37
4.1.1.1 Precipitación.....	37
4.1.1.2 Lago Xolotlán	46
4.1.1.3 Laguna de Tiscapa.....	49
4.1.1.4 Aguas Subterráneas.....	57
4.1.2 Correlación de los resultados isotópicos.....	66
4.1.3 Mapeo isotópico del agua subterránea en la zona de estudio	72
CAPÍTULO V	73
5.1 Conclusiones	74
5.2 Recomendaciones	75
5.3 Bibliografía.....	76
Anexos.....	1
Anexo 1. Glosario.....	2
Anexo 2. Área de estudio.....	4
Anexo 3. Datos isotópicos.....	7

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio, y sitios de muestreo en Managua.	21
Figura 2. Línea de agua meteórica local de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio, LN, PSA, AIACS y CIRA/UNAN-Managua 2018-2019.....	37
Figura 3. Efecto estacional de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$, y la demostración del efecto en "W" de Sánchez-Murillo et al., (2020) en un periodo de 2018-2019.....	39
Figura 4. Efecto altitud en las precipitaciones por el promedio de las 4 estaciones pluviométricas de 2018-2019.	41
Figura 5. d-exceso en cada estación de muestreo en función del tiempo de estudio, 2018 al 2019.	43
Figura 6. Línea de evaporación del Lago Xolotlán 1997-1998 y 2018-2019.....	46
Figura 7. Variabilidad del d-exceso vs $\delta^{18}\text{O}$ en Lago Xolotlán.	48
Figura 8. Línea de evaporación de Laguna de Tiscapa 2018-2019.	49
Figura 9. Variación de $\delta^{18}\text{O}$ por efecto estacional y diferencia isotópica a nivel superficial y lecho de las aguas de Laguna de Tiscapa 2018-2019.....	51
Figura 10. Variación isotópica en $\delta^{18}\text{O}$ con respecto la profundidad del muestreo. .	53
Figura 11. Variación en d-exceso por efecto estacional y la diferencia a nivel superficial y lecho de las aguas de Laguna de Tiscapa 2018-2019.....	54
Figura 12. Variación de lc-exceso por efecto estacional y la diferencia a nivel superficial y lecho de las aguas de Laguna de Tiscapa 2018-2019.....	56
Figura 13. Línea de aguas subterráneas correspondiente al acuífero Las Sierras. .	57
Figura 14. Nivel piezométrico del acuífero Las Sierras vs $\delta^{18}\text{O}$ en el área de estudio.	59
Figura 15. d-exceso de las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras 2018-2019.	61
Figura 16. Graficas de UTM Norte, de las aguas subterráneas que constituyen el acuífero Las Sierras.	64
Figura 17. Diagrama de cajas, variación isotópica en $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (A), d-exceso ‰ (B), y lc-exceso ‰ (C).	69

Figura 18. Isoscape de las aguas subterráneas en el área de estudio 2018-2019. .	72
Figura 19. Fotografías de Laguna de Tiscapa.....	4
Figura 20. Vista desde la loma de Tiscapa, al norte, se observa al Lago Xolotlán, y la zona que comprende entre Tiscapa y el Lago.	5
Figura 21. Vista del Lago Xolotlán desde el Malecón de Managua.....	6
Figura 22. Totalizador tipo Palmex Rain Sampler RS1.	15

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las variables.	27
Tabla 2. Equipos, materiales y reactivos utilizados para análisis isotópico y muestreo.	31
Tabla 3. prueba de Kruskal Wallis.	67
Tabla 4. Parámetros de estadísticas descriptivas de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$, $\delta^2\text{H}\text{‰}$, d-exceso‰ y lc-exceso‰.	71
Tabla 5. Datos isotópicos de las precipitaciones en las diferentes estaciones meteorológicas.....	7
Tabla 6. Datos isotópicos de Lago Xolotlán.....	12
Tabla 7. Análisis unidireccional de varianza en rangos de Kruskal-Wallis de los diferentes grupos de aguas subterráneas (GW), estaciones meteorológicas (R-LN, R-CIRA, R-PSA, R-AIACS), Laguna de Tiscapa (LT) y Lago Xolotlán (LX).....	16

REFERENCIAS DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

FPI

Fondo para Investigación

CIRA/UNAN-Managua

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua de la UNAN-Managua

UNAN-Managua

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua

OIEA

Organismo Internacional para La Energía Atómica

INETER

Instituto Nicaragüense de estudios territoriales

^{18}O

Isótopo de Oxígeno-18

^2H

Isótopo de Hidrogeno-2

δ

Símbolo delta, representa la desviación isotópica dado en por mil, ‰

V-SMOW

Vienna Standard Mean Ocean Water, standard international isotopic.

R

Relación Isotópica

GMWL

Global Meteoric Water Line

LMWL

Local Meteoric Water Line

d-exceso

Exceso de deuterio, ^2H

msnm

Metros sobre el nivel del mar

PSA

Puerto salvador allende

AIACS

Aeropuerto internacional Augusto C. Sandino.

LN

El Crucero Las Nubes

ZCIT

Zona de convergencia intertropical

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El ciclo hidrológico busca entender el movimiento del agua en cada una de sus etapas y los diferentes escenarios en los que está involucrada, desde que el agua cae como precipitación, y luego es interceptada por la vegetación hasta llegar al suelo, seguido sucede la infiltración, hasta llegar al subsuelo y se manifiesta el movimiento de las aguas subterráneas, esta puede viajar hasta la superficie, en manantiales o dirigirse a los océanos por escorrentía superficial. Es decir, considerando el recorrido del agua por todo el ciclo hidrológico es prioritario entender cómo se desplaza en cada fase del ciclo (Werner, 1996).

Para una detallada comprensión del ciclo hidrológico se emplean los isótopos de ^2H y ^{18}O , ya que son conservativos y no varían en el tiempo, esto los hace excelentes trazadores lo que permite determinar como el agua se mueve a través del ciclo (Mook, 2002).

La presente investigación, consiste primordialmente en aplicar técnicas isotópicas para trazar el movimiento de aguas de Laguna de Tiscapa, hacia el cuerpo de aguas subterráneas adyacentes, que corresponde al acuífero Las Sierras, todo esto conlleva a conocer una serie de factores isotópicos determinantes para llevar a cabo la investigación, así como conceptos básicos hidrogeológicos del área de estudio.

Para determinar el aporte de aguas por parte de Laguna de Tiscapa al acuífero Las Sierras, se utilizan isótopos estables de ^2H y ^{18}O que adquieren un rasgo particular en cada eslabón del ciclo hidrológico, para lograrlo se utilizaron fuentes de aguas de precipitaciones, Laguna de Tiscapa, Lago Xolotlán y aguas subterráneas.

La importancia del estudio radica en generar información relevante para una futura gestión ambiental de este valioso recurso hídrico, el cual se centra en mejorar la comprensión del modelo hidrogeológico del área de estudio por medio de técnicas isotópicas ambientales, ya que la Laguna de Tiscapa representa una reserva natural única y privilegiada por su posición central en la ciudad de Managua, y el acuífero Las Sierras a su vez es de vital importancia para la población capitalina la cual depende fuertemente, para la distribución y abastecimiento del agua potable (Mejía, 2018; JICA, 1993).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Laguna de Tiscapa sufre de contaminación, a causa de ser un receptor de aguas pluviales domésticas y desechos sólidos, provenientes de los diferentes cauces urbanos (San Isidro de la Cruz Verde, Jocote Dulce y los Duartes) de la ciudad de Managua, aportando sedimentos, y residuos sólidos que son arrojados a los cauces, lo cual provoca procesos de asolvamiento, contaminación biológica, eutrofización, deterioro de las características físico-químicas, afectando la calidad de las aguas de Tiscapa provocando que no sean aptas para consumo humano (Fiallos & Asociados – Consultores, 2004).

Debido al estado en que se encuentra la Laguna de Tiscapa, definir su comportamiento hidrogeológico con respecto al acuífero Las Sierras, es de suma importancia debido a que existe la posibilidad de que las aguas contaminadas de Tiscapa afecten al acuífero Las Sierras, ya que es donde se extraen las aguas subterráneas para abastecer a la población de Managua, lo que supondría un riesgo a la salud pública.

Por lo antes mencionado se plantea la siguiente pregunta ¿De qué manera las aguas de Laguna Tiscapa modifican la composición isotópica del acuífero Las Sierras? resolver esta interrogante, es una necesidad, para entender la hidrodinámica de Laguna de Tiscapa, su relación y aporte de aguas al acuífero Las Sierras.

Establecida ya esta pregunta, se procede a sistematizarla en las siguientes interrogantes: ¿Cuáles la composición isotópica de Laguna de Tiscapa, Lago Xolotlán, aguas subterráneas y precipitaciones? ¿Cómo la composición isotópica de las aguas de Laguna de Tiscapa modifican las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Estudiar y analizar el aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa al acuífero Las Sierras por métodos isotópicos, es de suma importancia para los tomadores de decisión, primero, por el peligro que podría representar por ser un posible punto de contaminación que afecte al acuífero Las Sierras, que abastece de agua potable a la población de la ciudad de Managua, aunque la presente investigación no evalúa la calidad de agua, sirve como punto de partida para realizar monitoreos constantes a las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras destinadas a consumo humano, y segundo, ayuda a mejorar la comprensión del modelo hidrogeológico del área de estudio.

Definir la influencia que ejerce Laguna de Tiscapa sobre el acuífero Las Sierras, podría cambiar la manera en que la ciudad trata la Laguna, despertando el interés sobre la gestión adecuada y sostenible de este recurso, no solo de la población si no del gobierno y sectores ambientales que ya están planeando proyectos para beneficiar la Laguna de Tiscapa.

La aplicación de las técnicas isotópica resulta ideal para este estudio en la que existe una relación de aguas superficiales y subterráneas, en el que los isotopos de ^{18}O y ^2H son excelentes trazadores ambientales, que rastrea la firma isotópica en diferentes fases del ciclo hidrológico, el origen de las aguas subterráneas y superficiales, así como estudiar los procesos de recarga-descarga, en síntesis, es utilizado para trazar el movimiento y transporte del agua por todo el ciclo (Peralta et al., 2015), además de brindar información y conocimientos únicos complementarios a los obtenidos por la geoquímica e hidrogeología clásicas (Porowski, 2014).

Los resultados generados facilitarían a una futura gestión sostenible del recurso hídrico que beneficiarían toda el área de Tiscapa y el acuífero Las Sierras, que son muy valiosos para la ciudad de Managua, además Laguna de Tiscapa tiene un potencial social-económico muy relevante debido a que se ubica al centro de la ciudad de Managua y causaría un impacto positivo al turismo nacional e inclusive internacional.

1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general.

Determinar aportes de aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando isótopos de ^{18}O y ^2H .

1.4.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar la composición isotópica en Laguna de Tiscapa, acuífero Las sierras, precipitaciones y Lago Xolotlán.
- Correlacionar la composición isotópica de las aguas en Laguna de Tiscapa, acuífero Las Sierras, Precipitaciones y Lago Xolotlán.
- Generar un isoscape para la representación isotópica espacial de las aguas subterráneas en el área de estudio.

CAPÍTULO II

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Hidrología isotópica.

El principal instrumento de la hidrología isotópica son los isótopos, estos son elementos con el mismo número atómico y propiedades químicas similares, pero con diferentes masas atómicas ya que al haber una diferencia de neutrones estos son más pesados y poseen un comportamiento característico que lo diferencia de los isótopos ligeros, muy importantes en la hidrología (Mook, 2002).

Los isótopos en la hidrología se emplean en los estudios relacionados con los recursos hídricos, son herramientas muy actuales y constituyen métodos adecuados para obtener modelos conceptuales fenomenológicos; siendo un instrumento de validación de otras técnicas hidrogeológicas e hidrológicas, y tienen probada eficacia en la solución de problemas relacionados con calidad del agua, interconexiones hidráulicas, mezclas de agua, profundidad de circulación, o localización de recargas y de fuentes de contaminación (Peralta et al., 2015)

Los estudios isotópicos pueden tomar como base las regularidades geoquímicas que presentan los isótopos en las aguas superficiales y subterráneas provocadas por los procesos naturales. Los estudios basados en isótopos ambientales contribuyen a la identificación del funcionamiento de sistemas hidrogeológicos en aspectos muy diversos por medio del contenido isotópico en el agua (Werner, 1996; Martínez et al., 2006):

- Si el contenido isotópico no cambia dentro de un sistema de flujo de agua, esta reflejara el origen del agua, especialmente ubicación, periodo y el proceso de recarga.
- Si el contenido isotópico cambia en los caminos del agua subterránea, este reflejara la historia del agua, es decir la mezcla de diferentes componentes y los procesos de la descarga, así como mostrar efectos de evaporación entre otros.

2.1.1.1 Trazadores ambientales.

Los trazadores deben de ser móviles y no experimentar retardos producidos por la retención en un sólido o matriz del acuífero, es por ello que deben ser no-reactivos y

conservativos y lo más importante debe ser fácilmente cuantificable. El caso de un trazador ambiental es que aparece de forma natural, su modelo espacial o su balance de masas global se utiliza para inferir los caudales de recarga y descarga (Geyh, 2002).

Los isótopos estables son trazadores introducidos en la litosfera naturalmente por medio de la lluvia, la nieve u otros tipos de precipitaciones menores como el granizo (Mook, 2002). Son excelentes trazadores porque no varían en el tiempo, y se utilizan para determinar el origen de las aguas subterráneas y los procesos de mezcla, así como determinar el balance de agua de un Lago, ya que los procesos de evaporación suelen provocar un incremento cuantificable de ^2H y ^{18}O en las aguas de los Lagos, lo que les da una característica particular (Geyh, 2002).

2.1.1.2 Isótopos estables.

Los isótopos son creados por eventos naturales, y muchos átomos poseen dos o más isotopos. En general los átomos que poseen un número par de protones y/o neutrones son más estables (Mook, 2002), es decir no emiten radiación, y existen los átomos inestables (radiactivos) que emiten radiaciones alfas, betas y gamma.

Se considera que un núcleo atómico es estable cuando no se desintegra espontáneamente transcurrido un cierto período de tiempo. En la práctica, esto se traduce en que los isótopos estables no presentan una actividad radiactiva apreciable es decir emisión de radiación ionizante (Martínez et al., 2006).

En la molécula del agua H_2O existen isotopos, tanto de H como de O, que pueden combinarse hasta formar diferentes configuraciones isotópicas en la molécula del agua, pero las de más relevancia en la hidrología isotópica son los isotopos de ^{18}O y el ^2H , este último es también llamado deuterio "D" (Martínez et al., 2006; Mook, 2002). El ^{18}O y el ^2H se encuentran formando parte de la molécula del agua en un 0,204% y 0,015%, respectivamente y el comportamiento tanto químico y físico del agua se ve afectado por los isótopos que constituyen la molécula (Werner, 1996).

La relación entre las concentraciones de los isótopos pesados y los ligeros que son más abundante, se expresa como desviación en tanto por mil (δ en ‰) (Porowski, 2014) respecto a un patrón V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), que representa

un valor medio de dicha relación con el agua del mar, como una desviación de la proporción de la muestra (R_s) relativa a un patrón de referencia o estándar (R_{std}) dicha relación se presenta en la siguiente ecuación (Gonfiantini, 1978).

$$\delta = \frac{R_s - R_p}{R_p} \cdot 1000 \quad \text{Ecuación 1}$$

δ —————> desviación isotópica dado en ‰ p —————> referencia internacional
R —————> relación isotópica de $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 1000 —————> convertir a por mil ‰
s —————> muestra

Los valores negativos corresponden, a muestras cuya relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o $^2\text{H}/^1\text{H}$ es inferior a la que se aprecia en el patrón, estos valores negativos (empobrecidos) son reportados como delta (δ) que indican baja presencia del isótopo menos abundante en la muestra, respecto al material de referencia, en tanto que valores positivos (enriquecidos) indican mayor abundancia. Su concentración se determina mediante espectrometría de masas, los errores habituales suelen ser $\pm 0,1\%$ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\pm 1\%$ para $\delta^2\text{H}$ (Araguás Araguás et al., 1992).

Los procesos meteorológicos (evaporación, condensación, precipitación) de una región, así como la geografía, juega un rol importante que afecta en la composición de los isótopos estables ^2H y ^{18}O , originando aguas de recarga con características isotópicas particulares. Una vez recargada el agua en un acuífero esta no cambia su composición isotópica, por lo que sirven como trazadores naturales para determinar la procedencia de las aguas subterráneas (Araguás Araguás et al., 1992; Rozanski et al., 2001).

2.1.1.3 Fraccionamiento isotópico.

Los cambios de los contenidos isotópicos originales de una sustancia en la naturaleza son causados por procesos físicos y químicos, dichos cambios se les conocen como fraccionamiento isotópico (Werner, 1996; Caballero, 1989). Las moléculas con diferencias de masas tienen diferentes velocidades de reacción, lo que conduce al fraccionamiento de isótopos, es decir, a una distribución desigual de isótopos entre dos

sustancias coexistentes o dos fases de la misma sustancia (Porowski, 2014; Mook, 2002).

Este fraccionamiento se puede dar en los procesos en que haya: reacciones de equilibrio, reacciones unidireccionales, procesos físicos tales como evaporación, condensación, adsorción, desorción y difusión de iones, donde la masa juega un papel fundamental en dichos procesos (Caballero, 1989). El fraccionamiento isotópico influye directamente en el contenido ^{18}O y ^2H en el agua por diferentes factores (Mook, 2002), los procesos que influyen en el fraccionamiento isotópico son:

- Distancia al mar: el vapor generado tiene δ ligeramente negativo ($\delta \sim -10\text{‰}$) y va disminuyendo a medida que penetra en las áreas continentales, es decir que las lluvias son más empobrecidas isotópicamente cuando más lejos están del mar.
- Temperatura: en zonas frías se produce un vapor más empobrecido isotópicamente que en las zonas más cálidas, aunque existe una notable dependencia de las situaciones y de las condiciones climáticas locales; el valor medio varía según $\delta^{18}\text{O} = 0,7\text{‰} t_a - 13,9 \text{ °C}$ (Dansgaard, 1964) siendo t_a la temperatura media anual, lo que conduce a una disminución de $0,5\text{‰}$ /grado de latitud, con notables excepciones.
- Altitud: la disminución de la temperatura con el aumento de la elevación en las regiones montañosas, generalmente conduce a una mayor condensación y, por lo tanto, a un agotamiento progresivo de los isótopos pesados de la precipitación, el gradiente varía verticalmente entre $-0,15\text{‰}$ y $-0,50\text{‰}$ 100m^{-1} para el ^{18}O y -1‰ a -4‰ para el ^2H (Araguás-Araguás et al., 2000).
- Latitud: los contenidos de ^2H y ^{18}O en la precipitación disminuyen al aumentar la latitud. El resultado de esta variación es que la precipitación a mayores latitudes, tiene una composición isotópica más ligera que la precipitación en el Ecuador geográfico, de acuerdo con el modelo de circulación atmosférica global (Díaz et al., 2009).
- Efecto cantidad: se ha observado que la lluvia de precipitaciones menores es isotópicamente más enriquecida, que aquellos eventos de precipitaciones

intensos. Durante las lluvias breves el efecto cantidad se ha atribuido, a la evaporación y el intercambio isotópico de las gotas de lluvia descendentes con la humedad atmosféricas (Sánchez-Murillo et al., 2016).

2.1.1.4 Línea de agua meteorica global (GMWL).

Craig (1961) en su estudio de ^{18}O y ^2H en las aguas superficiales todo el mundo, encuentra una relación lineal entre el ^{18}O y ^2H , la cual sugirió llamar al mejor de sus puntos como Global Meteoric Water Line (GMWL) definida por la siguiente ecuación de datos:

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

$\delta^2\text{H}$ —————> relación isotópica de ^2H . 8 —————> pendiente.

$\delta^{18}\text{O}$ —————> relación isotópica de ^{18}O . 10 —————> intercepto.

La línea de agua meteórica global, puede relacionarse a una escala regional o local, lo que demuestra una estrecha relación (Araguás-Araguás et al., 2000). La pendiente de esta recta, está controlada por la relación entre los factores de fraccionamiento isotópico del ^{18}O y ^2H durante la condensación, dependientes principalmente de la temperatura (Dansgaard, 1964). El corte de esta recta con el eje de ordenadas de $\delta^2\text{H}$ es controlada principalmente por la humedad relativa del aire, durante el proceso de fraccionamiento isotópico cinético desde la superficie oceánica.

Según Díaz et al., (2009) señala que el valor de 10‰ corresponde a una humedad relativa del vapor de agua a escala global en las franjas subtropicales y en algunas regiones áridas y semiáridas describe Araguás-Araguás et al., (2000) que las estaciones muy marcadas, se han reportado comúnmente pendientes menores a 8, lo que indica evaporación y, por ende, enriquecimiento isotópico.

2.1.1.5 Línea de agua meteórica local (LMWL).

La línea de agua meteórica local (o por sus siglas al inglés LMWL), es un referente para establecer desviaciones de equilibrio termodinámico durante el fraccionamiento isotópico, y establecer relaciones entre diferentes fuentes de agua, como sería precipitación versus recarga de un acuífero (Craig, 1961). La línea de agua meteórica

local también puede diferir sustancialmente de la línea de agua meteórica global (GMWL), en los casos en que el régimen de circulación atmosférica de un área dada varía estacionalmente, trayendo humedad al sitio de precipitación de dos o más fuentes diferentes, donde se puede discernir los valores absolutos distintos de ^{18}O , ^2H y el exceso de deuterio (Araguás-Araguás et al., 2000).

El establecimiento de líneas de aguas meteóricas a escalas regionales o locales, así como el conocimiento de los valores de las desviaciones isotópicas medias en una zona, proporcionan la base sobre la que se pueden comparar o correlacionar los datos, lo que permite inferir los orígenes del agua subterránea, cuantificar componentes del flujo base, hasta la determinación de tiempos de tránsitos en cuerpos de aguas, mediante conceptos básicos de hidrología e hidrogeología y desviaciones de muestras representativas de aguas de los diferentes componentes del ciclo hidrológico (Díaz et al., 2009).

2.1.1.6 Exceso de deuterio (d-exceso).

El exceso de deuterio (d-exceso) muestra el índice de desequilibrios rápidos en los procesos de condensación- evaporación de la precipitación, procesos dominados por efectos de fraccionamiento cinético producto por la evaporación, pero también que se pueden dar en los procesos de condensación. Los valores d-exceso, se adquieren durante la evaporación y no cambian significativamente en la evolución posterior de la masa nubosa, salvo por evaporación, además puede ser un indicador de la génesis de ese vapor (Dansgaard, 1964).

El d-exceso, viene definido por una ecuación que Dansgaard en (1964) formuló, que ofrece la posibilidad de caracterizar la interacción de las diferentes masas de aire y su evolución temporal, en una estación de observación dada, generalmente proporciona información sobre las condiciones climáticas en la región de la fuente oceánica. Sin embargo, el vapor evaporado en las cuencas continentales puede modificar la señal "oceánica" original (Araguás-Araguás et al., 2000).

2.1.1.7 Exceso condicionado por la línea.

Recientemente se utilizan estos parámetros calculados a partir de la composición isotópica (de líneas meteóricas locales o/y global) denominado exceso condicionado por

la línea, se representa “Lc-exceso” cuando se utiliza Línea Meteórica Global (GMWL), y “lc-exceso” cuando se utiliza Línea Meteórica Local (LMWL). Sus valores reflejan tanto las diferencias de la fuente de agua como la complejidad total de los procesos físicos que producen agua superficial (Landwehr & Coplen, 2006).

2.1.2 Hidrogeología.

El término hidrogeología, deriva del griego, hydro, geos y logos, que se define como el tratado del agua en la tierra. De forma sencilla se puede decir que la hidrogeología estudia las aguas subterráneas, sus aspectos químicos, la circulación y su medio geológico condicionante (Martínez et al., 2006).

Profundizando un poco más, Martínez et al (2006) describe la hidrogeología como una ciencia de las aguas subterráneas englobada en las ciencias de la tierra, que busca la comprensión de las condiciones geológicas e hidrogeológicas, así como de leyes físicas que rigen su origen, la presencia, los movimientos y las propiedades de las aguas subterráneas, además se ocupa de la aplicación de estos conocimientos, de cómo el ser humano trata con este recurso hídrico subterráneo, con respecto a su prospección, captación y debida protección o gestión racional de este valioso recurso hídrico.

Los recursos de aguas subterráneas son sistemas hidrodinámicos que se van recuperando permanentemente como partes del ciclo hidrológico por ser recargados por agua de precipitación (Werner, 1996).

2.1.2.1 Acuíferos.

Una definición sencilla del acuífero es que es un medio rocoso en el cual se mueve el agua subterránea (Werner, 1996). Los acuíferos son formaciones geológicas que almacenan y transmiten el agua en sus poros o/y fisuras, lo que permite la explotación por medio de pozos obteniendo caudales suficientes para uso práctico. Los acuíferos poseen ciertas características que determinan su capacidad de almacenaje y el movimiento de sus aguas.

La capacidad del acuífero de almacenar agua está determinada por su porosidad. El concepto porosidad (o volumen de poros), se utiliza también para el volumen de grietas, que son características de rocas sedimentarias consolidadas, plutónicas y metamórficas,

por las consecuencias de procesos tectónicos, en la cual las rocas presentan redes de fisuras, en las rocas volcánicas este tipo de poros es variable; por otro lado, el volumen de huecos kársticos presentan una porosidad distinta ya que, se da a partir de pequeñas fisuras en el cual el agua va disolviendo la roca, y acaban por formarse verdaderas redes de drenaje tridimensionales (Werner, 1996; Martínez et al., 2006).

2.1.2.2 Hidrodinámica del Acuífero Las Sierras

El acuífero Las Sierras es utilizado por la población de Managua para el abastecimiento de agua, del cual es la sub cuenca central del acuífero Las Sierras la que abarca en su mayoría el área urbana de Managua (JICA, 1993).

Las Sierras de Managua al sur, ocupa gran parte del acuífero que actúa como divisoria de aguas, a altitudes superiores de 900 m.s.n.m mientras que, en partes bajas son inferiores a los 50 m.s.n.m, la recarga del acuífero se produce fundamentalmente en estas zonas de alta elevación en las montañas de Managua, donde la precipitación es considerable, y se dan las condiciones favorables para la infiltración, importante destacar que el flujo de agua se divide dentro del graben de Managua, uno se dirige a la vertiente del suroeste al océano Pacífico y el otro al noreste hacia el Lago Xolotlán, siendo este último el de relevancia para el acuífero Las Sierras (Araguás Araguás et al., 1992).

Un concepto a tener en cuenta es la piezometría, que es un lugar geométrico de los puntos que señalan la altura piezométrica de un acuífero, es decir, la cota o altura que alcanzaría el agua, y el conjunto de estos puntos se le denomina superficie piezométrica, se representa por curvas de igual valor de altura piezométrica o isopiezas (Werner, 1996; Martínez, Santos, & Castaño, 2006).

En general el nivel piezométrico del acuífero Las Sierras, se encuentra a profundidades desde 400 a 200 m.s.n.m bajo la superficie del terreno, pero a cotas próximas de 100 m.s.n.m en el terreno, el nivel piezométrico se sitúa a profundidades del orden de 30 a 70 m.s.n.m. y la profundidad del nivel piezométrico disminuye en la parte norte hasta valores menores a 50 m.s.n.m, mientras que a las proximidades del lago Xolotlán, el acuífero aparece a través de las lagunas de Tiscapa y Asososca (Araguás Araguás et al., 1992).

Los gradientes hidráulicos son, por lo tanto, muy importante en la parte central del acuífero Las Sierras donde existen diferencias topográficas notables. La dirección y velocidad de flujo subterráneo se rige estrictamente por la naturaleza geológica del medio, en el caso particular los depósitos volcánicos recientes denominados Las Sierras propician el buen drenaje subterráneo (Araguás Araguás et al., 1992).

2.1.3 Prueba no paramétrica de kruskal-Wallis.

Cuando las variables cuantitativas de estudios no cumplen los criterios de pertenencia a una distribución normal, se recurre a pruebas no paramétricas; en el que explica López Soto (2013) que para el caso de la prueba de Kruskal-Wallis, se aplica cuando se quiere comparar tres o más muestras independientes, para poblaciones cuyas distribuciones no son normales, y la hipótesis que se plantea es:

- H_0 : Las medias o medianas de los n grupos son todas iguales.
- H_1 : Hay diferencia en al menos una de las medias o medianas.

La prueba de kruskal-Wallis provee información sobre la posible igualdad de medias o medianas entre tres o más grupos. Se rechaza la hipótesis alternativa (H_1) cuando el valor de significancia es decir $P > 0.05$ y se acepta la hipótesis nula, no hay diferencias significativas, es decir las medias o medianas del grupo de datos son todas iguales; y cuando el valor de $P < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula de igualdad y se acepta la hipótesis alternativa, hay diferencias significativas entre las medias o medianas del grupo de datos, con un intervalo de confianza del 95% (López Soto, 2013).

Cuando se determina que hay diferencia significativa en la prueba de Kruskal-Wallis, a posteriori se suelen emplear las comparaciones múltiples entre los grupos de datos, para detectar en que grupos de datos esta la o las diferencias significativas, se suelen emplear la prueba de Dunn o la prueba de rangos de Tukey (López Soto, 2013).

2.1.4 Isoscape.

Las isoscape, es la representación gráfica que denotan de manera precisa la distribución espacial de los isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, muy útiles en aplicaciones hidrológicas, paleo climáticas y ecológicas (Bowen & Revenaugh, 2003).

2.2 ANTECEDENTES

Nacionales:

En 2021, Nicaragua, Barberena-Moncada, Hurtado-García y Sirias-Silvía, determinaron el origen del agua del cráter de Laguna de Tiscapa a través del empleo de trazadores isotópicos (^{18}O y ^2H) e hidroquímicos, así como sus interacciones con el agua subterránea y Lago Xolotlán, concluyendo que, hay un origen común entre el agua subterránea y Laguna de Tiscapa, indicando los isotopos que, el acuífero aporta agua al oeste del cráter, detectaron también un enriquecimiento al noreste, lo que demuestra un carácter afluyente-influente de Laguna de Tiscapa, siendo el posible factor determinante de este fenómeno, el alto fracturamiento que presenta el cono de toba y la falla Tiscapa.

En 2014, Nicaragua, Valle de Sébaco, Delgado V., evaluó las características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero del Valle de Sébaco a través del empleo de técnicas isotópicas, donde se logró observar un cambio en la dirección de flujo de las aguas subterráneas hacia la zona de descarga del acuífero; se localizó la mayor explotación del acuífero en San Isidro y en Chagüitillo; se calculó y analizó el contenido de isótopos estables (^{18}O y ^2H) en las aguas del Río Viejo y del Río Grande de Matagalpa indicando que son evaporadas, mientras que las aguas subterráneas son aguas de recarga, infiltradas de la precipitación proveniente de las montañas que rodean al valle.

En 2010, Nicaragua, Calderón y Flores, evaluaron la dinámica de la Laguna de Apoyo usando herramientas isotópicas y geoquímicas, se monitorearon parámetros fisicoquímicos y la composición isotópica (^{18}O y ^2H) de las aguas de la laguna, manantiales, pozos y de la precipitación, los datos isotópicos muestran que la evaporación es muy significativa en el balance hídrico de la laguna e identificándose una zona de descarga de la laguna al noreste (cerca de Granada), hacia el acuífero aguas abajo, en esta zona se identificaron aguas con contenido isotópico más enriquecido que el flujo regional, indicando evaporación y sugiriendo una contribución de parte de la laguna.

En 2009, Nicaragua, Rodríguez et al., efectuaron una caracterización hidrogeológica e isotópica del Lago de Nicaragua, con el propósito de evaluar las características hidrodinámicas e hidráulicas, concluyendo que las aguas subterráneas y ríos están

empobrecidas en los isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, indican que son aguas de origen meteórico que no han estado expuestas durante mucho tiempo a la acción de la evaporación y las aguas del Lago Cocibolca esta enriquecida de isotopos con valores positivos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ así mismo indican que el Lago se halla homogéneamente mezclado en profundidad.

En 2001, Nicaragua, Rozanski et al., realizan un balance isotópico del Lago de Managua, los datos isotópicos generados del Lago revelan que es un cuerpo bien mezclado durante todo el año y una composición isotópica media igual a $\delta^{18}\text{O} = 0,0 \pm 0,01\text{‰}$, además la descarga de aguas subterráneas del Lago afecta en su composición isotópica, muy presumiblemente ocurre en dirección al Lago de Nicaragua, donde existen valores altos de $\delta^{18}\text{O}$ acompañado por un exceso bajo de deuterio, lo que indica alguna contribución del Lago de Managua al acuífero Las Sierras.

En 2001 Araguás, García, Martínez, & Bedmar, busca determinar la relación entre el Lago de Managua y las aguas subterráneas de su entorno, por técnicas químicas e isotópicas, concluyeron que la evaporación del Lago provoca que este enriquecida isotópicamente con $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, y la diferencia isotópica de las aguas subterráneas de su entorno muestran que no existe ningún proceso de intrusión del Lago a las aguas subterráneas explotadas, ni tampoco existe una relación significativa entre Lago de Managua y laguna Asososca, esto se debe a que el fondo del Lago de Managua está recubierto por sedimentos colmatados que son aportados por los ríos que descargan al Lago impermeabilizando el suelo del fondo del Lago.

En 1994 Plata, Gonfiantini, & Lopez, evalúan los riesgos de contaminación de la laguna Asososca, utilizando análisis químico, isotópico (^{18}O , ^2H y ^3H) y pruebas de flujo en pozos, indican que laguna Asososca esta enriquecida isotópicamente por efecto de la evaporación, además datos históricos de precipitación demuestran que las aguas de laguna Asososca no son de origen local, sino que debe prevenir de precipitaciones de mayor altura (efecto altitud), esto explica la ausencia de tritio termonuclear, sin embargo los pozos tanto perforados y excavados no contaminados entorno a la laguna tienen valores δ agotados, estas aguas son del acuífero Las Sierras, estas diferencias isotópicas en las aguas involucradas, demuestran que no se ha producido intrusión de

agua contaminada y no se ha iniciado ningún proceso de intrusión, ni en la zona del Lago Asososca ni en otros tres sitios de bombeo ubicados muy cerca del Lago Managua.

Internacionales:

En 2020 Arellano et al., aplican un enfoque bayesiano que incorpora incertidumbres y los efectos evaporativos en la composición isotópica para determinar la elevación de recarga media (MRE por sus siglas en inglés) de agua superficial en Centroamérica, se comparó los resultados con otros métodos isotópicos que no tiene estas propiedades, concluyendo que, existen diferentes patrones de MRE para el Pacífico y el Caribe, con firmas isotópicas distintas; el Pacífico con una recarga que se produjo en elevaciones altas en relación con la elevación media de la cuenca de captación (MCE), y el Caribe tuvo una recarga que se produjo principalmente en elevaciones más bajas que el MCE.

En 2020 Sánchez-Murillo et al., realizan la primera síntesis regional de variabilidad isotópica espacio-temporal en cuatro países tropicales, Costa Rica, Nicaragua, El Salvador y Honduras, concluyeron que, hay un patrón temporal regionalizado en la composición isotópica de la lluvia, así como el transporte de humedad regido principalmente por la cuenca semicerrada del Mar Caribe, además la recarga de agua subterránea se caracterizó por recarga agotada en áreas montañosas, recarga rápida por rutas de flujo, y recarga enriquecida por el fraccionamiento secundario, agregando que excesos-d bajos sugieren una conexión clara entre agua superficial y subterránea.

En 2012, Australia, Hughes & Crawford, proponen una alternativa ecuación para definir la LMWL, normalmente se define utilizando una regresión de mínimos cuadrados ordinarios (OLSR), pero presenta diferentes problemas, la ecuación alternativa es la regresión de mínimos cuadrados ponderados por cantidad (PWLSR) que corregirá los sesgos, el método se aplicó a 288 estaciones en la base de datos GNIP ($N > 36$) y se calculó la diferencia entre las pendientes de los LMWL ($\Delta a = \text{slope}_{\text{PWLSR}} - \text{slope}_{\text{OLSR}}$) en las estaciones de Australia, teniendo como conclusión que, el uso de un PWLSR en lugar de un OLSR dará como resultado mejores LMWL y también proporciona una alternativa más robusta a la eliminación subjetiva de pequeñas cantidades de lluvia o muestras en exceso de d bajo del análisis.

2.3 HIPÓTESIS

La composición isotópica de ^{18}O y ^2H en las aguas del acuífero Las Sierras entre la Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán, son enriquecidas isotópicamente por las aguas de la Laguna de Tiscapa y no por las aguas del Lago Xolotlán.

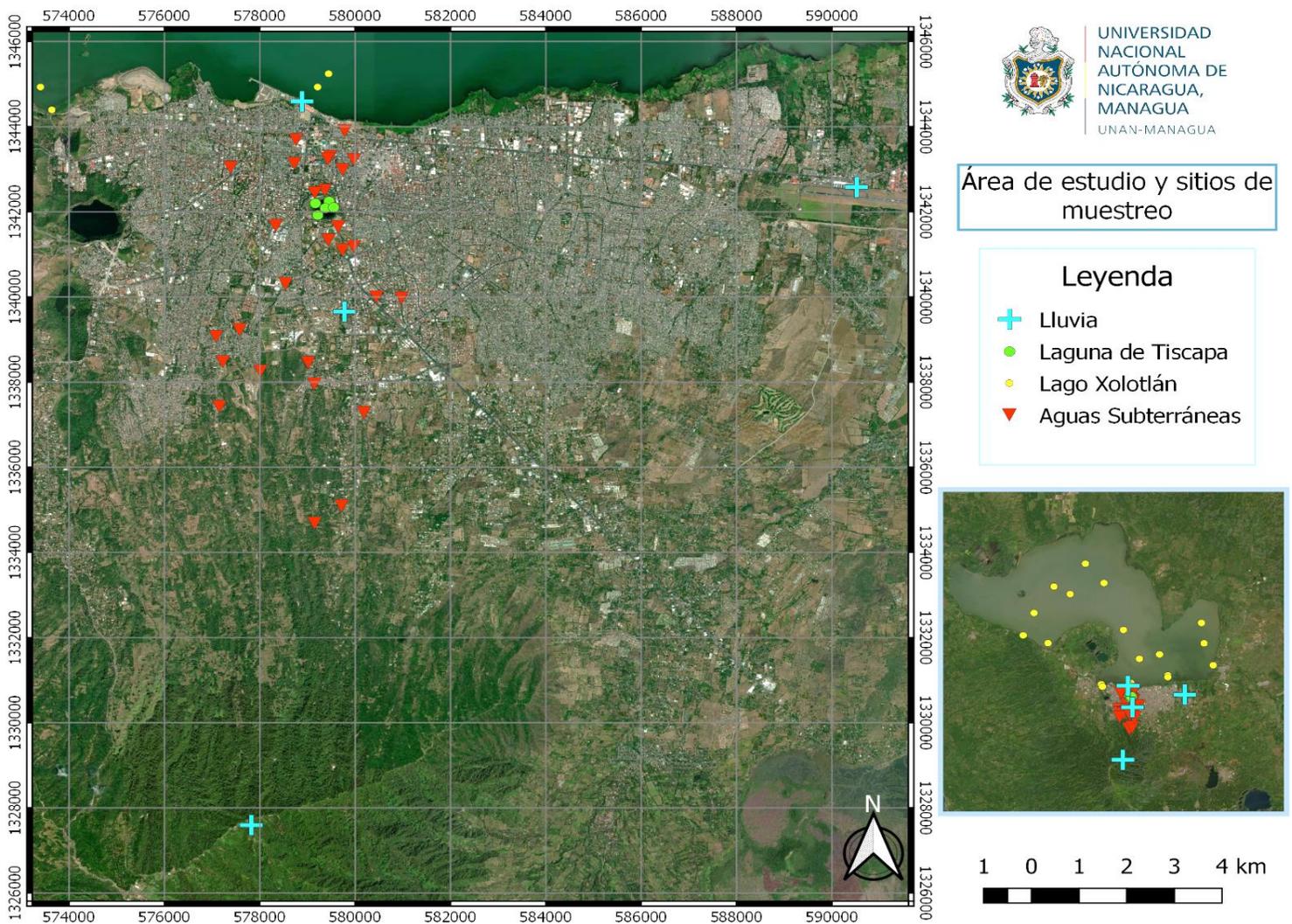
CAPÍTULO III

3.1 DISEÑO METODOLÓGICO

3.1.1 Descripción del ámbito de estudio.

La zona de estudio es el acuífero La Sierra en la zona que comprende entre la Laguna Tiscapa y Lago Xolotlán (zona entre Lagos), en la ciudad de Managua, el cual también se abarcan ambos cuerpos hídricos para determinar quién influye isotópicamente al acuífero Las Sierras en la zona entre lagos.

Figura 1. Área de estudio, y sitios de muestreo en Managua.



Fuente: Elaboración propia, en QGIS.

3.1.1.1 Zona entre Laguna Tiscapa y Lago Xolotlán.

Hidrogeológicamente la zona entre los Lagos está ubicada en la sub-área central del acuífero Las Sierras, alberga la ciudad de Managua que esta sobre una meseta baja y plana con un gradiente de 1/27 de 2,2° y, al norte de la Laguna de Tiscapa está la costa sur del Lago de Managua, hay una divisoria y un montículo de agua subterránea, las cuales son controlados en su mayoría por fallas, escarpa de falla, y por la forma de una superficie superior de capa basal impermeable en el oeste hasta el sureste (JICA, 1993).

3.1.1.2 Laguna de Tiscapa.

Laguna de Tiscapa está ubicada en el centro de la ciudad de Managua en las coordenadas UTM, norte: 1342052 y este: 579382.6; la laguna cratérica Tiscapa posee 45,6 m de profundidad con su línea de costa (51,6 m.s.n.m.) y con una superficie del espejo de agua de 0,14 km², tiene una forma aproximadamente circular y forma parte de la subcuenca II de la cuenca sur de Managua, se divide en siete microcuencas, correspondiendo a Tiscapa la II D (Freundt et al., 2010; Fiallos & Asociados – Consultores, 2004). En **Anexo 2. Área de estudio.**, **Figura 19** se aprecia imágenes de Laguna de Tiscapa.

De acuerdo a Freundt et al., (2010) Tiscapa se formó por el contacto del magma caliente con agua subterránea poco profundo, que produjo una violenta explosión de vapor, dejando un cráter volcánico, y la propia afluencia de agua subterránea formo la laguna, a esto se le denomina maar, este se formó en la parte superior de una falla de deslizamiento de rumbo noreste-suroeste lateral izquierda, que se extiende casi verticalmente alrededor de 10 km de profundidad, donde se situaba la cámara de magma de Tiscapa del cual su erupción es de tipo freatomagmatica, por ende es admisible que la falla Tiscapa actuara como una conducción de agua subterránea, con la cual el magma ascendente interactuó explosivamente.

3.1.1.3 Acuífero Las Sierras.

El acuífero Las Sierras posee una extensión aproximada de 1040 km², y se caracteriza por una estratificación compleja proveniente de distintas épocas geológicas, siendo de origen volcánica y con diferente grado de consolidación, capas porosas permeables de

flujos piroclásticas, tobas brechosas, cenizas, pómez y lapilla de granulometría media a gruesa (JICA, 1993; Araguás Araguás et al., 1992).

El acuífero Las Sierras se suele dividir en tres subsistemas de recarga o áreas hidrogeológicas: el centro, oriental y occidental. Están desarrollados en varias unidades geológicas de flujos piroclásticas, con permeabilidad mayor a 10 m/día (JICA, 1993). El área de interés en este estudio, es la zona central del acuífero Las Sierras, que alberga la ciudad de Managua, cuya extensión es aproximada de 600 km², y un espesor aproximado de 600 m.

3.1.1.4 Lago Xolotlán

El Lago Xolotlán o Lago de Managua, en las coordenadas UTM, norte 1363482.4 y este 563423; a una altitud de 39 m.s.n.m. y con un área de 1 040 km². El Lago está ubicado en la depresión nicaragüense y forma parte integral de la Cuenca del Río San Juan, donde alberga una serie de ríos tributarios (Cuenca 952) de 19 533,46 km² tiene un drenaje de 5 148, 4 km² (JICA, 1993; Rozanski et al., 2001). El Lago es relativamente somero con profundidad máxima aproximada de 25 m y profundidad media de 7,8 m. En el sector de la cuenca sur, donde está localizada la ciudad de Managua, el Lago es bastante plano y superficial, no excede los 5,0 m (Rozanski et al.,2001). En **Anexo 2. Área de estudio.**, **Figura 21** se aprecia imágenes del Lago Xolotlán.

3.1.2 Tipo de estudio.

El presente estudio es descriptivo, correlacional, estadístico, explicativo, corte transversal y cuantitativo.

Es descriptivo según Hernández Sampieri et al., (2010) porque permite profundizar el fenómeno estudiado, a través de la medición de las variables y la caracterización isotópica, de las distintas fuentes de agua que podrían aportar al acuífero Las Sierras y así, determinar la principal fuente de agua que aporta al acuífero; es correlacional debido a que se explica y cuantifica la relación entre las variables, es decir entre el contenido isotópico y el efecto estacional, o por el fraccionamiento isotópico en la Laguna Tiscapa y su conexión con las aguas subterráneas.

Se realizan análisis estadísticos descriptivo para una correcta comprensión de los resultados isotópicos, de acuerdo a Cognodata (2019), este tipo de metodología proporciona un enfoque que, confecciona un resumen de la información del que ofrecen los datos de las muestras, siendo la meta hacer síntesis de la información para arrojar precisión, sencillez, aclarar y ordenar los datos, por medio de gráficas u otro medio visual, para el presente caso se realizan análisis estadísticos como son: rangos máximos y mínimos, medias, desviaciones estándares y correlaciones lineales expresadas en sus respectivas gráficas.

Y finalmente es explicativo, ya que determina cual es la causa del enriquecimiento isotópico de las aguas del acuífero Las Sierras, en la zona entre Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán, generando así un entendimiento de este fenómeno, además la forma de llevar a cabo el estudio, es decir, por un período o por determinado rango de tiempo, se considera estudio de corte transversal, ya que los datos del estudio corresponden del 2018 al 2019.

De acuerdo a Hernández Sampieri et al., (2010) se determinó que el tipo de estudio es cuantitativo, ya que se trabaja con una hipótesis científica, y variables de investigación generadas a partir del tema, las cuales se desarrollan y se miden en el contexto del estudio por medios estadísticos y correlacionando dichas variables, estableciendo así una serie de conclusiones respecto a la hipótesis planteada.

3.1.3 Población y muestra

3.1.3.1 Población.

La población de estudio corresponde a la región central del acuífero Las Sierras, tomándose en cuenta además sus entornos hidrogeológicos, pozos que alberga la zona, así como diferentes estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo de la zona de incidencia al acuífero, del periodo de 2018-2019.

3.1.3.2 Muestra.

Las muestras del estudio corresponden a los sitios donde se realizaron las campañas de muestreos de aguas, las aguas subterráneas fueron captadas en pozos, desde el sur de Laguna de Tiscapa hasta la zona entre el Lago Xolotlán, donde ambos cuerpos

hídricos también fueron muestreados, y en lo que respecta a precipitaciones estas se colectaron en diferentes estaciones meteorológicas, ubicadas en puerto Salvador Allende (PSA), El Crucero Las Nubes, (LN), CIRA/UNAN-Managua (CIRA) y el aeropuerto internacional Augusto C. Sandino (AIACS). Los puntos de muestreo se aprecian en la **Figura 1**.

3.1.3.2.1 Criterios de inclusión.

Muestras que serán incluidas por los siguientes criterios:

- Muestras en distintos niveles de la columna de agua en Laguna de Tiscapa; a nivel superficial, intermedio y lecho de la Laguna.
- Muestras en épocas de verano e invierno en Laguna de Tiscapa, Lago Xolotlán y aguas subterráneas.
- Agua subterránea en pozos perforados en el acuífero Las Sierras que se ubican en el área de estudio (ver **Figura 1**).
- Muestras en distintos niveles de la columna de agua del Lago Xolotlán.
- Agua de precipitación en cuatro sitios de Managua, corresponden a los sitios Puerto Salvador Allende (PSA), Las Nubes el Crucero (LN) y aeropuerto internacional Augusto C. Sandino (AIACS), como acumulados mensuales, para eventos diarios solo la estación del CIRA/UNAN-Managua

3.1.3.2.2 Criterios de exclusión.

Muestras que son excluidas debido a los siguientes criterios:

- Alto contenido de sólidos suspendidos o basura disuelta en ella.
- Muestras en la zona de la desembocadura del cauce de aguas pluviales que descarga en Laguna de Tiscapa.
- Cerca del litoral de Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán.

3.2 VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN

3.2.1 Variables independientes.

- Composición isotópica de las aguas de Laguna Tiscapa.
- Composición isotópica de las aguas del Lago Xolotlán.

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

- Composición isotópica de las Aguas de precipitaciones.

3.2.2 Variables dependientes.

- Composición isotópica de las aguas del acuífero Las Sierras.

3.2.3 Operacionalización de las variables.

Tabla 1. Operacionalización de las variables.

Variables	Concepto	Indicador	Unidad de medida
Independientes			
Composición isotópica de las aguas de Laguna Tiscapa.	La composición isotópica en la Laguna de Tiscapa es sometida a procesos de evaporación, y responde a los cambios ambientales de su entorno, así como ser recargada por las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras e influirla isotópicamente.	$\delta = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \cdot 1000$ $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$	δ en ‰
Composición isotópica de las aguas del Lago Xolotlán.	La composición isotópica en Lago Xolotlán es sometida a procesos de evaporación lo que causa un enriquecimiento isotópico, y responde a los cambios ambientales de su entorno y ser influenciada isotópicamente por los ríos que aportan sus aguas al Lago.	$\delta = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \cdot 1000$ $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$	δ en ‰
Composición isotópica de las aguas de precipitaciones.	La composición isotópica en las precipitaciones está sujeta a los fenómenos meteorológicos que afectan la región de Managua, es un índice para comparar la composición isotópica observada en las aguas subterráneas y su influencia a nivel de cuenca.	$\delta = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \cdot 1000$ $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$	δ en ‰
Dependiente			

Composición isotópica de las aguas del acuífero Las Sierras

El acuífero Las Sierras en la ciudad de Managua tan solo ocupa el 22.7% de su extensión total, su composición isotópica esta influenciada por las precipitaciones en las Sierras de Managua, y experimenta un enriquecimiento isotópico notable en la zona entre Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán.

$$\delta = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \cdot 1000 \quad \delta \text{ en } \text{‰}$$
$$d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$$

Fuente: Elaboración propia.

3.3 MATERIAL Y MÉTODO

3.3.1 Materiales para recolectar información.

Los datos corresponden al proyecto mapa isotópico de Nicaragua, que coordina CIRA/UNAN-Managua desde 2016. La recopilación de información adicional fundamental se extrajo de instituciones nacionales como INETER, recolectando referencias importantes, relevantes y semejantes al tema de investigación, también se trabajó con datos históricos del Organismo Internacional para la Energía Atómica (OIEA), siendo una herramienta importante para complementar el presente estudio.

Algunos de los métodos que se utilizaron para la recolección de información fueron, los estudios de caso (nacionales e internacionales), se cuenta con la base de datos del proyecto FPI 13201804 que coordinó el Ing. Javier Barberena Moncada, del laboratorio de Hidrogeología del CIRA-UNAN-Managua.

El análisis documental fue principalmente el método para la recolección de información de esta investigación, por medios electrónicos y la web, de los cuales se recopiló con el fin de realizar una selección, valoración y evaluación de la información; además se utilizaron mapas topográficos de Managua y mapas hidrogeológicos, así como datos de precipitaciones e inventariados de pozos, cuyas fuentes corresponde a instituciones nacionales e internacionales, entre ellas el CIRA-UNAN, INETER y el OIEA.

La recolección de información por internet se buscó en páginas web fiables y oficiales como: Repositorio Institucional UNAN-Managua y www.iaea.org/es. Así como artículos

de revistas científicas que fueron muy fundamentales para recolectar la información y el enriquecimiento del tema, tales webs son:

- <https://www.researchgate.net/>
- <https://science.sciencemag.org/>
- <https://www.nature.com/>
- <https://www.elsevier.com/>

Las herramientas para recolectar información fueron principalmente software o aplicaciones de computadora, lo que facilitó la recolección de información:

- Mozilla Firefox.

El principal navegador web (libre) usado para la búsqueda de sitios webs importantes para la investigación.

- Google Earth Pro.

Utilizado para tener imágenes satelitales del área de estudio y otras zonas de interés, para comprender diferentes variables del área de estudio y la región de Nicaragua.

- Acrobat Reader DC.

Utilizado ampliamente para la lectura de archivos PDF, de los cuales fueron fuentes vitales de información bibliográfica.

3.3.2 Materiales para procesar la información.

Los materiales para procesar la información, fue por medio de un ordenador de escritorio y una laptop, de los cuales cuentan con una serie de programas o softwares de computadoras para procesar toda la información que se obtiene en la investigación bien sean para generar datos o/y dar una respuesta a estos datos:

- Microsoft Office Word 2016 y 2019.

Utilizado para procesar, y escribir la investigación realizada.

- Microsoft Office Excel 2019.

Utilizado para procesar y tratar los datos obtenidos de la investigación para obtener resultados.

- QGIS 3.14.1

Para la elaboración, edición, análisis, tratamiento, diseño de mapas, un software libre de sistemas de información geográfica.

- SigmaPlot 11.0

Para elaborar gráficos claros y precisos, así como análisis de datos, en donde se plasma el ámbito estadístico descriptivo de los datos de investigación.

3.3.3 Metodología isotópica.

A continuación, se describirá la metodología llevada a cabo en el presente estudio, por lo que se dividió en dos partes, la metodología de muestreo y la de análisis de datos isotópico, enfocado este último a la interpretación de resultados de los datos obtenidos del área de estudio. En la siguiente tabla, se presenta los materiales utilizados tanto para el muestreo, así como para el análisis de las muestras en laboratorio.

Tabla 2. *Equipos, materiales y reactivos utilizados para análisis isotópico y muestreo.*

Equipos, materiales y reactivos utilizados en análisis isotópico.		Equipos y materiales para muestreo.
Envases de polietileno de 50 mL de alta densidad.	Estándares internacionales como patrón de referencia V-SMOW2-SLAP2	Botella Van Dorn.
Viales de vidrio de 1 mL.	Agua destilada o/y desionizada.	Bomba de vacío Mityvac.
Espectroscopio láser Los Gatos Research modelo LWIA-45-EP	Tres estándares isotópicos nacionales, Laguna Tiscapa, Lago Xolotlán y Tapascalí.	Filtros Whatman de 47 mm
Jeringa Hamilton 1,2 μL .		Frascos de polietileno de alta densidad de 50 mL.
		Totalizadores Palmex, y Rain Sampler RS1.

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.1 Metodología de muestreo.

Se tomaron muestras directamente de las aguas superficiales de la Laguna de Tiscapa, luego se procede a coleccionar muestras a distintos niveles, es decir a nivel intermedio y lecho de la Laguna, esto se realiza por medio de una botella Van Dorn, tras tomar las muestras se procede a filtrarlas con una bomba de vacío Mityvac con filtros whatman de 47 mm, todas las muestras de agua tanto superficial como las de distintos niveles, son depositadas en frascos de polietileno de alta densidad de 50 mL.

Se trabajaron un total de 76 muestras de las aguas de Laguna de Tiscapa, 32 muestras en 2018 y 44 en 2019; y tomadas a distintos niveles de la columna de agua, 39 superficiales, 35 en el lecho de la Laguna y 2 niveles medios.

Las muestras de aguas subterráneas son colectadas en pozos, que previamente es necesario realizar una purga de agua de alrededor de 10 min, para evitar tomar agua estancada de la tubería del pozo, luego se colectan las muestras en frascos de polietileno de alta densidad de 50 mL, las muestras se extraen en los pozos que comprende el área de estudio, la zona entre Tiscapa y Lago Xolotlán. Se trabajaron un total de 35 muestras de aguas subterráneas que constituyen al acuífero Las Sierras, 5 corresponden al 2018, 24 son de 2019 y 6 datos históricos del 1991, 1997 y 1999.

Las muestras colectadas en el Lago Xolotlán, fueron tomadas en el lecho del Lago, por medio de una botella Van Dorn, luego las muestras son filtradas con bomba de vacío Mityvac con filtros Whatman de 47 mm, y se procede a almacenar todas las muestras en frascos de polietileno de alta densidad de 50 mL. El Lago Xolotlán se trabajó mayoritariamente con 57 muestras históricas compiladas de la OIEA que datan del 1997-1998, además, se cuentan con los datos recientes de 2018-2019 que son un total de 13 muestras. Los datos del Lago Xolotlán se aprecian en **Anexo 3. Datos isotópicos.** de la **Tabla 6.**

Las muestras de precipitaciones de acumulados mensuales son colectados en totalizadores tipo Palmex modelo Rain Sampler RS1, (el cual se puede apreciar **Anexo 3. Datos isotópicos.** de la **Figura 22**) luego las muestras son almacenadas en frascos de 50 mL de alta densidad para su análisis.

Las estaciones de muestreos de precipitaciones mensuales están ubicados en; Puerto Salvador Allende (PSA) a orillas del Lago Xolotlán a una altitud de 48 m.s.n.m, el muestreo inicio en 1/07/2018 y finalizo el 30/10/2019 con un total de N=11, y Las Nubes (LN) municipio El Crucero a una altitud de 941 m.s.n.m, el muestreo inicio en 1/08/2018 y finalizo el 30/10/2019 con un total de N= 11, y en el Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino (AIACS) a una altitud de 64 m.s.n.m, el muestreo inicio el 7/01/2018 y finalizo el 18/12/2019 con un total de N= 12.

Las muestras de eventos diarios se colectaron en CIRA/UNAN-MANAGUA a una altitud de 155 m.s.n.m, el muestreo inicio el 1/08/2018 y finalizo el 4/11/2019 con un total de N=107, las muestras de eventos diarios, también se colectaron mediante colector tipo Palmex modelo Rain Sampler RS1, estos son almacenados en frascos de 50 mL de polietileno de alta densidad. Los datos de las precipitaciones en las diferentes estaciones meteorológicas se aprecian en **Anexo 3**. Datos isotópicos. de la **Tabla 5**.

Se colectaron un total de 141 muestras de precipitación, el periodo de muestreo inicio el 1/07/2018 y finalizo en la estación de AIACS con un último registro de precipitación el 18/12/2019. El total de datos isotópicos de precipitaciones, Laguna de Tiscapa, Lago Xolotlán y aguas subterráneas dan una sumatoria en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de 322 cada uno respectivamente.

3.2.3.2 Metodología de análisis de datos isotópico.

El análisis de las muestras se realizó en CIRA/UNAN-MANAGUA, utilizando un espectroscopio láser LWIA-45-EP fabricado por "Los Gatos Research". Todos los resultados se expresan como δ definido en la **ecuación 1** como:

$$\delta = \frac{R_s - R_p}{R_p} \cdot 1000$$

δ —————> desviación isotópica dado en ‰ p —————> referencia internacional
R —————> relación isotópica de $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 1000 —————> convertir a por mil ‰
s —————> muestra

La referencia utilizada fue Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW), y los patrones nacionales utilizados son aguas de Laguna Tiscapa, Lago Xolotlán y Tapascalí. Se trabaja con una incertidumbre instrumental de $\pm 0,2$ ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y de ± 2 ‰ para $\delta^2\text{H}$.

Se aplica el método de regresión de mínimos cuadrados de precipitación ponderada para establecer la línea meteórica local (LML) del área de estudio, siguiendo la metodología propuesta de Hughes & Crawford, (2012) además, se calcula el exceso de deuterio, siguiendo la ecuación definida por Dansgaard (1964):

$$d\text{-excess} = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O} \quad \text{Ecuación 3}$$

d \longrightarrow exceso de deuterio ^2H

8 \longrightarrow pendiente de la medida de desviación del punto de datos que pasa por V-SMOW

$\delta^2\text{H}$ \longrightarrow relación isotópica de ^2H

$\delta^{18}\text{O}$ \longrightarrow relación isotópica de ^{18}O

El exceso de deuterio (d-exceso) denota abundancia relativa entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ determinada por las condiciones ambientales físicas (Dansgaard, 1964). El exceso condicionado por la línea (lc-exceso) por su parte, denota las pérdidas por evaporación a nivel local, siguiendo la ecuación y método planteado por (Landwehr & Coplen, 2006):

$$lc\text{-excess} = \delta^2\text{H} - a * \delta^{18}\text{O} - b \quad \text{Ecuación 4}$$

lc-exceso \longrightarrow Línea condicionada por el exceso

$\delta^2\text{H}$ \longrightarrow Relación isotópica de ^2H

$\delta^{18}\text{O}$ \longrightarrow Relación isotópica de ^{18}O

a \longrightarrow La pendiente de línea meteórica local (LML)

b \longrightarrow El intercepto de línea meteórica local (LML)

Se emplea un modelo de predicción espacio-temporal de isótopos de ^{18}O y ^2H , llamado isoscape, son mapas de cuadrículas de composición isotópica en las áreas terrestres, basados en puntos que se interpolaron usando modelo de elevación digital (DEM) que se agregaron a la superficie de regresión. Los DEM proporcionó un método robusto de interpolación geoestadística que explota la autocorrelación espacial de las características, estos corresponden a la ecuación de Terzer, Wassenaar, Araguás-Araguás (2013):

$$\delta^{18}\text{O} = a(\text{lat}^2) + b|\text{lat}| + c(\text{alt}) + d$$

$\delta^{18}\text{O}$ \longrightarrow Valor a predecir ^{18}O

a, b y c \longrightarrow coeficiente de regresión

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

d → intercepto de la recta

lat → latitud

alt → altitud

El modelo que se aplica es el M1 como indica Terzer, Wassenaar, Araguás-Araguás (2013), utiliza variables predictivas fijas como la latitud absoluta, latitud cuadrada y altitud, esto con el propósito de obtener las respuestas a las variables isotópicas de ^{18}O y ^2H en la precipitación, y a la vez un parámetro de interpolación para optimizar el ajuste.

CAPÍTULO IV

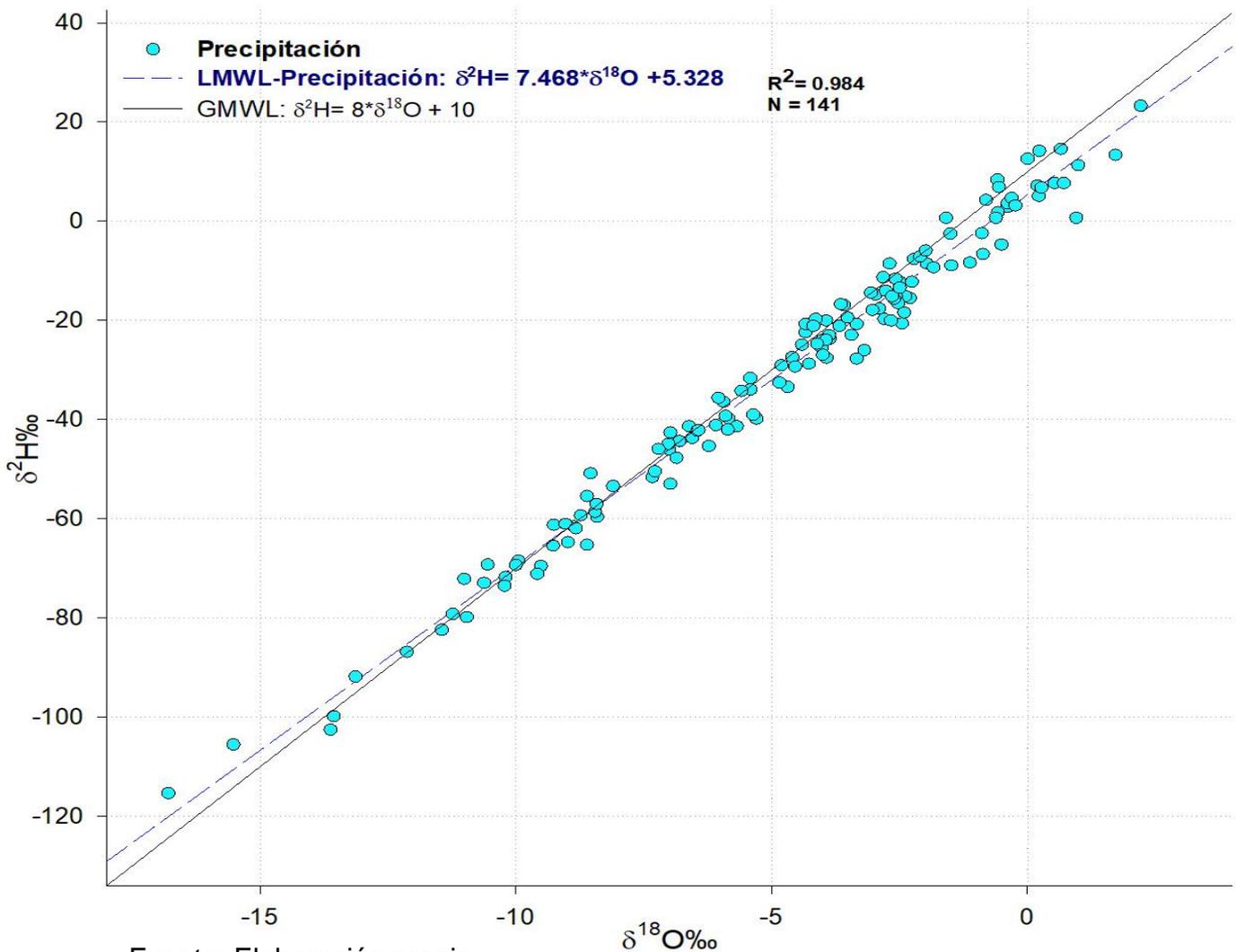
4.1 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados se presentan de acuerdo a los objetivos establecidos, lo cual abarcaría, la caracterización isotópica, de cada cuerpo hídrico involucrado que corresponde a las matrices de precipitaciones, Lago Xolotlán, Laguna de Tiscapa, y aguas subterráneas correspondiente al acuífero Las Sierras, luego la correlación isotópica de cada matriz, y por último abarcando el isoscape.

4.1.1 Caracterización isotópica.

4.1.1.1 Precipitación

Figura 2. Línea de agua meteórica local de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio, LN, PSA, AIACS y CIRA/UNAN-Managua 2018-2019.



Fuente: Elaboración propia.

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

La media isotópica de los datos en $\delta^{18}\text{O} = -4.84\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -30.82\text{‰}$, los máximos de $\delta^{18}\text{O} = 2.21\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = 23.30\text{‰}$, así como mínimos de $\delta^{18}\text{O} = -16.79\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -115.30\text{‰}$; permitieron calcular la línea de agua meteórica local (LMWL) de acuerdo a la **Ecuación 2**, obteniéndose como resultado $\delta^2\text{H} = 7.468 \cdot \delta^{18}\text{O} + 5.327$ representado en la **Figura 2**, con una pendiente inferior a 8, lo que indica condiciones secas que provoca un mayor fraccionamiento isotópico relacionado con la evaporación, y por ende a un mayor enriquecimiento (Clark & Fritz, 1997).

Las precipitaciones se caracterizaron por un marcado efecto estacional, cantidad y altitud. Es importante destacar como el efecto estacional provocó una variación isotópica en verano e invierno, esto se puede contemplar en la

Figura 3 el cual se aprecia los valores enriquecidos que corresponden a eventos de precipitaciones de noviembre a abril durante el verano, con máximos en $\delta^{18}\text{O} = -0.39\text{‰}$ en noviembre (CIRA), diciembre $\delta^{18}\text{O} = 1.72\text{‰}$ (PSA), enero $\delta^{18}\text{O} = 0.65\text{‰}$ (CIRA), febrero $\delta^{18}\text{O} = 2.21\text{‰}$ (CIRA) y abril $\delta^{18}\text{O} = 0.71\text{‰}$ (CIRA).

Por otro lado, en invierno se registran los datos empobrecidos, con valores mínimos que coinciden con los dos episodios de mayores precipitaciones, primero, en mayo $\delta^{18}\text{O} = -13.56\text{‰}$ y junio $\delta^{18}\text{O} = -7.01\text{‰}$, segundo, corresponde a septiembre $\delta^{18}\text{O} = -10\text{‰}$ y octubre $\delta^{18}\text{O} = -16.79\text{‰}$, todos estos datos corresponden a la estación del CIRA del 2018 al 2019 donde se aprecia fácilmente en la

Figura 3.

Este mismo comportamiento observado en las precipitaciones es similar al reportado por diferentes autores como Sánchez-Murillo et al., (2016) que indica que predominan dos máximos de precipitación entre mayo-junio y septiembre-octubre que resultan en valores empobrecidos isotópicamente y por Barberena Moncada et al., (2021) que explica que las precipitaciones en Managua y el Crucero variaron según la estacionalidad entre periodo lluvioso y seco.

El fenómeno de la canícula que afecta a Nicaragua y Centroamérica, es una temporada relativamente seca con mínimos pluviales que provoca una interrupción del invierno (Magaña, Amador, & Medina, 1999), esto se ve reflejado en los isótopos

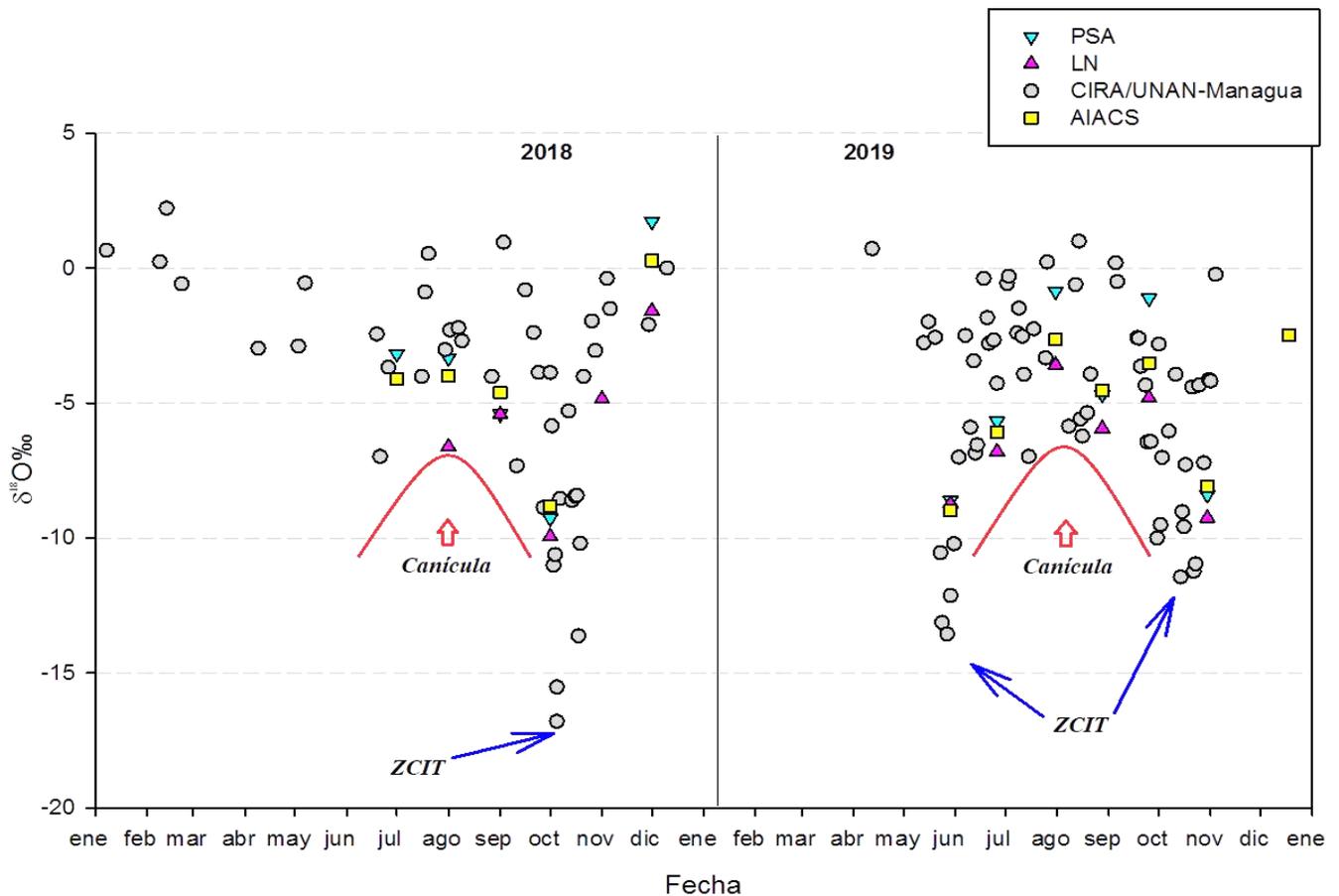
Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

de las precipitaciones, lo que causa un enriquecimiento isotópico característico durante la canícula con valores máximos en julio $\delta^{18}\text{O} = 0.53\text{‰}$ y agosto $\delta^{18}\text{O} = 0.99\text{‰}$, ambos en la estación del CIRA, dado que es la única de registro de eventos diarios.

El efecto estacional a lo largo de los años 2018 y 2019 está representado en la

Figura 3 que parte de los datos del verano en 2018, luego el primer máximo de precipitaciones en mayo-junio, continuando con la canícula en julio-agosto, y finalizando en el segundo máximo de mayor precipitación en septiembre-octubre, repitiéndose este patrón el siguiente año en 2019

Figura 3. Efecto estacional de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$, y la demostración del efecto en "W" de Sánchez-Murillo et al., (2020) en un periodo de 2018-2019.



Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia un patrón isotópico de enriquecimiento y empobrecimiento en la

Figura 3, de acuerdo Sánchez-Murillo et al., (2020), la estacionalidad climática, desde el verano hasta el invierno, se caracteriza por un patrón isotópico en forma de “W”, donde hay dos incursiones agotadas isotópicamente en invierno, ambas provocadas por el ingreso de la ZCIT en Centroamérica, y pulsos enriquecidos en julio y agosto producto de la canícula, este patrón en “W” se puede apreciar en la

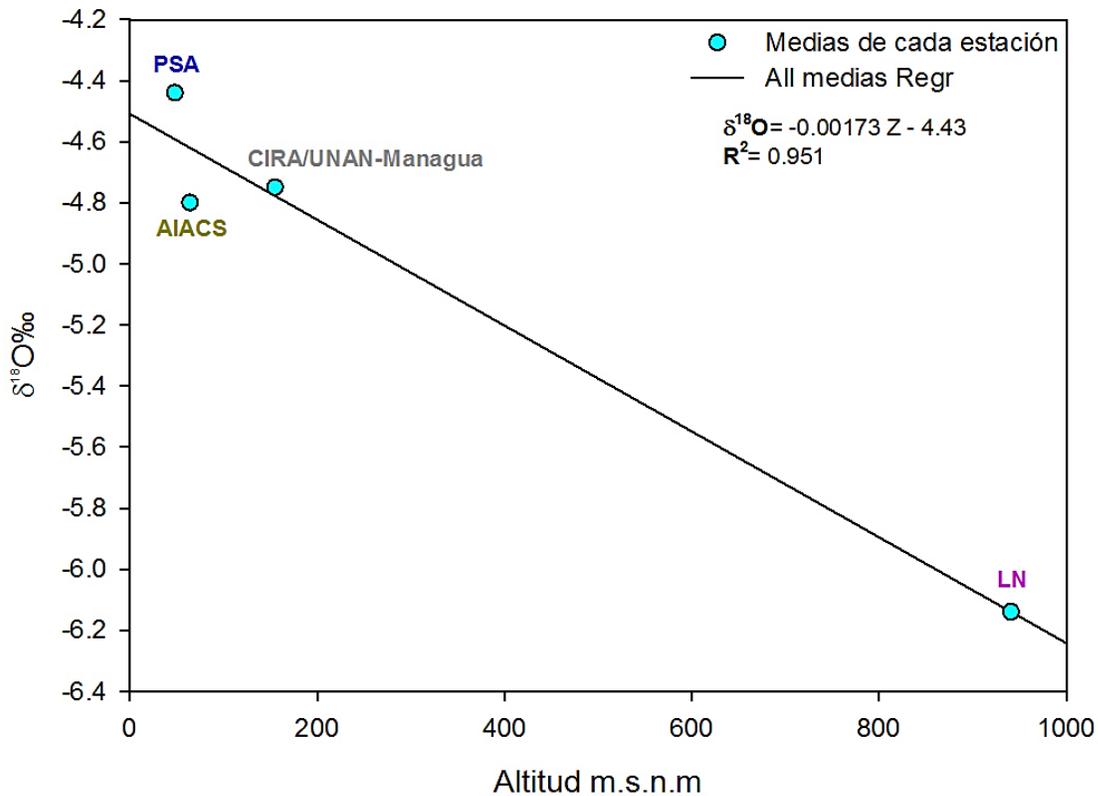
Figura 3, donde el año 2019 es más marcada esta tendencia isotópica.

De acuerdo a Dansgaard (1964) durante el período que se da la canícula ocurre el fenómeno de Rayleigh, esto es producto que las precipitaciones que se dan en condiciones de baja humedad, que causa un enriquecimiento isotópico, alcanzando un valor máximo $\delta^{18}\text{O} = 0.99\text{‰}$ provocado por el intercambio de la humedad del entorno en el recorrido de las bases de las nubes y el suelo esta evaporación que sufren suele llamarse “secundaria”, y disminuye en invierno registrando un valor mínimo en $\delta^{18}\text{O} = -16.79\text{‰}$ esto debido a la alta humedad ambiental (Sánchez-Murillo et al., 2016).

Es decir, que el efecto cantidad puede estar asociado a diferentes mecanismos atmosféricos como, la ZCIT (Sánchez-Murillo et al., 2016) y la canícula (Magaña, Amador, & Medina, 1999), coincidiendo con las ya definidos variaciones isotópicas en invierno y verano.

Los valores isotópicos más empobrecidos fueron aquellos eventos de intensas precipitaciones en mayo ($\delta^{18}\text{O} = -13.56\text{‰}$) septiembre ($\delta^{18}\text{O} = -10\text{‰}$) y octubre ($\delta^{18}\text{O} = -16.79\text{‰}$), cuando la humedad está saturada, y el d-exceso muestra cierta tendencia a estar $>10\text{‰}$ (ver **Figura 5**) lo que indica alta humedad, en tal escenario explica Sánchez-Murillo et al., (2016) que entre mayor sea el porcentaje de humedad, menor será la probabilidad de evaporación secundaria, impidiendo el enriquecimiento isotópico de las gotas al descender.

Figura 4. Efecto altitud en las precipitaciones por el promedio de las 4 estaciones pluviométricas de 2018-2019.



Fuente: Elaboración propia.

El efecto altitud es otra característica importante en las precipitaciones, esta se aprecia en la **Figura 4**, donde en cotas altas se exhiben valores empobrecidos que de acuerdo a Dansgaard (1964) es causada por las lluvias orográficas, que es el resultado por la pérdida de temperatura a medida que las masas de aire asciende sobre los relieves orográficos, este proceso de destilación orográfica, producen precipitaciones empobrecidas en comparación con zonas de baja elevación (Sánchez-Murillo et al., 2013). Este es el escenario LN zona de alta elevación con una media isotópica en $\delta^{18}\text{O} = -6.14\text{‰}$ que sufre de destilación orográfica.

Para entender el efecto altitud en el área de estudio, se parte de la diferencia isotópica la estación de LN a 941 m.s.n.m (con un promedio de $\delta^{18}\text{O} = -6.14\text{‰}$, d-exceso=10.93‰), con las de menor elevación, especialmente con PSA a 48 m.s.n.m el cual se aprecia en la **Figura 4** con una media isotópica enriquecida $\delta^{18}\text{O} = -4.44\text{‰}$ y en d-exceso= 4‰, en el que existe una diferencia entre LN y PSA de -1.74‰ en

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

$\delta^{18}\text{O}$ y en d-exceso= 6.93‰, esto se debe a la poca elevación en PSA, y por la posible influencia de las aguas evaporadas provenientes del Lago Xolotlán.

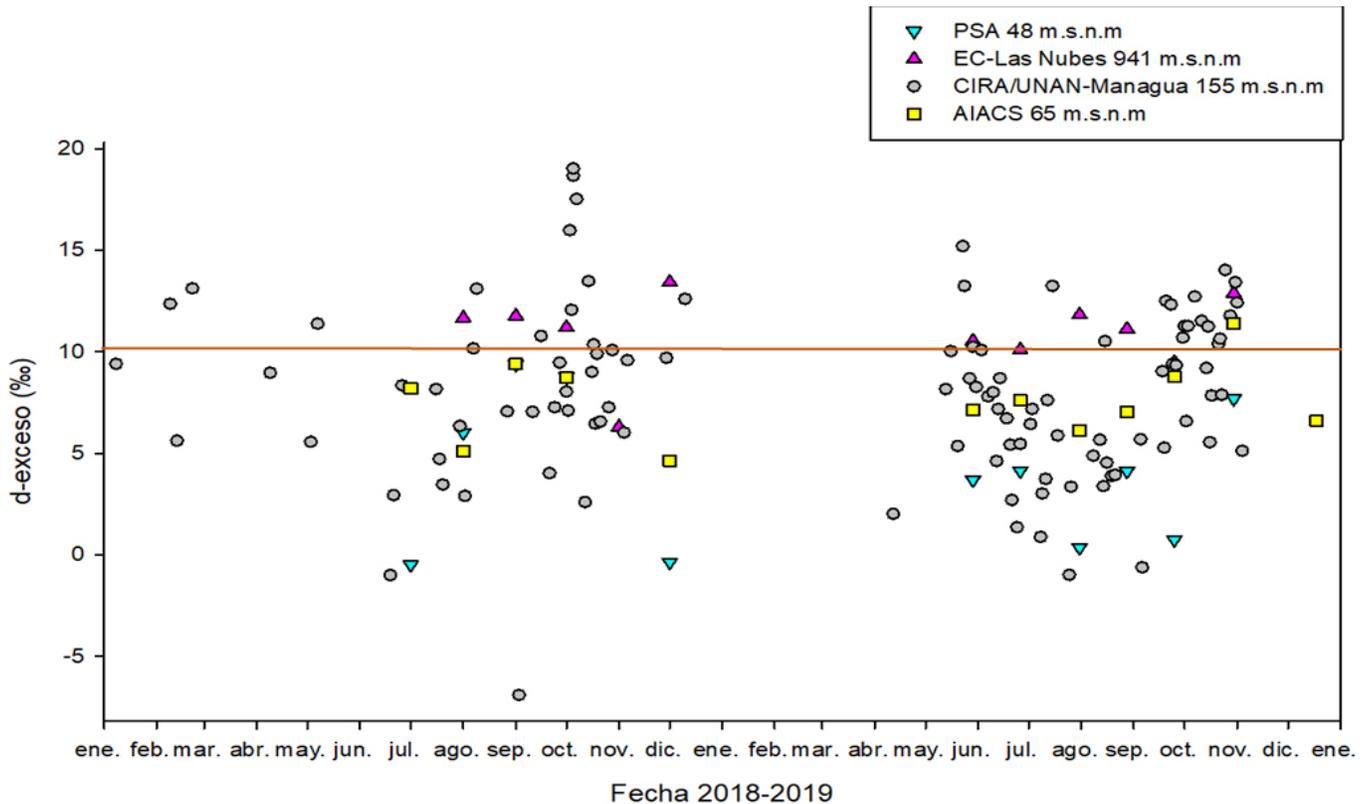
La cercanía en los datos en $\delta^{18}\text{O}$ de las estaciones de PSA= -4.44‰, AIACS= -4.80‰ y CIRA= -4.75‰ en la **Figura 4**, se debe a dos factores, primero, sus elevaciones no difieren sustancialmente una de otra, como se aprecia en la gráfica, y segundo, las estaciones son afectadas por las aguas evaporadas del Lago Xolotlán, esto se ve reflejado en la composición isotópica en las precipitaciones, dada su proximidad con el Lago, siendo los procesos de lluvias convectivas las primeras en precipitarse, y las que darían estos valores característicos en la zona.

Expone Barberena Moncada (2019) que la humedad del Caribe Norte, son las únicas que atraviesan el Lago Xolotlán, siendo las precipitaciones en Managua en su mayoría humedad proveniente del mar Caribe, a su vez (Sánchez-Murillo et al., 2016, 2017) indica que el transporte de humedad en las masas de aire, que viajan a través de las tierras bajas del Caribe son más enriquecidas isotópicamente; se atribuye en este caso, a las precipitaciones enriquecidas de Managua, lo que se ve reflejado en las estaciones de PSA= -4.44‰, AIACS= -4.80‰ y CIRA= -4.75‰ en la **Figura 4**.

Un dato interesante fue el efecto orográfico sobre las precipitaciones en el área de estudio con un valor estimado de $-1.73\text{‰ } \delta^{18}\text{O km}^{-1}$ por elevación, en cambio Sánchez-Murillo et al., (2020) han reportado un valor en orden de $-1.0\text{‰ } \delta^{18}\text{O km}^{-1}$ por elevación, para Centroamérica en la región del Pacífico.

El d-exceso en cada estación de muestreo se graficó en función del tiempo para el periodo de estudio (2018-2019) el cual se aprecia en la **Figura 5** lo que permitió analizar el efecto estacional y de cantidad. De acuerdo a Dapeña et al., (2010), los valores d-exceso $>10\text{‰}$ indican zonas donde la evapotranspiración es considerablemente alta, y se producen precipitaciones a partir de condensación de vapores reciclados; mientras que los valores entre 0‰ y 10‰ indican procesos de evaporación; y los valores d-exceso $<0\text{‰}$ indican procesos de fraccionamiento cinético.

Figura 5. *d*-exceso en cada estación de muestreo en función del tiempo de estudio, 2018 al 2019.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica del *d*-exceso de la **Figura 5**, la línea naranja, señala el punto de equilibrio (Dansgaard, 1964). El *d*-exceso ayuda a comprender con más detenimiento los efectos estacionales y de cantidad, en el cual solo el 4.96% de los datos son *d*-exceso $<0\text{‰}$, el 32.62% es $>10\text{‰}$, y el 62.41% de datos esta entre 0-10‰, lo que indica que el *d*-exceso es dominado principalmente por la evaporación.

El *d*-exceso también muestra un efecto estacional bien marcado en la **Figura 5** que sustenta lo antes planteado con $\delta^{18}\text{O}$ en la

Figura 3, por ello se evaluó cada una de las estaciones meteorológicas con respecto a la composición isotópica y en *d*-exceso. Partiendo de LN se determinó un efecto estacional en verano con máximos $\delta^{18}\text{O} = -1.59\text{‰}$ y en *d*-exceso = 13.42‰, durante la canícula existen máximos de $\delta^{18}\text{O} = -3.59\text{‰}$ y en *d*-exceso = 11.82‰, y en invierno con mínimos $\delta^{18}\text{O} = -9.26\text{‰}$ y en *d*-exceso = 12.88‰, los valores en *d*-

exceso indica que, las precipitaciones en esta zona son dominadas por vapores reciclados y alta humedad, lo que encaja debido a las lluvias orográficas que sufre el Crucero.

Hay que destacar que en dos meses en LN, se registró valores d-exceso que indican procesos de evaporación de 6.3‰ y 9.48‰ (Dapeña et al., 2010), corresponden a noviembre 2018 y septiembre 2019 respectivamente, el primer valor (d-exceso= 6.3‰) puede deberse al inicio del verano, disminuyen los volúmenes de precipitaciones y aumentan las temperaturas, y en el caso de septiembre, inicia el segundo evento de máximas precipitaciones por ello el valor cercano a 10‰ en d-exceso.

El efecto estacional para la estación de CIRA, con máximos en verano de $\delta^{18}\text{O}= 2.21\text{‰}$ y en d-exceso= 5.62‰, durante la canícula con máximos de $\delta^{18}\text{O}= 0.99\text{‰}$ y en d-exceso= 3.38‰ y mínimos en invierno de $\delta^{18}\text{O}= -16.79\text{‰}$ y en d-exceso= 19.02‰, debido a que el CIRA es la única estación de eventos diarios esto se puede apreciar en la **Figura 5**, posee mayor número de datos y se aprecian todas las variaciones isotópicas estacionales puntuales, enriquecidos en verano y empobrecidos en invierno y en la canícula (Magaña, Amador, & Medina, 1999), enriquece isotópicamente las precipitaciones en este periodo, de julio a agosto como ha sido expuesto por (Sánchez-Murillo et al., 2017, 2020).

Se destacan los meses de octubre con valores promedios en d-exceso de 10.88‰ (n=16 en 2018) y 10.35‰ (n=15, en 2019), meses donde más se registraron datos de lluvias consecutivas, en la estación del CIRA de eventos diarios, con valores en d-exceso>10‰ sobre la línea de equilibrio en la **Figura 5**, indica que estas precipitaciones fueron mayoritariamente originadas con condiciones de alta humedad, lo que parece lógico de acuerdo con el segundo periodo de intensas lluvias y el paso de ZCIT (Sánchez-Murillo et al., 2016).

El efecto estacional para la estación de PSA, con máximos en verano $\delta^{18}\text{O}= 1.72\text{‰}$ y en d-exceso= -0.36‰, durante la canícula con máximos $\delta^{18}\text{O}= -0.87\text{‰}$ y en d-exceso= 0.36‰ y mínimos en invierno $\delta^{18}\text{O}= -9.27\text{‰}$ y en d-exceso= 8.76‰,

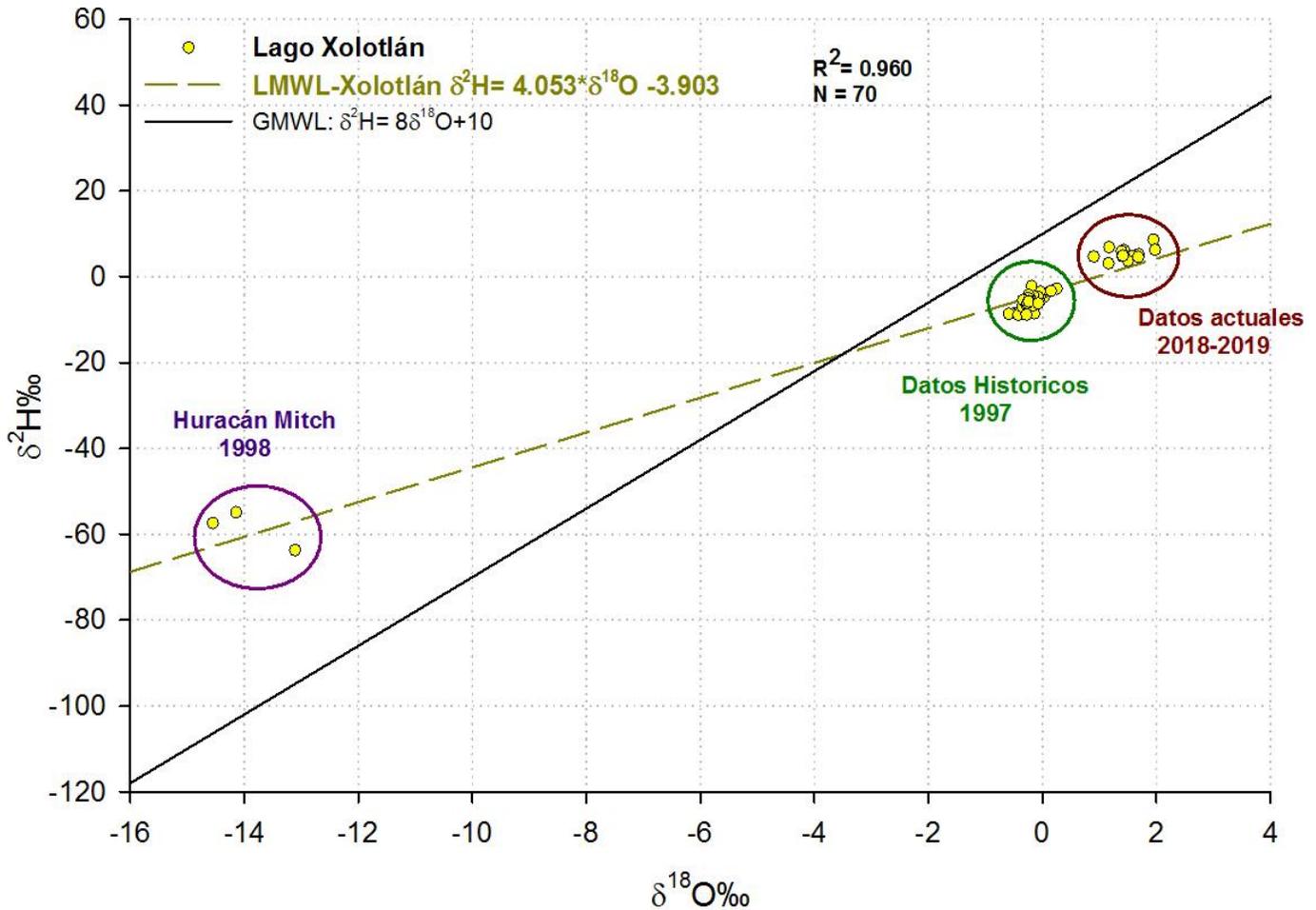
Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

se aprecia una clara variación entre verano e invierno, además PSA, es la que está más próxima al Lago Xolotlán, bien se aprecia en el área de estudio en la **Figura 1**, por lo que presenta fraccionamiento cinético con valores en d-exceso= -0.48‰ y -0.36‰ en julio y diciembre 2018 respectivamente, y en julio 2019 d-exceso= 0.36‰ donde dichos valores corresponde a eventos de poca humedad durante la canícula, y el verano. (Magaña, Amador, & Medina, 1999).

En AIACS también se puede ver los patrones estacionales, con máximos en verano $\delta^{18}\text{O} = 0.27\text{‰}$ y en d-exceso= 4.64‰ , durante la canícula con máximos $\delta^{18}\text{O} = -2.65\text{‰}$ y en d-exceso= 6.1‰ y mínimos en invierno $\delta^{18}\text{O} = -8.98\text{‰}$ y en d-exceso= 7.14‰ , lo que muestra que sigue los patrones locales como PSA y CIRA, influencias por las aguas evaporadas de Xolotlán.

4.1.1.2 Lago Xolotlán

Figura 6. Línea de evaporación del Lago Xolotlán 1997-1998 y 2018-2019.



Fuente: Elaboración propia.

La media isotópica de los datos es $\delta^{18}\text{O} = -0.416\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -5.588\text{‰}$, con máximos de $\delta^{18}\text{O} = 1.98\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = 8.60\text{‰}$; así como mínimos de $\delta^{18}\text{O} = -14.55\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -63.7\text{‰}$, hay que mencionar que estos valores mínimos son causados por eventos de precipitaciones muy extremas señalados en un círculo morado en la **Figura 6**, pero los mínimos en un entorno normal son de $\delta^{18}\text{O} = -3.63\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -31.3\text{‰}$.

Los datos permitieron calcular la línea de evaporación de acuerdo a la **Ecuación 2**, obteniéndose $\delta^2\text{H} = 4.053\delta^{18}\text{O} - 3.903\text{‰}$ el cual se aprecia en la **Figura 6**, con una pendiente muy inferior a 8, esto se debe a que es un cuerpo de agua superficial que es afectado por la evaporación produciendo fraccionamiento isotópico,

causando que las moléculas en isótopos pesados aumentan en los Lagos (^{18}O y ^2H) y sus concentraciones sea más positivas (Araguás et al., 2001).

Lago Xolotlán se ve afectado por los cambios estacionales de verano e invierno, en el que se registran los valores más enriquecidos en verano, $\delta^{18}\text{O} = -0.19\text{‰}$ y en d-exceso = -3.88‰ , y en invierno valores empobrecidos $\delta^{18}\text{O} = -0.54\text{‰}$ y en d-exceso = -1.36‰ , siempre mostro un carácter negativo en d-exceso lo que indica fraccionamiento cinético, y a pesar del cambio estacional, los valores isotópicos son enriquecidos, tal como plantea Rozanski et al., (2001) que la principal característica del Lago son sus aguas altamente enriquecidas.

Por otro lado, el exceso condicionado de la línea (lc-exceso) ofreció mayor comprensión del efecto estacional en el Lago, ya que de acuerdo Landwehr & Coplen (2006) el lc-exceso refleja las diferencias de las fuentes de agua, como la complejidad total de los procesos físicos que se producen en aguas superficiales, donde valores $<0\text{‰}$ indican procesos de fraccionamiento cinético. El lc-exceso mostro resultados más acorde a la estación, en verano negativo -0.74‰ , relacionada con condiciones de evaporación más intensas y, en invierno positivo 0.41‰ , y se debe a que según Esquivel-Hernández (2018) es en respuesta a la entrada de las precipitaciones.

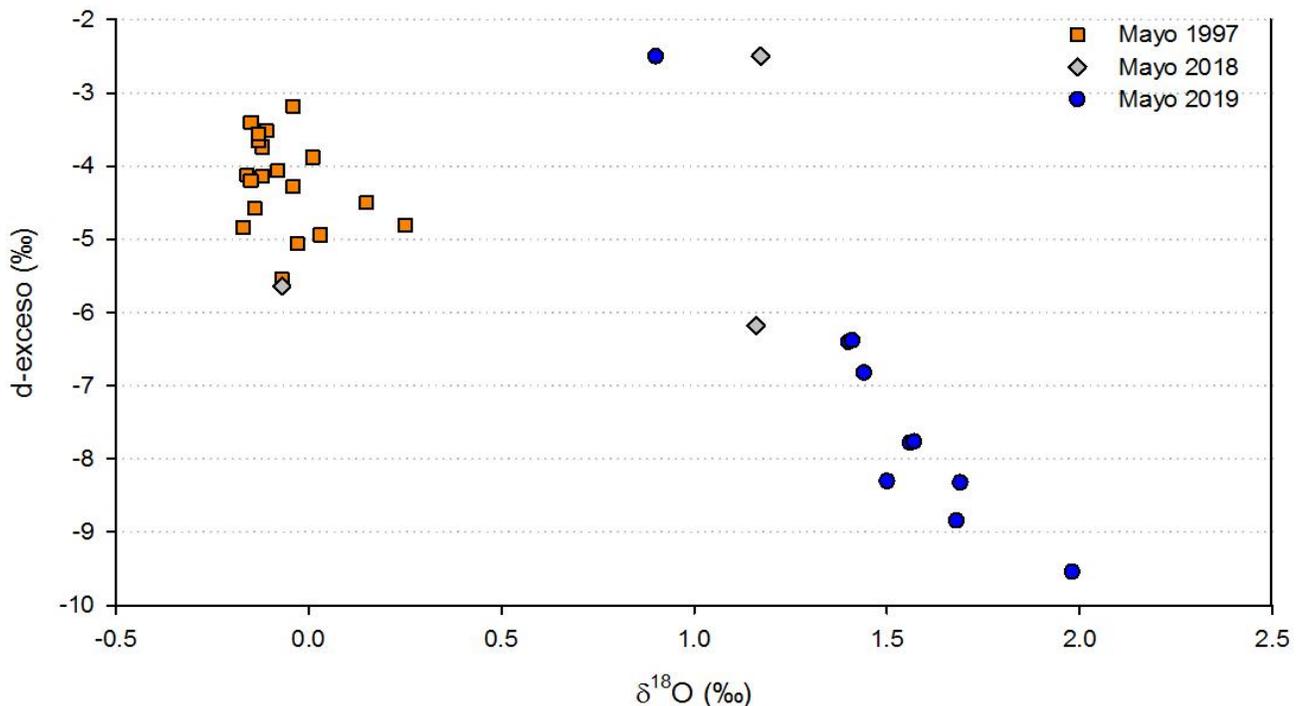
La media total de lc-exceso = -0.0764‰ ($n=67$) aun muestra de fraccionamiento cinético, lo que sustenta los resultados anteriores, siendo la principal característica del Lago Xolotlán sus enriquecidos valores isotópicos tal como planteo (Araguás et al., 2001).

Importante destacar que los datos isotópicos van empobreciendo a medida que avanza el invierno, por ende, los datos de mayo se presentan positivos a pesar de ya iniciado el invierno, con un promedio en $\delta^{18}\text{O} = 0.48\text{‰}$ ($n=35$), esta misma observación se ha visto antes por Rozanski et al., (2001) explica que puede deberse a la considerable extensión del Lago. Este comportamiento isotópico en mayo, podría señalar que el aporte de las aguas superficiales (ríos, escorrentías, cauces)

no es suficiente para provocar un cambio significativo que ocasione un empobrecimiento isotópico en las aguas del Lago a corto plazo.

Sin embargo a largo plazo, finalizando el invierno, el empobrecimiento isotópico ya es apreciable, Araguás et al., (2001) menciona que los ríos aportan valores isotópicamente agotados al Lago Xolotlán, a su vez sufren de empobrecimiento isotópico durante los periodos lluviosos, lo que guarda relación con el efecto estacional, por lo que los ríos tienen valores más negativos que recargar e influir sobre el Lago; tal como se puede observar en agosto y noviembre, que alcanzo promedios mínimos en $\delta^{18}\text{O} = -0.33\text{‰}$ (n=4) y $\delta^{18}\text{O} = -0.24\text{‰}$ (n=22) respectivamente, atribuyéndose a que finaliza el segundo periodo de intensas precipitaciones, por lo que es en este lapso, cuando las aguas del Xolotlán son más negativas en $\delta^{18}\text{O}$.

Figura 7. Variabilidad del d-exceso vs $\delta^{18}\text{O}$ en Lago Xolotlán.

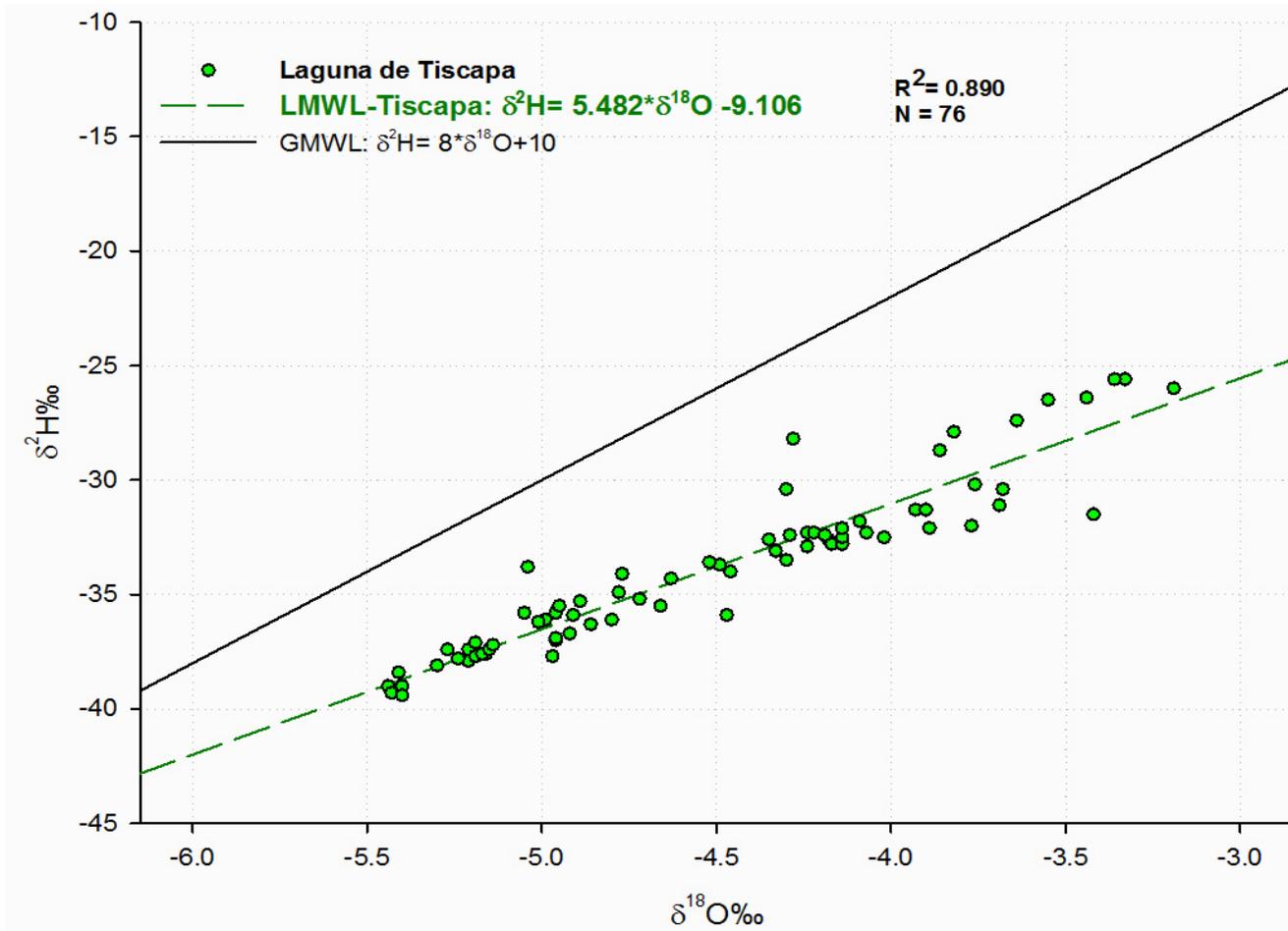


muestran las aguas de Xolotlán más enriquecidas $\delta^{18}\text{O} = 1.33\text{‰}$ (n=13), por lo que existe una diferencia isotópica de $+1.44\text{‰}$, en el que se distingue fácilmente esta desigualdad en la **Figura 7** pero solo para el mes de mayo. Esta diferencia isotópica, pone de manifiesto las fluctuaciones de las condiciones climáticas locales.

En la **Figura 7** el d-exceso siempre mostro fraccionamiento cinético, experimento variación sobre todo en 2019, esto marca una vez más, las diferencias entre las fechas que, son las condiciones climáticas entorno y del propio Lago Xolotlán.

4.1.1.3 Laguna de Tiscapa

Figura 8. Línea de evaporación de Laguna de Tiscapa 2018-2019.



Fuente: Elaboración propia.

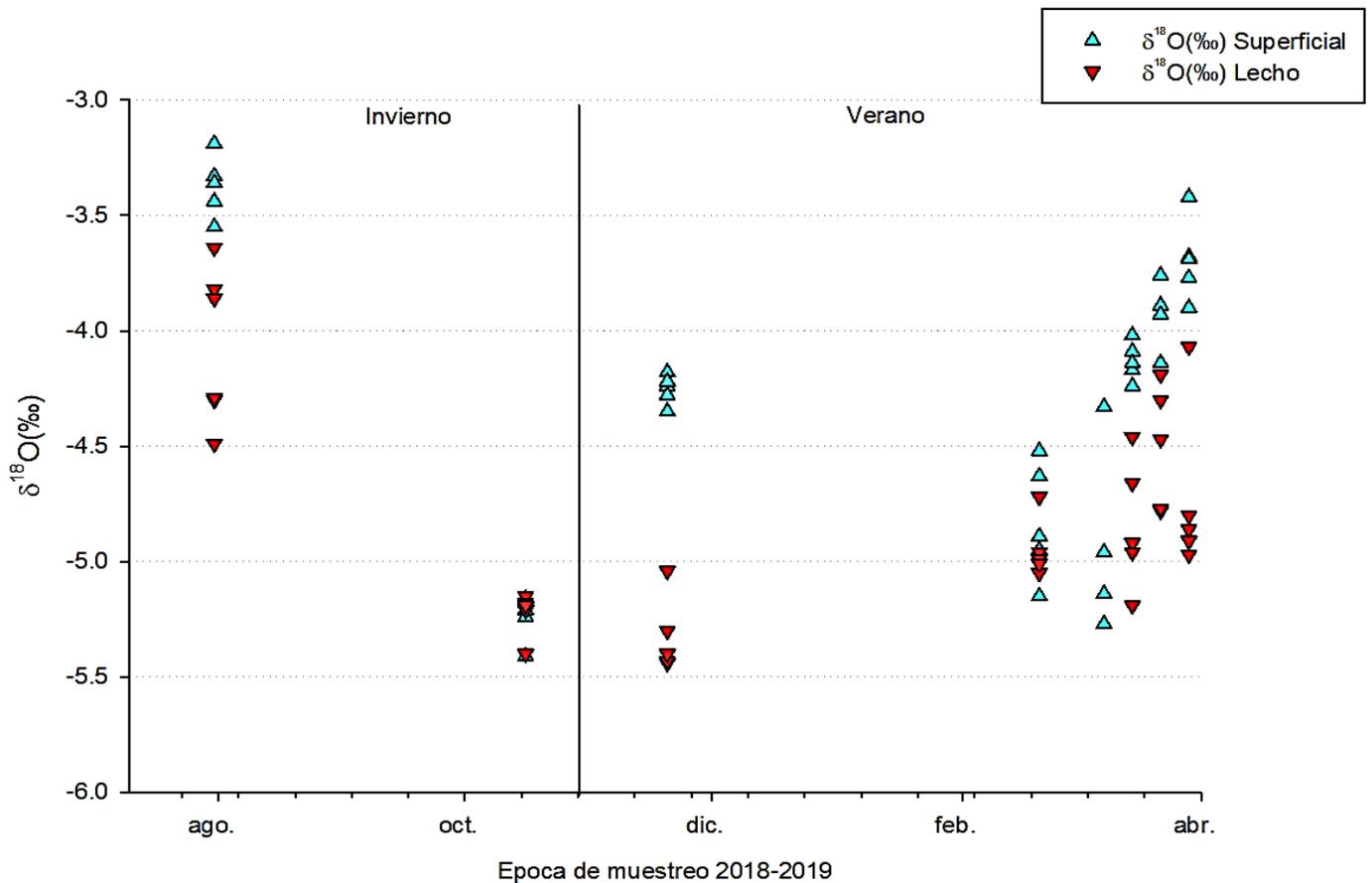
Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

La media isotópica de los datos en $\delta^{18}\text{O} = -4,53\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -33,96\text{‰}$, con valores máximos de $\delta^{18}\text{O} = -3,19\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -25,60\text{‰}$, así como mínimos de $\delta^{18}\text{O} = -5,44\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -39,40\text{‰}$; los datos permitieron calcular la línea de evaporación para Tiscapa de acuerdo a la **Ecuación 2**, obteniéndose $\delta^2\text{H} = 5.482 \cdot \delta^{18}\text{O} - 9.106$ que se aprecia en la **Figura 8**, con una pendiente inferior a 8 lo que indica procesos de evaporación, esto producto del fraccionamiento isotópico que se produce en la Laguna por ser un cuerpo de agua que se encuentra expuesto a luz solar, este fraccionamiento hace que los valores isotópicos sean más enriquecidos (Clark & Fritz, 1997).

Dado que Laguna de Tiscapa posee menor área de exposición solar que el Lago Xolotlán, provoca que su enriquecimiento isotópico sea inferior en comparación del Lago Xolotlán. A su vez las principales características de la Laguna de Tiscapa fueron el efecto estacional y la variación isotópica en la columna de agua.

Partiendo del efecto estacional, la Laguna de Tiscapa sigue un patrón, enriquecido en verano con un promedio de $\delta^{18}\text{O} = -4.55\text{‰}$ y en invierno empobrecido $\delta^{18}\text{O} = -5.22\text{‰}$ y el mes de julio estuvo presente el efecto canicular, con valores positivos $\delta^{18}\text{O} = -3.75\text{‰}$ luego se registró los valores empobrecidos en octubre, tal como se demostrará en las **Figura 9** y **Figura 11**.

Figura 9. Variación de $\delta^{18}\text{O}$ por efecto estacional y diferencia isotópica a nivel superficial y lecho de las aguas de Laguna de Tiscapa 2018-2019.



Fuente: Elaboración propia.

La composición isotópica se graficó de acuerdo a la columna de agua y a la variación estacional, en el que se observa en la **Figura 9** una tendencia, y es que las muestras superficiales están enriquecidas isotópicamente, con una media en $\delta^{18}\text{O} = -4.29\text{‰}$ ($n=39$), con respecto a las del lecho, que muestran un empobrecimiento isotópico en $\delta^{18}\text{O} = -4.79\text{‰}$ ($n=37$), por lo que existe una diferencia isotópica entre el lecho y las aguas superficiales de Tiscapa en $\delta^{18}\text{O} = -0.5\text{‰}$, un valor ciertamente inferior al reportado por Barberena Moncada et al., (2021) en el que estableció una diferencia de $\delta^{18}\text{O} = -1\text{‰}$.

La diferencia isotópica en la columna de agua, varía por cada mes esto se puede apreciar en la **Figura 9**, en el que ciertamente existe una influencia por las

precipitaciones (efecto cantidad) y de las aguas subterráneas que recargan a Laguna de Tiscapa (Fiallos & Asociados – Consultores, 2004).

El mes de octubre de la **Figura 9** presento una diferencia isotópica mínima entre el lecho y la superficie de 0.01‰ por la mezcla de sus aguas, a causa del invierno en dicho mes (precipitaciones promedio en octubre $\delta^{18}\text{O} = -7.90\text{‰}$, $n=31$) en el cual existe un aporte directo por el cauce pluvial que desemboca en la Laguna, el caudal del cauce evidentemente incrementa con el invierno, lo que se traduce a un empobrecimiento isotópico en Laguna de Tiscapa de un promedio en $\delta^{18}\text{O} = -5.22\text{‰}$ ($n=11$), tal afirmación la sostiene también Barberena Moncada et al., (2021) explica que, Tiscapa varía entre periodo donde los valores más agotados son provocados por intensas precipitaciones, debido al aporte de escorrentía que recibe la Laguna por el cauce pluvial.

La canícula ejerció influencia sobre las aguas superficiales de la Laguna de Tiscapa, enriqueciéndola isotópicamente en $\delta^{18}\text{O} = -3.37\text{‰}$ ($n=5$) en el mes de julio, siendo las aguas superficiales las más afectadas, puede deberse a que siguen típicamente los cambios de temperatura local o regional (Rozanski, Froehlich, & Mook, 2002) es decir, las aguas de Laguna de Tiscapa podría responder a los cambios ambientales de su entorno, cuando existen procesos de evaporación como fue el caso de julio (ver **Figura 9**) durante la canícula y bien podría ser durante el verano. La diferencia isotópica en la columna de agua para el mes de julio fue de 0.7‰ .

El mes de noviembre se registró la mayor diferencia isotópica en la columna de agua ($\delta^{18}\text{O} = 1.07\text{‰}$), fácilmente se distingue en la **Figura 9**, seguido de marzo ($\delta^{18}\text{O} = 0.54\text{‰}$), esto indica que hay aportes de aguas subterráneas por parte del acuífero Las Sierras en la Laguna, dicha recarga ya se ha afirmado (Barberena Moncada et al., 2021; Fiallos & Asociados – Consultores, 2004).

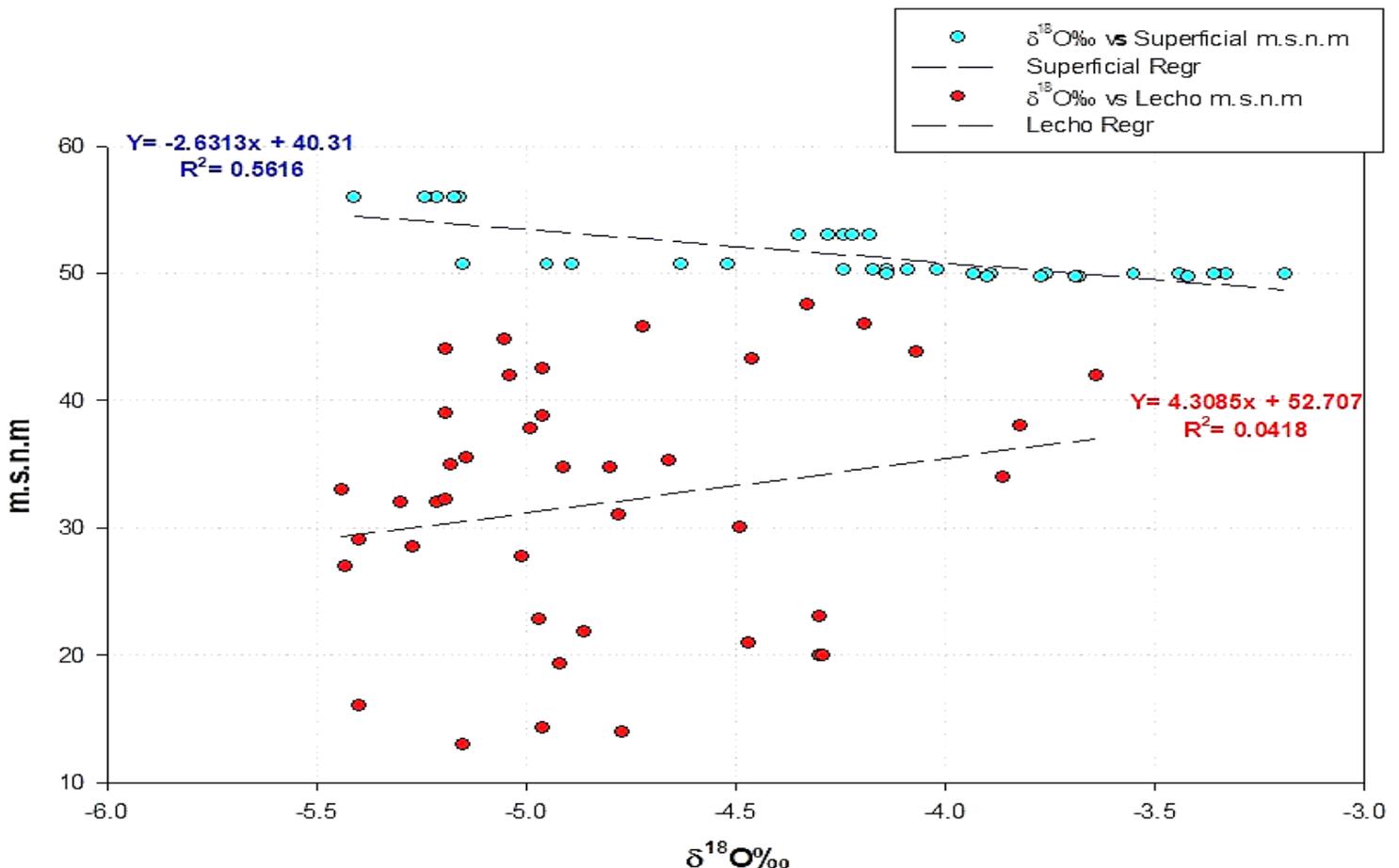
La recarga de las aguas subterráneas a la Laguna de Tiscapa impiden el enriquecimiento isotópico en las aguas del lecho, por lo tanto, en noviembre ($\delta^{18}\text{O} = -5.32\text{‰}$) y marzo ($\delta^{18}\text{O} = -4.68\text{‰}$) se registraron estos valores empobrecidos en el

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

lecho, al igual que en febrero alcanzo valores negativos importantes en el lecho ($\delta^{18}\text{O}=-4.94\text{‰}$), aunque la diferencia con las aguas superficiales fue poca 0.12‰ , por lo que, en noviembre, febrero y marzo, supondrían periodos de recarga de aguas subterráneas en la Laguna.

Para mayor apreciación de los resultados en la columna de agua de Tiscapa se graficó la composición isotópica en $\delta^{18}\text{O}$ de acuerdo a la profundidad de muestreo respecto a m.s.n.m en la **Figura 10**, el que los valores más enriquecidos suelen estar en las aguas superficiales de la Laguna ($\delta^{18}\text{O}= -4.29\text{‰}$) y los empobrecidos en el lecho ($\delta^{18}\text{O}= -4.79\text{‰}$).

Figura 10. Variación isotópica en $\delta^{18}\text{O}$ con respecto la profundidad del muestreo.



Fuente: Elaboración propia.

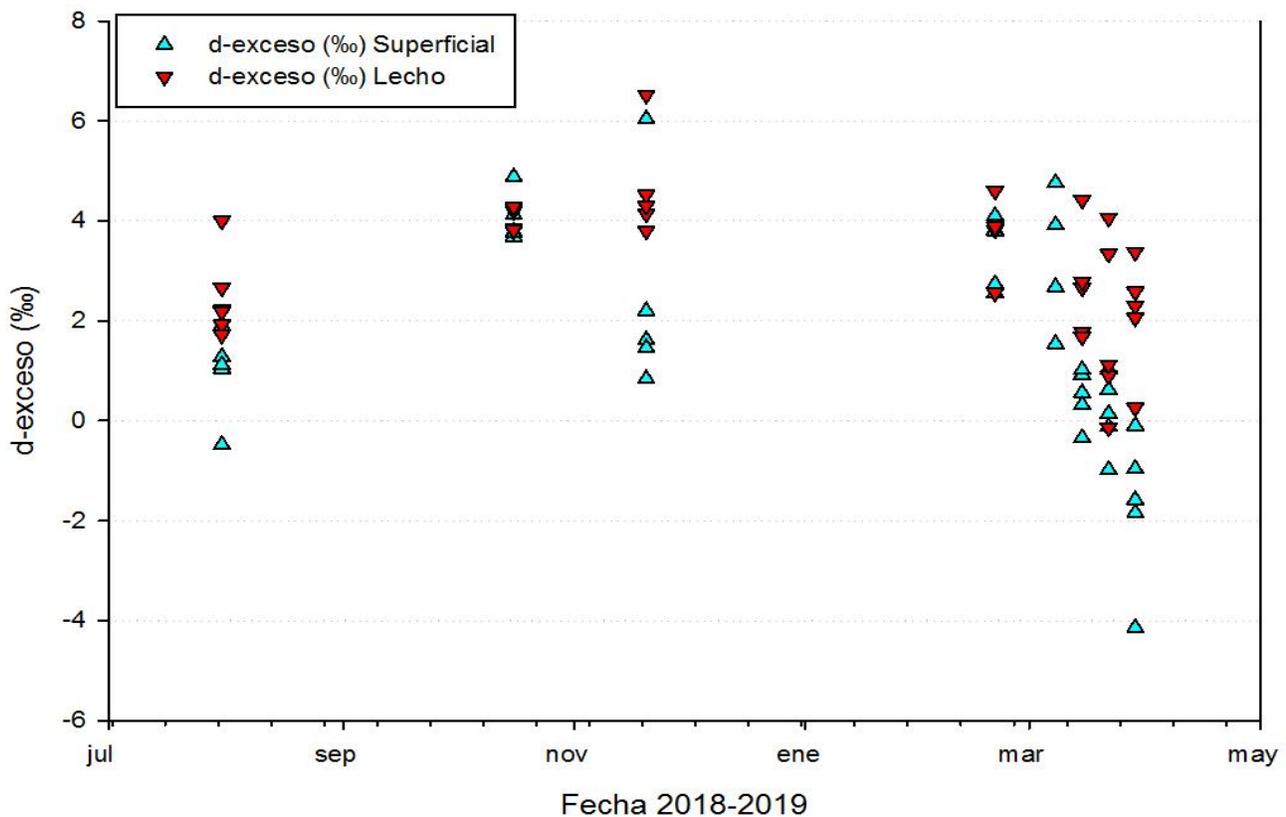
La variación que se aprecia en las aguas superficiales de la **Figura 10** se debe al efecto estacional, donde julio ($\delta^{18}\text{O}= -3.37\text{‰}$) marco los valores enriquecidos en

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

la superficie con un promedio en el nivel del agua de 50 m.s.n.m ($n=6$), y octubre los valores más empobrecidos ($\delta^{18}\text{O} = -5.22\text{‰}$) y un aumento promedio en el nivel del agua en la Laguna de 56 m.s.n.m ($n=5$), esto se debe al segundo evento de mayores precipitaciones que afecta a la Laguna debido al cauce que desemboca en ella lo que provocó este aumento en el nivel de sus aguas. La variabilidad en la composición isotópica en las aguas del lecho de Tiscapa se debe a la recarga por aguas subterráneas y a la mezcla en periodo de intensas precipitaciones.

Por otro lado, el d-exceso muestra una variación en la columna de agua el cual se aprecia en la **Figura 11**, en la superficie con una media en d-exceso = 1.58‰ , y en el lecho d-exceso = 3.07‰ , lo que da lugar a una diferencia de 1.49‰ . El d-exceso, sigue el mismo comportamiento en la variación por mes como con $\delta^{18}\text{O}$.

Figura 11. Variación en d-exceso por efecto estacional y la diferencia a nivel superficial y lecho de las aguas de Laguna de Tiscapa 2018-2019.



Fuente: Elaboración propia

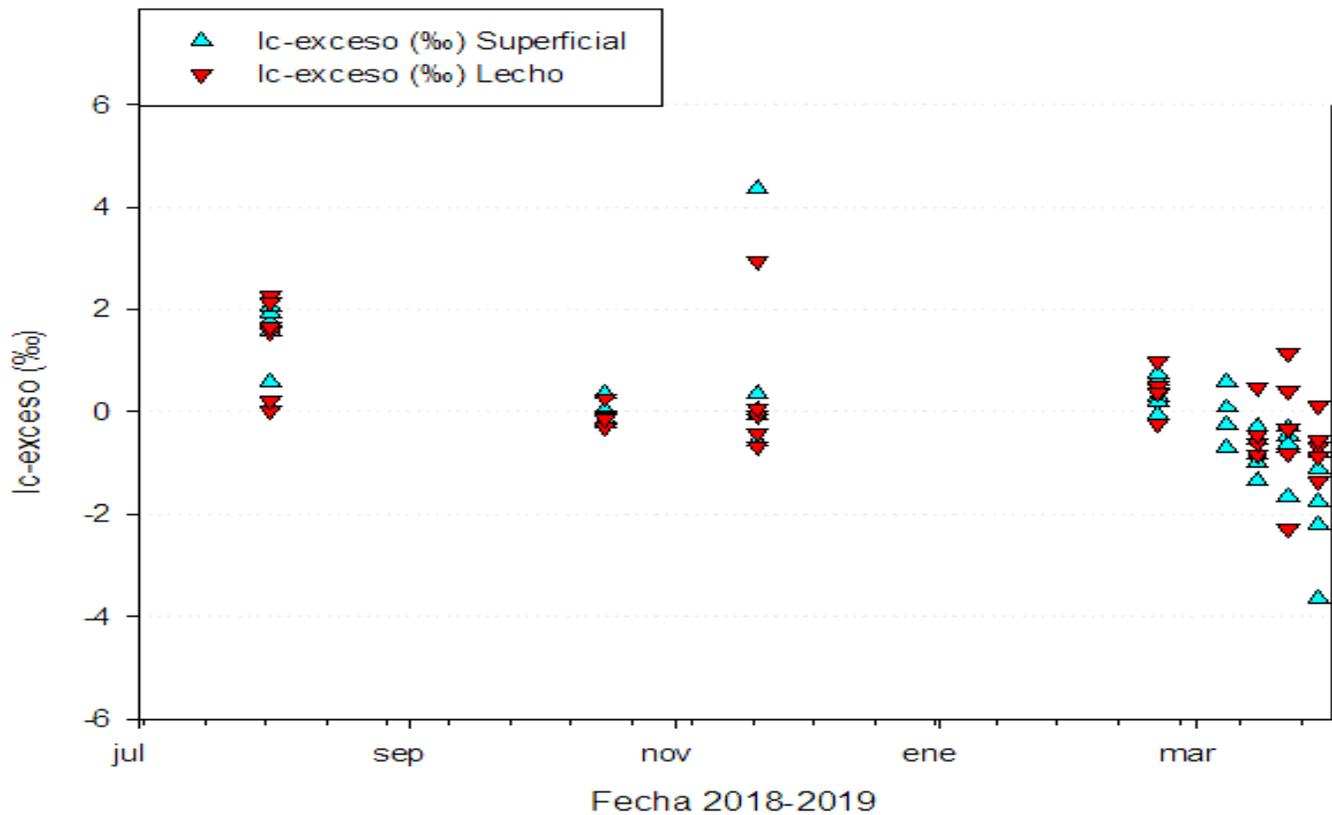
Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

En julio las aguas superficiales de Tiscapa experimentaron el fenómeno de la canícula, lo que enriqueció isotópicamente, esto se refleja también en el d-exceso de la **Figura 11** con un valor promedio de 0.97‰ en la superficie, y 2.45‰ en el lecho (con una diferencia de 1.97‰ en d-exceso), claramente, se aprecia que las aguas superficiales tuvieron valores próximos a 0‰, lo que se interpretaría como fraccionamiento cinético.

El mes de octubre en la **Figura 11** se registraron los valores en d-exceso más elevados tanto para las aguas superficiales (4.04‰), como las del lecho (3.96‰), lo que concuerda al segundo evento de mayores precipitaciones, y con los valores empobrecidos en $\delta^{18}\text{O}$, provocados por las intensas lluvias (Sánchez-Murillo et al., 2016). Las aguas del lecho de Laguna de Tiscapa, se ven directamente influenciadas por la recarga de aguas subterráneas por parte del acuífero Las Sierras, tal como planteo Barberena Moncada et al., (2021) afirman que hay un origen común entre las aguas subterráneas y laguna de Tiscapa

El lc-exceso en Laguna de Tiscapa indica un comportamiento típico de evaporación producto del fraccionamiento cinético, ya que su media total en lc-exceso= -0.0011‰ (n=76). También experimenta diferencia, entre la superficie y el lecho de la Laguna +0.89‰; en la **Figura 12** se aprecia la variación en la columna de agua.

Figura 12. Variación de lc-exceso por efecto estacional y la diferencia a nivel superficial y lecho de las aguas de Laguna de Tiscapa 2018-2019.

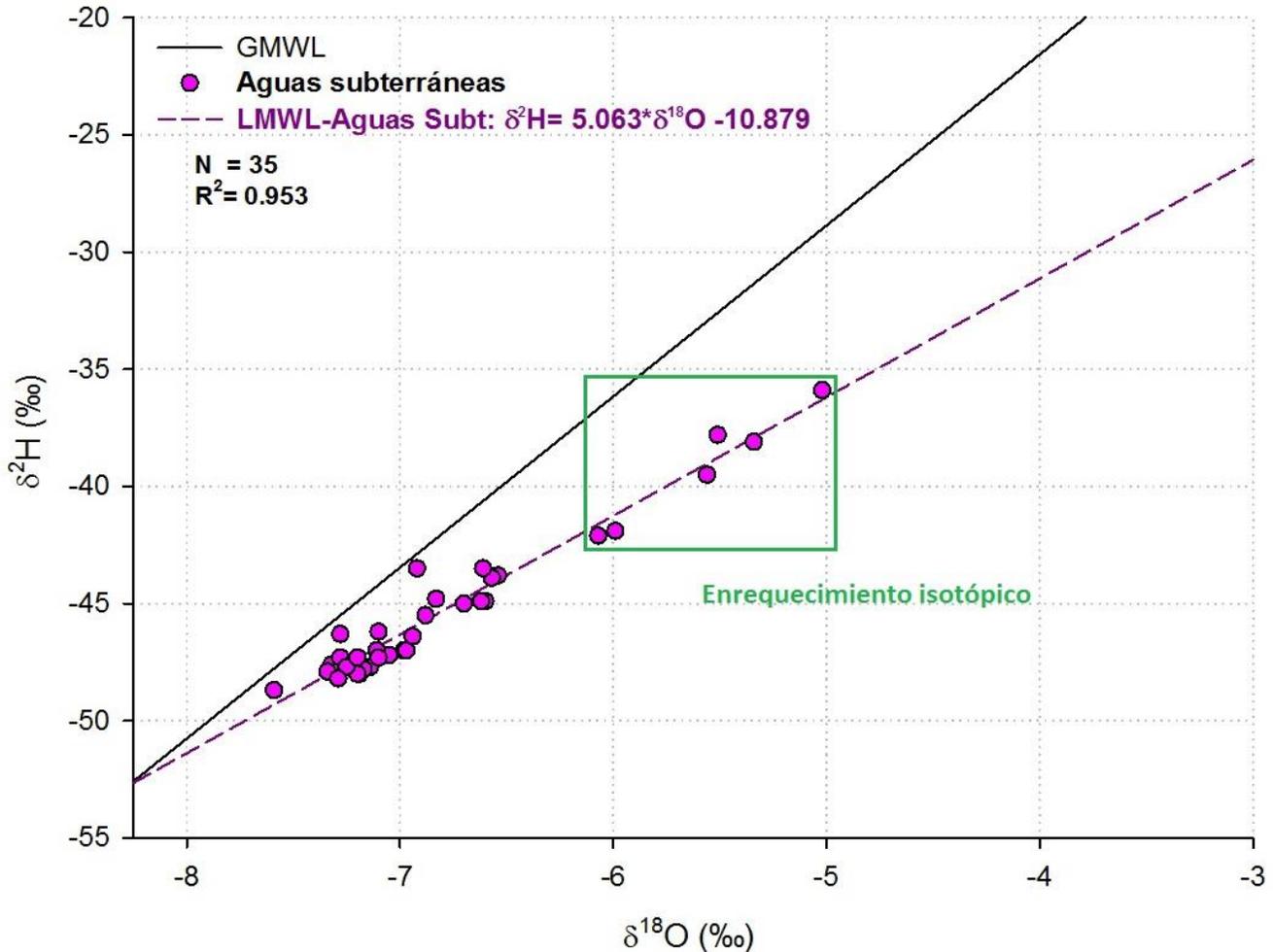


Fuente: Elaboración propia.

Las aguas superficiales de Tiscapa, tiene una media en lc-exceso= -0.10‰ ($n=39$) lo que sigue indicando procesos de evaporación, pero en el lecho sucede lo contrario, con una media de lc-exceso= 0.11‰ ($n=37$), de valor positivo, que podría interpretarse que los procesos de fraccionamiento cinético son mínimos en comparación con las aguas superficiales, esto es producto del aporte de las aguas subterráneas desde el lecho (Barberena Moncada et al., 2021), tal como se mencionaba anteriormente.

4.1.1.4 Aguas Subterráneas.

Figura 13. Línea de aguas subterráneas correspondiente al acuífero Las Sierras.



Fuente: Elaboración propia.

La media isotópica de los datos en $\delta^{18}\text{O} = -6.84\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -45.55\text{‰}$, con valores máximos de $\delta^{18}\text{O} = -5.34\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -37.80\text{‰}$, así como mínimos de $\delta^{18}\text{O} = -7.59\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -48.70\text{‰}$; los datos permitieron calcular la línea de aguas subterráneas del acuífero Las Sierras de acuerdo a la **Ecuación 2**, obteniéndose $\delta^2\text{H} = 5.063 * \delta^{18}\text{O} - 10.879$ mostrado en la **Figura 13** con una pendiente inferior a 8 de la GMWL (Clark & Fritz, 1997).

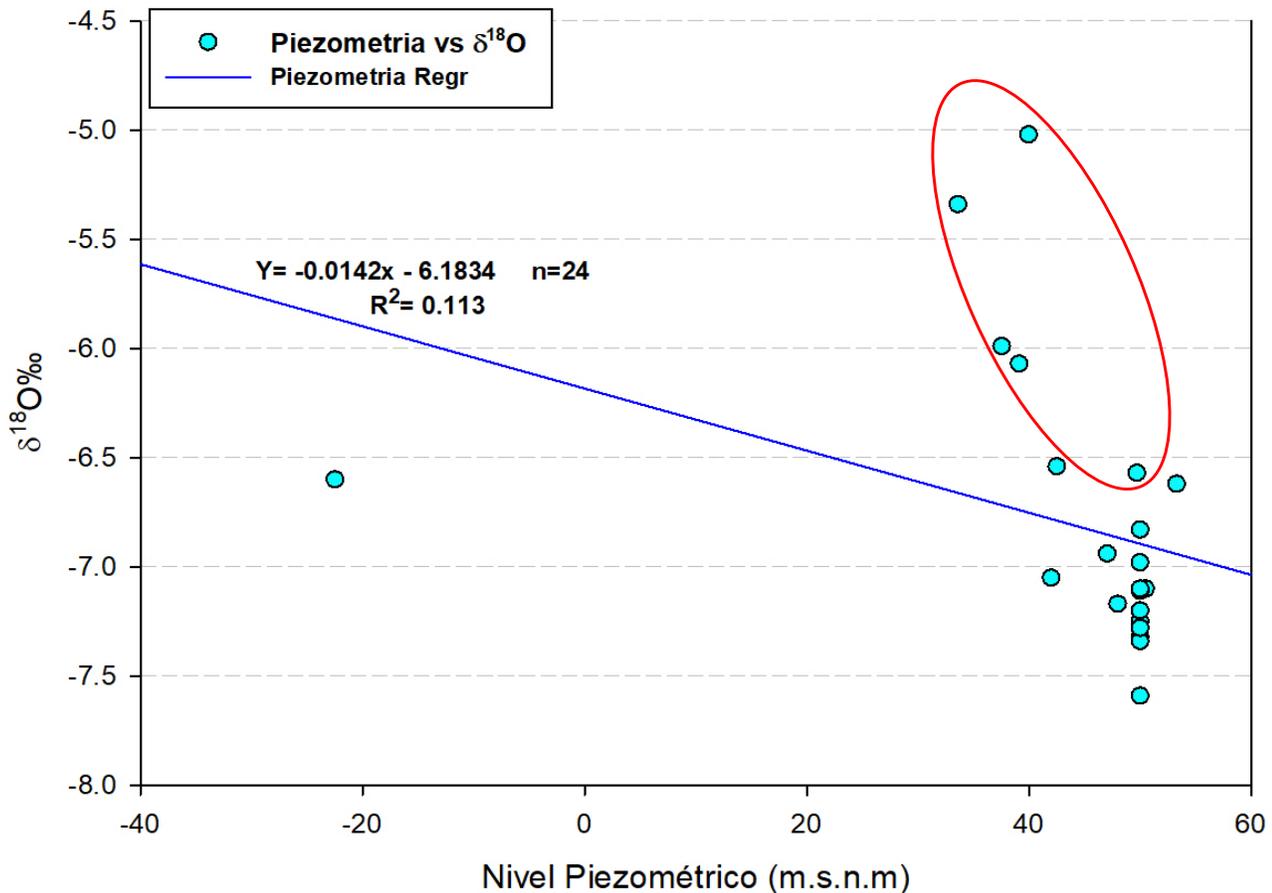
En la **Figura 13**, se puede apreciar 6 datos enriquecidos (encerrados en un cuadro verde) con media isotópica en $\delta^{18}\text{O} = -5.58\text{‰}$, que corresponde a pozos

ubicados al norte y noreste de Laguna de Tiscapa, hasta llegar a las cercanías de las costas del Lago Xolotlán, (ver área de estudio en **Figura 1**), lo que llega a comprender una zona entre Lagos (zona entre laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán) en donde se encuentran los pozos enriquecidos, el resto de datos en su mayoría se encuentran al sur de Laguna de Tiscapa con 22 pozos, estos más empobrecidos $\delta^{18}\text{O} = -7.11\text{‰}$, sin embargo, existe 7 pozos en la zona entre Lagos con valores negativos $\delta^{18}\text{O} = -6.77\text{‰}$, se sitúan en la gráfica de la **Figura 13**, con aquellos valores empobrecidos al sur de Tiscapa.

Las precipitaciones en el área de estudio influye en la composición isotópica de las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras, definir el grado de esta relación, varía de acuerdo a las proximidades de las zonas de recarga del acuífero Las Sierras, en el que señala Araguás Araguás et al., (1992) que la recarga del acuífero se produce fundamental en las tierras altas al sur de la ciudad de Managua, por precipitación directa, con elevaciones máximas de 940 m.s.n.m. con un movimiento en sus aguas subterráneas a partir del sur en las Sierras de Managua hasta el norte al Lago Xolotlán.

Para definir la relación de las precipitaciones con el acuífero Las Sierras, partimos de la pendiente de la línea de agua meteórica local de las precipitaciones ($\delta^2\text{H} = 7.468 \cdot \delta^{18}\text{O} + 5.328$) que tiene una semejanza con la composición isotópica de los pozos al sur de Tiscapa de -7.11‰ en $\delta^{18}\text{O}$, lo que podría interpretarse que es al sur de Tiscapa donde prevalece más las influencias de las precipitaciones, inclusive Araguás Araguás et al., (1992) reportó que las aguas subterráneas en la zona central del acuífero Las Sierras muestran un valor de -7.25‰ en $\delta^{18}\text{O}$, lo que puede relacionarse con las precipitaciones con valores de -6.0‰ y -7.5‰ en $\delta^{18}\text{O}$ registrados en dicho estudio.

Figura 14. Nivel piezométrico del acuífero Las Sierras vs $\delta^{18}\text{O}$ en el área de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento isotópico respecto al nivel piezométrico se aprecia en la **Figura 14**, en el que se detectó que los pozos empobrecidos al sur de Tiscapa ($\delta^{18}\text{O} = -7.11\text{‰}$, y en d-exceso = 9.93‰ , $n = 22$), poseen una media en nivel piezométrico de 48.82 m.s.n.m. con máximos de 50 m.s.n.m. y mínimos de 42.51 m.s.n.m. mientras que los pozos enriquecidos isotópicamente, encerrados en un círculo rojo en la **Figura 14** que corresponde a la zona entre lagos ($\delta^{18}\text{O} = -5.93\text{‰}$, y en d-exceso = 6.32‰ , $n = 6$) están a cotas inferiores con una media en nivel piezométrico de 29.57 m.s.n.m. con máximos de 49.71 m.s.n.m. y mínimos de -22 m.b.n.m. este pozo de valor negativo se muestra como el punto más aislado en la gráfica de la **Figura 14**.

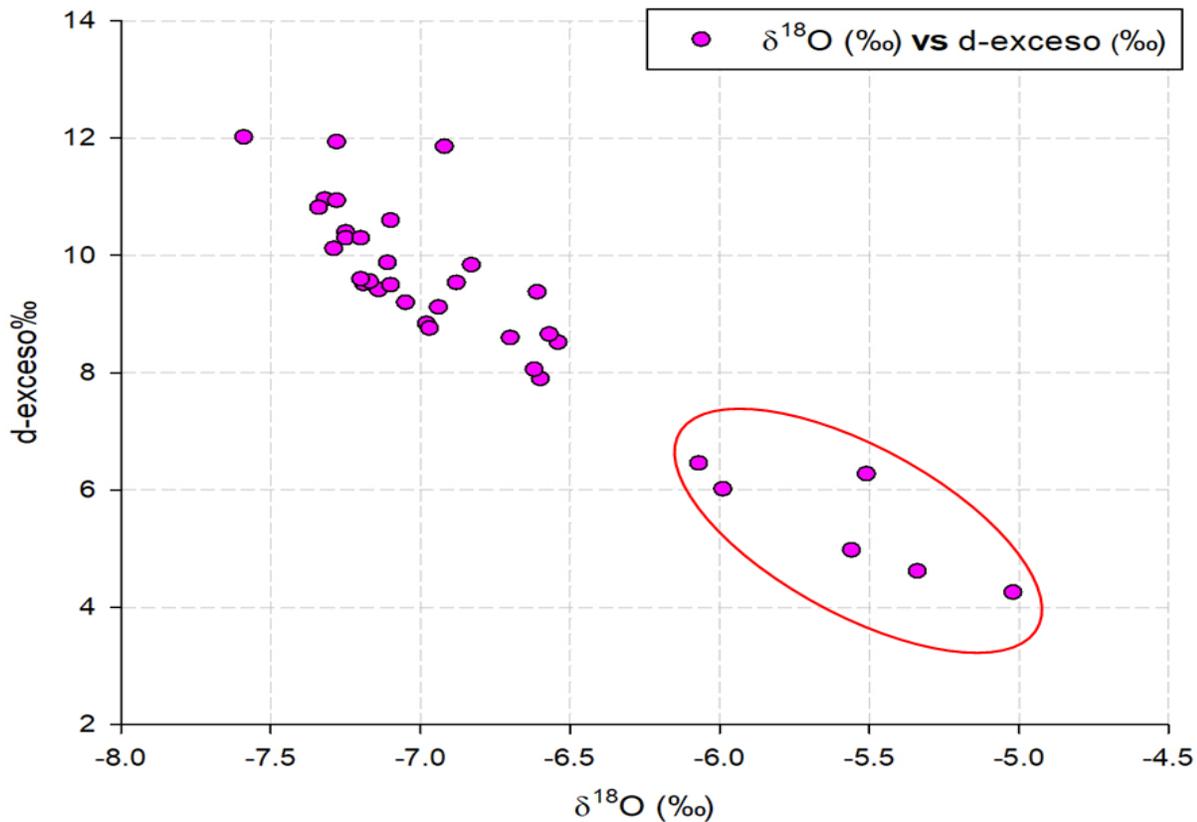
Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Este pozo con nivel piezométrico negativo -22 m.b.n.m. en la **Figura 14** indica que está bajo del nivel del mar, lo que sugiere una sobreexplotación del acuífero Las Sierras en esta zona norte de Tiscapa en el cual está ubicado dicho pozo, tal afirmación se ha realizado muchos años atrás por (JICA, 1993) había advertido de las consecuencias sobre la explotación de las aguas subterráneas en el área urbana de Managua, y más reciente Barberena Moncada et al., (2021) explica que el sector de Managua se producen diversos conos de abatimiento ubicados al oeste y al norte de Laguna de Tiscapa.

Es importante destacar que se detectó que el nivel del agua subterránea que comprende el acuífero Las Sierras varía desde el máximo de 50 m.s.n.m. ubicado al sur de Tiscapa, hasta el mínimo de -22 m.b.n.m al norte cerca del Lago Xolotlán, con un gradiente hidráulico estimado de 3.09 un resultado inferior al reportado por Barberena Moncada et al., (2021) que expuso un gradiente de 5.5.

El resultado obtenido (gradiente hidráulico= 3.09) encaja de acuerdo Araguás-Araguás et al., (1992) en el que espera una dinámica relativamente rápida de las aguas subterráneas en tierras altas, en contraste con las zonas bajas, la velocidad de flujo debe ser inferior a cotas próximas de 100 m.s.n.m. el nivel piezométrico se sitúa a 30-70 m, en dicho nivel las aguas del acuífero Las Sierras afloran en forma de Lagunas, como Asososca y Tiscapa con un nivel medio en sus aguas de 51.39 m.s.n.m. en 2018-2019 que comprende el tiempo de estudio.

Figura 15. d-exceso de las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras 2018-2019.



Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 15** el círculo rojo señala los valores más negativos; y el 22.85% de los datos en d-exceso son $>10\text{‰}$ al sur de Laguna de Tiscapa, y en la zona entre Lagos solo está el 5.71% de los datos $>10\text{‰}$, y el resto de valores esta entre $0\text{-}10\text{‰}$ siendo el 71.42% de los datos en d-exceso.

Este comportamiento en d-exceso indica que, tal como se planteaba, las precipitaciones ejercen más su influencia en las aguas del acuífero Las Sierras al sur de Laguna de Tiscapa, ya que posee una media en d-exceso= 9.93‰ lo que podría señalar que las precipitaciones en dicha área, son producto del reciclado de humedad y la destilación orográfica que se da en el Crucero, en el que destaca Araguás-Araguás et al., (1992) que existe recarga mínima por precipitación en cotas inferiores, como bien podría ser el caso al sur de Tiscapa con elevaciones medias de 193 m.s.n.m. y nivel piezométrico de 48.82 m.s.n.m.

En la **Figura 15**, el círculo rojo, señala los 6 datos más enriquecidos $\delta^{18}\text{O} = -5.58\text{‰}$ y con valores bajos en d-exceso = 5.43‰ , correspondiente a pozos de la zona entre Lagos que constituyen el acuífero Las Sierras, este comportamiento en el d-exceso, se podría relacionar con una influencia en las aguas del acuífero por parte de las aguas enriquecidas de Laguna de Tiscapa, tal como explica Sánchez-Murillo et al., (2020), que los valores d-exceso significativamente bajos en el agua subterránea de Nicaragua, evidenciaron la fuerte conectividad de los Lagos y reservorios de agua subterránea, en el que reportó un sesgo en el valor mediano de -1.74‰ en $\delta^{18}\text{O}$.

Siguiendo el argumento de Sánchez-Murillo et al., (2020) la conectividad entre Lagos y aguas subterráneas, ocurre con Laguna de Tiscapa aportando sus aguas al acuífero Las Sierras, al norte y noreste en la zona entre Lagos, viéndose reflejado en los 6 datos más enriquecidos que corresponde a 5 pozos, señalados en la línea de aguas subterráneas de la **Figura 13** y los valores bajos en d-exceso de la **Figura 15**, así mismo Barberena Moncada et al., (2021) indica que hay un enriquecimiento isotópico en el agua subterránea en la zona noreste entre Tiscapa y Lago Xolotlán, en lo que describe como un carácter afluente-influente de Laguna de Tiscapa.

Los argumentos para apoyar el aporte de aguas de Tiscapa al acuífero Las Sierras, son mediante los promedios isotópicos de Laguna de Tiscapa con $\delta^{18}\text{O} = -4.53\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -33.96\text{‰}$, comparándola con los promedios de las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras $\delta^{18}\text{O} = -6.78\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -45.23\text{‰}$ se puede apreciar una mayor cercanía de los datos entre Laguna de Tiscapa y las aguas del acuífero (que con las otras matrices de Lago Xolotlán o Precipitaciones), y las pendientes de sus respectivas líneas de aguas son semejantes, la línea de evaporación de Tiscapa, $\delta^2\text{H} = 5.482 * \delta^{18}\text{O} - 9.106$ y la línea de aguas del acuífero Las Sierras, $\delta^2\text{H} = 5.063 * \delta^{18}\text{O} - 10.879$.

La composición isotópica original de las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras que corresponde a pozos empobrecidos al sur de Tiscapa $\delta^{18}\text{O} = -7.11\text{‰}$, y en d-exceso = 9.93‰ , (n=22), y los pozos enriquecidos en la zona entre Lagos es $\delta^{18}\text{O} = -5.58\text{‰}$, y en d-exceso = 5.43‰ , (n=6), sufren un enriquecimiento isotópico a

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

causa de las aguas de Laguna de Tiscapa de $\delta^{18}\text{O} = +1.53\text{‰}$ y un aumento en d-exceso = $+4.5\text{‰}$.

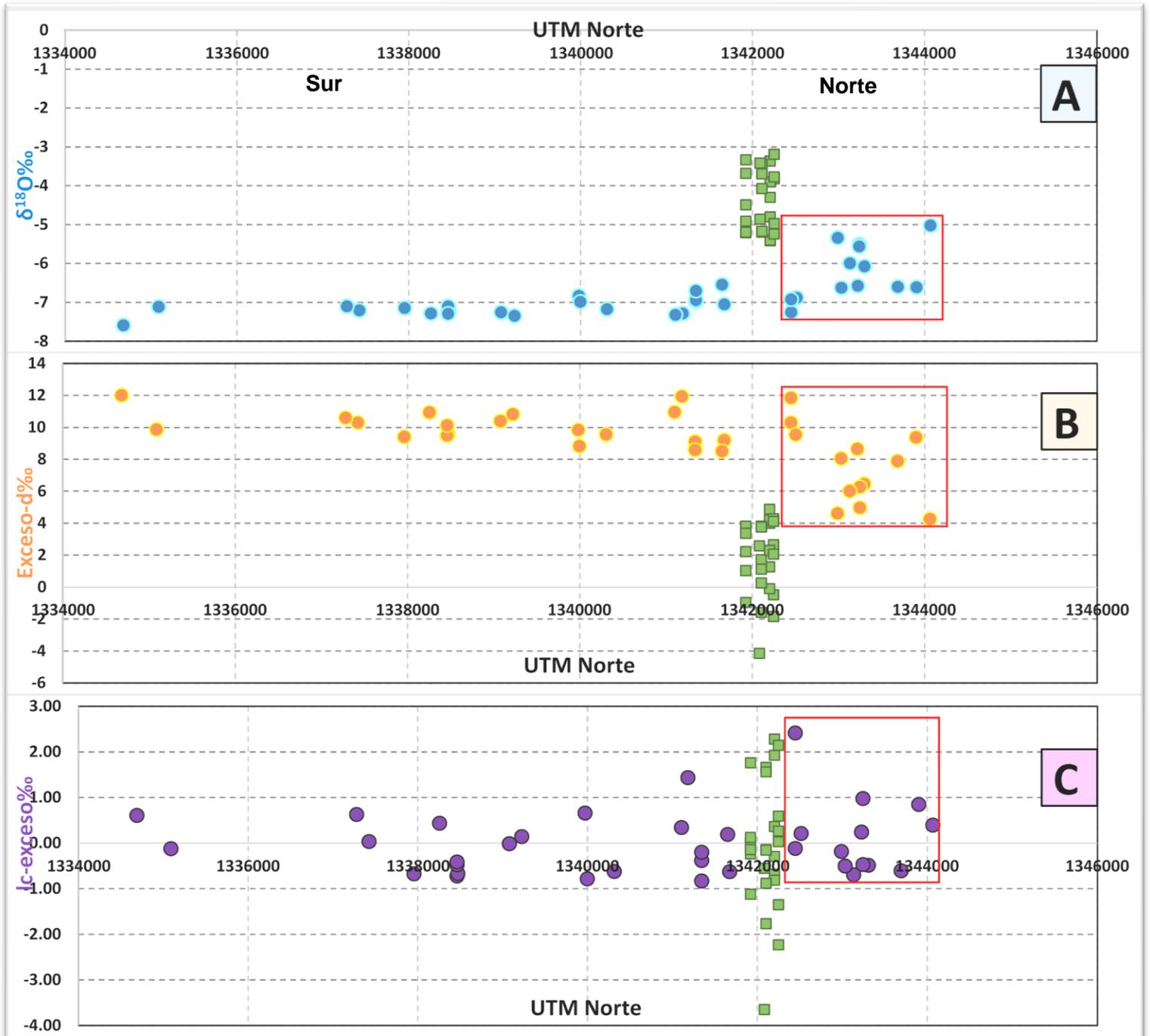
Estos valores ($\delta^{18}\text{O} = +1.53\text{‰}$, d-exceso = $+4.5\text{‰}$) representaría la conectividad de Laguna de Tiscapa, hacia las aguas subterráneas que constituyen el acuífero Las Sierras, en la zona entre Lagos, un dato un poco inferior al reportado por Sánchez-Murillo et al., (2020) de un enriquecimiento -1.74‰ en $\delta^{18}\text{O}$ y ligeramente superior al reportado Barberena Moncada et al., (2021) de un enriquecimiento de -1.4‰ en $\delta^{18}\text{O}$.

El aporte de aguas de Laguna de Tiscapa al acuífero Las Sierras, se puede relacionar con la existencia de zonas fuertemente afectadas por la falla Tiscapa, con deslizamiento noreste-suroeste lateral izquierdo (Freundt et al., 2010) en el que Barberena Moncada et al., (2021) plantea, que la interacción entre Laguna de Tiscapa y aguas subterráneas se puede asociar a los factores geológicos propios de las zonas, de ellos la denominada falla Tiscapa, que atraviesa la Laguna y también por el fracturamiento que se da en las paredes del cono.

Además movimiento de las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras es de sur a norte, del Crucero (Sierras de Managua) hacia al Lago Xolotlán (JICA, 1993; Araguás Araguás et al., 1992), esto tiene un efecto en la composición isotópica, donde se ve reflejado en los pozos de sur a norte, para ello se construyeron gráficas que ilustran este comportamiento por medio del d-exceso, $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ y el lc-exceso ‰ con respecto a las coordenadas UTM norte en la **Figura 16**.

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Figura 16. Gráficas de UTM Norte, de las aguas subterráneas que constituyen el acuífero Las Sierras.



Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 16** son tres gráficos A) donde los círculos celestes representan $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$; B) círculos naranjas indican d-exceso‰; C) círculos morados son el lc-

exceso‰ y los cuadros verdes representan los datos de Tiscapa, el recuadro rojo encierra los datos de la zona entre lagos correspondiente al acuífero Las Sierras.

La **Figura 16** ilustra la diferencia isotópica en $\delta^{18}\text{O}$ ‰ y d-exceso de los pozos del sur, con los del norte, que pertenecen a la zona entre Lagos (encerrados en recuadro rojo), además se contempla la cercanía de los datos de los pozos enriquecidos por las aguas de Laguna de Tiscapa, ubicados al norte y noreste de la Laguna.

Otro argumento interesante, es el d-exceso en las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras, partiendo de los pozos empobrecidos al sur de Tiscapa con un d-exceso = -0.10 ‰ (n=22) y luego al pasar por laguna de Tiscapa, y calculando la media de los pozos enriquecidos en la zona entre Lagos en d-exceso = 0.0023 ‰ (n=6), por lo que se puede apreciar el siguiente cambio en d-exceso, en el que se incluye el lecho de Laguna de Tiscapa.

-0.10 ‰ Sur  0.11 ‰ lecho de Tiscapa  0.023 ‰ norte, zona entre Lagos.

Al comparar las medias isotópicas del Lago Xolotlán $\delta^{18}\text{O}$ = -0.41 ‰, y en d-exceso = -2.26 ‰, (n=66) con las aguas subterráneas específicamente los pozos enriquecidos, $\delta^{18}\text{O}$ = -5.58 ‰, y en d-exceso = 5.43 ‰, (n=6) el Lago Xolotlán resulta que está muy enriquecida isotópicamente y sufre de procesos de fraccionamiento cinético, mientras que las aguas subterráneas son muy empobrecidas comparadas a las aguas del Lago.

El enriquecimiento isotópico provocado en algunos pozos en esta zona entre Lagos, no se debe a la intrusión de aguas del Lago Xolotlán, tal argumento lo sostienen estudios anteriores (Barberena Moncada et al., 2021; Araguás et al., 2001; Rozanski et al., 2001).

4.1.2 Correlación de los resultados isotópicos.

Se expone la relación isotópica de cada una de las variables por medio de la estadística, específicamente un análisis unidireccional no paramétrico de Kruskal-Wallis de varianza en rangos, para agrupar los valores con datos estadísticos, luego se procedió a realizar un análisis de correlaciones por medias.

También se realizó análisis de algunos parámetros de estadísticas descriptivas en los datos medias, medianas, desviaciones estándares, cuartiles 25% y 75%, máximos y mínimos y la elaboración de un diagrama de cajas para exponer la cercanía o diferencias entre las diferentes matrices, de Laguna de Tiscapa, aguas subterráneas, Lago Xolotlán, y las precipitaciones.

El análisis de Kruskal-Wallis realizadas en las matrices de agua subterránea (GW del inglés Groundwater), precipitación, Laguna de Tiscapa (LT) y Lago Xolotlán (LX), muestran que existe una diferencia estadísticamente significativa, entre las matrices $P = <0,001$ en el que se puede apreciar este resultado en la **Tabla 7**, de **Anexo 3**. Datos isotópicos.

Tabla 3. prueba de *Kruskal Wallis*.

Fuente	Medias	categoría
LN-Oct	-9.61	A
AIACS-May	-8.98	A
LN-May	-8.73	A
PSA-Oct	-8.84	A
PSA-May	-8.61	A
AIACS-Oct	-8.47	A
GW 50	-7.2	A
GW 47	-7.06	A
GW 42	-6.8	A
GW 53	-6.62	A
GW -22	-6.6	B
GW 49	-6.57	B
CIRA-Oct	-7.9	B
GW 37	-5.99	B
GW 33	-5.34	B
GW 39	-5.55	B
CIRA-May	-7.04	B
LT	-4.53	B
LX	-0.48	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de comparación por medias de la **Tabla 3** GW (del inglés Groundwater) son grupos de pozos de aguas subterráneas del acuífero Las Sierras, LN, AIACS, CIRA, PSA son las estaciones meteorológicas, durante octubre (Oct) y Mayo (May) en periodos de mayores precipitaciones, Laguna de Tiscapa (LT) y Lago Xolotlán (LX).

Se utilizaron los datos más representativos del área de estudio para el análisis de comparaciones por medias en la **Tabla 3**, y la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$) se

divide en tres diferentes grupos, de acuerdo a las medias de las distintas matrices, donde las medias con una letra común, no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

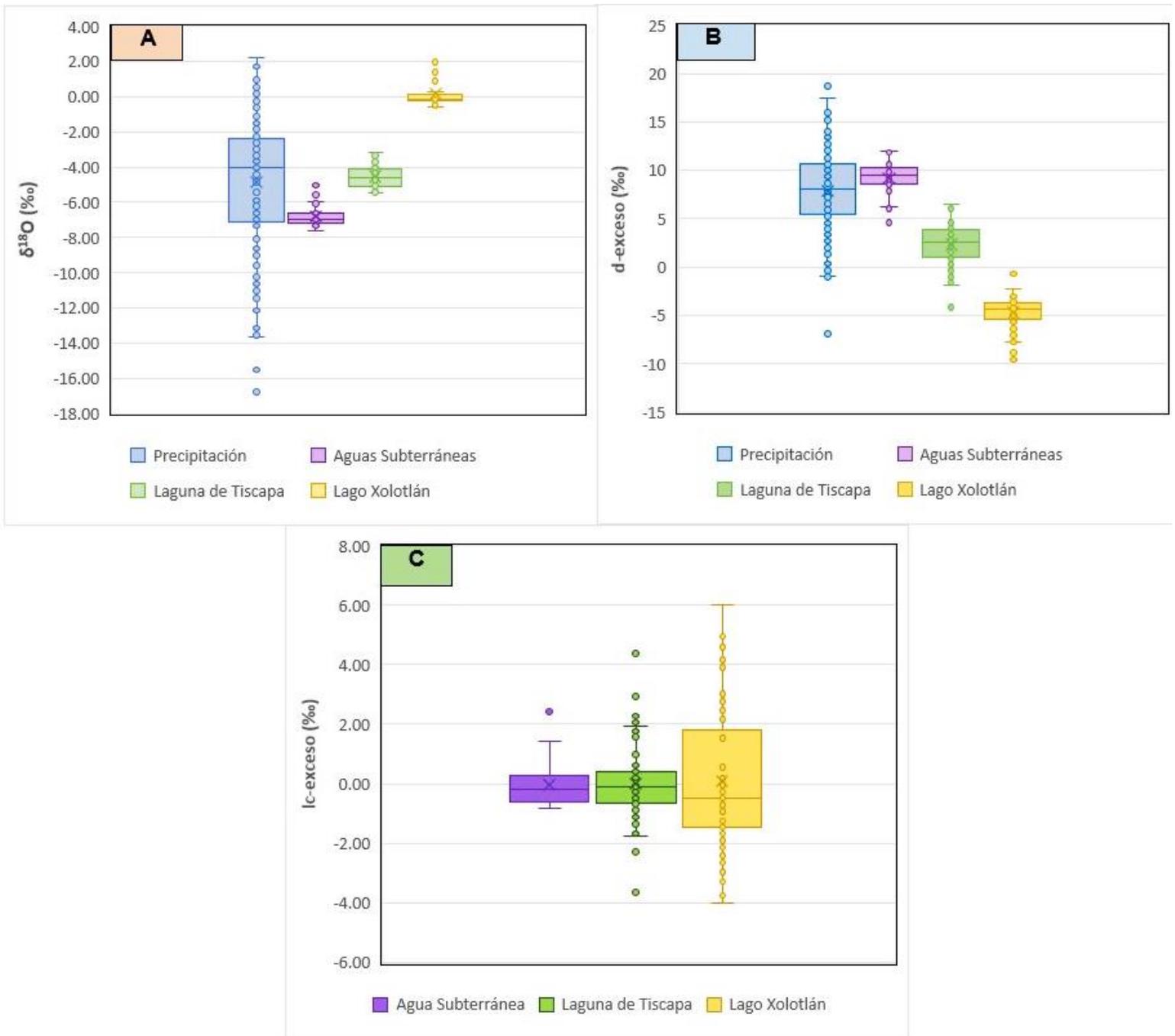
Las aguas subterráneas (GW) se agrupan en A y B estadísticamente en la **Tabla 3**. Los datos de GW en A, son los más empobrecidos del área de estudio que corresponden al sur de Laguna de Tiscapa, con una media grupal en $\delta^{18}\text{O} = -7.10\text{‰}$ ($n=18$) y la agrupación en B, corresponde a los datos más enriquecidos al norte de Tiscapa en la zona entre Lagos con una media grupal en $\delta^{18}\text{O} = -5.93\text{‰}$ ($n=6$).

En el grupo A, los datos muestran que no hay diferencia estadísticamente significativa entre sus medias ($p > 0.05$), se agrupan las aguas subterráneas más empobrecidas del acuífero Las Sierras al sur Tiscapa ($\delta^{18}\text{O} = -7.10\text{‰}$, $n=18$) excepto el pozo GW 53, que pertenece al noroeste de la Laguna, estas muestran en común las medias de las estaciones de PSA, LN y AIACS, durante mayo y octubre, que coincide con los eventos de mayores precipitaciones empobrecidas que se aprecia en la **Tabla 3**, lo que demuestra que en dichos meses ocurre la recarga del acuífero Las Sierras por medio de las precipitaciones al sur de Laguna de Tiscapa.

De manera similar se puede observar este comportamiento en los diagramas de cajas en la **Figura 17** gráfica A, donde existe homogeneidad entre las precipitaciones-acuífero Las Sierras y Laguna de Tiscapa, esto se demuestra en el cuartil inferior de precipitaciones $Q1 = -7.11 \delta^{18}\text{O}$, y las aguas subterráneas $Q1 = -7.20 \delta^{18}\text{O}$, que corresponden a valores agotados de precipitaciones en invierno, afectando la composición de las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras al sur de Tiscapa, a su vez la Laguna ($\delta^{18}\text{O} = -4.53\text{‰}$) y las precipitaciones ($\delta^{18}\text{O} = -4.84\text{‰}$) guardan promedios semejantes, pero se debe a que las lluvias presentan valores enriquecidos en verano ($\delta^{18}\text{O} = -0.89\text{‰}$, $n=17$) y durante la canícula ($\delta^{18}\text{O} = -3.03\text{‰}$, $n=32$).

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Figura 17. Diagrama de cajas, variación isotópica en $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (A), d-exceso ‰ (B), y lc-exceso ‰ (C).



Fuente: Elaboración propia.

Los diagramas de caja en la **Figura 17** incluyen cuartiles 25, 75, mediana y valores atípicos para cada grupo. En la gráfica B de la **Figura 17**, el d-exceso muestra el mismo comportamiento en las aguas subterráneas, el cuartil superior

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Q3= 10.30‰ y las precipitaciones Q3= 10.65‰, habiendo una clara proximidad en los datos, que indica reciclado de humedad en las precipitaciones empobrecidas que recargan las aguas subterráneas, que conservan estos valores negativos, tal como se planteaba en el análisis de comparación por medias de la **Tabla 3**.

La agrupación de datos en B de la **Tabla 3**, muestran que no hay diferencia estadísticamente significativa entre sus medias ($p > 0.05$), se agrupan las aguas subterráneas más enriquecidas del acuífero Las Sierras $\delta^{18}\text{O} = -5.93\text{‰}$ ($n=6$) con Laguna de Tiscapa $\delta^{18}\text{O} = -4.53\text{‰}$ ($n=76$), lo que demuestra un aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa a las aguas subterráneas, que corresponden al acuífero Las Sierras. Por otro lado, se agrupó la estación del CIRA debido a la frecuencia de muestreo en el que registra valores enriquecidos puntuales en mayo y octubre (ver **Tabla 3**), ya que es la única estación de eventos diarios, por lo que presenta un amplio rango de datos $\delta^{18}\text{O} = -16.79\text{‰}$ (mínimo) a $\delta^{18}\text{O} = -0.56\text{‰}$ (máximo).

En la gráfica C **Figura 17**, el Ic-exceso entre Laguna de Tiscapa y las aguas subterráneas muestran datos en común en lo que respecta en las medianas (-0.12‰ GW y -0.12‰ LT), los cuartiles inferiores ($Q1 = -0.57\text{‰}$ GW y $Q1 = -0.63\text{‰}$ LT) y cuartiles superiores ($Q3 = 0.38\text{‰}$ GW y $Q3 = 0.39\text{‰}$ LT), para mayor apreciación se elaboró la **Tabla 4** que expone las estadísticas descriptivas en los datos, en el que se pueden observar los datos mencionados y los utilizados para elaborar los diagramas de cajas.

Los grupos de datos A y B de la **Tabla 3** muestran una diferencia estadísticamente significativa entre sus medias ($p < 0.05$), es decir no guardan relación las aguas subterráneas del sur de Tiscapa, con las del norte en la zona entre Lagos, por lo que no todas las medias de la población son iguales es decir A distinto a B. Y el grupo de datos C, que corresponde solo al Lago Xolotlán $\delta^{18}\text{O} = -0.48\text{‰}$ ($n=70$), muestra una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) con los grupos A y B, por lo que no guarda relación en los datos o en sus medias, es decir es de una población distinta de A y B.

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

En el diagrama de cajas **Figura 17** se observa como Lago Xolotlán difiere de todas las demás matrices al igual que se puede apreciar en la **Tabla 4**.

Tabla 4. *Parámetros de estadísticas descriptivas de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$, $\delta^2\text{H}\text{‰}$, d-exceso‰ y lc-exceso‰.*

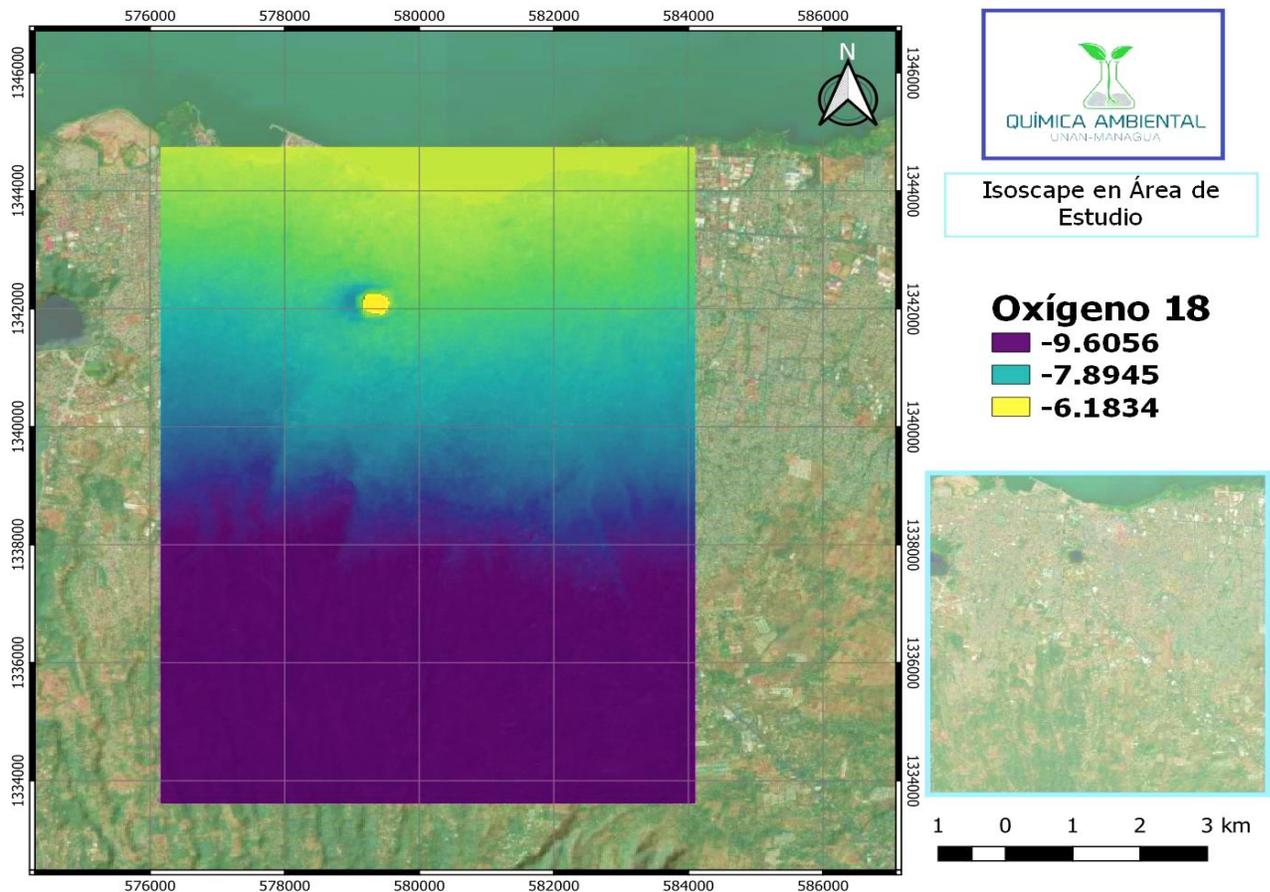
Sitio	n	máximo	mínimo	mediana‰	Q1 25%	Q3 75%	Media‰	Std Dev
Prec $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	141	2.21	-16.79	-4.02	-7.06	-2.36	-4.84	3.78
Prec $\delta^2\text{H}$ (‰)		23.30	-115.30	-24.90	-48.37	-11.52	-30.81	28.47
GW $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	35	-5.02	-7.59	-6.98	-7.20	-6.60	-6.78	0.62
GW $\delta^2\text{H}$ (‰)		-35.90	-48.70	-46.40	-47.60	-43.82	-45.23	3.25
LT $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	76	-3.19	-5.44	-4.57	-5.09	-4.11	-4.53	0.61
LT $\delta^2\text{H}$ (‰)		-25.60	-39.40	-34.05	-37.15	-32.10	-33.95	3.57
LX $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	70	1.98	-14.55	-0.15	-0.25	0.03	-0.41	2.96
LX $\delta^2\text{H}$ (‰)		8.60	-63.70	-5.15	-6.20	-3.30	-5.58	12.27
d-exceso Prec (‰)	141	19.02	-6.90	8.04	5.40	10.65	7.90	4.14
d-exceso GW (‰)	35	12.02	4.26	9.50	8.54	10.30	9.05	1.97
d-exceso LT (‰)	76	6.52	-4.14	2.56	1.02	3.83	2.30	1.95
d-exceso LX (‰)	70	59.00	-9.54	-4.23	-5.24	-3.58	-2.26	11.97
lc-exceso GW (‰)	35	2.41	-0.83	-0.12	-0.57	0.38	0.0007	0.70
lc-exceso LT (‰)	76	4.36	-3.64	-0.12	-0.63	0.39	-0.0011	1.18
lc-exceso LX (‰)	70	6.31	-6.66	-0.48	-1.46	1.52	1.6×10^{-5}	2.44

Fuente: Elaboración propia.

Los diminutivos de la **Tabla 4** indican, n: número de muestras Prec: Precipitación, GW: Aguas subterráneas, LT: Laguna de Tiscapa, LX: Lago Xolotlán.

4.1.3 Mapeo isotópico del agua subterránea en la zona de estudio

Figura 18. Isoscape de las aguas subterráneas en el área de estudio 2018-2019.



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 18**, el isoscape muestra la distribución espacial de los isótopos en las aguas subterráneas, en el que partiendo desde el sur los valores son empobrecidos ($\delta^{18}\text{O} = -7.11\text{‰}$ y d-exceso = 9.93‰), influenciadas por las precipitaciones en invierno ($\delta^{18}\text{O} = -8.90\text{‰}$ y d-exceso = 9.11‰) siendo esta su fuente de recarga.

Por otro lado, a partir del norte de Tiscapa en la zona entre Lagos, existe un enriquecimiento isotópico en las aguas subterráneas ($\delta^{18}\text{O} = -5.58\text{‰}$ y d-exceso = 5.43‰) causado por las aguas enriquecidas de Laguna de Tiscapa ($\delta^{18}\text{O} = -4.79\text{‰}$ y d-exceso = 3.07‰), viéndose reflejado en 5 pozos al norte y noreste, por lo que se estima que esta es el área de influencia del aporte agua de la Laguna de Tiscapa, al acuífero Las Sierras.

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

Se logro caracterizar la composición isotópica de todas las matrices de estudio, las precipitaciones, Lago Xolotlán, Laguna de Tiscapa y las aguas subterráneas que corresponden al acuífero Las Sierras, en el que se pudo identificar los principales rasgos isotópico singulares de cada uno, y bajo que efectos están sometidos como el estacional o cantidad, así como los factores meteorológicos que juegan un rol importante en la composición isotópica, esto permitió establecer las relaciones entre las matrices, tal es el caso de la conectividad de Laguna de Tiscapa con las aguas subterráneas de la zona entre lagos, que corresponde al acuífero Las Sierras.

La correlación de los datos isotópico permitió agrupar los valores en tres diferentes grupos de datos (A,B y C), en el que se pudo establecer las relaciones que existen entre las matrices, como fue el caso de las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras, que se agrupo en A los pozos más empobrecidos, y en B se agrupo los pozos más enriquecidos con la Laguna de Tiscapa, lo que indica que existe un aporte de las aguas de Tiscapa al acuífero Las Sierras en la zona entre Lagos, y por lo tanto Lago Xolotlán no influye isotópicamente en esta zona.

El Isoscape, logro facilitar la representación espacial isotópica de las aguas subterráneas que comprenden el acuífero Las Sierras, en el que se aprecia al sur de Tiscapa los valores empobrecidos y al norte en la zona entre lagos los valores más enriquecidos isotópicamente a causa de la recarga de Laguna de Tiscapa al acuífero.

Se puede concluir que se afirma la hipótesis planteada en este estudio, puesto que los datos, las pruebas estadísticas y las correlaciones demuestran que, la composición isotópica de ^{18}O y ^2H en las aguas del acuífero Las Sierras entre Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán, son enriquecidas isotópicamente por las aguas de la Laguna de Tiscapa y no por las aguas del Lago Xolotlán.

5.2 Recomendaciones

- Realizar un balance hídrico o isotópica en Laguna de Tiscapa.
- Ampliar y actualizar el rango de datos en verano e invierno, especialmente con las aguas subterráneas, y mantener un monitoreo mensual o diario de los pozos estratégicos de la capital, con respecto al nivel piezométrico.
- Emplear otras técnicas isotópicas o trazadores, como determinar la edad del agua por medio del tritio en la zona entre laguna de Tiscapa y al sur, para detectar la evolución y edad de las aguas subterráneas.
- Aplicar medidas de seguridad hídrica, y fomentar la educación ambiental con respecto a una gestión integrada de los recursos hídricos, atendiendo con mayor preocupación a Laguna de Tiscapa.
- Actualizar datos físico-químicos de laguna de Tiscapa, como temperatura, oxígeno disuelto, DQO y DBO, conductividad, entre otros, y caracterizar los diferentes contaminantes, así como el monitoreo de estos parámetros de calidad de agua en los pozos de la zona entre Tiscapa y Lago Xolotlán.
- Aplicar medidas para gestionar sosteniblemente las aguas subterráneas para frenar los conos de abatimiento en la zona entre Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán.
- Diseñar un plan de monitoreo para determinar las variaciones de calidad de las aguas en el tiempo en Laguna de Tiscapa, y en los pozos ubicados entorno a Tiscapa y en la zona entre Lagos.
- Fomentar los estudios isotópicos en los diferentes recursos hídricos de la ciudad de Managua, para tener un registro actualizado en los datos y construir una red de datos isotópicos a nivel nacional.

5.3 Bibliografía.

- Araguás Araguás, L., Castillo, E., Louvat, D., & Lopéz, A. (1992). *Estudios de hidrología isotópica de los acuíferos de Managua*. Viena: Organismo Internacional de Energía Atómica.
- Araguás, L., García, J., Martínez, R., & Bedmar, A. (2001). Relación entre el Lago de Managua (Nicaragua) y las aguas subterráneas de su entorno. *Revista Digital del Cedex*, 127-127.
- Araguás-Araguás, L., Froehlich, K., & Rozanski, K. (2000). Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. *Hydrological processes*, 14(08), 1341-1345. doi:10.1002/1099-1085(20000615)14:8<1341::AID-HYP983>3.0.CO;2-Z
- Barberena Moncada. (2019). Modelamiento del origen de las precipitaciones en la ciudad de Managua mediante simulaciones con HYSPLIT. *Revista científica de agua y conocimiento*, 5, 15-25.
- 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. *Revista Científica de FAREM-Estelí*(37), 35-53. doi:https://doi.org/10.5377/farem.v0i37.11211
- Bowen, G., & Revenaugh, J. (2003). Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water resources research*, 39(10). doi:10.1029/2003WR002086
- Caballero, E. (1989). Fraccionamiento isotópico: efecto de la composición química. *Estudios geológicos*, 45(5-6), 299-314. doi:10.3989/egol.89455-6502
- Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology* (1st Edition ed.). New York: Lewis Publishers. doi:https://doi.org/10.1201/9781482242911
- Cognodata. (1 de 10 de 2019). *Cognodata.com*. Obtenido de ¿Qué es el análisis descriptivo?: <https://www.cognodata.com/blog/que-es-analisis-descriptivo/>

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703. doi:10.1126/science.133.3465.1702
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 436-468. doi:10.3402/tellusa.v16i4.8993
- Dapeña, C., Varni, M., Panarello, H., Ducos, E., Weinzentel, P., & Usunoff, E. (2010). Composición isotópica de la precipitación de la Estación Azul, provincia de Buenos Aires. Red Nacional de Colectores Argentina. *Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. I*, págs. 386-393. Buenos Aires: Editorial Martin.
- Díaz, M., Castaño, S., & Rodríguez, J. (2009). La Red Española de Vigilancia de Isótopos en la Precipitación (REVIP): distribución isotópica espacial y aportación al conocimiento del ciclo hidrológico. *Ingeniería Civil*, 155, 87-97.
- Esquivel-Hernández, G. (2018). *Análisis integrado de variabilidad climática, dinámica de precipitación y conflictos por el agua para la gestión del recurso hídrico en Costa Rica*. Universidad Nacional, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. San José: UNA. Obtenido de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/10694>
- Fiallos & Asociados – Consultores. (04 de 2004). *Plan de manejo del área protegida paisaje terrestre protegido laguna de Tiscapa municipio de Managua*. Alcaldía municipal de Managua dirección de Ambiente. Managua: MARENA.
- Freundt, A., Hartmann, A., Kutterolf, S., & Strauch, W. (2010). Volcaniclastic stratigraphy of the Tiscapa maar crater walls (Managua, Nicaragua): implications for volcanic and seismic hazards and Holocene climate changes. *International Journal of Earth Sciences*, 6(99), 1453-1467. doi:DOI 10.1007/s00531-009-0469-6
- Geyh, M. (2002). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y Aplicaciones. En W. G. Mook (Ed.), *Sección IV Agua Subterránea zona saturada y no saturada*. Madrid: Instituto Geológico Minero de España.

- Gonfiantini, R. (1978). Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature*, 271(5645), 534-536. doi:<https://doi.org/10.1038/271534a0>
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. P. (2010). *Metodología de la investigación* (Quinta Edición ed.). México: McGRAW-HILL. Obtenido de <http://biblioteca.udgvirtual.udg.mx/jspui/bitstream/123456789/2707/1/Metodologia%20de%20la%20investigaci%c3%b3n.pdf>
- Hughes, C. E., & Crawford, J. (2012). A new precipitation weighted method for determining the meteoric water line for hydrological applications demonstrated using Australian and global GNIP data. *Journal of Hydrology*, 464, 344-351. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.029>
- JICA. (1993). *Estudio sobre el proyecto de abastecimiento de agua en Managua*. Informe principal, Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillado, Tokio.
- Landwehr, J., & Coplen, T. (2006). Line-conditioned excess: a new method for characterizing stable hydrogen and oxygen isotope ratios in hydrologic systems. *In International conference on isotopes in environmental studies* (págs. 132-135). Vienna: IAEA. Obtenido de <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20733407#page=153>
- López Soto, P. J. (2013). Contraste de hipótesis. Comparación de más de dos medias independientes mediante pruebas no paramétricas: Prueba de Kruskal-Wallis. *Revista Enfermería del Trabajo.*, Vol 3(4), 166-171.
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, XII(6), 1577-1588. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- Martínez, P., Santos, P., & Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Madrid, España: Mundi-prensa.

- Mejía, J. (mayo de 2018). Tiscapa, rescate de un desastre ecológico. (J. M. Lacayo, Ed.) *Temas Nicaragüenses*(121), págs. 11-12. Obtenido de <http://www.temasnicas.net/rtn121.pdf>
- Mook, W. G. (2002). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y Aplicaciones. En W. G. Mook (Ed.), *Sección I Introducción*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Peralta, J., Gil, R., Dapeña, C., Valdez, L., Olivera, A., & Morejón, Y. (2015). Hidrología isotópica, herramienta nuclear para la gestión sostenible. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 36(1), 57-72.
- Porowski, A. (2014). Isotope Hydrogeology. En S. Eslamian (Ed.), *Handbook of Engineering Hydrology: Fundamentals and Applications* (págs. 345-377). CRC Press. doi:10.1201/b15625-18
- Rain Sampler Palmex itd. (2019). *Palmex Rain Sampler RS1*. Obtenido de <http://www.rainsampler.com/portfolio-page/rain-sampler-rs1/>
- Rozanski, K., Castillo, E., Flores, Y., Urbina Ch, A., Castro C, M., & Davila L, R. (2001). *Balance isotópico e hidrogeológico del Lago Xolotlán*. Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales, Dirección de hidrogeología. Managua (Nicaragua): Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).
- Rozanski, K., Froehlich, K., & Mook, W. G. (2002). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y Aplicaciones. En W. G. Mook (Ed.), *Sección III Agua Superficial*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Sánchez-Murillo, Birkel, C., Welsh, K., Esquivel-Hernández, Corrales-Salazar, J Boll, . . . Araguás-Araguás. (2016). Key drivers controlling stable isotope variations in daily precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Eastern Pacific Ocean moisture sources. *Quaternary Science Reviews.*, 131, 250-261. doi:10.1016/j.quascirev.2015.08.028
- Sánchez-Murillo, Esquivel Hernández, Welsh, Brooks, Boll, Solís, & Valdés . (2013). Spatial and temporal variation of stable isotopes in precipitation across Costa

Rica: an analysis of historic GNIP records. *Open Journal of Modern Hydrology*, 3, 226-240. doi:10.4236/ojmh.2013.34027

Sánchez-Murillo, Esquivel-Hernández, G., Corrales-Salazar, J., Castro-Chacón, L., Durán-Quesada, A., Guerrero-Hernández, M., . . . Terzer-Wassmuth, S. (2020). Tracer hydrology of the data-scarce and heterogeneous Central American Isthmus. *Hydrological Processes*, 34(11), 2660-2675. doi:10.1002/hyp.13758

Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, G., Sáenz-Rosales, O., Piedra-Marín, G., Fonseca, A., Madrigal, H., . . . Vargas, J. (2017). 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:10.1080/10256016.2016.1193503

Terzer, S., Wassenaar, L., Araguás-Araguás, L., & Aggarwal, P. (2013). Global isoscapes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), 4713-4728. doi:10.5194/hessd-10-7351-2013

Werner, J. (1996). *Introducción a la Hidrogeología* (Primera ed.). Linares, Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León. Obtenido de <http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1080066373/1080066373.PDF>

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Anexos

Anexo 1. Glosario.

Aguas subterráneas: Es agua debajo de la superficie de la tierra que actualmente participa en el ciclo hidrológico o está almacenado de tal modo que puede entrar nuevamente al ciclo.

Cinético/Cinética: La cinética en química estudia las velocidades de las reacciones químicas y los factores que influyen en ellas, como la concentración, temperatura y catalizadores

Empobrecimiento isotópico: Muestras cuya relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o $^2\text{H}/^1\text{H}$ es inferior a la que se aprecia en el patrón, estos valores son negativos, lo que indican baja presencia del isótopo menos abundante (isotopo pesado) en la muestra, respecto al material de referencia.

Enriquecimiento isotópico: Muestra cuya relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o $^2\text{H}/^1\text{H}$ es superior a la que se aprecia en el patrón, estos valores son positivos, lo que indica mayor presencia del isotopo generalmente menos abundante (isotopo pesado) en la muestra, respecto al material de referencia.

Gradiente hidráulico: se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua

Hidrología: Ciencia que estudia las aguas terrestres, su origen, movimiento y distribución en nuestro planeta, propiedades físicas y químicas, interacción en el medio ambiente físico y biológico e influencia en las actividades humanas.

Humedad relativa: La humedad relativa es el porcentaje de saturación de un volumen específico de aire a una temperatura específica. La humedad relativa del aire depende de la temperatura y la presión del volumen del aire analizado y describe la cantidad de agua que se transporta por el aire, importante para determinar el desarrollo de las nubes y el factor precipitación.

Isotopo: Los isótopos son elementos con el mismo número atómico y propiedades químicas similares, pero con diferentes masas atómicas ya que al haber una diferencia de neutrones estos son más pesados.

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Litología: Es la parte de la geología que estudia las características de las rocas que aparecen constituyendo una determinada formación geológica, es decir una unidad litostratigráfica, en la superficie del territorio, o también la caracterización de las rocas de una muestra concreta.

Lluvias convectivas: Lluvias provocadas por una baja presión local, formada por el ascenso de masa de aire cálidas y húmedas en forma de nubes verticales, son lluvias torrenciales, como las tormentas de verano.

Nivel piezométrico: Cota que alcanza el agua en el interior de un sondeo ranurado en un punto de un acuífero confinado.

Orografía: La orografía es la parte de la geografía física que se dedica a la descripción de montañas. A través de sus representaciones cartográficas (mapas), es posible visualizar y estudiar el relieve de una región.

Paleo climáticas: Es una palabra compuesta del griego “paleo”; pasado, antiguo y clima, es el estudio de los climas sucedidos años atrás, hasta épocas geológicas pasadas.

Zona intertropical: La zona intertropical es una franja geográfica imaginaria alrededor del planeta delimitada por el trópico de Cáncer al norte y por el trópico de Capricornio al sur. Su centro es la línea ecuatorial; por ello incluye toda el área tropical.

Zona de convergencia intertropical: Región del globo terrestre donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur, se caracteriza por ser una zona de baja presión, el cual convergen masas de aire cálido y humedad proveniente del norte y del sur de la zona intertropical.

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Anexo 2. Área de estudio.

Figura 19. *Fotografías de Laguna de Tiscapa.*



Fuente: Mario A León Quezada, extraído de Google Earth Pro.

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Figura 20. Vista desde la loma de Tiscapa, al norte, se observa al Lago Xolotlán, y la zona que comprende entre Tiscapa y el Lago.



Fuente: Google Earth Pro

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Figura 21. *Vista del Lago Xolotlán desde el Malecón de Managua.*



Fuente: Propia.

Anexo 3. Datos isotópicos.

Tabla 5. Datos isotópicos de las precipitaciones en las diferentes estaciones meteorológicas.

Fecha	Ubicación	Elevación m.s.n.m	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d-exceso‰
1-7-18	PSA	48	-3.19	-26.00	-0.48
1-8-18	PSA	48	-3.34	-20.70	6.02
1-9-18	PSA	48	-5.41	-33.90	9.38
1-10-18	PSA	48	-9.27	-65.40	8.76
1-12-18	PSA	48	1.72	13.40	-0.36
29-5-19	PSA	48	-8.61	-65.20	3.68
26-6-19	PSA	48	-5.68	-41.30	4.14
31-7-19	PSA	48	-0.87	-6.60	0.36
28-8-19	PSA	48	-4.69	-33.40	4.12
25-9-19	PSA	48	-1.13	-8.30	0.74
30-10-19	PSA	48	-8.41	-59.60	7.68
1-8-18	Las Nubes	941	-6.62	-41.30	11.66
1-9-18	Las Nubes	941	-5.42	-31.60	11.76
1-10-18	Las Nubes	941	-9.95	-68.40	11.2
1-11-18	Las Nubes	941	-4.85	-32.50	6.3
1-12-18	Las Nubes	941	-1.59	0.70	13.42
29-5-19	Las Nubes	941	-8.73	-59.30	10.54
26-6-19	Las Nubes	941	-6.80	-44.30	10.1
31-7-19	Las Nubes	941	-3.59	-16.90	11.82
28-8-19	Las Nubes	941	-5.94	-36.40	11.12
25-9-19	Las Nubes	941	-4.81	-29.00	9.48
30-10-19	Las Nubes	941	-9.26	-61.20	12.88
8-1-18	CIRA/UNAN-Managua	155	0.65	14.60	9.4
9-2-18	CIRA/UNAN-Managua	155	0.23	14.20	12.36
13-2-18	CIRA/UNAN-Managua	155	2.21	23.30	5.62
22-2-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.59	8.40	13.12

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

9-4-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.97	-14.80	8.96
3-5-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.90	-17.60	5.56
7-5-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.56	6.90	11.38
19-6-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.45	-20.60	-1
21-6-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-6.98	-52.90	2.94
26-6-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.68	-21.10	8.34
16-7-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-4.02	-24.00	8.16
18-7-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.89	-2.40	4.72
20-7-18	CIRA/UNAN-Managua	155	0.53	7.70	3.46
30-7-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.03	-17.90	6.34
2-8-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.30	-15.50	2.9
7-8-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.22	-7.60	10.16
9-8-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.70	-8.50	13.1
27-8-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-4.02	-25.10	7.06
3-9-18	CIRA/UNAN-Managua	155	0.95	0.70	-6.9
11-9-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-7.33	-51.60	7.04
16-9-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.81	4.30	10.78
21-9-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.39	-15.10	4.02
24-9-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.87	-23.70	7.26
27-9-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-8.87	-61.50	9.46
1-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.88	-23.00	8.04
2-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-5.85	-39.70	7.1
3-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-11.01	-72.10	15.98
4-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-10.62	-72.90	12.06
5-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-15.52	-105.50	18.66
5-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-16.79	-115.30	19.02
7-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-8.54	-50.80	17.52
12-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-5.30	-39.80	2.6
14-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-8.61	-55.40	13.48
16-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-8.45	-58.60	9

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

17-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-8.42	-57.00	10.36
18-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-13.62	-102.50	6.46
19-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-10.20	-71.70	9.9
21-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-4.02	-25.60	6.56
26-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-1.97	-8.50	7.26
28-10-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.06	-14.40	10.08
10-12-18	CIRA/UNAN-Managua	155	0.00	12.60	12.6
4-11-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.39	2.90	6.02
6-11-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-1.51	-2.50	9.58
29-11-18	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.10	-7.10	9.7
12-4-19	CIRA/UNAN-Managua	155	0.71	7.70	2.02
13-5-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.77	-14.00	8.16
16-5-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-1.99	-5.90	10.02
20-5-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.57	-15.20	5.36
23-5-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-10.55	-69.20	15.2
24-5-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-13.13	-91.80	13.24
27-5-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-13.56	-99.80	8.68
29-5-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-12.13	-86.80	10.24
31-5-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-10.22	-73.50	8.26
3-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-7.01	-46.00	10.08
7-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.50	-12.20	7.8
10-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-5.90	-39.20	8
12-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.44	-22.90	4.62
13-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-6.86	-47.70	7.18
14-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-6.55	-43.70	8.7
18-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.39	3.60	6.72
20-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-1.84	-9.30	5.42
21-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.80	-19.70	2.7
24-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.67	-20.00	1.36
26-6-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-4.27	-28.70	5.46

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

2-7-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.58	1.80	6.44
3-7-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.31	4.70	7.18
8-7-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.41	-18.40	0.88
9-7-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-1.49	-8.90	3.02
11-7-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.53	-16.50	3.74
12-7-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.94	-23.90	7.62
15-7-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-6.98	-42.60	13.24
18-7-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.26	-12.20	5.88
25-7-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.34	-27.70	-0.98
26-7-19	CIRA/UNAN-Managua	155	0.22	5.10	3.34
8-8-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-5.86	-42.00	4.88
12-8-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.62	0.70	5.66
14-8-19	CIRA/UNAN-Managua	155	0.99	11.30	3.38
15-8-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-5.59	-34.20	10.52
16-8-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-6.23	-45.30	4.54
19-8-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-5.36	-39.00	3.88
21-8-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.93	-27.50	3.94
5-9-19	CIRA/UNAN-Managua	155	0.19	7.20	5.68
6-9-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.51	-4.70	-0.62
18-9-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.58	-11.60	9.04
19-9-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.61	-15.60	5.28
20-9-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.65	-16.70	12.5
23-9-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-4.34	-22.40	12.32
24-9-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-6.45	-42.20	9.4
26-9-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-6.43	-42.10	9.34
30-9-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-10.00	-69.30	10.7
1-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-2.82	-11.30	11.26
2-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-9.51	-69.50	6.58
3-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-7.02	-44.90	11.26
7-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-6.04	-35.60	12.72

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

11-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-3.94	-20.00	11.52
14-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-11.45	-82.40	9.2
15-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-9.03	-61.00	11.24
16-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-9.58	-71.10	5.54
17-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-7.28	-50.40	7.84
21-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-4.41	-24.90	10.38
22-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-11.23	-79.20	10.64
23-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-10.96	-79.80	7.88
25-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-4.34	-20.70	14.02
28-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-7.21	-45.90	11.78
31-10-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-4.14	-19.70	13.42
1-11-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-4.19	-21.10	12.42
4-11-19	CIRA/UNAN-Managua	155	-0.24	3.20	5.12
1/7/2018	AIACS	64	-4.11	-24.7	8.18
1/8/2018	AIACS	64	-4	-26.9	5.1
1/9/2018	AIACS	64	-4.6	-27.4	9.4
1/10/2018	AIACS	64	-8.83	-61.9	8.74
1/12/2018	AIACS	64	0.27	6.8	4.64
29/5/2019	AIACS	64	-8.98	-64.7	7.14
26/6/2019	AIACS	64	-6.09	-41.1	7.62
31/7/2019	AIACS	64	-2.65	-15.1	6.1
28/8/2019	AIACS	64	-4.54	-29.30	7.02
25/9/2019	AIACS	64	-3.52	-19.40	8.76
30/10/2019	AIACS	64	-8.10	-53.40	11.4
18/12/2019	AIACS	64	-2.50	-13.40	6.6

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Tabla 6. *Datos isotópicos de Lago Xolotlán.*

Fecha	Sitio	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	d-exceso‰
1/6/1998	Lago Xolotlán	-63.7	-13.11	41.18
1/4/1998	Lago Xolotlán	-54.9	-14.14	58.22
1/4/1998	Lago Xolotlán	-57.4	-14.55	59
1/6/1985	Lago Xolotlán	6.2	1.43	-5.24
15/05/1989	Lago Xolotlán	5.9	1.39	-5.22
01/05/1997	Lago Xolotlán	-4.8	-0.1	-4.00
01/07/1997	Lago Xolotlán	-8.5	-0.48	-4.66
01/10/1997	Lago Xolotlán	-6.9	-0.29	-4.58
01/11/1997	Lago Xolotlán	-6.1	-0.26	-4.02
01/05/1997	Lago Xolotlán	-5.3	-0.16	-4.02
01/07/1997	Lago Xolotlán	-8.7	-0.45	-5.10
01/10/1997	Lago Xolotlán	-8.7	-0.59	-3.98
01/11/1997	Lago Xolotlán	-6.9	-0.25	-4.90
01/05/1997	Lago Xolotlán	-8.5	-0.14	-7.38
01/07/1997	Lago Xolotlán	-8.9	-0.42	-5.54
01/10/1997	Lago Xolotlán	-7	-0.35	-4.20
01/11/1997	Lago Xolotlán	-6.2	-0.21	-4.52
01/05/1985	Lago Xolotlán	8.6	1.95	-7.00
01/05/1997	Lago Xolotlán	-4.4	-0.11	-3.52
01/05/1997	Lago Xolotlán	-4.6	-0.15	-3.40
01/05/1997	Lago Xolotlán	-4.7	-0.12	-3.74
01/05/1997	Lago Xolotlán	-4.7	-0.13	-3.66
01/05/1997	Lago Xolotlán	-4.7	-0.08	-4.06
01/05/1997	Lago Xolotlán	-4.6	-0.13	-3.56
01/05/1997	Lago Xolotlán	-5.1	-0.12	-4.14
01/05/1997	Lago Xolotlán	-5.4	-0.16	-4.12
01/05/1997	Lago Xolotlán	-5.7	-0.14	-4.58
01/05/1997	Lago Xolotlán	-5.4	-0.15	-4.20

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

01/05/1997	Lago Xolotlán	-5.3	-0.03	-5.06
01/05/1997	Lago Xolotlán	-4.7	0.03	-4.94
01/05/1997	Lago Xolotlán	-3.8	0.01	-3.88
01/05/1997	Lago Xolotlán	-2.8	0.25	-4.80
01/05/1997	Lago Xolotlán	-3.3	0.15	-4.50
01/05/1997	Lago Xolotlán	-4.6	-0.04	-4.28
01/05/1997	Lago Xolotlán	-3.5	-0.04	-3.18
01/05/1997	Lago Xolotlán	-6.1	-0.07	-5.54
01/05/1997	Lago Xolotlán	-6.2	-0.17	-4.84
01/05/1997	Lago Xolotlán	-4.7	-0.08	-4.06
01/11/1997	Lago Xolotlán	-7.1	-0.24	-5.18
01/11/1997	Lago Xolotlán	-4.6	-0.15	-3.40
01/11/1997	Lago Xolotlán	-5.2	-0.27	-3.04
01/11/1997	Lago Xolotlán	-5.5	-0.24	-3.58
01/11/1997	Lago Xolotlán	-2.2	-0.19	-0.68
01/11/1997	Lago Xolotlán	-6.3	-0.21	-4.62
01/11/1997	Lago Xolotlán	-5.6	-0.26	-3.52
01/11/1997	Lago Xolotlán	-6.5	-0.21	-4.82
01/11/1997	Lago Xolotlán	-4.7	-0.24	-2.78
01/11/1997	Lago Xolotlán	-5.3	-0.2	-3.70
01/11/1997	Lago Xolotlán	-4.2	-0.24	-2.28
01/11/1997	Lago Xolotlán	-6.5	-0.28	-4.26
01/11/1997	Lago Xolotlán	-8.8	-0.28	-6.56
01/11/1997	Lago Xolotlán	-6.7	-0.16	-5.42
01/11/1997	Lago Xolotlán	-5	-0.25	-3.00
01/11/1997	Lago Xolotlán	-5.4	-0.34	-2.68
01/11/1997	Lago Xolotlán	-6.2	-0.26	-4.12
01/11/1997	Lago Xolotlán	-5.7	-0.24	-3.78
01/11/1997	Lago Xolotlán	-5.8	-0.24	-3.88
31/07/2018	Lago Xolotlán	3.10	1.16	-6.18

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

16/10/2018	Lago Xolotlán	-6.2	-0.07	-5.64
03/04/2016	Lago Xolotlán	6.88	1.17	-2.50
22/05/2019	Lago Xolotlán	5.2	1.69	-8.32
22/05/2019	Lago Xolotlán	4.7	1.56	-7.78
22/05/2019	Lago Xolotlán	4.8	1.57	-7.76
22/05/2019	Lago Xolotlán	4.7	1.44	-6.82
22/05/2019	Lago Xolotlán	6.3	1.98	-9.54
22/05/2019	Lago Xolotlán	4.6	1.68	-8.84
22/05/2019	Lago Xolotlán	3.7	1.5	-8.30
22/05/2019	Lago Xolotlán	4.8	1.4	-6.40
22/05/2019	Lago Xolotlán	4.9	1.41	-6.38
22/05/2019	Lago Xolotlán	4.7	0.9	-2.50

Aporte de las aguas de Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras, utilizando los isótopos ^{18}O y ^2H como trazadores ambientales, 2018-2019.

Figura 22. Totalizador tipo Palmex Rain Sampler RS1.



Fuente: (Rain Sampler Palmex itd, 2019).

Tabla 7. Análisis unidireccional de varianza en rangos de Kruskal-Wallis de los diferentes grupos de aguas subterráneas (GW), estaciones meteorológicas (R-LN, R-CIRA, R-PSA, R-AIACS), Laguna de Tiscapa (LT) y Lago Xolotlán (LX).

Kruskal-Wallis One Way Analysis of Variance on Ranks					
Dependent Variable: Valor isotópico					
Group	N	Missing	Median	25%	75%
GW 53	1	0	-7.290	-7.290	-7.290
GW 50	13	0	-7.200	-7.300	-7.100
GW 49	1	0	-6.570	-6.570	-6.570
GW 47	2	0	-7.055	-7.170	-6.940
GW 42	2	0	-6.795	-7.050	-6.540
GW 39	2	0	-5.545	-6.070	-5.020
GW 37	1	0	-5.990	-5.990	-5.990
GW 33	1	0	-5.340	-5.340	-5.340
GW -22	1	0	-6.600	-6.600	-6.600
R-LN May	1	0	-8.730	-8.730	-8.730
R-LN Oct	2	0	-9.605	-9.950	-9.260
R-PSA May	1	0	-8.610	-8.610	-8.610
R-PSA Oct	2	0	-8.840	-9.270	-8.410
R-AIACS May	1	0	-8.980	-8.980	-8.980
R-AIACS Oct	2	0	-8.465	-8.830	-8.100
R-CIRA May	10	0	-6.558	-12.380	-2.425
R-CIRA Oct	31	0	-8.420	-10.620	-4.340
LT	76	0	-4.575	-5.117	-4.103
LX	70	0	-0.150	-0.250	0.0600

H = 146.436 with 18 degrees of freedom. (**P = <0.001**)

The differences in the median values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = <0.001)

Fuente: Elaboración propia, en Sigmaplot.