



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL
ACUÍFERO QUE ABASTECE EL POZO MUNICIPAL, SANTA CLARA, MUNICIPIO DE VILLA
NUEVA, GUATEMALA**

Carlos Humberto Saravia Alemán

Asesorado por el Msc. Ing. Wener Armando Ochoa Orozco

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL
ACUÍFERO QUE ABASTECE EL POZO MUNICIPAL, SANTA CLARA, MUNICIPIO DE VILLA
NUEVA, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS HUMBERTO SARAVIA ALEMÁN

ASESORADO POR EL MSC. ING. WENER ARMANDO OCHOA OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Inga. María Martha Wolford Estrada
EXAMINADORA	Inga. Nora Leonor Elizabeth García Tobar
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL
ACUÍFERO QUE ABASTECE EL POZO MUNICIPAL, SANTA CLARA, MUNICIPIO DE VILLA
NUEVA, GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 06 de julio de 2020.

Carlos Humberto Saravia Alemán

Ref. EEPFI-660-2020
Guatemala, 6 de julio de 2020

Director
César Ernesto Urquizú Rodas
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial
Presente.

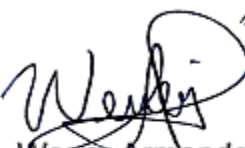
Estimado Ing. Urquizú:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: EDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO QUE ABASTECE EL POZO MUNICIPAL, SANTA CLARA, MUNICIPIO DE VILLA NUEVA, GUATEMALA**, presentado por el estudiante **Carlos Humberto Saravia Alemán** carné número **200615009**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Ciencias en Gestión de Recursos Hidrogeológicos.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Agr. MSc. Wener Ochoa
Catastro 3.558
Mtro. Wener Armando Ochoa Orozco
Asesor


Mtro. Julio Roberto Luna Aroche
Coordinador de Maestría
Gestión de Recursos Hidrogeológicos





Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **EDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO QUE ABASTECE EL POZO MUNICIPAL, SANTA CLARA, MUNICIPIO DE VILLA NUEVA, GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario Carlos Humberto Saravia Alemán, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial





Guatemala, Julio de 2020

DTG. 159.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO QUE ABASTECE EL POZO MUNICIPAL, SANTA CLARA, MUNICIPIO DE VILLA NUEVA, GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Humberto Saravia Alemán**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga Anabella Corchova Estrada
Decana



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Guatemala, abril de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por haberme dado fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida, guiado siempre por el camino correcto.
- Mis padres** Carlos Saravia y Zoila Alemán, por brindarme la vida, darme su apoyo y educarme para ser una persona de bien.
- Mis hermanos** Fredy, Jorge y Lesly Saravia, por enseñarme a ser responsable, acompañarme en la vida y estar en los momentos difíciles a mi lado.
- Mi abuela** María Alemán (q. e. p. d.) por consentirme y brindarme consejos para la vida.
- Mi hijo** Carlos Saravia, por ser la inspiración para seguir adelante.
- Mis padrinos** Edgar De León y Jaime Toledo por los conocimientos compartidos tanto en temas laborales como en el desenvolvimiento personal y el apoyo de seguir adelante siempre.

Familiares y amigos

Luz Chigüichon, Gonzalo Alemán, Verónica Tobar, Bayron González, Raúl Noriega, Héctor y Luis Urías, David Soto, Fernando Torres, Luz Guerra, Calixto Pérez, Luis Castro, Cristopher Aguirre, Byron Tocay, Carlos Cacoj y muchos más que siempre han estado presentes para brindarme su apoyo y cariño incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la <i>alma mater</i> que me permitió nutrirme de conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas	Por brindarme las instalaciones para aprender y en especial al ingeniero Julio Luna que siempre me apoyó en este proceso.
Cooperación Italiana en Guatemala	Por permitirme participar en el Proyecto Agua futura.
Municipalidad de Villa Nueva	Al alcalde y Concejo Municipal, por permitirme realizar el trabajo en sus instalaciones.
Mi asesor	Msc. Ing. Wener Armando Ochoa, por haberme guiado durante el trabajo de graduación.
Mi asesor externo	Msc. Ing. Alan Cosillo, por tener la paciencia para trasmitirme los conocimientos para realizar este trabajo y apoyarme a seguir adelante.
Mis amigos	De la primera cohorte de la Maestría Gestión de Recursos Hidrogeológicos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1. Investigaciones previas.....	6
2.2. Descripción del área de estudio.....	7
2.2.1. Ubicación	7
2.2.2. Localización del área o lugar en estudio	8
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
3.1. Descripción general	13
3.2. Definición del problema	14
3.3. Delimitación del problema.....	15
3.4. Pregunta principal de investigación	15
3.4.1. Preguntas complementarias de investigación	15
4. JUSTIFICACIÓN	17
5. OBJETIVOS	19
5.1. General.....	19
5.2. Específicos	19

6.	NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	21
7.	MARCO TEÓRICO	23
7.1.	Características generales del agua	23
7.2.	Ciclo hidrológico.....	26
7.3.	Hidrología.....	27
7.4.	Agua subterránea.....	27
7.5.	Acuíferos.....	28
7.5.1.	Tipos de acuíferos	30
7.5.2.	Acuitardo	32
7.6.	El ciclo hidrológico y los isótopos ambientales	32
7.6.1.	Interacción de los isótopos durante la precipitación.....	33
7.6.2.	Procesos atmosféricos y la composición isotópica del agua.	35
7.7.	Principales trazadores de la edad del agua (3H, 14C, 36Cl)	35
7.8.	Edad del agua subterránea	37
7.8.1.	Edad másica, media y distribución de edades del agua subterránea	40
7.8.2.	Edad hidráulica.....	42
7.8.3.	Edad cinemática.....	42
7.9.	Composición química del agua subterránea.....	44
7.9.1.	Representación gráfica de la composición química de las aguas subterráneas.....	45
7.9.2.	Diagrama de Piper.....	45
7.9.3.	Diagrama de Stiff.....	47
7.9.4.	Diagrama de Schoeller	48
7.10.	Prueba de bombeo.....	49

8.	HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	51
8.1.	Variable independiente	52
8.1.1.	Variable dependiente	52
9.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO	55
10.	METODOLOGÍA	59
10.1.	Cálculo de nivel piezométrico	59
10.2.	Prueba de bombeo	60
10.3.	Método de Theis	60
10.3.1.	Procedimiento	62
10.4.	Análisis hidrogeológico e hidroquímico	63
10.5.	Fase de campo	66
10.5.1.	Representación espacial	66
10.5.2.	Análisis químicos	67
10.5.3.	Análisis químicos históricos.....	67
10.5.4.	Análisis isotópicos	68
10.6.	Fase de gabinete	68
10.6.1.	Análisis estadístico.....	68
11.	TÉCNICA DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	69
11.1.	Línea meteórica	69
11.2.	Línea meteórica local.....	69
11.3.	Análisis gráfico	69
11.4.	Análisis de componentes principales (ACP).....	69
12.	CRONOGRAMA.....	71
13.	FACTIBILIDAD DE ESTUDIO	73

13.1.	Costos.....	73
13.2.	Análisis FODA.....	74
14.	REFERENCIAS	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ubicación de área en estudio	7
2.	Localización de microcuenca río Platanitos y pozo Santa Clara	8
3.	Isoyetas de la subcuenca del río Platanitos.....	9
4.	Uso de la tierra de la subcuenca del río Platanitos.....	10
5.	Mapa geológico local de la subcuenca del río Platanitos.....	11
6.	Árbol de problemas	16
7.	Forma tetraédrica de la molécula de agua	24
8.	Esquema dipolo de la molécula de agua	25
9.	Enlaces de hidrógeno en el agua	25
10.	Esquema de un sistema hidrogeológico	29
11.	Esquema conceptual que representa la edad del agua	38
12.	Esquema del tiempo de vida de una molécula de agua subterránea	39
13.	Distribución de frecuencia de edades en una muestra de agua	41
14.	Esquema simplificado de acuífero	43
15.	Representación de un diagrama de Piper	46
16.	Representación de diagramas de Stiff.....	47
17.	Representación de un diagrama de Schoeller	48
18.	Esquema de superficie piezométrica-isopiezas	60
19.	Cronograma de actividades.....	71

TABLAS

I.	Relación de la humedad relativa y el efecto fraccionamiento isotópico .	35
II.	Matriz de coherencia.....	53
III.	Costos del estudio	73
IV.	Análisis FODA de la investigación.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
^2H	Deuterio
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
^{14}C	Isótopo carbono14
km	Kilometro
km²	Kilómetros cuadrados
km/h	Kilómetros por hora
M	Metros
m²	Metros cuadrados
μS/cm	Microsiemen
meq/L	Miliequivalente por litro
mg/L	Miligramos por litro
mm	Milímetros
¹⁶O, ¹⁷O, ¹⁸O	Oxígeno 16, 17 y 18
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
^3H	Tritio

GLOSARIO

Acuífero	Un acuífero se define como la formación geológica en la que todos los espacios vacíos están ocupados por agua (saturada). La formación debe ser lo suficientemente permeable para contener cantidades económicas de agua.
Acuífero colgado	Se producen ocasionalmente cuando por efecto de una fuerte recarga, asciende el nivel freático quedando retenida una porción de agua por un nivel inferior impermeable.
Acuífero confinado	También llamados cautivos, a presión en carga: en ellos el agua está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. Si se extrae agua de él, ningún poro se vacía, solo disminuye la presión del agua.
Acuífero libre	También llamados no confinados o freáticos. Entre ellos existe una superficie libre y real del agua almacenada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica.
Acuífero multicapas	Son un caso particular (y frecuente) de acuíferos en los que se suceden niveles de distinta permeabilidad.

Acuífero semiconfinado	Es un acuífero cuyos límites superior e inferior presentan una conductividad hidráulica baja, aunque sí que permiten que una gran cantidad de agua salga del acuífero.
Agua subterránea	Agua que se encuentra bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo o el subsuelo.
Agua superficial	Agua continental con una parte diferenciada y significativa de agua superficial, como un lago, un embalse, una corriente, un río o un canal.
ARL	Laboratorio de Recursos del Aire.
Caudal	Parte del caudal aportado por las reservas de una cuenca, en particular las subterráneas, que se mantiene fuera de periodos de lluvia o de fusión de nieves y que tiende a confundirse con el caudal de agotamiento.
Ciclo del agua	Circulación del agua en el dominio hidrográfico terrestre por evaporación y evapotranspiración (desde masas de agua libre y desde superficies húmedas, hacia la atmósfera) y por condensación y precipitación (desde las nubes, de vuelta hacia masas superficiales).
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.

Cuenca hidrográfica	Territorio cuyas aguas afluyen todas al mar a través de una red de cauces secundarios que convergen en un cauce principal único.
Estado de las aguas subterráneas	Es la expresión general del estado de una masa de agua subterránea, determinado por el peor valor de su estado cuantitativo y de su estado químico.
GDASA	Sistema Global de Asimilación de Datos.
GNIP	Global Network of Isotopes in Precipitation (red global de isótopos en precipitación).
Hidrogeología	Rama de la ciencia geológica que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación.
HYSPLIT	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory.
INE	Instituto Nacional de Estadística.

Isótopos	Son átomos cuyos núcleos atómicos tienen el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones. No todos los átomos de un mismo elemento son idénticos y cada una de estas variedades corresponde a un isótopo diferente.
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica.
OMM	Organización Meteorológica Mundial.
SEGEPLAN	Secretaría de Planificación y de Programación de la Presidencia de Guatemala.
SMOW	Standard Mean Ocean Water.
Subcuenca	Espacio geográfico delimitado dentro de una cuenca en función de sus características hidrológicas propias.
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water.
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical.

RESUMEN

El presente estudio partió de la pregunta central ¿cuál es la edad de las aguas subterráneas en la microcuenca río Platanitos, tomando como referencia el pozo Santa Clara, zona 3 Villa Nueva?, para lo cual se recopiló información de geología local, niveles estáticos, variables biofísicas y climatológicas, toma de muestra del agua subterránea para enviarla al laboratorio certificado para el análisis isotópico respectivo. Los resultados obtenidos fueron que la edad de vida media de estas aguas subterráneas son jóvenes preindustriales desde la perspectiva de la edad holocénica.

Asimismo, se realiza una descripción de la morfología de la microcuenca. El tiempo de vida media del agua subterránea obtenido por medio del análisis radio carbónico de los isotopos de carbono 13 (^{13}C) son importantes para la gestión integrada del agua a nivel municipal.

1. INTRODUCCIÓN

En la microcuenca del río Platanitos se ha presentado la necesidad de perforar pozos más profundos para el aprovechamiento de agua subterránea sin realizar algún tipo de planificación futura o de recarga debido a la expansión poblacional e industrial del municipio de Villa Nueva como lo comprueba Instituto Nacional de Estadística INE (2019), en el censo del año 2018 su población era de 433,734 habitantes. Esto ha motivado a la toma de muestras para el análisis de agua por medio de aplicación de métodos isotópicos de agua subterránea del pozo municipal Santa Clara zona 3 que abastece parte de la población. En el estudio tiene como objetivo de investigación central encontrar y analizar los isótopos de hidrógeno Tritio y Deuterio como el de oxígeno 18. Para lo cual se escogerá el método adecuado y dependerá de varios factores como: el tipo de suelo, patrones de precipitación, exactitud de la muestra, entre otros.

La siguiente investigación presentará los resultados de la edad de vida media de las aguas subterráneas de la microcuenca del río Platanitos del pozo municipal Santa Clara zona 3 de Villa Nueva, Guatemala, que pertenece a la cuenca del lago de Amatitlán. La investigación proporcionará una proyección de tiempo de vida del pozo municipal Santa Clara.

En el primer capítulo se realizará una descripción de la morfología de la microcuenca y de los parámetros más utilizados para el estudio de cuencas; indicando sus ventajas y desventajas; así como, su forma de aplicación.

En el segundo capítulo se explicará el método de uso de isótopos y químico del Pozo Santa Clara en la microcuenca del río Platanitos, sus

aplicaciones y objetivos, características, formas de cálculo y los ensayos que asegurarán la correcta aplicación del método. Se exponen las condicionantes que permiten que la aplicación de este método y su aplicación válida para este proyecto.

En el tercer capítulo se presentarán los resultados de varias pruebas de laboratorio a fin de comprender las condiciones existentes de las aguas subterráneas de la microcuenca del río Platanitos y los resultados de los siguientes ensayos de laboratorio: ensayo físico químico (norma Coguanor 29001) análisis de isótopos de agua (oxígeno 16 y 18, hidrogeno deuterio y tritio).

En el cuarto capítulo se analiza el tiempo de vida media del agua subterránea del pozo Santa Clara de la microcuenca del río Platanitos mediante la realización de los ensayos aplicados con anterioridad a estas aguas.

En el quinto capítulo se concluirá con la discusión de los resultados obtenidos mediante la medición de diversos parámetros físicos, químicos e isotópicos del agua. Se realizarán recomendaciones para el tiempo de vida útil del pozo municipal de Santa Clara de la microcuenca de Villa Nueva, Guatemala.

2. ANTECEDENTES

El presente protocolo de investigación se enmarca en el proyecto Agua Futura de la Cooperación Italiana en Guatemala, que en conjunto con el Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM), la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería y la Universidad de San Carlos Guatemala (USAC) desarrollan.

El área de estudio se delimita específicamente en el pozo municipal Santa Clara zona 3 de Villa Nueva del departamento de Guatemala, con la finalidad de evaluar los aspectos que afectan al recurso hídrico, mediante el estudio de composición isotópica del agua subterránea de la microcuenca del río Platanitos.

En Centroamérica el fenómeno de escasez del agua tiene características distintas que en otras regiones del mundo y se relaciona con la distribución bimodal de la precipitación con máximos en los meses de junio, septiembre y octubre y un mínimo entre los meses de julio y agosto conocido como canícula. Este fenómeno es influenciado por la localización de la zona de convergencia intertropical del pacífico y las fluctuaciones en intensidad, sumado a los vientos alisios, provocando precipitaciones máximas en el caribe y precipitaciones mínimas en la zona costera del Pacífico centroamericano. “Éste fenómeno es asociado al fenómeno ENOS o fenómeno del Niño” (Sánchez, Durán, Birkel, Esquivel y Boll, 2016, p. 5).

En cuanto al fenómeno de escases de agua, (Sánchez *et al.*, 2016) manifiestan que los fenómenos asociados al cambio climático como la sequía afecta cada vez más a los países de Guatemala, Honduras, El Salvador,

Nicaragua, parte del noroccidente de Costa Rica y regiones de Panamá, que se les ha denominado como Corredores Secos, porque integran características ecosistémicas, de bosque tropicales secos, que inician desde el Estado de Chiapas en México y toda las zonas bajas del Pacífico y región central de las montañas de Centroamérica.

Según Sepúlveda e Ibrahim (2013), “Estas sequías son prolongadas, sumado a la variación de los patrones de precipitación y temperatura como consecuencia de la variabilidad climática que azota la región, predice efectos negativos en la agricultura y la seguridad alimentaria del istmo” (p. 6).

En lo que es la Vertiente del Pacífico de Centroamérica, se precipita el 30 % de las lluvias, pero concentra más del 70 % de la población, debido a ello, muchos territorios y poblaciones son afectados por estrés hídrico y cada vez la calidad del agua que reciben los pobladores son de dudosa calidad, tomando en cuenta que la cobertura de agua potable en las zonas rurales apenas alcanza el 42 % y en áreas urbanas un 83 %. (Ballesteros, 2005, p. 56)

Para el caso del municipio de Villa Nueva, uno de los municipios con mayor densidad poblacional del departamento de Guatemala y que se localiza al sur, posee una extensión de 114 km², todo su territorio pertenece a la cuenca del lago de Amatitlán, considerado unos de los municipios con mayor expansión urbana, por su cercanía al municipio de Guatemala, fenómeno que ha promovido el desarrollo de proyectos habitacionales en los últimos años. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística INE (2019), en el Censo del año 2018 su población era de 433,734 habitantes.

Actualmente el agua que se suministra a los pobladores del municipio de Villa Nueva es producida por medio de 46 pozos y 9 rebombeos para las zonas altas con motores de diferentes caballajes desde 2hp hasta 125hp, lo que genera un costo elevado en la energía eléctrica, y la demanda ha provocado desabastecimiento en algunas zonas del municipio. Debido a ello, existe la necesidad de generar estudios y de desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento del agua subterránea afectados por la variación del ciclo hidrológico y la distribución irregular del recurso hídrico (Magrin *et al.*, 2014).

Según Sánchez *et al.*, (2016):

Indica que la comprensión de los patrones de precipitación, sobre todo su distribución espacial y temporal, proporciona más información sobre los procesos hidrológicos regionales y globales y da paso a una mejor planificación y preparación para posibles cambios futuros en el clima, que serán herramientas indispensables para la toma de decisiones en áreas vulnerables a sequías o inundaciones que pueden afectar las actividades socioeconómicas y las agrupaciones ecológicas. (p. 10)

El estudio isotópico son herramientas y metodologías para el estudio de los recursos naturales en especial los recursos hídricos, para la realización de balances hídricos, debido a los cambios naturales de la composición de isótopos en las diferentes fuentes de agua, que varían por su fraccionamiento, provocando procesos complejos de transporte y transiciones en la biosfera, litósfera y atmósfera. Por lo tanto; el estudio de la composición isotópica estable $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ resultan importantes para conocer mejor el ciclo hidrológico, logrando aportes cuando se usan juntamente con los métodos hidrológicos convencionales (Unkovich, Pate, McNeill y Gibbs, 2013).

2.1. Investigaciones previas

Existen investigaciones sobre el uso de isótopos en Centroamérica, uno de los más relevantes es el estudio realizado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en la cuenca del río Lempa que pertenece a la zona del Trifinio entre Guatemala, El Salvador y Guatemala, el cual se evaluó la composición física, química e isotópica del recurso hídrico (Toro, 2007).

Autores como Abarquero y Sánchez han incorporado isótopos en sus investigaciones para comprender la complejidad de los componentes en el ciclo hidrológico, las zonas de recarga de los acuíferos y su relación con las regiones y montañosas.

Según Alvarado (2013): “Otro de los estudios destacados es realizado en el año 2013 por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, en el marco del proyecto *Gobernanza de aguas subterráneas fronterizas*, donde se realizó un inventario del acuífero Esquipulas-Ocotepeque-Citalá” (p. 6).

Según López (2005):

Realiza el estudio sobre hidrogeología de la subcuenca del río Platanitos, Guatemala, e indica que la explotación del agua subterránea para el año 2005, representaba el 77.5 % del recurso temporal, destinado para consumo humano, industrial y agrícola. De acuerdo con el balance hídrico realizado, contaba con una recarga del 27.44 % por la precipitación, y el agua de retorno del acuífero era de 23 millones de metros cúbicos, con una calidad de agua aceptable, donde el 67 % se encontraban dentro del límite aceptable de acuerdo a las Normas COGUANOR, el autor concluye

que son aguas aptas para el consumo humano y se encuentra en un rango de vulnerabilidad media equivalente al 95.64 % del área total. (p. 45)

2.2. Descripción del área de estudio

En los siguientes apartados se realizará la descripción del área en estudio.

2.2.1. Ubicación

El área en estudio se encuentra ubicada en la zona 3, Municipio Villa Nueva, Departamento de Guatemala, a un costado de la carretera que conduce de Bárcenas hacia la Antigua Guatemala en kilómetro 18.1 (figura 1).

Figura 1. Ubicación de área en estudio

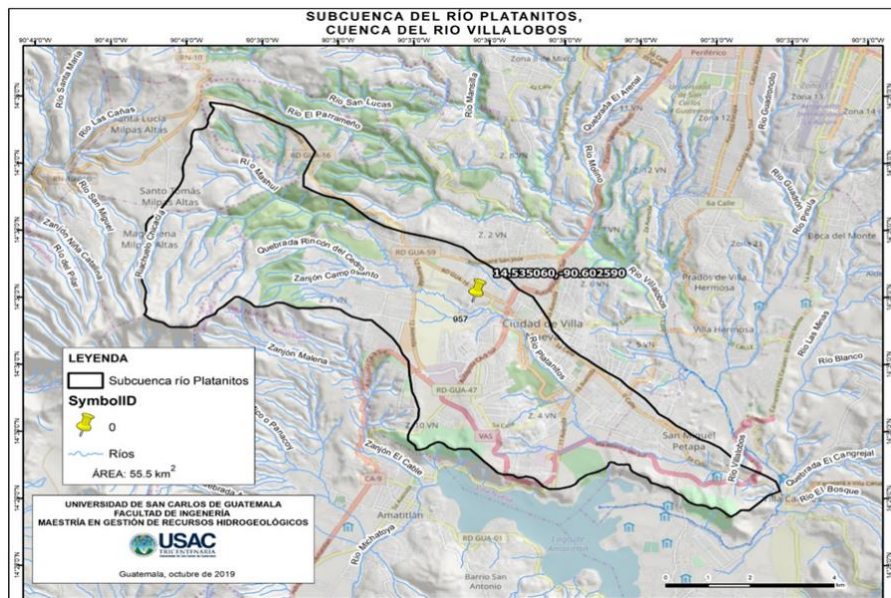


Fuente: Google Maps. (2019). *Zona 3, Municipio Villa Nueva, Departamento de Guatemala*. Consultado el 6 de julio de 2019. Recuperado de <https://www.google.com/maps/search/zona+3,+Municipio+Villa+Nueva,+Departamento+de+Guatemala/@14.5577118,-90.6439873,12z/data=!3m1!4b1>.

2.2.2. Localización del área o lugar en estudio

El área en estudio se encuentra localizada en la microcuenca del río Platanitos, que tiene un área de 55.5 kilómetros cuadrados, ubicado en los municipios de Villa Nueva y San Miguel Petapa, departamento de Guatemala. Se encuentra a una altura de 1,225 metros sobre el nivel del mar en la parte más baja y en la parte más alta a 2047 metros sobre el nivel del mar. El pozo municipal Santa Clara se ubica a una latitud $14^{\circ}32'06.2''$ norte y una longitud de $90^{\circ}36'09.3''$ oeste. En la dirección siguiente: Kilometro 18.1 carretera a Bárcenas Villa Nueva (figura 2).

Figura 2. Localización de microcuenca río Platanitos y pozo Santa Clara

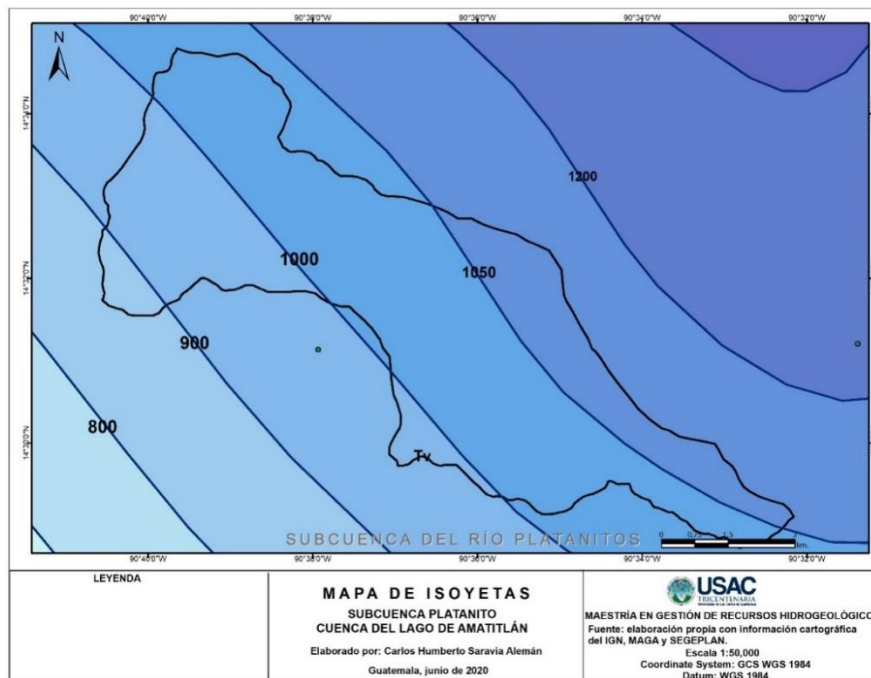


Fuente: elaboración propia.

La precipitación promedio anual se puede observar en la (figura 3) y se encuentra en el rango de 900 a 1,050 milímetros) según los registros de la base

de datos de la Secretaría de Planificación y de Programación de la Presidencia (SEGEPLAN, 2020) de Guatemala en su Unidad del Sistema Nacional de Información Territorial (Sinit) del Geoportal Electrónico Infraestructura de Datos Espaciales de Guatemala (IDEG). Estos datos serán fundamentales para realizar el balance hidrogeológico.

Figura 3. **Isoyetas de la subcuenca del río Platanitos**

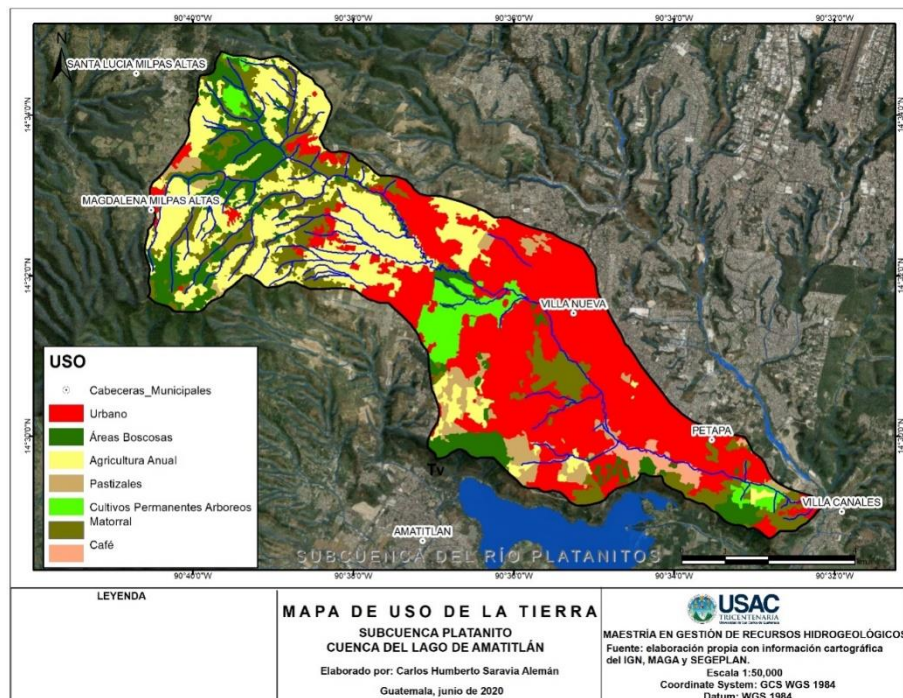


Fuente: elaboración propia.

Ha considerado que del balance hídrico de suelos el total de la precipitación 90 % escurre y el resto se evapora. En los centros poblados el 60 % es impermeable y el área restante es permeable, considerando que las calles pavimentadas y se estima un 40 % de área verde (López, 2005).

El uso de suelo en la actualidad (figura 4) es evidente el avance urbano en el sector (color rojo) principalmente en las áreas de los municipios de Villa Nueva y San Miguel Petapa. Representa una oportunidad en la parte alta donde el uso es principalmente agrícola y áreas boscosas como zonas potenciales de recarga natural a través del suelo y del fallamiento del lugar, lo que plantea esta investigación cuanto tiempo le toma al agua de lluvia en llegar al acuífero.

Figura 4. **Uso de la tierra de la subcuenca del río Platanitos**

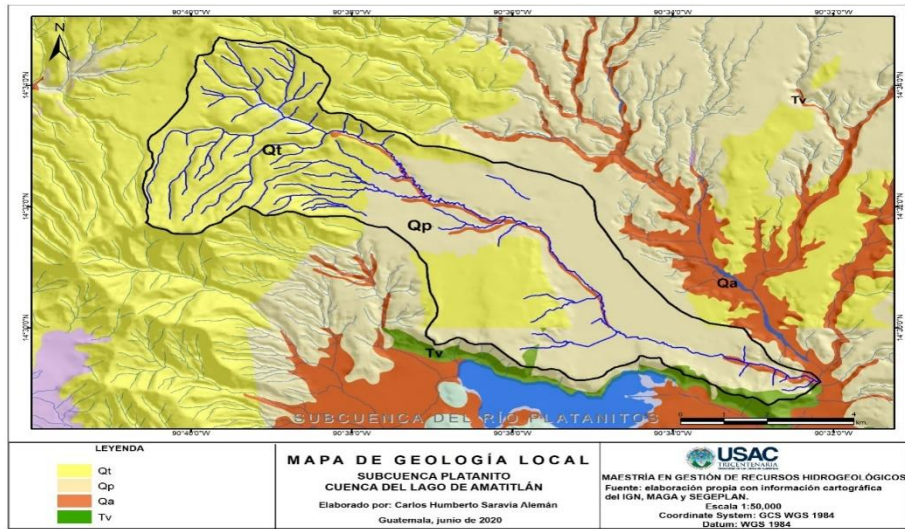


Fuente: elaboración propia.

Segeplan (2020) menciona que Geoportal (IDEG) presenta la geología local de la subcuenca, está constituida de origen volcánico como se puede observar en la (figura 5) con los principales tipos de roca como lo son:

- Qt: Tefra, pómez gris a blanco y ceniza gris a negra interestratificada con paleosols.
- Qa: Aluvión y coluvión.
- Qp: Pómez de dacita y riodacita. Complejo volcán de Pacaya.
- Tv: Rocas volcánicas. Andesita gris oscura.

Figura 5. **Mapa geológico local de la subcuenca del río Platanitos**



Fuente: elaboración propia.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se describirán aspectos por los cuales se realiza el trabajo de investigación en el pozo de Santa Clara de la microcuenca del río Platanitos.

3.1. Descripción general

En el municipio de Villa Nueva, más de un 95 % de los sistemas de abastecimiento de agua potable se alimentan de pozos y manantiales; en 1960 había pozos poco profundos para riego y consumo local de los parceleros, el pueblo se abastecía del cauce del río Platanitos, que debido al crecimiento urbano, estos han desaparecido.

El aumento de la densidad poblacional del municipio de Villa Nueva, representa un crecimiento urbano significativo que impermeabilizando la zona de recarga hace que cada vez se perfore un pozo en búsqueda de agua subterránea y se tenga que realizar a mayor profundidad porque no se cuenta con estudios de aguas subterráneas del lugar.

Las actividades residenciales y productivas que se dan en las zonas altas y medias de la cuenca comprometen y limitan seriamente la calidad del agua en la parte baja, obligando a la población de las zonas a la explotación del recurso subterráneo como alternativa de abastecimiento perforando el pozo Santa Clara zona 3. Este hecho también hace dirigir la atención para conocer el estado de los acuíferos, a través de estudios especializados que permitan caracterizar y determinar la disponibilidad a futuro del recurso.

3.2. Definición del problema

El pozo municipal Santa Clara zona 3 Villa Nueva, es una de las principales fuentes de abastecimiento del área urbana del municipio de Villa Nueva. Su área de distribución es: la zona 1, 4 y 6 que de acuerdo con el censo del INE (2018), tiene una población de (16,712; 80,075 y 36,462) 133,249 habitantes. Las características del área destinada a realizar los estudios son de vital importancia por la posición geográfica del pozo de extracción de agua de donde se bombea hacia el centro del municipio.

La falta de una normativa y de un estudio isotópico de aguas subterráneas ha hecho que la microcuenca del río Platanitos tenga un uso de suelo desordenado. Existe un crecimiento de áreas industriales, comercios y desarrollos habitacionales, provocando un estrés hídrico en los acuíferos que abastecen el municipio, que ante una sobreexplotación del agua subterránea creará un desabastecimiento del agua para uso doméstico.

Lo anterior supone que la investigación dará una base práctica para la determinación del tiempo de vida media de las aguas subterráneas del pozo, lo que ayudará a que se puedan plantear más investigaciones a nivel nacional sobre las aguas subterráneas de diferentes cuencas y microcuencas.

Ante el crecimiento poblacional y comercial, se ha determinado que los pozos ubicados en la microcuenca fueron perforados sin tener un registro isotópico y en muchos de los casos sin estudio hidrogeológico. Es el caso del Pozo Santa Clara que fue perforado en el año 1988 sin registro de proyección de 40 años de la disponibilidad de agua subterránea en la microcuenca del río Platanitos, sin tomar en cuenta la población que habita actualmente y sin proyección futura.

3.3. Delimitación del problema

El estudio se pretende realizar en el pozo municipal Santa Clara que se ubica el área de la microcuenca del río Platanitos de 55.5 km², zona 3, del municipio de Villa Nueva Departamento de Guatemala, durante los meses de marzo a agosto del año 2020, por medio de observación y recolección de datos.

3.4. Pregunta principal de investigación

¿Cuál es la edad de las aguas subterráneas en la microcuenca río Platanitos, tomando como referencia el pozo Santa Clara, zona 3 Villa Nueva?

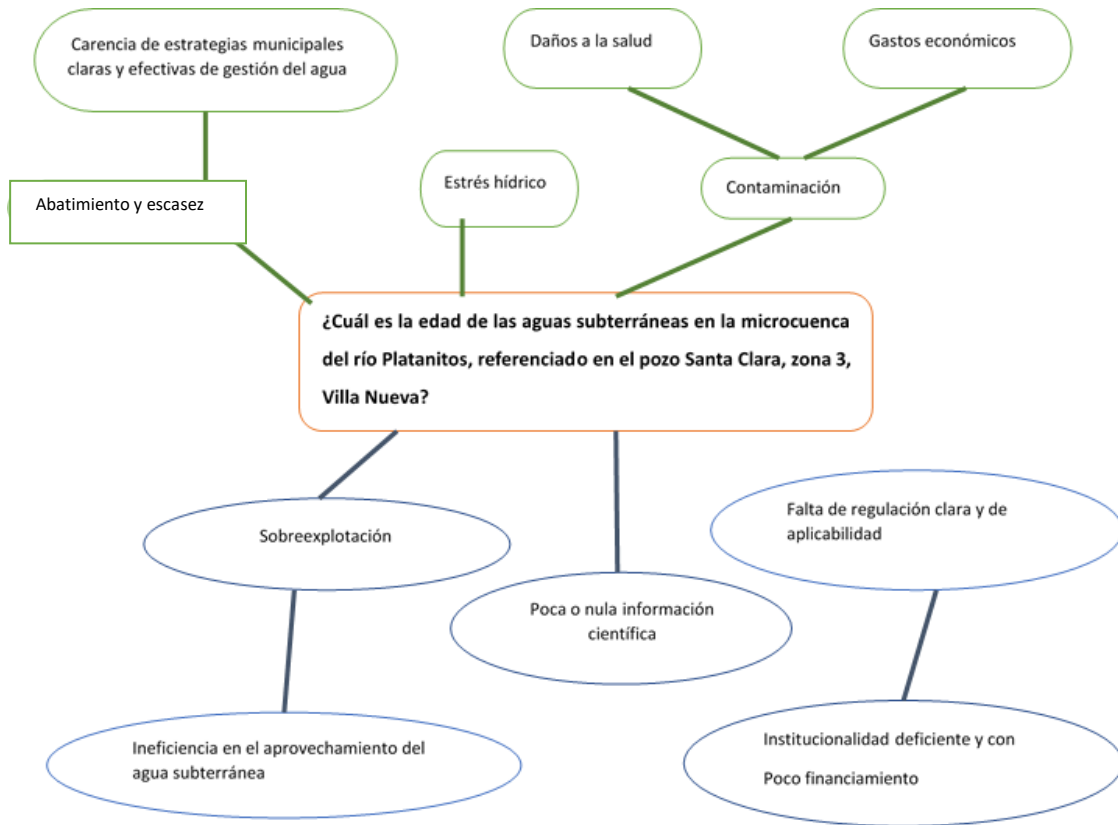
3.4.1. Preguntas complementarias de investigación

- ¿Cómo afecta la impermeabilización, densidad poblacional y mayor extracción de agua en la cuenca del pozo Santa Clara zona 3 Villa Nueva?
- ¿Cuáles son los métodos de extracción de las aguas subterráneas?
- ¿Qué disponibilidad de agua tendrá el acuífero que abastece el pozo Santa Clara?
- ¿Cuál es el tiempo de vida media de las aguas subterráneas?
- ¿Qué directrices pueden orientar la gestión sostenible del agua subterránea?

Con la investigación se pretende determinar cuánto tiempo le toma al agua de lluvia infiltrarse hasta el manto acuífero o zona saturada y su extracción por

medio del estudio isotópico de agua, lo que representa una innovación en el ámbito local y nacional para poder planificar a futuro cuánta población puede abastecer una microcuenca o cuenca.

Figura 6. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

4. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala, el deterioro de los recursos naturales ha incrementado significativamente en los últimos años, principalmente por la demanda de los mismos. Aunque es multicausal dicho deterioro, el crecimiento poblacional y el desarrollo socioeconómico juegan un papel significativo, aunado a las condiciones de extrema pobreza que prevalecen en el país, la contaminación y otros factores que ejercen significativa presión.

El agua es un recurso de vital importancia en la economía del país, principalmente para la vida humana. En párrafos posteriores se hará mención de como el recurso se ve disminuido significativamente año tras año debido a los efectos de la sobre explotación hídrica.

Para el estudio de las aguas subterráneas existen varios factores como; clima, tipo de suelo, entre otros. Por tanto, el factor de tiempo de vida media que tardan las aguas de lluvia en llegar al manto acuífero del municipio de Villa Nueva se hace fundamental para poder planificar el buen manejo y gestión de uso del agua subterránea que se ha convertido en un bien aprovechable para el desarrollo con enfoque de sostenibilidad.

El aporte de dicha investigación consiste en determinar cuánto tiempo le toma al agua de lluvia infiltrarse hasta el manto acuífero o zona saturada y su extracción por medio del estudio isotópico de agua, lo que representa una innovación en el ámbito local y nacional para poder planificar a futuro cuánta población puede abastecer una microcuenca o cuenca.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar el tiempo de vida media de las aguas subterráneas del acuífero del pozo Santa Clara zona 3 del municipio de Villa Nueva, departamento de Guatemala.

5.2. Específicos

- Determinar la evolución piezométrica en el acuífero del pozo Santa Clara zona 3.
- Interpretar la composición fisicoquímica del pozo.
- Identificar los impactos en la calidad del agua de pozos de abastecimiento.
- Establecer el tiempo de vida media de las aguas subterráneas del acuífero.
- Definir directrices estratégicas para la gestión sostenible del agua subterránea.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Las necesidades se pretenden cubrir utilizando las siguientes variables, que permiten a través de sus procesos un desarrollo correcto del esquema para plantear soluciones.

- Tipo de investigación: longitudinal porque permite dar una idea de cómo se relacionan en la realidad las variables de estudio a partir de medirlas varias veces (antes-después).
- Nivel de la investigación en cuanto a su carácter: exploratoria y descriptiva.
- Posibles usuarios por beneficiar: municipalidad de Villa Nueva y usuarios de agua potable, empresas e instituciones gubernamentales y academia.
- Solución: los escenarios generados en este estudio contribuirán con información científica para la determinación de la edad de las aguas, la vulnerabilidad del acuífero y la calidad física química del agua del pozo Santa Clara, siendo una de las principales fuentes de abastecimiento del municipio.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Características generales del agua

El agua es la sustancia con mayor importancia en el planeta Tierra, y esto hace que sea único dentro del Sistema Solar hasta el momento.

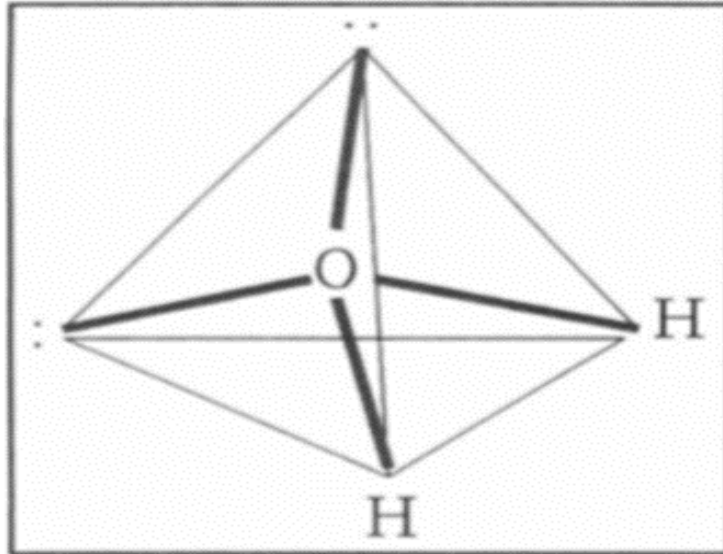
Raya (2003) indica que el agua “Es indispensable para la vida y es el responsable del régimen climático global” (p. 25).

“De acuerdo con las características moleculares del agua, aunado a las condiciones de temperatura y presión del planeta, puede presentarse en los tres estados: líquido, sólido y gaseoso” (Glock, 2015, p. 68).

“El agua es una estructura heterogénea y fluida de moléculas, compuesto por grupos moleculares y de iones H^+ y OH^- .” (Glock, 2015, p. 69)

Cuando dos átomos de hidrógeno se unen con uno de oxígeno para formar la molécula de agua, el hidrógeno aporta su único electrón, combinándose con los seis del oxígeno alcanzan los ocho.

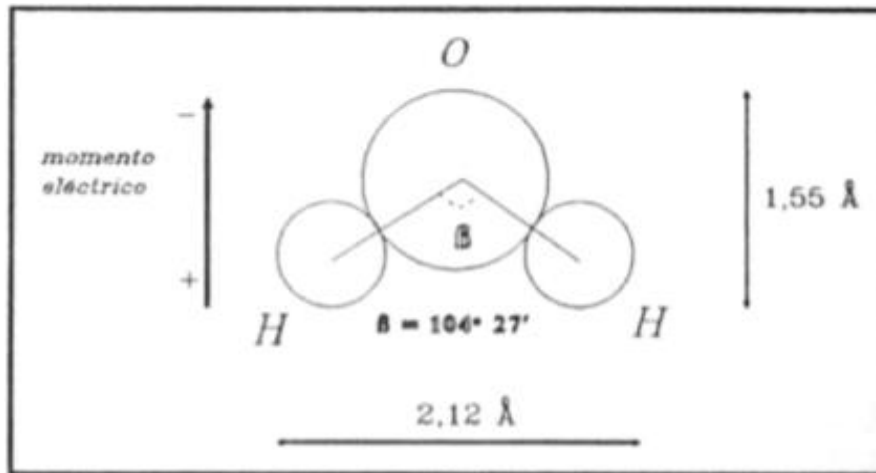
Figura 7. **Forma tetraédrica de la molécula de agua**



Fuente: Pérez y Espigares. (1995). *Estudio sanitario del agua*.

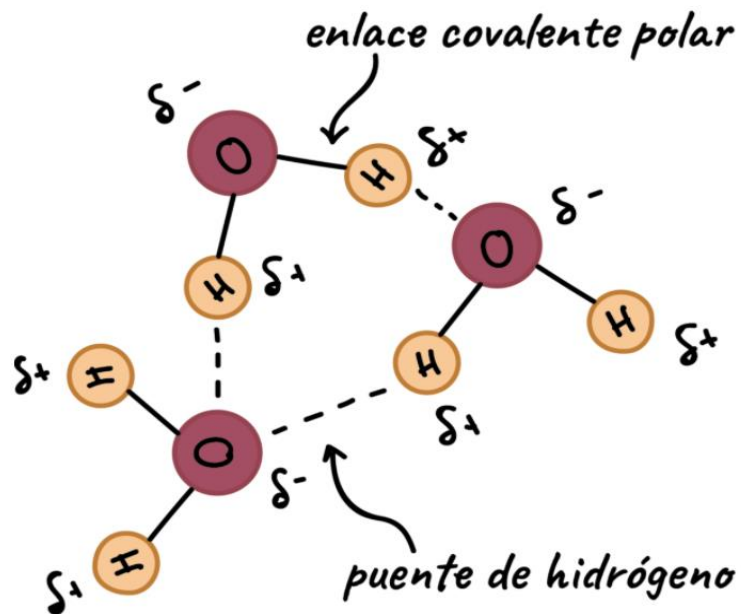
La electronegatividad del oxígeno determina una gran atracción hacia los átomos del hidrógeno, formando un dipolo eléctrico (figura 7). Estos dipolos tienen una atracción entre sí, integrando agrupaciones de moléculas de aproximadamente 100 unidades, que se unen por enlaces de hidrógeno, en agua líquida o en hielo, con fuerzas parecidas en magnitud de Van Der Waals (figura 8). Para romper estos enlaces, es necesario aplicar fuerzas mayores a las necesarias.

Figura 8. Esquema dipolo de la molécula de agua



Fuente: Pérez y Espigares. (1995). *Estudio Sanita* (Kazemi G., Lehr J. H., Perrochet P., 2006) *rio del agua*.

Figura 9. Enlaces de hidrógeno en el agua



Fuente: Khan. (2020). *Los puentes de hidrógeno en el agua*. Consultado el 10 de julio de 2019. Recuperado de <https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/chemistry-of-life/structure-of->

La densidad del agua líquida es mayor en un 10% del de agua sólida, es lo que lo diferencia de los demás compuestos, este fenómeno reside en la propiedad de las moléculas de agua de atraerse mutuamente, y a los 4° C, temperatura alcanza su máxima densidad (para H₂ y 16O). Estas propiedades fisicoquímicas son únicas por ende son gran trascendencia para el desarrollo de la vida. El efecto termorregulador en los seres vivos está en función de su alta capacidad calorífica, valor de calor de fusión y evaporación.

7.2. Ciclo hidrológico

Por su parte, Raya (2003) “El ciclo hidrológico se puede definir como la circulación global del agua entre la superficie terrestre, los océanos y la atmósfera” (p. 25).

Los procesos más importantes que se producen en ella son la evaporación, transpiración, condensación, precipitación, acumulación, infiltración y escorrentía.

Desde los mares y océanos se genera constantemente vapor por el calentamiento solar, que se incorpora a la atmósfera es transportado por los vientos y al enfriarse, este vapor de agua se condensa en partículas de agua que forman nieblas y nubes, posteriormente se precipitan en forma de lluvia, nieve o granizo. Después de que se precipite, una parte escurre y se infiltra recargando los acuíferos, y otra parte nuevamente se evapora para mantenerse en el aire y el resto regresa a los océanos y continentes.

El agua que se precipita al suelo de los continentes va a seguir diferentes rutas:

- Se almacena en la superficie, en forma de charcos y lagunas.
- Escorrentía superficial, que va alimentando el cauce de los ríos, lagos o los mares.
- Infiltración, una parte del agua penetra dentro del suelo y alimentando el subsuelo.

En resumen el ciclo hidrológico es un sistema abierto, con entradas y salidas, con un motor principal que es la energía solar que evapora y eleva el agua, y que gracias a la gravedad hace que, una vez condensado el vapor, precipite y circule hacia los lugares más bajos.

7.3. Hidrología

“La hidrología es la ciencia que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades fisicoquímicas y su relación con el ambiente y seres vivos” (Chow, 1964, p. 23).

La hidrología se divide en hidrología superficial e hidrología subterránea o hidrogeología.

7.4. Agua subterránea

El agua subterránea se encuentra bajo la superficie terrestre, en formaciones geológicas que se conocen como acuíferos, y su desplazamiento depende de las propiedades físicas y químicas de las rocas que lo componen. Se mueve desde zonas de recarga hasta zonas de descarga; su velocidad es lento que va de 1 m/año hasta cientos de m/año. Debido a las tasas del flujo lento

y los tiempos de residencia largos, se producen grandes volúmenes de almacenamiento.

“El agua subterránea puede ser aprovechada mediante perforaciones manuales o mecánicas, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie” (Tuinhofeta *et al.*, 2006, p. 4)

“El agua adquiere su composición química mediante un proceso donde intervienen factores geológicos, fisicoquímicos, hidrogeológicos, climáticos, antrópicos y otros” (Fagundo, 2005, p. 36).

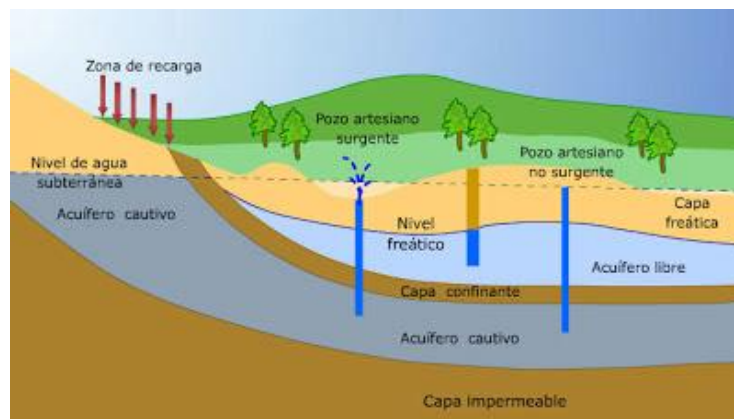
7.5. Acuíferos

Expresa que los acuíferos es el medio rocoso en donde se mueve el agua subterránea, compuestos por rocas con características que transportan cantidades de agua económicamente aprovechables; que cumplen funciones de conducción de agua subterránea y almacenamiento, como medio de intercambio geoquímico, el agua subterránea se desplaza desde elevaciones altas a bajas y desde ubicaciones de presión alta hasta presiones más bajas. Por lo general, este movimiento es bastante lento. (Werner, 1996, p. 25)

En cuanto a los acuíferos, Harte (2003) explica que se clasifican en no confinados y confinados. Cuando hay niveles múltiples de acuíferos, el acuífero más alto típicamente no está confinado. En cuanto al acuífero no confinado se expone que la recarga vertical de un se da por agua de lluvia o agua de riego que se filtra hacia abajo a través del suelo.

La capa freática del acuífero no confinado puede migrar libremente hacia arriba y hacia abajo dentro, dependiendo de la cantidad de agua almacenada allí. El nivel de agua en un pozo perforado y en un acuífero no confinado estará a la misma profundidad que el nivel freático en el acuífero. (Werner, 1996, p. 8)

Figura 10. **Esquema de un sistema hidrogeológico**



Fuente: Taylor. (2001). *Ground-water-level monitoring and the importance of long-term water-level data.*

“El proceso de infiltración hacia el subsuelo sobrelleva una serie de procesos de interacción entre el agua y la roca, logrando un equilibrio con el acuífero y se logra por medio de reacciones entre el agua y el sólido” (Díaz, 2001, p. 27).

La composición isotópica, cuando se infiltra al subsuelo, las aguas subterráneas cambian su composición isotópica solo en la medida en que se produce la mezcla con otras aguas. A diferencia de los marcadores medioambientales radiactivos, la composición isotópica de los elementos

estables no depende básicamente del tiempo ni se establecen escalas de tiempo; ayudan a resolver razones sobre el origen del agua y el contenido de mezcla, que funcionan igual que los trazadores químicos, como la salinidad.

“Los trazadores isotópicos suelen tener ventajas prácticas de una mayor variabilidad de la composición y de interacciones menores con el suelo y el material rocoso, siempre que las temperaturas no sean demasiado altas” (Gat y Gonfiantini, 1981, p. 226).

7.5.1. Tipos de acuíferos

De acuerdo con Foster, Tuinhof, Kemper, Garduño, y Nanni (2006) un acuífero es una formación geológica que almacena volúmenes de agua que se mueven con facilidad a través de él y es capaz de suministrar agua subterránea a pozos y manantiales.

Están sujetos a la gran variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación y escurrimiento y a la importante variación horizontal de los perfiles del suelo, así como a sus condiciones hidrogeológicas. Pueden estar presentes en estratos con alta o baja permeabilidad, y las capas superiores confinan las aguas subterráneas, provocando cierto aislamiento de la superficie del terreno, pero no del sistema de agua subterránea en general.

Según las formaciones hidrogeológicas se clasifican de la siguiente manera de acuerdo con el tipo de acuíferos:

- Acuífero libre

Son los que están limitados por una capa confinante en la base del acuífero, el nivel estático se encuentra a presión atmosférica, asciende y desciende libremente y se recarga directamente de las precipitaciones.

“La composición química de las aguas que se mueven en este tipo de acuífero refleja las propiedades litológicas del mismo”. (Fagundo, 2005, p.14)

- Acuífero confinado

Cuentan con una capa impermeable suprayacente, se encuentra confinado entre dos acuitardos que no permite la infiltración directa, sino a partir del deslizamiento de agua de una zona distante donde el material acuífero es alimentado por la infiltración de las precipitaciones.

La composición química de las aguas que corren en los acuíferos confinados es constante y no refleja las propiedades del material rocoso del lugar, sino del material que forma parte de su zona de alimentación. La presión del agua regularmente es mayor que la atmosférica, al perforar un pozo de un acuífero confinado el agua se elevará por encima del nivel del acuífero o por encima del nivel del terreno. (Fagundo, 2005, p. 14)

- Acuífero semiconfinado

Es una formación permeable saturada, cuyo límite superior está constituido por una capa semipermeable llamada acuitardo y cuyo límite inferior puede ser una capa impermeable o semipermeable. El agua es

libre de moverse a través de los acuitardos en sentido vertical, hacia arriba o hacia abajo. (Villón, 2007, p. 63)

7.5.2. Acuitardo

El acuitardo es una unidad geológica con menor permeabilidad dentro de una secuencia estratigráfica. Contiene apreciables cantidades de agua y la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el aprovechamiento de agua subterránea; sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical hacia otros acuíferos. (Freeze y Cherry, 1979, p. 86)

7.6. El ciclo hidrológico y los isótopos ambientales

En todo el sistema terrestre están compuestos naturalmente por cierta cantidad de isótopos que son elementos químicos con el mismo número atómico, pero diferente masa y solo algunos tienen importancia práctica.

Los principales isótopos que componen los sistemas hidrológicos, geológicos y biológicos son el H, C, N, O, P y S; los cuales han aumentado dada la especialización de los equipos y métodos de análisis. Ahora, los isótopos han abierto una nueva gama para el estudio del ciclo hidrológico. (Reyes-García y Andrade, 2007, p. 21)

Los isótopos naturales H₂O¹⁶, HDO¹⁶ y H₂O¹⁸, son componentes intrínsecos de la molécula de agua. Se reparten selectivamente en cada paso del ciclo hidrológico, desde la evaporación primaria sobre los océanos, pasando por la condensación y la precipitación hasta la recarga de aguas subterráneas y la escorrentía hacia los mares.

“Los isótopos proporcionan huellas características del origen y la historia del agua. Esta huella digital es la base de la hidrología isotópica” (Gat y Gonfiantini, 1981, p. 241).

En cuanto a la composición isotópica del agua, Gat y Gonfiantini (1981) explican que su mayor cambio ocurre cuando se presenta en la atmósfera durante el ciclo hidrológico y en aguas superficiales, expuestas a la atmósfera.

El suelo y el agua subterránea adquieren o guardan una marca isotópica al infiltrarse.

“El estudio de la composición isotópica del agua ($\delta^{18}\text{O}$ o $\delta^2\text{H}$) y su uso como trazadores naturales en el ciclo hidrológico ayuda en la identificación de diferentes masas de agua, su dinámica y el rastreo de sus interrelaciones” (Hernández *et al.* 2015, p. 393).

Cuando los isótopos son estables, presentan ligeramente diferencias entre sus propiedades físicas y químicas y requieren energía para los cambios de fase. Estos cambios ocurren en varias escalas dentro del ciclo hidrológico de la tierra, resultando en cambios relativos de su distribución espacio-temporal (Salazar, 1966).

7.6.1. Interacción de los isótopos durante la precipitación

Para Araguas, Froehlich y Rozanski (2000) las variaciones de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en el vapor de agua atmosférico a partir del fraccionamiento de isótopos durante la evaporación del océano y la posterior condensación durante la formación de lluvia ocurren casi exclusivamente en la parte atmosférica del ciclo hidrológico, incluida la superficie de la Tierra.

Cuando el agua ingresa al suelo debajo de una zona no saturada, la composición isotópica permanece en el desplazamiento y almacenamiento sub superficial.

Taylor y Alley (2001) afirman: “aunque una tormenta individual puede ser grande e isotópicamente muy diferente de la del agua vieja en la cuenca, la cantidad de precipitación que se infiltrará probablemente sea pequeña en comparación con la cantidad de agua vieja almacenada” (p. 51).

Otros autores han confirmado lo siguiente:

Considera que los principales procesos hidrológicos que afectan la huella digital isotópica del agua son:

- Formación primaria de vapor atmosférico por evaporación bajo diferentes situaciones de humedad.
- Condensación en nubes y precipitación a lo largo de un gradiente de temperatura.
- Evaporación de suelos y aguas superficiales, que enriquece el agua residual en ambos isótopos.
- Mezcla de aguas en la superficie o subsuelo, un proceso que a menudo ocurre en pozos abiertos que pueden conectar y muestrear zonas de acuíferos poco profundos. (Gat y Gonfiantini, 1981, p. 23)

En aguas superficiales y subterráneas, las aguas tienen firma isotópica que pueden identificar su origen, cuando estas aguas se evaporan cambian su firma isotópica, que se debe a la pérdida de isótopos en la fracción de vapor (tabla I).

Tabla I. **Relación de la humedad relativa y el efecto fraccionamiento isotópico**

Pendiente	3.9	4.2	45	5.2	6.8	8
Humedad	0	25 %	50 %	75 %	95 %	100 %

Fuente: Clark y Peter (1997).). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*.

7.6.2. **Procesos atmosféricos y la composición isotópica del agua.**

La distribución temporal y espacial de los isótopos de la precipitación en Centroamérica y América, está regida por los océanos del Atlántico, Caribe y Pacífico, en las cuencas evaporativas, en la zona de convergencia intertropical y cadenas montañosas que liberan flujos de aires que promueven la condensación de la humedad.

“La composición isotópica del $\delta^{18}\text{O}$, varía dentro de un rango relativamente estrecho entre -2 ‰ y -7 ‰. Sus valores medios siguen de cerca la Línea de Agua Meteorológica Global (WML); aunque se pueden observar desviaciones localmente significativas” (Rozanski y Araguás, 1995, p. 381).

7.7. **Principales trazadores de la edad del agua (3H, 14C, 36Cl)**

Los trazadores isotópicos son sustancias químicas correspondientes a isótopos estables o radiactivos que, aplicados al campo de la hidrogeología, sirven para datar aguas subterráneas.

De acuerdo con Davies *et al.* (1985) el trazador es una sustancia o energía transportada por el agua subterránea que puede proveer información respecto a la dirección del movimiento y / o velocidad del agua. En general se buscan trazadores que se muevan con la misma velocidad y dirección del agua subterránea y que no interactúen con el medio acuífero.

Otros autores afirman lo siguiente:

El tritio ^3H es un isótopo radiactivo del hidrógeno que se produce de manera natural o antrópica. Naturalmente se genera por acción de los rayos cósmicos con el nitrógeno y el oxígeno de la atmósfera superior a bajas concentraciones 0.20 átomos de ^3H cm^2 . S^{-1} . La actividad del hombre ha liberado una gran cantidad de tritio en la atmósfera durante los ensayos nucleares. (Torres, 2002, p. 2583)

En ambos casos es arrastrado por la precipitación. Una vez que ingresa al acuífero con el agua de recarga comienza a desintegrarse a ^3He . Su concentración suele medirse en unidades de tritio (UT) que es el número de núcleos de tritio por cada 10^{18} núcleos de hidrógeno estable.

Para Mook (2002) El isótopo radiactivo del carbono es el ^{14}C se forma de manera natural y antrópica. Naturalmente se produce en la atmósfera superior por acción de los rayos cósmicos (neutrones), los cuales reaccionan con el nitrógeno. Artificialmente se produce debido a los ensayos nucleares que han añadido una considerable concentración de este isótopo en la atmósfera. Con un periodo de semidesintegración de 5730 años, tiene el potencial de datar aguas de hasta 40000 años. (p. 148)

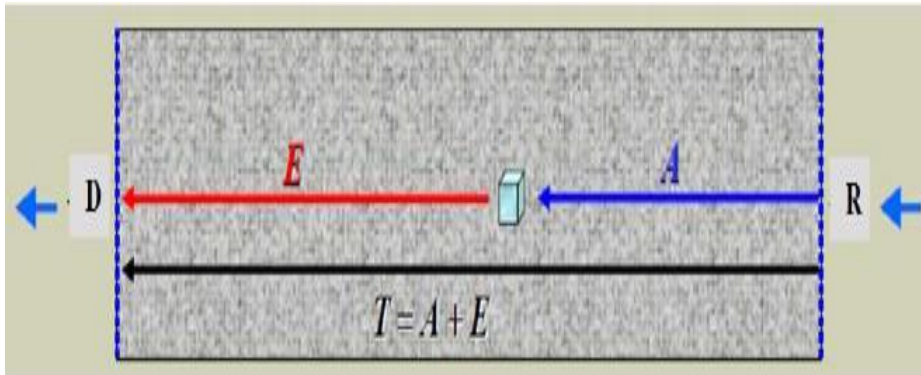
Sin embargo, al no formar parte de la molécula de agua es transportado, su contenido en las especies carbonatadas disueltas en el agua es función de tres factores: tiempo con una fuente de carbono moderno, proporción de carbonos activos que el agua ha disuelto en la zona no saturada, y fenómenos que alteran su actividad en el agua subterránea tales como la disolución de carbonatos minerales, intercambio isotópico, oxidación de materia orgánica y reducción de sulfatos, entre otros.

El ^{36}Cl es un isótopo del cloro que se produce de manera natural y antrópica. Naturalmente se produce en la atmósfera principalmente por la partición del ^{40}Ar , K y Ca bajo el efecto de la componente protónica de la radiación cósmica y mediante la activación del ^{36}Ar por los neutrones inducidos por la misma radiación; y a través de la producción profunda de las rocas. La producción artificial del ^{36}Cl está ligada a las explosiones nucleares atmosféricas y más precisamente a la activación neutrónica del ^{35}Cl tras las explosiones nucleares.

7.8. Edad del agua subterránea

En la literatura existe una gran variedad de términos para referirse al tiempo de vida de una molécula de agua subterránea. Como lo puede ser la edad de vida media del agua subterránea o como lo plantea. Los tres más comúnmente utilizados por la comunidad científica son: la edad del agua, la esperanza de vida del agua, la edad del agua y el tiempo de residencia del agua los que se esquematizan en la (figura 11).

Figura 11. **Esquema conceptual que representa la edad del agua**



Fuente: (Kazemi *et al.*, 2006). *Groundwater Age*.

- Edad del agua: es la cantidad de tiempo que ha transcurrido desde que una molécula de agua de interés particular fue recargada en el acuífero hasta que esta molécula alcanza una localización específica donde es muestreada físicamente.
- Esperanza de vida: es la cantidad de tiempo que ha de transcurrir para que una molécula de agua se desplace desde una localización específica donde es muestreada físicamente hasta la zona de descarga del acuífero.
- Tiempo de residencia: es el tiempo que le toma a una partícula de agua en viajar desde el área de recarga hasta el área de descarga del acuífero.

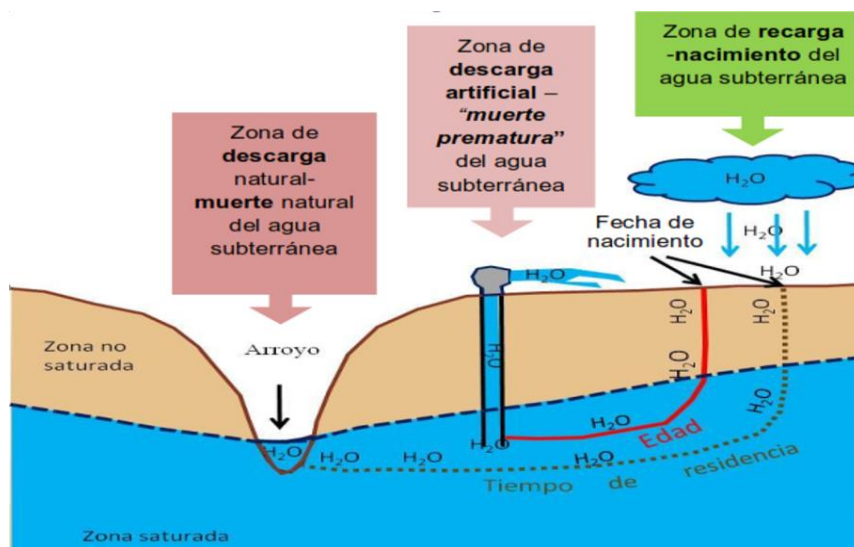
De acuerdo con Varni y Cabrera (1998) estas definiciones lo que la mayoría de los investigadores miden es la edad del agua subterránea, y no su tiempo de residencia. Es importante puntualizar que la medición de la edad del agua posee incertidumbres y limitaciones asociadas al tiempo de viaje en la zona no saturada, técnicas disponibles de medición, complejidad del flujo y transporte

y fenómenos de mezcla, obtención de datos representativos, la heterogeneidad del medio y el hecho de que la mayoría de los isótopos utilizados para datación no son parte de la molécula de agua, sino que son solutos.

Otros autores como Varni, Goode y Carrera (1998) adicionaron una nueva dimensión al concepto de edad del agua subterránea. En las mismas se explica que la edad del agua subterránea es una propiedad intrínseca de la molécula de agua y no un soluto, tal como lo son otros parámetros como la conductividad eléctrica (CE) y la temperatura.

Basados en las definiciones anteriores, la fecha de nacimiento de una molécula de agua subterránea, esto es edad cero, es la fecha en la cual la molécula entra en el acuífero a través del proceso de infiltración (figura 12).

Figura 12. **Esquema del tiempo de vida de una molécula de agua subterránea**



Fuente: Kazemi, et al. (2006). *Groundwater Age*.

El lugar de formación del agua subterránea es el área de recarga del acuífero, o en cualquier localización en la superficie de la tierra donde las moléculas de agua son provistas con las condiciones requeridas para infiltrarse al acuífero.

Las moléculas de agua subterránea mueren cuando dejan el acuífero a través de la descarga directa, la evaporación o la extracción desde un pozo de bombeo. Términos como renacimiento o regeneración pueden ser más apropiados (comparados a muerte) para describir tales situaciones. (Kazemi et al 2006, p. 179)

7.8.1. Edad másica, media y distribución de edades del agua subterránea

La edad másica A_M puede definirse como el producto entre la edad media de una muestra de agua subterránea con su masa:

$$A_M = A_m \cdot \rho \cdot V$$

Donde A_m es la edad media (T), la densidad (M/L³) y V (L³) el volumen de la muestra. Este concepto muestra que, para muestras de agua subterránea con muchas fracciones de diferente edad, el promedio de edades puede ser engañoso, por lo tanto, lo que debe ser contabilizado es el promedio de masas de edad

Además, las edades presentes en la muestra de agua subterránea pueden ser descritas por una distribución estadística o distribución de edades, dando la frecuencia de ocurrencia de una edad particular en la muestra, como se esquematiza en la (figura 12).

Figura 13. **Distribución de frecuencia de edades en una muestra de agua**



Fuente: Cabrera, *et al.* (2014). *Cuadernos de uso y manejo de aguas subterráneas*. Consultado el 12 de octubre de 2014. Recuperado de <https://www.unrc.edu.ar/unrc/comunicacion/editorial/repositorio/978-987-688-106-7.pdf>.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la edad media o la edad medida por métodos isotópicos es prácticamente el promedio de edades de todas las moléculas en la muestra.

Como se aprecia en la (figura 9) la distribución de edades en la zona de descarga de un acuífero (distribución de tiempos de residencia) es una función de la organización de las rutas de flujo dentro del acuífero, donde cada ruta de flujo relaciona una edad específica, como así también una descarga específica en la salida del acuífero.

Kazemi *et al.* (2006) en el caso de captaciones a distinta profundidad, se puede apreciar como la edad del agua es condicionada por la hidrodinámica y las características geológicas y estructurales. El tiempo de residencia medio en la zona de descarga es además un promedio de cada edad específica ponderada por la correspondiente descarga específica. Estadísticamente hablando, la edad media es el primer momento de la distribución de edades, es decir el promedio.

Por lo tanto, muchas distribuciones de edades diferentes pueden ciertamente resultar en la misma edad media. Si se quiere describir la edad de una muestra dada, es necesario entender el tipo de distribución estadística de edades la muestra; esto puede ser únicamente hecho por simulación a través de modelos matemáticos.

7.8.2. Edad hidráulica

Es posible calcular la edad tanto de aguas jóvenes como muy viejas con base a la ley de Darcy, y usando gradientes hidráulicos medidos, porosidad efectiva y conductividad hidráulica. En un acuífero con flujo horizontal y sin recarga a lo largo de la línea de flujo, tal como lo es un acuífero confinado, la edad del agua subterránea en cualquier punto a lo largo de la línea de flujo es la distancia desde la recarga dividido por la velocidad del agua subterránea. (Nittman, 2014, p. 96)

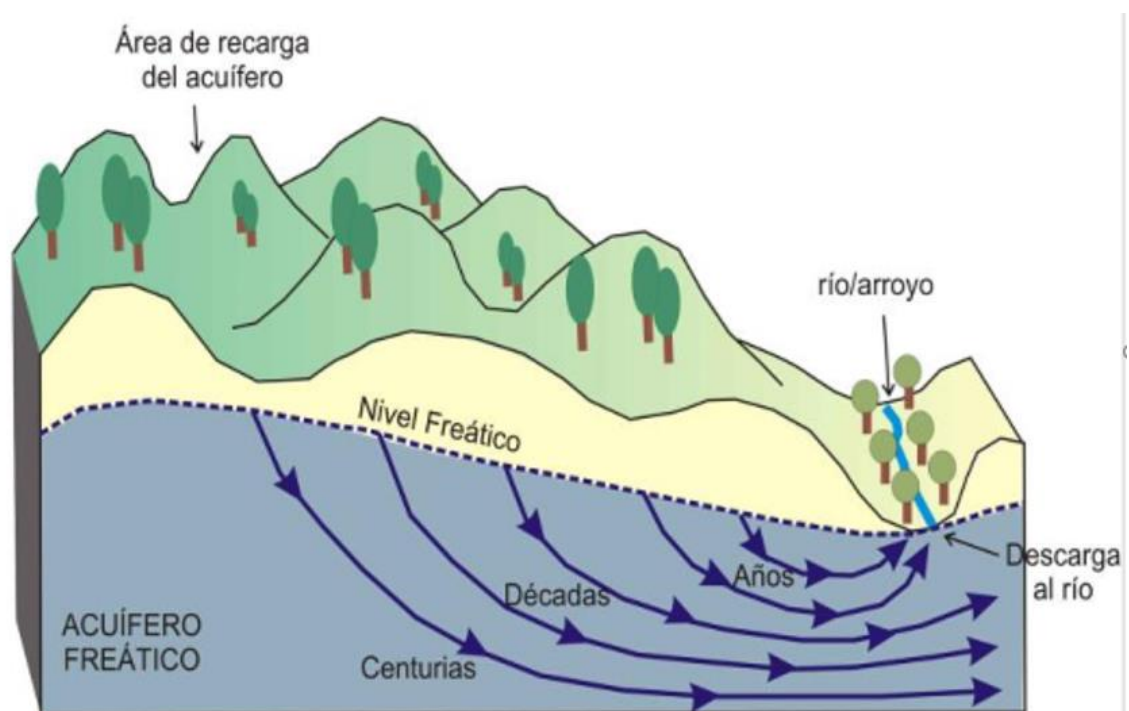
7.8.3. Edad cinemática

De acuerdo con Kazemi *et al.* (2006) es aquella que asume que las moléculas de agua subterránea sólo se mueven por advección, lo que significa que su desplazamiento es únicamente gobernado por el campo de velocidades

del flujo, siendo despreciables otros procesos de transporte tales como la dispersión hidrodinámica y la difusión molecular.

Como se muestra en la (figura 10), en este concepto las moléculas de agua subterránea viajan estacionariamente desde el área de recarga del acuífero hacia el área de descarga como un paquete aislado siguiendo una línea de flujo, con mínima turbulencia y sin ninguna interferencia e intercambio con las moléculas que hay a su alrededor (figura 14).

Figura 14. **Esquema simplificado de acuífero**



Dirección simplificada de las líneas de flujo para las moléculas (no existe mezcla)

Fuente: Cabrera, *et al.* (2014). *Cuadernos de uso y manejos de aguas subterráneas*. Consultado el 12 de octubre de 2014. Recuperado de <https://www.unrc.edu.ar/unrc/comunicacion/editorial/repositorio/978-987-688-106-7.pdf>.

La edad de cualquier molécula de agua subterránea depende únicamente de la evolución de la velocidad de poro a lo largo de una línea de flujo dada, e ignora la evolución de la edad del agua subterránea cercana.

7.9. Composición química del agua subterránea

Güler, Thyne, McCray y Turner (2002) señalan que “El agua subterránea adquiere su composición química donde intervienen varios factores que incluyen fisicoquímica, geomorfológicos, geológicos, las precipitaciones, hidrogeológicos, climáticos, antrópicos y otros” (p. 458).

El agua subterránea está constituida por nueve iones principales (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NO_3^- y SiO_2) que conforman el 99 % del contenido soluto en las aguas subterráneas naturales; la concentración de cada ion depende de la trayectoria del flujo de agua subterránea, la evolución hidrogeoquímica respectiva y el tipo de roca que forma el acuífero. (Foster *et al.*, 2006, p. 3)

Los trazadores representan el 1 % de los constituyentes disueltos presentes en el agua subterránea en forma natural, sin embargo, varios de estos elementos trazadores son esenciales en pequeñas cantidades para la salud humana. Los elementos traza que constituyen el agua subterránea son: V, Se, As, Cd, Co, Ni, Cr, Pb, Al, Li, Ba, Cu, Mn, U, I, P, B, Br, Fe, y Zn; es importante mencionar que no todos están siempre presentes en el agua.

La composición de las aguas naturales está definida por características fisicoquímicas como: el pH mide el grado de acidez o basicidad del agua, la temperatura que presenta un estado de equilibrio calorífico en el acuífero y depende de la conductividad térmica e hidráulica y del nivel freático.

Los sólidos disueltos totales (SDT) miden el peso de las sustancias disueltas en el agua que determinan la conductividad del medio; la conductividad eléctrica es una manera de medir la capacidad del agua para transportar la corriente eléctrica así como el contenido de especies iónicas en el agua; la dureza corresponde a la presencia de cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} y se expresa en mg/L de CaCO_3 ; la alcalinidad se define como la capacidad de neutralizar ácidos que está influenciada por el pH, temperatura y fuerza iónica. (Vargas, 2004, p. 33).

7.9.1. Representación gráfica de la composición química de las aguas subterráneas

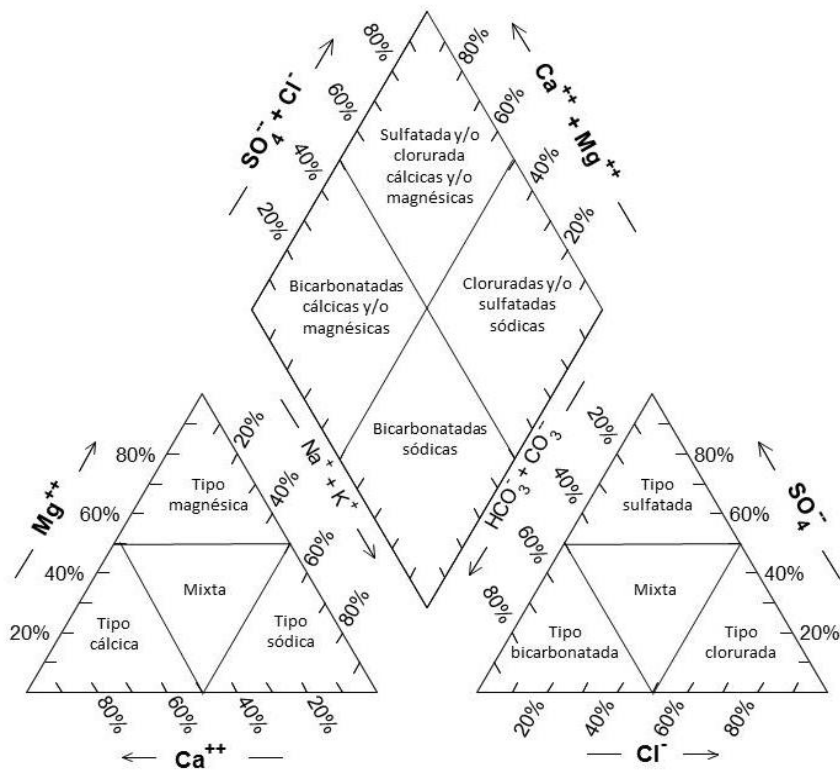
Fagundo, *et al.* (2005) expone que los datos hidroquímicos se pueden representar de manera gráfica, siendo una herramienta muy eficaz para interpretar y comparar las propiedades del agua. También permite notar el comportamiento y evolución de un agua en un territorio determinado y a través del tiempo. Existen diversos métodos gráficos que muestran la composición química del agua subterránea como son: diagramas de columnas triangulares, circulares, poligonales, logarítmicas. Los diagramas más utilizados son diagrama de Stiff, diagrama de Piper y diagrama de Schoeller. Cada uno presenta ventajas y limitaciones específicas.

7.9.2. Diagrama de Piper

Es un diagrama triangular, compuesto por dos triángulos equiláteros en que se representa, respectivamente, la composición aniónica y catiónica del agua de que se trate y un campo central romboidal en que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Es necesario reducir las concentraciones de los iones,

expresadas en mili equivalentes/litro a % y sólo se pueden reunir en cada triángulo tres aniones y/o tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anióno catión. Como aniones se suelen representar: HCO₃, SO₄, Cl, y NO₃, comocaciones Na⁺,K⁺,Ca²⁺yMg²⁺. (Fagundo, *et al.*, 2005, p. 65)

Figura 15. Representación de un diagrama de Piper



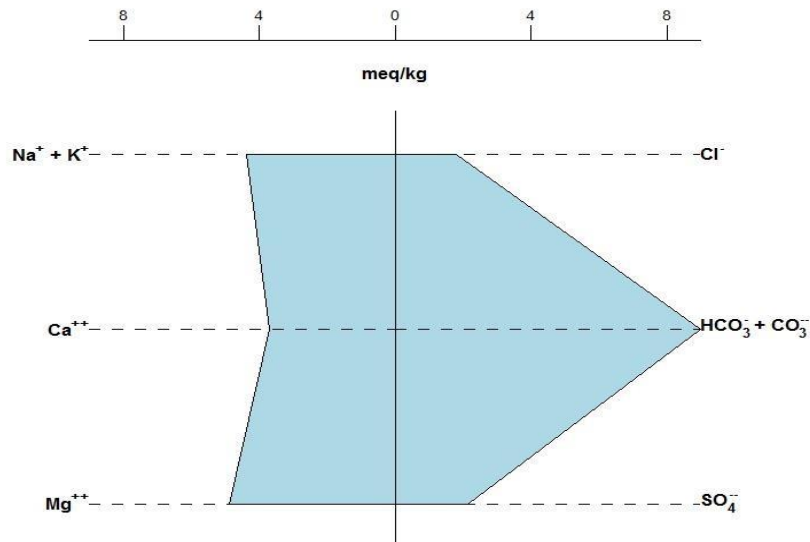
Fuente: elaboración propia.

7.9.3. Diagrama de Stiff

Este diagrama se refiere a la construcción de polígonos que se sitúan sobre un mapa para ubicar la distribución geográfica de la composición de las aguas.

Se forman con 3 ejes paralelos hacia la izquierda (cationes) y otros tres hacia la derecha (aniones). La distancia entre los ejes horizontales es arbitraria, simplemente estética, y la escala elegida en horizontal dependerá de la salinidad de las aguas de la región estudiada. La longitud y escala se establecen a partir del análisis de concentraciones más elevadas. Se sitúan las concentraciones en cada uno de los seis ejes en meq/L y después se unen formando un polígono (Fagundo, *et al.*, 1996, p. 63)

Figura 16. Representación de diagramas de Stiff

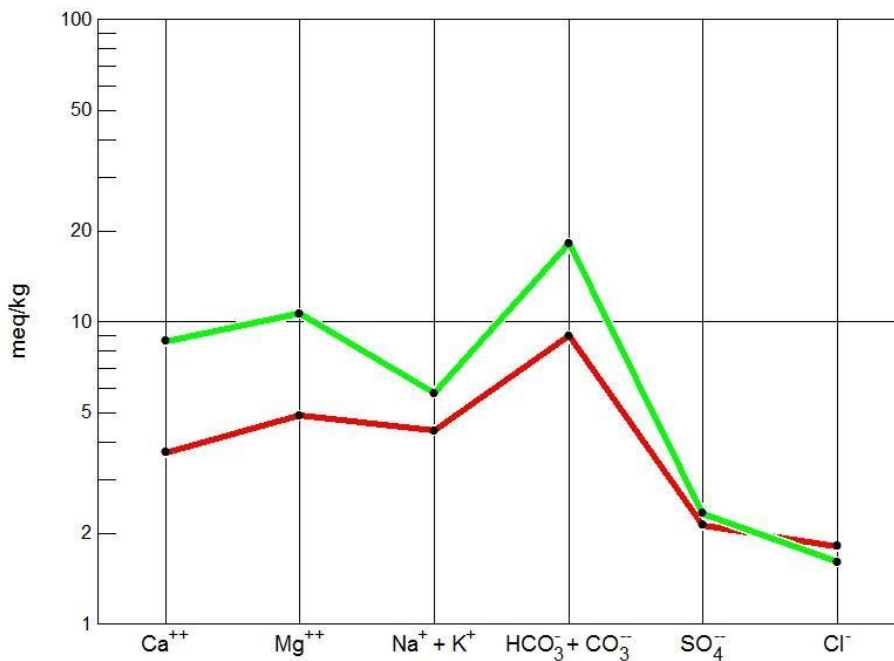


Fuente: elaboración propia.

7.9.4. Diagrama de Schoeller

Este diagrama dispone de varias columnas paralelas y verticales, divididas y espaciadas en una escala logarítmica, a cada recta se le asigna un catión o un anión, excepto en la primera columna que no tenga asociada un ion, cada dato de cationes y aniones se representan por una secuencia de puntos, en cada eje, conectados por una línea recta formando un perfil. (Fagundo, 2005, p. 66)

Figura 17. Representación de un diagrama de Schoeller



Fuente: elaboración propia.

7.10. Prueba de bombeo

Una de las formas preferentes de solución, sigue siendo el ajuste a curvas tipo, que ha sido una solución ampliamente difundida desde su desarrollo, aunque actualmente existen métodos numéricos, redes neuronales o algoritmos genéticos. La interpretación de una prueba de bombeo es un problema de identificación de un sistema desconocido. Esta identificación incluye gráficas de diagnóstico tipo semilogo log-log del abatimiento-tiempo o del abatimiento-distancia. Las gráficas, son específicas para un régimen de flujo y un tipo de acuífero.

8. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

El tiempo de residencia de las aguas subterráneas del acuífero del pozo de Santa Clara, zona 3 del municipio de Villa Nueva departamento de Guatemala, es mayor a 10 años. Lo cual contribuirá a las estrategias de manejo y administración del recurso para satisfacer la demanda en las zonas 1, 2 y 3 del municipio, además debido a la sobreexplotación que altera su disponibilidad, composición química y física. Esta hipótesis se formula partiendo de la premisa que considera que las aguas más profundas son más antiguas mientras que las que se encuentran menos profundas tienen menos tiempo de edad.

Actualmente, ante la contaminación y sobre explotación del recurso hídrico y las amenazas del cambio climático en el mundo, el agua subterránea es una fuente estratégica de agua para los diversos usos que tiene, por lo tanto; juega un papel de suma importancia más allá del ámbito municipal y nacional a escala global. Conocer el tiempo de vida media de las aguas subterráneas del acuífero del pozo en mención, permitirá realizar una gestión eficaz y eficiente de este recurso hídrico.

Con esta información científica se llegará a conocer el momento preciso en el cual se infiltró el agua que se extrae del acuífero en mención y esto ayudará a definir su origen y las estrategias a seguir para garantizar el abastecimiento del agua.

8.1. Variable independiente

El tiempo de vida media de las aguas subterráneas del acuífero.

8.1.1. Variable dependiente

La disponibilidad de agua para abastecer la demanda del pozo de Santa Clara zona 3 del municipio de Villa Nueva.

Tabla II. Matriz de coherencia

PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	MARCO TEÓRICO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES
Ante el crecimiento industrial, comercial y poblacional, falta de una normativa, abatimiento y escasez del recurso hídrico, gastos en el mantenimiento y en la búsqueda de oferta del recurso en mención y el desconocimiento de la edad del agua subterránea, es necesario conocer dicha edad para aportar a la sostenibilidad del pozo santa clara en el mediano plazo.(10	Determinar el tiempo de vida media de las aguas subterráneas del acuífero del pozo Santa Clara zona 3 del municipio de Villa Nueva, departamento de Guatemala.	Hidrología Agua subterránea Acuíferos El ciclo hidrológico y los isótopos ambientales Principales trazadores de la edad del agua (3H, 14C, 36Cl) Edad del agua subterránea Composición química del agua subterránea Prueba de Bombeo	El tiempo de residencia de las aguas subterráneas del acuífero del pozo de Santa Clara, zona 3 del Municipio de Villa Nueva departamento de Guatemala, es mayor a 10 años. Lo cual contribuirá a las estrategias de manejo y administración del recurso para satisfacer la demanda en las zonas 1, 2 y 3 del municipio, además debido a la sobreexplotación que altera su disponibilidad, composición química y física. Esta hipótesis se formula partiendo de la premisa que considera que las aguas más profundas son más antiguas mientras que las que se encuentran menos profundas tienen menos tiempo de edad.	Variable Independiente: El tiempo de vida de las aguas subterráneas del acuífero. Variable Dependiente: La disponibilidad de agua para abastecer la demanda del pozo de Santa Clara zona 3 del municipio de Villa Nueva.	Capacidad del acuífero Lluvia Análisis físico-químicos Niveles estático y dinámico Análisis isotópicos Pruebas de campo
PREGUNTA PRINCIPAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS				
¿Cuál es la edad de las aguas subterráneas en la microcuenca río Platanitos, tomando como referencia el pozo Santa Clara zona 3 Villa Nueva?	Determinar el tiempo de vida media de las aguas subterráneas del acuífero del pozo Santa Clara zona 3 del municipio de Villa Nueva, departamento de Guatemala.				

Continuación tabla II.

PREGUNTAS SECUNDARIAS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	MARCO TEÓRICO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES
<p>¿Cómo afecta la impermeabilización, densidad poblacional y mayor extracción de agua en la cuenca del pozo Santa Clara zona 3 Villa Nueva?</p> <p>¿Cuáles son los métodos de extracción de las aguas subterráneas?</p> <p>¿Qué disponibilidad de agua tendrá el acuífero que abastece el pozo Santa Clara?</p> <p>¿Cuál es el tiempo de vida media de las aguas subterráneas?</p> <p>¿Qué directrices pueden orientar la gestión sostenible del agua subterránea</p>	<p>Identificar los impactos en la calidad del agua de pozos de abastecimiento</p> <p>Establecer el tiempo de vida media de las aguas subterráneas del acuífero</p> <p>Definir directrices estratégicas para la gestión sostenible del agua subterránea</p>		<p>Actualmente, ante la contaminación y sobre explotación del recurso hídrico y las amenazas del cambio climático en el mundo, el agua subterránea es una fuente estratégica de agua para los diversos usos que tiene, por lo tanto; juega un papel de suma importancia más allá del ámbito municipal y nacional a escala global. Conocer el tiempo de vida media de las aguas subterráneas del acuífero del pozo en mención, permitirá realizar una gestión eficaz y eficiente de este recurso hídrico. Con esta información científica se llegará a conocer el momento preciso en el cual se infiltró el agua que</p>		

Fuente: elaboración propia.

9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

1. INTRODUCCIÓN

2. ANTECEDENTES

2.1. Investigaciones previas

2.2 Descripción del área de estudio

2.2.1 Ubicación

2.2.2 Localización del área o lugar en estudio

3. OBJETIVOS

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Características generales del agua

4.2. Ciclo hidrológico

4.3. Hidrología

4.4. Agua subterránea

- 4.5. Acuíferos
 - 4.5.1. Tipos de acuíferos
 - 4.5.2. Acuitardo
- 4.6. El ciclo hidrológico y los isótopos ambientales
 - 4.6.1. Interacción de los isótopos durante la precipitación
 - 4.6.2. Procesos atmosféricos y la composición isotópica del agua.
- 4.7. Principales trazadores de la edad del agua (3H, 14C, 36Cl)
- 4.8. Edad del agua subterránea
 - 4.8.1. Edad másica, media y distribución de edades del agua subterránea
 - 4.8.2. Edad hidráulica
 - 4.8.3. Edad cinemática
- 4.9. Composición química del agua subterránea
 - 4.9.1. Representación gráfica de la composición química de las aguas subterráneas
 - 4.9.2. Diagrama de Piper:
 - 4.9.3. Diagrama de Stiff:
 - 4.9.4. Diagrama de Schoeller:
- 4.10. Prueba de bombeo

5. METODOLOGÍA

- 5.1 Cálculo de nivel piezométrico
- 5.2 Prueba de bombeo
- 5.3 Método de Theis
 - 10.3.1 Procedimiento
- 5.4 Análisis hidrogeológico e hidroquímico
- 5.5 FASE DE CAMPO
 - 10.5.1 Representación espacial
 - 10.5.2 Análisis químicos

10.5.3 Análisis químicos históricos

10.5.4 Análisis isotópicos

5.6. Fase de gabinete

10.6.1 Análisis estadístico

6. RESULTADOS

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

10. METODOLOGÍA

10.1. Cálculo de nivel piezométrico

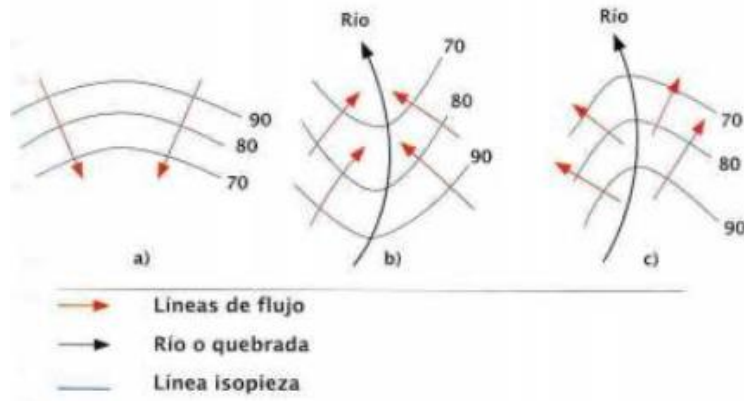
El nivel piezométrico, llamado también cabeza hidráulica, representa la energía mecánica del fluido por unidad de peso y es un parámetro medible en cualquier punto del sistema de flujo subterráneo. Controla el movimiento del agua subterránea, puesto que siempre la dirección de flujo será de zonas de mayores cabezas piezométricas a zonas con menores cabezas de presión y la cabeza de elevación, siempre se expresa respecto a un dato o nivel de referencia.

En donde:

$$H = z + \frac{P}{\rho g}$$

- H: nivel piezométrico o cabeza hidráulica.
- Z: cabeza de elevación.
- P / ρg : cabeza de presión.

Figura 18. **Esquema de superficie piezométrica-isopiezas**



Fuente: Vélez, *et. al* (2011). *Las aguas subterráneas*.

10.2. Prueba de bombeo

Una prueba de bombeo o prueba hidráulica, es un método de análisis de uno o varios pozos de captación de aguas subterráneas y del acuífero en que se encuentran, se aplica a las captaciones tipo pozo. La metodología de su realización es simple, consiste en bombear los pozos y sondeos, a caudal constante o a caudal variable, siguiendo la evolución del nivel del agua, debida al bombeo, tanto en el mismo pozo de bombeo como en otros pozos cercanos, cuando se disponga de estos para observación.

10.3. Método de Theis

Theis (1935) desarrolló una fórmula para régimen de flujo transitorio, en la cual, se introduce el factor tiempo y el coeficiente de almacenamiento.

En el trabajo de Theis se considera que el caudal de descarga de un pozo en un acuífero confinado es directamente proporcional a los abatimientos

multiplicados por el coeficiente de almacenamiento y esto sumado sobre el área de influencia. Debido a que el agua bombeada de un acuífero confinado proviene de la reducción de su almacenamiento, el nivel piezométrico descenderá continuamente, siempre y cuando el acuífero sea de extensión infinita. Por lo tanto, no existen condiciones de flujo permanente. Sin embargo, los abatimientos son menores a mayores distancias del pozo de bombeo y eventualmente llegan a ser tan pequeños, que para fines prácticos se consideran despreciables como para suponer flujo estable.

La ecuación representa la expresión de Theis para flujo transitorio

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi T} \right) \int_u^{\infty} e^{-y} \frac{dy}{y} = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

En donde:

- $u = r^2 S / 4Tt$

Por lo tanto

- $S = 4T t u / r^2$

Donde:

- $s =$ abatimiento medido en el piezómetro (m).
- $r =$ distancias del piezómetro al pozo de bombeo (m).
- $Q =$ caudal constante de descarga en el pozo de bombeo (m³ /día).

- $S =$ coeficiente de almacenamiento del acuífero (adimensional).
- $T =$ transmisividad del acuífero ($m^2 / día$).
- $t =$ tiempo de bombeo (días).
- $W(u) =$ Función de pozo de Theis = $-0.5772 - \ln u + u - (u^2/4) + (u^3/18) - \dots + (-1)^n (u^n/n.n!)$.

El método de ajuste de curvas de Theis (1935), está basado en las suposiciones listadas al inicio del capítulo y en la siguiente condición limitante: el flujo hacia el pozo es transitorio, es decir, las diferencias de abatimiento con el tiempo no son despreciables, ni tampoco el gradiente hidráulico es constante.

10.3.1. Procedimiento

- Preparar la curva tipo de la función de pozo de Theis en papel logarítmico. Esto se hace por medio de una gráfica de los valores de $W(u)$ en función de $1/u$.
- Hacer una gráfica con los valores de s en función de t / r^2 en otro papel logarítmico a la misma escala que la empleada para dibujar la curva tipo. Se obtiene una curva por cada piezómetro utilizado en la prueba.
- Sobreponer la curva de valores observados a la curva tipo, manteniendo paralelos los ejes de ambas gráficas. Situar la posición en la cual exista la mejor sobre posición de las curvas.
- Seleccionar un punto arbitrario A en la porción de las gráficas sobrepuestas y determinar las coordenadas $W(u)$, $1/u$, s y t / r^2 . Por lo general, los cálculos se pueden simplificar si se utiliza un punto que tenga coordenadas $W(u) = 1$, $1/u = 10$.

- Sustituir los valores de $W(u)$, s y Q en la ecuación 4.5 para encontrar T .
- Calcular el valor de S , substituyendo los valores de T , t / r^2 y u en la ecuación.

Las ecuaciones teóricas del método de Theis (1935) se basan principalmente en las hipótesis de que el caudal es constante y que el agua bombeada provoca un abatimiento instantáneo del nivel piezométrico.

Esto no sucede en la realidad, sino hasta unos minutos después de haber comenzado el bombeo, lo cual provoca que la curva teórica difiera de la curva observada en su primera porción. Por otra parte, si los datos observados, al hacer la gráfica en un papel logarítmico, presentan una curva muy aplanada (como la que presenta la curva tipo cuando $1/u < 100$), la solución por este método gráfico se considera indeterminada, ya que son factibles varias soluciones. En tales casos es necesario recurrir a algún otro método.

10.4. Análisis hidrogeológico e hidroquímico

- Fase de gabinete

En esta etapa se debe recopilar la información disponible en relación con la geología del sector o acuífero en estudio. Esta etapa, al igual que todas las demás, quedarán sujetas a la disponibilidad de la información existente en el sector como en las áreas cercanas, tanto aguas arriba como aguas abajo del sentido del flujo de las aguas subterráneas, por lo que la estimación de los flujos mediante el monitoreo de los niveles piezométricos circundantes a la zona se vuelve indispensable.

La información por recopilar en esta etapa es básicamente la siguiente:

- Niveles estáticos de los pozos cercanos al sitio del estudio o la cuenca en la cual se ubica el sitio. De no existir, se deben generar mediante campañas de monitoreo.
- Geología local, con una escala mínima de 1:100.000 o inferior. Para obtener la geología local se puede recurrir al Instituto Geográfico Nacional (IGN) donde se puede verificar la existencia de la información. De no existir, debe ser generada por medio de estudios geológicos llevados a cabo en el área de estudio definida.
- Estudios hidrogeológicos, ya sean modelos hidrogeológicos de la cuenca en la cual se ubica el sitio o la generación de la hidrogeología local por medio de la revisión de los expedientes de los pozos existentes en la zona circundante al sitio de estudio.
- Catastro de las actividades industriales, mineras y agrícolas desarrolladas en sectores aledaños al sitio, tanto aguas arriba como aguas abajo. Junto con lo anterior se debe determinar la ubicación de los asentamientos humanos, como también la ubicación de rellenos sanitarios y lugares de disposición de aguas residuales tratadas y no tratadas.

La información recopilada anteriormente es de vital relevancia. Esta información se utiliza como base para determinar las propiedades hidrogeológicas del sitio del estudio, para realizar los análisis predictivos en relación con los efectos de la geología sobre la composición de las aguas subterráneas, como también generar un esquema general de las actividades

antrópicas desarrolladas en las cercanías del sector. En particular, la información recopilada anteriormente permitirá determinar las siguientes variables.

- Direcciones de flujo: la determinación de los gradientes, por medio de los niveles piezométricos, permite la ubicación de la red de monitoreo en el sitio de estudio.
- Transmisividades: el conocimiento de las transmisividades puede aportar información con relación al comportamiento del flujo, así como dar una idea de los tiempos de residencia en el sitio o la cuenca.
- Niveles piezométricos: permite no sólo conocer los gradientes y determinar flujos, sino que también permite conocer las estructuras litológicas que tiene contacto el agua subterránea en su movimiento.
- Litología: permite conocer tanto las rocas como los minerales que están presentes en la geología, y da una idea de los minerales que podrían estar en contacto con las aguas subterráneas, no solo de la cuenca, sino que del sitio de infiltración.
- Condiciones de recarga del acuífero: permite identificar los principales mecanismos de recarga del acuífero, como la recarga por efecto de un curso superficial, por escorrentía o por interacción con otros acuíferos de la zona. Lo anterior se debe verificar tanto puntualmente como en la cuenca o localidad donde se encuentre el sitio de infiltración.
- Identificación de sitios de actividad antrópica: permite identificar sitios que podrían generar cambios en la calidad del agua debido a la actividad desarrollada en el sector o la cuenca. Este punto es de vital importancia

debido a que permite identificar zonas con mayor o menor impacto, y así, poder determinar criterios adecuados para cada sector en particular.

La información que se detalla anteriormente sirve de base para el siguiente punto que corresponde al análisis predictivo. Se recomienda el uso de programas de software que permitan el manejo de sistemas de información geográfica y de sistemas de procesamiento de imágenes. Estas herramientas permitirán una mejor integración de la información recopilada tanto en este punto como en los demás.

10.5. Fase de campo

La segunda etapa de la metodología consiste en la obtención de las muestras de calidad, tanto de aguas subterráneas como de aguas superficiales y de precipitación. La utilización de análisis de calidad de las aguas subterráneas permite conocer las características químicas y físicas de las mismas. Razón, por la que las muestras deben cumplir una serie de requisitos mínimos para que éstas sean representativas de la química de las aguas del acuífero. Los criterios que deben cumplir los análisis tienen que ver con la representatividad de los mismos en relación al tiempo y el espacio, es decir:

10.5.1. Representación espacial

Los análisis por utilizar deben tener cierta representatividad espacial, esto quiere decir que los datos obtenidos o las fuentes de las cuales fueron obtenidas las muestras, entiéndase pozos de monitoreo, bombeo y observación. Deben estar distribuidos uniformemente en el área abarcada por el acuífero o la zona en estudio. Otro punto importante dentro de la variabilidad espacial, tiene relación con la obtención de muestras a lo largo del perfil vertical del acuífero, es decir,

considerar la opción de tomar muestras en distintos niveles a manera de conocer la variabilidad vertical de la calidad.

10.5.2. Análisis químicos

Estos análisis se deben recopilar en la zona de estudio con previa definición de los flujos subterráneos y sus gradientes a manera de conocer la dirección predominante del flujo y así definir la ubicación de la red de monitoreo. Las muestras deben ser tomadas en sentido del flujo subterráneo, es decir: obtener muestras de aguas arriba como de aguas abajo a manera de observar la posible variación espacial de la calidad antes y después de su paso por el sitio de estudio. Es importante que el muestreo actual se desarrolle al menos en 4 épocas estacionales diferentes y con un tiempo mínimo de al menos 3 a 5 años a modo de observar efectos asociados a la variación estacional. De no poder realizar lo anterior, se debe recurrir a la información histórica existente en la cuenca o localidad donde se encuentre el sitio de estudio.

10.5.3. Análisis químicos históricos

Estos se deben obtener para la cuenca o localidad donde se emplaza el sitio de estudio. Estos datos permitirán, ante una eventual falencia de datos históricos en el sitio, comprobar el comportamiento de las muestras en relación a los datos históricos que se tengan en la cuenca. La recopilación de esta información histórica se debe realizar por medio de la revisión de informes, evaluaciones de impacto ambiental, trabajos de ingeniería relacionados, estudios desarrollados por entidades del Estado, entre otros. Desarrollado en la cuenca o subcuenca en cuestión. Si el comportamiento de los datos obtenidos en el punto anterior se encuentra dentro de los rangos históricos observados en la cuenca o subcuenca, se considerará a estos datos como los representativos de la calidad

natural para el sector bajo la justificación del comportamiento similar entre las aguas de la cuenca y el sitio de estudio.

10.5.4. Análisis isotópicos

Para realizar un estudio detallado de los aportes reales a cada tipo de actividad, como también conocer la edad de las aguas y su origen en términos de cuál es la recarga con mayor importancia que hace de estos análisis una herramienta necesaria para la determinación de la calidad natural. La realización de estos análisis puede realizarse en conjunto con la toma de muestras actuales en el sitio.

10.6. Fase de gabinete

Con las muestras realizadas de agua subterránea, superficial y de precipitación pluvial, se procede a determinar las características físicas y químicas para realizar el análisis estadístico, así como su interpretación.

10.6.1. Análisis estadístico

En esta etapa se presenta la estadística descriptiva de los análisis de la química de las aguas subterráneas, identificando, en lo posible, muestras pertenecientes a una geología similar o a un mismo estrato, de manera de observar las posibles diferencias entre las zonas identificadas. Esto permite entre otras cosas verificar las hipótesis con relación a las actividades antrópicas desarrolladas en la zona.

11. TÉCNICA DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

11.1. Línea meteórica

La ecuación que relaciona al Deuterio y Oxígeno-18 a nivel global se ha establecido como $\delta 2H = 8 \delta 18O + 10$, conociéndose como Línea Meteórica Mundial o GMWL por sus siglas en inglés.

11.2. Línea meteórica local

La LML se establecerá utilizando los valores de las señales isotópicas de muestras de precipitaciones y de muestreo de pozos en el área de estudio del año 2020. Para poder realizar el cálculo, junto con las señales isotópicas, se necesitarán además las precipitaciones (agua caída) en cada estación, de las cuales se encontraban disponibles.

11.3. Análisis gráfico

Se realizarán los modelos estadísticos descriptivos para cada parámetro medido, se puede observar que las variaciones en las señales isotópicas de $\delta 2H$ y $\delta 18O$ en las aguas superficiales y subterráneas obtenidas en distintos períodos de tiempo (campañas) son mínimas.

11.4. Análisis de componentes principales (ACP)

Los parámetros con los que se trabajará para este análisis serán pH, CE, Ca, Cu, Mg, K, Na, Zn, Fe, HCO₃, Cl, SO₄, NO₃.

12. CRONOGRAMA

En la siguiente figura se presenta el cronograma de actividades, en la cual se da a conocer las diferentes actividades que se realizaron, así como la duración de la investigación que es de 21 meses, el tiempo por actividad está organizado por trimestres, tres trimestres para el año 2019 y cuatro trimestres para el año 2020.

Figura 19. Cronograma de actividades

Fase	Actividades	Mes														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Introdutoria o de recopilación de información	Revisión bibliográfica	■	■	■												
	Diseño de trabajo de campo		■	■	■											
	Obtención y verificación de información		■	■	■											
	Selección de criterio y documentos utilizados		■	■												
Analítica, de ejecución y validación	Recorridos de campo				■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	Identificación de áreas de recarga hídrica										■	■	■	■		
	Muestreo isotópico		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	Clasificación y análisis balance hídrico										■	■	■	■		
	Análisis de información laboratorio										■	■	■	■	■	
	Análisis y validación plan de Gestión									■	■	■	■	■	■	
Interpretativa	Procesamiento y análisis de datos												■	■	■	■
	Análisis y discusión de resultados												■	■	■	■
	Redacción de informe final												■	■	■	■

Fuente: elaboración propia.

13. FACTIBILIDAD DE ESTUDIO

13.1. Costos

A continuación, se presenta el presupuesto de las diferentes actividades que se llevarán a cabo, para realizar la investigación y su implementación, en la cual se toman en cuenta los recursos humanos y materiales que serán utilizados.

Tabla III. **Costos del estudio**

	Recurso humano personal apoyo de campo	Q. 4,000.00
1	Personal de apoyo técnico	Q. 8,000.00
	Investigador	Q. 30,000.00
1	Asesor	Q. 2,500.00
	Subtotal	Q. 44,500.00
	Materiales y equipo	
	Análisis de laboratorio	Q. 5,000.00
	Insumos y equipo para muestreo isotópico	Q. 5,000.00
	Insumos de oficina	Q. 2,000.00
	Equipo de oficina (computadora, impresora, escáner)	Q. 5,000.00
	Transporte (combustible, lubricantes, depreciación de vehículo)	Q. 5,000.00
	Viáticos	Q. 3,000.00
	Impresiones	Q. 1,000.00
	Papelería	Q. 1,000.00
	Material cartográfico (mapas, ortofotos, fotografías aéreas, imágenes satelitales)	Q. 1,000.00
	Subtotal	Q. 28,000.00
	Total	Q. 72,500.00

Fuente: elaboración propia.

13.2. Análisis FODA

El estudio tiene una importante relevancia para el municipio de Villa Nueva, que brindará información científica y promoverá nuevas líneas de investigación del tema de agua subterránea, así mismo es una investigación pionera en el área, como es la determinación de la edad media de las aguas subterráneas de las que se abastece a la red municipal del municipio y evaluar su vulnerabilidad, en ese sentido se realizarán lineamientos para su gestión sostenible. Es importante destacar que las debilidades y amenazas como se muestra en la (tabla 4), son previsiones previas para que el estudio pueda concluirse en el tiempo estipulado.

Tabla IV. Análisis FODA de la investigación

Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Formación profesional del maestrante. • Equipo técnico profesional asesor con experiencia científica. • Equipo técnico profesional de la municipalidad. • Apoyo de la municipalidad debido a que laboro actualmente ahí. • Acompañamiento de CESEM y la Cooperación italiana. • Primera revisión del estado del arte del tema de investigación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Generar investigación científica. • Aportar a la gestión municipal y del país. • Conocer la edad de residencia del agua subterránea. • Contribuir con la ciencia al presentar resultados novedosos. • Abrir nuevos espacios de investigación en este tema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de financiamiento para generar información científica en el país. • Poco expertiz de la temática en el país. • Gestión administrativa académica burocrática. 	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de casos y de efectos del COVID19. • Fenómenos sociales fuera de control • Fenómenos hidrometeorológicos extremos. • Cambios políticos.

Fuente: elaboración propia.

14. REFERENCIAS

1. Alvarado, P. (2013). *Inventario de información disponible e identificación de vacíos para caracterización y diagnóstico del acuífero Esquipulas-Ocotepeque-Citalá (Acuífero Trifinio)*. Guatemala: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.
2. Argaguás, L., Froehlich, K., y Rozanski, K. (15 de 6 de 2000). *Hydrological Processes*. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/1099-1085%2820000615%2914%3A8%3C1341%3A%3AAID-HYP983%3E3.0.CO%3B2-Z>.
3. Ballesteros, M. (18 de 3 de 2005). *Planificación y administración hídrica en Centroamérica en: administración del agua en América Latina*. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/6282>
4. Cabrera, A., Blarasin, M., y Maldonado, L. (12 de 10 de 2014). *Cuadernos de uso y manejos de aguas subterráneas*. Recuperado de <https://www.unrc.edu.ar/unrc/comunicacion/editorial/repositorio/98-987-688-106-7.pdf>
5. Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hidrology*. Michigan United States of America: McGraw-Hill.
6. Clark, I., Peter, F. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York: Lewis Publishers.

7. Davies S. N., Campbell D. J., Bentley H. W., y Flynn T. J. (1985). *Ground Water Tracers*. Washington: National Water Well Association.
8. Díaz, O. (2012). *La evolución del rol territorial de la Bahía de Jiquilisco*. San Salvador: Prisma.
9. Fagundo, J. R. (2005). *Hidrogeoquímica*. La Habana, Cuba: Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (CENAMENT).
10. Foster, S., Tuinhof, A., Kemper, K., Garduño, H., y Nanni, M. (2006). *Caracterización de Sistemas de Agua Subterránea conceptos clave e ideas erróneas frecuentes*. Washington: Banco mundial.
11. Freeze, R.A. and Cherry, J. A. (1979). *Groudwater*. New Jersey: Prentice-Hall.
12. Gat, J. R., y Gonfiantini, R. (1981). *Stable isotope hydrology*. Australia: IAEA.
13. Glock. M. (2015). *El agua subterránea como agente geológico en el sector meridional de la cuenca de la laguna Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires. Su estudio con herramientas hidrogeoquímicas e isotópicas*. Argentina: UNP.
14. Google Maps. (6 de 6 de 2019). *Zona 3, Municipio Villa Nueva, departamento de Guatemala*. Recuperado de <https://www.google.com/maps/search/zona+3,+Municipio+Villa+Nueva,+Departamento+de+Guatemala/@14.5577118,90.6439873,12z/data=!3m1!4b1>.

15. Güler, C., Thyne, G., McCray, J., y Turner, A. (09 de 05 de 2002). *Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data*. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-002-0196-6>.
16. Harter, T. (2003). *Basic concepts of groundwater hydrology*. California: UCANR Publications.
17. Hernández A. A., Mahlkecht, J., Tamez Meléndez, C., Ramos Leal, J., Ramírez Orozco, A., Parra, R., Ornelas Soto, N., y Eastoe, C. (2015). *Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: the case of Guadalajara*. México: Hydrology and Earth .
18. INE. (22 de 6 de 2019). *Censo Nacional de Población y Vivienda año 2018*. Recuperado de <https://www.ine.gob.gt/ine/>.
19. Kazemi G., Lehr J. H., Perrochet P. (2006). *Groundwater Age*. Irán: Shahrood.
20. Khan, A. (8 de 2 de 2020). *Los puentes de hidrógeno en el agua*. México: Introducción a las propiedades del agua. Recuperado de <https://es.khanacademy.org/science/biology/water-acids-andbases/hydrogen-bonding-in-water/a/hydrogen-bonding-in-water>.
21. López D. (2005). *Hidrogeología de la subcuenca del río Platanitos, Guatemala, Guatemala*. Costa Rica: Sistema de Estudios de Posgrado.

22. Magrin, G. O., J. A., Marengo, J. P. Boulanger, M. S. Buckeridge, E. Castellanos, G. Poveda, F.R. Scarano, and S. Vicuña. (2014). *Central and South America*. Argentina: IPCC.
23. Mook, W. (22 de 6 de 2002). *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico*. Recuperado de http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_publication_hydroCycle_es.html.
24. Nittmann, J. (2014). *Simulación del flujo y transporte de la edad del agua subterránea en el sistema acuífero Guaraní*. Argentina: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral.
25. Pérez López, J. A. y Espigares García, M. (1995). *Estudio sanitario del agua*. España: Universidad de Granada.
26. Raya Garrido, J. (2003). *Composición Isotópica del vapor de agua atmosférico en el sureste de la Península Ibérica*. España: CSIC.
27. Reyes García, C., y Andrade, J. L. (2007). *Los isótopos estables del hidrógeno y el oxígeno en los estudios ecofisiológicos de plantas*. México: Boletín de la Sociedad Botánica de México.
28. Rozanski, K., Araguás Araguás, L. (22 de 3 de 1995). *Spatial and temporal variability of stable isotope composition of precipitation over the South American continent*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Kazimierz_Rozanski/publication/26431057_Spatial_and_temporal_variability_of_stable_isotope_composition_of_precipitation_over_the_South_American_Continent/links/553631330cf20ea35f1127ad.pdf.

29. Salazar, A. (1966). *Contaminación de recursos hídricos: modelos y control*. Medellín: Ainsa.
30. Sánchez Murillo, R., Durán Quesada, A. M., Birkel, C., Esquivel Hernández, G., y Boll, J. (18 de 10 de 2016). *Tropical precipitation anomalies and d-excess evolution during El Niño 2014-16 Hydrological Processes*. Hydrological Processes. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/hyp.11088>.
31. Secretaría de Planificación y de Programación de la Presidencia. (25 de 5 de 2020). *Infraestructura de Datos Espaciales de Guatemala*. Obtenido de <http://ideg.segeplan.gob.gt/geoportal/>.
32. Sepúlveda López, C. J., y Ibrahim, M. (2013). *Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas: como una medida de adaptación al cambio climático en América Central*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE): Turrialba, Costa Rica.
33. Taylor, C. J., y Alley, W. M. (2001). *Ground water level monitoring and the importance of long-term water-level data*. Denver: Colorado.
34. Theis, C. V. (1935). *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage*. Washington: Department of the interior.

35. Toro, L. (6 de 8 de 2007). *Evaluación avances proyectos “desarrollo sostenible del ambiente y recursos hídricos de la parte alta de la cuenca del río Lempa” -RLA|8|038- Y “sostenibilidad de los recursos de aguas subterráneas en acuíferos rurales y metropolitanos”*. Obtenido de http://sintet.net/images/bliblioteca_digital/Evaluacin-proyectos-desarrollo-sostenible-del-ambiente-y-recursos-hdricos-CARL-y-sostenibilidad.pdf

36. Torres Quintero, E. (2002). *Técnicas nucleares aplicadas a la investigación*. México: INGEOMINAS.

37. Tuinhof, A., et al. (2006). *Gestión de recursos de agua subterránea: Una introducción a su alcance y práctica*. Washington: Banco Mundial.

38. Unkovich, M. J., Pate, J. S., McNeill, A., Gibbs, J. (2013). *Stable Isotope Techniques in the Study of Biological Processes and Functioning of Ecosystems*. Australia: CSIRO.

39. Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano*. Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/OPS.

40. Varni M. & Carrera J. (1998). *Simulation of groundwater age distributions*. Argentina: Instituto de Hidrología de Llanuras.

41. Vélez, M. Ortiz, C., y Vargas, M. (2011). *Las aguas subterráneas*. Colombia: INGEOMINAS.

42. Villón, B. M. (2007). *Drenaje*. Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica.

43. Werner J. (1996). *Introducción a la hidrogeología*. México: Facultad de Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de Nuevo León.