

Open Minds

Internacional Journal

ISSN 2675-5157

vol. 2, n. 2, 2026

... ARTICLE 15

Acceptance date: 04/02/2026

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO CON ENFOQUE DE CUENCA EN EL MUNICIPIO DE MANAGUA EN EL AÑO 2024 - CASO DE ESTUDIO

Victor Rogelio Tirado Picado

Doctor en Ciencias, Director de Investigación y Extensión Universitaria, Universidad Americana
<https://orcid.org/0000-0002-7907-0006>



All content published in this journal is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

Resumen : El presente trabajo de investigación tiene como propósito evaluar el recurso hídrico subterráneo con un enfoque de cuenca en el municipio de Managua durante el año 2024. Se consiguió evaluar el recurso hídrico subterráneo con un enfoque de cuenca en el municipio de Managua durante el año 2024. A través de la aplicación del caso de estudio seleccionado, se logró obtener una caracterización integral de la disponibilidad y calidad del agua subterránea, evidenciando las dinámicas naturales y antrópicas que influyen directamente en el comportamiento del acuífero. Los resultados obtenidos muestran que la presión sobre el recurso hídrico ha aumentado considerablemente debido al crecimiento urbano, la expansión de la demanda de agua potable y el cambio en el uso del suelo, lo que plantea la necesidad de implementar estrategias de manejo sostenible que garanticen su conservación y uso racional. En relación con las bases teóricas establecidas, se comprobó que contar con un marco conceptual sólido permitió abordar de manera sistemática los componentes hidrogeológicos, climáticos y antrópicos que determinan la disponibilidad del agua subterránea. Dichas bases sirvieron para interpretar los datos obtenidos, facilitando la identificación de zonas de recarga, niveles de vulnerabilidad y posibles riesgos de contaminación. Este enfoque teórico permitió además fortalecer la comprensión de los procesos hidrogeológicos locales, aportando una visión científica que respalda la toma de decisiones en materia de planificación hídrica.

En cuanto a la metodología aplicada, la recolección y análisis de datos sobre calidad y cantidad del agua subterránea demostraron la utilidad de integrar herramientas de monitoreo y análisis espacial. Las observaciones realizadas respecto a variables como la

precipitación, el uso del suelo y la extracción de agua reflejan la importancia de establecer sistemas de seguimiento continuo. Finalmente, la valoración del estudio frente a los lineamientos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) confirmó que la metodología propuesta se encuentra alineada con las políticas nacionales de gestión hídrica. Esto refuerza la validez del trabajo como una herramienta técnica de apoyo para la gestión sostenible del recurso hídrico en Managua, promoviendo un equilibrio entre el aprovechamiento del agua y la protección del medio ambiente.

Palabras clave: Evaluación hidrogeológica, disponibilidad de agua, calidad del agua subterránea, manejo integral del recurso hídrico, sostenibilidad ambiental.

Introducción

De manera general, Fili, Dalla Costa, Díaz y Giorgio (2002) describen que los estudios hidrogeológicos se orientan a determinar la incidencia de las aguas subterráneas de un acuífero con el fin de ser aprovechadas para el consumo humano, industrial y comercial (p. 1).

Existen diversos métodos y metodologías aplicadas en este tipo de estudios. Entre ellas se encuentra el uso de isótopos en investigaciones hidrológicas e hidrogeológicas, técnica que permite obtener registros a largo plazo de la precipitación. Depeña y Panarello (2008), en el Congreso desarrollado en Quito, Ecuador, destacan la importancia de los isótopos como herramienta fundamental para el desarrollo de estudios hidrogeológicos e hidrológicos (p. 2). Además, los autores remarcen la relevancia de conocer la distribución de la composición isotópica de la precipitación local y sus re-

laciones con las condiciones ambientales —como la temperatura y la humedad relativa—, factores esenciales para los estudios hidrogeológicos a escala regional y local (Depeña & Panarello, 2008, p. 2).

Por otro lado, también existen metodologías empíricas que se implementan en estudios hidrogeológicos, las cuales se sustentan en procedimientos derivados de la experiencia práctica acumulada en el campo.

En el contexto nicaragüense, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) pone a disposición términos de referencia para la elaboración de estudios hidrológicos e hidrogeológicos, los cuales son requeridos para solicitar títulos de concesión para el uso o aprovechamiento de aguas, tanto superficiales como subterráneas. Dichos términos de referencia constituyen una sistematización de los diversos cálculos y procedimientos que deben incluirse en este tipo de estudios.

Sin embargo, los estudios antes mencionados suelen tomarse como referencia sin estar necesariamente sustentados científicamente ni validados como resultados inéditos de las experiencias acumuladas. A partir de ello surge la siguiente pregunta de investigación:

¿La evaluación del recurso hídrico subterráneo en el municipio de Managua, tomando un caso de estudio basado en experiencias previas, puede validar los términos de referencia establecidos por la ANA y, al mismo tiempo, constituir una metodología que oriente futuros estudios en el área?

Por esta razón, el objetivo principal del presente trabajo de investigación es evaluar el recurso hídrico subterráneo con un enfoque de cuenca en el municipio de Managua durante el año 2024, tomando como referencia un caso de estudio. De manera espe-

cífica, se pretende definir las bases teóricas que garanticen la metodología para la realización del estudio hidrogeológico, proponer la metodología para el estudio hidrológico y valorar la importancia de la propuesta en función de los términos de referencia establecidos por la ANA.

Revisión de Literatura

La evaluación del recurso hídrico subterráneo desde un enfoque de cuenca requiere un marco teórico que integre procesos hidrológicos, hidrogeológicos y de demanda para orientar la gestión sostenible del acuífero. Autores clásicos señalan que los estudios hidrogeológicos deben determinar la incidencia y el potencial de las aguas subterráneas para usos humano, industrial y comercial, constituyéndose así en la base para la planificación y ordenamiento del recurso (Fili, Dalla Costa, Díaz & Giorgio, 2002). Asimismo, la visión del acuífero como parte integral de la cuenca permite considerar recarga, descarga y conexiones con aguas superficiales, aspecto fundamental para decisiones de gestión territorial (Custodio & Llamas, 2001).

En la identificación y caracterización del área de estudio, la integración de registros hidrometeorológicos de largo plazo es indispensable. Se recomienda trabajar con historiales de al menos 15 años para parámetros como precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación y velocidad del viento, lo que fortalece la interpretación del estado medio de la atmósfera y la estimación de recarga (Depeña & Panarello, 2008). Además, la consideración conjunta de climatología, geomorfología, litología y uso del suelo es necesaria para comprender

los controles naturales y antrópicos sobre la disponibilidad del recurso.

Las técnicas isotópicas y los ensayos de infiltración son herramientas metodológicas ampliamente reconocidas para caracterizar procesos de recarga y la dinámica del agua subterránea. Los estudios isotópicos permiten rastrear el origen y la edad del agua y establecer relaciones con variables ambientales (Depeña & Panarello, 2008), mientras que las pruebas de infiltración (doble anillo, infiltrómetros o fórmulas empíricas como ()) brindan estimaciones de la capacidad de recarga y permiten clasificar respuestas del suelo según su textura, apoyadas en tablas de infiltración y grupos hidrológicos (Picado, 2022).

La caracterización hidrogeológica mediante inventarios de pozos, pruebas de bombeo y análisis de propiedades hidráulicas —transmisibilidad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, radio de influencia y capacidad específica— constituye el eje técnico para estimar la aptitud del acuífero y su rendimiento. Las relaciones basadas en la ley de Darcy y en soluciones analíticas de bombeo (por ejemplo, las expresiones para transmisibilidad y descenso piezométrico) permiten clasificar acuíferos y definir duraciones mínimas de pruebas acorde a guías técnicas; la literatura técnica y normativa (INAA & JICA, Picado, Bradbury et al.) provee tablas comparativas y criterios para esta clasificación (Custodio & Llamas, 2001; Picado, 2022; Bradbury et al., 2000).

El análisis de calidad del agua es igualmente fundamental y debe compararse con normas técnicas nacionales y regionales para consumo humano y usos productivos. La aplicación de análisis hidroquímicos y diagramas como PIPER ayuda a interpretar

procesos geoquímicos y señales de contaminación, mientras que las Normas Técnicas Obligatorias (NTON) y criterios de calidad (CAPRE) determinan los límites permisibles para proteger la salud pública y los sistemas de abastecimiento (Martínez Ruiz & Chevez Rodríguez, 2017; NTON-09-003-99; NTON-09-007-19). En contextos urbanos como Managua, la identificación de focos puntuales (tanques sépticos, vertidos, estaciones de servicio) y no puntuales (uso agroquímico, escorrentía urbana) es esencial para priorizar medidas de mitigación.

La gestión integrada del recurso hídrico subterráneo implica además la aplicación de marcos institucionales y legales que promuevan la sostenibilidad. En Nicaragua, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) establece los lineamientos técnicos y términos de referencia que deben cumplir los estudios hidrogeológicos, garantizando que las evaluaciones sean comparables y ajustadas a criterios técnicos normalizados (ANA, 2024). La adopción de estos lineamientos ha permitido mejorar la calidad técnica de los estudios y fortalecer la toma de decisiones en la gestión de los acuíferos urbanos.

Por otra parte, la literatura reciente enfatiza la relación entre el cambio climático y la vulnerabilidad del recurso hídrico subterráneo. Estudios de la CEPAL (2022) y de la UNESCO (2021) destacan que el incremento en la variabilidad climática afecta directamente las tasas de recarga de los acuíferos, modificando los balances hídricos y generando presiones sobre los sistemas de abastecimiento en las ciudades. En este contexto, la evaluación con enfoque de cuenca se convierte en una herramienta clave para identificar zonas de recarga crítica y definir políticas de adaptación frente a escenarios climáticos futuros.

Asimismo, la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) y modelos de simulación hidrogeológica ha revolucionado la forma de evaluar el recurso hídrico subterráneo. Herramientas como MODFLOW o GMS permiten modelar la dinámica de flujo, recarga y descarga, facilitando la identificación de zonas vulnerables y la planificación del uso sostenible del recurso (Zhou, 2019). En Managua, el uso de modelos digitales del terreno combinados con datos piezométricos y geofísicos puede mejorar la delimitación de acuíferos y optimizar los planes de extracción sostenible.

A nivel local, investigaciones previas realizadas en el Pacífico de Nicaragua han evidenciado la sobreexplotación de pozos y el descenso del nivel freático, particularmente en zonas urbanas densamente pobladas. Según García y López (2020), la falta de monitoreo continuo y la limitada aplicación de políticas de recarga artificial han acelerado la degradación de los acuíferos. Estos hallazgos subrayan la urgencia de implementar estudios técnicos rigurosos y metodologías integradas, como la que propone este caso de estudio en Managua.

Finalmente, la literatura consultada muestra que la evaluación integral del recurso hídrico subterráneo con enfoque de cuenca requiere la combinación de ciencia, tecnología y gobernanza. Al integrar registros hidrometeorológicos, análisis isotópicos, pruebas hidráulicas y herramientas SIG, junto con políticas públicas coherentes y participación comunitaria, se fortalece la capacidad de los gobiernos locales para garantizar la sostenibilidad del recurso (Schoinsky, 2006; Custodio & Llamas, 2001; UNESCO, 2021). En consecuencia, el presente estudio en Managua se inscribe dentro de una tendencia contemporánea de gestión hídrica orientada a la resiliencia y sostenibilidad ambiental.

Materiales y métodos

El presente estudio se enmarca dentro del enfoque metodológico cualitativo, el cual permite una exploración flexible y profunda de los fenómenos analizados. Según Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2014), “los estudios cualitativos pueden desarrollar preguntas e hipótesis antes, durante o después de la recolección y análisis de los datos. Con frecuencia, estas actividades sirven, primero, para descubrir cuáles son las preguntas de investigación más importantes; y después, para perfeccionarlas y responderlas. La acción indagatoria se mueve de manera dinámica en ambos sentidos: entre los hechos y su interpretación, y resulta un proceso más bien ‘circular’ en el que la secuencia no siempre es la misma, pues varía con cada estudio” (p. 7).

En este contexto, la investigación se centra en un análisis profundo de un estudio de caso sobre la evaluación hídrica, seleccionado por cumplir con los criterios establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). La metodología propuesta se desarrolla en tres etapas principales: evaluación del estudio de caso, formulación de la metodología hidrogeológica y validación de dicha metodología.

De manera general, el estudio posee 4 fase fundamentales, distribuidos de la siguiente manera:

Fase 1, corresponde a la identificación del estudio del recurso hídrico que incorpora una breve introducción, antecedentes, objetivos del estudio, ubicación del sitio de aprovechamiento, característica del área de estudio. En la caracterización del área de estudio, tiene contenido la climatología, en este caso se debe de trabajar con la o las estaciones hidrometeorológicas, con el que

se pueda caracterizar el estado medio de la atmósfera en la región estudiada, para ello se deben de considerar al menos un historial de registros 15 años, para cada parámetro estudiado, llámese precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación, velocidad del viento entre otros. Dentro de esta misma fase se debe de considerar la geomorfología, geología histórica, litología y estructural. Suelo, esto es tipo de suelo según taxonomía, uso actual de suelo, hidrología superficial, prueba de infiltración.

Para la prueba de infiltración se pueden escoger diversos métodos, se destaca: doble anillo o infiltrometro, Porchet o la desarrollado por (Picado, 2022):

$$d = K * t^m \quad (1)$$

Donde:

d = infiltración acumulada en el tiempo t (mm)

K = constante que depende de la estructura inicial del suelo (en seco). Es la laminar que se infiltra en el primer instante mayor que cero (mm)

m = constante que depende de la estabilidad de la estructura del suelo frente al agua, $0 < m < 1$ K en suelos arenosos o francos con grietas presentan valores entre 10 a 30, suelos con estructuras estables frente al agua muestran valores de m mayores a 0.6

Para obtener los valores de K y m se realiza lo siguiente:

$$\log(d) = \log(K) + m * \log(t) \quad (2)$$

Ecuación que responde a la línea recta

$$y = b + a * x$$

Donde:

$\log d = y$; variable dependiente

$\log K = b$; ordenada en el origen (constante del suelo)

$m = a$; pendiente de la recta (constante del suelo)

$\log t = x$; variable independiente

Resolviendo por mínimos cuadrado, se tiene:

$$m = \frac{\frac{\sum (\log t * \log d)}{n} - \frac{\sum \log t}{n} * \frac{\sum \log d}{n}}{\frac{\sum (\log t)^2}{n} - \left(\frac{\sum \log t}{n} \right)^2} \quad (3)$$

De la ecuación (2) se despeja $\log K$, y se obtiene K , una vez obteniendo los valores de los coeficientes K y m , se aplica la ecuación (1), de esta forma se predice cualquier lámina acumulada en base a un tiempo de prueba, luego se gráfica la infiltración acumulada versus el tiempo, (Picado, 2022. p. 1105).

Para determinar la velocidad de infiltración promedio, se parte de la siguiente expresión:

$$I = \frac{d}{t} \left(\frac{mm}{h} \right) \quad (4)$$

Sustituyendo 1 en 4 se tiene:

$$I = \frac{d}{t} = \frac{K * t^m}{t} = K * t^{m-1} \quad (5)$$

Donde:

I = infiltración en un tiempo t (mm/h)

$k = K * m * 60$

$$-n = m-1$$

Quedando la siguiente expresión:

$$I = k * t^{-n} \quad (6)$$

El resultado de la infiltración promedio es comparado con tabla relacionada con la textura del suelo, tabla 1, la infiltración promedio está en estrecha relación con la textura del suelo, ver tabla 1.

Para la demanda de agua se debe utilizar la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense (NTON-09 007-19 (2019)).

Fase 2, corresponde en presentar todas las características del medio geológico, que este comprendida en la geometría del acuífero estudiado, esto incluye la composición y las propiedades hidráulicas inherentes al tipo de roca. Se debe de presentar inventario de pozos en un radio de acción de 3km; análisis de las características hidrodinámicas, los datos técnicos del pozo (tubo piezométrico, caudalímetro, tubería de descarga, equipo de bombeo, entre otros), así como las características hidráulicas y el inventario de otros usuarios con su consumo particular.

Para las características hidráulicas, en el caso que en el sitio se tiene que perforar un pozo, cuando esté terminado, se deberá realizar prueba de bombeo a caudal constante considerando que en medios porosos la duración deberá ser de 24 horas para pozos que operan con caudales mayores a 113.55 m³/h; de lo contrario serán 12 horas como mínimo. En medios porosos fracturados se deberá realizar la prueba de bombeo por 8 horas como mínimo, todo esto de acuerdo con los TDR's de la Autoridad Nacional del Agua. (ANA, 2024).

Si en el sitio existe un pozo, se tendrá que realizar pruebas de bombeo con la mis-

ma indicación anteriores. Para ambos casos las características hidrodinámicas se calculan de la siguiente manera.

Transmisibilidad

Se emplea la ley de Darcy para medios homogéneo e isótropo, medios anisótropos, como lo plantea (Custodio & LLamas, 2001. p. 460).

$$T_{\text{pozo}} = 0.183 \frac{Q \left(\frac{m^3}{\text{dia}} \right)}{\Delta S (m)} \quad (7)$$

Donde:

Q = caudal en m³/día

ΔS = Descenso del abatimiento en m

Se compara con la siguiente tabla 2, donde se puede clasificar el tipo de acuífero.

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica está relacionada con el espesor saturado probado, según (Martínez Ruiz & Chevez Rodriguez, 2017. p. 31), se determina a partir de la siguiente expresión:

$$K = \frac{T \left(\frac{m^2}{\text{dia}} \right)}{M (m)} \quad (8)$$

Donde:

T = Transmisibilidad m²/día = 125.96m²/día

M = Espesor saturado probado = 5.81m

Textura del suelo	Infiltración básica Rango de Variación (mm/h)	Ib promedio (mm/h)
Arena	25 – 50	50
Franco-arenoso	13 – 75	25
Franco	7.5 – 20	12.5
Franco-limoso	2 – 15	7.5
Arcillo-limoso	0.2 – 5	2.6
Arcilla	0.1 – 1	0.5

Tabla 1. *Textura del suelo en funcion de los valores de infiltración promedio de los uselo (mm/h)*

Fuente: recuperado de (Bradbury et al., 2000. p. 84)

Coeficiente de Transmisibilidad T		Transmisibilidad del Acuífero		Parametros comparativos correspondiente al coeficiente de Transmisibilidad				Rendimiento aproximado de pozos con un descenso de 5 m.	
m²/día	gl/d/pie	Clase	Denominación	No logarítmica Caudal específico (q)			Logarítmica Índice (Y)	l/s	gpm
				m3/h/m	l/s-m	Gpm/pie			
1000	80,520	I	Muy Alta	36	10	48.32	7	>50	>793
100	8,052	II	Alta	3.6	1	4.83	6	5-50	79.3-793
10	805,2	III	Moderada	0.36	0.1	0.48	5	0.5-5	7.93-79.3
1	80,052	IV	Baja	0.036	0.01	0.048	4	0.05-0.5	0.79-7.93
0.1	8,052	V	Muy baja	0.0036	0.001	0.0048	3	0.005-0.05	0.0079-0.79
		VI	Impermeable					<0.005	<0.079

Tabla 2. *Coeficiente de transmisibilidad (T) y denominación del acuífero.*

Fuente: recuperado de (Picado, 2022. p. 1145).

K (m/día)	Calificación	Comportamiento	$K_h > k_v$ K_h 10 a 20 veces mayor
$K < 10^{-2}$	Muy baja	Impermeables	
$10^{-2} < K < 1$	Baja	Acuíferos pobres	
$1 < K < 10$	Media	Buenos acuíferos	
$10 < K < 100$	Alta		
$K > 100$	Muy alta		

Nota: Según (Picado, 2022) la conductividad hidráulica es el volumen de agua gravificada que percola durante la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de una sección del terreno bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad (p. 1146).

Tabla 3. Clasificación del acuífero según la conductividad hidráulica.

Fuente: recuperado de (Picado, 2022. p. 1146).

En base a los datos de entrada, se tiene una conductividad hidráulica de acuerdo a la tabla 3.

Coeficiente de almacenamiento

De acuerdo con (Picado, 2023), es adimensional, y se refiere al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico (o la presión) (p. 675). Por otro lado (INAA & JICA, 1993), define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad y altura la del espesor saturado. Tratándose de un acuífero libre y de las características hidrogeológicas, se estima un coeficiente de almacenamiento que oscila entre 0.05 y 0.03, (p. 4-16).

En el caso que en el sitio se tiene que perforar un pozo se asume un coeficiente de almacenamiento entre 0.05 – 0.03. Si en el sitio hay un pozo se asumirá la metodología propuesta por (Picado, 2023), que desarrolla la siguiente expresión:

$$h_o - h = \frac{Q}{2 * \pi * T} * \ln \frac{R}{r} \tag{9}$$

Donde:

ho = nivel piezométrico inicial;

h = nivel piezométrico en el punto r;

Q = caudal de bombeo;

T = transmisibilidad;

ho – h = descenso;

R = radio de influencia;

r = distancia del punto al eje del pozo.

$$h_o - h = s = 0.079 \frac{Q}{T} * \ln \frac{2.25 * T * t}{r^2 * S} \tag{10}$$

Donde:

s = es la caída medida en el instante t, desde el inicio del bombeo, en el punto de medición situado a la distancia r del eje del pozo de bombeo;

Q = caudal de bombeo;

T = transmisibilidad del medio;

S = coeficiente de almacenamiento del medio.

Capacidad específica

De acuerdo con (Picado, 2022) la capacidad específica es la relación que existe entre el caudal y el espesor saturado, su unidad de medida es gpm/pie, (p. 1145).

Radio de influencia

De acuerdo con (Picado, 2022), el radio de influencia es la distancia que alcanza el cono de depresión en el acuífero, cuando se bombea un pozo durante un tiempo determinado (t). El resultado depende de la transmisibilidad (T m²/día) y el coeficiente de almacenamiento (S -unidad adimensional), (p. 1145).

$$R = 1.5 \sqrt{\frac{Tx \left(\frac{t}{24} \right)}{S}} \quad (11)$$

Donde:

T = transmisibilidad en m²/día

t = tiempo de bombeo en horas

S = Coeficiente de almacenamiento

Recarga del acuífero

Para el caso de la recarga del acuífero, de momento se cuantifica a partir del método desarrollado por (Schosinsky, 2006), el cual debe ser justificado, basándose en las características hidrogeológicas del medio. El método deberá ser desarrollado en el estudio, incorporando todas las variables climatológicas, considerándose las horas de lluvia, según la zona de estudio.

Fase 3, corresponde al análisis de calidad de agua, está en dependencia de la actividad socioeconómica que se realicen en la zona de estudio, así como también el uso del sitio de aprovechamiento, en este caso se deben realizar análisis de la calidad de agua por medio de laboratorio especializados. De acuerdo con (Martínez Ruiz & Chevez Rodriguez, 2017), el resultado de calidad de agua debe ser comparado con los criterios

que establece las Normas CAPRE para calidad de aguas. El objetivo de esta Norma de Calidad de Agua de Consumo Humano es proteger la salud pública y por consiguiente, ajustar, eliminar o reducir al mínimo aquellos componentes o características del agua que pueden representar un riesgo para la salud de las comunidades e inconvenientes para la preservación de los sistemas de abastecimiento de agua, (p. 34).

También, (Martínez Ruiz & Chevez Rodriguez, 2017), plantea que el resultado de agua debe ser comparado con los criterios que establece las Normas Técnicas Obligatorias Nicaragüenses NTON-09-003-99 para calidad de aguas, las presentes Normas de Calidad de Agua para el consumo humano han sido adoptados de la Norma Regional de Calidad del Agua para el Consumo Humano, por medio de la preservación de la Calidad del Agua, para proteger la calidad de la misma, en las que se debe prever las condiciones presentes y futuras, para evitar la contaminación de fuentes de agua, por medio de contaminantes de tipo, doméstico, agrícola, industrial, o de cualquier otro índole. Dichas normas presentan las concentraciones máximas permisibles de los parámetros que indican la calidad del agua, desde el punto de vista químico como bacteriológico, (p. 34.).

Los autores (Martínez Ruiz & Chevez Rodriguez, 2017), recogen en su trabajo de investigación el Easy-Quim o denominado diagrama de PIPER, ellos recuperan el concepto del grupo de hidrología subterránea del departamento de ingeniería civil y ambiental de la universidad politécnica de Cataluña (UPC), el cual, se trabaja en la caracterización de medios permeables a través de datos hidráulicos, hidro químicos e isotópicos ambientales. El diagrama de PIPER

se representa por diagramas triangulares que se utilizan para representar la porción de tres componentes en la composición de un conjunto de una sustancia. La suma de los tres componentes debe representar el 100% de la composición de lo que se considera; en hidro química se utiliza un triángulo para los cationes principales y otro para los aniones, (p. 34-35).

Fase 4, se debe identificar y describir los posibles putos o focos de contaminación, ya sean naturales o antropogénicos, se deben de detallar coordenadas y distancias con respecto al sitio en estudio, deben de incluir tanques sépticos, plantas de tratamiento de agua residual, puntos de vertidos, gasolineras, áreas de uso agroquímicos industriales. En esta fase se deben de considerar las conclusiones, recomendaciones, bibliografías o referencias bibliográficas en que se sustenta el estudio, así como los anexos.

Técnicas y métodos de recolección de datos

Se seleccionaron cinco estudios hidrogeológicos previos, de los cuales se eligió como caso de estudio principal aquel que cumple con los criterios definidos en los términos de referencia del ANA. Dichos términos funcionaron como guía metodológica para la evaluación del recurso hídrico subterráneo.

Las fuentes primarias incluyeron:

- Artículos científicos sobre estudios hidrogeológicos.
- Bibliografía y estudios previos sobre el área de estudio.
- Términos de referencia elaborados por el ANA.

- Portales web especializados en la evaluación de recursos hídricos.

Universo, población y muestra

El universo de la investigación está constituido por todos los estudios de evaluación hídrica con enfoque de cuenca realizados en la cuenca Sur de Managua y en el acuífero Las Sierras de Managua.

La población se conforma por los cinco estudios seleccionados que cumplen con los criterios definidos en los términos de referencia del ANA.

La muestra corresponde al estudio de caso seleccionado, ubicado en las coordenadas UTM-WGS84-16P 583527E; 1336661N, el cual fue elegido por su nivel de detalle, representatividad y cumplimiento técnico.

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión se basan en la selección de estudios hidrogeológicos ubicados en la cuenca Sur de Managua y dentro del acuífero Las Sierras, que cumplan con los lineamientos establecidos por el ANA.

Por el contrario, los criterios de exclusión descartan aquellos estudios que no satisfacen los parámetros definidos o que carecen de la información requerida para una evaluación integral del recurso hídrico.

Resultados y discusión

Fase I: Identificación en la zona de estudio

En la fase de identificación del estudio del recurso hídrico, se definió como área de interés el sector del residencial Las Colinas,

ubicado en el Distrito V del municipio de Managua, específicamente en la tercera entrada de la intersección Las Colinas, cuyas coordenadas geográficas corresponden a UTM-WGS84-16P 583527E; 1336661N. Este sitio se encuentra dentro de la cuenca sur de Managua, perteneciente a la subcuenca II, con una elevación promedio de 252 m s. n. m. A partir del enfoque de cuenca, y mediante el uso de herramientas del módulo ArcMap del software ArcGIS, se procedió a la delimitación geomorfológica y geológica de la subcuenca, identificándose varias microcuencas. Entre ellas, la Microcuenca 1, con una extensión de 26,9 km², fue seleccionada como el área principal de estudio por su relevancia hidrogeológica y su potencial de aprovechamiento sostenible del recurso subterráneo.

Los resultados del análisis espacial revelan que el sitio de aprovechamiento no se encuentra dentro de zonas ambientalmente frágiles, según la clasificación establecida por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) ni dentro de los territorios de vulnerabilidad ambiental definidos por el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA). En consecuencia, el área en estudio no representa riesgo directo de contaminación ambiental ni se encuentra bajo restricciones legales para su uso o manejo, lo que constituye una ventaja significativa para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento hídrico responsable.

Para la caracterización hidrometeorológica, se seleccionó la estación Aeropuerto, clasificada como Hidrometeorológica Principal (HMP), por encontrarse dentro de la misma cuenca 69 del río San Juan y en el área de influencia directa de la cuenca sur de Managua. Esta estación proporcionó una base de datos extensa y consistente que

permitió analizar los principales parámetros climáticos. Se utilizaron registros históricos de precipitación (1958–2021), temperatura máxima (1957–2020), temperatura media (1957–2021), temperatura mínima (1957–2020) y evaporación (1968–2020), garantizando una cobertura temporal de más de 15 años para cada variable, lo cual otorga validez y confiabilidad estadística al análisis realizado.

Precipitación

El comportamiento de la precipitación anual, representado en el gráfico N°1, evidencia una marcada estacionalidad típica del clima tropical de Managua. Se observa un período seco o estival comprendido entre los meses de diciembre y abril, caracterizado por la escasez o ausencia de lluvias, seguido por el período lluvioso, que se extiende de mayo a noviembre. Dentro de esta fase, se registra el máximo acumulado de precipitación en octubre, con un valor promedio de 218,1 mm/mes, lo que coincide con los patrones pluviométricos históricos de la región.

Sin embargo, durante el periodo lluvioso se presenta un fenómeno transitorio conocido como canícula, el cual ocurre entre junio y agosto. Este evento se manifiesta como una disminución temporal de las precipitaciones y un aumento en la temperatura ambiente, afectando la recarga natural del acuífero y la disponibilidad superficial de agua. Este comportamiento climático debe ser considerado en la planificación del aprovechamiento hídrico, ya que influye directamente en los procesos de infiltración, almacenamiento y extracción sostenible del recurso subterráneo.

En términos generales, los resultados obtenidos permiten concluir que el área de estudio presenta condiciones geográficas, climáticas y ambientales favorables para la implementación de estrategias de gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo. La delimitación de la microcuenca, el análisis climatológico y la evaluación de la ausencia de amenazas ambientales proporcionan una base técnica sólida para el diseño de una metodología hidrogeológica integral, alineada con los términos de referencia establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Temperatura

En los gráficos N.º 2, N.º 3 y N.º 4 se presenta la distribución anual de la temperatura en el área de estudio. Los resultados muestran que los meses más calurosos corresponden a marzo, abril y mayo, con temperaturas máximas promedio de 29.7 °C, 30.5 °C y 30.3 °C, respectivamente. A partir del mes de junio, la temperatura inicia un descenso gradual que se mantiene hasta los primeros meses del año siguiente, evidenciando un comportamiento térmico variable y estacional. Este patrón refleja la influencia directa de los ciclos climáticos regionales sobre la dinámica térmica del área, aspecto que resulta relevante para comprender los procesos de evaporación, recarga y disponibilidad del recurso hídrico subterráneo.

Evaporación pana

En el gráfico N.º 5 se presenta el comportamiento de la evaporación pana a lo largo del año. Los resultados muestran que los meses con mayores pérdidas de agua por evaporación coinciden con los meses de mayor temperatura, específicamente marzo,

abril y mayo, registrando valores de 384.7 mm, 365.9 mm y 318.1 mm, respectivamente. En los meses posteriores, la evaporación presenta un patrón variable de ascenso y descenso entre los periodos de junio a marzo, reflejando la influencia directa de las condiciones térmicas y climáticas sobre la dinámica de pérdida de agua en la zona de estudio.

Humedad relativa

En relación con los datos de humedad relativa, se observa que durante el periodo seco (noviembre a abril) el mes con mayor humedad es noviembre, con un valor medio de 79%. En contraste, durante el periodo húmedo (mayo a octubre), el máximo nivel de humedad se registra en octubre, alcanzando un valor promedio de 82%. El mes con menor humedad corresponde a marzo, con un valor medio de 63%, lo que indica la presencia de un aire más seco y caliente, característico de la época previa al inicio del periodo lluvioso. (*Ver gráfico N.º 6*).

Geomorfología

De acuerdo con el INETER (1997), el área en estudio forma parte de la Cordillera Volcánica del Pacífico, conformada por una cadena de volcanes del Cuaternario reciente que abarca una extensión aproximada de 35.24 km².

Las elevaciones de mayor extensión, con alrededor de 9 km², se encuentran entre los 5º y 6º, correspondientes a zonas de planicies localizadas principalmente al norte de la microcuenca. Las pendientes entre 7º y 9º, que cubren aproximadamente 5.9 km², presentan un relieve ligeramente inclinado y se sitúan en el sector sur del área. Por su parte, las pendientes de 0º a 4º ocupan unos

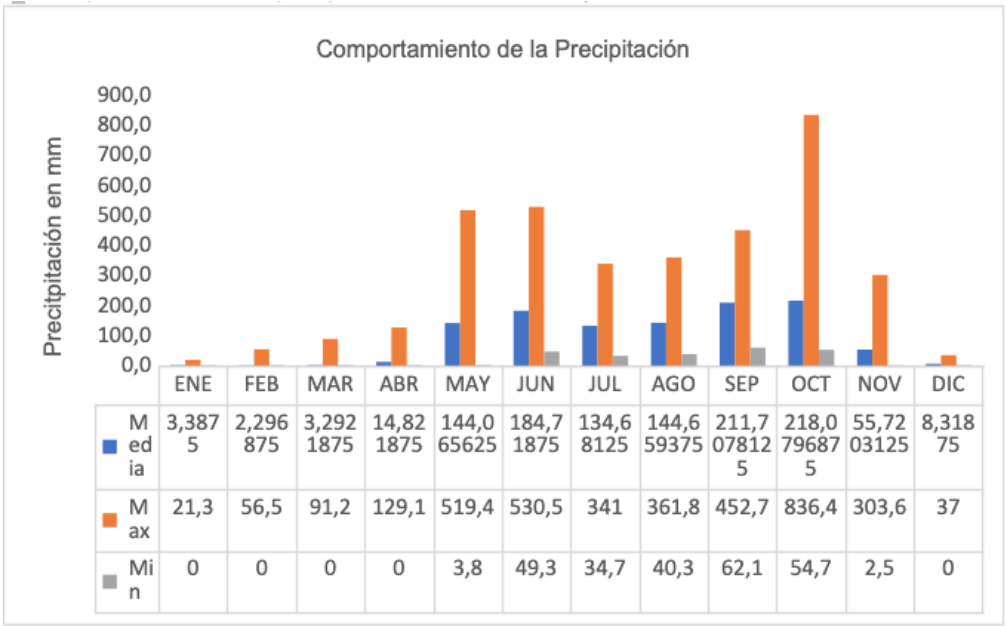


Gráfico 1. Comportamiento de la precipitación media, máximo y mínimo en mm durante el año.

Fuente: A partir de datos de INETER. (2024).

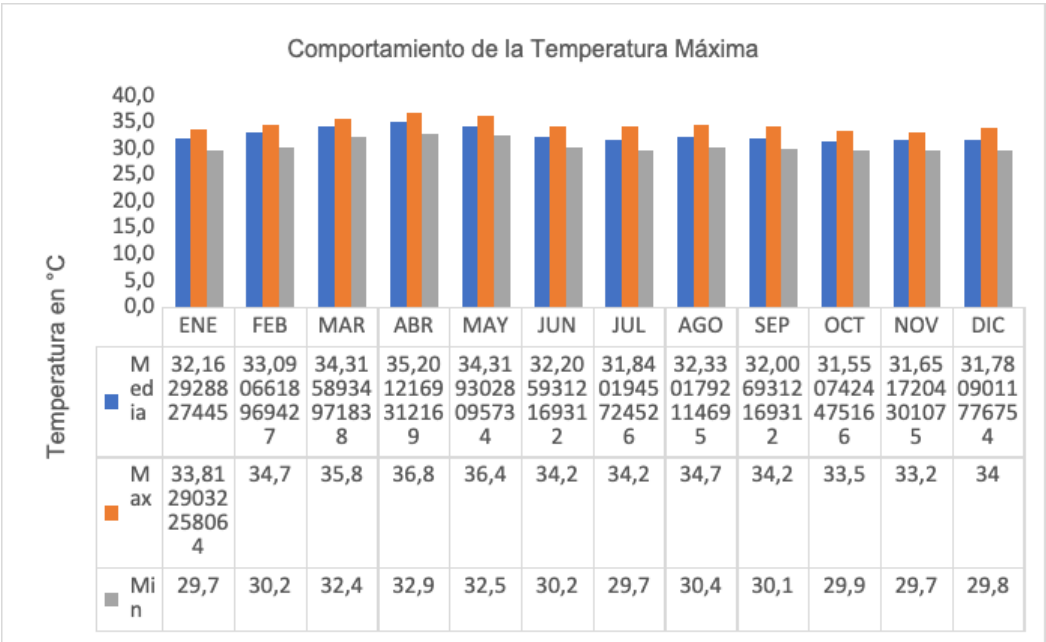


Gráfico 2. Comportamiento de la temperatura máxima en °C durante el año.

Fuente: A partir de datos de INETER. (2024).

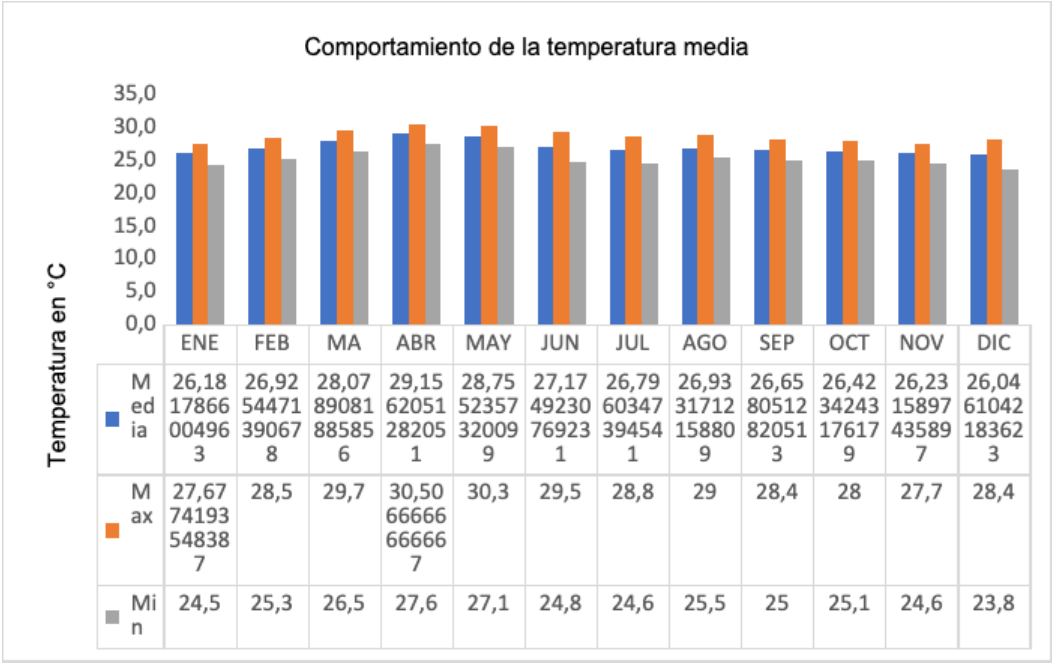


Gráfico 3. Comportamiento de la temperatura media en °C durante el año.

Fuente: A partir de datos de INETER. (2024).

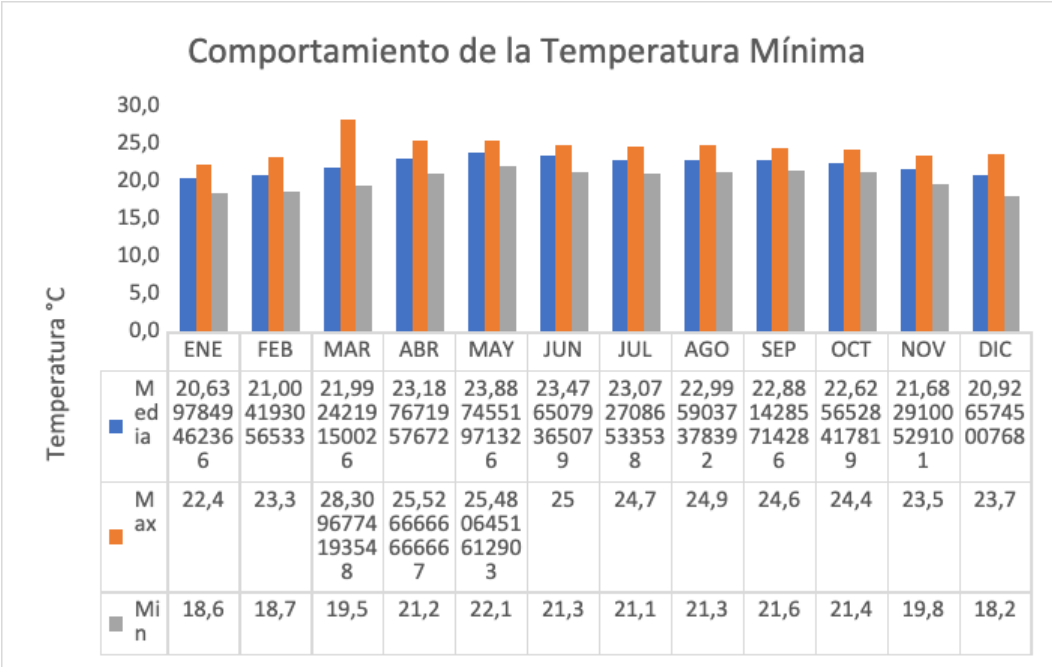


Gráfico 4. Comportamiento de la temperatura mínima en °C durante el año.

Fuente: A partir de datos de INETER. (2024).

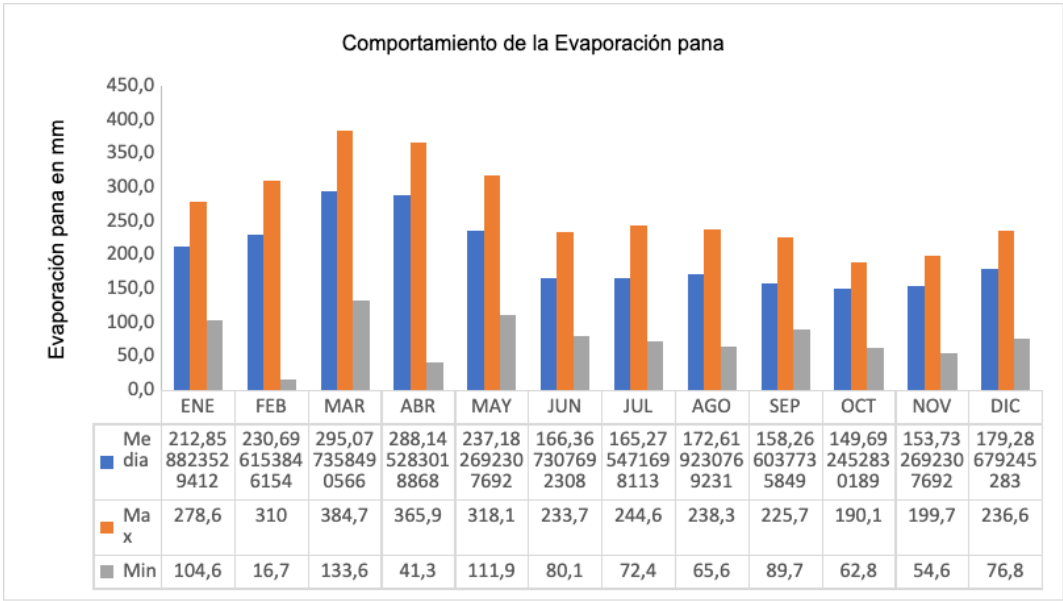


Gráfico 5. Comportamiento de la evaporación pana durante un año

Fuente: A partir de datos de INETER. (2024).

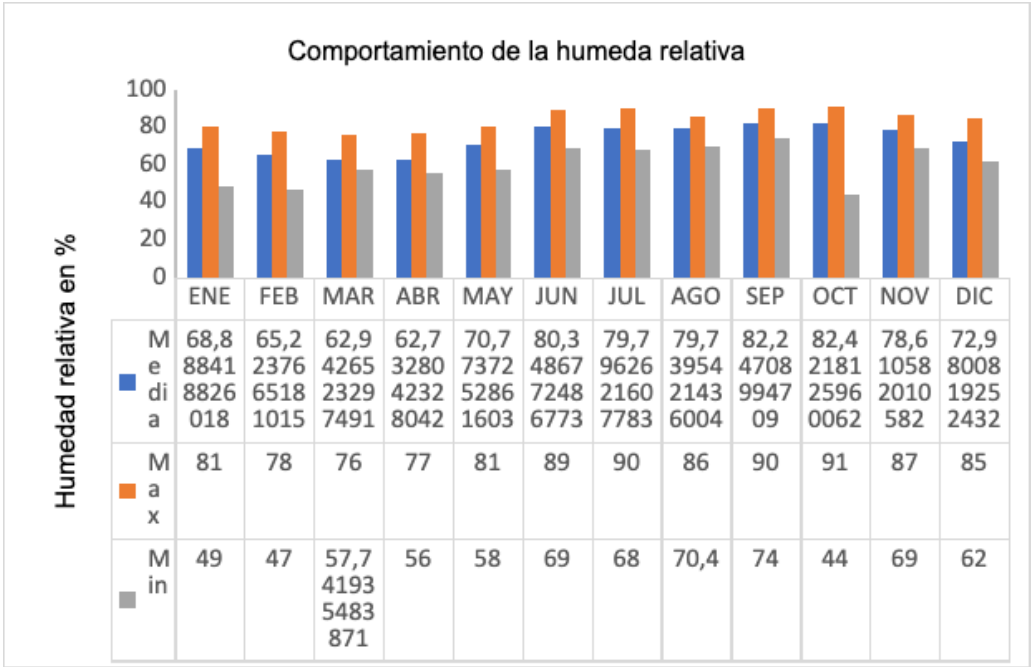


Gráfico 6. Comportamiento de la humedad relativa en % un año.

Fuente: A partir de datos de INETER. (2024).

5.8 km², distribuyéndose de forma predominante en la parte norte de la microcuenca.

Las pendientes de 10° a 18°, que abarcan una menor extensión, corresponden a zonas moderadamente escarpadas. Finalmente, las áreas de mayor elevación, ubicadas al sur, presentan pendientes de 19° a 60°, clasificadas como escarpadas a fuertemente escarpadas, y cubren una superficie menor a 1 km². En esta última zona, los rasgos más notables son los escarpes, que coinciden con laderas montañosas y relieves abruptos característicos del entorno volcánico.

Desde el punto de vista geológico, la microcuenca se asienta sobre dos series geológicas principales: Pleistoceno y Holoceno. El Holoceno ocupa aproximadamente 19.8 km² y está compuesto por lavas, tobas, cenizas, aglomerados, escorias basálticas y andesitas-basálticas, materiales de origen volcánico y piroclástico. La serie del Pleistoceno, con una extensión cercana a 7 km², presenta rocas piroclásticas y aglomeradas, entre las que se identifican ignimbritas, tobas, aglomerados, escorias y basaltos.

Desde el punto de vista estructural, la microcuenca es atravesada parcialmente por varias fallas geológicas de importancia regional, entre ellas las fallas Unidad de Propósito, Waspán, Centroamérica y Aeropuerto, las cuales influyen en la dinámica geomorfológica y en los procesos de drenaje superficial.

En cuanto a la taxonomía de los suelos, estos son de origen volcánico y pertenecen principalmente a los órdenes Molisoles, Entisoles, Andisoles y la unidad Managua Urbano. La distribución espacial de estos suelos se detalla en la Tabla 4.

El área de estudio se encuentra circunscrita dentro de la delimitación estab-

lecida bajo el enfoque de microcuenca. En ella se identifican tres órdenes principales de suelo: Molisol, con una extensión aproximada de 15 km²; Entisol, con 5 km²; Managua Urbano (denominación establecida por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales [INETER], (1997), con 5 km²; y Andisol, con una superficie de 1 km².

Se realizaron dos pruebas de infiltración para determinar la capacidad de absorción de agua en los suelos predominantes. La primera prueba, correspondiente al orden Molisol, se ejecutó en las coordenadas 583529E, 1336654N. Los resultados muestran una tasa de infiltración de 30.79 mm/h, valor que, según los rangos de infiltración básica de los diferentes tipos de suelo establecidos por Timm Sauer et al. (2010), ubica este suelo en el Grupo Hidrológico C, caracterizado por una infiltración lenta y una textura franco-arcillosa.

La segunda prueba se realizó en el orden Entisol, localizada en las coordenadas 582670E, 1336719N. Los resultados indican una tasa de infiltración de 23.03 mm/h, la cual, de acuerdo con los criterios definidos por Timm Sauer et al. (2010), también corresponde al Grupo Hidrológico C, con infiltración lenta y textura franco-arcillosa.

En cuanto al uso actual del suelo, el área de estudio presenta ocho coberturas principales. La más predominante corresponde a centros poblados, que ocupan una extensión aproximada de 19.7 km². Le sigue el bosque latifoliado cerrado, con 3.8 km², y la vegetación arbustiva, con 1.3 km². Estas coberturas reflejan una marcada intervención antrópica y una reducción de áreas naturales en favor del crecimiento urbano.

Respecto al drenaje superficial, la microcuenca no presenta corrientes permanen-

Sub grupo	Orden	Área Km ²
Typic Argiustolls	Molisol	15.9
Lithic Ustorthents	Entisol	5
-	Managua urbano	5
Humic Haplustands	Andisol	1
	Total	26.9

Tabla 4. Clasificación del acuífero según la conductividad hidráulica.

Fuente: Obtenidas de base de datos cartográfica de INETER. (2024).

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Volumen (m ³)	2448.69	2211.72	2448.69	2369.70	2448.69	2369.70
Meses	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Volumen (m ³)	2448.69	2448.69	2369.70	2448.69	2369.70	2448.69
Volumen anual = 28831.28 m ³ /anual						

Tabla 5. Volúmenes máximos mensuales.

Fuente: recuperado del estudio evaluación del recurso hídrico, caso de estudio. (2024).

Descripción	Caudal (gpm) (m ³ /d)			Descenso (pies) (m)	
Pozo proyectado	151.53gpm (825.98m ³ /día)			3.93 pies (1.20m)	
Descripción	Q (m ³ /día)	ΔS (m)	T (m ² /día)	Denominación	Espesor Saturado pies (m)
Pozo Proyectado	825.98 m ³ /día	(1.20m)	125.96m ² / día	Clase alta	19.06 pies (5.81m)
Descripción	K (m/día)	Calificación	Comportamiento	Ca (S)	
Pozo Proyectado	21.679 m/día	Alta	Buenos Acuíferos	0.01	
Descripción	Ce (gpm/pie)		T(hrs)	Ri(m)	
Pozo Proyectado	7.95 gpm/pie		15	119.36m	

Tabla 6. Resultados de los parámetros hidráulicos del pozo proyectado.

Fuente: recuperado del estudio evaluación del recurso hídrico, caso de estudio. (2024).

tes de importancia. En la zona alta se identifican corrientes efímeras, mientras que en los sectores medio y bajo se observan principalmente drenajes pluviales urbanos (cauces) que desembocan en el Lago Xolotlán.

En el marco del cumplimiento de la Ley General de Aguas Nacionales (Ley No. 620), específicamente lo dispuesto en el Capítulo II sobre el otorgamiento de concesiones, autorizaciones y licencias (Artículo 46), se establece que dicho otorgamiento debe basarse en:

- a) Los estudios de disponibilidad media anual del agua.
- b) Los derechos de uso o aprovechamiento registrados en el Registro Público Nacional de los Derechos de Agua.
- c) El posible impacto social y el tipo de uso solicitado.
- d) La suscripción de un contrato entre el solicitante y la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Por consiguiente, en el sitio de estudio se considera la perforación y aprovechamiento del recurso hídrico para consumo humano en su forma natural. Para su cuantificación, se toma como referencia la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense NTON 09 007-19 (2019), obteniéndose los volúmenes estimados que se presentan en la tabla 5 correspondiente.

Fase II: Características del medio geológico

De manera general, a nivel regional, la microcuenca en estudio se encuentra dentro del área comprendida por la subprovincia Graben de Nicaragua, la cual forma parte de la provincia hidrogeológica del Pacífico.

Esta unidad constituye, a nivel nacional, una de las zonas hidrogeológicas más relevantes por su potencial en la producción de aguas subterráneas (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales [INETER], 1997).

El área de estudio se ubica completamente dentro del acuífero Las Sierras, con una extensión aproximada de 575 km². Esta formación geológica se caracteriza por su alta capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea, debido a la presencia de capas porosas y permeables, conformadas por flujos piroclásticos, depósitos de caída, escorias con fragmentos de roca, zonas meteorizadas con suelos fósiles y fracturas en aglomerados basáltico-andesíticos, tobas y tobas brechosas. Estas características están estrechamente asociadas con la litología y el fallamiento de la zona (INETER, 1997).

La recarga del acuífero se ve favorecida por las condiciones topográficas, geológicas y de cobertura vegetal presentes en el sector alto de la microcuenca, donde la infiltración es más eficiente. El agua subterránea en el acuífero Las Sierras se encuentra bajo condiciones libres o no confinadas, con un flujo predominante en dirección norte hacia la costa del Lago Xolotlán, ubicada a una altitud aproximada de 40 m s. n. m., considerada la principal zona de descarga del acuífero (Martínez González, 2012).

Dentro del área delimitada bajo el enfoque de cuenca se registran 22 pozos, de los cuales 10 están referenciados en la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y 12 en los registros del INETER. No obstante, para el presente estudio no se dispone de información de aforos, dado que el propósito principal es solicitar una nueva concesión y permiso de perforación ante la ANA. A pesar de no existir estudios previos específicos en el sitio, se tomaron como re-

ferencia investigaciones relacionadas con el acuífero Las Sierras de Managua, entre ellas INAA y JICA (1993), Martínez González (2012) y Martínez Ruiz y Chévez Rodríguez (2017).

Según Martínez Ruiz y Chévez Rodríguez (2017), los pozos más cercanos al área de estudio son tres:

- Pozo 1: Coordenadas UTM WGS-84 581764E, 1343896N.
- Pozo 2: Coordenadas UTM WGS-84 583446E, 1343628N.
- Pozo 3: Coordenadas UTM WGS-84 583452E, 1343720N.

Los resultados obtenidos por dichos autores indican capacidades de extracción de 233.2 gpm (1,271.16 m³/día), 422.26 gpm (2,301.6 m³/día) y 516.22 gpm (2,813.76 m³/día), respectivamente, con una producción promedio de 390.56 gpm. Los niveles estáticos (NEA) registrados fueron de 147 pies, 500 pies y 400 pies, respectivamente.

En cuanto a los descensos de nivel, Martínez Ruiz y Chévez Rodríguez (2017) reportaron valores de 1.15 m, 1.10 m y 1.36 m para los pozos 1, 2 y 3, respectivamente, con un promedio general de 1.20 m. Un resumen de estos resultados se presenta en la tabla 6.

Recarga local del acuífero

Para cuantificar la recarga local del acuífero en el área de estudio, se aplicó el método de Schosinsky (2006), el cual se basa en el principio del balance hídrico del suelo. Este método considera las variables que inciden directamente en la recarga de los acuíferos, tales como la precipitación, el coeficiente de infiltración, la evapotranspiración, la retención pluvial, la pendiente del

terreno, la cobertura vegetal, la profundidad de las raíces y la textura del suelo. A partir de estos parámetros, se estima el volumen total del aporte anual de las precipitaciones al acuífero en el área de estudio, reflejando así el potencial de infiltración efectiva del sistema.

Para la determinación del balance hídrico de suelos, se consideraron dos órdenes de suelo predominantes en la zona: el Molisol y el Entisol. El primero presenta una textura franco-arcillosa con una tasa de infiltración de 30.79 mm/h, mientras que el segundo, también con textura franco-arcillosa, presenta una tasa de infiltración de 23.03 mm/h. Ambos valores fueron determinados a partir de pruebas de campo realizadas durante el estudio, considerando un tiempo promedio de 8 horas de lluvia en un día.

De acuerdo con los criterios establecidos por Timm Sauer et al. (2010), estos valores corresponden al grupo hidrológico C, caracterizado por una infiltración lenta debido a la composición textural y a la moderada permeabilidad del suelo. Esta clasificación resulta relevante para la modelación de la recarga y la planificación del uso sostenible del recurso hídrico subterráneo.

En las tablas 7 y 8 se presentan los resultados del cálculo del balance hídrico y la estimación del volumen total de recarga anual del acuífero, considerando las condiciones edáficas y climáticas específicas de la microcuenca.

En un radio de acción de tres kilómetros, se identificaron veintitrés pozos, de los cuales trece están inventariados por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) y diez por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). El volumen total pro-

medio de aprovechamiento es de 529.068 m³/h, equivalente a 12,697.632 m³/día.

Los principales usuarios del recurso hídrico son empresas e instituciones como Inversiones CARVI, S.A.; Desarrollos Hoteleros de Nicaragua, S.A.; Pablo Francisco Albir Sotomayor; Inmobiliaria Santo Domingo; Casa Comercial Mántica, S.A. (Supermercados La Colonia); Embajada de la Federación Rusa; Grupo Horizonte, S.A.; Asociación Española Nicaragüense (Casa España); e Inmuebles Diano Marina, S.A. En su mayoría, el uso del recurso se destina al consumo humano, doméstico y al sector turístico (INETER, s. f.; ANA, s. f.).

Fase III: Análisis de calidad del agua

De acuerdo con el medio hidrogeológico, los datos obtenidos del análisis de calidad del agua en el punto muestreado, ubicado en las coordenadas 583461E; 13365523N (UTM WGS84-16P), se consideran representativos, ya que el sitio se localiza dentro del mismo acuífero, en la misma línea piezométrica y con igual dirección de flujo subterráneo. Para la realización del análisis de calidad del agua se trabajó en colaboración con el Laboratorio Bengoechea, S.A. (Bengoechea, 2025).

El análisis físico-químico se efectuó con base en los resultados proporcionados por dicho laboratorio. Los rangos obtenidos, así como los criterios de clasificación del agua según su dureza, fueron contrastados con las *Guías Internacionales para el Agua Potable* de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017).

De acuerdo con los criterios establecidos por la OMS (2017), los parámetros físico-químicos cumplen con los valores

normativos recomendados. No obstante, conforme a los lineamientos de la Comisión Centroamericana de Agua Potable y Saneamiento (CAPRE, 2012), se observó que el parámetro de conductividad eléctrica se encuentra fuera del rango permitido, lo cual está relacionado con la presencia de sólidos disueltos provenientes de sales minerales. En consecuencia, según su dureza, el agua analizada se clasifica como moderadamente dura.

En el siguiente diagrama se presenta el tipo hidroquímico del agua determinado a partir de la concentración de cationes y aniones predominantes. En la Gráfica 7, se observa un patrón hidroquímico donde predominan las facies bicarbonatadas sódicas sulfatadas ($\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-}$), lo que confirma la clasificación del recurso como agua moderadamente dura.

Análisis de metales pesados, plaguicidas y parámetros microbiológicos

En cuanto a los metales pesados, los resultados obtenidos indican que, conforme a los criterios establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017), los parámetros analizados cumplen con los valores normativos, ya que no se detectaron concentraciones de metales pesados en la muestra evaluada. De igual manera, según la normativa de la Comisión Centroamericana de Agua Potable y Saneamiento (CAPRE, 2012), los resultados se encuentran dentro de los rangos permitidos.

Respecto al parámetro de plaguicidas, el análisis contempló la detección de compuestos organoclorados y organofosforados. Este estudio se realizó en el pozo de ENACAL, localizado en las coordenadas

ENTRADAS	MM ³ /anual	SALIDAS	MM3/anual
Recarga Potencial	6.6162	Escurrimiento subterráneo	0.2448
Infiltración por corrientes superficiales	0.0000	Percolación profunda	0.3308
Recarga por retorno de extracciones	0.0000	Extracción por bombeo	0.1931
Total	6.6162	Total	0.7687
Disponibilidad (Δs) = 5.8475 MM3/año			

Tabla 7. Balance hídrico, entrada y salida en el sistema, para suelo molisol.

Fuente: recuperado del estudio evaluación del recurso hídrico, caso de estudio. (2024).

ENTRADAS	MM ³ /anual	SALIDAS	MM3/anual
Recarga Potencial	0.9572	Escurrimiento subterráneo	0.2448
Infiltración por corrientes superficiales	0.0000	Percolación profunda	0.0478
Recarga por retorno de extracciones	0.0000	Extracción por bombeo	0.1931
Total	0.9572	Total	0.4857
Disponibilidad (Δs) = 0.4715 MM3/año			

Tabla 8. Balance hídrico, entrada y salida en el sistema, para suelo entisol.

Fuente: recuperado del estudio evaluación del recurso hídrico, caso de estudio. (2024).

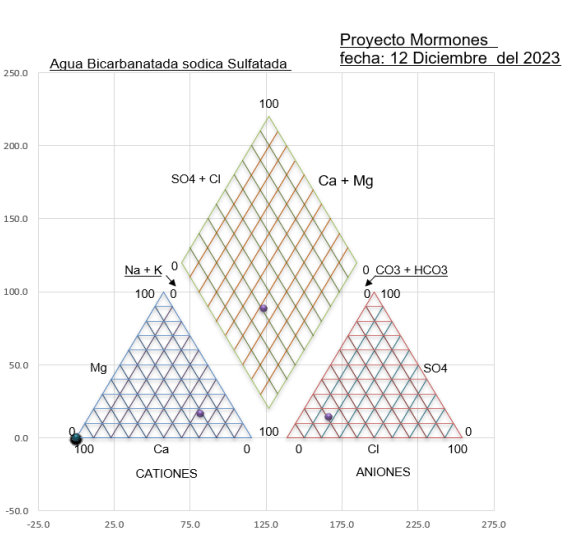


Gráfico 7. Diagrama de PIPPER, hidroquímico del sitio muestreado

Fuente: recuperado del estudio evaluación del recurso hídrico, caso de estudio. (2024).

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.5157226260115>DOI <https://doi.org/10.1002/for>DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.5157226260115>DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.5157226260115>

23



23



23



23

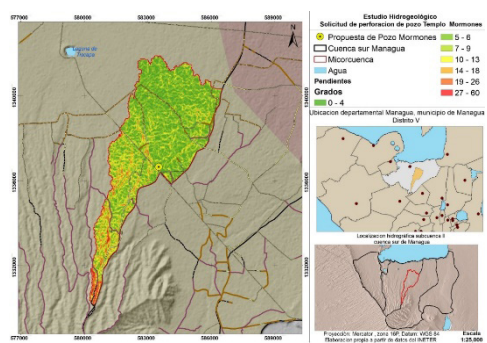


Figura 4. Elevaciones del área en estudio.

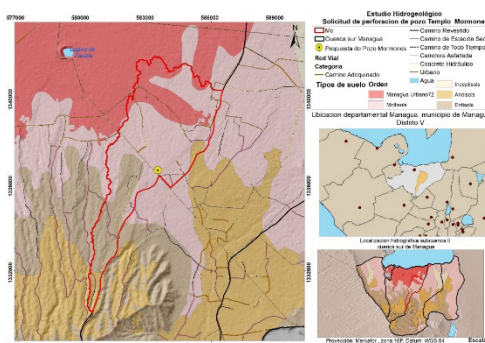


Figura 7. Tipo de suelos según su taxonomía.

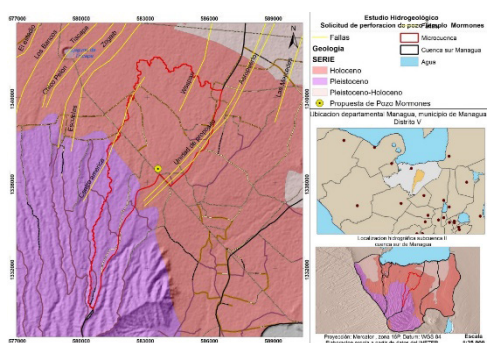


Figura 5. Geología histórica y estructural del área en estudio.

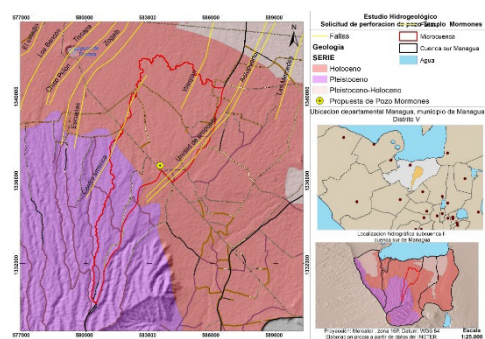


Figura 8. Ubicación de las pruebas de infiltración.

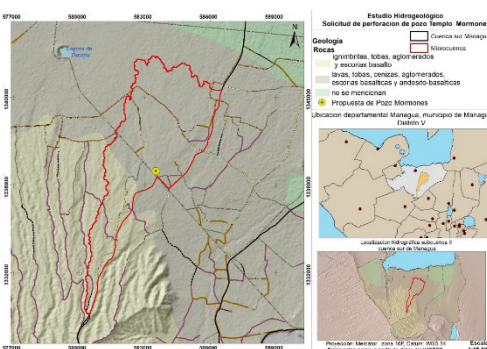


Figura 6. Geología litológica.

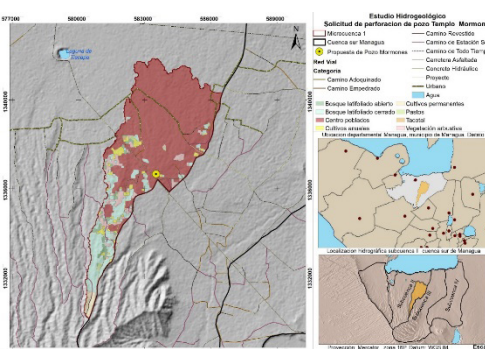


Figura 9. Cobertura y uso de la tierra.

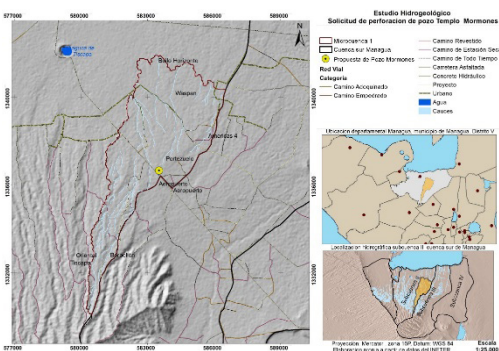


Figura 10. Drenaje de la microcuenca.

Mapas considerados en la fase IV:

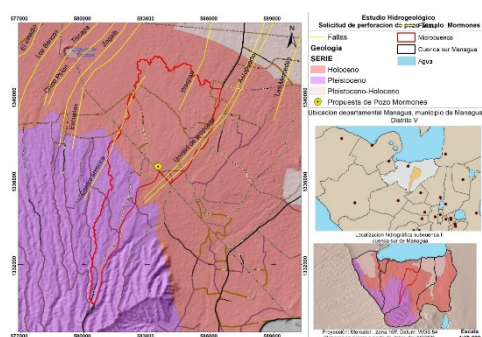


Figura 13. Amenaza por fallas locales

Figuras consideradas del estudio en la fase II

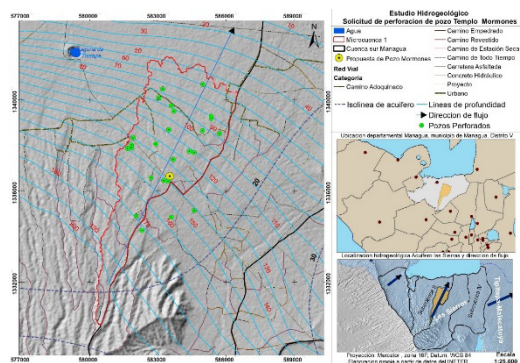


Figura 11. Acuífero La Sierra-Dirección de flujo

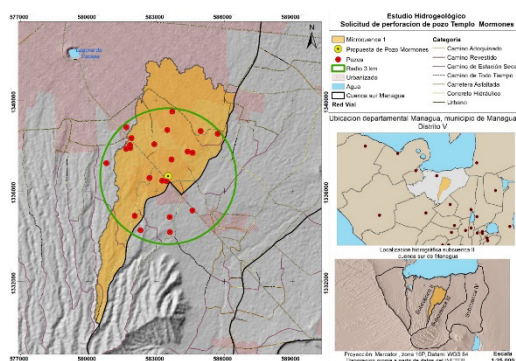


Figura 12. Pozos circunscritos en un radio de acción de y línea de contorno de nivel freático. 3km.

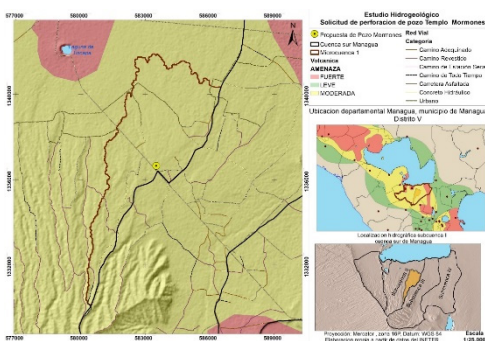


Figura 14. Amenaza por volcanes en el área de estudio.

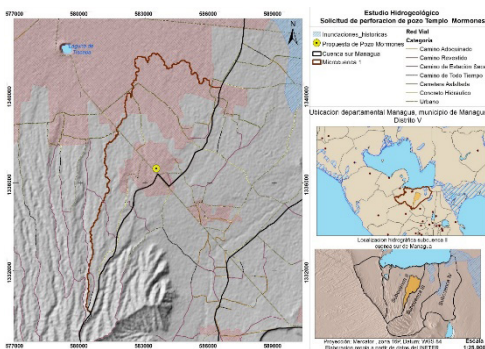


Figura 15. Amenaza por inundaciones en el área de estudio.

Conclusiones

Los resultados del análisis de calidad del agua del pozo ubicado en las coordenadas 583461E; 13365523N (UTM WGS-84-16P) permiten concluir que, desde el punto de vista físico-químico, el recurso hídrico cumple con los parámetros establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017) y la Comisión Centroamericana de Agua Potable y Saneamiento (CAPRE, 2012), a excepción de la conductividad eléctrica, la cual se encuentra por encima del rango normativo. Este comportamiento se asocia a una mayor concentración de sales disueltas, posiblemente relacionadas con procesos naturales de disolución de minerales en el acuífero. Resultados similares fueron reportados por Pérez et al. (2020) en su estudio sobre aguas subterráneas en zonas semiáridas de Honduras, donde la elevada conductividad eléctrica también se vinculó a la mineralización natural del subsuelo.

La clasificación del agua como moderadamente dura se ajusta a los criterios hidroquímicos establecidos por la OMS (2017), evidenciando un predominio de las facies bicarbonatadas sódicas sulfatadas (HCO_3^- - Na^+ - SO_4^{2-}). Este tipo de composición es característica de acuíferos con procesos de intercambio iónico y disolución de yesos y carbonatos, tal como señalan Custodio y Llamas (2016) en su obra sobre hidrogeología de aguas subterráneas.

En cuanto a los metales pesados, los análisis demostraron la ausencia de concentraciones detectables, lo que indica un bajo riesgo de contaminación antrópica. Este hallazgo coincide con lo reportado por Mendoza y Rodríguez (2019), quienes encontraron condiciones similares en pozos de abastecimiento urbano en Nicaragua, donde

los niveles de metales se mantienen por debajo de los límites establecidos por la OMS.

Respecto al análisis de plaguicidas organoclorados y organofosforados, los resultados revelaron ausencia total de estos compuestos, lo que sugiere una baja presión de contaminación agrícola directa en la zona de recarga. Sin embargo, se recomienda mantener un monitoreo periódico, considerando la persistencia ambiental y bioacumulación de este tipo de sustancias, como advierte la FAO (2021) en sus lineamientos para el control de contaminantes en aguas subterráneas.

Finalmente, los resultados del análisis microbiológico evidenciaron la ausencia de coliformes y bacterias patógenas, confirmando que el agua es apta para el consumo humano según las normas CAPRE (2012) y OMS (2017). Este hallazgo reafirma la efectividad de las medidas de protección sanitaria implementadas en el pozo, aunque se recomienda continuar con evaluaciones semestrales para garantizar la inocuidad del recurso en el tiempo.

En síntesis, el estudio demuestra que el agua subterránea analizada mantiene una calidad adecuada para uso doméstico y humano, presentando únicamente una ligera mineralización que no compromete su potabilidad. La aplicación de metodologías de monitoreo continuo permitirá fortalecer la gestión sostenible del acuífero y prevenir posibles riesgos de contaminación futura.

Referencias

ANA (Autoridad Nacional del Agua). (2024). Términos de referencia para estudios hidrológicos e hidrogeológicos. Managua, Nicaragua.

Asamblea Nacional de la República de Nicaragua. (2007). Ley General de Aguas Nacionales (Ley No. 620). La Gaceta, Diario Oficial No. 169.

Aprovechamiento de aguas subterráneas para consumo humano. Managua: Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA).

Bradbury, K., et al. (2000). Clasificación hidrológica de suelos y tablas de infiltración. Wisconsin Geological and Natural History Survey.

CEPAL. (2022). Cambio climático y gestión del agua en América Latina. Santiago de Chile: CEPAL.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). Hidrogeología y gestión de aguas subterráneas. Madrid: Fundación Marcelino Botín.

Depeña, A., & Panarello, H. (2008). *Aplicación de isótopos en estudios hidrológicos e hidrogeológicos*. Congreso desarrollado en Quito, Ecuador.

Fili, D., Dalla Costa, F., Díaz, A., & Giorgio, L. (2002). Estudios hidrogeológicos para la determinación de la incidencia de aguas subterráneas. Buenos Aires: Universidad Nacional del Litoral.

García, L., & López, C. (2020). Diagnóstico hidrogeológico del Pacífico de Nicaragua. Managua: UNI.

INAA & JICA. (1993). Guía técnica para estudios de acuíferos en Nicaragua. Managua: Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (1997). Mapa de suelos y geología del Pacífico de Nicaragua. Managua, Nicaragua.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (1997). Mapa hidrogeológico de Nicaragua. Managua, Nicaragua.

Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INAA) & Agencia de

Cooperación Internacional del Japón (JICA). (1993). Estudio de los recursos hídricos subterráneos del Pacífico de Nicaragua. Managua, Nicaragua.

Martínez Ruiz, A., & Chevez Rodríguez, O. (2017). Análisis de calidad de agua y

uso de diagramas PIPER. Managua: Universidad Nacional de Ingeniería.

Martínez González, R. (2012). Evaluación hidrogeológica del acuífero Las Sierras,

Managua. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.

Martínez Ruiz, D., & Chévez Rodríguez, M. (2017). Caracterización hidrogeológica y evaluación del potencial del acuífero Las Sierras de Managua. Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua.

NTON-09-003-99. (1999). Norma técnica obligatoria para calidad de aguas de consumo humano. Managua: Ministerio de Salud.

NTON-09-007-19. (2019). Norma técnica obligatoria: Demanda de agua.

Managua: Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales.

Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense (NTON) 09 007-19. (2019).

Picado, A. (2022). Métodos de infiltración y caracterización de suelos. León: UNI.

Picado, A. (2023). Formulaciones analíticas para bombeo y coeficiente de almacenamiento. Managua: UNI.

Schosinsky, R. (2006). Métodos de estimación de recarga de acuíferos. San José: Universidad de Costa Rica.

Timm Sauer, T., et al. (2010). Hydrologic soil groups and infiltration rates in tropical soils. *Journal of Hydrologic Research*, 45(2), 1–8.

UNESCO. (2021). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2021: Valorar el agua. París: UNESCO.

Zhou, Y. (2019). Hydrogeological modeling and groundwater management. Springer.