

Evaluación de disponibilidad y calidad del agua subterránea en pozo comunitario de Momotombo, Nicaragua

Assessment of the availability and quality of groundwater in community well in Momotombo, Nicaragua

*Acosta Green*¹, *Josué Ariel*^{1*}
*Ramírez Martínez*², *Isabel del Carmen*²
*Rojas Morales*³, *Cristofer José*³

^{1,2} Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua

³ Agrologico de Nicaragua S.A, Managua, Nicaragua

¹ Josue.acosta@daca.uni.edu.ni  <https://orcid.org/0009-0002-6519-0549>

² isabelramirezm08@gmail.com  <https://orcid.org/0009-0004-5284-3090>

³ cris2452001r@gmail.com  <https://orcid.org/0009-0009-4840-4147>

Recibido/received: 03/03/2025 Corregido/revised: 15/04/2025 Aceptado/accepted: 18/06/2025

Resumen: El presente estudio evaluó la disponibilidad y calidad del recurso hídrico subterráneo en la comunidad de Momotombo, municipio de La Paz Centro, departamento de León. Según Corrales Pérez (2005), las aguas subterráneas son la principal fuente de abastecimiento para el consumo humano, lo que resalta la necesidad de proteger y utilizar sosteniblemente los acuíferos. Desde 2014, la comunidad se abastece de un pozo de la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL), pero carece de estudios recientes sobre sus propiedades hidráulicas y calidad. Este estudio como parte de sus objetivos actualiza la información mediante una metodología mixta que combina métodos cualitativos y cuantitativos, incluyendo análisis de datos meteorológicos, evaluación del medio hidrogeológico y análisis de calidad del agua a través del bombeo del pozo y pruebas de laboratorio, utilizando herramientas de software como ArcGIS, EASY QUIM y AQTESOLV. Los hallazgos indican condiciones hidrogeológicas favorables, evidenciando un acuífero libre con una transmisividad de 1216.60 m²/d, lo que sugiere alta productividad y viabilidad en la explotación del pozo. Se estima un potencial hídrico de 21.27 Mm³/año y una extracción de 0.3188 Mm³/año para satisfacer la demanda de la población, asegurando un uso sostenible. En cuanto a la calidad del agua, esta cumple mayormente con los valores establecidos por Comisión Nacional del Agua Potable y Saneamiento, (CAPRE) y la Norma técnica nicaragüense (NTON 05-007-98) aunque se detectaron niveles elevados de sodio y cloruros, junto con la presencia mínima de agentes bacteriológicos, recomendando un tratamiento primario de las aguas del pozo evaluado.

* Autor de correspondencia

Correo: Josue.acosta@daca.uni.edu.ni



Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-SinDerivar 4.0

Palabras clave: Acuíferos; hidrodinámica; transmisividad; bacteriológico; metales pesados

Abstract: The present study evaluated the availability and quality of the groundwater resource in the community of Momotombo, municipality of La Paz Centro, department of León. According to Corrales Pérez (2005), groundwater is the main source of supply for human consumption, highlighting the need to protect and sustainably use aquifers. Since 2014, the community has been supplied by a well from the Nicaraguan Company of Aqueducts and Sewers (ENACAL), but lacks recent studies on its hydraulic properties and quality. This study aims to update that information through a mixed methodology that combines qualitative and quantitative methods, including meteorological data analysis, hydrogeological assessment, and water quality analysis through well pumping and laboratory tests, utilizing software tools such as ArcGIS, EASY QUIM, and AQTESOLV. The findings indicate favorable hydrogeological conditions, showing a free aquifer with a transmissivity of 1216.60 m²/d, suggesting high productivity and viability for well exploitation. A water potential of 21.27 Mm³/year and an extraction of 0.3188 Mm³/year are estimated to meet the population's demand, ensuring sustainable use. Regarding water quality, it mostly complies with the values established by the National Commission of Drinking Water and Sanitation (CAPRE) and the Nicaraguan technical standard (NTON 05-007-98), although elevated levels of sodium and chlorides were detected, along with minimal presence of bacterial agents, recommending primary treatment for the evaluated well water.

Keywords: Aquifers; hydrodynamics; transmissivity; bacteriological; heavy metals.

Introducción

En el territorio centroamericano la calidad de los cuerpos de agua no es adecuada. Esto se debe en parte a que el crecimiento urbano y de la población en general ha provocado una mayor presión sobre las fuentes de agua. La inadecuada gestión de desechos, el uso excesivo de agroquímicos y las prácticas insostenibles de extracción de agua han deteriorado gravemente la calidad y disponibilidad de este vital recurso en la región Centroamericana, (Tábora et al., 2011) .

Kumar et al., (2009), argumentan, que el agua subterránea presenta características hidrogeológicas que la hacen menos susceptibles a la contaminación antrópica y a las variaciones ambientales. Sin embargo, la creciente demanda de este recurso hídrico ha conllevado a un aumento en la cantidad de agua extraída mediante perforaciones de pozos. Por otra parte, Roldán et al. (2019), aducen que los principales problemas que enfrenta Nicaragua en la calidad de su agua son provocados por la contaminación debido a actividades agrícolas, industriales y procesos naturales del medio geológico que afectan las aguas subterráneas, así como por la eutrofización y sedimentación hacia los cuerpos de las aguas superficiales.

A su vez, Delgado et al. (2023), infiere que, la calidad de agua del pacifico del país se ve sumamente afectada por explotación agrícola, siendo los mayores contaminantes, la explotación de caña de azúcar, bananeras, maniseras y la ganadería. Así mismo Delgado aduce que el suministro de agua potable para la población del pacifico proviene principalmente de las aguas subterráneas, siendo estas mayormente explotadas, debido al poco aprovechamiento de las aguas superficiales, ya que, el agua superficial está contaminada o escasa. Vammen y Hurtado García (2012), añaden que las aguas subterráneas en la región de León-Chinandega, presentan problemas de calidad debido a altos niveles de cloruro y sólidos disueltos en zonas de descarga regional. Además, están afectadas por desechos domésticos, industriales, así como por los efectos de la ganadería. Asimismo, infieren que la cuenca enfrenta desafíos significativos relacionados con el cambio climático, dado que estos departamentos son especialmente vulnerables a las variaciones climáticas que afectan la disponibilidad y calidad del agua.

El propósito general de este estudio fue evaluar la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas en el occidente de Nicaragua, afectadas por el crecimiento poblacional y la contaminación derivada de prácticas agrícolas e industriales. Para alcanzar este propósito, se llevaron a cabo dos objetivos; se analizó las propiedades hidráulicas del acuífero mediante la realización de una prueba de bombeo y se determinó la calidad del agua del pozo en estudio con el fin de verificar su idoneidad para el consumo humano. Los resultados obtenidos permitieron no solo comprender el estado actual del recurso hídrico subterráneo, sino también servir de base para el diseño de políticas públicas y estrategias de manejo que garanticen el acceso sostenible a agua potable de calidad en la comunidad.

Esta investigación se realizó en un área determinada del acuífero de Occidente. Geográficamente, localizada en las coordenadas 12°24'50" N 86°37'52" E, comunidad Momotombo, municipio de La Paz centro, departamento León, justificándose por la necesidad de comprender las propiedades hidráulicas con el fin de evaluar su potencial hídrico y la calidad del agua extraída del pozo en estudio. A través de la evaluación de las características hidráulicas del acuífero y del análisis de la calidad del agua, se buscó ofrecer información actualizada y relevante que sirva como base para la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico.

Conforme al Decreto N° 44-2010, Reglamento a la Ley General de Aguas Nacionales (Ley N° 620 y su reforma Ley N° 1046), la Autoridad Nacional del Agua (ANA) actúa como el ente superior del Poder Ejecutivo responsable de la gestión de las aguas nacionales y de sus bienes inherentes. El Artículo 44, titulado "Operación de Acueductos de Distribución de Agua", establece que los sistemas operados por el Estado, la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillado (ENACAL) o las empresas municipales que prestan el servicio público de agua potable y alcantarillado sanitario, deben obtener la autorización correspondiente del Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INAA).

Tanto a la Autoridad Nacional del Agua (ANA) como Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INAA), son responsables de verificar el cumplimiento de la NTON 09 006-11 que establece los requisitos ambientales para pozos de extracción de agua, donde especifica que el agua de los pozos destinados al abastecimiento público de agua potable y uso doméstico debe ser analizada según los parámetros establecidos por la Comisión Nacional del Agua Potable y Saneamiento

(CAPRE) y la Norma técnica Nicaragüense para la clasificación de los recursos hídricos NTON 05-007-98, (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2025).

Material y Métodos

Este estudio fue realizado en la comunidad Momotombo, municipio de La Paz Centro, en un pozo para abastecimiento de agua potable de la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios (ENACAL). Geográficamente, se localiza en las coordenadas 12°24'50" N 86°37'52" E, a una elevación de 89 metros sobre el nivel del mar (msnm). Desde el punto de vista hidrográfico, se encuentra en la subcuenca Río San Juan circunscrita a la cuenca N°69, conocida comúnmente como Río San Juan, con código 952939, de acuerdo a la unidad 6, del método de Pfastetter. Esta investigación es de tipo descriptivo y correlacional con un enfoque mixto, puesto que, se integraron los métodos cualitativos y cuantitativos, permitiendo recolectar datos mediante observaciones, entrevistas y análisis de documentales, así como analizar y procesar los datos.

La investigación se llevó a cabo en tres fases: La primera fase consistió en un proceso de recopilación de información primaria y secundaria. La información secundaria se centró en la búsqueda y revisión de estudios locales y regionales, así como literatura existente sobre la zona proporcionando un marco referencial sobre el potencial y calidad hídrica de la investigación, así como también la obtención de los datos meteorológicos basándose en información espacial de Data Access Viewer y el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), enfocándose en parámetros cruciales como precipitación con unidad de medida en milímetros (mm) y la temperatura expresada en grados Celsius (°C), para calcular la evapotranspiración potencial, se aplicó el método de Hargreaves simplificado, expresando los resultados en milímetros por días (mm/día). Por otro lado, la información primaria permitió tener un mejor conocimiento del área en estudio, ya que fueron datos obtenidos directamente de la comunidad.

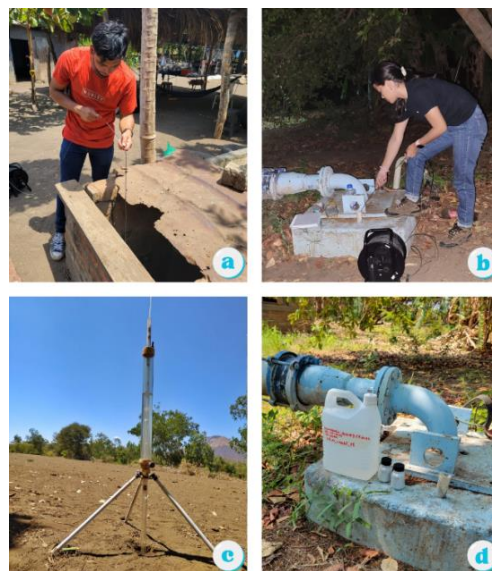
La segunda fase del estudio, se centró en la recolección de datos de campo, que incluyó un inventario de fuentes subterráneas "Pozos" en la comunidad, así como la realización de una prueba de bombeo en el pozo de estudio, utilizando una sonda de medición de nivel de agua, se realizaron pruebas de infiltración dentro del área y toma de muestras de agua subterránea para evaluar la calidad de agua, (figura 1).

La última fase del estudio, se dedicó al procesamiento y análisis de datos recopilados, integrando tanto la información de la primera fase como la recolección de los datos de campo. Esta etapa incluyó el cálculo del coeficiente de determinación estadístico (R^2) para la variable de precipitación, con el fin de evaluar el rendimiento y efectividad de los datos obtenidos de Data Access Viewer e INETER, el valor deseado para explicar la variabilidad de los datos es de 1 o más de 0.6 indicando un ajuste adecuado del modelo a los datos.

Además, se utilizó el software ArcGis, para la creación de mapas temáticos y la caracterización del medio físico e hidrogeológico, permitiendo analizar la distribución del suelo y comprender sus características edafológicas, así como visualizar la distribución de las unidades geológicas, que ayudan a entender la composición del subsuelo y su relación con el acuífero. A su vez, se identificaron patrones de precipitación, analizando su variabilidad y su relación con la recarga del acuífero, también se conoció la topografía del terreno permitiendo entender el flujo y dinámica del acuífero, incluyendo la representación de los niveles piezométricos, lo cual fue crucial para identificar áreas de recarga y puntos de descarga del acuífero, elementos esenciales para la elaboración de una balance subterráneo, a través de la ecuación de masa o de continuidad, considerando que las entradas deben ser igual a las salidas del sistema, según (Custodio y Llamas, 1976).

Para el cálculo de la transmisividad y el análisis de las características hidráulicas durante la prueba de bombeo con duración de 24 hrs, se utilizó el software AQTESOLV. Por otra parte, las muestras de agua recolectadas se llevaron al Laboratorio de Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA), quienes fueron los responsables de medir los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados. Para la evaluación de estos análisis, el laboratorio PIENSA utilizó la metodología Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23 RD 2017, Metodología HACH aprobada por Environmental Protection Agency (EPA). Además, se aplicó la herramienta EasyQuim 5.0 con la finalidad de interpretar y graficar los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua, incluyendo la representación de iones mayoritarios mediante el diagrama de Piper.

Figura 1.
Etapas de la fase de campo



a: Medición de nivel estático del pozo (inventario de pozo), b: Realización de monitoreo de los niveles dinámicos (prueba de bombeo), c: Prueba de infiltración, c: Muestras de agua recolectadas.

Para este estudio, se delimitó un área a partir del Mapa Hidrogeológico de Krásný correspondiente a la hoja de Managua (INETER, 1998) y se tomó en cuenta los principios básicos de hidrogeología,

considerando una distancia de 3 kilómetros en dirección aguas arriba o bien a la recarga del acuífero situado al Noreste a partir de la ubicación del pozo, asimismo, se contempló un área de descarga de aproximadamente 2 kilómetro, teniendo como límite sureste su punto de descarga natural, que es el lago Xolotlán o lago de Mangua. Dicho sitio cuenta con un área total de 62.88 km² y un perímetro de 29.30 km.

Análisis de potencial hídrico

Una vez calculado el coeficiente de determinación estadístico (R^2) para la variable de precipitación, se obtuvo un valor de 0.3567, lo que indica que solo el 35.67% de la variabilidad de los datos es explicada por el modelo. El valor deseado para una buena explicación de la variabilidad debe ser cercano a 1 o al menos superior a 0.6. Este resultado se atribuye a que los datos brindados por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) presentaron una cantidad considerable de datos faltante, lo que afectó al momento de calcular el coeficiente de determinación, por tal razón, se optó por utilizar los datos de la estación meteorológica de León adquiridos de la plataforma Data Access Viewer, dado que, este contiene los datos completos, además de ser datos confiables establecidos por la NASA.

El análisis de datos climáticos incluyó precipitación, temperatura y la evapotranspiración registrados en la estación meteorológica de León en un periodo de 23 años (2000-2023). Asimismo, se llevó a cabo una prueba de bombeo en el pozo (figura 1), a caudal constante utilizando 325 galones por minutos (gpm) durante un periodo de 20 horas, donde se realizaron lecturas de las mediciones del nivel del agua en intervalos de 1,2,5,10,20,30 y 60 minutos, utilizando una sonda de nivel. Al finalizar la prueba de bombeo en el período establecido, se apaga el equipo de bombeo, con la finalidad de mediar el ascenso del agua subterránea o bien el tiempo que dura el pozo en recuperar el nivel inicial que se encontró antes de dar inicio a la prueba de bombeo, las mediciones pueden estar establecidas entre intervalos de cada 1, 2 y 5 minutos, hasta que el nivel del pozo se estabilizara o se acercara al nivel estático medido antes de iniciar la prueba.

Transmisividad: Se calculó utilizando los datos obtenidos durante la realización de una prueba de bombeo y el software AQT SOLV, expresada en unidades de medida metros cuadrados por día (m²/día), donde se utilizó el método de Hantush-Jacob, adecuado para acuíferos semiconfinados con fugas “Leaky” (Hantush y Jacob, 1961).

Permeabilidad o conductividad hidráulica: En el cálculo de la permeabilidad se utilizó la transmisividad calculada en la prueba de bombeo y el espesor de acuífero captado, que no es más que la profundidad total del pozo menos el nivel estático medido a la hora de iniciar la prueba de bombeo. Estos valores obtenidos se sustituyen en la ecuación (1).

$$K (m/d) = T/b \quad (1)$$

Capacidad específica: La capacidad específica se determinó a través de una prueba bombeo, donde se conoció el descenso medido en el pozo o abatimiento máximo durante las horas de la prueba y el caudal que brinda el pozo de 1,771.38 metros cúbicos por día (m^3/d), equivalente a 325 gpm. Se aplicó la ecuación 2.

$$q(m^3/d/m) = Q/s \quad (2)$$

Recarga potencial o directa: Para determinar la recarga potencial del área, se evaluó la infiltración del suelo mediante dos pruebas de infiltración realizadas con el método del permeámetro de Guelph, (figura 1) el cual consta de dos tubos, uno que actúa como depósito de agua y otro de menor dimensión que se pone en contacto con el suelo y lleva acoplado un sistema que permite mantener una carga hidráulica constante (tubo de mariotte). Dicha carga de agua dependió del tipo de suelo que se encontró en el sitio, el cual se identificó por la prueba del tacto, la cual consiste en tomar una pequeña cantidad de suelo seco, agregar agua al suelo y mezclar hasta obtener una consistencia pastosa e intentar formar una rosquilla, también se utilizaron datos climáticos. Finalmente, se estimó la recarga potencial aplicando el método del balance hídrico de suelos de (Schosinsky N., 2006).

Escurrimiento subterráneo: Este permite determinar la descarga subterránea del acuífero, el cual se realizó a través del principio de la dirección del flujo, propuesto por Krásný (1998) y empleando la Ley de Darcy. Para calcular esta variable, se consideró el valor de la transmisividad, además, se realizó un inventario de pozo, utilizando los niveles piezométricos de los pozos seleccionados para calcular el gradiente hidráulico y el ancho de la sección transversal, aplicando la ecuación 3.

$$Q(m^3/día) = TiL \quad (3)$$

Demanda: Se calculó, realizando una proyección de la población para un lapso de 20 años, según lo establecido en la norma para el abastecimiento de agua potable NTON 09 007-19, adecuándose a los parámetros de dotación de acuerdo a lo observado en el área. Utilizando el método geométrico, se realizaron los cálculos a partir de los datos poblacionales del año 2010, obtenidos de la plataforma SINIMBU (ENACAL et al., 2024). Con esta información base, se estimó la proyección al año 2023 y posteriormente se proyectó al año 2043, con el objetivo de determinar si el pozo sería capaz de satisfacer las necesidades de la población futura.

Balance hidrogeológico: Al realizar el balance hidrogeológico del pozo en estudio, se consideró el principio de conservación de masas y la ley de continuidad, donde se considera que las entradas deben ser igual a las salidas de agua del acuífero. Se tomó como entrada de agua la recarga potencial obtenida por el método de (Schosinsky N., 2006) más el escurrimiento subterráneo. Por otro lado, se consideró como salida, la descarga del acuífero o descarga subterránea, tomando en cuenta la extracción o demanda del pozo en estudio.

Potencial hídrico: Este valor se calculó a partir de la suma de la recarga directa y el escurrimiento subterráneo del área delimitada, lo que permitió estimar la cantidad de agua disponible en el acuífero del cual se extrae el recurso. Lo que permite evaluar el volumen de agua aprovechable para satisfacer las necesidades de la comunidad.

Calidad de agua

Para evaluar la calidad, se recolectaron muestras de agua para determinar los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados, (figura 1) las muestras fueron llevadas al Laboratorio del Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA), donde se aplicó la metodología Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23 RD 2017, Metodología HACH aprobada por la EPA. Además, Los resultados obtenidos fueron comparados con la norma de calidad del agua para consumo humano CAPRE (IPSA, 1993) y la norma para la clasificación de los recursos hídricos NTON 05-007-98 (Asamblea Nacional de la República de Nicaragua, 2000).

Análisis fisicoquímicos: Se recolectó una muestra de agua de un galón en un envase adecuado proporcionado por el laboratorio. La muestra fue transportada en un termo con hielo para garantizar su conservación a una temperatura entre 2 a 6 grados Celsius, cumpliendo con el requisito de ser entregada en un plazo inferior de 24 horas. Se realizaron análisis tanto de cationes mayoritarios, como los aniones mayoritarios y la dureza del agua, su unidad de medida es en miligramos por litro ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

Análisis bacteriológicos: En un frasco estéril de 100 mililitros proporcionado por el laboratorio, se recolectó muestra de agua y se transportó en un termo con hielo para garantizar su conservación a una temperatura entre 2 a 6 grados Celsius, cumpliendo con el requisito de ser entregada en un plazo inferior de 30 horas. El análisis incluyó la determinación de coliformes totales con unidades de números más probables por 100 mililitros (NMP/100 ml), Coliforme Fecal (NMP/100ml) y *Escherichia Coli* (NMP/100ml).

Análisis metales pesados: En la misma muestra de agua destinada para los análisis fisicoquímicos, se reservó una porción para la determinación de metales pesados. En este análisis se consideraron el arsénico, plomo y cromo, expresadas en unidades de medida en miligramos por litro ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

Tipo hidroquímico: Una vez obtenido los resultados de los análisis fisicoquímicos del laboratorio de la muestra de agua, se empleó la herramienta de software EASY QUIM 5.0, el cual permitió graficar y analizar los resultados. Mostrando los cationes y aniones mayoritarios en un diagrama de Piper.

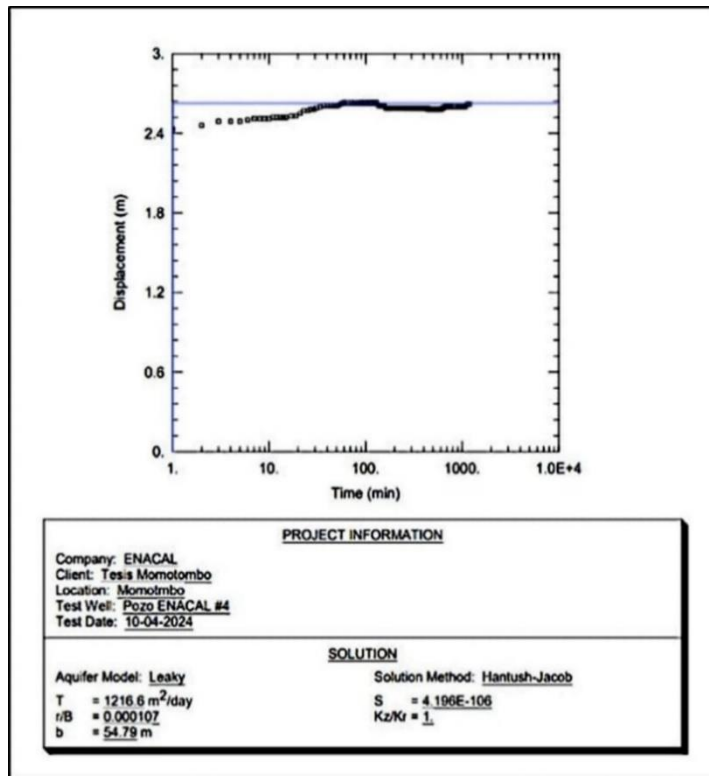
Resultados y discusión

Potencial hídrico: En la figura 2, se muestra la transmisividad calculada que se estimó en 1216.60 metros cuadrados por día (m^2/d), lo que indica que el pozo es altamente productivo, ya que, de acuerdo a la geología del área, según el Mapa Geológico Minero de Nicaragua (1987), el pozo se encuentra en aluviales recientes y depósitos volcánicos, los cuales suelen ser sedimento granulares y porosos, lo que permite que el agua pueda infiltrarse y moverse a través de los espacios porosos.

La transmisividad obtenida se encuentra dentro del rango del mapa hidrogeológico del pacífico y clasificándolo según las clases de transmisividad de Krásný (1998), se considera de clase I, indicando una transmisividad “Muy alta”, dado que se encuentra en el intervalo superior a $>1000 \text{ m}^2/\text{d}$, tabla 1. Clase de transmisividad).





Al comparar los resultados de transmisividad del estudio actual, con los resultados obtenidos en el estudio de Greitzery (1971), titulado “Balance del agua subterránea en el área del proyecto de riego León”, dividiendo la zona de La Paz centro – Nagarote – León en Sur y Norte, y a su vez dividida en 12 franjas numeradas de I a XII, donde las transmisividades de las capas acuíferas fluctuaban en intervalos de 500 a 2000 $\text{m}^2/\text{día}$, esta consistencia en los niveles de transmisividad, sugiere una estabilidad en las características hidrogeológicas de la región a lo largo de los años, lo que puede facilitar la planificación y gestión del agua.

Figura 2.
Prueba de bombeo AQTESOLV



Nota: El gráfico representa el desplazamiento de los niveles dinámicos de agua en función del tiempo de bombeo del pozo, donde la línea horizontal sugiere que, el método de Hantush-Jacob, supone que no hay almacenamiento en acuitardos con fugas incompresibles y puede dar cuenta de pozos con penetración parcial, lo que podría sugerir un acuífero estable o que se ha alcanzado un equilibrio hidráulico.

Tabla 1. Clase de transmisividades

Coefficiente de Transmisividad (m ² /d)	Código de color	Clase de la Transmisividad	Rango de Transmisividad
>1000		I	Muy alta
100 – 1000		II	Alta
10 – 100		III	Moderada
1 – 10		IV	Baja

Fuente: Se retomó la leyenda del mapa hidrogeológico de la hoja Managua (Krásný, 1989)

De acuerdo al cálculo realizado se estimó una permeabilidad de 22.20 m/d equivalente a 2.57E-02 cm/s, encontrándose en el rango de permeabilidad de 10¹. Por su parte, Custodio y Llamas (2001),(tabla 2) categorizan a la permeabilidad en el rango de 10¹ como un acuífero de alta productividad, ya que, el acuífero está compuesto por arena limpia, grava y una mezcla de ambos, permitiendo desarrollar una capacidad de drenaje óptima, lo que significa que el agua puede moverse fácilmente a través del acuífero, lo que lo hace favorable para el almacenamiento y la transmisión de agua subterránea.

Realizando una comparación con el estudio de Torrez Aburto et al. (2017), “Estudio de vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero de Achuapa, usando el método Drastic”, se observa que los rangos de conductividad hidráulica en casi toda el área del valle, varían entre 14 y 25 m/d. Esta área se ubica aproximadamente a 70 km del pozo en estudio, por tanto, se atribuye que los acuíferos del occidente del país presentan alta productividad, ya que un valor elevado de permeabilidad indica un flujo más eficiente del agua a través de los materiales del acuífero, facilitando la extracción y recarga del agua subterránea.

Tabla 2. Clasificación de permeabilidad en materiales detríticos sedimentarios

Permeabilidad (m/día)	10 ⁴	10 ³	10 ²	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia, mezcla de grava y arena		Arena fina, arena arcillosa, mezcla de arena, limo y arcilla, arcillas estratificadas			Arcillas no meteorizadas				
Clasificación	Buenos acuíferos				Acuíferos pobres				Impermeables			
Capacidad de drenaje	Drenan bien				Drenan mal				No drenan			

Fuente: Benítez (1972).

Luego de realizar el cálculo correspondiente, se determinó una capacidad específica de 673.53 metros cúbicos por día por metro (m³/d/m), lo que equivale a 28.06 metros cúbicos por hora por metro (m³/h/m). Esto significa que, durante la prueba de bombeo realizada, el pozo extrae un volumen de agua de 28.06 m³ por metro de abatimiento en un lapso de 20 horas. Es importante destacar que la

eficiencia del pozo no depende únicamente de la capacidad específica, sino también de la litología del área en la que se encuentra.

Tabla 3. Propiedades hidráulicas

Sitio	Parámetro	Rango Aceptado	Valor Encontrado	Análisis de Resultado
Pozo Momotombo #4 ENACAL	Transmisividad (m ² /d)	>1000	1216.6	Alta, indica alta capacidad de extracción del acuífero.
	Permeabilidad (m/d)	10 ¹	10 ¹	Buena, favorable para el flujo de agua.
	Capacidad Específica (m ³ /d/m)	-	673.53	Alta eficiencia en el suministro de agua del pozo.

Recarga potencial: A partir del método de Schosinsky, donde se introdujeron los datos climáticos de precipitación y evapotranspiración, así como el valor de la velocidad promedio de infiltración del suelo, que se determinó a partir de las dos pruebas de infiltración es de 2.18 cm/min equivalente a 39.18 mm/hr, este valor indica una ligera absorción del suelo, esto se debe al tipo de suelo identificado mediante el método del tacto, el cual resultó ser arenoso, que, por su alta porosidad y granulometría, permite una rápida infiltración del agua a través de los espacios que se da entre las partículas de arenas. Obteniendo una recarga potencial de 0.1655 m/mes, para obtener el valor de recarga directa se multiplicó la recarga potencial por el área de estudio, esta alcanza un área total de 62.88 km² lo que equivale a 62,880,000 m², de acuerdo con esto se estimó una recarga anual de 10.41 Mm³/ anual (tabla 4).

Tabla 4. Recarga potencial del área de estudio

Mes	Recarga (m/mes)	Recarga Directa (m ³ /mes)	Recarga Mm ³
Enero	0.00000	0.0	0.0
Febrero	0.00000	0.0	0.0
Marzo	0.00000	0.0	0.0
Abril	0.00000	0.0	0.0
Mayo	0.02646	1663804.8	1.7
Junio	0.00761	478516.8	0.5
Julio	0.00000	0.0	0.0
Agosto	0.02213	1391534.4	1.4
Septiembre	0.06180	3885984.0	3.9
Octubre	0.04753	2988686.4	3.0
Noviembre	0.00000	0.0	0.0
Diciembre	0.00000	0.0	0.0

Total/ Anual	0.1655	10,408,526	10.41
--------------	--------	------------	-------

Nota: m³/mes- metros cúbicos por mes, Mm³- Millones de metros cúbicos

Escurrecimiento subterráneo: Considerando el valor de la transmisividad (figura 2) y utilizando los niveles piezométricos de los pozos seleccionados para calcular el gradiente hidráulico, para entrada de agua, se estableció el pozo “Momotombo #4” como punto de recarga y el pozo “Concepción” como punto de descarga, para salida de agua, se definió el pozo “Concepción” como recarga y como descarga el pozo “María”. Estos pozos fueron elegidos como puntos estratégicos, ya que siguen la dirección del flujo y coinciden con el punto de descarga al lago Xolotlán, de la misma manera se estableció el ancho de descarga, lo que permitió obtener los valores de flujo de entrada y flujo de salida del área en estudio.

Tabla 5. Escurrecimiento subterráneo dentro del área de estudio

Sitio	T (m ² /m/día)	i	L (m)	Q (m ³ /día)	Q (m ³ /mes)	Q Mm ³ anual
Flujo de entrada	1216.6	0.0264	700	22,482.77	674,483.04	8.0938
Flujo de salida	1216.6	0.010	580	7,267.97	218,039.05	2.6165
Escurrecimiento subterráneo total				29,750.74	892,522.09	10.86

Nota: T- Transmisividad, i- Gradiente hidráulico, Longitud de la zona (recarga o descarga), Q- Caudal, Mm³- Millones de metros cúbicos.

Demanda: En la tabla 6 se muestra la proyección poblacional, donde se utilizó el método adecuado para ciudades en desarrollo que crecen a una tasa fija del 2.5%, clasificando a la comunidad como una población rural dispersa con una dotación de 80 litros por persona por día (lppd). Además, se presenta la dotación total de agua para la población en litros por segundo (l/s), considerando las pérdidas que ocurren durante la circulación del agua potable a través de las tuberías hasta llegar a las viviendas, de acuerdo con los porcentajes establecidos por la normativa: un 20% para localidades con más de 500 viviendas y un 15% para aquellas con hasta 500. Con base a estos datos, se determinó una demanda total de 10.11 l/s, lo que equivale a 873,504 litros por día (l/p) o 873. 504 m³/d, con un total de 318828.96 m³/anual equivalente a 0.318829 Mm³/anual.

Esta demanda fue necesario determinarla, ya que no se dispuso de información sobre la capacidad de abastecimiento del pozo para satisfacer a la población, y la sarta de descarga carecía de un caudalímetro en condiciones adecuadas.

Tabla 6. Dotación de agua

Año	Población total	Cobertura %	Dotación (lppd)	Consumo (lppd)	CPD (lps)	comercial (lps7%)	publico (lps7%)	industrial (lps2%)	CPD (lps)	Hf	
										perdida (15% CMD)	CPD total
2023	5652	100	80	452151.6	5.23	0	0	0	5.23	0.78	6.02
2043	9493	100	80	759425.7	8.79	0	0	0	8.79	1.32	10.11

Nota: lppd- Litros por persona por día, lps- Litros por segundo.

Balance hidrogeológico: Al realizar la suma de la recarga directa y el escurrimiento subterráneo, se obtuvo el valor disponible de agua subterránea que se estimó en 21,267,545.19 m³/ anual, esto equivale a 21.27 Mm³/anual (Tabla 6), esta disponibilidad se calculó para el área de estudio la cual posee una superficie de 62.88 km².

Potencial hídrico: La disponibilidad de agua subterránea en el área de estudio se estima en 21.27 Mm³/anual, lo que representa un volumen del recurso hídrico aprovechable para satisfacer las necesidades de la comunidad, la extracción o demanda de agua de la población es de 0.3188 Mm³/anual. Al calcular la diferencia entre la disponibilidad y la demanda se determinó un volumen disponible en el acuífero de 21.09 Mm³/anual, lo que indica que solo se utiliza 1.49% de la capacidad total del recurso, por lo que este acuífero sufre con facilidad la extracción de manera sostenible, tabla 7).

Tabla 7. Potencial hídrico del área de estudio

	Anual		
	Disponibilidad (Mm ³ /anual)	Demanda (Mm ³ /anual)	Volumen no utilizado (Mm ³ /anual)
Total	21.27	0.3188	20.95

Nota: Q- Caudal, Mm³- Millones de metros cúbicos.

Calidad de agua

Análisis fisicoquímicos: Los resultados obtenidos de laboratorio se compararon con las normativas de calidad de agua establecidas por CAPRE y NTON 05-007-98, dando como resultado un potencial de hidrógeno (pH) 6.95, una temperatura de 25.1 °C y una conductividad eléctrica de 754 µS/cm. Esto indica que el agua estudiada se clasifica como (Tipo 1. Aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o sub-producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él. Las aguas de este tipo se desagregan en dos categorías, categorizando el tipo de agua en estudio en: 1-A: Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes).

En la figura 3, el catión predominante es el calcio (Ca²⁺), seguido del sodio (Na⁺). Al analizar el contenido total de cationes mayores (calcio, sodio, magnesio y potasio), se observa que magnesio y

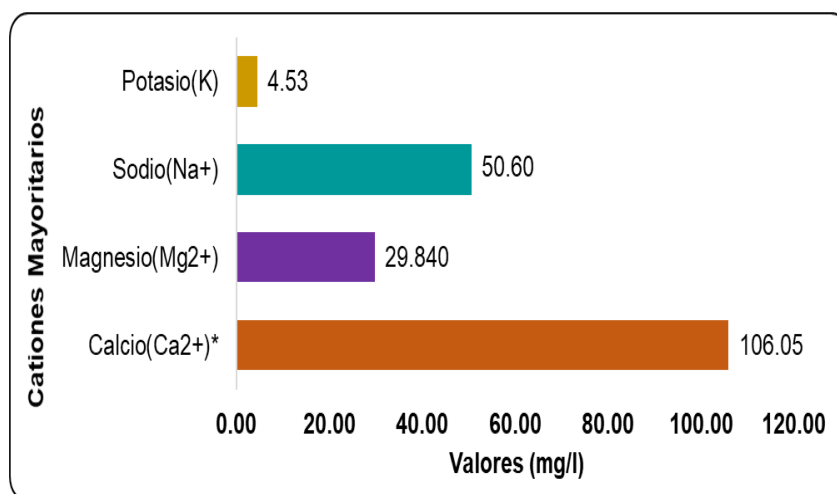
potasio están dentro de los límites máximos permitidos según las normas CAPRE y NTON 05 007-98; sin embargo, los niveles de calcio y sodio superan los límites establecidos. El calcio presenta una concentración de 106.05 mg/L, excediendo el límite recomendado de 100 mg/L de la norma CAPRE, mientras que la norma NTON 05-007-98 no especifica un valor para este parámetro. En cuanto al sodio, su concentración es de 50.60 mg/L, lo que supera el límite de 25 mg/L de la norma CAPRE, aunque está dentro del rango recomendado de 200 mg/L según la norma NTON 05-007-98.

Según UNESCO (2008), la composición química del agua subterránea suele estar influenciada por la geología de los acuíferos, particularmente por la presencia de minerales ricos en elementos como calcio, magnesio y sodio. Por lo tanto, los excesos de calcio y sodio encontrados en la muestra de agua pueden estar relacionados con la predominancia de material geológico rico en estos elementos en el área de estudio.

Estos hallazgos concuerdan con lo señalado por Delgado et al. (2023) y Vammen & Hurtado García (2012), quienes documentan que el acuífero del occidente de Nicaragua presenta concentraciones elevadas de sodio, calcio y cloruros, atribuibles tanto a la geología volcánica como a las prácticas de uso del suelo.

El análisis de calidad del agua indicó una alcalinidad de 400 mg/l de CaCO₃, lo que supera los límites recomendados por la CAPRE (20-200 mg/l) y plantea preocupaciones, aunque pueda ser tolerable en algunos contextos. La OMS no establece un límite específico, pero indica que un pH equilibrado (6.5 a 8.5) es crucial, y la alcalinidad adecuada contribuye a mantenerlo. Sin embargo, valores superiores a 300 mg/l pueden estar asociados con problemas de eutrofización y contaminación, lo que requiere un monitoreo continuo. Por lo tanto, es fundamental un monitoreo continuo para asegurar que la calidad del agua subterránea no se vea comprometida.

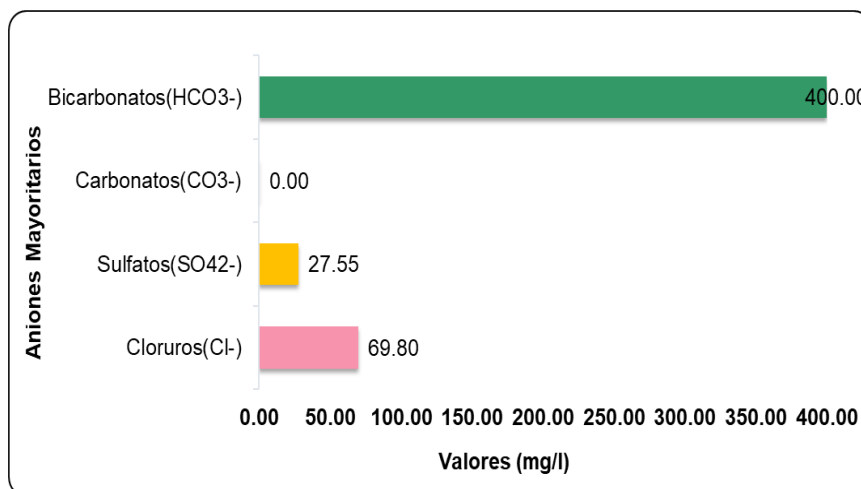
Figura 3.
Concentración de cationes mayoritarios



A como se muestra (figura 4), el anión predominante es el bicarbonato HCO_3^- , seguido de este los Cloruros Cl^- , este presenta una alta concentración en el pozo, sin embargo, las concentraciones determinadas en aniones mayores (Carbonatos, Bicarbonatos, Cloruros y Sulfatos) se encuentran dentro del valor máximo admisible de las Normas CAPRE y cumple con las NTON 05 007-98, a excepción del contenido de cloruro, el cual excede el límite 25 mg.l^{-1} establecido en la norma CAPRE, aunque si cumple con el límite de la NTON 05 007-98.

Aunque no se cuente con un valor límite establecido para la concentración de bicarbonatos en el agua, la norma CAPRE, NTON 05 007-98 y la OMS señalan que el bicarbonato forma parte de los sólidos totales disueltos (STD) en el agua, dichas normativas establecen que los STD no deben superar los 1000 mg.l^{-1} . Por tanto, si bien no existe un valor máximo permisible directo, su concentración se encuentra regulada a través del límite general para los sólidos totales disueltos. El bicarbonato al igual que el calcio depende del material geológico encontrado en el área.

Figura 4.
Concentración de aniones mayoritarios



Dentro de los análisis fisicoquímicos, se evalúa la dureza total del agua, conforme a la clasificación establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), esta dureza está relacionada con la presencia de calcio y magnesio, cuyas concentraciones determinan el nivel de dureza del agua. Según la clasificación de la OMS, el agua del pozo analizado en base a la concentración de dureza de CaCO_3 , se ha clasificado entre rango de aguas Muy duras (ver, Tabla 8), ya que presenta concentraciones superior a 180 mg.l^{-1} CaCO_3 , y el resultado del análisis de laboratorio reporta 387.39 mg/l de CaCO_3 . Por tanto, el agua extraída del pozo Momotombo #4 ENACAL, de acuerdo a su dureza es clasificada como agua de calidad media, (tabla 9).

Tabla 8. *Clasificación de la Dureza por CaCO₃ en el Agua, Según OMS*

Rango de Dureza (mg.l ⁻¹ CaCO ₃)	Descripción
0 – 60	Blandas
61 – 120	Moderadamente duras
121 – 180	Duras
Más de 180	Muy duras

Fuente: (OMS, 2018).

Tabla 9. *Calidad de agua según dureza*

Calidad del Agua	Rango de dureza
Aguas de buena calidad	Hasta 150 mg de CaCO ₃
Aguas de calidad media	Hasta 300 mg de CaCO ₃
Aguas de calidad aceptable	Hasta 500 mg de CaCO ₃
Aguas difícilmente utilizables	Por encima de 600 mg de CaCO ₃

Fuente: (Rodríguez, 2010).

Según López (2016), las aguas duras, es el resultado de minerales disueltos, como el calcio, magnesio y manganeso. Aunque no existe un valor de referencia basado en efectos sobre la salud para la dureza del agua, este parámetro puede incidir en la aceptabilidad del agua por parte del consumidor, en cuanto a sabor y a la formación de incrustaciones en el sistema de distribución y tuberías (UNESCO, 2008). Sin embargo, el agua dura no es un peligro para la salud humana y pueden ser tratada mediante diversos métodos de acuerdo con López.

La manera más común para ablandar el agua es a través de un ablandador de agua de intercambio iónico. Este sistema funciona mediante el intercambio minerales duros de carga positiva (calcio y magnesio) con minerales suaves con carga positiva (de sodio o de potasio) en una superficie de resina que es regenerada. Este intercambio de minerales suaviza el agua y puede extender la vida útil de los sistemas de plomería ya que se reduce la obstrucción en las tuberías.

Actualmente, existen tres tipos básicos de suavizantes de transferencia de iones.

- El primero es un ablandador automático, este tipo de ablandador está conectado a un temporizador que cada cierto tiempo inicia el proceso de regeneración con el lavado de iones

duros pegados a la resina y su sustitución por iones blandos. Esto permite un continuo intercambio de iones duros y blandos durante todo el día.

- El segundo tipo de suavizante es la regeneración iniciada por la demanda (DIR, en inglés), con este sistema, la regeneración se produce sólo cuando el agua blanda se ha agotado. Dado que este sistema se ajusta a la cantidad de agua utilizada en lugar del tipo automático, utiliza menos sal y agua y, por lo tanto, es más eficiente.
- El suavizante final es un intercambiador portátil, aquí un tanque es alquilado al dueño de la casa y tiene una resina regenerada, cuando la resina ya no puede intercambiar iones, el tanque se devuelve a la empresa y es regenerada allí (López, 2016).

Análisis bacteriológicos: Los resultados del análisis bacteriológico efectuado y comparado con las normas CAPRE Y NTON 05-007-98, indican una baja presencia de coliformes fecales (tabla 10). Aunque la presencia de estos microorganismos sea baja, esto no implica ausencia total de estos, ya que, en el periodo lluvioso asciende el nivel del agua, por tanto, la presencia de estos agentes coliformes puede aumentar debido a la infiltración que se dan en esa época, lo cual puede conllevar a un incremento en la presencia de estos agentes contaminantes. Además, es posible que la situación se deba a que aguas arriba de la fuente de abastecimiento, existen familias que aún utilizan letrinas, las cuales se encuentran aproximadamente a una distancia entre 58 y 80 metros del pozo, lo que influye en la calidad del agua.

Actualmente, no se ha encontrado presencia de *Escherichia coli* en la muestra analizada. Sin embargo, con la llegada de la temporada lluviosa, es muy probable que se detecten niveles de esta bacteria en futuros análisis. Según el estudio de Vílchez Samuel et al. (2009) “Prevalence of diarrhoeagenic *Escherichia coli* in children from Leon, Nicaragua”, la diarrea es la segunda causa más importante de mortalidad en Nicaragua, afectando a niños de 0 a 60 meses de edad. Esta situación se debe a que en el departamento de León se registra una considerable prevalencia de la bacteria *Escherichia coli* en sus cinco patotipos diferente de DEC, *Escherichia coli* enterotoxigénica (ETEC), *Escherichia coli* enteroagregativa (EAEC), *Escherichia coli* enteropatógena (EPEC), *Escherichia coli* enteroinvasiva (EIEC) y *Escherichia coli* enterohemorrágica (EHEC) o productora de verocitotoxina.

Tabla 10. Análisis bacteriológico

Puntos Muestreo	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Coliformes Fecal (NMP/100 ml)	<i>Escherichia Coli</i> (NMP/100 ml)
Pozo Momotombo #4 ENACAL	46	4.5	Negativo
Normas CAPRE	Negativo*	Negativo*	NE
NTON 05-007-98	Promedio mensual menor de 2000 NMP/ 100ml	NR	NR

Nota: NE – No encontrado, NR – No registrado.

Análisis metales pesados: Según los datos obtenidos por laboratorio en el análisis de metales pesados en el pozo de aprovechamiento, el cual se tomó en el periodo seco a inicios del mes de “Mayo”, el agua se encuentra dentro de los límites permisibles de referencia establecidos en las normas CAPRE y NTON 05-007-98, ya que, estos resultados indican que la presencia de arsénico, plomo y cromo total es mínima, los cuales no representan riesgos significativos para su consumo u otro uso (tabla 11).

Tabla 11. Análisis metales pesados

Parámetros	Unidades	Pozo Momotombo #4 ENACAL	Normas CAPRE	NTON 05-007-98
Arsénico	mg.l ⁻¹	<0.002	0.01	NR
Plomo	mg.l ⁻¹	0.001	0.01	0.01
Cromo total	mg.l ⁻¹	0.005	0.05	0.05

Nota: mg.l⁻¹ – Miligramos por litros.

Al comparar el “Estudio de las aguas subterráneas en la comunidad rural La Fuente” realizado por Altamirano y Delgado (2020) y el pozo Momotombo #4 ENACAL, se observa una notable diferencia en las concentraciones de arsénico, considerando que ambas comunidades fueron afectadas por la erupción del Volcán Momotombo. En la comunidad de La Fuente, la mayoría de los pozos monitoreados presentan concentraciones de arsénico que oscilan entre 0.002 mg.l⁻¹ y 0.103 mg.l⁻¹, superando el límite admisible de 0.01 mg.l⁻¹ en agua para consumo humano, estos datos se atribuyen a que la comunidad está ubicada en la base de las faldas septentrionales del volcán El Hoyo y del edificio de la caldera Galán, donde el material es rico en arsénico. En contraste, aunque el pozo Momotombo #4 ENACAL también se encuentra en área afectada por la actividad volcánica su material geológico no está predominantemente formada por este metaloide, lo que explica la menor concentración de arsénico en sus aguas subterráneas.

Tipo hidroquímico: Los cationes y aniones mayoritarios predominantes se representaron en un diagrama de Piper (figura 5), lo que indica que el agua corresponde al tipo química bicarbonatada Cálcida y/o Magnésica (HCO₃-Ca/ HCO₃-Mg), es decir, son aguas procedentes de zonas de descarga, las cuales se asocian a acuíferos de recarga rápida. La presencia de estos elementos se debe a la geología del área en estudio, ya que presentan formaciones basálticas, dichas rocas son ricas en calcio y magnesio. Estas aguas se caracterizan por ser aguas con menor tiempo de residencia en el subsuelo (Sánchez, 2023).

Las rocas basálticas son ricas en hierro y magnesio, lo que resulta en la presencia de minerales oscuros. Por tanto, (García, 2025) recomienda tratamientos de desferrización, un proceso para eliminar las formas disueltas de hierro (Fe²⁺) del agua, transformándolas típicamente en formas insolubles (Fe³⁺) que pueden ser retenidas mediante filtración. Aunque las concentraciones habituales de hierro no representan un riesgo grave para la salud, su presencia es un problema común, especialmente en aguas subterráneas como las de pozo.

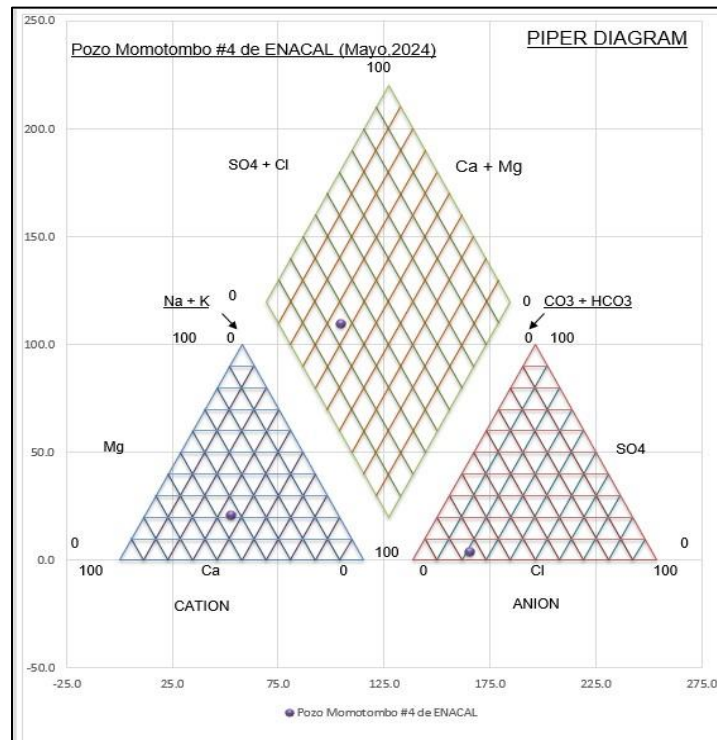
Existen distintas estrategias de tratamiento para la desferrización adaptadas al origen del agua, la concentración de hierro, el caudal y las condiciones específicas de cada proyecto. Las tecnologías más habituales mencionadas son:

Oxidación seguida de filtración: Este método consiste en oxidar el hierro disuelto (Fe^{2+}) para convertirlo en hierro férrico (Fe^{3+}), que forma partículas insolubles. Estas partículas se eliminan fácilmente mediante filtración. Los métodos de oxidación pueden incluir la inyección de aire (aireación forzada), dióxido de cloro, ozono, permanganato potásico o hipoclorito sódico. La filtración se realiza típicamente con filtros cerrados de presión que utilizan medios filtrantes específicos como arenas, estos sistemas suelen integrar sistemas automáticos de retrolavado y pueden contar con medidores de presión diferencial y válvulas automáticas para un mantenimiento eficiente.

Filtración catalítica: Esta estrategia emplea medios filtrantes que tienen la capacidad de oxidar y retener el hierro simultáneamente. Se menciona BIRM, que es eficaz con niveles bajos de hierro y no requiere oxidantes químicos. También se incluye Greensand Plus, un medio filtrante que requiere ser regenerado periódicamente con permanganato potásico y es adecuado para tratar concentraciones más altas de hierro.

Filtración multicapa: Consiste en el diseño de filtros con capas de diferentes granulometrías. Esto ayuda a aumentar la eficacia y la vida útil del sistema, siendo especialmente útil para caudales altos o aguas con turbidez.

Figura 5.
Diagrama de Piper



Si se comparan los resultados obtenidos mediante el diagrama de Piper con el mapa hidroquímico de Hetch (figura 6), se tiene un tipo de agua bicarbonatada cálcica, esta variabilidad puede verse afectada por el tiempo en que se realizaron los análisis de agua, lo que evidencia un intercambio catiónico en el tiempo de recurrencia del agua subterránea. Además, el mapa hidroquímico, muestra las diferentes concentraciones de boro en el área de estudio, presentando condiciones aceptables para el consumo, de igual forma, se aprecia la presencia de aguas termales debido a su cercanía al volcán y agua dulce debido al lago Xolotlán.

Figura 6.
Mapa hidroquímico del área de estudio

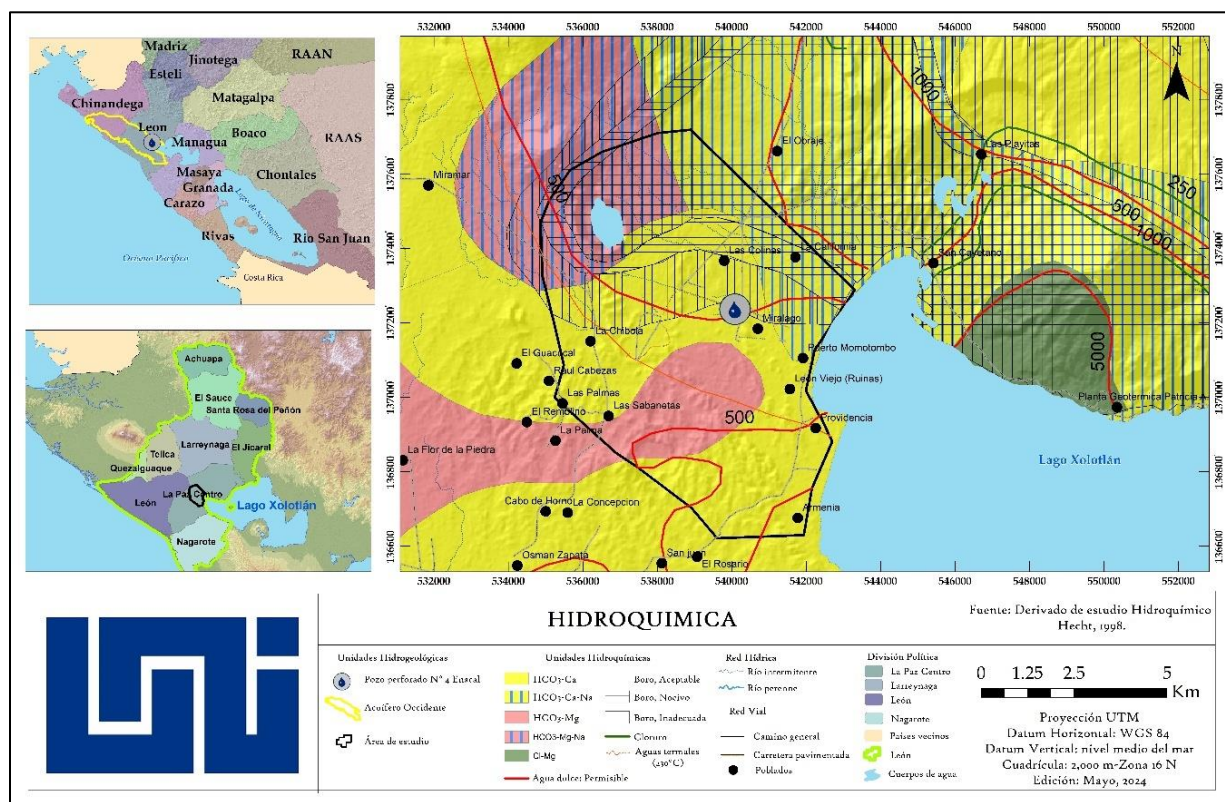


Tabla 12. Parámetros de calidad de agua

Sitio	Parámetro	Unidad	Resultados	Norma CAPREI	NTON 05 007-98
Pozo Momotombo ENACAL #4	Potencial de Hidrógeno	pH	6.95	6.5 . 8.5	6.0 . 8.5
	Temperatura	°C	25.1	18 a 30	NE

Conductividad Eléctrica	μS/cm	754	400	NE
Potasio (K)	mg K /L	4.53	10	NE
Sodio (Na+)	mg Na/L	50.6	200	200
Magnesio (Mg 2+)	mg Mg/L	29.84	50	NE
Calcio (Ca2+)	mg Ca/L	106.5	100	NE
Bicarbonatos (HCO3-)	mg/L CaCO ₃	400	NE	NE
Carbonatos (CO3-)	mg/L CaCO ₃	<0.40	NE	NE
Sulfatos (SO42-)	mg SO ₄ ²⁻ /L	27.55	250	250
Cloruros (Cl-)	mg Cl/L	69.8	250	250
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	387.39	400	NE
Coliforme Total	NMP/100mL	46	Negativo	<200
Coliforme Fecal	NMP/100mL	4.5	Negativo	NE
E.Coli	NMP/100mL	Negativo	Negativo	NE
Arsenico	mg/L	<0.002	0.01	NE
Cromo Total	mg/L	0.005	0.05	0.05
Plomo	mg/L	0.001	0.01	0.01

Conclusiones

De acuerdo con las características hidráulicas determinadas, el pozo en estudio presenta condiciones hidrogeológicas favorables, evidenciando una transmisividad alta de 1216.60 m²/d y un potencial hídrico 21.27 Mm³/año, lo que no solo confirma la viabilidad de su explotación, sino también su sostenibilidad, dado que la extracción es de 0.3188 Mm³/año, lo que representa el 1.49% de la disponibilidad total del recurso, garantizando así un uso sostenible del acuífero. Estos resultados contribuyen al entendimiento de la dinámica del sistema hidrogeológico del acuífero y ofrece una base científica para orientar la planificación y gestión integrada del recurso hídrico subterráneo en contextos de creciente demanda y variabilidad climática.

Según los resultados de laboratorio, las variables fisicoquímicas se encuentran dentro del rango permisible de las normas CAPRE y NTON 05-007-98, con excepción del sodio y el sulfato, que sobrepasan los límites permitidos por la norma CAPRE. La evaluación de la dureza del agua mostró una concentración de 387.39 mg/l de CaCO₃, clasificándose como aguas muy duras y de calidad media, por lo que se recomienda tratarlas mediante métodos para ablandar el agua. Además, los análisis reflejan la presencia de agentes bacteriológicos en el área de estudio durante el periodo seco, sugiriendo un proceso de tratamiento primario (cloración). Las concentraciones de metales pesados en las aguas del pozo se encontraron por debajo de los valores permisibles para consumo humano, bajo este contexto el análisis de agua proporciona datos actualizados sobre la calidad del agua en Momotombo, lo que es fundamental para la gestión hídrica local, permitiendo a las autoridades implementar estrategias adecuadas para garantizar un suministro seguro y sostenible.

El análisis hidroquímico por medio del diagrama de Piper, caracterizó las aguas como un tipo bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$ y/o $\text{HCO}_3\text{-Mg}$), lo que indica que, el agua del área de estudio son aguas transitorias de punto de descarga. La presencia de estos elementos se debe a la geología del área en estudio, ya que presentan formaciones basálticas, dichas rocas son ricas en calcio y magnesio.

El análisis de alcalinidad del agua, que arrojó un valor de 400 mg/l de CaCO_3 , subraya la necesidad de un monitoreo constante para prevenir riesgos de eutrofización y contaminación. Se recomienda implementar estrategias de gestión para mitigar estas amenazas y asegurar la calidad del recurso hídrico. Además, dado que el estudio de otros parámetros como el azufre no se incluyó en los alcances de esta investigación, se sugiere considerar su análisis en futuros estudios para obtener una evaluación más integral de la calidad del agua.

Contribución de Autoría CRediT

En el presente estudio, todos los autores contribuyeron de manera equitativa en todas las etapas de la investigación. La *conceptualización* del estudio, el diseño de la *metodología*, la implementación del *software*, la *validación* de los resultados y el *análisis formal* fueron desarrollados en conjunto. Asimismo, todos participaron en la *investigación*, incluyendo la recolección y análisis de datos, la gestión de *recursos*, y la *validación de datos* para su posterior reutilización. La *redacción del borrador original*, así como la *revisión y edición* del manuscrito, fueron realizadas colaborativamente. Además, la *supervisión*, *la administración del proyecto* y *la adquisición de fondos* fueron llevadas a cabo de manera conjunta, asegurando la adecuada ejecución y finalización del estudio. En consecuencia, se declara que todos los autores han tenido una participación equitativa en cada aspecto del trabajo.

Declaración de intereses contrapuestos

Los autores de este artículo declaran que no tienen intereses financieros en conflicto ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Disponibilidad de datos

Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

La declaración le dice al lector dónde están disponibles los datos de investigación asociados con un artículo y en qué condiciones se puede acceder a ellos. También incluyen enlaces (cuando corresponda) al conjunto de datos.

Agradecimientos y financiamiento

Dirección de Área de Conocimiento de Agricultura (DACA), por su disposición en el préstamo de equipos necesarios para la realización de pruebas en campo.

A la Lic. Carolina Delgadillo Munguía y al Ing. Yader Antonio Cisneros de la Empresa de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios (ENACAL), sede La Paz Centro y departamental León, por el excelente servicio y apoyo durante el desarrollo del estudio.

MSc. Ing. Silvano Cruz Sánchez, director del Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA), por su valiosa colaboración en la realización de análisis y pruebas de calidad del agua.

Referencias

- Altamirano, M., y Delgado, V. (2020). Contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la comunidad rural “La Fuente”, para sugerir y promover el uso de fuentes alternativas de agua segura municipio La Paz Centro, León, Nicaragua. *Revista Torreón Universitario*, 8(23), 58-72. <https://doi.org/10.5377/torreon.v8i23.9533>
- Asamblea Nacional de la República de Nicaragua. (2000, enero 11). *Norma para la clasificación de los recursos hídricos*. <http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/b92aaca87dac762406257265005d21f7/1a3a99b77290b980062573df00594022>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2025). *Leyes | Autoridad Nacional del Agua (ANA)*. http://www.ana.gob.ni/index.php/marco_normativo/leyes
- Benitez, A. (1972). *Captacion de Aguas Subterranas: Nuevos métodos de prospección y de cálculo de caudales* (Segunda). DOSSAT, S.A. Madrid; hidrogeología. <https://es.scribd.com/document/364580992/Captacion-de-Aguas-Subterranas>
- Corrales Pérez, D. (2005). *Estudio hidrogeológico del funcionamiento del acuífero de Estelí*. <https://repositorio.unan.edu.ni/2356/13/2356.pdf>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (Eds.). (1976). *Hidrología subterránea* (1. ed). Omega.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (Eds.). (2001). *Hidrología subterránea* (2. ed). Omega.
- Delgado, V., Ryan, C., & Bethune, D. (2023). *Sistema de Flujo de Agua Subterránea y Calidad del Agua en un Acuífero Costero Plano en el Noroeste de Nicaragua*.
- ENACAL, ANA, & FISE. (2024). *Sinimbu*. <https://aguaysaneamiento.info.ni/nimbu/>
- García, M. R. (2025, mayo 27). Desferrización del agua. *Ruberte Tratamientos de Agua*. <https://www.ruberte.es/desferrizacion-del-agua>
- Greitzery, Y. (1971, junio 27). *Balance del agua Subterránea en el área del proyecto de riego de*

León, Nicaragua. ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/341642062_GREITZER_Y_1971_Balance_del_agua_subterranea_en_el_area_del_proyecto_de_riego_de_Leon_Nicaragua

Hantush, & Jacob. (1961, a,b). *Hantush and Jacob r/B Solution for Leaky Aquifers*.
<http://www.aqtesolv.com/hantush-jacob.htm>

INETER (with COSUDE & GIZ). (1998). *Estudio Hidrogeológico e Hidroquímico de la Región del Pacífico Nicaragua* (INETER). INPASA.

IPSA. (1993, septiembre). *Normas CAPRE.pdf.pdf*.
<https://www.ipsa.gob.ni/Portals/0/1%20Inocuidad%20Alimentaria/Normativas%20Generales/ACTUALIZACION%20051217/Secci%C3%B3n%20Inocuidad%20L%C3%A1cteos/Normas%20CAPRE.pdf.pdf>

Krasny, J. (1989). *Mapa Hidrogeológico de Managua* (oficial; 1.^a ed.) [Hidrogeológico]. hidrogeología.

Krásný, J. (1998). *Estudios Hidrogeológicos E Hidroquímicos de la Región Del Pacífico de Nicaragua*. COSUDE.

Kumar, M., Kumari, K., Singh, U. K., & Ramanathan, AL. (2009). Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muktsar, Punjab: Conventional graphical and multivariate statistical approach. *Environmental Geology*, 57(4), 873-884.
<https://doi.org/10.1007/s00254-008-1367-0>

López, C. A. (2016, enero 26). *Tratamiento de aguas duras* [Text]. iAgua; iAgua.
<https://www.iagua.es/blogs/cristina-assenjo-lopez/tratamiento-aguas-duras>

OMS. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda* (4a ed + 1a adenda). Organización Mundial de la Salud.
<https://iris.who.int/handle/10665/272403>

Rodríguez, S. A. (2010, octubre 11). *Dureza_agua.pdf*.
https://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza_agua.pdf

Roldán, G., Tundisi, J., Jiménez, B., Vammen, K., Vaux, H., González, E., & Doria, M. (2019). *Calidad de Agua Nicaragua.pdf*.
https://caps-nicaragua.org/media/adjuntos/Calidad_de_Agua_Nicaragua.pdf

Sánchez, F. J. (2023). *Hidroquímica_Basica.pdf*.

Schosinsky N., G. (2006). *Cálculo de La Recarga Potencial de Acuíferos Mediante Unbalance Hídrico de Suelos PDF | PDF | Evapotranspiración | Agua subterránea*. Scribd.
<https://es.scribd.com/document/483037825/Calculo-de-la-recarga-potencial-de-acuiferos-mediante-unbalance-hidrico-de-suelos-pdf>

Tábor, F., Basterrechea, M., Candanedo, H., Wallace, M., Kawas, N., Ariaga, R., Frutos, R., Solís, M., Sánchez, J. C., Rodríguez, T., Zelaya, L., Ramírez, P., & Paquet, G. (2011, abril). *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica*. SlideShare.

<https://es.slideshare.net/slideshow/situacin-de-los-recursos-hdricos-en-centroamrica/35013758>

Torrez Aburto, D. A., Báez Salgado, I. D., Matus Díaz, J. A., & Alvarado Munguía Aldo Ricargo. (2017, abril). *Estudio de vulnerabilidad hidrogeología del acuífero de.pdf*. <https://ribuni.uni.edu.ni/1812/1/90124.pdf>

UNESCO. (2008). El Agua responsabilidad Compartida, 2do Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. En *UNESCO Digital Library* (2do ed.). Sociedad Estatal Expo Agua Zaragoza. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000149519?posInSet=1&queryId=c53ef51d-3270-4dac-bee0-4f683bd5d609>

Vammen, K., & Hurtado García, I. (2012). *Los recursos hídricos de Nicaragua y el cambio climático*.

Semblanza del autor o autores

Josué Ariel Acosta Green. Ingeniero Agrícola, Con Maestría en “Ciencias del Agua con énfasis en Calidad”. Especialista en la realización de estudios hidrológicos e hidrogeológicos, para determinación de disponibilidad hídrica para un manejo sostenible a nivel nacional. Docente Universitario, UNI-RUSB.

Isabel del Carmen Ramírez Martínez. Ingeniera Agrícola, con participación en el “rally latinoamericano de innovación 2023” con el equipo TLACATLYANI obteniendo el primer lugar en categoría de impacto social sede UNI-RUPAP y a nivel Nacional. “Pasantías en actividades de campo en estudios hidrogeológicos de AMBAGUA - consultores”.

Cristofer José Rojas Morales. Ingeniero Agrícola, actualmente labora para la empresa “Agrologico de Nicaragua S.A”, donde desempeña un papel de supervisión de sistemas de riego.