



DETERMINACION DE LAS ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA DEL ACUIFERO CAACUPE EN LA CIUDAD DE PIRIBEBUY A PARTIR DE INDICADORES SUPERFICIALES¹

DETERMINATION OF THE RECHARGE AND DISCHARGE ZONES OF THE
CAACUPE AQUIFER IN THE CITY OF PIRIBEBUY FROM SURFACE
INDICATORS

DETERMINAÇÃO DAS ZONAS DE RECARGA E DESCARGA DO AQUÍFERO
CAACUPE NA CIDADE DE PIRIBEBUY COM BASE EM INDICADORES DE
SUPERFÍCIE.

Justo Daniel Vargas
Investigador independiente
danipiripy@gmail.com
ORCID: 0009-0004-0631-8949

Narciso Cubas Villalba
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay
ncubas@facen.una.py
ORCID: 0000-0003-0052-2872

RESUMEN

La ciudad de Piribebuy enfrenta un crecimiento desordenado que amenaza la calidad de su recurso hídrico, especialmente el Acuífero Caacupé, principal fuente de agua potable. Por ello, se justifica la necesidad de identificar sus zonas de recarga y descarga para protegerlas eficazmente. El objetivo de esta investigación fue determinar las zonas de recarga y descarga del Acuífero Caacupé en el área urbana de Piribebuy, utilizando el gradiente hidráulico y evidencias superficiales como criterio principal. Se empleó un enfoque cuantitativo con diseño descriptivo y metodología no experimental. Los datos se recopilieron mediante muestreos en cinco pozos artesianos, análisis de coliformes fecales y procesamiento geoespacial con QGIS 3 y Surfer 12 para elaborar mapas 2D y 3D. Los resultados indicaron que el acuífero es un sistema libre, con niveles freáticos más profundos en zonas altas y más superficiales en zonas bajas, evidenciando un flujo natural hacia el arroyo Piribebuy, que actúa como curso ganador sin afectar la calidad del acuífero. Las zonas de recarga, ubicadas en cotas altas, fueron identificadas como áreas vulnerables a contaminación, por lo que se recomienda su protección prioritaria.

Palabras clave: Acuífero Caacupé; Piribebuy; zonas de recarga; calidad del agua; hidrogeología.

¹ Este artículo se deriva de la investigación de un trabajo de grado de licenciatura titulada 'Determinación de las zonas de recarga y descarga del acuífero Caacupé en la ciudad de Piribebuy a partir de indicadores superficiales', presentada en el departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción.

ABSTRACT

The city of Piribebuy faces a disorderly growth that threatens the quality of its water resources, especially the Caacupé Aquifer, the main source of drinking water. Therefore, the need to identify its recharge and discharge zones in order to protect them effectively is justified. The objective of this research was to determine the recharge and discharge zones of the Caacupé Aquifer in the urban area of Piribebuy, using the hydraulic gradient and surface evidence as the main criteria. A quantitative approach with descriptive design and non-experimental methodology was used. Data were collected through sampling in five artesian wells, fecal coliform analysis and geospatial processing with QGIS 3 and Surfer 12 to produce 2D and 3D maps. The results indicated that the aquifer is a free system, with deeper phreatic levels in higher areas and shallower in lower areas, evidencing a natural flow towards the Piribebuy stream, which acts as a winning course without affecting the quality of the aquifer. The recharge zones, located at high altitudes, were identified as areas vulnerable to contamination, and their priority protection is recommended.

Key words: Caacupé aquifer; Piribebuy; recharge zones; water quality; hydrogeology.

RESUMO

A cidade de Piribebuy enfrenta um crescimento desordenado que ameaça a qualidade dos seus recursos hídricos, especialmente o Aquífero Caacupé, principal fonte de água potável. Isso justifica a necessidade de identificar suas zonas de recarga e descarga para protegê-las de forma eficaz. O objetivo desta pesquisa foi determinar as zonas de recarga e descarga do Aquífero Caacupé na área urbana de Piribebuy, utilizando como principais critérios o gradiente hidráulico e a evidência superficial. Foi utilizada uma abordagem quantitativa com desenho descritivo e metodologia não experimental. Os dados foram coletados através de amostragem em cinco poços artesianos, análise de coliformes fecais e processamento geoespacial com QGIS 3 e Surfer 12 para produzir mapas 2D e 3D. Os resultados indicaram que o aquífero é um sistema livre, com níveis freáticos mais profundos nas zonas mais altas e mais rasos nas zonas mais baixas, evidenciando um fluxo natural para a ribeira de Piribebuy, que actua como um curso vencedor sem afetar a qualidade do aquífero. As zonas de recarga, localizadas em altitudes elevadas, foram identificadas como áreas vulneráveis à contaminação, recomendando-se, portanto, sua proteção prioritária.

Palavras-chave: Aquífero Caacupé; Piribebuy; zonas de recarga; qualidade da água; hidrogeologia.

Recibido: 05/05/2025 Aprobado: 08/07/2025 Publicado: 01/08/2025

1. Introducción

En los últimos años, la ciudad de Piribebuy ha experimentado un notable crecimiento en las actividades ganaderas, comerciales y turísticas, lo cual ha generado un desarrollo urbano desordenado, especialmente en áreas vulnerables cercanas a los cauces hídricos. Este proceso, junto con la falta de información precisa sobre las zonas de recarga y descarga del acuífero local, representa una amenaza directa para la calidad del agua potable y la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo.

Ante este escenario, el presente estudio tiene como objetivo aplicar la teoría de los sistemas de flujo para identificar y delimitar zonas de recarga y descarga del agua subterránea en el área seleccionada. Para ello, se correlacionan indicadores superficiales como la litología, los tipos de suelo, la elevación del terreno, la cobertura vegetal, así como la presencia de manantiales y características propias de zonas de humedales.

Este trabajo fue realizado en el año 2017, en el marco del trabajo de grado de la carrera de Licenciatura en Ciencias con mención en Geología, de la Facultad de

Ciencias Exactas y Naturales (FACEN) de la Universidad Nacional de Asunción. No obstante, en esta versión se han actualizado ciertos datos y referencias bibliográficas con base en literatura científica reciente, a fin de fortalecer la validez y vigencia de los resultados.

La investigación busca constituirse en una base técnica y científica para futuros estudios de ordenamiento territorial, con el propósito de contribuir a la protección del Acuífero Caacupé y a la garantía del suministro de agua segura para los habitantes de Piribebuy. La delimitación de zonas de recarga y descarga se considera de gran utilidad para el diseño de estrategias de conservación de áreas prioritarias (Peñuela y Carrillo, 2012), al tiempo que representa una primera aproximación al conocimiento integral de la dinámica del agua subterránea en la región. El área de estudio, de aproximadamente 20.3 km², fue delimitada teniendo en cuenta las restricciones logísticas y presupuestarias propias de un trabajo de grado autofinanciado.

Además del análisis del gradiente hidráulico y los indicadores superficiales, la investigación incluyó análisis químicos de coliformes fecales en muestras de agua, con el fin de verificar posibles contaminaciones por efluentes que podrían afectar la calidad del recurso hídrico.

Antecedentes

Geología Regional

Con lo que respecta a rocas de la Cuenca del Paraná del Paleozoico, Harrington, (1950), elaboró un bosquejo geológico del Paraguay Oriental a escala 1:5.000.000 y describió los afloramientos a modo de poder interpretar la secuencia estratigráfica de esta cuenca en nuestro territorio, hasta hoy en día sigue siendo uno de los trabajos más citados.

Desde allí surgieron un sinnúmero de trabajos que modificaron y/o complementaron las propuestas hechas por Harrington, (1950), tales como: Eckel, (1959), el mismo Harrington, (1956-1972), investigaciones paleontológicas de Wolfart, (1961), e investigaciones geológicas de Putzer, (1962), The Anschutz Co. (1981) y Proyecto PAR 83/005, (1986). Debido a esto surgieron varias columnas estratigráficas en donde se establecían variantes de nomenclaturas para series, grupos, formaciones y miembros, todos éstos tomando en cuenta las observaciones anteriores realizados por otros autores.

El Paleozoico se inició con la sedimentación de conglomerados intercalados con areniscas conglomerádicas que corresponden a afloramientos observados a lo largo de la ciudad de Piribebuy, estas rocas pertenecen al Grupo Caacupé según el Mapa Geológico del Paraguay Escala 1:1.000.000 (Proyecto PAR 86), estas rocas fueron descritas ya por Harrington (1950) quien nomino a estos afloramientos como Serie Caacupé asignándole una edad Silúrico Inferior y dos unidades formales; el Conglomerado de Paraguarí que según la descripción de dicho autor está formada por unos 40 a 50 metros de conglomerados con intercalaciones delgadas de areniscas de

grano grueso, con colores predominantes que van desde blanco amarillento a amarillento pardusco y pardo claro, estos conglomerados pasan a las Areniscas de Piribebuy por medio de una disminución de las camadas conglomeradicas y el aumento relativo de la potencia de los bancos arenosos intercalados, estas areniscas continúan inmediatamente sobre el conglomerado de Paraguarí, de manera gradada; estas areniscas son de grano medio a fino, poco cementadas hasta casi incoherentes con granos bastante bien redondeados. Según el citado autor, en la base estas areniscas son del tipo feldespáticas muy monótonas y homogéneas de colores claros siendo poco frecuentes los tonos parduscos y rojizos; poseen estratificación en camadas delgadas con laminación entrecruzada. Hacia la parte superior de esta serie, las areniscas de Piribebuy se hacen más sacaroides y la laminación entrecruzada se hace progresivamente menos clara hasta que termina por desaparecer, las capas superiores por tanto son de grano fino a medio, poco coherentes y sacaroides predominando el color blanco amarillento. En el informe sobre la geología de la Cuadrícula 40 (1966), el Silúrico está englobado en la Serie Cordillera con las Formaciones Caacupé, Eusebio Ayala, Ypacaraí e Itacurubí. En la descripción de la geología de la Cuadrícula 41 (1966), la Formación Itacurubí es reemplazada por la Formación Acosta Nú.

En el trabajo de Putzer (1962) menciona que Harrington (1950) estuvo errado al darle una edad Silúrico Inferior a la Serie Caacupé, reassignándole una edad Ordovicico-Silúrico utilizando el trabajo de Wolfart (1961) como base para esa afirmación.

Posteriormente Harrington (1956) cambia la denominación anterior por Grupo Caacupé y Harrington (1972) subdivide al grupo en tres unidades, siendo estas Conglomerado de Paraguarí, Arenisca de Cerro Jhu y Arenisca de Tobati respectivamente, ya asumiendo una edad Ordovicico-Silúrico para dicho grupo. Según el mismo autor este grupo descansa discordantemente sobre rocas precámbricas y es suprayacido concordantemente por el Grupo Itacurubí. Según Degraff (1982), la formación Tobati posee un espesor de 200-250 m al E del Valle de Ypacaraí y un mínimo de 80 m al W de la misma depresión.

Petrografía Fm. Tobati y Fm. Cerro Jhu

Fm. Cerro Jhu: se destaca la presencia de areniscas arcosas como paquetes masivos de porte medio y grande, a veces estratificados y exhibiendo acamamiento plano paralelo, predominan en la porción inferior de la unidad. En la parte superior es común la presencia de camadas lenticulares de carácter gradacional, con conglomerados en la base pasando a rocas clásticas más finas, de naturaleza silico-arcillosa, intercalas con areniscas. La sección inferior de la formación es caracterizada por el predominio de areniscas cuarzo feldespáticas, mal seleccionados, mostrando color claro y manchas oscuras ferruginosas. En general, contiene intercalaciones de material silíceo-arcilloso a micáceo, y corresponden a su paquete de mayor porte. Por otro lado, la parte superior tiene como litología más expresiva sedimentos arenosos, con lentes de siltita y arcilla, en forma de paquetes de gran espesor, por encima de 25 m,

pasando a areniscas cuarzosas, friables, mal seleccionadas y poco cementadas. (Orué, 1996)

Fm. Tobati: consiste principalmente en sedimentos arenosos de coloración clara, en el que se reconocen dos secciones clásticas. La sección inferior es caracterizada por la predominancia de estratos de areniscas retrabajadas de color pardo-amarillento, granulometría media a gruesa, poco cementados y mal seleccionados con fragmentos angulosos a subangulosos, y mostrando niveles con nódulos de arcillas y lentes de arcillas micáceas con un espesor variado que va de entre 0.30 m a 2 m. La sección superior muestra una presencia dominante de areniscas friables, con textura de tipo sacaroides y granulometría fina a media. Poseen buena selección, poco redondeados, y se presentan parcialmente silicificados; a veces, contienen material carbonático. Presenta acamamiento en láminas finas, localmente exhibe estratificación cruzada de gran porte y de bajo ángulo (Orué, 1996).

MAPA GEOLOGICO DE LA CIUDAD DE PIRIBEBUY

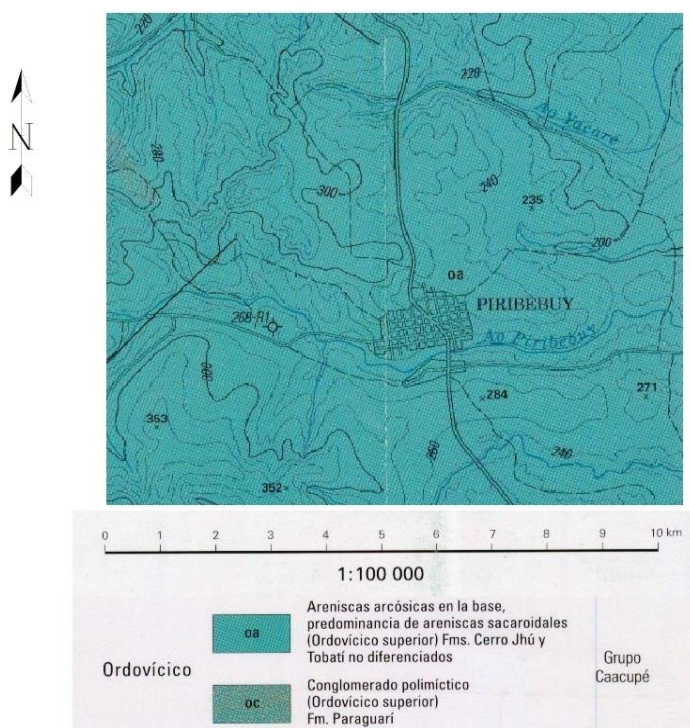


Figura 1: Mapa geológico zona urbana Piribebuy (Modificado de *Mapa Geológico de la República del Paraguay*, Hoja CAACUPE 5470, 1999)

Hidrología

El río Piribebuy o Arroyo Piribebuy es el principal cauce hídrico que cruza por la ciudad homónima. Según el *Atlas de cuencas hidrográficas del Paraguay* (MADES, 2022), posee una longitud total aproximada de 120 km desde su nacimiento hasta su

desembocadura en el río Paraguay y cuenta con una cuenca hidrográfica total aproximada de 1638 km². En casi todo su trayecto por la ciudad de Piribebuy, el arroyo corre sobre rocas correspondientes al Grupo Caacupé (Harrington, 1972). La profundidad aproximada no supera los 2 metros de profundidad, exceptuado ya casi en su desembocadura en el Río Paraguay, en las cercanías del distrito de Arroyos y Esteros.

Hidrogeología

Acuífero: Según Custodio y Llamas (1983) se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que, permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir sus necesidades.

Acuíferos libres: se denominan acuíferos libres no confinados o freáticos a aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y por lo tanto a presión atmosférica (Custodio, Llamas; 1983).

Acuíferos confinados: Según Custodio y Llamas (1983) los acuíferos cautivos, confinados o a presión, el agua de los mismos está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente. Por ello durante la perforación de pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del agua hasta estabilizarse en una terminada posición.

Acuíferos semiconfinados o semicautivos: Según Custodio y Llamas (1983) pueden considerarse como caso particular de los acuíferos cautivos, en los que el muro (parte inferior) y/o techo (parte superior) que los encierra no sea totalmente impermeable sino un acuitardo; es decir material que permita una filtración vertical del agua, muy lenta, que alimente el acuífero principal en cuestión, a partir de un acuífero o masa de agua situada encima o debajo del mismo.

Pozos verticales: Según Custodio y Llamas (1983) se define como una perforación vertical, en general de forma cilíndrica y de diámetro mucho menor que la profundidad. El agua penetra a lo largo de las paredes creando un flujo de tipo radial. Es con mucho el tipo de captación más extendido. Son conocidos coloquialmente como pozos artesianos.

Nivel freático: cota absoluta (en m sobre el nivel del mar) que corresponde a la parte superior de saturación en un acuífero libre. Es una variable de significado puntual, pues la cota del agua varía espacialmente en el terreno. En acuíferos libres el nivel freático se encuentra a presión atmosférica. Custodio y Llamas (1983)

Nivel piezométrico en acuíferos libres: En los acuíferos libres el nivel piezométrico coincide con el nivel freático. Custodio y Llamas (1983)

Determinación de los niveles piezométricos: La única forma disponible para medir los niveles piezómetros de un acuífero es mediante una perforación que permita un

acceso directo al mismo. La construcción de piezómetros es costosa y debe reducirse al mínimo indispensable. En acuíferos no consolidados de escasa profundidad se pueden instalar a hinca directa, de forma rápida y relativamente económica, pero en acuíferos más profundos o en rocas consolidadas se precisa de maquinaria costosa y la construcción es a veces lenta y no exenta de dificultades e imprevistos. Por las razones aludidas debe tratarse de aprovechar los accesos al acuífero que ya existan y sean suficientemente representativos tales como pozos, galerías, zonas pantanosas, manantiales, ríos conectados con el acuífero, etcétera. Custodio y Llamas (1983).

La profundidad del nivel piezométrico se mide desde una determinada referencia; para conocer el nivel piezométrico es preciso conocer la cota de la referencia respecto a un cierto punto fijo tal como el nivel del mar. Custodio y Llamas (1983).

Factores de la Infiltración: la generación de agua subterránea viene a ser el resultado de la infiltración producida a través del suelo de agua que puede provenir tanto de las lluvias, nieve, granizo, rocío o distintos cuerpos de agua (lagos, arroyos, ríos). En sitios en los que el nivel de agua de ríos y lagos se halla más alto que la superficie freática y sus lechos son permeables, el depósito es recargado por esos cuerpos líquidos. Cuando una corriente o tramo de esta brinda su contribución de agua a la zona de saturación, se dice que es una corriente *afluente* respecto del agua subterránea. Si por el contrario el agua subterránea se halla a una elevación superior a la de un río y percola hacia este, se dice que la corriente es *efluente* de aquella. (Johnson Filtration Systems Inc., 1975)

Determinación de Zonas de Recarga y Descarga de acuíferos libres

Zonas de descarga: Una zona de descarga es la evidencia más viable de identificar el funcionamiento del agua subterránea, es el sitio donde el agua aflora o se encuentra cerca de la superficie y representa la fase final de recorrido del flujo subterráneo; así, el agua ha adquirido propiedades particulares (salinidad, temperatura, pH, entre otros) teniéndose una continuidad específica de caudal en el tiempo que condiciona la presencia de determinado suelo y de una vegetación acorde con las variables del caso. (Peñuela y Carrillo, 2013)

Una zona de descarga puede estar representada por un manantial, lago, suelo salino, vegetación controlada por la salinidad del agua-suelo, y/o un nivel de agua subterránea somero. Entre mayor ha sido el recorrido del agua subterránea en el subsuelo, se han originado diversos procesos, entre ellos el intercambio fisicoquímico agua-roca, que otorgan al agua propiedades fisicoquímicas peculiares que dependen del tipo de roca, profundidad y distancia de recorrido, principalmente. Así, un suelo asociado con una zona de descarga tiende a ser más salino y alcalino, tornándose en general bien desarrollado, con alto contenido de materia orgánica (MO) y pudiendo llegar a tener rasgos hidromórficos (moteado y concreciones de Fe y Mn; colores gley). Por esto, la vegetación asociada con zonas de descarga sobrevive en regiones permanentemente inundadas y/o es tolerante a alta salinidad y/o yeso. La descarga de

agua subterránea ocurre a una elevación topográfica más baja que donde se origina la recarga. (Peñuela y Carrillo, 2013)

Zonas de recarga: La identificación de estas zonas es más complicada debido a que el agua se infiltra y no se tiene evidencia superficial como en las de descarga, a menos que se cuente con presupuesto suficiente para perforar y tomar muestras de suelo y subsuelo en condiciones específicas. No obstante, un primer indicador está asociado con la conductividad hidráulica de la roca, la cual puede permitir la infiltración del agua de lluvia; un segundo es que tal roca se localice en una elevación topográficamente alta. En la zona de recarga el nivel freático se encuentra profundo, el suelo es ácido y poco desarrollado con poca cantidad de materia orgánica, baja concentración de sodio y/o sales. La vegetación es xerófita; esto es, adaptada a un ambiente relativamente seco, con raíz larga para alcanzar a captar el agua infiltrada en su camino al nivel freático (Peñuela y Carrillo, 2013).

Acuífero Caacupé

Según el Texto del Mapa Hidrogeológico del Paraguay Escala 1:1.000.00 (1986) clasifica al acuífero Caacupé como un “Acuífero Regional de Extensión Restringida” por su patrón geométrico natural. Según dicho texto el acuífero es del Periodo Silúrico, tiene una extensión relativamente restringida de 1.395 km², y está compuesto en su mayoría por areniscas de granulometría media a gruesa con un conglomerado de base. El espesor del acuífero se estima en 300 m. El agua normalmente es buena, pero puede variar a salobre en relativamente cortas distancias, aparentemente debido a movimientos tectónicos verticales ocurridos, que tienen como consecuencia condiciones de agua sin flujo o casi sin el en ciertas secciones del área.

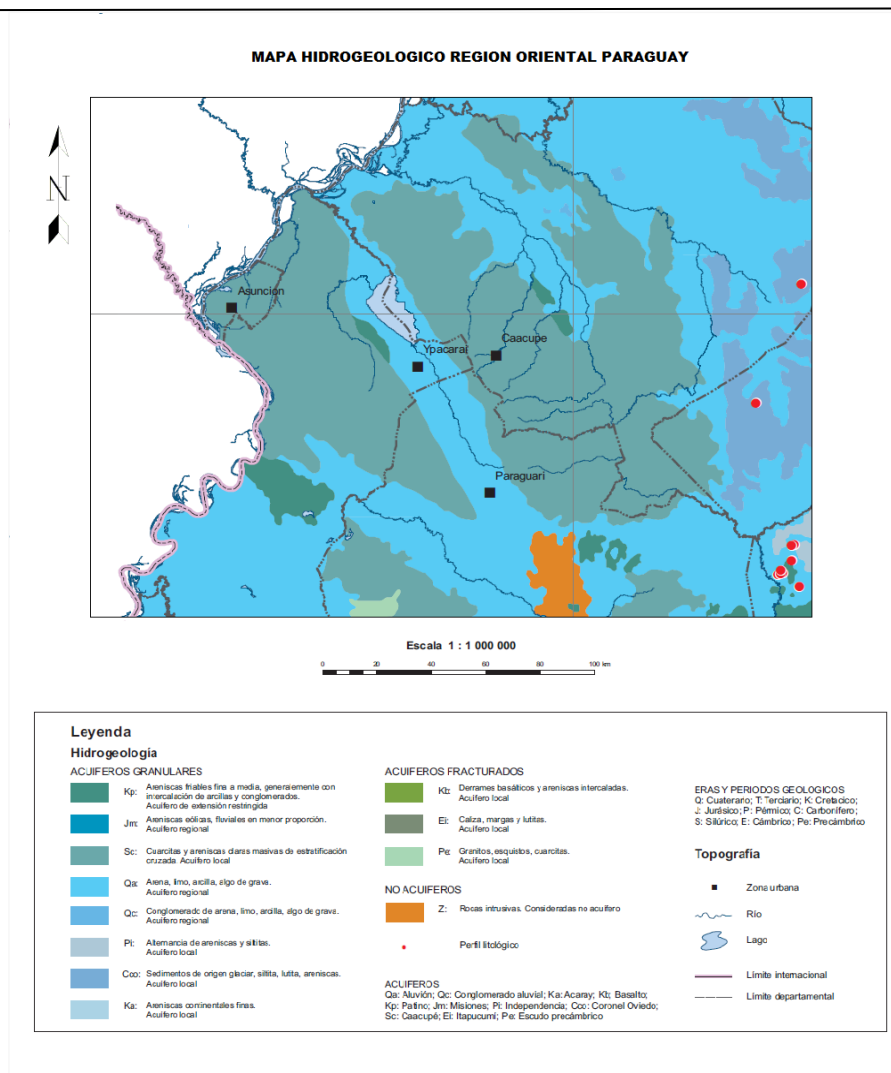


Figura 2: Mapa hidrogeológico región oriental Paraguay (Modificado de *Región Oriental del Paraguay Mapa Hidrogeológico – General. Proyecto SAG-PY. SEAM BGR 2007*)

Marco Legal

Ley N° 1.614/2000 “LEY GENERAL DEL MARCO REGULATORIO Y TARIFARIO DEL SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO SANITARIO”

ANEXO I - LIMITES DE CALIDAD DE AGUA POTABLE – FRECUENCIA DE MUESTREOS MINIMOS.

Componentes Bacteriológicos Básicos

- Método Membrana Filtrante

AGUA SOMETIDA A TRATAMIENTO QUE ENTRA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.					
ORGANISMO	UNIDAD	LÍMITE ADMISIBLE	LÍMITE (*) RECOMEND.	FRECUENCIA DE MUESTREO	OBSERVACION
Bacterias Coliformes Fecales	UFC/100ml	0	0	Diaria	(1)
Bacterias Coliformes Totales	UFC/100ml	0	0	Diaria	(1)
AGUA NO SOMETIDA A TRATAMIENTO QUE ENTRA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.					
ORGANISMO	UNIDAD	LÍMITE PERMISIBLE	LÍMITE (*) RECOMEND.	FRECUENCIA DE MUESTREO	OBSERVACION
Bacterias Coliformes Fecales	UFC/100ml	0	0	Diaria	
Bacterias Coliformes Totales	UFC/100ml	0	0	Diaria	(2)
Bacterias Coliformes Totales	UFC/100ml	3	0	Diaria	(3)
AGUA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.					
ORGANISMO	UNIDAD	LÍMITE PERMISIBLE	LÍMITE (*) RECOMEND.	FRECUENCIA DE MUESTREO	OBSERVACION
Bacterias Coliformes Fecales	UFC/100ml	0	0	Diaria	
Bacterias Coliformes Totales	UFC/100ml	0	0	Diaria	(2)
Bacterias Coliformes Totales	UFC/100ml	3	0	Diaria	(4)

Tabla 1: Parámetros de coliformes totales y fecales para agua de consumo (Ley 1.614/2000).

(*) Los límites recomendables corresponden a los establecidos en las Guías de la OPS y OMS. (1) Turbiedad <1 UNT. Para desinfección con cloro es preferible un PH < 8. Cloro Residual Libre, luego de 30 minutos de contacto entre 0,2 a 0,5 mg/l. (2) En el 98% de las muestras examinadas durante el año, cuando se trata de grandes sistemas de abastecimiento y se examinan suficientes muestras. (3) Ocasionalmente en alguna muestra pero no en muestras consecutivas. (4) En el 95% de las muestras examinadas durante el año, cuando se trata de grandes sistemas de abastecimiento y se examinan suficientes muestras.
ABREVIATURAS: UFC = Unidad Formadora de Colonias. UNT = Unidades Nefelométricas de Turbiedad

Por tanto, el objetivo de esta investigación es determinar las zonas de recarga y descarga del Acuífero Caacupé en el área urbana de Piribebuy, a partir del análisis del gradiente hidráulico y de indicadores superficiales verificados en campo, incluyendo evidencias visibles y análisis de coliformes fecales como posibles señales de contaminación.

2. Metodología

Este estudio se enmarcó dentro de un enfoque **cuantitativo** y empleó un diseño **descriptivo** para analizar las características del acuífero Caacupé y las zonas de recarga en la ciudad de Piribebuy. La elección de este enfoque se basó en la necesidad de obtener datos precisos y objetivos sobre los parámetros de calidad de las aguas y su distribución geoespacial, con el objetivo de realizar una interpretación rigurosa de la información recabada.

Área de estudio:

La ciudad de Piribebuy se encuentra ubicada a aproximadamente 73 kilómetros al este de Asunción, en el departamento de Cordillera, Paraguay. Según el censo paraguayo de 2022, cuenta con una población de 25,758 habitantes. Su extensión territorial es de 174

km². La principal fuente de agua potable para la comunidad es el Acuífero Caacupé (Proyecto PAR 86), del cual se abastecen diversas juntas de saneamiento a través de pozos artesianos distribuidos en la zona urbana y sus alrededores.

Desde el punto de vista geológico, la región está dominada por formaciones de areniscas correspondientes al período Ordovícico (Harrington, 1972). En cuanto a la hidrología superficial, el arroyo Piribebuy, que es un afluente directo del río Paraguay, constituye el principal curso de agua superficial en la zona, jugando un papel importante en la dinámica hídrica local (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADES], 2022).

La combinación de estos factores geológicos, hidrológicos y demográficos configura un contexto complejo para el manejo y conservación del recurso hídrico, lo que subraya la relevancia de delimitar adecuadamente las zonas de recarga y descarga del acuífero en esta área.

Para delimitar el área de estudio, se definieron los siguientes vértices en coordenadas UTM, zona 21S:

- Punto 1: Este 493,289 m; Norte 7,185,121 m
- Punto 2: Este 497,775 m; Norte 7,185,146 m
- Punto 3: Este 497,799 m; Norte 7,180,650 m
- Punto 4: Este 493,310 m; Norte 7,180,624 m

Esta delimitación comprende una superficie aproximada de 20.3 km² y responde a la necesidad de focalizar el estudio en la zona urbana y sus alrededores inmediatos de la ciudad de Piribebuy, considerando además las limitaciones propias de un trabajo de grado autofinanciado.

Método

El estudio se clasifica como **no experimental**, dado que no se manipularon variables de manera controlada, sino que se observó el comportamiento natural de los pozos artesianos en la ciudad, obteniendo datos a través de muestreos y análisis de imágenes satelitales. Este enfoque permitió una comprensión detallada de la distribución y comportamiento del acuífero en su entorno natural.

Procedimientos de Recolección de Datos

La recolección de datos se llevó a cabo en cuatro fases, que se describen a continuación:

1. Fase 1: Recolección de información preliminar y autorización

Durante los dos primeros meses, se realizaron las revisiones bibliográficas, trabajos de gabinete y visitas a las autoridades locales, incluyendo la Municipalidad y la Junta de Saneamiento de Piribebuy. El propósito fue obtener información técnica sobre las características de los pozos existentes (perfil geológico, profundidad, nivel estático y caudal) y gestionar los permisos para el muestreo de las aguas.

2. Fase 2: Muestreo de aguas

En el tercer mes, una vez obtenidos los permisos correspondientes, se procedió a la recolección de muestras de agua en varios pozos artesianos. El procedimiento de muestreo se realizó conforme a las indicaciones metodológicas proporcionadas de forma verbal por técnicos del Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, quienes orientaron sobre los pasos a seguir para garantizar la representatividad y seguridad de las muestras. Las recomendaciones incluyeron:

- Dejar correr el agua de los pozos durante 5 minutos antes de la toma de muestras.
- Limpiar la boca de la canilla con algodón impregnado en alcohol y flamearla durante 30 segundos.
- Proceder al muestreo de agua en frascos de 100 ml. Las muestras fueron transportadas en conservadoras refrigeradas al laboratorio para su análisis.

Posteriormente al muestreo de agua, se procedió a la verificación de los niveles estáticos mediante un piezómetro. Esta actividad se realizó una vez concluidas las tomas de muestra, con el fin de evitar cualquier posible contaminación de los pozos durante la medición.

3. Fase 3: Procesamiento y digitalización de datos

Durante los dos últimos meses del semestre se llevó a cabo la digitalización y el procesamiento de los datos recolectados en la fase de muestreo. Para ello, se empleó software especializado en análisis geoespacial y generación de mapas temáticos, específicamente *QGIS 3* y *Surfer 12*, que permitieron representar con precisión la información hidrogeológica obtenida..

4. Fase 4: Análisis e interpretación de los resultados

Se analizó la información obtenida a través de observación de imágenes satelitales y salidas de campo. Se verificaron los datos de gabinete mediante la comparación con las observaciones directas, lo que permitió establecer conclusiones sobre el comportamiento del acuífero, incluyendo las zonas de recarga y descarga del mismo.

Selección de puntos de muestreos

Las muestras de agua se tomaron de un total de cinco pozos artesianos, distribuidos en diferentes barrios de la ciudad de Piribebuy. Cada punto fue georreferenciado utilizando coordenadas UTM (Zona 21J, Datum WGS 84), según el siguiente detalle:

- M1: 495283 E; 7183816 N
- M2: 496156 E; 7183688 N
- M3: 495487 E; 7184579 N

- M4: 494787 E; 7183683 N
- M5: 496310 E; 7182641 N

Los pozos fueron seleccionados de forma intencionada, considerando la disponibilidad, los permisos de acceso y la representatividad espacial dentro del área urbana. El muestreo se realizó una sola vez, el 13 de octubre de 2017, durante la estación de primavera.

Análisis de los Datos

Los datos fueron procesados utilizando el software de Sistemas de Información Geográfica **QGIS 3** y el programa de modelado y visualización **Surfer 12**, con el objetivo de generar mapas en 2D y 3D que representen la distribución espacial de las zonas de recarga y descarga del Acuífero Caacupé. Esta integración de herramientas permitió identificar patrones geoespaciales del flujo subterráneo, así como establecer correlaciones entre las características hidrogeológicas del acuífero, el relieve local y las actividades antrópicas en el área de estudio.

La metodología adoptada se basa en enfoques de zonificación hidrogeológica similares a los utilizados por Peñuela y Carrillo (2013), quienes destacan la importancia de la interpretación espacial para la delimitación de áreas prioritarias en la gestión de recursos hídricos subterráneos.

Consideraciones Éticas

Este estudio se llevó a cabo siguiendo las normativas éticas nacionales e internacionales para la investigación científica. Se garantizó la confidencialidad de los datos obtenidos, y en caso de que se haya requerido la colaboración de autoridades locales o personal externo, se obtuvo el consentimiento informado previo. Las normativas éticas institucionales de la Universidad y de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales fueron respetadas en todo momento para asegurar la integridad y confiabilidad del estudio.

3. Resultados y Discusión

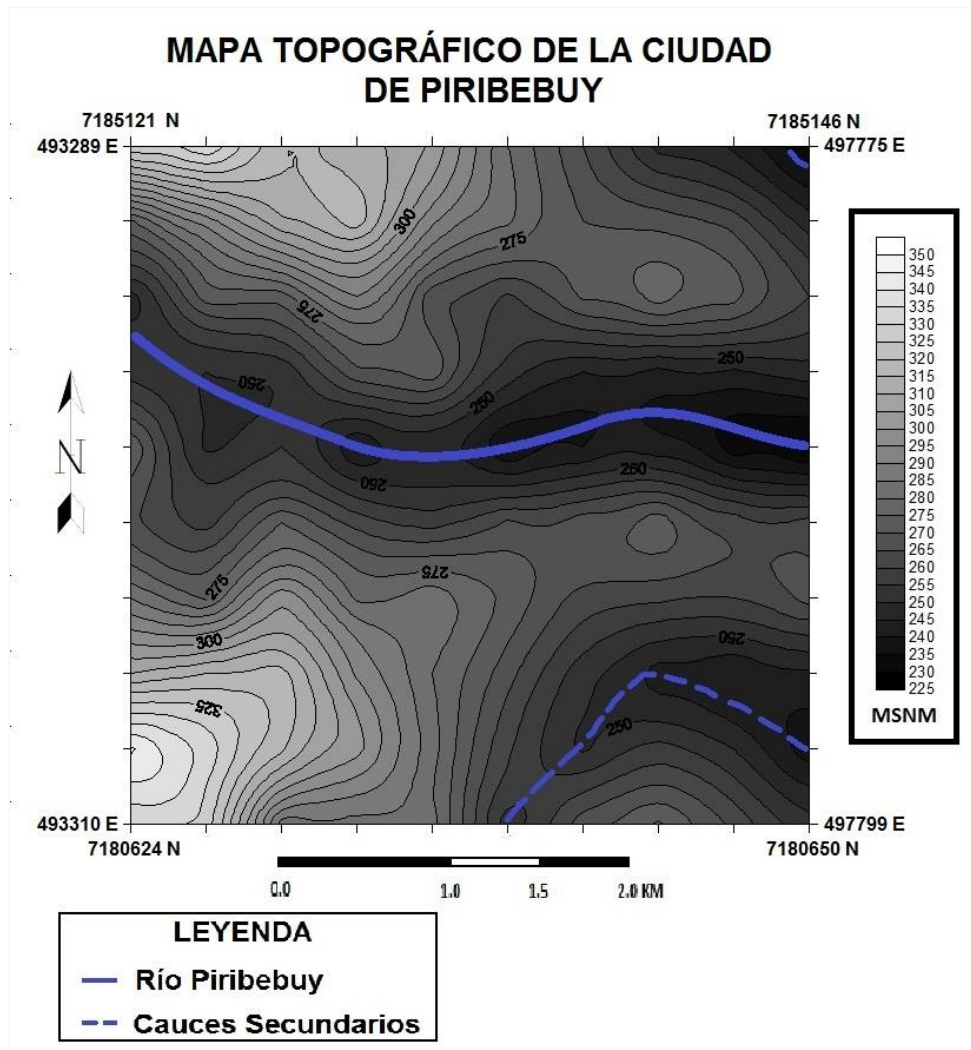


Figura 3: Mapa topográfico de la ciudad de Piribebuy donde cada curva de nivel representa una cota en msnm.

Como se puede observar en la figura 3, el modelado del relieve de la ciudad de Piribebuy está definido principalmente por el cauce del arroyo homónimo, donde se localizan las cotas más bajas, así como en otros cursos hídricos menores. Las cotas más altas se concentran hacia el sector occidental del área de estudio, correspondiente a una franja elevada de la Cordillera de los Altos.

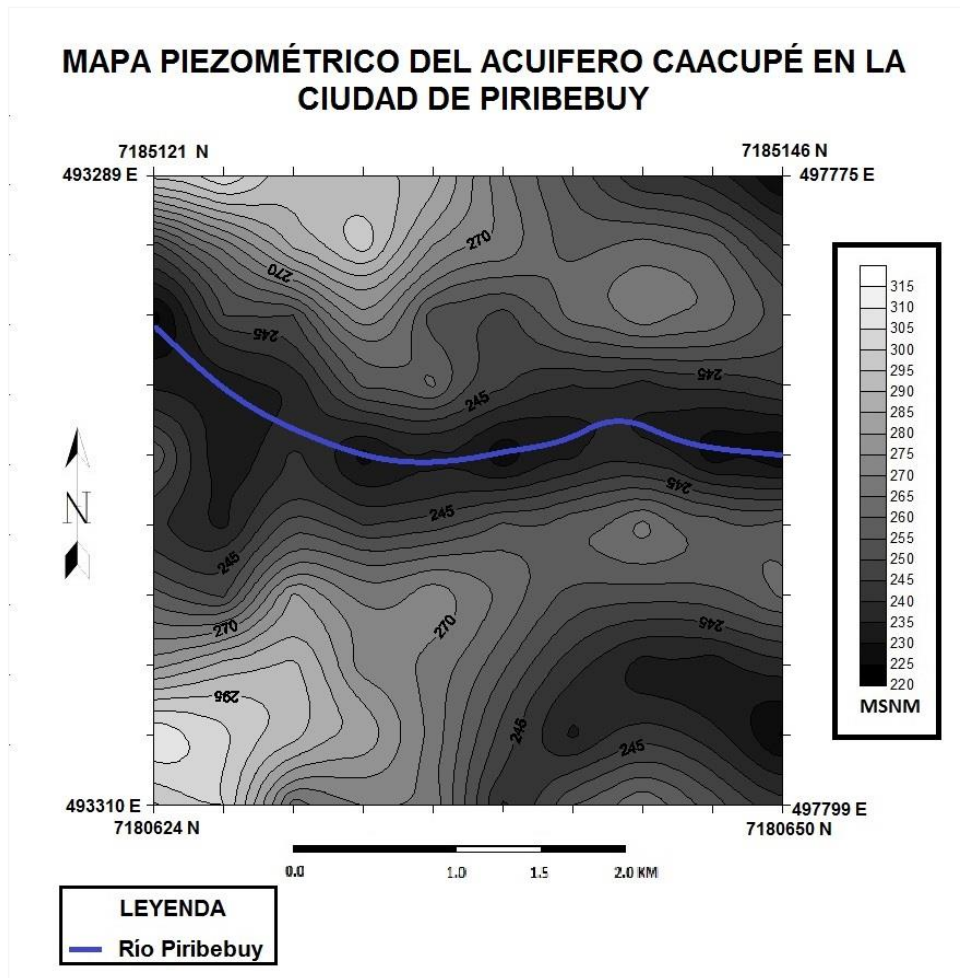


Figura 4: Mapa piezométrico del acuífero en la ciudad de Piribebuy donde cada curva de nivel representa una cota en msnm.

El nivel piezométrico fue inferido a partir de datos recolectados en campo por el autor, a través del relevamiento de pozos administrados por la Junta de Saneamiento y por empresas privadas. Se observa que este se encuentra a mayor profundidad en zonas de cotas altas y más próximo a la superficie en cotas bajas, un comportamiento característico de los acuíferos libres o no confinados. Esta interpretación se refuerza en la Figura 5, donde se presenta un modelo tridimensional superpuesto al relieve, evidenciando la concordancia entre el nivel piezométrico y el relieve superficial. Este comportamiento es coherente con lo señalado por Custodio y Llamas (1983), quienes afirman que en acuíferos no confinados el nivel freático tiende a reflejar la topografía, profundizándose en zonas elevadas y ascendiendo en las depresiones. Asimismo, a partir de la descripción geológica de la zona realizada por Harrington (1972), y posteriormente complementada por diversos autores, se infiere que no existen capas confinantes, lo cual respalda la interpretación de que se trata de un acuífero libre.

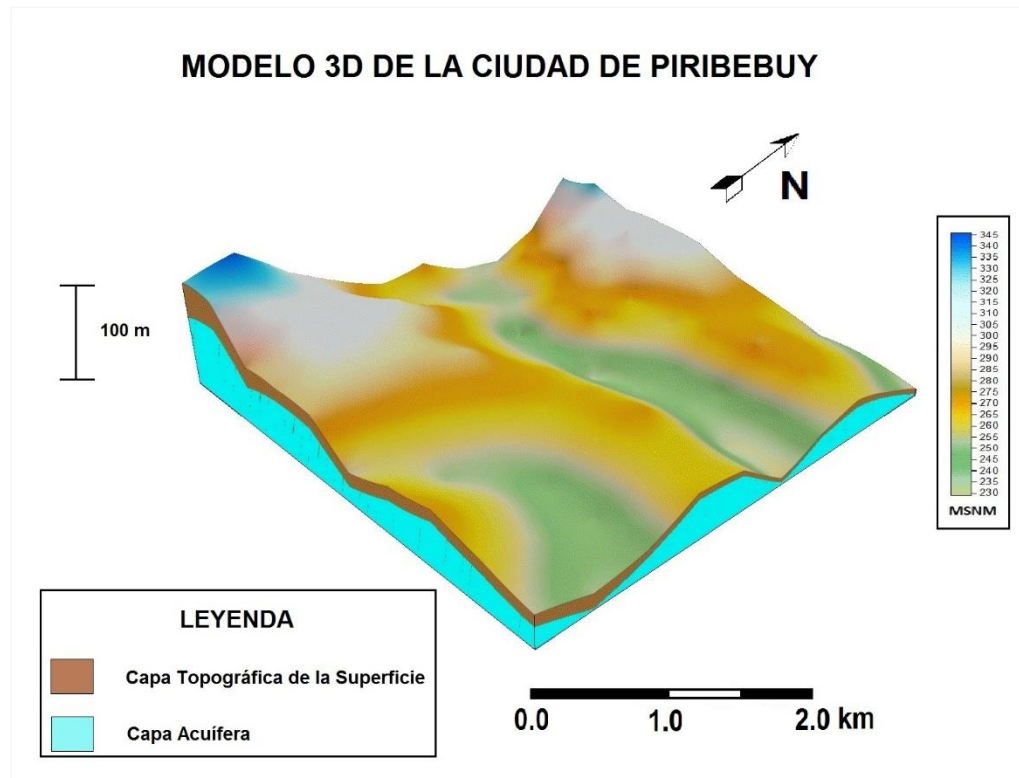


Figura 5: Modelo en 3D propuesto del Acuífero Caacupé en la ciudad de Piribebuy superpuesto con la capa del relieve topográfico. Cotas medidas con respecto al nivel del mar.

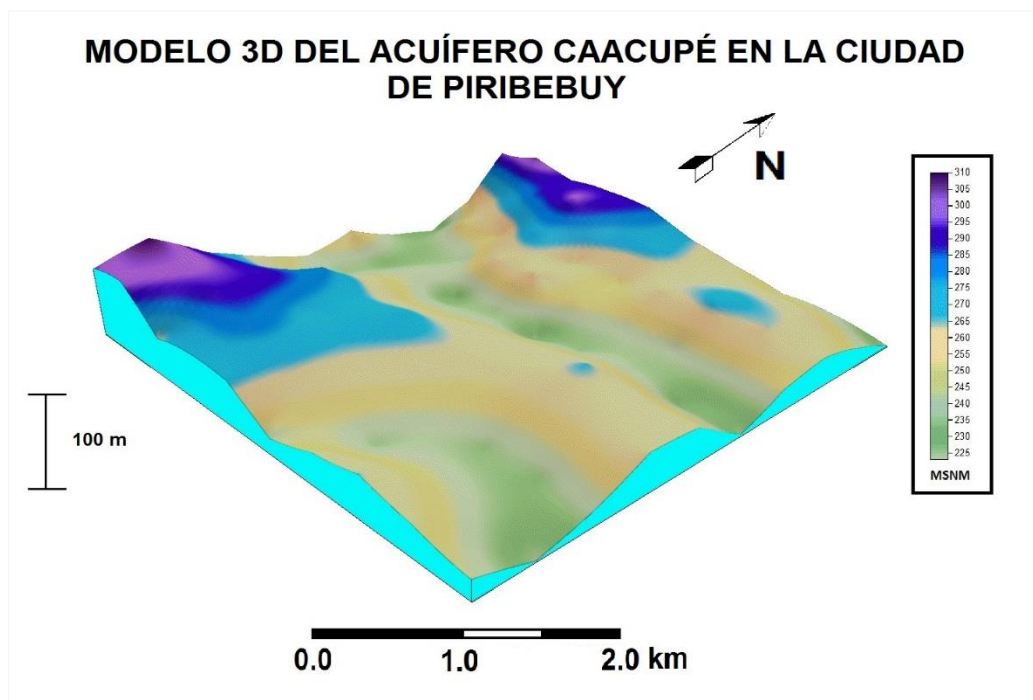


Figura 6: Modelo en 3D propuesto del Acuífero Caacupé en la ciudad de Piribebuy sin superposición del relieve topográfico. Cotas medidas con respecto al nivel del mar.

A partir del modelo de flujo del agua subterránea (Figura 7), se identificaron las zonas de recarga y descarga del acuífero. En coherencia con su naturaleza libre, las cotas bajas actúan como zonas de descarga, coincidiendo con los cursos hídricos,

especialmente el arroyo Piribebuy. Esto sugiere que dicho arroyo funciona como un río "ganador", recibiendo agua del acuífero, lo cual implica que la contaminación superficial no afecta directamente al acuífero en esta zona.

Esta interpretación fue confirmada mediante observaciones de campo, como la presencia de suelos arcillosos con materia orgánica, vegetación asociada a humedales, y manantiales (ver Figura 9). Además, los modelos piezométricos (Figuras 5 y 6) muestran que el nivel freático intercepta el relieve en las cotas más bajas, explicando así la presencia de manantiales en la zona.

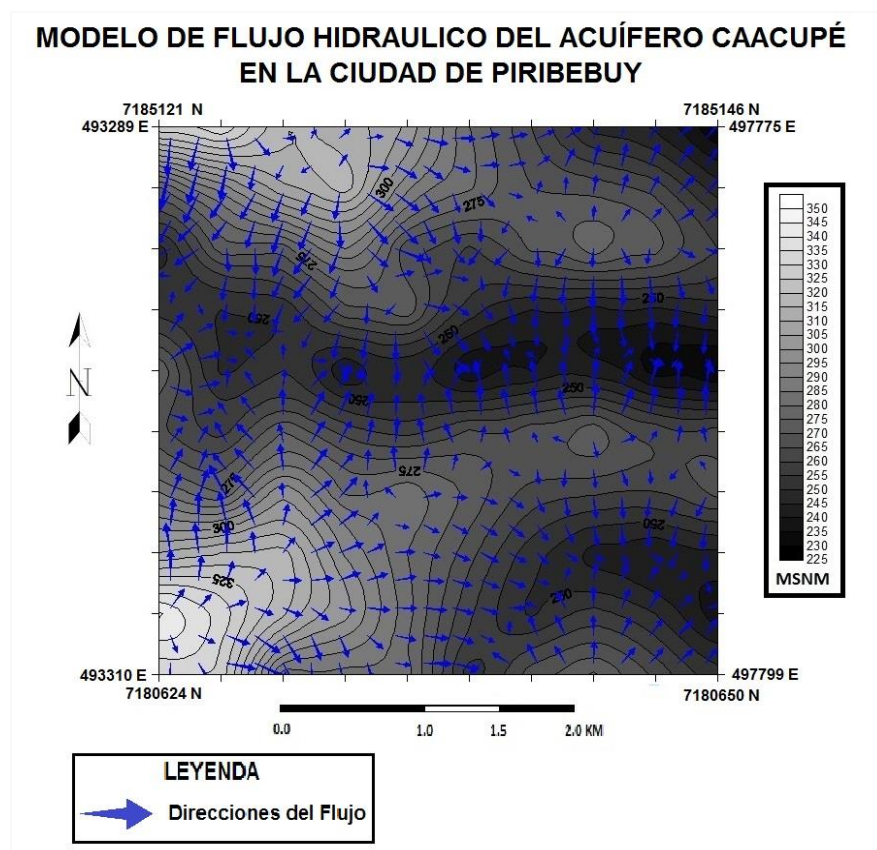


Figura 7: Modelo de flujo del Acuífero Caacupé en la ciudad de Piribebuy. Cotas medidas con respecto al nivel del mar.

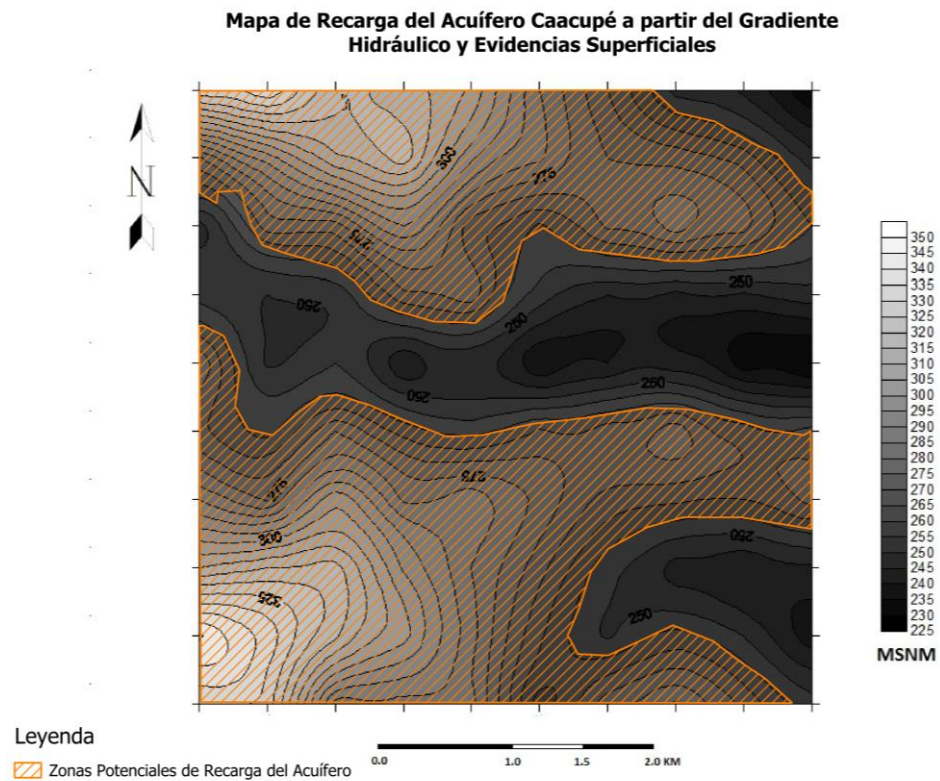


Figura 8: Mapa de recarga del Acuífero Caacupé a partir del Gradiente Hidráulico y Evidencias Superficiales del acuífero Caacupé en la ciudad de Piribebuy. Cotas medidas con respecto al nivel del mar.

Las cotas más elevadas, entre 260 y 350 msnm, se identificaron como zonas de recarga, verificadas mediante observación directa por la presencia de suelos arenoso, con poca o nula presencia de MO e inclusive afloramientos rocosos en las zonas de mayor elevación (Peñuela y Carrillo, 2013). Estas áreas, por su función de recarga, deben ser consideradas zonas prioritarias de protección frente a potenciales fuentes de contaminación (Peñuela y Carrillo, 2012).

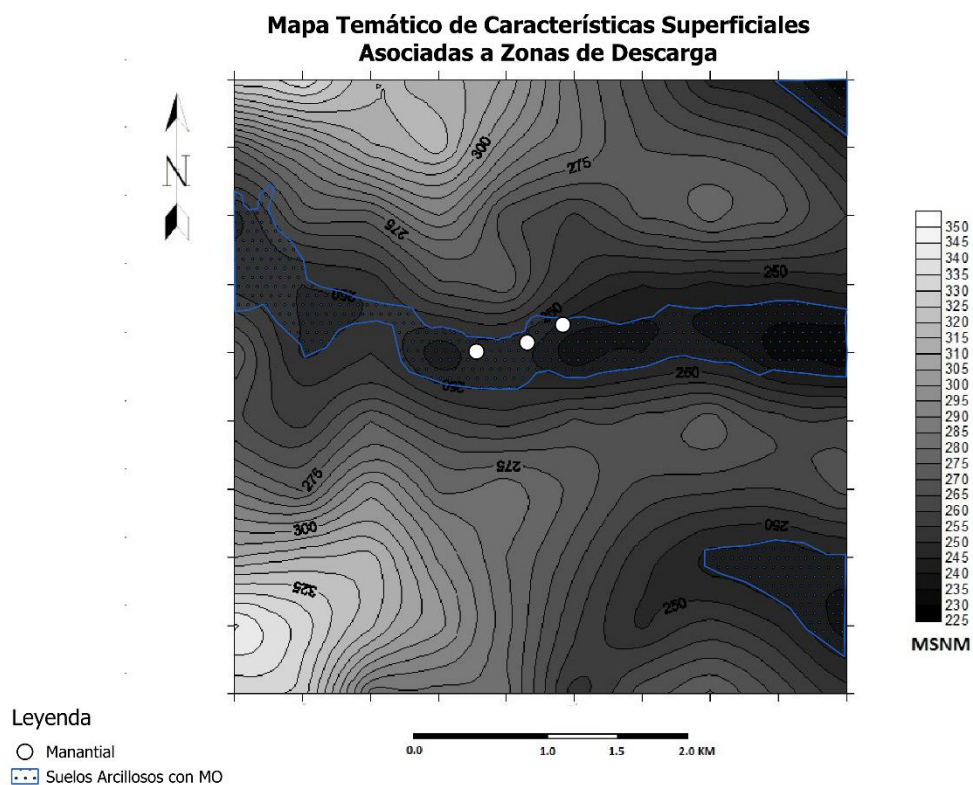


Figura 9: Mapa topográfico con curvas de nivel referidas al nivel del mar (msnm). Se superponen características superficiales asociadas a zonas de descarga: manantiales y suelos arcillosos con materia orgánica, verificados in situ.

Resultados de Análisis Laboratoriales

N° de Muestra	Coordenadas	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia – NP 2400180/11 Valor Máximo
M1	• 495.283 E • 7.183.816 N • Cota: 118 msnm	SM 9222 D	0	UFC/100 mL	0
M2	• 496.156 E • 7.183.688 N • Cota: 238 msnm	SM 9222 D	0	UFC/100 mL	0
M3	• 495.487 E • 7.184.579 N • Cota: 274 msnm	SM 9222 D	0	UFC/100 mL	0

M4	• 494.787 E • 7.183.683 N • Cota: 279 msnm	SM 9222 D	0	UFC/100 mL	0
M5	• 496.310 E • 7.182.641 N • Cota: 265 msnm	SM 9222 D	0	UFC/100 mL	0

Tabla 2: Resultados de los análisis laboratoriales de coliformes fecales en muestras de agua recolectadas el 13 de octubre de 2017, durante la estación de primavera, provenientes de pozos de abastecimiento de la Junta de Saneamiento de la ciudad de Piribebuy.

Los análisis laboratoriales de muestras provenientes de pozos administrados por la Junta de Saneamiento de Piribebuy no evidenciaron presencia de coliformes fecales, lo que indica ausencia de contaminación microbiológica en el momento del muestreo. Sin embargo, esta conclusión debe tomarse con precaución, dado que no se analizaron otros posibles contaminantes como agroquímicos ni se consideraron variables estacionales (épocas de lluvia o sequía). Además, no fue posible incluir muestras de pozos de uso privado debido a restricciones de acceso y permisos.

3. Conclusiones

La ciudad de Piribebuy presenta un relieve influenciado por el arroyo homónimo, con cotas más elevadas correspondientes a la Cordillera de los Altos y niveles más bajos en las zonas atravesadas por cursos hídricos. A través de este estudio fue posible identificar las zonas de recarga y descarga del Acuífero Caacupé. Las zonas de descarga se localizan en los sectores más bajos del terreno, coincidiendo con cauces de agua superficial, mientras que las de recarga se sitúan en las cotas más altas, lo que las convierte en áreas particularmente vulnerables a la contaminación (Peñuela & Carrillo, 2012).

El comportamiento del acuífero Caacupé en esta región se corresponde con el de un acuífero libre, al no contar con una capa impermeable que lo confine, de acuerdo con la descripción litológica de la zona (Harrington, 1972). Las propiedades hidráulicas observadas —como el mayor nivel freático en zonas bajas y su profundidad en sectores elevados— indican un flujo subterráneo típico de este tipo de sistemas, desde las áreas altas hacia las más bajas (Custodio & Llamas, 1983).

Este patrón de comportamiento también implica que cualquier contaminante presente en las zonas de recarga podría desplazarse a lo largo del gradiente hidráulico, comprometiendo la calidad del agua en los pozos ubicados aguas abajo. Aunque los análisis laboratoriales realizados no evidenciaron contaminación microbiológica por efluentes domésticos en los pozos evaluados, se recomienda profundizar los estudios incorporando parámetros fisicoquímicos y la detección de agroquímicos, así como ampliar el monitoreo a diferentes estaciones del año, a fin de lograr una evaluación integral de la vulnerabilidad del acuífero.

Relevancia del trabajo

Este estudio aporta conocimientos relevantes sobre la dinámica hidrogeológica de Piribebuy, especialmente en relación al Acuífero Caacupé y su interacción con el

relieve local. La identificación de zonas de recarga y descarga proporciona una base técnica para futuras estrategias de protección del recurso hídrico y planificación territorial, lo cual es fundamental en contextos de expansión urbana y uso intensivo del suelo.

Los resultados obtenidos pueden orientar políticas públicas orientadas a prevenir la contaminación del acuífero y garantizar el acceso sostenible al agua potable para la población. Asimismo, la delimitación de áreas vulnerables permite priorizar zonas críticas para su conservación y fortalecer marcos normativos de protección ambiental.

Este trabajo también adquiere relevancia en el contexto del cambio climático, donde las variaciones en el régimen de precipitaciones y el aumento de la presión sobre los recursos naturales hacen urgente una gestión más eficiente del agua subterránea. Además, el enfoque metodológico empleado —que combina análisis hidrogeológicos, topográficos y observaciones de campo— puede ser replicado en otros municipios con condiciones geográficas similares, ampliando su impacto territorial.

Al tratarse de un proyecto de grado financiado con recursos propios, este trabajo presenta limitaciones en cuanto a cobertura espacial y profundidad analítica. Sin embargo, representa un primer aporte técnico local sobre el Acuífero Caacupé en Piribebuy y sienta las bases para investigaciones más avanzadas. Asimismo, puede servir como insumo para actividades de educación ambiental, fortalecimiento de capacidades locales y elaboración de planes de desarrollo sostenible que integren el componente hidrogeológico en la toma de decisiones.

Referencias

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea* (Vol. 1). Editorial

Omega.

DeGraff, J. M. (1982). *Geologic structures associated with the Ypacaraí Valley,*

Paraguay, based on gravity and geologic data [Informe científico].

Universidad Nacional de Asunción, Instituto de Ciencias Básicas.

Dionisi, A. (1999). *Mapa geológico de la República del Paraguay: Hoja Caacupé*

5470. Texto explicativo. Dirección de Recursos Minerales (MOPC), Instituto

Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR).

- Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos. (2022). *Censo nacional de población y viviendas 2022*. <https://www.ine.gov.py/>
- Eckel, B. E. (1959). *Geology and mineral resources of Paraguay: A reconnaissance* (U.S. Geological Survey Professional Paper No. 327).
- Golden Software. (2012). *Surfer* (versión 12) [Software].
<https://www.goldensoftware.com/products/surfer>
- Google. (2017). *Ubicación geográfica de la ciudad de Piribebuy* [Imagen satelital].
Google Earth. <https://earth.google.com>
- Harrington, H. (1950). *Geología del Paraguay Oriental*. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Harrington, H. (1956). Paraguay. En *Handbook of South American geology*. Geological Society of America.
- Harrington, H. (1972). Silurian of Paraguay. En *Correlation of South American Silurian rocks* (Special Paper No. 133). Geological Society of America.
- Johnson Filtration Systems Inc. (1975). *El agua subterránea y los pozos: Libro de referencia dedicado a la industria de los pozos de agua* (1ª ed., 511 págs.). Johnson Division, UOP Incorporated.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC), Dirección de Recursos Minerales. (1966). *Cuadrilla 40 Itá: Plan de prospección geológica y mineral* (Informe técnico, 65 págs.).

- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC), Dirección de Recursos Minerales. (1966). *Cuadrilla 41 Coronel Oviedo: Plan de prospección geológica y mineral* (Informe técnico, 58 págs.).
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Atlas de cuencas hidrográficas del Paraguay*.
- Orue, D. (1996). *Síntese da geologia do Paraguai Oriental com ênfase para o magmatismo alcalino associado* [Tesis de maestría, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências].
- Paraguay. (2000). *Ley N.º 1614/2000: Ley general del marco regulatorio y tarifario del servicio de agua potable y alcantarillado sanitario*. Gaceta Oficial.
- Peñuela Arévalo, L. A., & Carrillo Rivera, J. J. (2012). Discharge areas as a useful tool for understanding recharge areas: Study case, Mexico catchment. *Environmental Earth Sciences*.
- Peñuela Arévalo, L. A., & Carrillo Rivera, J. J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (81), 18–32.
- Proyecto PAR 83/005. (1986). *Mapa geológico del Paraguay*. Comisión Nacional de Desarrollo Regional – Ministerio de Defensa Nacional.
- Proyecto PAR 83/005. (1986). *Mapa hidrogeológico del Paraguay, escala 1:1.000.000*. Comisión Nacional de Desarrollo Regional – Ministerio de Defensa Nacional.

Proyecto SAG-PY. (2007). *Mapa hidrogeológico Región Oriental Paraguay*. BGR & SEAM.

Putzer, H. (1962). *Die Geologie von Paraguay*. Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde.

QGIS Development Team. (2017). *QGIS Geographic Information System* (versión 3.0) [Software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://www.qgis.org>

The Anschutz Corporation. (1979). *Annual summary of exploration operations in Paraguay*.

Wolfart, R. (1961). Stratigraphie und Fauna des älteren Paläozoikums in Paraguay. *Geologisches Jahrbuch*, 78, 29–102.

Anexos

ABREVIATURAS UTILIZADAS

Abreviatura	Significado
E	Este
Fe	Hierro
Fm.	Formación geológica
km	Kilómetro
km ²	Kilómetros cuadrados
m	Metro
ml	Mililitro
MO	Materia orgánica
Mn	Manganeso
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
N	Norte
pH	Potencial de Hidrógeno
SIG	Sistema de Información Geográfica
UFC	Unidad formadora de colonias
UNT	Unidades nefelométricas de turbiedad
W	Oeste

Contribución de los autores

Justo Daniel Vargas participó en la concepción y diseño del estudio, la recolección de datos, el análisis e interpretación de resultados y la redacción del manuscrito. Narciso Cubas Villalba contribuyó con la revisión crítica del contenido, la validación metodológica y la edición final del artículo.

Agradecimientos

El presente manuscrito no ha sido revisado previamente por ninguna otra revista o publicación científica.

Agradezco a los funcionarios del Laboratorio de Paleontología de la FACEN por su acompañamiento y apoyo durante el desarrollo del trabajo de campo y análisis. Expreso también mi sincero agradecimiento a la profesora Ana María Castillo por su orientación académica, sus valiosos comentarios y su constante acompañamiento a lo largo de esta investigación.

Financiamiento

Autofinanciado.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Correspondencia

[danipiripy@gmail.com].

Trayectoria académica de los autores

Justo Daniel Vargas González es Lic. En ciencias mención Geología por la **Universidad Nacional de Asunción**. Actualmente se desempeña como consultor independiente. Sus principales líneas de investigación incluyen la geología, la paleontología, hidrología y la hidrogeología.

Narciso Cubas Villalba es Licenciado en Ciencias con mención en Geología (1991), Magíster en Hidrogeología (2008) y Especialista en Hidrogeología (2008), todos los títulos otorgados por la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción. Actualmente se desempeña como docente-investigador con dedicación completa en la carrera de Geología de la FACEN-UNA, donde es Profesor Titular de las asignaturas Geotectónica y Geología del Paraguay II. Ha desarrollado una amplia trayectoria docente en el área de Mineralogía y Petrología, impartiendo asignaturas como Petrología Ígnea y Petrología Metamórfica desde el año 2007. Sus áreas de investigación incluyen la geología, hidrogeología, petrología, mineralogía, geoquímica y geocronología. Entre sus publicaciones más relevantes se destacan:

– *Petrology and geochronology (U-Pb) of the Caapucú suite, Southern Paraguay: Post-tectonic magmatism of the Paraguari belt* (Journal of South American Earth Sciences, 2018);

– *Geología de los complejos alcalino-carbonatíticos, noreste de Paraguay Oriental* (Reportes Científicos de la FACEN, 2021);

– *Reconocimiento preliminar de diamictitas aflorantes en la localidad de Takurutu, Villeta* (Reportes Científicos de la FACEN, 2022).