

Desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual, utilizando hidrología isotópica y variables hidroquímicas para la cuenca del río La Villa, Panamá

Muñoz, Yaxuri

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá

ORCID: 0009-0004-7866-7945

Salceda, Miguel

Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) – Universidad Tecnológica de Panamá;
Investigador Asociado CEMCIT-AIP.

Panamá, Panamá

Miguel.salceda@utp.ac.pa

Fábrega, José

Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) – Universidad Tecnológica de Panamá;
Miembro del sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá; Investigador Asociado CEMCIT-AIP.

Panamá, Panamá

Jose.fabrega@utp.ac.pa

Abstract

The La Villa River basin, located in Panama's Dry Arc region, is one of the most important and vulnerable areas in terms of water resources due to its seasonal aridity, high dependence on groundwater, and increasing pressure from human activities. However, its hydrogeological dynamics are not yet fully understood because of the lack of continuous monitoring and the limited application of integrated approaches that combine hydrogeological, isotopic, and chemical aspects.

This research aims to develop a conceptual hydrogeological model of the basin by integrating the analysis of stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) with physicochemical and hydrogeochemical parameters to characterize the recharge, flow, and discharge processes of the aquifer system. The methodology includes hydrogeological characterization of the basin, groundwater sampling campaigns during the dry and wet seasons, and laboratory analyses to determine the chemical and isotopic composition of the samples.

The results will enable the construction of an integrated conceptual model representing the main hydrological processes and the interactions between groundwater and surface water. In addition, recharge and discharge zones will be visualized using geographic information system (GIS) tools, and the model is expected to be validated through numerical modelling

(MODFLOW). This work will contribute to strengthening the sustainable management of water resources in the region, in alignment with the National Water Security Plan and the Sustainable Development Goals.

Keywords: Conceptual model, Groundwater, isotopic hydrology, La Villa River basin, water quality.

Resumen

La cuenca del río La Villa, ubicada en el Arco Seco de Panamá, es una de las regiones más importantes y vulnerables en términos de recursos hídricos debido a su aridez estacional, alta dependencia de aguas subterráneas y creciente presión por actividades humanas. No obstante, su dinámica hidrogeológica aún no se comprende plenamente debido a la escasez de monitoreo continuo y de enfoques integrales que combinen aspectos hidrogeológicos, isotópicos y químicos.

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca, integrando el análisis de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) junto con parámetros fisicoquímicos e hidro-geoquímicos, para caracterizar los procesos de recarga, flujo y descarga del sistema acuífero. La metodología incluye la caracterización hidrogeológica de la cuenca, campañas de muestreo de aguas subterráneas en las temporadas seca y lluviosa, así como el análisis de laboratorio para determinar la composición química e isotópica de las muestras.

Los resultados permitirán construir un modelo conceptual integrado que representará los principales procesos hidrológicos y las interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales. Así mismo, se visualizarán las zonas de recarga y descarga mediante herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), y se prevé validar el modelo mediante modelación numérica (MODFLOW). Este trabajo contribuirá a fortalecer la gestión sostenible del recurso hídrico en la región, alineándose con el Plan Nacional de Seguridad Hídrica y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras claves: Aguas subterráneas, hidrología isotópica, calidad del agua, cuenca del río La Villa, modelo conceptual.

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas representan el 30 % del agua dulce disponible a nivel mundial [1], y son producto de la lluvia que se infiltra en el suelo, representando una garantía de abastecimiento de agua asequible y seguro para la población mundial actual y futura, puesto

que, es un recurso renovable que, gestionado adecuadamente, garantiza satisfacer a largo plazo demandas futuras y a mitigar los impactos del cambio climático [2]. No obstante, retos apremiantes por atender en el mundo especialmente en el área de Centroamérica [3] tales como el aumento de la demanda y contaminación de recurso hídrico debido al crecimiento poblacional y económico de los países, y la variabilidad climática hacen apremiante que se mejore la gestión del recurso hídrico en general y de las aguas subterráneas en particular. En Panamá, en las últimas décadas, los cambios en la variabilidad climática se han evidenciado con la creciente vulnerabilidad en los recursos hídricos, la agricultura y la energía. Uno de los cambios más notables ha sido en los patrones de precipitación, que modifican la disponibilidad del agua para diversos tipos de consumo [4].

Desde una perspectiva hidrológica, las principales variaciones en la precipitación en el país son las siguientes: disminución de la disponibilidad de agua en los acuíferos, incremento en la temperatura, especialmente en época seca, disminución del flujo de agua en ríos y arroyos, así como también un aumento en la frecuencia, intensidad y duración de los eventos de sequías en el área del Arco Seco, que comprende las provincias de Herrera, Los Santos, Coclé y la Sabana Veragüense [4]. El Arco Seco es una región que se caracteriza por el uso intensivo, pero no eficiente de las aguas subterráneas. En el período comprendido entre los años 2002 hasta el 2010, la extracción de aguas subterráneas se incrementó en un 75%, alcanzando volúmenes de extracción que oscilan por los 700,000 m³/día [5]; esto se debe principalmente a que esta zona tiene la precipitación anual más baja del país, con una precipitación máxima de 400 mm durante la temporada seca y 1600 mm en la temporada lluviosa [6]; lo que la convierte en una región con aridez estacional. En esta región se da una perforación de pozos por personas naturales. Por otro lado, los estudios hidrogeológicos basados únicamente en análisis hidráulicos no son suficientes para describir un sistema de aguas subterráneas y superficiales, ni para evaluar su sostenibilidad. Así, la integración de métodos hidro-geoquímicos e isotópicos podrían ayudar a cerrar esta brecha y proporcionar información para determinar las fuentes de recarga de agua y los tiempos de residencia para su explotación sostenible [7].

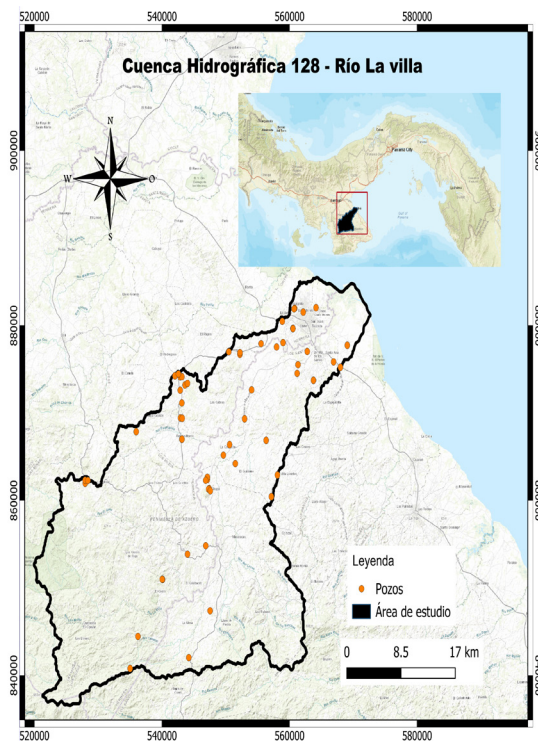
Las metodologías para calcular la recarga de aguas subterráneas suelen dividirse en enfoques de modelado físico, numérico y trazadores [8]. Los isótopos estables de hidrógeno y oxígeno son isótopos que se encuentran de manera generalizada en las aguas naturales; constituyen una técnica innovadora de trazadores utilizada en hidrología para analizar la composición y el movimiento del agua a lo largo del ciclo del agua [9]. La composición isotópica estable en el agua está influenciada por factores meteorológicos (como la temperatura, la humedad, etc.), geográficos (latitud, longitud y altitud), y en menor medida, por reacciones con materiales geológicos, lo que los hace apropiados para investigar el origen del agua subterránea [10]. El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un modelo conceptual de las aguas subterráneas en la cuenca del río La Villa, utilizando análisis isotópico y

parámetros de calidad del agua, para determinar los procesos de recarga, flujo y descarga.

2. METODOLOGÍA

A. Ubicación área de estudio

La cuenca hidrográfica río La Villa, 128, tiene una superficie de 1,296.64 km², su afluente principal es el río La Villa, con una longitud de 117 km, y un caudal medio de 24.34 m³/s [11]. Se localiza en la parte central de la península de Azuero, ubicada entre las cordilleras de El Montuoso y el Canajagua principalmente, sus márgenes, cauce y potencial hidráulico se encuentran compartidos por las provincias de Herrera y Los Santos. Los nacimientos principales de este río se ubican en la cordillera de El Montuoso, aunque afluentes secundarios con singular importancia y potencial se registran hacia territorios de la provincia de Los Santos como el caso del río Estibaná [12].



B. Equipo utilizado

Durante las giras de campo se emplearon equipos especializados para la caracterización in situ. Se utilizó un medidor de temperatura y conductividad eléctrica (Figura 1) para obtener perfiles en pozos, un transductor de presión (Figura 2) (Solinst Levelogger 5) para el registro

continuo de niveles freáticos y temperatura, y un multiparámetro portátil (Figura 3) (Hanna HI98194) para medir parámetros básicos como pH, oxígeno disuelto, conductividad y sólidos disueltos. Estos instrumentos permitirán complementar los análisis isotópicos e hidroquímicos de laboratorio, asegurando una descripción más integral de los procesos de recarga, flujo y descarga en la cuenca.



Figura 1. Medidor de temperatura y conductividad eléctrica



Figura 2. Transductor de presión



Figura 3. Multiparámetro portátil

3. RESULTADOS ESPERADOS

Entre los principales resultados que se esperan obtener de esta investigación podemos listar los siguientes:

- Un mapa detallado de las zonas de recarga y descarga de la cuenca del río La Villa, que identifique espacialmente las áreas donde ocurre la infiltración de agua meteórica hacia el sistema acuífero, así como las zonas donde el agua subterránea emerge o contribuye al flujo superficial. Este resultado constituirá una herramienta fundamental para la gestión y protección de áreas estratégicas para la sostenibilidad del recurso hídrico.
- Diferenciación de recarga reciente vs. reservas profundas de acuerdo con los criterios establecidos por la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA). Esta distinción permitirá evaluar los tiempos de residencia del agua subterránea y su grado de renovación, aportando información clave para la explotación racional de los acuíferos.
- Identificación de patrones hidrogeoquímicos que evidencien la evolución química del agua subterránea a lo largo del sistema acuífero, permitiendo reconocer procesos como mezcla de aguas, disolución mineral, intercambio iónico y posibles influencias antrópicas. Estos patrones contribuirán a una mejor comprensión de la dinámica hidrogeológica de la cuenca.
- Desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual, el cual representará de manera esquemática y funcional los principales procesos de recarga, flujo y descarga, así como las interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales. Este modelo constituirá

una base técnica para fortalecer la planificación, la gestión sostenible del recurso hídrico y la toma de decisiones a nivel regional.

4. PROYECCIONES FUTURAS

Como fase posterior al desarrollo del modelo conceptual, se contempla la validación y análisis numérico del sistema acuífero mediante el uso de modelos como MODFLOW, integrando información hidrodinámica y geoquímica, así como la aplicación de SWAT+ para el análisis hidrológico superficial y la estimación de recarga a escala de cuenca. Esta integración permitirá evaluar distintos escenarios de uso y gestión del agua bajo condiciones climáticas actuales y futuras.

Recopilar y comparar metodologías aplicadas en otras cuencas con aridez estacional en Panamá, con el fin de establecer similitudes, diferencias y lecciones aprendidas que puedan fortalecer el enfoque metodológico y facilitar su replicabilidad en regiones con características hidroclimáticas similares.

Los resultados obtenidos serán difundidos a través de artículos científicos, presentaciones en congresos nacionales e internacionales y talleres dirigidos a comunidades locales y actores clave, promoviendo la transferencia de conocimiento y el fortalecimiento de capacidades para la gestión integrada de los recursos hídricos.

5. CONCLUSIONES PRELIMINARES

La integración de la hidrología isotópica e hidrogeoquímica constituye una herramienta robusta que permite una caracterización más precisa y confiable de los sistemas acuíferos, superando las limitaciones de los enfoques tradicionales basados únicamente en análisis hidráulicos.

Esta investigación representará un aporte significativo para la seguridad hídrica del Arco Seco de Panamá, una región altamente vulnerable a la variabilidad climática y donde la presión sobre los recursos de aguas subterráneas continúa en aumento debido a la demanda agrícola, doméstica y productiva.

El estudio se encuentra alineado al Plan Nacional de Seguridad Hídrica y contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en particular el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 13 (Acción por el clima), fortaleciendo la base científica necesaria para una gestión sostenible y resiliente del recurso hídrico.

Referencias

- [1] comité de alto nivel de seguridad hídrica. (2016). Plan nacional de seguridad hídrica: agua para todos. Panamá: isbn: 978-9962-5581-0-1.
- [2] autoridad nacional del ambiente. (2013). Las aguas subterráneas de la región del arco seco y la

- importancia de su conservación. Panamá: anam.
- [3] global water partnership. (2022). Plan de acción para la gestión integrada de los recursos hídricos (pagirh) de panamá (2022 – 2026). Panamá: miambiente.
- [4] ministerio de ambiente. (2022). Plan de acción para la gestión integrada de los recursos hídricos (pagirh) de panamá (2022 – 2026). Panamá: gwp.
- [5] castellón, m. (2016). Hydrogeological conceptual model of la villa river watershed, republic of panama. Honors scholar theses, 545.
- [6] castellón, m., Muñoz, m., guerra, g., leiva, j., foglia, l., & fábrica, j. (2021, junio 29). Las aguas subterráneas en el arco seco de panamá: un tesoro por explorar. *Apanac*, 113-119 <https://doi.org/10.33412/apanac.2021.3180>
- [7] ettayfi, n., bouchaou, l., michelot, j. L., tagma, t., warner, n., boutaleb, s., . . . Vengosh, a. (2012). Geochemical and isotopic (oxygen, hydrogen, carbon, strontium) constraints for the origin, salinity, and residence time of groundwater from a carbonate aquifer in the western anti-atlas mountains, morocco. *Journal of hydrology - elsevier*, 97-111 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.003>.
- [8] scanlon, B, healy, r., & cook, p. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology journal vol10*, 18-39.
- [9] liu, y., yamanaka, t., zhou, x., tian, f., & ma, w. (2014). Combined use of tracer approach and numerical simulation to estimate groundwater recharge in an alluvial aquifer system: a case study of nasunogahara area, central japan. *Journal of hydrology*, 833-847.
- [10] clark, i., & fritz, p. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. Crc press: taylor & francis group <https://doi.org/10.1201/9781482242911>.
- [11] cathalac. (2016). Ministerio de ambiente. Obtenido de ministerio de ambiente: <http://cuencas.cathalac.int/cuencas/cuencas-prioritarias/rio-la-villa>
- [12] tierragrande. (21 de abril de 2011). Tierragrande. Obtenido de tierragrande: <https://www.tierragrande.co/2011/04/la-cuenca-del-rio-la-villa/>

Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XX a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XX ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.