

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS MUNICIPIOS DE TIQUIPAYA Y COLCAPIRHUA DEL VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA-BOLIVIA

HYDROGEOLOGICAL MODELING OF THE MUNICIPALITIES OF TIQUIPAYA AND COLCAPIRHUA IN THE CENTRAL VALLEY OF COCHABAMBA-BOLIVIA

²Brayan López, ¹Laura Rosales, ^{1,2}Oliver Saavedra

¹Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)

²Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Universidad Privada Boliviana

blog7@gmail.com

(Recibido el 12 de abril 2024, aceptado para publicación el 13 de mayo 2024)

RESUMEN

En la región metropolitana de Cochabamba, el crecimiento urbano hacia áreas de recarga acuífera ha aumentado el estrés hídrico en las aguas subterráneas, que abastecen aproximadamente el 65% del consumo total de agua. Por ello, se llevó a cabo un estudio hidrogeológico en una zona de abanicos aluviales en el Valle Central de Cochabamba. Se estableció una red de monitoreo de niveles freáticos en pozos de suministro de agua potable y riego en los municipios de Tiquipaya y Colcapirhua, realizando 26 mediciones entre abril y septiembre de 2021. Se desarrolló un modelo hidrogeológico simplificado con Visual MODFLOW Flex, calibrado con alta correlación (0.94) y un RMS de 17 m. En la validación, la correlación fue de 0.63, con un RMS normalizado del 78%. Se identificó la dirección principal del flujo subterráneo del norte a sur. Durante el monitoreo, se observó un descenso significativo del nivel freático, especialmente en los pozos OG-5 y OG-7, mientras que en OG-28 y OG-10 se registró un aumento de 3 a 5 metros desde 2019, indicando recarga asociada a los abanicos aluviales, principalmente el río Chijlawiri. Se recomienda emplear el modelo en estudios posteriores, mejorar la gestión de acuíferos y realizar un monitoreo continuo con datos mensuales para una mejor planificación hídrica.

Palabras Clave: Aguas Subterráneas, Cochabamba, Valle Central, Modelo Hidrogeológico.

ABSTRACT

In the metropolitan region of Cochabamba, urban growth towards areas of aquifer recharge has increased water stress in groundwater, which supplies approximately 65% of total water consumption. Therefore, a hydrogeological study was carried out in an alluvial fan zone in the Central Valley of Cochabamba. A water table monitoring network was established in drinking water supply and irrigation wells in the municipalities of Tiquipaya and Colcapirhua, taking 26 measurements between April and September 2021. A simplified hydrogeological model was developed with Visual MODFLOW Flex, calibrated with a high correlation (0.94) and a 17 m RMS. In the validation, the correlation was 0.63, with a normalized RMS of 78%. The main direction of subsurface flow was identified from north to south. During monitoring, a significant decrease in the water table was observed, especially in wells OG-5 and OG-7, while in OG-28 and OG-10 an increase of 3 to 5 meters was recorded since 2019, indicating recharge associated with alluvial fans, mainly the Chijlawiri River. It is recommended to use the model in subsequent studies, improve aquifer management and carry out continuous monitoring with monthly data for better water planning.

Keywords: Groundwater, Cochabamba, Central Valley, Hydrogeological Model.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado en la población refleja una mayor tensión en los recursos hídricos, especialmente en zonas semiáridas [1], produciendo una extracción insostenible de agua dulce para consumo humano de ríos, acuíferos y embalses [2], lo cual altera el ciclo hidrológico del agua, incrementa la contaminación de las fuentes de agua y reduce las zonas de infiltración natural, tal como ocurre en el Valle Central de Cochabamba [3], donde se estima que para 2036, la mancha urbana llegará a cubrir un 65% de la zona acuífera [4].

Por otra parte, la cantidad de agua dulce disponible en el mundo equivale solamente a un 2.5% del total [5] y las aguas subterráneas representan el 99% del agua dulce en estado líquido en la tierra [2]; por ende, este recurso es un proceso clave para el sustento del bienestar humano, desarrollo socioeconómico y medioambiental [6], destacando sus distintos usos en abastecimiento de agua potable, agricultura, industria, minería, recreación, entre otros [1]. Por ejemplo, en el Valle Central de Cochabamba, las aguas subterráneas representan la principal fuente de abastecimiento con un 65% aproximadamente y el resto de aguas superficiales [7].

Las aguas subterráneas se constituyen en fuentes de agua necesarias para lograr las metas del Objetivo 6 de la Agenda del Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, es decir, agua limpia y saneamiento para todos [6], por lo que es imprescindible comprender las características locales de los recursos de aguas subterráneas, en vista de su heterogeneidad, recopilar datos de los acuíferos y pozos, intensificar la investigación para desarrollar capacidades de análisis hidrogeológico que proporcionen bases para estudios y mejorar la gestión de las aguas subterráneas [8], en zonas de gran estrés hídrico como lo son los municipios del Valle Central de Cochabamba.

En este estudio se explora proponer una red de monitoreo de niveles freáticos y la configuración de un modelo hidrogeológico en un sector productivo del Valle Central de Cochabamba utilizando Visual MODFLOW Flex. El objetivo principal es representar el sistema hidrogeológico de la zona de forma simplificada de manera que permita comprender el estado actual y el comportamiento de los acuíferos en la zona.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio Figura 1 comprende los municipios de Tiquipaya y Colcapirhua, la cual limita al norte por la cordillera Tunari, y al sur por las serranías de Santivañez y Anzaldo, al este por el municipio de Quillacollo y al oeste por el municipio de Cercado. Forma parte de la región del Valle Central de Cochabamba en la Cuenca del río Rocha.

La extensión del área de estudio es de aproximadamente 60 km², con una elevación entre 2840 a 2550 m.s.n.m. (determinado en base a DEM modificado [9]). Se observa que los ríos principales que atraviesan el área de estudio son: el río Taquiña, la torrentera Chutakawa, la torrentera Khora, el río Tolavi, el río Pihusi y el río Chijllawiri.

Tiquipaya

La zona de estudio abarca los distritos que se encuentran en el Valle, donde se presenta una urbanización desacelerada y sin planificación [10]. Se encuentra en un sector de llanuras aluviales con pendientes promedio del 8%, con abanicos y conos aluviales del cuaternario a nivel de piedemonte [11].

Colcapirhua

En cambio, en el municipio de Colcapirhua, el 68% de su extensión comprende áreas rurales, de cultivo intensivo, tanto en agropecuaria como en floricultura [12]. Se encuentra en una zona de valles mesotérmicos, en un flanco del macizo montañoso central, con un clima característico de valle (semiárido) y con paisajes de montañas estructurales, piedemonte y llanuras fluvio-lacustres. Los suelos están formados por sedimentos coluvio-aluviales del cuaternario en la llanura (con limos y arcillas de buenas características fisicoquímicas) y por limolitas y areniscas grises a verdosas del Ordovícico en la Cordillera del Tunari. Tienen buen potencial para las aguas subterráneas. [13].

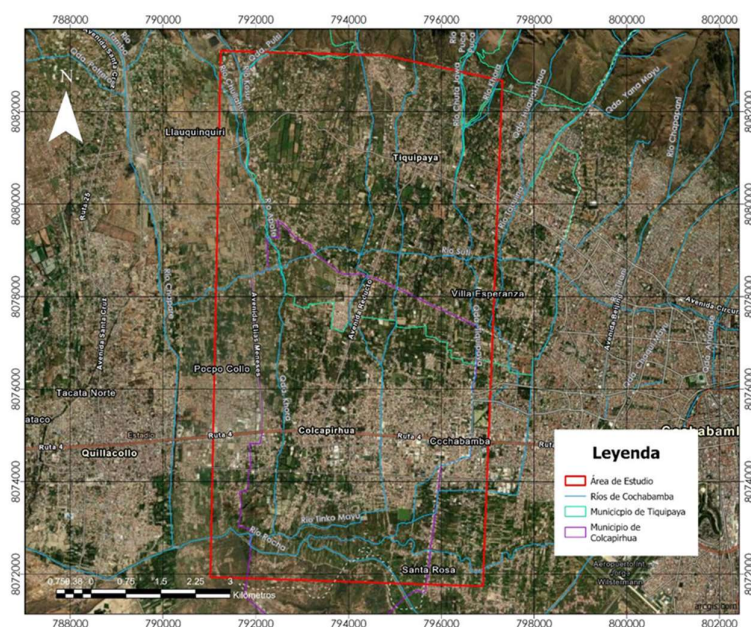


Figura 1: Mapa de Ubicación de la Zona de Estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3. METODOLOGÍA

La secuencia metodológica para cumplir con los objetivos del estudio se describe en la Figura 2. La información secundaria corresponde a una recopilación de información de fuentes y estudios previos como referencia, y la información primaria, corresponde al inventario y monitoreo de los niveles piezométricos que se utilizaron para la modelación.

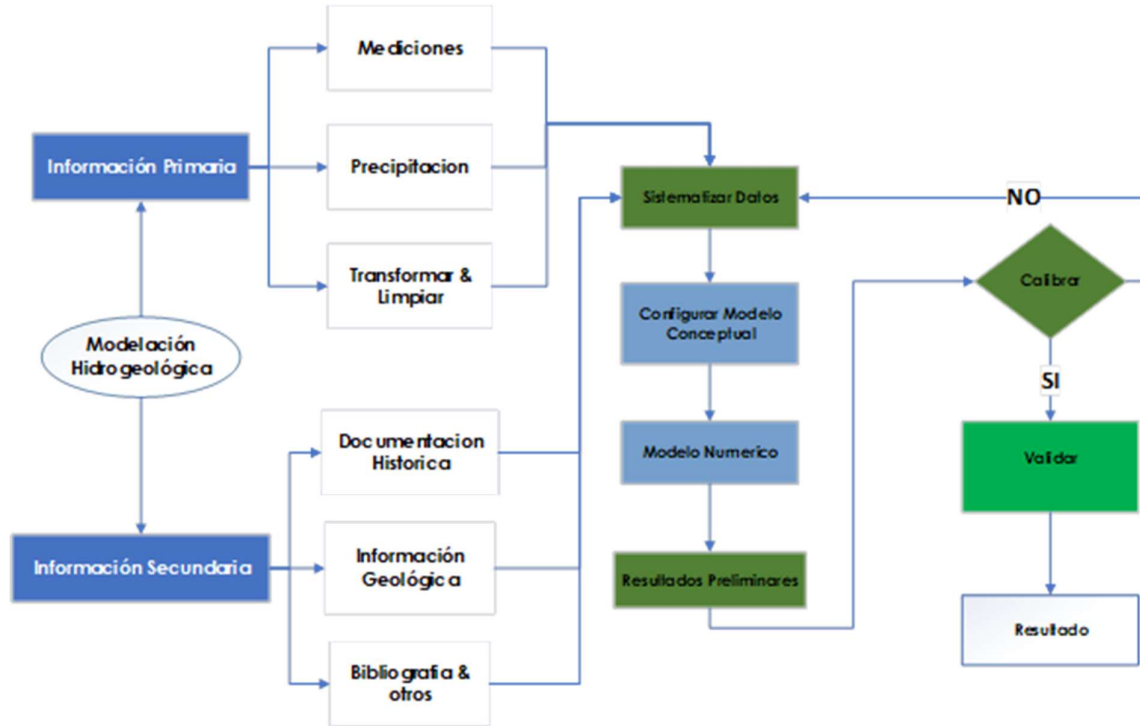


Figura 2: Flujograma de Procesos para la Configuración del Modelo Hidrogeológico.

Fuente: Elaboración propia.

En base a esta recopilación, se procedió a conceptualizar el sistema hidrogeológico de forma básica y simplificada, en vista de la gran extensión de la zona de estudio. El modelo conceptual y numérico fue configurado en “Visual MODFLOW Flex”.

Para el desarrollo de un modelo conceptual, se puede seguir la siguiente secuencia de recopilación de datos: 1. Datos Geológicos: Antecedentes Históricos, Exploración in situ, Estudio Cartográfico y Descripción Geológica; 2. Datos Climáticos: Precipitación, Infiltración Evapotranspiración, Recarga & Salida; 3. Datos Hidrogeológicos: Condiciones de Flujo, Capas Estratigráficas, Tipos de Acuíferos y Caudal.

3.1. Datos geomorfológicos

3.1.1. Datos Climatológicos

La zona de estudio se caracteriza por tener un clima templado y semiárido, sin cambios bruscos durante el año, siendo los veranos donde se produce la precipitación, los otoños son semisecos, e invierno y primavera secos. Debido a la diferencia de alturas existentes en el valle con respecto a la cordillera, en las partes bajas la temperatura aumenta y en altas disminuye, siendo opuesto para la precipitación [14].

Precipitación

Las precipitaciones ocurren normalmente entre los meses de noviembre hasta abril, siendo enero el mes de mayor intensidad, pero de corta duración. En cambio, los meses más secos son de mayo a julio. Las lluvias que se producen en el valle central no son uniformes, es decir, ocurren como chubascos locales y además varía con la altura (a mayor altura, mayor precipitación) [14].

Se observó en una interpolación realizada de la precipitación media anual distribuida en la zona, entre los años 2015 – 2020 y utilizando datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), donde un rango aproximado es de 600 a 400 mm.

Temperatura

La temperatura media anual en el Valle Central de Cochabamba es aproximadamente 17.5 °C, al igual que la precipitación, esta varía con la altura (a mayor altura menor temperatura). Las temperaturas más extremas se observan en los meses de octubre a febrero (en verano) y las temperaturas mínimas, en invierno, entre los meses de mayo a julio [14]. Este comportamiento característico se refleja en la zona de estudio, donde la temperatura media es 27.3°C, la mínima es 6°C en invierno y la máxima es 30.9°C.

Evapotranspiración

Se estima que en el Valle Central de Cochabamba, la evapotranspiración potencial (ETP) es de aproximadamente 1400 mm/año, y la evapotranspiración real (ETR) es de 490 mm/año [14].

3.1.2. Geología e Hidrogeología de la Zona

Geología

La zona de estudio se encuentra a los pies de la cordillera Tunari, en la llanura aluvial del valle, por tanto, está representada en su totalidad por sedimentos del cuaternario con materiales lacustres y fluvio-lacustres [14]. En la parte inferior de la cordillera se encuentran los depósitos de piedemonte, conformados por materiales heterogéneos tales como clastos, rocas, gravas, arenas, formando un área de depósito de abanicos aluviales. En la región media se presentan los depósitos de terraza y más al sur los depósitos fluvio-lacustres. En los ríos se destacan los depósitos aluviales que permiten gran infiltración de caudal a los acuíferos, especialmente en el río Chijllawiri [15] (río al oeste de la zona). Los sedimentos en general se vuelven más finos hacia el sur, tales como limos y arcillas, formando acuíferos confinados hacia el río Rocha en una región fluvio-lacustre.

Fisiografía y Geomorfología

Se observa que en la zona se caracteriza por estar presente en valles mesotérmicos, en un flanco macizo montañoso central, donde se observan paisajes de montañas estructurales, piedemonte y llanuras fluvio-lacustres, con ligeras depresiones y serranías ubicadas al sur del municipio de Colcapirhua [13].

Con respecto a la geomorfología, la zona está limitada al norte y al sur por la zona montañosa sujeta a procesos de erosión, glaciación y cambios de temperatura y gran precipitación. A los pies de la cordillera se encuentra una zona de talud y piedemonte, donde los abanicos aluviales se interconectan y forman la llanura aluvial. Los abanicos más antiguos se encuentran al norte y los más recientes, hacia el río Rocha. En la parte central de la cuenca de Cochabamba, se encuentra la zona de la llanura con los depósitos fluvio-lacustres y predominantes los materiales finos [14].

Hidrogeología

La hidrogeología de la zona de estudio se caracteriza por ser del grupo de “Rocas porosas no consolidadas”, con presencia de abanicos aluviales a los pies de la cordillera del Tunari con sedimentos gruesos heterogéneos [14], estos pertenecen a los “Abanicos Aluviales y Terrazas en ríos de pendientes bajas” al norte (Tiquipaya), con bloques, cantos, gravas, arenas y limos; y al sur (Colcapirhua) con “Acuíferos Locales o discontinuos de Producción moderada”, destacándose materiales fluvio-lacustres con gravas, arenas, limos y arcillas.

La principal recarga de agua subterránea a la zona proviene de los ríos. Estos se caracterizan por ser dendríticos con tendencia a centripetas a la cuenca del río Rocha, con cauces de ríos irregulares que generan grandes volúmenes de sedimentos en época de lluvias [14]. La mayoría de los ríos son intermitentes de caudales bajos, sin embargo, se ha observado que en el río Chijllawiri, presenta constantemente caudales producto de excedentes de la Central Hidroeléctrica de Misicuni [15], favoreciendo con un gran aporte a los acuíferos de la zona.

3.1.3. Campañas de Medición de Nivel Freático

Se realizaron campañas de mediciones en la extensión del área de estudio, en un periodo de 6 meses durante el año 2021, entre los meses de abril hasta septiembre. Estas mediciones cuentan con el nombre de código “OG” numerado del 1 al 26, las cuales corresponden a 26 mediciones realizadas en orden de fecha. Aunque algunos pozos fueron medidos más de una vez.

Se observa la ubicación de los pozos medidos durante las campañas de monitoreo, utilizando el código OG. Dado que el modelo hidrogeológico es en régimen estacionario, los niveles medidos fueron los estáticos.

3.2. Configuración del Modelo Hidrogeológico

Para el desarrollo del Modelo Conceptual, se ha optado por utilizar Visual MODFLOW Flex por su interfaz de usuario. El modelo numérico está definido por los datos que se importan (superficies, polilíneas, polígonos, otros), las condiciones de borde y la grilla definida [16].

3.2.1. Campañas de Medición de Nivel Freático

Los datos utilizados para importar al modelo son:

- Área de Estudio, esta debe ser un polígono en formato shapefile, exportado por herramientas GIS, en este caso se usó ArcGIS Pro, tomando como base el límite político de los municipios.
- Base DEM de la Zona de Estudio, una vez hecho los debidos preparativos con el archivo DEM. Se procedió a prepararlo en un sistema de puntos por medio de ArcGIS, para luego importarlos en Surfer y crear un mapa raster
- Capas Estratigráficas (Tabla 1), estas se configuraron en base a estudios previos [15] y al esquema geológico de la cuenca de Cochabamba propuesto por el PIRH, el cual proporciona una idea general de los estratos [14]. Se utilizó la herramienta Surfer para interpolar estas superficies, obteniéndose cuatro capas.
- Para definir las conductividades hidráulicas se ha determinado rangos de los estratos, a partir del propuesto por Todd [17]:

TABLA 1 – VALORES DE LA CONDUCTIVIDAD SEGÚN SU TENDENCIA

Estratos	Rango de Conductividad (m/s)
Arenas, Gravas o Bloques	10^{-1} al 10^{-4}
Limos y Arcillas	10^{-1} al 10^{-7}
Arenas, Gravas o Bloques	10^{-2} al 10^{-6}
Limos y Arcillas	10^{-5} al 10^{-8}

Fuente: Elaboración propia.

- Ríos: obtenidos por medio del DEM corregido. Según el cauce natural, sus dimensiones son variables en toda la extensión de la zona, sin embargo, se tomaron dimensiones y altura de agua uniformes.
- Pozos: se procedió a obtener los niveles piezométricos en m.s.n.m. utilizando la Coordenada Z desplegada del DEM.
- Condiciones de borde: para este modelo se tomó en cuenta la evapotranspiración real, recarga y nivel de agua de los ríos (ver Tabla 2).

TABLA 2 – CONFIGURACIÓN DE LAS CONDICIONES DE BORDE

Evapotranspiración	Tasa mm/año: 520	Extinction Depth (m): 5.8
Recarga	Tasa mm/año: 173.5	Ponding Depth (m): 0.4
Ríos	Espesor del lecho (m): 1.5	Ancho del río (m): 2.5
		Conductividad del lecho m/s: 0.01

Fuente: Elaboración propia.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de calibración, validación, dirección de flujo y fluctuación de niveles en toda la zona de estudio. Para el proceso de calibración utilizó el periodo de toma de muestras de los pozos entre los meses de agosto a septiembre y para la validación, los pozos del periodo de junio a julio. Con los niveles piezométricos se ha determinado la dirección de flujo subterráneo y la fluctuación de niveles en distintos periodos y años.

4.1. Calibración

El método utilizado para la calibración fue el “Ensayo de Prueba y Error”, este proceso se traduce como: el ajuste sistemático de los parámetros más sensibles del modelo con el fin de identificarlos e influir en ellos. A fin de estabilizar el modelo, se identificó que los dos parámetros más influyentes en el modelo son los niveles piezométricos que determinan la superficie freática, y la conductividad hidráulica de los estratos. En cambio, los otros parámetros tienen poca influencia. En base al modelo estabilizado y al rango de conductividades hidráulicas, se utilizaron las siguientes conductividades hidráulicas (Tabla 3) para la Calibración Final.

En la Tabla 4 se puede observar los errores obtenidos en la calibración, destacando un coeficiente de correlación de 0.94 y un RMS de 17.75 m. y un RMS normalizado de 16.69%.

Obteniendo la siguiente comparación entre niveles piezométricos calculados vs observados: Estos se representan mejor en una comparación gráfica de los resultados, como se observa en la Figura 3:

TABLA 3 – CONFIGURACIÓN FINAL DE CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS

Zona de Estudio	Estrato	Conductividad (m/s)		
		Kx	Ky	Kz
Zona 1	Arenas, Gravas, Bloques	0.005	0.005	0.0005
Zona 2	Limos, Arcillas	0.0001	0.0001	1E-05
Zona 3	Arenas, Gravas, Bloques	0.0005	0.0005	5E-05
Zona 4	Limos, Arcillas	3.3E-09	3.3E-09	3.3E-10

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 4 – ERRORES RESIDUALES DE LOS RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN FINAL DEL MODELO

Min. Residual (m)	2.7	Standard Error of the Estimate (m)	2.67
Max. Residual (m)	34.67	Root Mean Squared (m)	17.75
Residual Mean (m)	14.43	Normalized RMS (%)	16.69
Abs. Residual Mean (m)	14.98	Correlation Coefficient	0.94

Fuente: Elaboración propia.

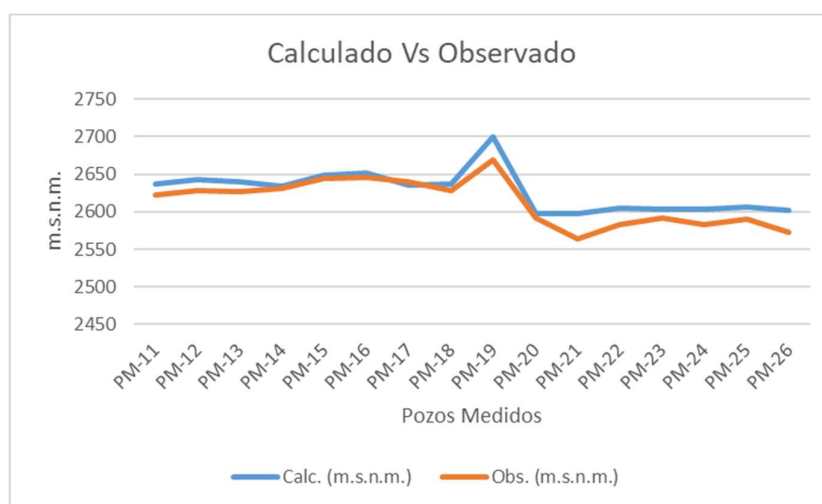


Figura 3: Comparación de los niveles piezométricos calculados vs observados para la calibración final del modelo utilizando los pozos medidos de agosto a septiembre.

Fuente: Elaboración Propia.

4.2. Validación

Del mismo modo que en calibración, se procedió con la validación por medio de otra distribución de mediciones con alta densidad, las cuales corresponden temporalmente a los meses, junio y julio. Estos serían los pozos PM-5, PM-6, PM-7, PM-8, PM-9 y PM-10, obteniéndose los resultados de la Tabla 5.

TABLA 5 – TABLA DE RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN FINAL DEL MODELO

Min. Residual (m)	11.88	Standard Error of the Estimate (m)	3.08
Max. Residual (m)	31.4	Root Mean Squared (m)	19.6
Residual Mean (m)	18.35	Normalized RMS (%)	78.38
Abs. Residual Mean (m)	18.35	Correlation Coefficient	0.63

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la correlación se reduce a un 0.63 y el RMS aumenta a 19 m, pero el RMS normalizado aumenta a 78%. Sin embargo, en vista que la mayoría de los datos se acomodan a la recta de dispersión y el coeficiente de correlación es alto, se puede concluir que el modelo es satisfactorio.

En la Figura 4, se observa la comparación de los datos obtenidos, del cual sus resultados se describen en la Tabla 5.

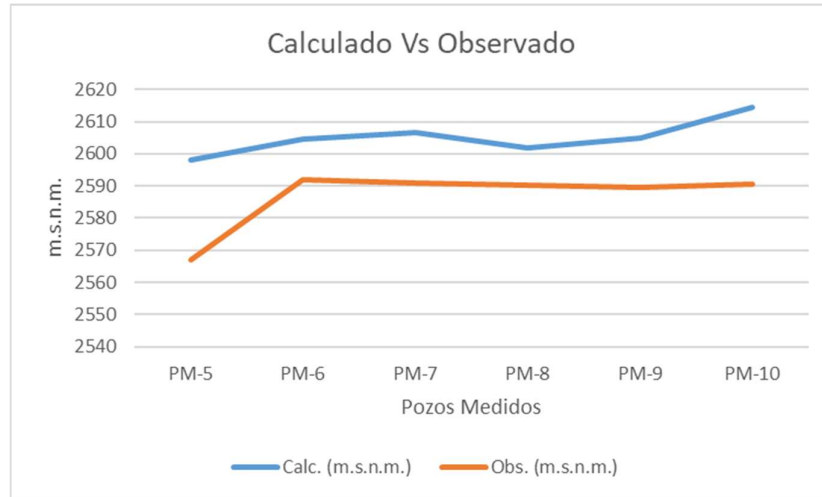


Figura 4: Comparación de los niveles piezométricos calculados vs observados para la validación del modelo utilizando los pozos medidos de junio a julio.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3. Dirección de Flujo Subterráneo

Se ha determinado la dirección de flujo subterráneo para el periodo de calibración. Se tiene la dirección de flujo en base a los datos medidos en campo y del modelo en MODFLOW. En ambos casos, la tendencia en la dirección de flujo es de norte a sur o de mayor a menor potencial hidráulico.

4.4. Fluctuación de Niveles

Los niveles freáticos fluctúan dependiendo la explotación, la época y la cantidad de recarga que llega a la zona, principalmente. Para este estudio, se midieron algunos pozos en distintas épocas para su comparación. El Pozo OG-2 se midió entre los meses de abril, julio y septiembre. El nivel se mantuvo cerca de los 2 metros sin mucha variación a comparación de los pozos que se midió entre junio y septiembre (OG-4, OG-5, OG-6 y OG-7), que la diferencia entre épocas es muy notoria, especialmente en el pozo OG-7 que cambió de 7 a 24 metros o el pozo OG-5 que cambió de 5.5 a 14.85 metros en sólo unos meses.

Se compararon las mediciones de los pozos OG-18 y OG-10 con las realizadas en otro estudio en 2019 [15], en la misma época del año (Agosto a Septiembre). Se puede observar que el nivel subió aproximadamente 5 metros para el pozo OG-18 y 3 metros para el pozo OG-10, estando su nivel muy cerca del nivel del terreno. Estos pozos se encuentran en un sector de recarga considerable por estar entre dos ríos, el Chijlawiri y Tolavi. Además, el río Chijlawiri cuenta con caudales provenientes de la Central Hidroeléctrica de Masicuni [15].

5. CONCLUSIONES

Se lleva a cabo un inventario y monitoreo de los pozos de abastecimiento en el Valle Central de Cochabamba, seguido por la configuración de un modelo hidrogeológico. Durante seis meses en 2021, se realizaron 26 mediciones de nivel freático utilizando una sonda de nivel. Se observó que, al norte de Colcapirhua, los niveles eran pequeños o incluso superan el nivel del terreno, indicando acuíferos surgentes, especialmente gracias a la recarga del río Chijlawiri, potenciada por la Central Hidroeléctrica de Masicuni.

Se recopila información para definir cuatro estratos principales en el modelo hidrogeológico en Visual MODFLOW Flex, destacando la sensibilidad de la conductividad hidráulica y los niveles piezométricos. La calibración y validación del modelo mostraron resultados satisfactorios, con una correlación de 0.94 y 0.63 respectivamente, cumpliendo los requisitos mínimos.

El flujo subterráneo principal es de norte a sur, con variaciones en los niveles freáticos. Se destaca el descenso crítico en el pozo OG-7 Los pozos Og-10 y OG-18 mostraron una recarga de 3 a 5 metros en comparación con mediciones de 2019.

El modelo puede ser utilizado como apoyo para estudios posteriores, gobernanzas y planificación, así como implementar medidas de recarga de acuíferos. Se enfatiza la necesidad de expandir el inventario y continuar el monitoreo mensual de los pozos, junto con el control de la calidad del agua subterránea.

REFERENCIAS

- [1] OECD, *Drying Wells, Rising Stakes: Towards Sustainable Agricultural Groundwater Use*, OECD Studies on Water. OECD, 2015. doi: 10.1787/9789264238701-en.
- [2] UN Water, *Groundwater making the invisible visible*, The United Nations world water development report, no. 2022. Paris: UNESCO, 2022.
- [3] GADC, SDC, y DGIA, "Plan Director de la Cuenca del río Rocha: Estado de situación y propuesta de lineamientos estratégicos," Cochabamba, 2014.
- [4] J. E. Cabrera, A. Alarcon, H. Terraza, D. Maleki, y S. Lew, "Plan de acción: Área metropolitana de Cochabamba sostenible," ICES - Banco Interamericano de Desarrollo, 2013. doi: 10.13140/RG.2.1.1673.4961.
- [5] I. A. Shiklomanov, "World Freshwater Resources," in *Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources*, P. H. Gleick, Ed. New York: Oxford University Press, 1993, pp. 13-24.
- [6] IAH, "The UN-SDGs for 2030: Essential Indicators for Groundwater," 2017. [En línea]. Available: <https://iah.org/wp-content/uploads/2017/04/IAH-Groundwater-SDG-6-Mar-2017.pdf>.
- [7] "Plan Maestro Metropolitano de Agua y Saneamiento de Cochabamba Bolivia: Informe Final. Resumen Ejecutivo," Cochabamba, 2014.
- [8] M. Velis, K. I. Conti, y F. Biermann, "Groundwater and human development: synergies and trade-offs within the context of the sustainable development goals," *Sustain. Sci.*, vol. 12, no. 6, pp. 1007-1017, Nov. 2017. doi: 10.1007/s11625-017-0490-9.
- [9] ASF DAAC, "PALSAR Radiometric Terrain Corrected high_res," NASA Alaska Satellite Facility DAAC, 2014. doi: 10.5067/Z97HFCNKR6VA.
- [10] C. Ledo, "Documento de Trabajo Negowaat Bolivia N° 4. Tiquipaya: Urbanización e infraestructura," 2005.
- [11] SEI (Stockholm Environmental Institute) US Center, "Formulación y Actualización del Plan Director de la Cuenca del Río Rocha, bajo un enfoque de Adaptación al Cambio Climático. Entregable C: Caracterización de la Cuenca del río Rocha," Cochabamba.
- [12] educa.com, "Colcapirhua - Municipio de Quillacollo," Accessed: May 31, 2023. [En línea]. Available: <https://www.educa.com.bo/geografia/colcapirhua-municipio-de-quillacollo>.
- [13] GAM Colcapirhua, "Plan Territorial de Desarrollo Integral del Gobierno Autónomo Municipal de Colcapirhua. Diagnóstico 2016 - 2020," 2020. [En línea]. Available: https://www.colcapirhua.gob.bo/pdf/planificacion/PDTI_COLCAPIRHUA_DIAGNOSTICO_PARTE_I.pdf.
- [14] S. Renner y C. Velasco, "Geología y Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba. – Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN)," 2000.
- [15] L. Rosales, O. C. Saavedra, y W. Soruco, "Modelación hidrogeológica en un abanico aluvial de Cochabamba-Bolivia," *I&D*, vol. 20, no. 1, pp. 51-66, Jul. 2020. doi: 10.23881/idupbo.020.1-4i.
- [16] Waterloo Hydrogeologic, *User's Manual. Visual MODFLOW Flex 6.1. Integrated Conceptual & Numerical Groundwater Modeling Software*, Waterloo, Canada, 2019.
- [17] D. K. Todd y L. W. Mays, *Groundwater hydrology*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.