

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN UN ABANICO ALUVIAL DE COCHABAMBA-BOLIVIA HYDROGEOLOGICAL MODELING IN AN ALLUVIAL FAN OF COCHABAMBA-BOLIVIA

Laura Rosales¹, Oliver C. Saavedra¹, Waldir Soruco²

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

²*Facultad de Ingenierías y Arquitectura*

Universidad Privada Bolivia

oliversaavedra@upb.edu

(Recibido el 30 de mayo 2020, aceptado para publicación el 20 de junio 2020)

RESUMEN

Los indicios de sobreexplotación de acuíferos en la región del Valle Central de Cochabamba evidencian la necesidad de tener un mejor entendimiento realizando monitoreo de los niveles piezométricos y configurando un modelo hidrogeológico para evaluar el comportamiento de los acuíferos. Alrededor de un 65% de agua para consumo humano para la región metropolitana de Cochabamba proviene de aguas subterráneas. El área de estudio se ubica en la zona de El Paso al noroeste del Valle de Cochabamba, considerada como una de las zonas de mayor importancia para la explotación de agua subterránea. El área de estudio se ubica dentro un abanico aluvial conformado por cantos rodados, gravas y arenas. El objetivo de este estudio es actualizar y expandir el monitoreo de niveles de una red de pozos en El Paso, como también entender mejor el comportamiento del flujo subterráneo usando un modelo hidrogeológico. El modelo fue configurado con el paquete MODFLOW y se realizaron mediciones de niveles para calibración y validación de los parámetros. La simulación de los niveles calculados con los observados muestra una raíz media cuadrática (RMS) de 5.69 m. y un coeficiente de correlación de 0.75. La conductividad hidráulica fue identificada como la más sensible a los resultados. La modelación se realizó en estado estacionario presentando una diferencia positiva en el balance de masas que indica un aporte de entrada al sistema de 26 m³. La dirección de flujo es de norte a sur paralelo a la pendiente de la superficie donde la dirección cambia de golpe en algunos puntos debido a la explotación. Los resultados demuestran que existe un equilibrio en el sistema con un pequeño aporte lo que es viable realizar estudios en estado transitorio para identificar los cambios en el balance hídrico. Se ha detectado que no existe sobreexplotación debido al equilibrio que presenta un estado estacionario.

Palabras Clave: Aguas Subterráneas, El Paso, Cochabamba, Modelo Hidrogeológico, Niveles Piezométricos, Estado Estacionario, Flujo Subterráneo.

ABSTRACT

The growing aquifers exploitation in the Central Valley of Cochabamba demonstrate the necessity of a better understating by monitoring piezometric levels and setup a hydrogeological model to evaluate the aquifer's behavior. Around 65% of water consumption for the metropolitan area of Cochabamba comes from groundwater. The study area is located in El Paso at the northwest zone of Cochabamba Valley, considered one of the most important zones for groundwater exploitation. The study zone is located inside of an alluvial fan conformed by boulders, gravels and sand. The objective of this study is to update and expand the monitoring levels within well network in El Paso, as well as a better understanding of the groundwater flow behavior using a hydrogeological model. The model was setup with the package MODFLOW and measurements of levels were made for calibration and validation of parameters. The comparison of simulated heads against observed ones showed a root mean square (RMS) of 5.69 m and a correlation coefficient of 0.75. The hydraulic conductivity was identified as the most sensitive parameter. The model was run in steady state showing a positive difference in the mass balance indicating a greater input by 26 m³ to the system. The main flow direction is from north to south parallel to the surface slope where the direction may suddenly change in some points due to well operation. The results showed a balance in the system which is feasible to carry out studies in transient state to identify the changes in larger periods. No overexploitation was detected due to a balance of a steady state.

Keywords: Groundwater, El Paso, Cochabamba, Hydrogeological Model, Piezometric Levels, Steady State, Groundwater Flow.

1. INTRODUCCIÓN

La región metropolitana de Cochabamba tiene una población aproximada de 2 millones de habitantes. La expansión urbana ha generado problemas como inequidad, desempleo, contaminación ambiental y escasez de recursos hídricos. Se estima que, en solo dos décadas, la población creció un 150% generando cada vez más una mayor demanda de agua para riego y para consumo humano; sin tener en su totalidad acceso a servicios básicos como agua potable y alcantarillado [1].

Las aguas superficiales y subterráneas representan las principales formas de abastecimiento para los diferentes usos: consumo humano, riego e industrial [2]. La cuenca del Río Rocha incluye los Valles de Sacaba, Central y Bajo, donde sus aguas son usadas principalmente para riego. Aproximadamente, el 81 % de las aguas residuales de la población desembocan en el río Rocha, generando niveles críticos de contaminación [1].

El clima es templado, y la época de lluvia se extiende entre octubre a abril y los meses de estiaje entre mayo a julio. La precipitación varía con la altura desde 800 a 1300 mm/año y se estima que reduce un 10% debido al cambio climático [2]. La evapotranspiración real asciende a 490 mm/año aproximadamente. La vegetación de la zona incluye Molles, Eucaliptos, Pinos, Sauces, hierbas medicinales y árboles frutales [2].

El Valle Central de Cochabamba es rico en recursos hídricos. Los acuíferos almacenan una gran cantidad de agua [3]. La presencia de abanicos al norte y oeste de la cuenca corresponden a las zonas de recarga y forman la principal zona de aprovechamiento, donde la mayor recarga de la cuenca viene de la infiltración de la lluvia y la percolación del cauce de los ríos. Se estima que alrededor de un 65% del agua consumida en la región metropolitana de Cochabamba proviene de la extracción de aguas subterráneas [2].

El número de pozos existentes aumenta considerablemente cada año de acuerdo a la exigencia en la demanda, teniendo como uno de los principales problemas: la reducción de los niveles piezométricos de agua y la disminución del caudal de extracción. El crecimiento urbano a las partes altas de la cuenca ha disminuido la cobertura vegetal y provocando la impermeabilización de los suelos con asfalto y afectando el proceso de infiltración natural, reduciendo la recarga acuífera [2]. Se estima que alrededor del 47 % del acuífero está cubierto por la mancha urbana y que para 2036 llegará al 80% [4].

Es difícil estimar el número de pozos en operación en todo el Valle Central debido a que la perforación de un pozo se realiza de acuerdo a la necesidad. Se estima que existen 5000 pozos, y que por perforaciones ilegales llegaría a los 10000 [4]. Cada comunidad tiene sus propios pozos para agua potable y para riego (construidos a partir de sus propios recursos), pero también están las industrias, agricultura y floricultura que algunos cuentan con pozos privados, y los pozos de SEMAPA.

La variación del nivel freático en los acuíferos implica una baja recarga y/o un retiro excesivo, de modo que es necesario realizar estudios a los acuíferos en el Valle Central de Cochabamba. Por esta razón, se busca configurar un modelo hidrogeológico en una zona local del Valle Central. El Paso, Quillacollo fue elegido debido a que es una zona de elevada extracción de aguas subterráneas y por ser zona de recarga. Según el estudio realizado por CABAS, El Paso pertenece a una zona donde existen conos aluviales y, por lo tanto, es de alto interés para la explotación [3]. También presenta una elevada transmisividad sobrepasando los 400 m²/d, evidenciando depósitos gruesos de abanicos aluviales, permitiendo que se infiltre alrededor del 20 al 25% de la precipitación [5].

Debido a la gran productividad y la posible sobreexplotación, se evidencia la necesidad de: 1) monitorear los niveles piezométricos y 2) configurar un modelo hidrogeológico para evaluar el comportamiento de los acuíferos. El objetivo de este estudio es aumentar el entendimiento sobre la fluctuación de los niveles piezométricos como también el comportamiento del flujo subterráneo usando un modelo hidrogeológico.

2. METODOLOGÍA

La obtención de información primaria y secundaria es primordial para configurar un modelo hidrogeológico. El estudio “Geología e Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba” [3] se utilizó como principal referencia para los datos geológicos, hidrogeológicos y geomorfológicos. Mediante estos datos y con ayuda de un SIG y la descarga de un DEM, se pudo elaborar mapas temáticos base. Se obtuvo datos meteorológicos del Servicio Departamental de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) como ser precipitación y temperatura principalmente [6], con los cuales se pudo calcular la recarga y evapotranspiración. Para la adquisición de datos primarios se realizaron campañas de medición de niveles de

agua en pozos en época de lluvia y estiaje. Con esta información se pudo configurar el modelo hidrogeológico de El Paso y posteriormente se procedió a la calibración de los parámetros utilizando los datos de campo. Para describir el procedimiento, fue necesario elaborar un flujograma de proceso para la configuración del modelo, como se observa en la Figura 1.

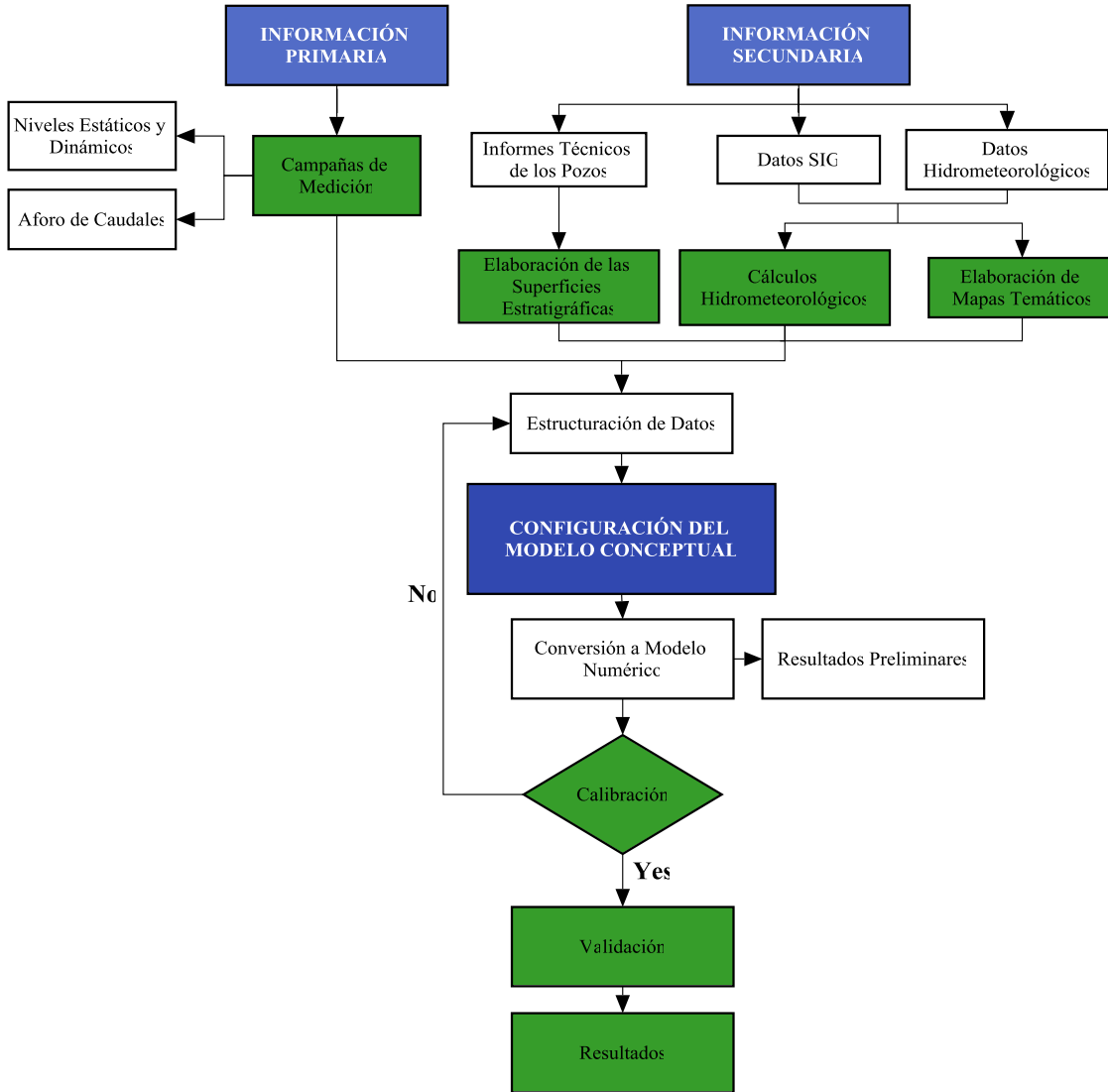


Figura 1: Flujograma de Procesos para la Configuración del Modelo Hidrogeológico.

Fuente: Elaboración Propia.

2.1. Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio “El Paso” se encuentra ubicada en el sector Noroeste de la cuenca de Cochabamba en la provincia Quillacollo del departamento de Cochabamba. La zona comprende el distrito 8 del municipio de Quillacollo “El Paso” y una pequeña parte del municipio de Colcapirhua y Tiquipaya al sureste de la zona. La altura varía entre 2800 y 2600 m.s.n.m.

La zona de estudio cubre un área aproximada de 24 km². En la Figura 2 se observan las cuencas de los Ríos: Chocaya, Ok’hosuru, Chijlawiri y Pihusi, que aportan caudal de flujo y de recarga a la zona de estudio.

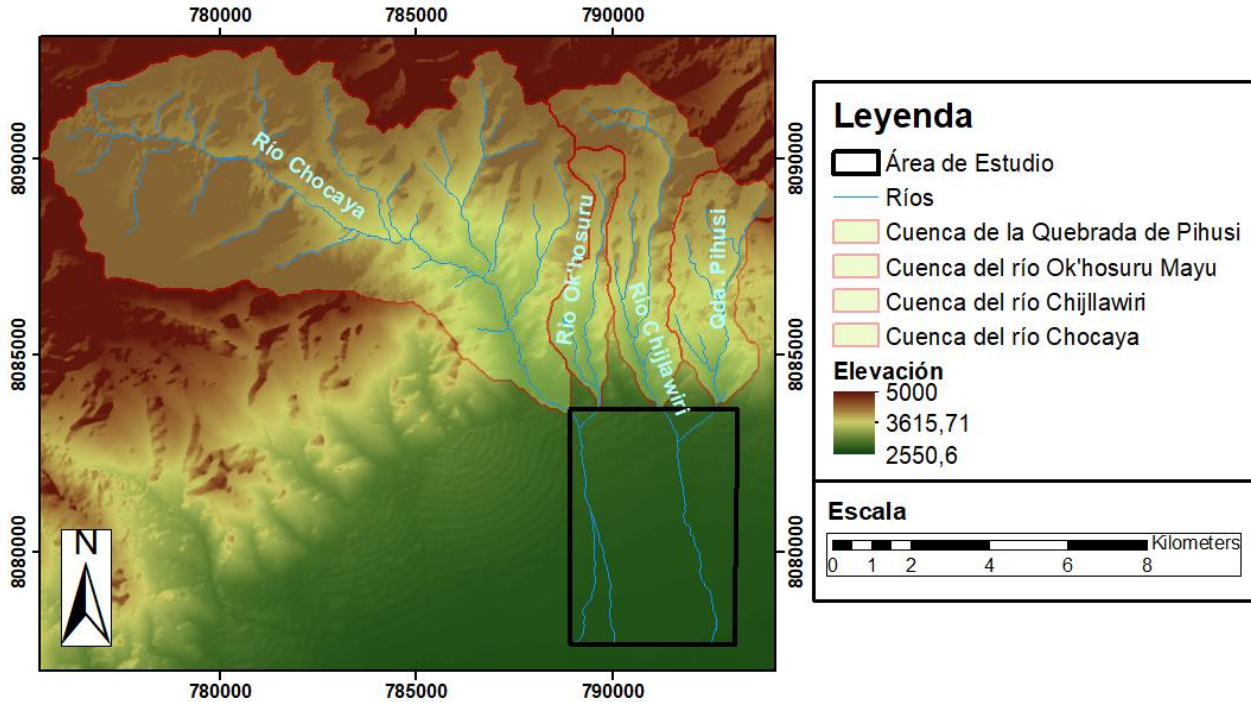


Figura 2: Mapa de Sub-Cuencas de Aporte a la Zona de Estudio.

Fuente: Elaboración Propia en Base a ASTER de 30m.

La recarga a los acuíferos en la zona se realiza por medio de la infiltración de precipitación, principalmente en los abanicos aluviales, y de las aguas superficiales que drenan a través de los cauces de los ríos. La cuenca del Río Chocaya es la más importante por su gran extensión, como también las aguas del Río Chijllawiri también son de gran importancia debido a que la “Central Hidroeléctrica Misicuni” desemboca sus excedentes en este río. El agua de los ríos se distribuye por canales de riego en época de lluvia, y es usada para producir flores a campo abierto o en invernaderos: rosas, claveles, crisantemos, lilioms, entre otros. En la agricultura se produce de gramíneas, maíz, papa, quinua, entre otros [7]. En cuanto a la industria, se observó la existencia de varios invernaderos para la producción y venta de árboles frutales, también granjas avícolas, entre otros.

2.1.1. Datos hidrometeorológicos

Los datos meteorológicos de precipitación y temperatura fueron obtenidos de SENAMHI [6]. Se eligieron 8 estaciones y los datos de los años 2015-2018 fueron tabulados para obtener el área de influencia de cada una para los polígonos de Thiessen. Se descartaron algunas estaciones donde se tiene gran cantidad de información vacía.

▪ Precipitación

La época de lluvia comienza en octubre y termina en el mes de abril, con la mayor intensidad en enero. La época más seca es en periodo entre mayo a julio.

La Figura 3 representa el mapa de precipitación media anual en milímetros de los años 2015-2018 del Valle Central de Cochabamba y el Valle de Sacaba.

Se determinó que la precipitación media anual en la zona de estudio es de 638 mm. Para la estimación de la recarga directa se utilizó un 20% de la precipitación [5], lo cual equivale a 128 mm/año.

La escorrentía se determinó con el método SCS para abstracciones [8]. Se determina la altura de escorrentía “Pe” en toda la cuenca durante un evento o tormenta, mediante el número de curva, extensión de uso de suelos, etc. El evento que se utilizó para el cálculo fue entre los días 12 al 13 de enero de 2019. Con el “Pe” se calculó la altura de nivel de agua en los ríos a la entrada de la zona de estudio. Los datos de escorrentía se encuentran tabulados en la Tabla 2.

▪ **Temperatura**

El clima se caracteriza por ser templado con variación anual pequeña. La temperatura mínima es en invierno, con cielos despejados y radiación de onda larga. En verano se presenta gran nubosidad y humedad [3]. A medida que aumenta la altura, disminuye la temperatura y aumenta la precipitación [9]. En la zona, la temperatura media anual es de 20.1°C, con mínima extrema de -2°C y máxima extrema de 29.4°C.

Por medio de los datos diarios de temperatura: máximos, medias y mínimos de los años 2015-2018, se calculó la evapotranspiración. Los datos de la estación La Violeta presentan muchos vacíos por lo que se usó la estación Pairumani. Para el cálculo de la evapotranspiración real en los años 2015-2018, se utilizaron los métodos de Tourc y Coutagne cuyos resultados se encuentran en la Tabla 1.

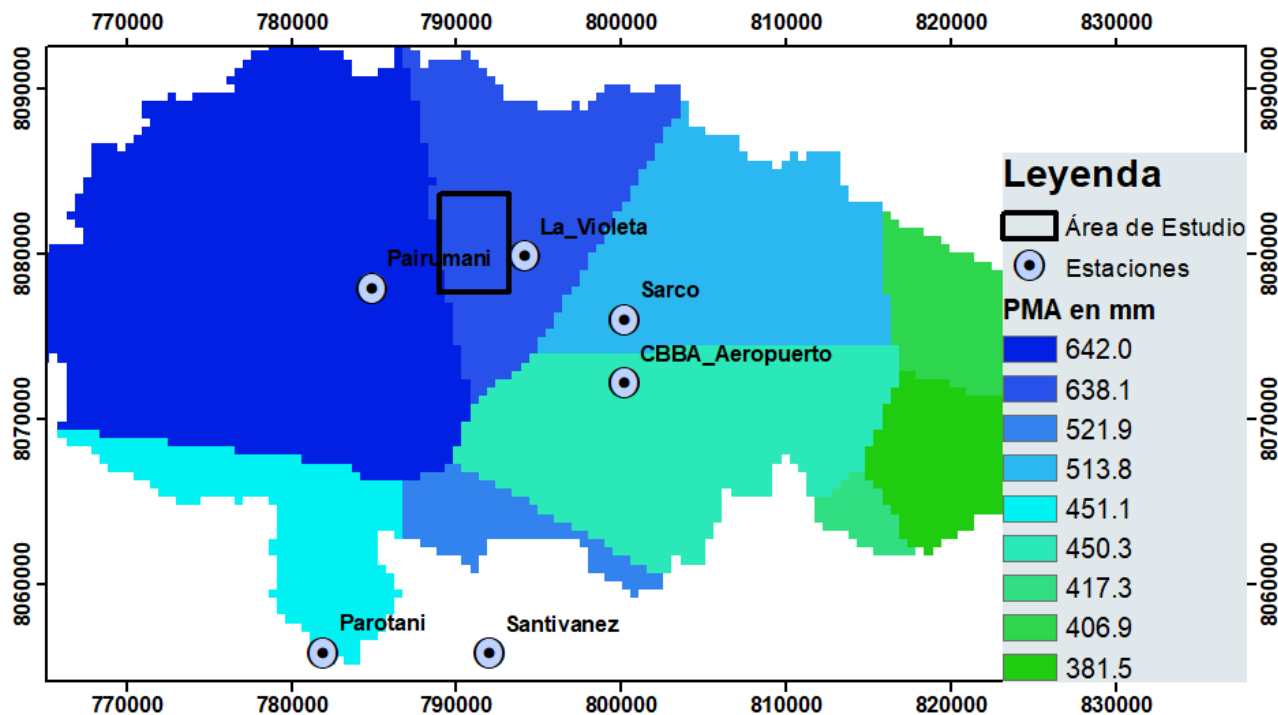


Figura 3: Precipitación Media Anual del Valle Central de Cochabamba. Zona de Estudio en Rectángulo.

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 1 - CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

Año	ETR (mm/año)	
	Tourc	Coutagne
2015	494.4	441.7
2016	467.5	417.2
2017	581.9	520.2
2018	768.99	697.44
CABAS	490	

Fuente: Elaboración Propia.

El valor que se utilizó para el modelo conceptual fue de 520 mm/año, en vista que los valores del método de Tourc son bastante elevados y del método de Coutagne el valor más cercano al estimado por el estudio CABAS [3] es el mismo.

2.1.2. Geología y geomorfología

En la Figura 4, se observa que el flanco norte del área de estudio, que corresponde a la Cordillera del Tunari, está conformada geológicamente por afloramientos paleozoicos donde resalta el sistema Ordovícico con la formación Anzaldo (Oan), conformado por lutitas, limolitas y bancos de cuarcitas afectadas por los procesos de meteorización y erosión intensa. En la parte inferior de la cordillera se identifican depósitos del piedemonte conformado por clastos de rocas, gravas, arenas con una deposición de material heterogéneo [3]. A la salida de las quebradas e ingreso de la cuenca predominan depósitos cuaternarios, resaltando la formación de abanicos aluviales donde el ápice conformado por material grueso, clastos de rocas, gravas y arenas de alta permeabilidad, permiten la infiltración de agua al subsuelo. En la parte media del abanico aluvial se tiene bloques gravas con presencia de arena arcillosa de alta permeabilidad. En la zona distal del abanico, los sedimentos van tornándose más finos hacia el sur (limos, arcillas). En el ingreso de la cuenca también se resalta la formación de terrazas aluviales, lateralmente conformados por sedimentos de alta permeabilidad como cantos rodados, gravas y arenas influenciadas por procesos erosivos intensivos, principalmente durante riadas fuertes [10].

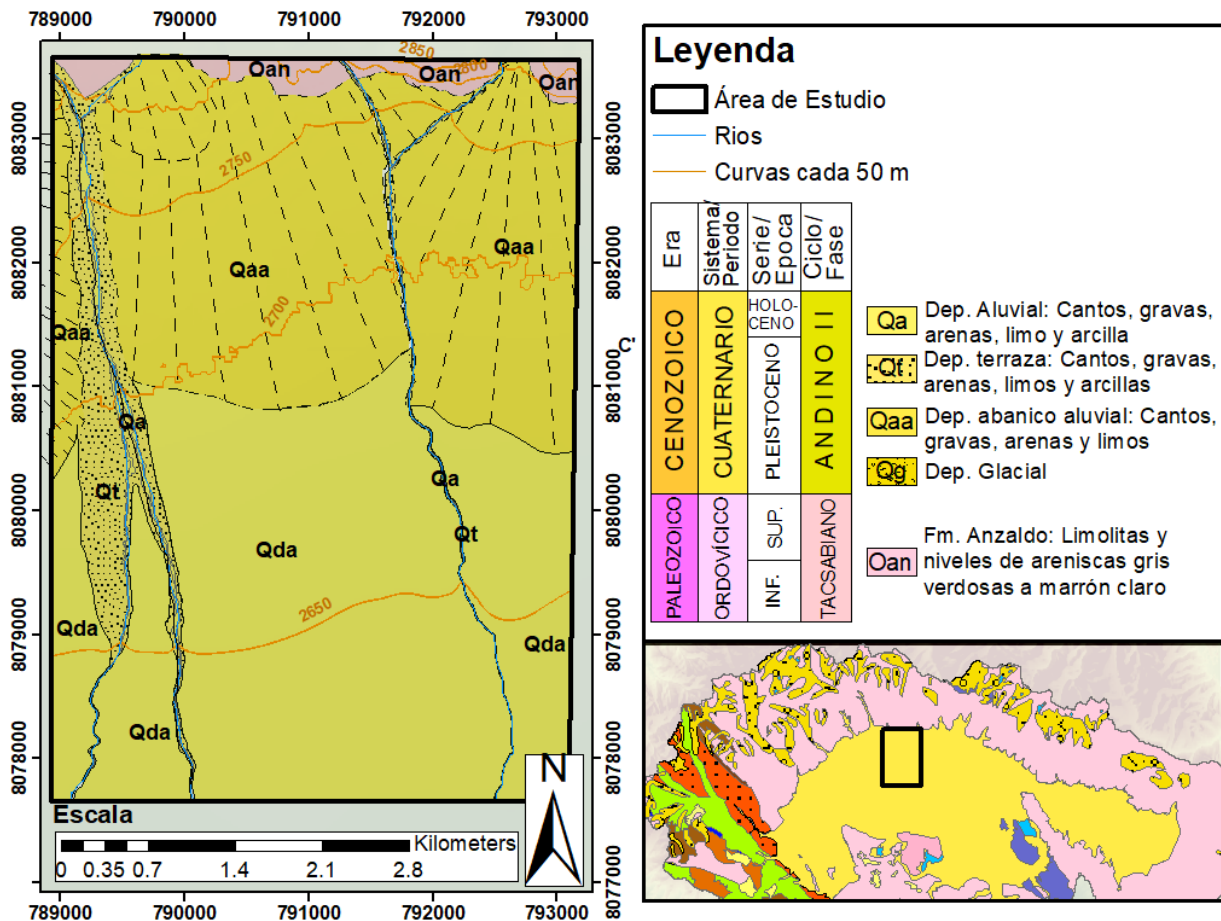


Figura 4: Mapa de la Geología Local.

Fuente: Elaboración Propia en Base al Mapa Geológico de Cochabamba [10].

2.1.3. Hidrogeología

En el mapa hidrogeológico de la Figura 5, se observa que la parte montañosa de la zona se encuentra en el grupo de “regiones sin aguas subterráneas en cantidades apreciables”, y en cambio, el resto se encuentra en el grupo de “rocas porosas no consolidadas: acuíferos extensos y productivos”. Debido a la presencia de abanicos aluviales, predominan sedimentos gruesos y de espesor variable (depósitos coluvio-aluviales) [3].

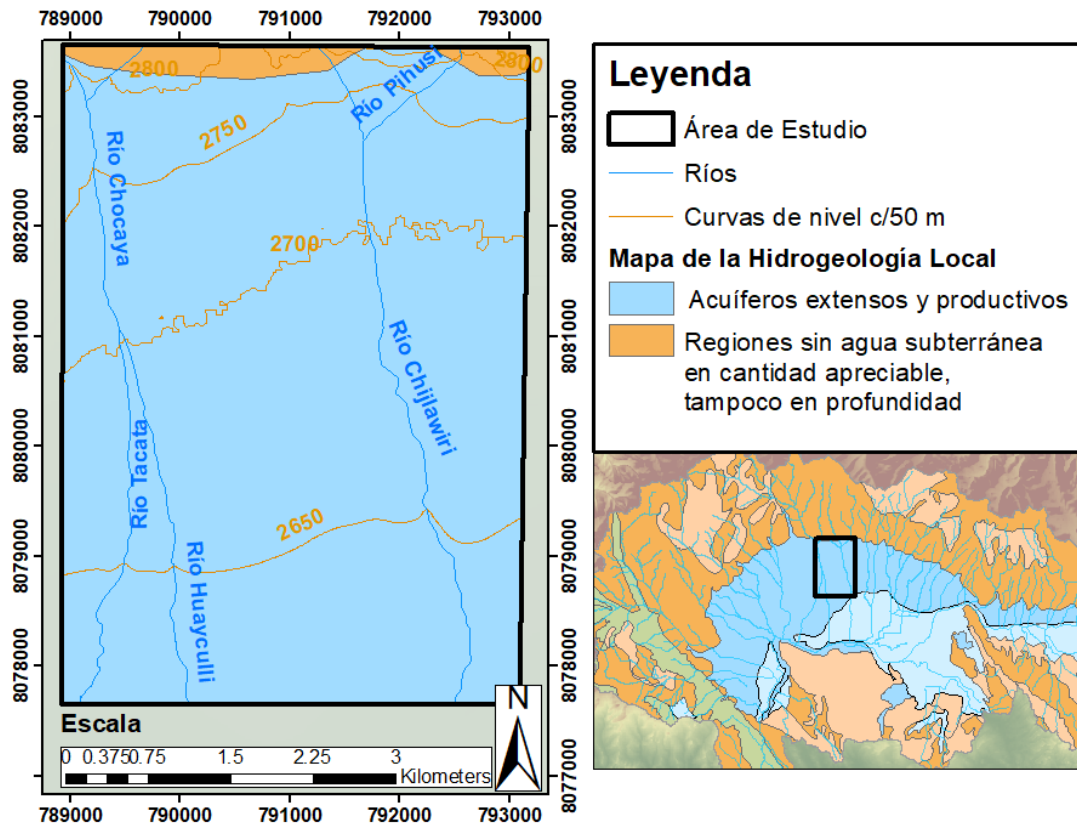


Figura 5: Mapa de la Hidrogeología Local.

Fuente: Elaboración propia en base al estudio del Valle Central [3].

2.1.4. Pozos de monitoreo

Se estableció una red de pozos de monitoreo en la zona. En la Figura 6 se encuentra la ubicación de los pozos para monitoreo en la zona de estudio, en el cual se han inventariado 29 pozos en total. Las profundidades de perforación varían de 160 a 180 en la parte norte y 84 a 150 en la parte sur. Estos pozos litológicamente están conformados por material grueso de cantos rodados, bloques, gravas, arenas y arcillas. La profundidad del nivel estático varía de 55 a 80 metros en la parte norte y de 10 a 36 metros en la parte sur. En cambio, en la parte este del río Chijlawiri varía de 8 a 39 metros. Los caudales de explotación varían de 4 a 15 l/s en la parte sur y de 1 a 7 l/s en la parte norte.

3. METODOLOGIA

3.1 Campañas de medición de niveles

Se realizaron 3 campañas de medición: octubre 2018, enero y agosto 2019.

▪ Comparación de los niveles estáticos

En la campaña de octubre, la medición de niveles estáticos fue de 4 pozos en la zona sureste. En cambio, las mediciones en época de lluvia y época de estiaje fueron de 25 y 15 pozos respectivamente, distribuidos uniformemente. Por esta razón se utilizaron estas últimas mediciones para la modelación. En la Figura 7 se observa la comparación de los niveles estáticos de los pozos que se midieron en ambas épocas de lluvias y de estiaje, donde los pozos W-24, W-16 y W-1 tienen un nivel estático pequeño entre 8 a 12 m. En cambio, los pozos W-19, W-20 y W-21 tienen un nivel estático profundo entre 55 a 81 m, siendo el más profundo el pozo W-21. También se observa que no necesariamente en época de estiaje el nivel estático es más profundo que en época de lluvia, como en los pozos W-7, W-2, W-1, W-18, W-19, W-20 y W-24. En cambio, en los pozos W-8, W-12, W-14, W-16 y W-21, el nivel estático en época de estiaje es más profundo que en época de lluvias, evidenciando explotación para estos pozos.

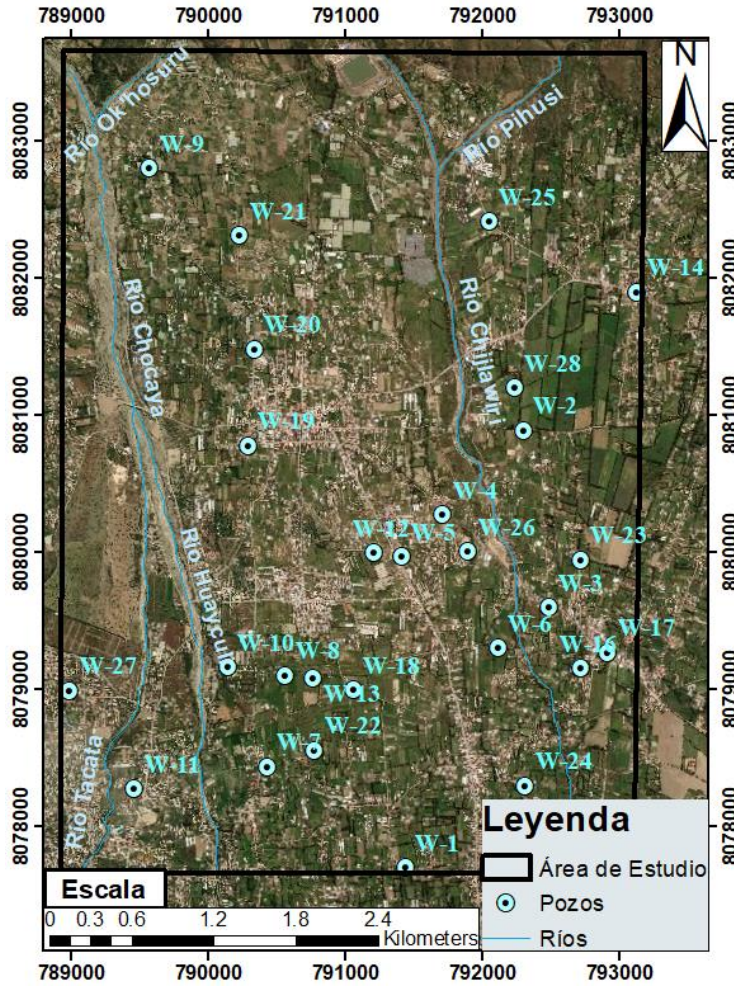


Figura 6: Ubicación de los pozos de monitoreo.

Fuente: Elaboración Propia.

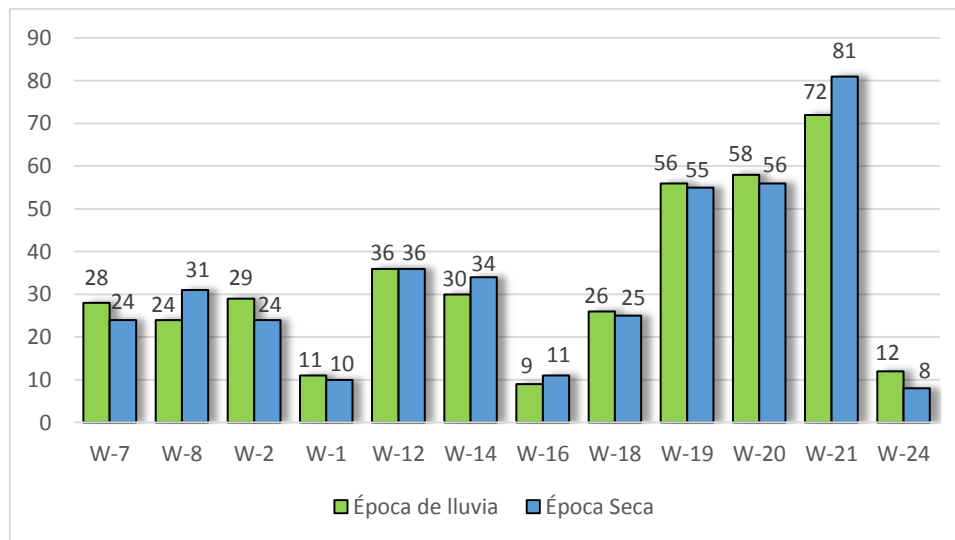


Figura 7: Comparación de los niveles estáticos en época de lluvia y época seca.

Fuente: Elaboración Propia.

▪ Dirección de Flujo

En base a la medición del nivel estático, se determinó la dirección de flujo en la zona de estudio, donde se puede apreciar que el agua fluye de mayor a menor potencial hidráulico. La dirección de flujo es de norte a sur, donde al sur se reducen los niveles piezométricos. En la Figura 8, se observa que las flechas cambian de dirección en varios puntos evidenciando la presencia de explotación de las aguas subterráneas en esas partes.

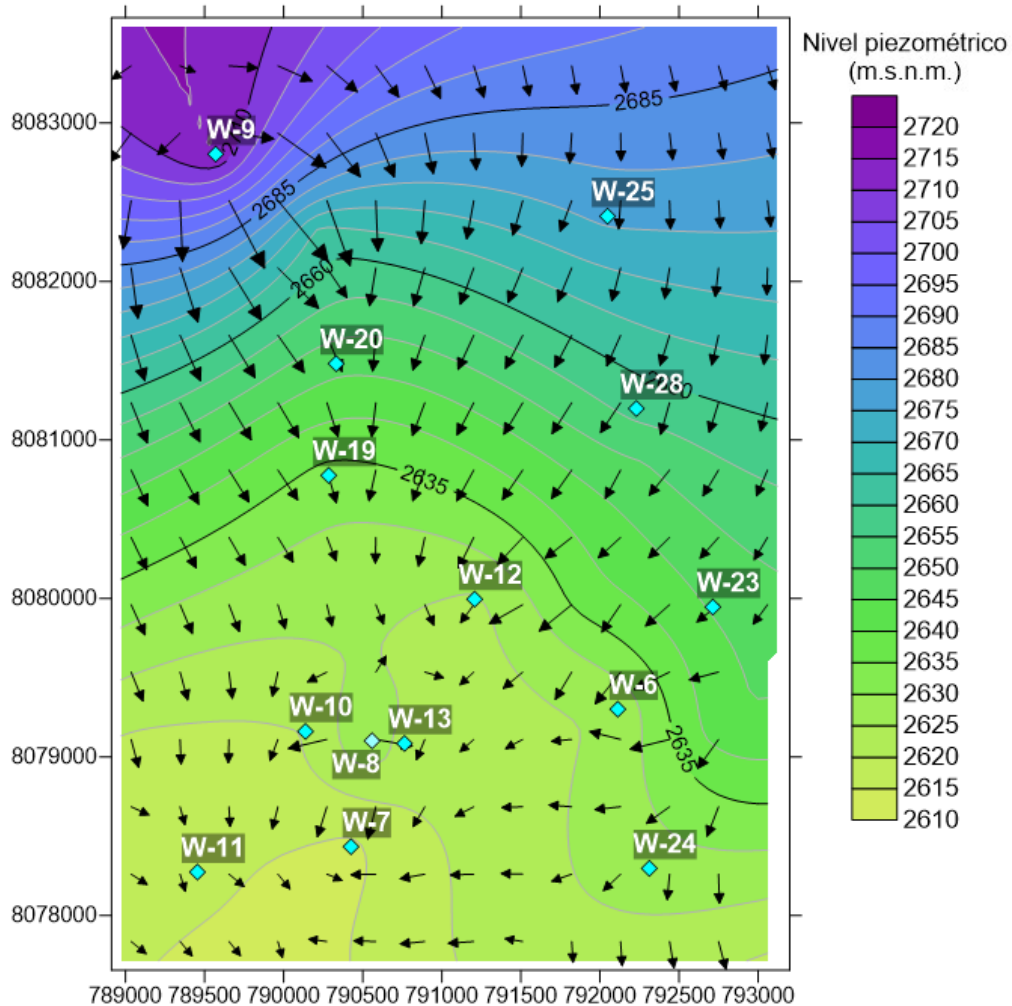


Figura 8: Dirección de flujo por explotación de las aguas subterráneas en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración Propia.

La medición de los niveles piezométricos fue realizada por medio de una sonda de nivel introducida a través del entubado del pozo. La sonda es de 100 m. de longitud, y el pozo más profundo medido fue el W-21 llegando a los 81 m. Al mismo tiempo se consiguieron informes técnicos de algunos pozos, el cual contenía el perfil estratigráfico. En la Figura 9 se observa el perfil litológico y diseño del Pozo W-21, donde la profundidad de perforación es de 160 m., la profundidad del entubado 155 m., caudal de salida 6 l/s, y el diámetro del entubado es 8 pulgadas.

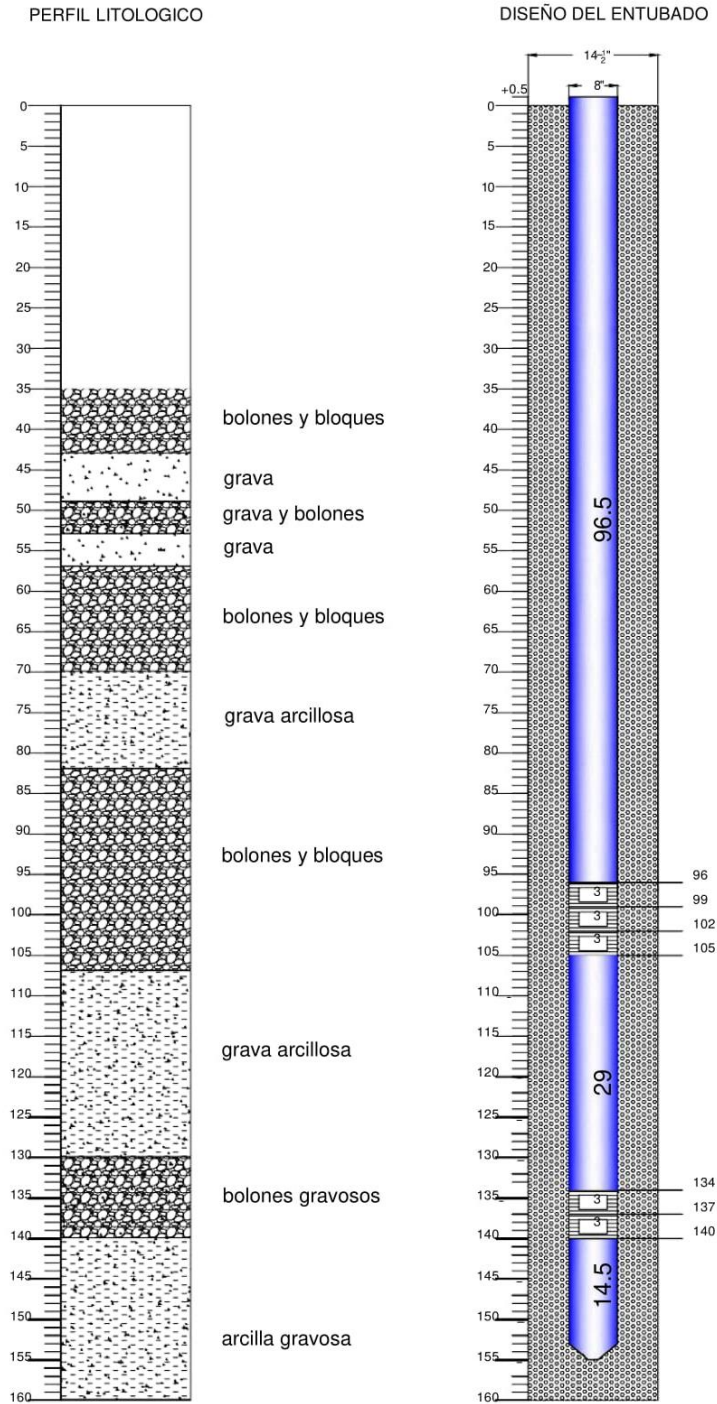


Figura 9: Perfil litológico y diseño del pozo W-21.

Fuente: Empresa Constructora SIKU [11].

3.2 Configuración del modelo hidrogeológico

Para preparar los datos de entrada al programa Visual MODFLOW y desarrollar el modelo conceptual, se utilizaron las herramientas de análisis espacial del ArcGIS.

3.2.1 Preparación de Archivos

▪ Estratigrafía

La estratigrafía se determinó en base a los Informes Técnicos de los Pozos y con ayuda del corte geológico propuesto por el estudio “Geología e Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba” [3]. Con lo que se determinó la presencia de cantos rodados, bloques fracturados, gravas, arenas y arcillas en su mayoría. Las superficies estratigráficas se elaboraron en el programa Surfer 14 y se importaron a MODFLOW para crear las zonas estratigráficas, Figura 10, del modelo conceptual.

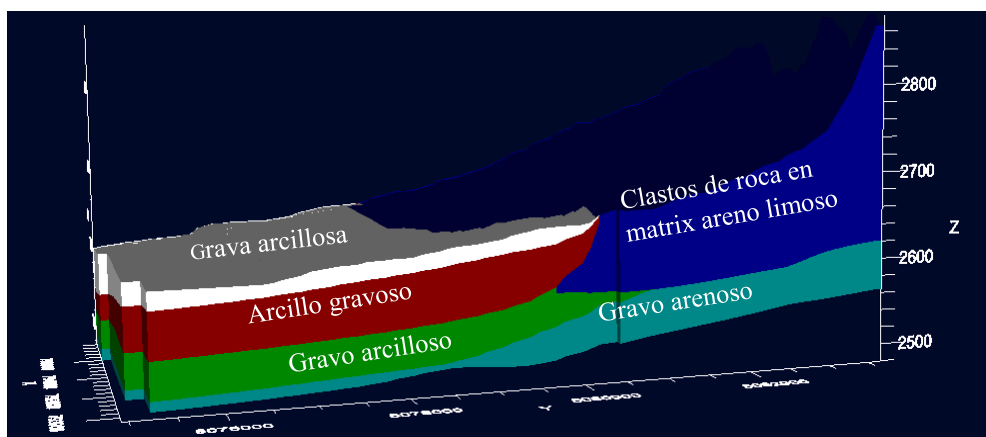


Figura 10: Vista 3D de las zonas estratigráficas en MODFLOW.

Fuente: Elaboración propia obtenida de MODFLOW.

▪ Delimitación y Ríos

En ArcGIS se determinó la delimitación de la zona en formato *shapefile*, del distrito 8 del municipio de Quillacollo “El Paso” y un pequeño sector de los municipios de Tiquipaya y Colcapirhua. También se determinó el archivo de ríos en base al DEM.

▪ Pozos

Los datos de los pozos fueron ordenados en Excel en el formato de importación que pide el programa: ID Pozo, Coordenada X, Coordenada Y, Elevación, Profundidad del Pozo, Logger ID, Logger Z, Nivel Piezométrico observado, Fecha de la observación.

3.2.2 Condiciones de Borde

▪ Ríos

La información requerida por los ríos se observa en la Tabla 2. Para la altura de espejo de agua se crearon nuevas superficies, sumándole al DEM la altura de espejo de agua en metros. Los valores de lecho del río y conductividad fueron estimados. El ancho del río se obtuvo a partir de imágenes satelitales. La conductividad hidráulica del lecho del río utilizada para los 4 ríos fue un valor constante de 0.001 m/s.

TABLA 2 - CONDICIÓN DE BORDE TIPO RÍO

RÍO	Altura de espejo de agua (mm)	Espesor del lecho del río (m)	Ancho del río (m)
PIHUSI	150	1	1
OK'HOSURU	200	1.5	1.5
CHIJLAWIRI	200	2	4
CHOCAYA	300	2	4

Fuente: Elaboración Propia.

▪ **Evapotranspiración y Recarga**

Los datos requeridos en evapotranspiración y recarga se muestran en la Tabla 3.

TABLA 3: CONDICIÓN DE BORDE TIPO EVAPOTRANSPIRACIÓN Y RECARGA

Evapotranspiración real (mm/año)	Profundidad de las raíces (m)	Recarga (mm/año)	Profundidad de encharcamiento (m)
520	2	127.63	0.05

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3 Creación del Modelo Conceptual

Los datos de las secciones 2.3.1 y 2.3.2 se utilizaron para la configuración del modelo conceptual en Visual MODFLOW 5.1., del cual se observa una vista previa de los datos introducidos, en la Figura 11.

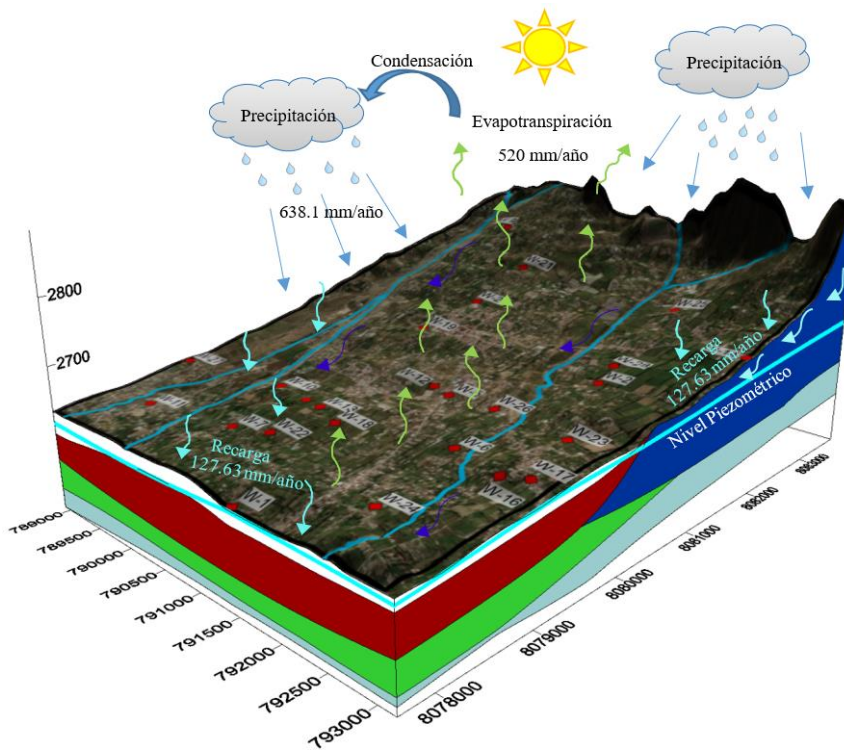


Figura 11: Modelo conceptual de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

4. RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos en el proceso de calibración y validación del modelo en MODFLOW.

4.1. CALIBRACIÓN

Para la calibración se efectuó el ensayo “Prueba-Error”, es decir calibración manual. Los pozos de observación utilizados fueron los de enero a abril de 2019. Al inicio se redujeron los valores de escorrentía, porque no existía un balance hidrológico. Posteriormente, se redujo el valor de profundidad de raíces, ya que se tenía un intervalo para especies arbóreas de 7 ± 1.2 metros e inicialmente se optó por 5.8 metros, pero posteriormente se redujo a 2. Se optó por modificar el porcentaje de recarga ya que según la tesis de “Hidrogeología del oeste de la cuenca de Cochabamba” [9], utiliza una recarga aproximada de 10% de la precipitación y según el estudio CABAS [5], la recarga del Valle Central de Cochabamba es 20 a 25%. Sin embargo, al utilizar 10%, los resultados afectaban el balance hídrico por lo que se utilizó un 20%.

El parámetro más sensible de la modelación es la conductividad hidráulica en relación con las superficies de suelo creadas a partir de los perfiles litológicos de los pozos. Inicialmente se optaron por 3 capas generales de: clastos de roca en matrix areno-limoso, gravo arenoso y areno gravoso, ya que según el esquema litológico de la cuenca de Cochabamba [3], donde se encuentra la zona existe en su mayoría bloques, gravas y arenas. Sin embargo, al correr el modelo, los niveles potenciométricos calculados se encontraban muy por encima de la recta de regresión en el gráfico de dispersión, por lo que se optó por modificar las superficies. A medida que se iba cambiando las superficies, los resultados mejoraban o empeoraban, con lo que se identificó que la capa superior es la más sensible al modelo, ya que, al introducir valores de conductividad muy elevados, las cabezas hidráulicas calculadas vs las observadas eran muy diferentes. Por lo que se optó por tantear la conductividad hidráulica en capas superiores, con lo que los resultados mejoraban considerablemente.

En vista que la zona de estudio tiene dos ríos que la atraviesan, el sistema de acuíferos está dividido por la interacción río a acuífero. Por eso, la profundidad del nivel freático a ambos lados de los ríos es muy diferente. El modelo conceptual está configurado para tomar el sistema un todo, la superficie freática calculada (Water Table) se mantiene casi a la misma altura que las cabezas de agua al centro de la zona de estudio. Es por eso que para los pozos muy cerca de los ríos (al este del río Chijlawiri y al oeste del río Tacata y Huayculi), los niveles piezométricos calculados y observados son muy diferentes. De la misma manera, para los pozos profundos en la zona de recarga, las cabezas de agua calculadas son muy diferentes a las observadas. Por lo que se optó por eliminar todos estos pozos que difieren demasiado en la simulación.

En las simulaciones se observaron: el coeficiente de correlación, la raíz media cuadrática (RMS) y la máxima y mínima residual. El coeficiente de correlación puede ser positivo o negativo, mientras sea mayor a 0.5 existe una correlación buena, en cambio el RMS debe ser menor a 10%. La Tabla 4 muestra la conductividad hidráulica en la simulación final.

TABLA 4 - CALIBRACIÓN: SIMULACIÓN FINAL

Capa	Conductividad hidráulica (m/s)
Capa Aluvial: grava arcillosa	0.001
Capa Aluvial: clastos de roca en matrix areno limoso	0.0001
Arcillo gravoso	1E-05
Gravo arcilloso	0.00015
Gravo arenoso	0.0008

Fuente: Elaboración Propia.

A partir del gráfico de dispersión (Scatter Plot), como se puede apreciar en la Figura 12, se pudo comparar los niveles potenciométricos calculados vs los observados en estado estacionario.

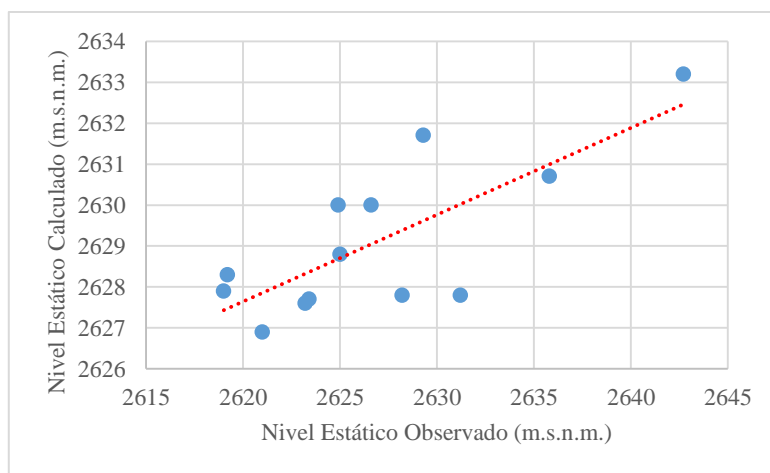


Figura 12: Dispersión de la simulación final.

Fuente: Elaboración Propia.

Esta simulación es la que más se correlacionaron las dos series puesto que los errores residuales de la simulación, que se describen en la Tabla 5, muestran que la raíz media cuadrática es 5.69 m. y el coeficiente de correlación es 0.75.

TABLA 5 - ERRORES RESIDUALES EN LA SIMULACIÓN FINAL

Media Residual (m)	2.22
Media Residual Absoluta (m)	5.61
Error Estándar de la Estimación (m)	1.51
Raíz Media Cuadrática (m)	5.69
Coefficiente de Correlación	0.75

Fuente: Elaboración Propia.

El balance de masas, en la Figura 13, muestra que los parámetros de entradas y salidas al modelo fueron: Fuga de río, evapotranspiración real y recarga. Existe un balance en los parámetros de entradas y salidas, con una diferencia en volumen de 26 m³.

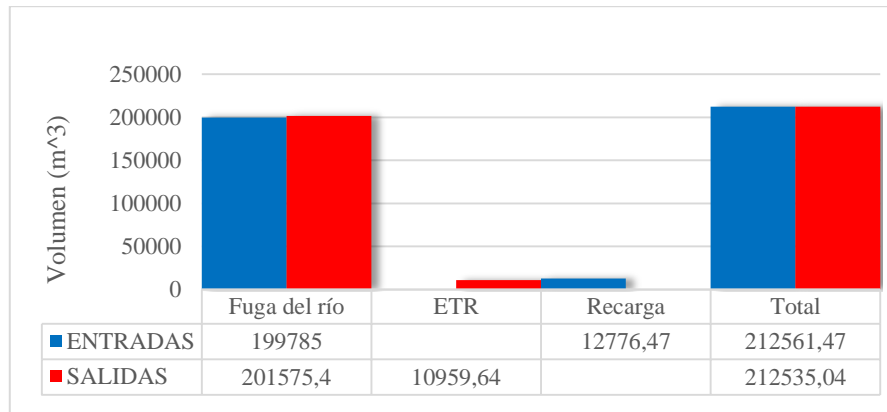


Figura 13: Balance de masas.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Validación

Para la validación se procedió a la simulación utilizando los niveles estáticos medidos en agosto de 2019. En este proceso se utilizaron 15 pozos. En la Figura 14, se observa que hay mejor dispersión de los resultados en la recta de regresión, por ello tiene un mejor coeficiente de correlación de 0.78. Sin embargo, si existe una mayor diferencia en los valores residuales, con lo que la Raíz Media Cuadrática sube a 9 m.

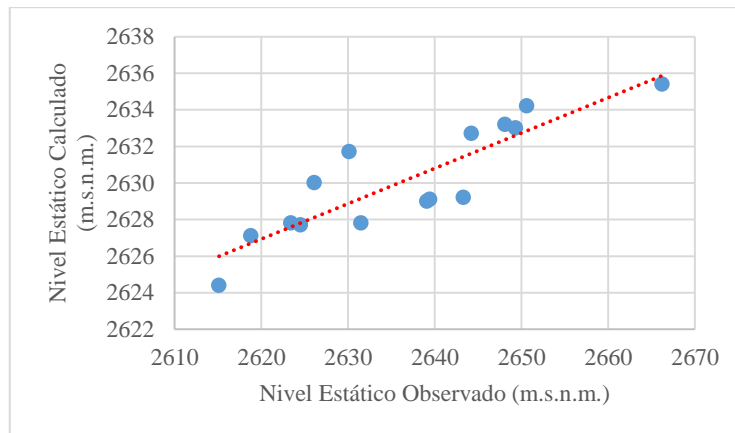


Figura 14: Dispersión de la validación.

Fuente: Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

La zona de estudio “El Paso”, al noroeste del Valle Central de Cochabamba, es una zona de gran importancia para la explotación de aguas subterráneas debido a que se encuentra en una zona de recarga y en la parte media de un abanico aluvial conformada por sedimentos gruesos de alta permeabilidad consecuencia de los depósitos aluviales procedentes de la meteorización, erosión, transporte y posterior deposición. Los materiales predominantes son cantos rodados, gravas y arenas, y en pequeña proporción limos y arcillas.

Para la asignación de superficies estratigráficas se utilizaron la deposición de materiales de canto rodado con arenas y limos, grava arcillosa, arcillo gravoso, grava arcilloso y grava arenoso. Para configurar el modelo, se determinaron las entradas y salida al sistema: infiltración del río, evapotranspiración real de 520 mm/año utilizando el método de Coutagne y recarga de 128 mm/año.

Para el proceso de calibración se realizó el ensayo prueba y error, en el que se modificaron manualmente los parámetros hidráulicos hasta llegar a la convergencia y que los niveles piezométricos calculados se acercuen a los observados hasta que se muestre un RMS menor a 10% y un coeficiente de correlación mayor o igual a 0.5. Para la calibración se utilizaron los datos medidos en época de lluvia. En la simulación final se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.75 y un RMS de 5.7 m. El valor residual entre entradas y salidas es positivo lo que indica un aporte de entrada al sistema del acuífero de 26 m³ extra. El modelo fue validado para época de estiaje donde los resultados presentan una mejor distribución en el gráfico de dispersión, pero un RMS más alto.

El modelo nos indica que en estado estacionario existe equilibrio con una recarga adicional al sistema y que la infiltración de los ríos es la principal fuente de aporte y la infiltración por precipitación sólo una pequeña parte. También se concluye que gran parte de las aguas subterráneas retornan a los ríos por el aporte de acuífero a río. A su vez, con el modelo se determinó que el sistema de acuíferos libres, al norte de la zona está influenciada como zona de recarga y la parte sur como zona de descarga. La dirección de flujo es de norte a sur con puntos donde la dirección cambia de golpe debido a la explotación en un pozo. Los niveles piezométricos en la zona norte son profundos llegando hasta los 80 m. que estos fluyen por medio del potencial hidráulico llegando a la zona sur entre 20 a 30 m. de profundidad. En cambio, en la ribera de los ríos, el sistema es diferente porque la profundidad de los niveles se encuentra entre 7 a 10 m. La interacción del sistema hidrogeológico con los ríos afecta a la simulación y existen dos ríos principales que atraviesan la zona: el río Chocaya y el río Chijlawiri. Los pozos cercanos a estos presentan incongruencias en la simulación debido a la interacción río a acuífero. De la misma manera, algunos pozos en la zona de recarga también presentan incongruencias en base a los resultados calculados vs los observados, por lo que se procedió a eliminar algunos de estos pozos para la simulación. La modelación fue realizada en estado estacionario, por lo que en el balance de masas se evidenció un equilibrio.

El presente estudio ha llevado a la configuración de un modelo hidrogeológico en estado estacionario en MODFLOW, del cual algunas variables fueron medidas y calculadas, pero otras fueron estimadas o simplificadas, por lo que es una de las principales razones de la variabilidad de resultados en algunos aspectos, como es el caso de los pozos cercanos a los ríos. Sin embargo, en vista de los resultados favorables se concluye que el modelo hidrogeológico es representativo de la zona.

El estudio realizado es considerado un estudio piloto en un sector de recarga y parte de un abanico aluvial. Se ha detectado que no existe sobreexplotación de acuíferos debido a que en estado estacionario existe un equilibrio principalmente por la infiltración de agua de los ríos superficiales. Por lo que se estima que las condiciones hidrogeológicas tienden a ser similares principalmente en el norte de la cuenca donde se produce mayor recarga y por la presencia de abanicos aluviales.

6. REFERENCIAS

- [1] A. Alarcón, H. Terraza, J. E. Cabrera, D. Maleki y S. Lew, «Plan de acción: Área metropolitana de Cochabamba sostenible,» 2013.
- [2] Servicio Departamental de Cuencas (SDC), Dirección de Planificación y Gestión Integral del Agua (DGIA), «Plan Director de la Cuenca del Río Rocha: “Estado de Situación y Propuesta de Lineamientos,» 2015.

- [3] S. Renner y C. Velasco, Geología e Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba, Cochabamba: Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minera N°34, 2000.
- [4] La Razón, «Expansión urbana cochabambina amenaza el reservorio de agua,» *La Razón*, 10 11 2013.
- [5] C. Neumann-Redlin, S. Renner y J. Torrez, «Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba, Bolivia,» de *1st Joint World Congress on Groundwater*, Fortaleza, Ceará, Brasil, Julio 31 - Agosto 04, 2000.
- [6] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI, «SisMet - Sistema de Procesamiento de Datos Meteorológicos,» [En línea]. Available: <http://senamhi.gob.bo/index.php/sismet>. [Último acceso: 2019].
- [7] Colaboradores de Wikipedia, «El Paso (Cochabamba),» Wikipedia, La enciclopedia Libre, 6 Octubre 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Especial:Citar&page=El_Paso_%28Cochabamba%29&id=111090749. [Último acceso: 27 Mayo 2020].
- [8] V. T. Chow, D. R. Maidment y L. W. Mays, Hidrología Aplicada, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [9] Universidad Mayor de San Andrés, Hidrogeología del oeste de la cuenca de CBBA, 1995.
- [10] SERGEOMIN, *Mapa Geológico de Cochabamba*, Vols. %1 de %2SGB Serie I-CGB-28, Cochabamba, 1994.
- [11] Empresa Constructora SIKU, *Perfil y Diseño del Entubado del Pozo "Aransaya"*, Cochabamba, 2016.