

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

MODELO MATEMÁTICO PRELIMINAR DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO CHAMBO (CBRCH)

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA GEÓLOGA

ADRIANA LISBETH RUIZ RAMOS

adriana.ruiz01@epn.edu.ec

DIRECTOR: PhD. SANDRA PROCEL

sandra.procel@epn.edu.ec

Quito, julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Adriana Lisbeth Ruiz Ramos declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Adriana Lisbeth Ruiz Ramos

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Adriana Lisbeth Ruiz Ramos, bajo mi supervisión.

PhD. Sandra Procel

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Adriana Lisbeth Ruiz Ramos

PhD. Sandra Procel

DEDICATORIA

A todas aquellas personas que, de una u otra manera, han contribuido a mi formación y desarrollo personal y académico. Su apoyo y confianza han sido esenciales para alcanzar este logro.

AGRADECIMIENTOS

” El triunfo no es solo del individuo que lo alcanza, sino también de quienes lo apoyan”

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a:

Mis queridos abuelitos, Jaime Ramos y Beatriz Toapanta, tuvieron un impacto inmenso en mi vida. Tuve la fortuna de pasar mi infancia y adolescencia rodeada de su amor, mimos y enseñanzas. Me cuidaron con devoción y me dejaron lecciones invaluable. Mi abuelita me enseñó que, sin importar cuán difíciles sean las circunstancias, siempre se puede salir adelante. De mi abuelito aprendí a ser resiliente y que el amor trasciende más allá de la muerte. Ambos dejaron una huella imborrable en mi corazón y alma, que llevaré conmigo siempre.

Mi madre es la mujer que siempre ha cuidado mis pasos; es mi ángel, mi refugio, y como bien lo dice su nombre, es mi Consuelo. Gracias por siempre cuidar mi corazón y no soltar mi mano, por ser una madre dedicada y amorosa. Gracias por recordarme lo valiosa que soy y, sobre todo, por creer en mí. De todas las personas en el mundo, estoy segura de que usted es la única que jamás me fallaría. Gracias por ser mi cómplice y por su arduo trabajo en mi educación. Gracias por enseñarme que nadie nace sabiendo, sino que todo se aprende y que todo es parte de un proceso. Qué bendición es tener una mamá que me ama con toda su alma y me guía en mi camino.

Mi padre, si hay alguien a quien admiro profundamente en este mundo, es a él. A pesar de una infancia difícil, decidió ser diferente y convertirse en un padre amoroso y protector. Gracias, papi, por elegir ser distinto, por cuidar de su familia y por demostrarme cada día que no nos define el lugar donde nacemos, sino las decisiones y acciones que tomamos en el camino. Gracias por ser un luchador incansable y enseñarme que las cosas buenas llegan con esfuerzo y dedicación. Su ejemplo me inspira cada día.

Katerine Oviedo, gracias por demostrarme que la familia no es solo de sangre y por estar siempre presente en los momentos difíciles. Qué bonito es tener a alguien que se preocupa por mí y me quiere como si fuera su propia hija. Gracias por ser mi cómplice, por formar parte de mi familia y por apoyarme en todo. Su ayuda constante y su cariño incondicional me han enseñado a superar mis miedos y a entender que, aunque cometamos errores, siempre debemos seguir adelante. Su presencia en mi vida es un verdadero regalo.

Fabricio Osorio, gracias por abrirme las puertas de su hogar y por su apoyo constante. Sus sabios consejos y su presencia en momentos difíciles han sido importantes para mí. Gracias por impulsarme a ser una mejor persona y por enseñarme que la educación es un

pilar fundamental en la vida. Su generosidad y guía me han inspirado a seguir adelante y a luchar por mis sueños.

Mi querido tío, Edison Ruiz, gracias por ser una fuente constante de inspiración en mi vida. Me ha enseñado que, aunque uno pueda no tener mucho en términos materiales, la perseverancia y el esfuerzo pueden llevarnos a alcanzar grandes metas. Gracias por sus lecciones de matemáticas en la escuela, por reparar innumerables veces mi computadora e impresora, y por estar siempre disponible cuando he necesitado su ayuda. Aunque es una persona de pocas palabras, sus acciones han hablado fuerte y claro, demostrando su cariño.

Mi tía Patricia Ordoñez, gracias por ser esa persona alegre que siempre busca que todos estén bien. Gracias por siempre sacarme una sonrisa, incluso en los momentos más difíciles. Su disposición para ayudarme, incluso cuando necesitaba algo del bazar en la madrugada, es un testimonio de tu amor incondicional. Agradezco también por siempre tenerme en cuenta al organizar algún evento, lo cual me ha hecho sentir valiosa y apreciada. Pero, sobre todo, gracias por enseñarme que los problemas se enfrentan con una sonrisa en la cara.

Geovanny Ruiz, gracias por estar presente en mi vida, por darme consejos y por brindarme su ayuda en todo momento. Su apoyo y generosidad han significado más de lo que las palabras pueden expresar.

Mayrita Vallejo, gracias por su ayuda incondicional y por ser esa persona que me ha brindado paz en los momentos más difíciles. Su apoyo ha sido una luz en mi vida, y sus innumerables consejos me han guiado y fortalecido en cada paso del camino.

Sor Magdalena Ronquillo, gracias por su apoyo incondicional a lo largo de mis años en el colegio. Usted ha sido mucho más que una profesora; ha sido mi guía y mi mentora, una verdadera maestra de vida. Recuerdo con cariño cada momento en el que me brindó su apoyo y sus sabios consejos, los cuales no solo me ayudaron académicamente, sino que también fueron fundamentales para mi crecimiento personal. La quiero mucho y siempre le estaré agradecida.

A mis amigas del colegio Domi, Ibeth y Mabe, quiero agradecerles desde lo más profundo de mi corazón por demostrarme que la verdadera amistad trasciende más allá de las conversaciones diarias y las cosas superficiales. Gracias por tenderme su mano cuando más lo necesitaba y por sus palabras de aliento cada vez que sentía que me iba a rendir. Ustedes han sido mi 911, siempre dispuestas a acudir en mi ayuda sin importar la hora ni

el lugar. Su apoyo incondicional ha sido un pilar fundamental en mi vida, y no hay palabras suficientes para expresar cuánto valoro nuestra amistad. Anhele con todo mi corazón que sigamos siendo amigas para toda la vida y que continuemos construyendo recuerdos memorables juntas. Gracias por ser las personas maravillosas que son y por estar siempre a mi lado.

Lizbeth Vázquez, quiero agradecerte profundamente por ser mi primera amiga en la universidad y por enseñarme a no rendirme. Recuerdo con cariño nuestros días en el prepo, y siempre sonrío al pensar en ellos, porque fue tu apoyo el que me permitió continuar. Gracias por abrirme las puertas de tu casa, por convertirme en una hermana para mí y por siempre estar dispuesta a escuchar mis problemas. Tu amistad es un regalo que Dios me ha dado, y valoro inmensamente cada momento que hemos compartido. No tengo palabras suficientes para expresar cuánto aprecio todo lo que has hecho por mí y lo agradecida que estoy por tenerte en mi vida.

Micaela Toapanta, gracias por ser mi amiga desde primer semestre. A pesar de seguir carreras distintas, siempre has estado presente con tu apoyo y tus palabras de aliento. Gracias por traer luz a mi vida con tu alegría y por tu compañía tanto en los buenos momentos como en los más difíciles. Agradezco inmensamente a Dios por poder ser tu amiga, porque contigo he aprendido a ser fuerte y valiente. Me has demostrado que los verdaderos amigos son leales y que la verdadera amistad aún existe. Gracias por ser mi curita del corazón, te quiero hasta el infinito y más allá.

A mis amigos Stalin, Diana, José.N, Anahí, Jorge.M y Andrés, gracias por las risas, las conversaciones profundas, los desafíos superados y las alegrías compartidas que han hecho que la universidad sea verdaderamente especial. Su compañía ha sido un rayito de luz en mi camino, y los recuerdos que he creado con ustedes son tesoros que llevaré conmigo siempre.

Ismael Ramos y Gabriela Núñez, gracias por su valiosa amistad, su infinita paciencia y su guía durante el TIC. Su apoyo ha sido fundamental para mí, y no tengo palabras suficientes para agradecerles todo lo que han hecho. Gracias por estar a mi lado, por ofrecerme sus consejos y por brindarme su ayuda incondicional.

A mis amigos Karelys, José.L, David y Gisel, gracias por todos los momentos compartidos en la carrera, juntos hemos superado desafíos, celebrado éxitos y creado recuerdos.

Marco Molina, quiero agradecerle profundamente por enseñarme que crecer a veces duele, pero que los mejores diamantes surgen al estar sometidos a mucha presión. Sus consejos,

su fe en mí y sus palabras de aliento han sido fundamentales en este proceso. Gracias por por siempre estar dispuesto a ofrecerme su apoyo incondicional. Sus enseñanzas han sido una guía que me han ayudado a enfrentar los desafíos con valentía.

Doctora Sandra Procel, gracias ser mucho más que una profesora para mí. Su preocupación, su infinita paciencia y su dedicación han tenido un impacto profundo en mi vida. Gracias por ser una guía constante y por demostrarme, día tras día, que la educación va más allá de los libros y las aulas. Usted no es solo una profesora, sino una verdadera maestra de vida. Aprecio enormemente cada consejo, cada lección y cada momento que ha compartido conmigo. Su pasión por enseñar y su compromiso con sus estudiantes son inspiradores, y me siento muy afortunada de haber tenido la oportunidad de aprender bajo su tutela.

A mi hermana de otra madre, mi amiga desde hace 19 años, la persona que nunca ha soltado mi mano y ha sido testigo de todo mi camino y evolución. Sofía, no me alcanzan las palabras para agradecerte por siempre estar ahí para mí, secando mis lágrimas, creyendo en mí, y enseñándome el verdadero significado de la amistad. Tu apoyo incondicional y tu capacidad para escuchar mis problemas, así como estar presente cuando más te necesito, han sido un pilar en mi vida. Gracias por ser mi persona, mi alma gemela. Tu presencia me ha brindado fortaleza y alegría. La bondad, lealtad y amor inquebrantable que nos tenemos han hecho de nuestra amistad sea un tesoro invaluable. Aprecio cada momento compartido, cada risa, cada lágrima, y cada paso que hemos dado juntas. Anhele poder seguir compartiendo contigo hasta el último día de mi vida, te amo con todo mi corazón.

André Aguilar, quiero agradecerte profundamente por todo tu apoyo y por estar siempre a mi lado. Gracias por desvelarte conmigo, por consolarme en mis momentos de llanto, por cuidarme y por ser esa persona que me ha brindado un amor incondicional. Aprecio enormemente las horas enteras que pasaste a mi lado mientras yo trabajaba, gracias por tu paciencia y tu ayuda para resolver mis problemas. Gracias por enseñarme que el amor no es como en los cuentos de hadas; no es algo que se busca o se encuentra, sino algo que se construye a largo plazo. Tu amor y tu comprensión han sido una bendición en mi vida, y estoy inmensamente agradecida por todo lo que hemos compartido.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. | Objetivo general..... | 2 |
| 1.2. | Objetivos específicos..... | 2 |
| 1.3. | Alcance..... | 2 |
| 1.4. | Área de estudio..... | 3 |
| 2. | MARCO TEÓRICO..... | 5 |
| 2.1. | Conceptos generales..... | 5 |
| 2.1.1 | Cuenca hidrográfica..... | 5 |
| 2.1.2 | Red de Drenaje..... | 5 |
| 2.1.3 | Ciclo hidrológico..... | 7 |
| 2.1.4 | Balace Hídrico..... | 8 |
| 2.2 | Parámetros Hidrogeológicos..... | 8 |
| 2.2.1 | Transmisividad (T)..... | 8 |
| 2.2.2 | Almacenamiento específico (<i>ss</i>):..... | 9 |
| 2.2.3 | Capacidad de almacenamiento (S)..... | 9 |
| 2.3 | Principales conceptos que considerar en las aguas subterráneas..... | 9 |
| 2.3.1 | Porosidad (<i>n</i>)..... | 9 |
| 2.3.2 | Porosidad Efectiva (<i>ne</i>)..... | 9 |
| 2.3.3 | Gradiente Hidráulico (i)..... | 10 |
| 2.3.4 | Conductividad Hidráulica (K)..... | 10 |
| 2.4 | Acuíferos..... | 10 |
| 2.4.1 | Tipos de acuíferos..... | 11 |
| 2.5 | Pozos y sus tipos..... | 13 |
| 2.5.1 | Tipos de Pozos..... | 13 |
| 2.6 | Modelos Matemáticos..... | 15 |
| 2.6.1 | Construcción del Modelo Matemático..... | 16 |
| 2.6.2 | Modelación en <i>MODFLOW 6</i> | 20 |
| 3. | METODOLOGÍA..... | 21 |
| 3.1 | Levantamiento de información geológica..... | 21 |
| 3.2 | Levantamiento de información hidrogeológica..... | 23 |
| 3.3 | Modelación en <i>MODFLOW 6</i> | 24 |
| 4.1.1 | Interfaz de entrada (condiciones de borde)..... | 24 |

| | |
|--|----|
| 4. RESULTADOS | 39 |
| 4.1 Geología del área de estudio | 39 |
| 4.1.2 Descripción local | 39 |
| 4.1.3 Descripción litológica en el área de estudio | 49 |
| 4.2 Parámetros hidrogeológicos..... | 56 |
| 4.3 Modelo Matemático | 58 |
| 4.3.1 Balance Hídrico..... | 61 |
| 5. CONCLUSIONES | 63 |
| 6. RECOMENDACIONES..... | 64 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 65 |
| ANEXOS..... | 68 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Ubicación del área de estudio. Localización de los pozos y vertientes considerados en este trabajo. | 3 |
| Figura 2. Representación de la división de cuencas y subcuencas hidrográficas en el Ecuador (Cuenca Hidrográfica del río Pastaza, cuenca del río Chambo)..... | 6 |
| Figura 3. Red de drenaje de una cuenca hidrográfica (Cuenca del río Chambo). | 6 |
| Figura 4. Ciclo Hidrológico. Modificado de Freeze & Cherry (1979)..... | 7 |
| Figura 5. Diagrama de los tipos de acuíferos | 11 |
| Figura 6. Tipos de acuíferos según la porosidad: a) detrítico; b) fracturado; c) kárstico. Tomado de Poeter (2020). | 12 |
| Figura 7. Tipos de acuíferos según la presión. Modificado de Núñez (2021). | 13 |
| Figura 8. Tipos de pozos..... | 15 |
| Figura 9. Proceso de modelamiento matemático del flujo subterráneo de agua. Parte de la construcción de un modelo conceptual del acuífero, la compilación de datos previos, después se escoge el tipo de modelo y calibración, para finalmente probar la hipótesis. Tomado de (Winston, 2023). | 16 |
| Figura 10. Condiciones de borde aplicadas en la construcción del modelo matemático en este trabajo..... | 18 |
| Figura 11. Tipo de discretizaciones: a) elementos finitos; b) diferencias finitas; c) elementos de contorno. Tomado de Fetter (2001) y Anderson et al. (2015)..... | 19 |
| Figura 12. Interfaz principal de ModelMuse. | 20 |
| Figura 13. Flujo de trabajo de la metodología aplicada. | 22 |
| Figura 14. Modelo digital del terreno MDT del área de estudio que se utilizó como base para el modelo matemático..... | 25 |
| Figura 15. Ingreso de los datos iniciales para la modelación..... | 26 |
| Figura 16. Creación de la malla para la zona de estudio..... | 26 |
| Figura 17. División de la zona de estudio..... | 27 |
| Figura 18. Esquema de asignación del espesor a la litología y su simplificación. Modificado de Brandenburg (2020). | 28 |
| Figura 19. Modelación de la litología del área de estudio..... | 29 |
| Figura 20. Modelación del Sistema de Fallas en el área de estudio..... | 30 |
| Figura 21. Paquete de fallas..... | 30 |
| Figura 22. Ingreso de datos de pozos de extracción..... | 31 |
| Figura 23. Modelación de pozos en la zona de estudio..... | 31 |
| Figura 24. Ingreso de datos de la conductividad hidráulica de las formaciones de la CBRCH. | 32 |
| Figura 25. Valores de la conductividad hidráulica propuestos en la Tabla 4..... | 33 |
| Figura 26. Ingreso y modelación de la red de drenaje | 34 |
| Figura 27. Incorporación y modelación del río Chambo..... | 35 |
| Figura 28. Paquete de drenaje de la CBRCH..... | 35 |
| Figura 29. Ingreso de valores del nivel freático | 36 |
| Figura 30. Nivel piezométrico en el área de estudio..... | 37 |
| Figura 31. Ingreso de los datos de la recarga local | 37 |
| Figura 32. a) Modelo con el paquete CHD y RCH activos. b) Modelo preliminar con todos los paquetes de entrada activos. | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 33. Formaciones y Unidades Geológicas del área de estudio. Modificado de Egüez et al. (2017), Bablon et al. (2018), Nuñez (2021)..... | 39 |
| Figura 34. Formación Apagua: a) Turbiditas de la Formación Apagua ubicadas en la vía Latacunga – La Maná; b) Areniscas de la Formación Apagua ricas en feldespatos ubicadas en la vía Latacunga – La Maná. Tomado de Vallejo (2007)..... | 40 |
| Figura 35. Formación Yaruquíes: a) Areniscas; b) Canales con estratificación cruzada en surco de conglomerados y areniscas volcánicas. Tomado de Buenaño (2018)..... | 41 |
| Figura 36. Afloramiento en un paleolahar en la Formación Cizarán. Tomado de Salguero (2017) | 42 |
| Figura 37. Formación Riobamba. Tomado de Procel (2018) y Buenaño (2018) | 43 |
| Figura 38. Volcánicos del Igualta. Tomado de Salguero (2017)..... | 44 |
| Figura 39. Sedimentos del Río Chambo: a) brecha con clastos volcánicos andesíticos y metamórficos angulares; b) secuencia sedimentaria al margen del río Chambo. Tomado de Buenaño (2018). | 45 |
| Figura 40. Cangahua. Tomado de Procel (2018)..... | 46 |
| Figura 41. Volcánicos del Chimborazo. Tomado de Nuñez (2020)..... | 46 |
| Figura 42. Flujo de Lava de Chimborazo. Tomado de Barba (2006)..... | 47 |
| Figura 43. Volcánicos del Tungurahua. Tomado de Bablon et al. (2018)..... | 48 |
| Figura 44. Depósitos Cuaternarios. Tomado de Nuñez (2020). | 48 |
| Figura 45. Muestra de mano CBRCH (Ya) de la formación Yaruquíes | 49 |
| Figura 46. Muestra de mano CBRCH (RI) de la formación Riobamba | 50 |
| Figura 47. Muestra de mano CBRCH (RI2) de la formación Riobamba. | 51 |
| Figura 48. Muestra de mano CBRCH (LL) del flujo de lava del Chimborazo | 52 |
| Figura 49. Lámina delgada CBRCH (Ya) de la formación Yaruquíes en luz polarizada plana y luz polarizada cruzada..... | 53 |
| Figura 50. Lámina delgada CBRCH (RI) de la formación Riobamba en luz polarizada plana y luz polarizada cruzada..... | 54 |
| <i>Figura 51. Lámina delgada CBRCH (RI2) en luz polarizada plana y luz polarizada cruzada</i> | 55 |
| Figura 52. Lámina delgada CBRCH (LL) del flujo de lava del Chimborazo en luz polarizada plana y luz polarizada cruzada | 56 |
| Figura 53. Perfil de los tipos de acuífero de la CBRCH | 57 |
| Figura 54. Ubicación de los pozos en la zona de estudio. Perfil A-A` zona norte (Llío), Perfil B-B` zona centro (Riobamba), Perfil C-C` zona sur (Yaruquíes). | 59 |
| Figura 55. Nivel de agua representado por isopiezas en la CBRCH. | 60 |
| Figura 56. Nivel de agua representado por isopiezas en: Perfil A-A` zona norte (Llío), Perfil B-B` zona centro (Riobamba), Perfil C-C` zona sur (Yaruquíes). | 61 |
| Figura 57. Cálculo del Balance Hídrico realizado en MODFLOW 6 considerando la recarga local..... | 62 |
| Figura 58. Rangos de conductividad hidráulica y litología. Tomado de Heath (1983). | 69 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Información recopilada de Procel (2018) donde se indica la ubicación de los 16 pozos muestreados en los acuíferos de Llío-Guano, Riobamba y Yaruquíes | 23 |
| Tabla 2. Parámetros hidrogeológicos. Q, caudal; K, conductividad hidráulica; T, transmisividad, Trec, transmisividad recalculada; T, transmisividad calculada; NE nivel estático promedio. | 24 |
| Tabla 3. Espesores de las formaciones pertenecientes a la CBRCH y cálculo de espesores estimados | 27 |
| Tabla 4. Conductividad de las formaciones modeladas en la CBRCH | 32 |
| Tabla 5. Parámetros hidrogeológicos (T y S) calculados para las formaciones que constituyen acuíferos en la CBRCH. K, conductividad hidráulica (m/día); b, espesor del acuífero (m); <i>ne</i> , porosidad efectiva. | 57 |
| Tabla 6. Estimación de la velocidad de flujo de agua subterránea en las formaciones que constituyen acuíferos. | 58 |

RESUMEN

En este proyecto se propone un modelo matemático preliminar del movimiento del flujo subterráneo en la cuenca baja del río Chambo, provincia de Chimborazo (Ecuador) con base en el modelo conceptual del flujo subterráneo de Procel et al. (2023) con el fin de modelar la dinámica del flujo subterráneo, los niveles de agua y las principales unidades acuíferas. A través de información se recopila una base de datos geológicos e hidrogeológicos que se utilizaron para crear un modelo matemático de la cuenca en *MODFLOW 6*. Como resultado se determinó la Geología del área de estudio y se aportó con la descripción petrográfica de cuatro muestras de roca que representan las principales unidades que constituyen acuíferos. Se estimó los espesores de los estratos acuíferos y se determinó los parámetros hidrogeológicos. Finalmente, se construyó el modelo matemático de la CBRCH obteniendo los niveles de agua freático y piezométrico y el balance hídrico. Los resultados matemáticos se correlacionaron con los datos previos confirmando a través de la modelación, las características de los niveles acuíferos de la cuenca y su comportamiento como acuíferos libres en Llío-Guano, semiconfinados en Riobamba, y confinados en Yaruquíes. Además, se estableció que existe una diferencia en el balance hídrico si se considera únicamente la recarga local debido que existe un gran aporte de agua sobre los acuíferos desde la recarga regional, el volcán Chimborazo.

PALABRAS CLAVE: Modelo matemático, cuenca, flujo subterráneo, parámetros hidrogeológicos.

ABSTRACT

In this project, a preliminary mathematical model of the groundwater flow movement in the lower basin of the Chambo River, Chimborazo (Ecuador) is proposed based on the conceptual model of groundwater flow by Procel et al. (2023) to model the dynamics of groundwater flow, water levels, and the main aquifer units. Using previous information, a geological and hydrogeological database was used in the modeling of the basin in MODFLOW 6. The results include the Geology of the study area, the petrographic description of four rock samples from the principal units that constitute aquifers, the thicknesses of the aquifer strata, and the hydrogeological parameters. Finally, we determined the mathematical model, the phreatic and piezometric levels, and the water balance of the CBRCH. The mathematical results were correlated with previous data, confirming through modeling the characteristics of the aquifer levels in the basin and their behavior as unconfined aquifers in Lío-Guano, semi-confined aquifers in Riobamba, and confined aquifers in Yaruquíes. In addition, it was determined a difference in the water balance if only the local recharge was considered because there is a large contribution of water to the aquifers from the regional recharge, the Chimborazo volcano.

KEYWORDS: Mathematical model, basin, groundwater flow, hydrogeological parameters.

1. INTRODUCCIÓN

En los Andes de Ecuador, el desarrollo socioeconómico de la población se acompaña de la producción agrícola en zonas montañosas donde el principal recurso hídrico lo constituye el agua subterránea filtrada por los páramos y transportada cuenca abajo donde es aprovechada por las comunidades locales como recurso esencial y casi único para la vida y subsistencia de los ecosistemas (Hofstede et al., 1998; Buytaert et al., 2006; Bradley et al., 2006). Alrededor del 12% de la población mundial vive en áreas montañosas y depende en gran medida del agua subterránea (Poeter et al., 2020). No obstante, su estudio es limitado debido a las dificultades para perforar pozos en estas áreas y el mantenimiento de un monitoreo continuo de las condiciones hidrogeológicas del medio.

En el extremo sur de la región andina del Ecuador, en la provincia de Chimborazo, se localiza la cuenca baja del río Chambo (CBRCH), un importante sistema hídrico que abastece de agua a cerca de 332.776 habitantes (INEC, 2010) (Figura 1). En la cuenca, el agua subterránea se explota a través de 30 pozos perforados por la Empresa Metropolitana de Agua Potable y Alcantarillado de Riobamba (EP-EMAPAR) y el Gobierno Descentralizado de la Provincia de Chimborazo (Núñez, 2021) con un caudal de 0.22 m³/s en vertientes, y 0.09 m³/s en pozos (Procel et al., 2023).

La CBRCH constituye una cuenca hídrica en un contexto volcánico donde el sistema de agua subterránea nace en las cordilleras y fluye hacia el valle Interandino hasta la zona de descarga del río Chambo (Chidichimo et al., 2018). Los sistemas acuíferos se desarrollan en un relleno volcánico-sedimentario que se superpone a un basamento de roca metamórfica e ígnea. En las zonas de recarga, el agua de las precipitaciones y del deshielo glaciar es filtrada por el páramo, un ecosistema andino dentro del bioma de pastizales (Buytaert et al., 2006). En altitudes bajas, estos acuíferos abastecen de agua potable a los centros urbanos de Riobamba, Guano, Chambo, y proporcionan agua para riego y ganadería en las zonas rurales.

En el estudio del agua subterránea y su contexto en el medio físico por el que se filtra, transporta y circula, la construcción de modelos matemáticos permite comprender y predecir el comportamiento del agua mediante herramientas geométricas que brinden una descripción precisa y cuantitativa del funcionamiento de los acuíferos y el medio en el que se desarrollan (Brandenburg, 2020). En este trabajo se propone un modelo matemático preliminar del flujo de agua subterránea de la CBRCH con el objetivo de corroborar el modelo conceptual propuesto por Procel et al. (2023) utilizando información geológica e

hidrogeológica. Adicionalmente, se presenta una descripción litológica de las muestras de roca de las principales Formaciones Geológicas del área de estudio que se utilizó para confirmar el modelo matemático.

1.1. Objetivo general

Simular el comportamiento del flujo hídrico subterráneo en la cuenca baja del río Chambo mediante la aplicación de un modelo matemático preliminar.

1.2. Objetivos específicos

1. Definir las formaciones geológicas que están presentes en la zona de estudio,
2. Estimar los espesores de las formaciones geológicas para crear las superficies en el modelo,
3. Establecer valores de los parámetros hidrogeológicos para caracterizar al modelo,
4. Modelar la cuenca baja del río Chambo.

1.3. Alcance

En este proyecto se propone elaborar un modelo matemático preliminar del movimiento del flujo subterráneo en la CBRCH realizando un levantamiento bibliográfico de proyectos de titulación, informes técnicos, artículos científicos hidrológicos e hidrogeológicos sobre el área de estudio. El proyecto se basa en entender la dinámica del flujo subterráneo existente y visualizarlo en un modelo matemático. Este modelo comparará y verificará los datos de niveles de agua (niveles estáticos), así como las principales unidades acuíferas, diferenciando el tipo de acuífero (libre, confinado o semiconfinado) y zonas de recarga y descarga.

1.4. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca baja del río Chambo (CBRCH) localizada en la provincia de Chimborazo-Ecuador a 180 km del Distrito Metropolitano de Quito. Según el sistema de coordenadas universal de Proyección Transversal de Mercator (UTM), se encuentra en la zona 17 entre 9780000-9830000 m Norte y 730000-780000 m Este con un área de 1.500 km². De acuerdo con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la cuenca presenta temperaturas moderadas con una media anual de 12°C a 18°C. Precipitación anual moderada entre 500 mm y 1.000 mm con dos estaciones lluviosas principales de marzo a mayo y de octubre a diciembre y una estación seca de junio a septiembre (INAMHI, 2017) (Figura 1).

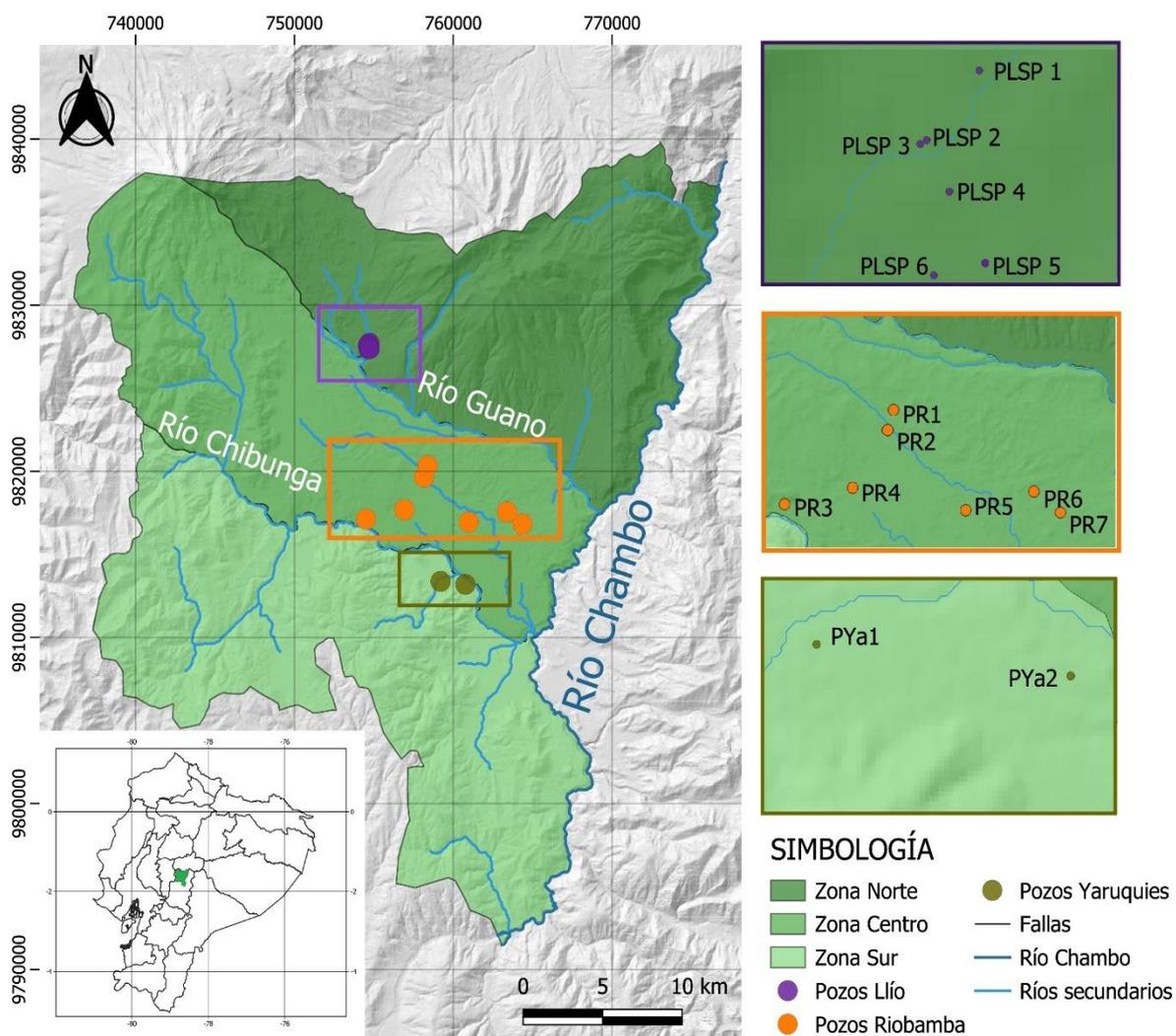


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Localización de los pozos y vertientes considerados en este trabajo.

La CBRCH tiene una importancia económica y social significativa para la región debido a que alberga diversas actividades industriales y comerciales como la ganadería, industria cementera, textil, turismo, manufactura y metalurgia que impulsan el desarrollo económico (Comité de la Subcuenca del río Chambo, 2015). Entre las principales fuentes de ingresos se destaca la agricultura con cultivos predominantes como maíz, papas y frutas que son cruciales para la sostenibilidad económica local.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos generales

2.1.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una unidad fisiográfica delimitada por divisiones topográficas que limitan áreas de terreno drenadas por un río principal y sus afluentes (Arai et al., 2012). Constituye un área geográfica que incluye todos los drenajes que convergen en un solo punto a una elevación más baja conocido como punto de cierre. Se considera también una unidad de estudio del movimiento del agua dentro del ciclo hidrológico debido a que la mayor parte del agua que se descarga de la cuenca se origina de la precipitación dentro de ella (Liu, 2015).

La cuenca hidrográfica representa la unidad “natural” para la planificación y gestión de los recursos hídricos de las sociedades (Molle, 2009). En Ecuador, el Ministerio del Ambiente y el Consejo Nacional de Recursos Hídricos definieron en 2002 con base en la homogeneidad climática y espacial, 79 cuencas hidrográficas. 49% del área total del país drenan las cuencas que se vierten en el Pacífico y 51%, las vertientes que se vierten en el Amazonas. Con el objetivo de disponer de una mayor capacidad de gestión de los recursos hídricos se consideraron 137 subcuencas que corresponden a unidades de drenaje de menor superficie que constituyen tributarios de las cuencas hidrográficas (Figura 2).

2.1.2 Red de Drenaje

La red de drenaje se define como el conjunto de todos los canales de agua en una cuenca hidrográfica, incluyendo ríos principales y secundarios (Figura 3). Estas redes se forman y organizan según la topografía, Geología, y clima de una región (Chorley, 1971). Influye directamente en la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y en la escorrentía superficial. La infiltración ocurre cuando llueve, parte del agua penetra en el suelo, llenando los espacios vacíos y recargando los acuíferos subterráneos. Sin embargo, si el suelo ya está lleno de agua o es muy compacto y no deja pasar el agua, esta no puede infiltrarse y se queda en la superficie generando la escorrentía superficial.

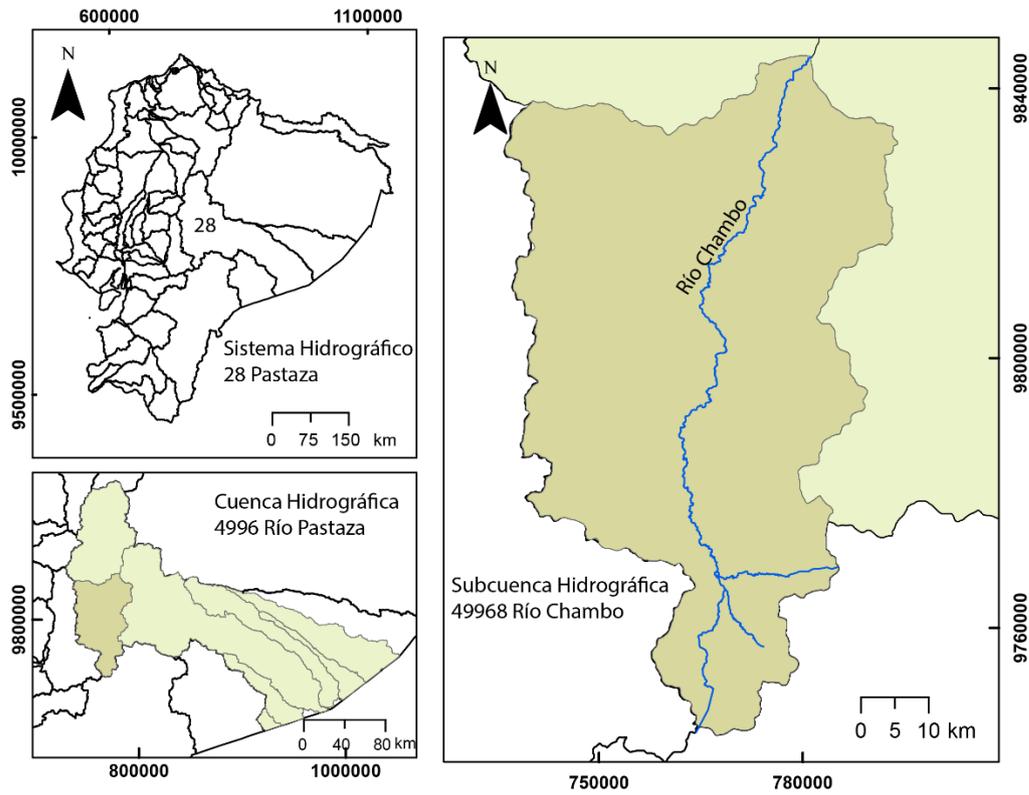


Figura 2. Representación de la división de cuencas y subcuencas hidrográficas en el Ecuador (Cuenca Hidrográfica del río Pastaza, cuenca del río Chambo).

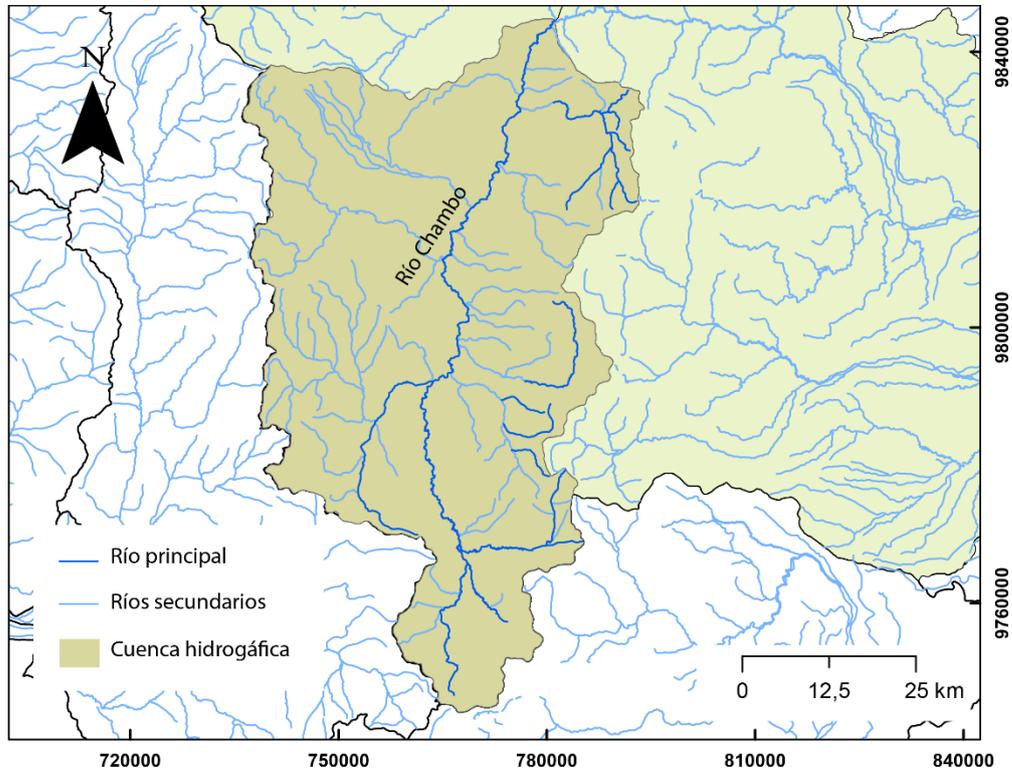


Figura 3. Red de drenaje de una cuenca hidrográfica (Cuenca del río Chambo).

2.1.3 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico describe el proceso continuo de movimiento del agua a escala global, regional y local (Thornthwaite & Mather, 1955; Manahan, 2010). Este movimiento es inducido por la energía calórica del sol que transforma el agua de las superficies oceánicas y terrestres en vapor transportado por el viento y condensado en forma de nubes para después caer como precipitación sobre los continentes donde parte permanece temporalmente como nieve y humedad del suelo y otra fracción se infiltra por debajo de la superficie como agua subterránea (Trenberth & Asrar, 2014). El exceso de la precipitación forma los ríos que descargan el agua en los océanos (Manahan, 2010) (Figura 4).

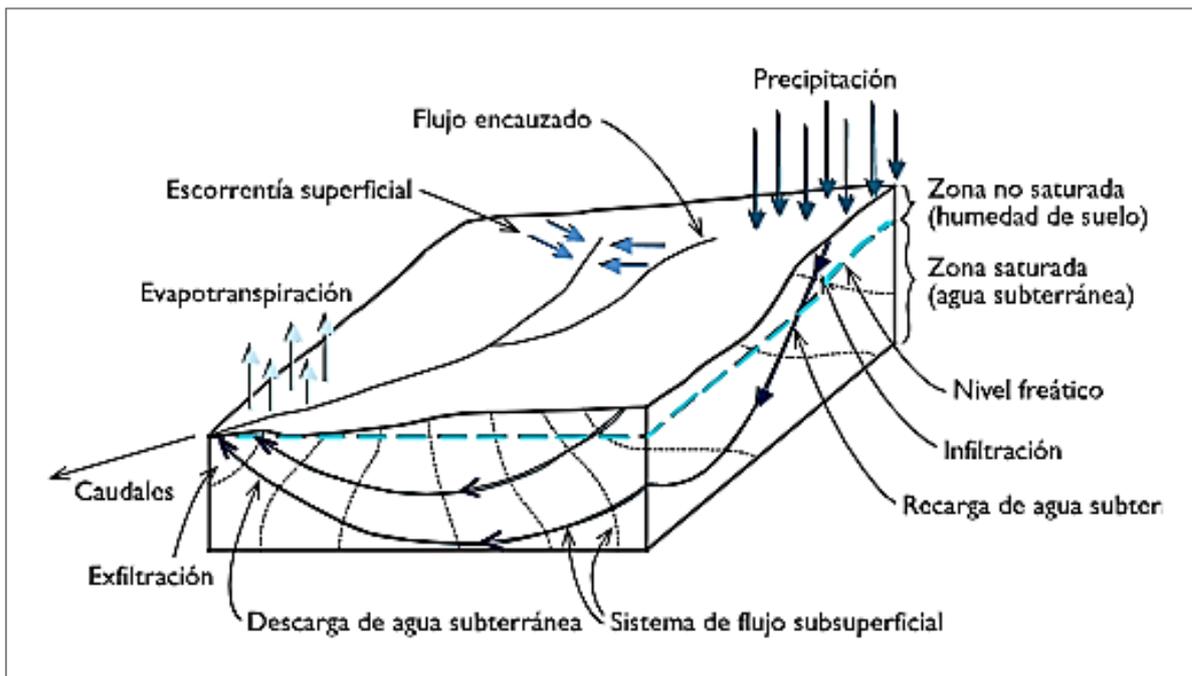


Figura 4. Ciclo Hidrológico. Modificado de Freeze & Cherry (1979).

2.1.3.1 Componentes del Ciclo Hidrológico

Precipitación. Incluye aguas meteóricas que caen a la superficie en forma de lluvia, nieve y granizo. Es característico para el inicio del ciclo hidrogeológico y afecta directamente los procesos de recarga y el dinamismo del flujo subterráneo (Freeze & Cherry, 1979) (Figura 4).

Evapotranspiración. Proceso que combina la evaporación del agua desde superficies terrestres y cuerpos de agua con la transpiración de agua desde las plantas hacia la atmósfera (Brutsaert, 2005) (Figura 4).

Infiltración. Proceso mediante el cual el agua de precipitación se incorpora al suelo desde la superficie terrestre, además recarga a los acuíferos y mantiene de los niveles de agua subterránea (Freeze & Cherry, 1979) (Figura 4).

Escorrentía Superficial. Desplazamiento del agua sobre la superficie terrestre que se dirige hacia sistemas acuáticos como ríos, lagos y océanos (Dunne & Leopold, 1978) (Figura 4).

Escorrentía Subterránea. Desplazamiento del agua bajo la superficie terrestre a través de formaciones geológicas, que nutren los cuerpos de agua superficiales. (Fetter, 2001) (Figura 4).

2.1.4 Balance Hídrico

El balance hídrico es una herramienta utilizada para comprender las características de una cuenca hidrográfica aplicando el principio de conservación de masa o ecuación de continuidad (Rose, 2004). Según este principio, cualquier diferencia entre las entradas y salidas de agua se refleja en un cambio en el almacenamiento de agua en el área de estudio (UNESCO, 1988; Simón, 2010) (Ecuación 1).

$$\Delta S = \textit{Entradas} - \textit{Salidas} \quad (\textit{Ecuación 1})$$

donde, ΔS representa el cambio del almacenamiento de agua, las entradas corresponden a la precipitación y las salidas a la evapotranspiración, escorrentía superficial y escorrentía subterránea.

2.2 Parámetros Hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos describen el comportamiento del flujo de agua subterránea a través del medio poroso. Incluyen Transmisividad (T) y Almacenamiento (S).

2.2.1 Transmisividad (T)

Se define como la relación de la conductividad hidráulica (K) y el espesor saturado del acuífero (b) y sirve para evaluar el rendimiento de un acuífero (Bear, 1972). Esta propiedad refleja la facilidad con la que el agua puede moverse a través del acuífero (Ecuación 2).

$$T = K * b \quad (\textit{Ecuación 2})$$

2.2.2 Almacenamiento específico (s_s):

Se describe como el volumen de agua que una unidad de volumen del acuífero libera o almacena en respuesta a una unidad de cambio en la carga hidráulica (Domenico & Schwartz, 1998).

2.2.3 Capacidad de almacenamiento (S)

Indica el volumen total de agua que puede liberar o almacenar un acuífero por cada unidad de superficie cuando cambia el nivel del agua subterránea y se expresa de acuerdo con la ecuación 3.

$$S = s_s * b \quad \text{(Ecuación 3)}$$

2.3 Principales conceptos que considerar en las aguas subterráneas

El movimiento del flujo subterráneo contempla la aplicación de conceptos generales para el flujo y el medio por el que circula. Para el agua se describe: densidad (ρ), viscosidad (μ) y compresibilidad (β); y para el medio poroso: porosidad (n), permeabilidad intrínseca (k) y compresibilidad (α) (Freeze & Cherry, 1979). Todos los demás parámetros se derivan de estas propiedades y en este contexto se consideran los conceptos de porosidad (n), porosidad efectiva (n_e), gradiente hidráulico (i), y conductividad hidráulica (K).

2.3.1 Porosidad (n)

Se define como la relación entre el volumen total (V_T) de una roca o sedimento y el volumen compuesto por espacios vacíos o poros (V_v), los cuales pueden contener agua o aire (Freeze & Cherry, 1979) (Ecuación 4).

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

2.3.2 Porosidad Efectiva (n_e)

La porosidad efectiva es la porción del volumen total de una roca que está interconectada y permite el flujo de agua excluyendo los poros aislados. Esta característica es esencial para evaluar la capacidad de almacenamiento y permeabilidad de formaciones geológicas como acuíferos (Fetter, 2001) (Ecuación 5).

$$n = \frac{V_{ve}}{V_T} \quad (\text{Ecuación 5})$$

2.3.3 Gradiente Hidráulico (i)

Este concepto se define como la diferencia de la altura del nivel del agua (dh) entre dos puntos dividida por la distancia horizontal (dl) entre ellos, actuando como una medida de la fuerza de flujo de agua a través de un medio poroso (Bear, 1972) (Ecuación 6).

$$i = \frac{dh}{dl} \quad (\text{Ecuación 6})$$

2.3.4 Conductividad Hidráulica (K)

Indica la capacidad de un material poroso para transmitir agua bajo un gradiente hidráulico, dependiendo tanto de las propiedades del medio como del fluido (Bear, 1972). Factores como el tamaño de los poros y la viscosidad del fluido influyen significativamente en la conductividad hidráulica, determinando su capacidad de permitir el paso del agua (Freeze & Cherry, 1979) (Ecuación 7).

$$K = k \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde k es la permeabilidad intrínseca, ρ es la densidad del agua (1 kg/m^3), μ la viscosidad dinámica, y g la gravedad.

A través de la conductividad hidráulica se calcula la transmisividad (T) al multiplicar por el espesor saturado del acuífero (b) como se indica en la ecuación 8.

$$T = K * b = k \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) * b \quad (\text{Ecuación 8})$$

2.4 Acuíferos

Un acuífero es un estrato o formación geológica permeable y saturada con la capacidad de almacenar y transmitir grandes volúmenes de agua. Estos acuíferos pueden estar compuestos por sedimentos como grava, arena y limo, o por rocas ígneas, sedimentarias

o metamórficas, volcánicas, volcanosedimentarias que permiten el flujo de agua a través de sus fracturas y porosidad (Custodio & Llamas, 1976).

2.4.1 Tipos de acuíferos.

La clasificación de los acuíferos está determinada por la presión hidrostática, porosidad, geometría, litología, estratigrafía y estructuras geológicas (Figura 5). La litología influye en la porosidad y conductividad hidráulica de las formaciones al definir el tamaño de los granos, la composición mineral y la densidad de los sedimentos. La estratigrafía permite entender las relaciones geométricas y cronológicas entre los diferentes estratos lo que facilita la identificación de las unidades hidrogeológicas. Las estructuras geológicas como fracturas, pliegues y fallas afectan el flujo del agua subterránea al crear barreras que impiden su movimiento o canales que lo faciliten (Freeze & Cherry, 1979).

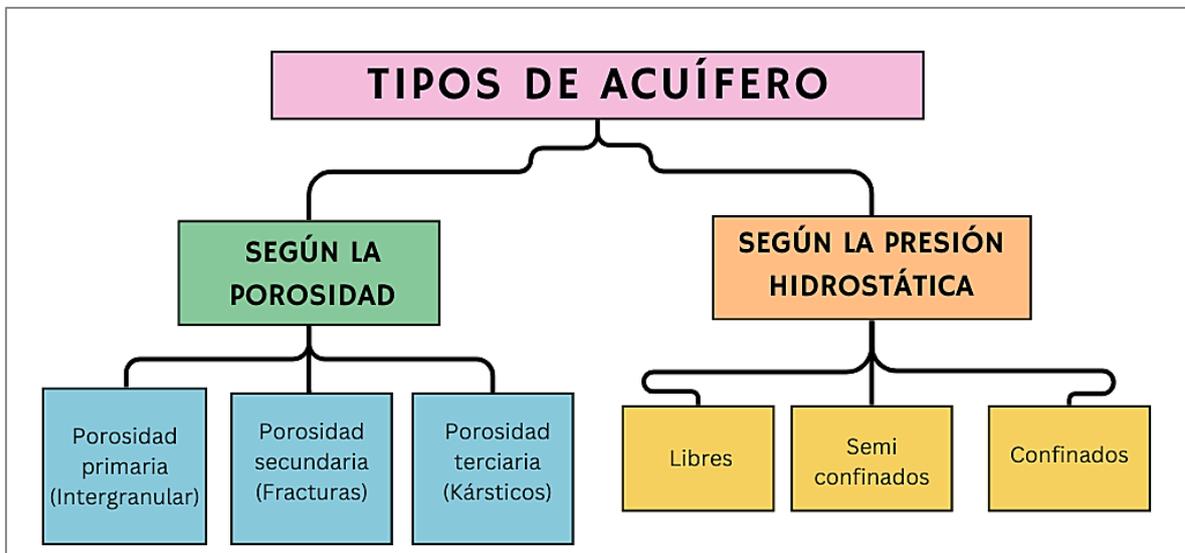


Figura 5. Diagrama de los tipos de acuíferos

2.4.1.1 Clasificación de acuíferos según su porosidad

La clasificación de acuíferos según su porosidad se basa en las características físicas del medio geológico que compone el acuífero, específicamente en su capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea (Custodio & Llamas, 1976).

Los acuíferos detríticos están compuestos por materiales no consolidados como arenas y gravas, presentan una porosidad intergranular que permite un alto flujo de agua debido a su alta porosidad y permeabilidad (Freeze & Cherry, 1979) (Figura 6a). En contraste, los acuíferos fisurados, presentes en rocas consolidadas como basaltos y areniscas, dependen del grado y extensión de las fracturas para su porosidad y conductividad hidráulica (Todd & Mays, 2005) (Figura 6b). Por último, los acuíferos kársticos se forman

en rocas carbonatadas como la caliza donde la disolución de la roca crea un sistema de poros y cavidades con alta porosidad secundaria permitiendo una rápida transmisión de agua (Ford & Williams, 2007) (Figura 6c).

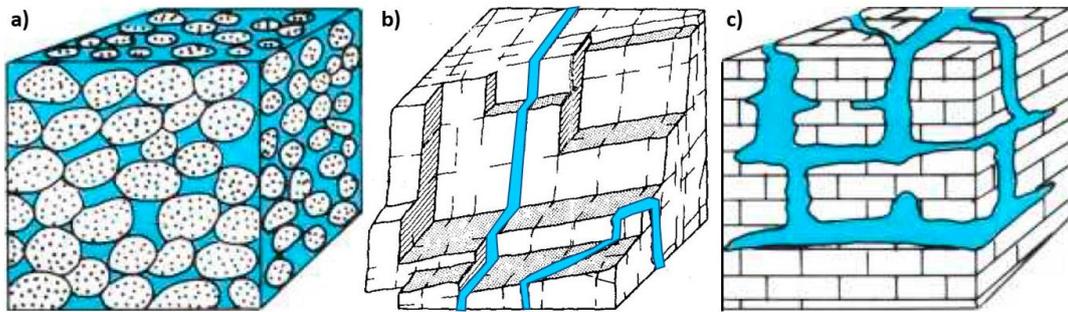


Figura 6. Tipos de acuíferos según la porosidad: a) detrítico; b) fracturado; c) kárstico. Tomado de Poeter (2020).

2.4.1.2 Clasificación de acuíferos según la Presión Hidrostática

La clasificación de acuíferos según la presión hidrostática se basa en la presión del agua contenida dentro del acuífero y cómo ésta influye en el movimiento del agua subterránea. Los acuíferos libres presentan su superficie freática en contacto directo con la atmósfera, manteniendo una presión hidrostática equivalente a la presión atmosférica (Freeze & Cherry, 1979) (Figura 7). En contraste, los acuíferos confinados están cubiertos por capas impermeables, lo que genera una presión hidrostática superior a la atmosférica (Todd & Mays, 2005) (Figura 7). Los acuíferos semiconfinados, ubicados entre estos dos extremos, están cubiertos por una capa permeable y una capa impermeable que permite un flujo limitado de agua, manteniendo una presión hidrostática intermedia (Fetter, 2001) (Figura 7).

Una variación de acuífero libre corresponde a acuíferos colgados que se forman como lentes saturados delimitados por un estrato impermeable de pequeña extensión en un estrato de mayor conductividad hidráulica (Freeze & Cherry, 1979) (Figura 7). Las formaciones geológicas que se encuentren saturadas, pero son incapaces de transmitir cantidades significativas de agua se denominan acuícluidos. Por otro lado, se denominan acuitardos a los estratos que tienen una permeabilidad baja, pero pueden transmitir cantidades de agua limitadas a tasas muy bajas (Freeze & Cherry, 1979) (Figura 7).

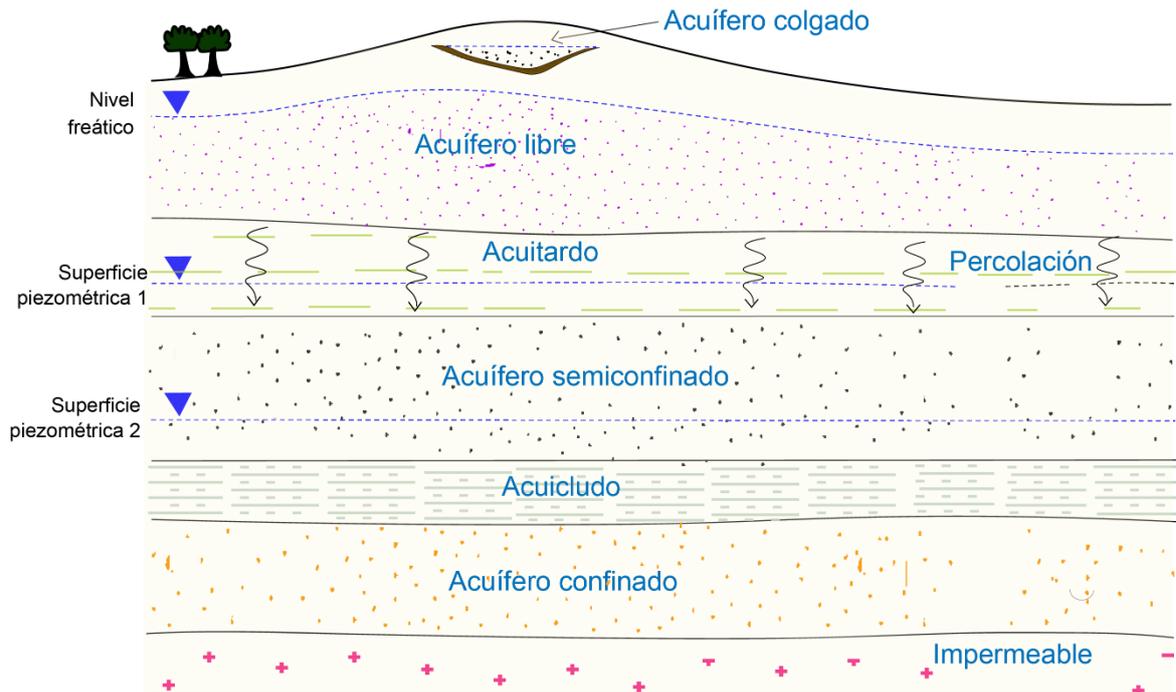


Figura 7. Tipos de acuíferos según la presión. Modificado de Núñez (2021).

2.5 Pozos y sus tipos

De acuerdo con Sharp (2023), un pozo corresponde a cualquier excavación cilíndrica construida con el propósito de explorar zonas que puedan producir agua subterránea para el abastecimiento de agua para consumo humano. Otras aplicaciones incluyen abastecimiento para riego, suministros industriales, energía geotérmica, inyección de agua a yacimientos de petróleo, limpieza de acuíferos, recarga artificial de acuíferos, y monitoreo de los niveles de agua y calidad del agua (Misstear et al., 2017).

2.5.1 Tipos de Pozos

2.5.1.1 Pozo común

Es un tipo de excavación vertical o inclinada que se realiza en el suelo para acceder a recursos subterráneos, principalmente agua (Driscoll, 1986) (Figura 8).

2.5.1.2 Calicata

Son excavaciones realizadas mediante medios mecánicos convencionales que permiten la observación directa del terreno a determinadas profundidades. Este método facilita la toma de muestras y la realización de ensayos *in situ* (González de Vallejo, 2004) (Figura 8).

2.5.1.3 Pozo tubular

Pozos de agua que se perforan utilizando maquinaria y se instala una tubería (generalmente de acero, PVC, o plástico) que recubre todo el pozo (Figura 8).

2.5.1.4 Pozo de monitoreo

Pozos de observación que son utilizados para registrar los niveles de agua y las condiciones de flujo, así como para recoger muestras con el fin de analizar la calidad del agua subterránea y evaluar las propiedades hidráulicas de los estratos acuíferos (National Research Council, 1984) (Figura 8).

2.5.1.5 Pozo de bombeo

Es un tipo de pozo diseñado específicamente para la extracción de agua subterránea mediante el uso de bombas manuales o motorizadas (Fetter, 2001) (Figura 8).

2.5.1.6 Pozo totalmente penetrante

Pozos cuya sección filtrante cubre toda la extensión del acuífero. Una variación constituye los pozos parcialmente penetrantes que no penetran por completo el acuífero y los pozos incompletos que penetran totalmente el acuífero, sin embargo, los filtros no se localizan en toda su extensión (se consideran como parcialmente penetrantes) (Driscoll, 1986) (Figura 8).

2.5.1.7 Pozo artesiano

Un pozo artesiano se caracteriza por la presión interna en un acuífero confinado la cual es suficiente para elevar el agua por encima del nivel del acuífero, aunque no necesariamente hasta la superficie. El agua sube dentro del pozo sin requerir bombeo adicional (Todd & Mays, 2005) (Figura 8).

2.5.1.8 Pozo surgente

Se los conoce también como pozos artesianos fluyentes, donde la presión del acuífero confinado supera la elevación del terreno circundante, permitiendo que el agua emerja en la superficie de manera continua y espontánea (Freeze & Cherry, 1979) (Figura 8).

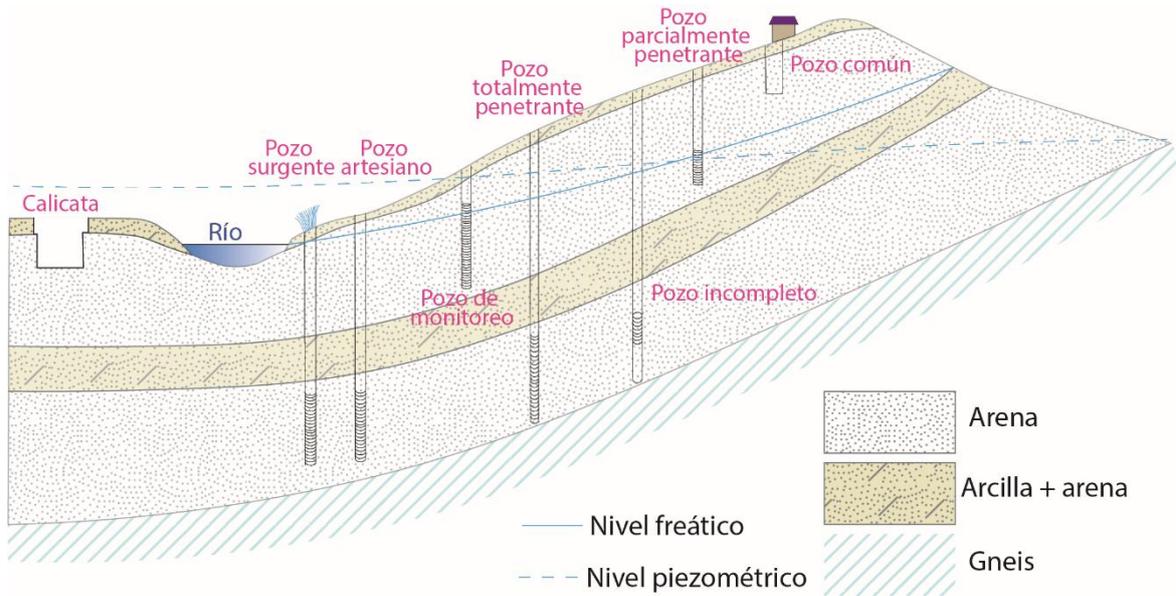


Figura 8. Tipos de pozos.

2.6 Modelos Matemáticos

Un modelo matemático es una herramienta utilizada para representar y analizar sistemas complejos mediante el uso de ecuaciones y algoritmos (Brandenburg, 2020). En el ámbito de la hidrogeología, los modelos matemáticos simulan el flujo de agua subterránea, la evaluación de la recarga y descarga de acuíferos y el medio por el que circulan las aguas subterráneas.

Estos modelos se basan en procesos numéricos establecidos que definen el sistema de aguas subterráneas, incluyendo su dinámica y características específicas (Winston, 2023). El proceso de modelado comienza con el desarrollo de un modelo conceptual claro y conciso, que incorpora todos los procesos relevantes del fenómeno físico que se está estudiando (Figura 9). El modelo conceptual proporciona una base estructurada sobre la cual se construye el modelo matemático.

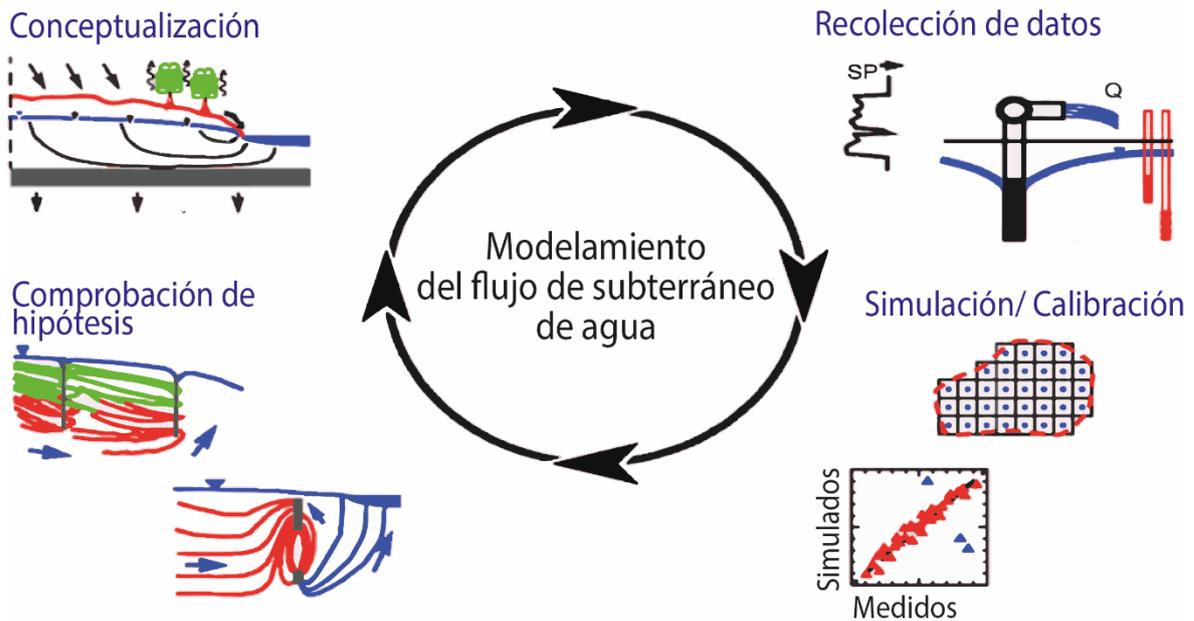


Figura 9. Proceso de modelamiento matemático del flujo subterráneo de agua. Parte de la construcción de un modelo conceptual del acuífero, la compilación de datos previos, después se escoge el tipo de modelo y calibración, para finalmente probar la hipótesis. Tomado de (Winston, 2023).

2.6.1 Construcción del Modelo Matemático

La construcción de un modelo matemático en hidrogeología utiliza los siguientes parámetros.

2.6.1.1 Ecuaciones diferenciales

Ley de Darcy. Es una medida empírica que describe la velocidad del agua al transmitirse en un medio poroso y se determina por la relación entre el gradiente y conductividad hidráulica (Ecuación 9).

$$V_D = -K \frac{dh}{dl} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde V_D es la velocidad de Darcy, K es la conductividad hidráulica de la formación geológica y $\frac{dh}{dl}$, el gradiente hidráulico (Freeze & Cherry, 1979).

Principio de la continuidad. Establece que cualquier cambio en la cantidad de agua en una zona específica debe ser igual a la diferencia entre la cantidad de agua que entra y la que sale de esa zona (Todd & Mays, 2005) (Ecuación 10).

$$\frac{dp}{dt} + \nabla \cdot (pv) = 0 \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Donde, p es la densidad del agua, t el tiempo, v el vector de velocidad del flujo de agua y ∇ el operador divergente que mide la tasa neta de salida de flujo de un punto.

Al considerar un flujo constante y una densidad uniforme del agua, la ecuación 10 se simplifica de acuerdo con la ecuación 11.

$$\nabla \cdot q = 0 \quad \text{(Ecuación 11)}$$

Donde, q es el vector del flujo de Darcy, el cual describe el flujo volumétrico del agua subterránea.

Al combinar la ecuación de continuidad con la ley de Darcy se obtiene la ecuación de flujo de agua subterránea (Ecuación 12).

$$\nabla \cdot (K \nabla h) = \frac{dh}{dt} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Donde, ∇ es el operador divergente, K la conductividad hidráulica, ∇h el gradiente hidráulico, y $\frac{dh}{dt}$ la tasa de cambio de la carga hidráulica con respecto al tiempo.

Además de las ecuaciones diferenciales, se emplean ecuaciones algebraicas para resolver las variables y parámetros necesarios. Estas ecuaciones permiten la interpretación y manipulación de los datos obtenidos de campo y de las condiciones iniciales del sistema acuífero.

2.6.1.2 Condiciones de borde

Son esenciales para definir el estado del sistema al inicio de la simulación y en sus límites espaciales. Estas condiciones incluyen factores como los niveles piezométricos iniciales, la recarga y descarga del acuífero y las características de los límites físicos del sistema (Anderson & Woessner, 1992) (Figura 10).

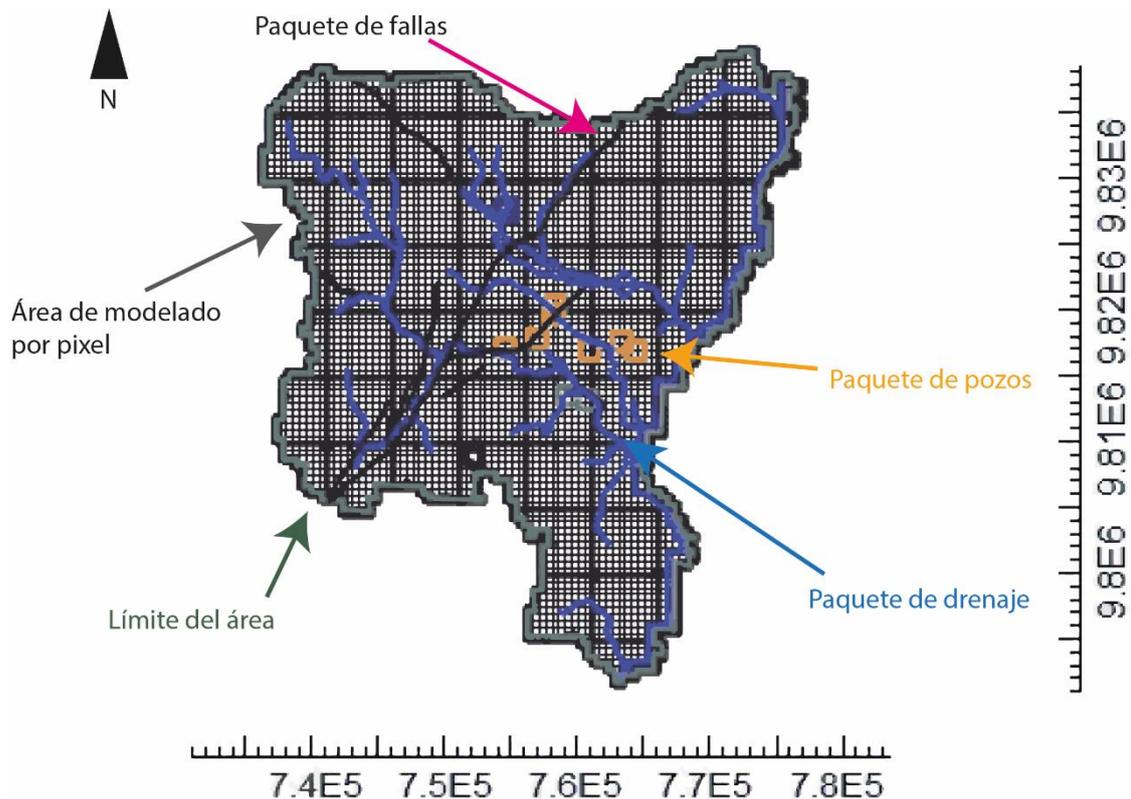


Figura 10. Condiciones de borde aplicadas en la construcción del modelo matemático en este trabajo.

2.6.1.3 Discretización

Convierte las ecuaciones diferenciales en un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas numéricamente. Los métodos de discretización comúnmente utilizados incluyen los métodos de diferencias finitas, elementos finitos, diferencias finitas integradas, elementos de contorno y otros que se basan en funciones bases que permiten calcular soluciones precisas en nodos adyacentes. (Bear & Verruijt, 1987) (Figura 11).

Diferencias Finitas. El método de diferencias finitas es una técnica numérica utilizada para resolver ecuaciones diferenciales de manera aproximada. Este método implica dividir el dominio continuo en una serie de puntos discretos o nodos y aproximar las derivadas en estos puntos, esto permite transformar las ecuaciones diferenciales originales en un conjunto de ecuaciones algebraicas más simples. Estas ecuaciones algebraicas se resuelven para obtener valores aproximados de la variable en los nodos (Fetter, 2001) (Figura 11b).

Diferencias Finitas Integradas. Este método reemplaza el medio continuo con regiones arbitrarias e irregulares alrededor de cada punto de la malla, denominadas volúmenes de control, lo que puede ocasionar complicaciones en el ajuste y la entrada de datos debido a

la necesidad de definir correctamente los volúmenes de control y las propiedades en cada nodo (Anderson & Woessner, 1992) (Figura 11b).

Elementos Finitos. El método de elementos finitos se utiliza para resolver problemas complejos al dividir el área de interés en pequeñas partes llamadas elementos, y en cada uno de estos elementos se definen puntos específicos llamados nodos. Las ecuaciones se construyen utilizando estos nodos, lo que puede ocasionar que el proceso de resolución sea más complejo debido a la cantidad de cálculos que se necesitan (Fetter, 2001) (Figura 11a).

Elementos de Contorno. Formula ecuaciones basándose en métodos de integración que se aplican al contorno del dominio del problema, en lugar de todo el volumen como se hace en otros métodos (Becker, 1992) (Figura 11c).

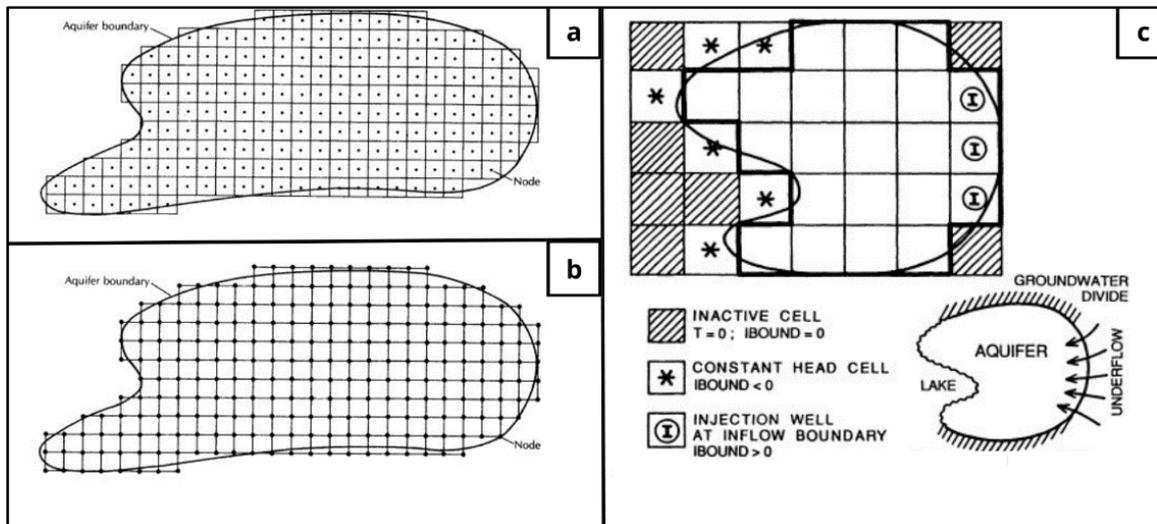


Figura 11. Tipo de discretizaciones: a) elementos finitos; b) diferencias finitas; c) elementos de contorno. Tomado de Fetter (2001) y Anderson et al. (2015).

2.6.1.4 Malla de discretización

La malla de discretización define el espacio en que se resuelve el modelo. Esta malla puede ser estructurada o no estructurada, y su resolución depende de la complejidad del sistema. En hidrogeología, la malla se utiliza para modelar el flujo de agua subterránea en un acuífero. Al dividir el acuífero en pequeñas celdas, se puede aplicar la ecuación de Darcy en cada celda para calcular el flujo de agua, lo que permite simular su movimiento a través del acuífero. (Wang & Anderson, 1982).

2.6.2 Modelación en MODFLOW 6

MODFLOW 6 es un programa desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), para simular de manera precisa, confiable y eficiente el flujo de agua subterránea (Winston, 2023). Esta sexta versión permite incluir un número ilimitado de modelos dentro de una simulación, ya sean independientes, interactivos o estrechamente integrados a nivel de matriz. La información entre modelos se transfiere mediante objetos de intercambio, lo que facilita el desarrollo y uso de los modelos de manera independiente, esto permite acoplar un modelo de aguas subterráneas a escala regional con varios modelos a escala local, o integrar modelos de flujo de agua superficial con modelos de flujo de agua subterránea (Winston, 2023).

Para modelar en *MODFLOW 6* se comienza definiendo el dominio del modelo y creando una malla tridimensional de celdas, especificando el número de filas, columnas y capas. Después, se ingresan las condiciones iniciales y de contorno, junto con la conductividad hidráulica, la porosidad, los datos de recarga y descarga, precipitación y los caudales de los pozos. Utilizando la interfaz gráfica *ModelMuse* (v 5.2) (Figura 12), se crean los archivos de entrada necesarios, permitiendo la gestión independiente de los datos espaciales y temporales. Una vez configurado, se ejecuta el modelo para simular el flujo de agua subterránea y se calibra ajustando los parámetros para mejorar la concordancia con los datos observados. Finalmente se analizan los resultados para comprender el comportamiento del flujo.

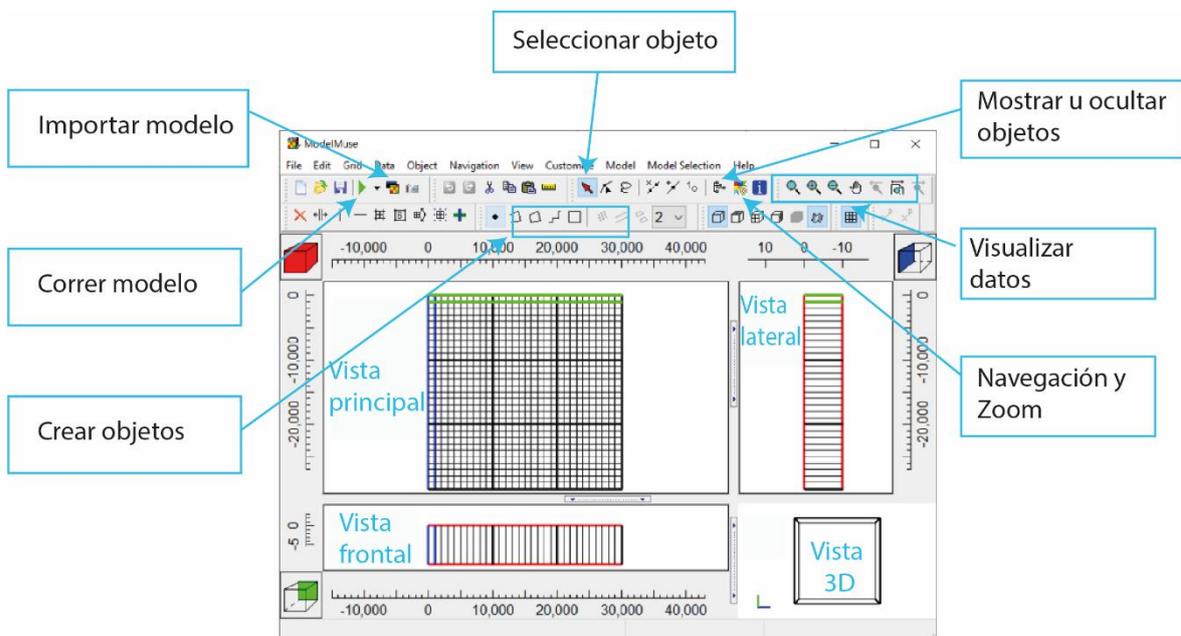


Figura 12. Interfaz principal de ModelMuse.

3. METODOLOGÍA

Este trabajo considera el modelo conceptual del flujo subterráneo en la cuenca baja del río Chambo, provincia de Chimborazo (Ecuador) publicado por Procel et al. (2023), y los trabajos de Chidichimbo et al. (2018) y Mendoza (2016). A través de los resultados presentados en estos trabajos se recopila una base de datos geológicos e hidrogeológicos que se utilizaron en la modelización de la cuenca. A continuación, se detalla los métodos y técnicas utilizadas para las fases relacionadas con los objetivos específicos de la investigación: Describir la Geología del área de estudio, estimar los espesores de los estratos, determinar los parámetros hidrogeológicos y construir el modelo matemático (Figura 13).

3.1 Levantamiento de información geológica

La evaluación expedita de la geología regional y local de la CBRCH se realizó a través de la consulta y análisis de mapas geológicos a nivel regional como el Mapa Geológico del Ecuador de Egeuz et al. (2017) a escala 1:1.000.000; la Hoja Geológica de Chimborazo de Randel y Lozada (1976) a escala 1:100.000; el Mapa de Volcanes Cuaternarios del Ecuador Continental de Bernard y Andrade (2011) a escala 1:1.000.000; y la Hoja Geológica de Riobamba de Sosa y Guevara (1973) a escala 1:100.000.

Se utilizaron mapas geológicos locales como el Mapa Geológico de Guano Salguero (2017) a escala 1: 50.000 y el Mapa geológico del Basamento Metamórfico de la Cordillera Real, al este de Chambo, Provincia de Chimborazo de Yáñez (2016) a escala 1:50.000. Además, se empleó los mapas de uso de suelo homogeneizados y estandarizados por Procel (2018).

Todos los archivos digitales se integraron al software de código libre QGIS (versión 3.34.3) adoptando el sistema de referencia de coordenadas (SRC), proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), Datum WGS84 Zona 17S.

Las informaciones sobre la Geología local, así como la estratigrafía, litología y estructuras geológicas fueron complementadas analizando los trabajos de Nuñez (2020), Salguero (2017); Yáñez (2016), Naranjo (2013), Espinosa (2022), Dunkley y Gaibor (1997), Aspden et al. (1997), Aspden y Litherland (1992), Spikings et al. (2015), Winkler et al. (2005), Bablon et al. (2018), Chidichimo et al. (2018) e Ibarra et al. (2015).

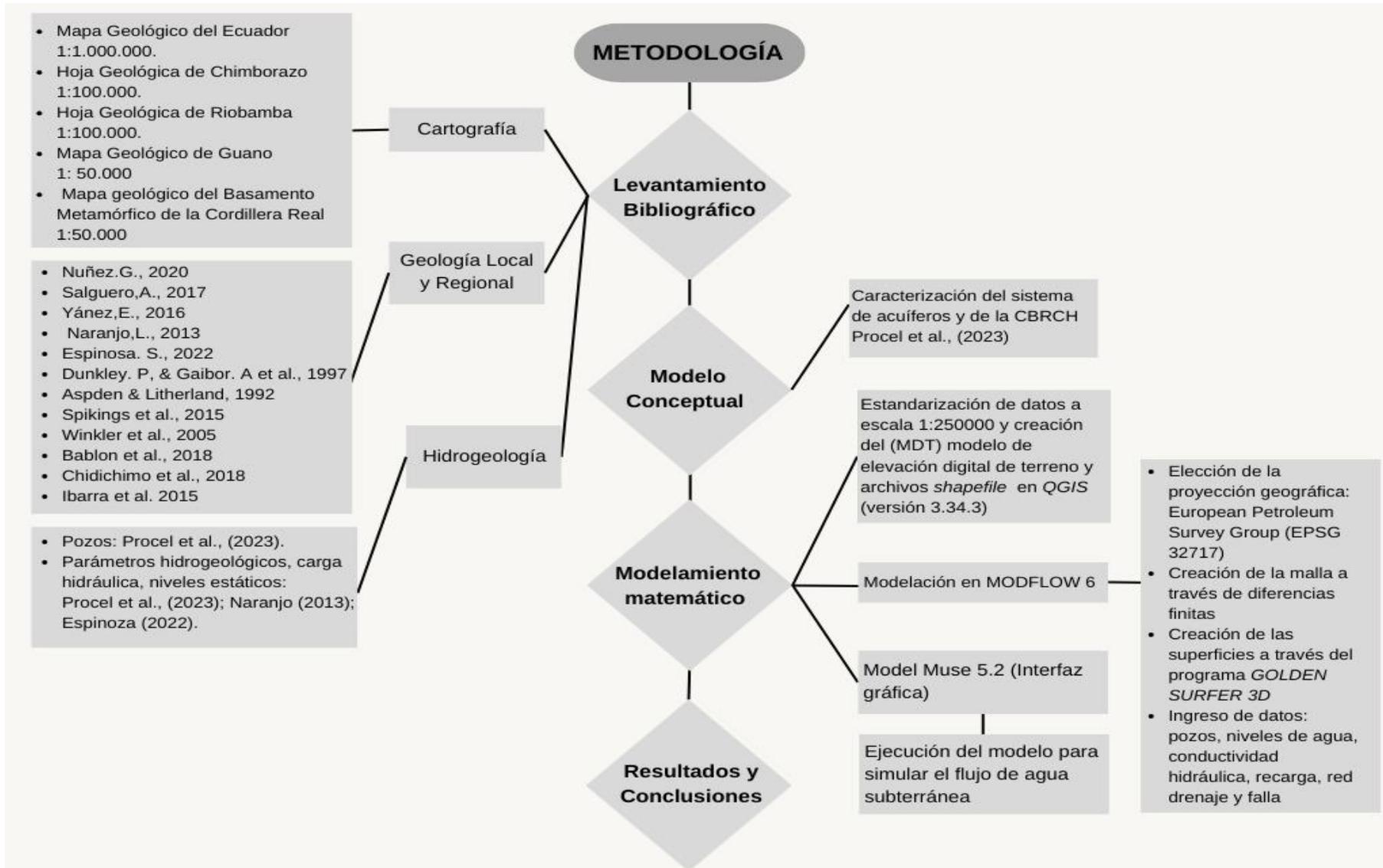


Figura 13. Flujo de trabajo de la metodología aplicada.

3.2 Levantamiento de información hidrogeológica

Los datos hidrogeológicos se obtuvieron de 16 pozos de bombeo distribuidos en: i) Llío (7 pozos distanciados entre 13 m y 290 m entre sí), ii) Riobamba (7 pozos distanciados entre un rango de 787 m y 4270 m), iii) Yaruquíes (2 pozos con un distanciamiento de 1580 m). La ubicación de los pozos, cota, caudal y profundidad se analizaron a partir de los datos presentados por Procel (2018) (Tabla 1).

Tabla 1. Información recopilada de Procel (2018) donde se indica la ubicación de los 16 pozos muestreados en los acuíferos de Llío-Guano, Riobamba y Yaruquíes

| Pozo | UTM E WGS84 | UTM N WGS84 | Cota (msnm) | Profundidad (m) |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| Acuífero Llío - Guano | | | | |
| PLSP1 | 754485 | 9827333 | 3123 | 88 |
| PLSP2 | 754446 | 9827230 | 3116 | 97 |
| PLSP3 | 754395 | 9827005 | 3120 | 50 |
| PLSP4 | 754395 | 9826998 | 3119 | 168 |
| PLSP5 | 754449 | 9827230 | 3116 | 224 |
| PLSP6 | 754386 | 9827228 | 3113 | |
| PLSP7 | 754424 | 9827142 | 3116 | |
| Acuífero Riobamba | | | | |
| PR1 | 757432 | 9819172 | 2901 | 221 |
| PR2 | 764096 | 9816447 | 2768 | 222 |
| PR3 | 757551 | 9819673 | 2981 | 243 |
| PR4 | 758140 | 9819959 | 2887 | 243.9 |
| PR5 | 763392 | 9817550 | 2746 | 222.5 |
| PR6 | 756684 | 9881730 | 2871 | 255 |
| PR7 | 760979 | 9816928 | 2833 | 200 |
| Acuífero Yaruquíes | | | | |
| PYa1 | 758947 | 9812997 | 2817 | 151 |
| PYa2 | 758994 | 9813514 | 2815 | 258.5 |

Se recopilaron informaciones de parámetros hidrogeológicos como la conductividad hidráulica, transmisividad y almacenamiento de Procel (2018), Naranjo (2013) y Espinoza (2022) (Tabla 2). Se calculó el promedio del nivel estático documentado por Procel (2018) y Naranjo (2013) y se determinó las cargas hidráulicas restando los valores de la cota del terreno y los niveles estáticos del agua registrados entre los años 2016 y 2017. Adicionalmente, se realizó un recálculo de la transmisividad mediante la ecuación 2.

Los mapas piezométricos se elaboraron a partir de las cargas hidráulicas de 16 pozos registrados en Llío (7), Riobamba (7) y Yaruquíes (2). Se determinaron también las líneas del flujo del agua subterránea, el gradiente hidráulico y la velocidad del flujo a través de la Ley de Darcy (Ecuación 9).

Tabla 2. Parámetros hidrogeológicos. Q, caudal; K, conductividad hidráulica; T, transmisividad, Trec, transmisividad recalculada; T, transmisividad calculada; NE nivel estático promedio.

| Pozo | Q (m ³ / día) | K (m/día) | T (m ² /día) | Trec (m ² /día) | Tcalc (m ² /día) | S | NE (m) | Carga Hidráulica |
|----------------------|--------------------------------|--------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|---------------------|
| Acuífero Lío - Guano | | | | | | | | |
| PLSP 1 | 4.75E+0 3 | 1.00E+0 1 | - | - | - | - | 13.6 | 3.11E+03 |
| PLSP 2 | 5.36E+0 3 | 1.00E+0 1 | - | - | - | - | 24 | 3.09E+03 |
| PLSP 3 | 1.21E+0 3 | 1.00E+0 1 | - | - | - | - | 13.075 | 3.11E+03 |
| PLSP 4 | 3.97E+0 3 | 1.00E+0 1 | - | - | - | - | 17 | 3.10E+03 |
| PLSP 5 | 8.21E+0 3 | 1.00E+0 1 | 1.04E+0 2 | - | - | - | 20 | 3.10E+03 |
| PLSP 6 | 3.97E+0 3 | 1.00E+0 1 | - | - | - | - | 14.6 | 3.10E+03 |
| PLSP 7 | 2.33E+0 3 | 1.00E+0 1 | - | - | - | - | 20.8 | 3.09E+03 |
| Acuífero Riobamba | | | | | | | | |
| PR1 | 2.24E+0 2 | 1.77E-01 | 3.52E+0 0 | 5.96E+0 0 | 1.06E+0 1 | 5.48E+0 2 | 46.58 | 2.85E+03 |
| PR2 | 5.97E+0 2 | 1.84E+0 0 | 2.96E+0 2 | 2.59E+0 2 | 1.10E+0 2 | 5.77E-06 | 51.4 | 2.72E+03 |
| PR3 | 5.96E+0 2 | 2.42E+0 1 | 5.54E+0 1 | 1.37E+0 1 | 1.45E+0 3 | 9.76E-03 | 49.515 | 2.93E+03 |
| PR4 | 3.73E+0 2 | 2.73E+0 1 | 6.06E+0 1 | 2.31E+0 1 | 1.64E+0 3 | 2.19E-07 | 140.11 5 | 2.75E+03 |
| PR5 | 5.44E+0 2 | 5.14E-01 | 7.99E+0 1 | 4.24E+0 1 | 3.08E+0 1 | 2.17E-12 | 34.195 | 2.71E+03 |
| PR6 | 5.47E+0 2 | 1.78E+0 0 | 4.13E+0 2 | 4.12E+0 2 | 1.07E+0 2 | 2.15E-24 | 88.8 | 2.78E+03 |
| PR7 | 6.22E+0 2 | 9.07E-01 | 1.89E+0 2 | 1.43E+0 2 | 5.44E+0 1 | 3.30E-06 | 49.415 | 2.78E+03 |
| Acuífero Yaruquíes | | | | | | | | |
| PYa1 | 86.4 | 1.90E-07 | 2.41E-04 | - | 1.29E-05 | - | 60.995 | 2.743.005 |
| PYa2 | 2592 | 1.90E-07 | - | - | - | - | 71.16 | 2691.84 |

3.3 Modelación en MODFLOW 6

4.1.1 Interfaz de entrada (condiciones de borde)

A partir de los archivos utilizados en el software QGIS (*shapefile [shp]*) se creó un modelo de elevación digital del terreno (MDT o *Digital Elevation Model-DEM*) con una resolución de 30 metros en el que se delimitó la zona de estudio, se estableció la red de drenaje y se definieron las estructuras geológicas existentes (Figura14).

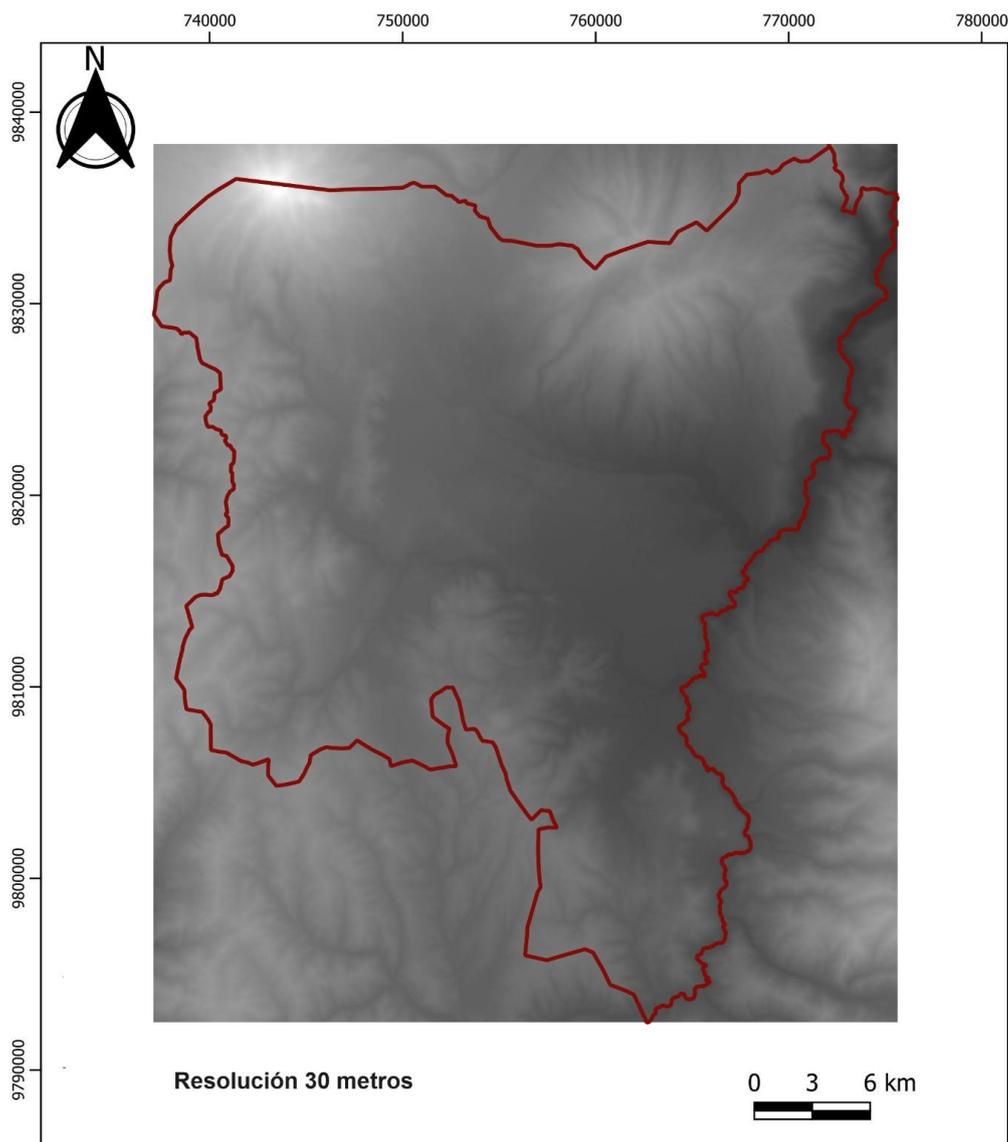


Figura 14. Modelo digital del terreno MDT del área de estudio que se utilizó como base para el modelo matemático.

A continuación, se presenta el detalle de esta interfaz con los parámetros utilizados en el modelo matemático.

3.3.1.1. **Proyección Geográfica**

Se empleó la proyección geográfica del *European Petroleum Survey Group* (EPSG 32717), que tuvo como fecha de inicio 1 de abril de 2024, unidades de m/día (Figura 15).

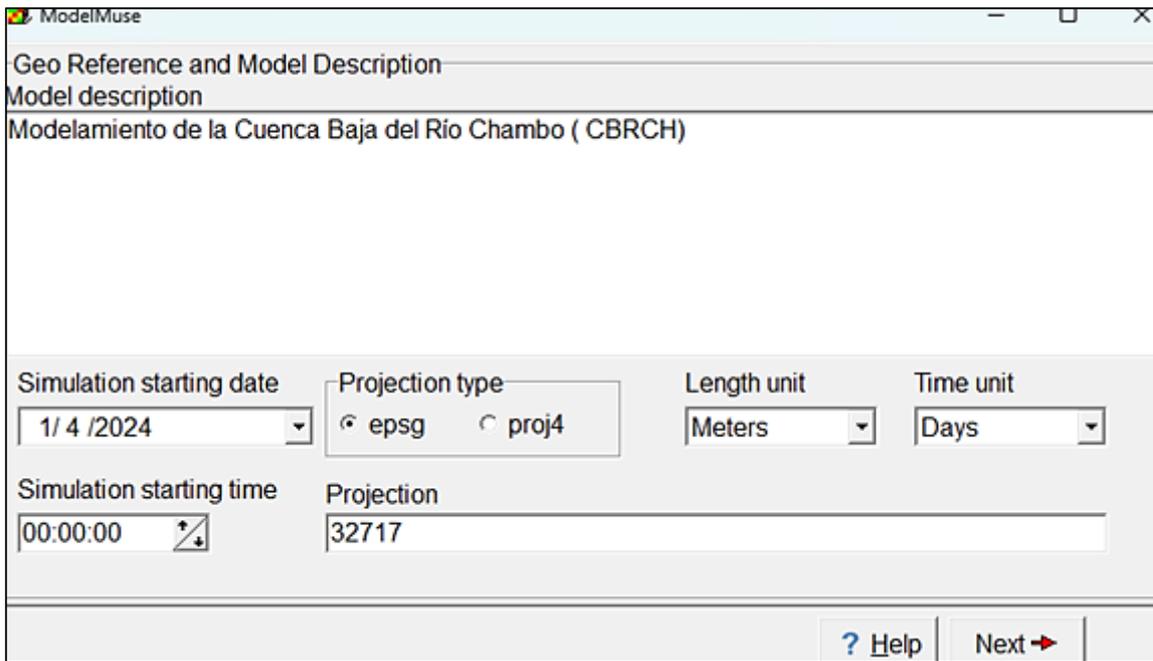


Figura 15. Ingreso de los datos iniciales para la modelación

3.3.1.2. Cartografía y área a modelar

El área de estudio tiene una extensión de 162 km². Para su modelamiento se creó una malla de 98 filas y 82 columnas, con un ancho de 500 m, considerando los factores: i) coordenadas del área de estudio tomadas de QGIS (versión 3.34.3) (736118; 9839882), (788118; 9839882), (788118; 9788863), (736118; 9788863); i) la complejidad geológica del área de estudio; ii) la existencia de diferentes tipos de acuíferos; iii) pozos independientes en una celda; iv) información limitada (Figura 16).

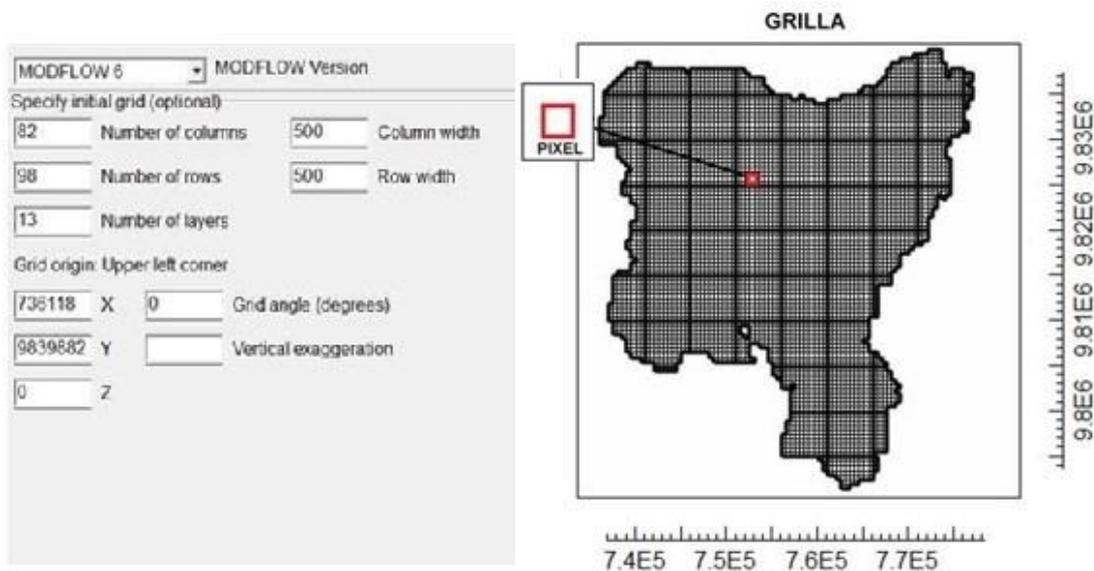


Figura 16. Creación de la malla para la zona de estudio.

3.3.1.3. Litología

Las principales formaciones geológicas del área de estudio se ingresaron considerando sus espesores estimados que se calcularon promediando los valores de espesores bibliográficos (Tabla 3).

Tabla 3. Espesores de las formaciones pertenecientes a la CBRCH y cálculo de espesores estimados

| Formación | Nomenclatura | Espesor (m) Espinoza (2022) | Espesor (m) Salguero (2017) | Espesor en el modelo (m) |
|------------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Depósitos Cuaternarios | DC | 20 | - | 20 |
| Volcánicos Tungurahua | VTu | 10 | 10 | 10 |
| Volcánicos Chimborazo | V.Ch1 | 40-50 | - | 45 |
| Flujo Lava Chimborazo | VCh2 | - | 100 -10 | 55 |
| Cangahua | Cg | 20 | 20 | 20 |
| Sedimentos río Chambo | Rch | 20-50 | - | 35 |
| Volcánicos Igualata | Vig | 20 | 20 | 20 |
| Formación Riobamba | Ri | 40 | - | 40 |
| Formación Cizarán | Ci | 20-30 | - | 25 |
| Formación Yaruquíes | F.Ya | 15 | - | 15 |

Debido a las variables descritas en la sección de cartografía y área por modelar (3.3.1.2), se dividió al área de estudio en tres zonas (norte, centro y sur) de acuerdo con el drenaje principal: río Guano, Chibunga y Chambo (Figura 17).

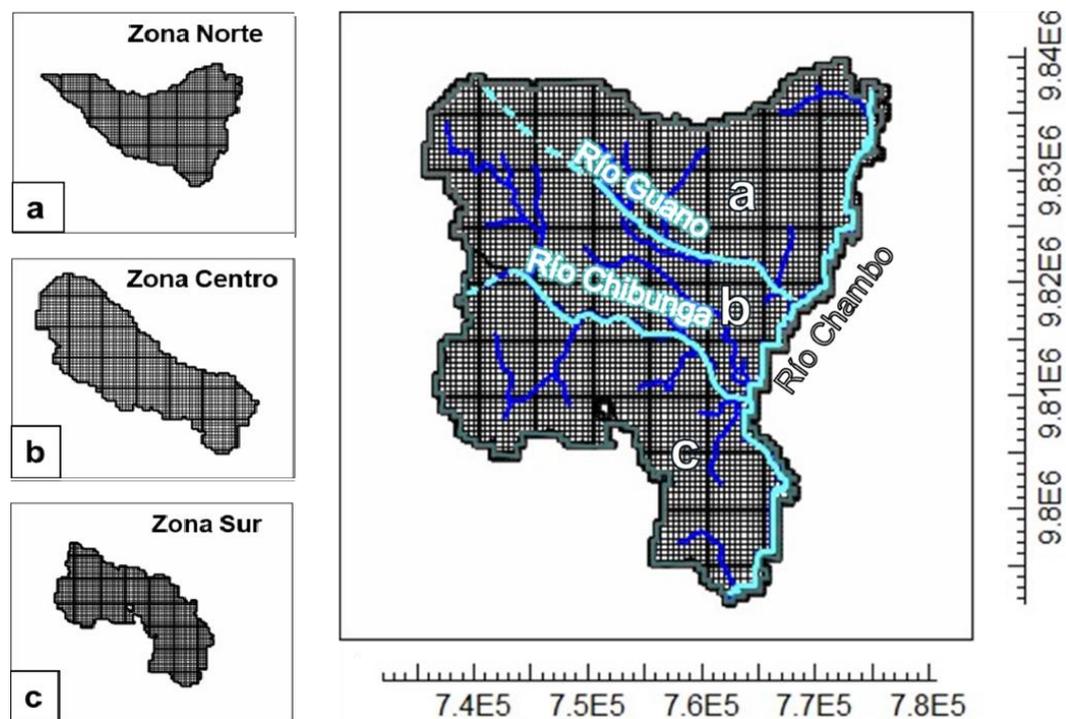


Figura 17. División de la zona de estudio

Los cortes y secciones hidrogeológicas se obtuvieron a través de capas subterráneas (*Layer*) determinadas a partir del cálculo del gradiente hidráulico y el modelo de elevación de terreno (MDT) de la zona de estudio (este archivo proporciona la altura de cada píxel representando los puntos de la superficie). Se crearon 13 columnas correspondientes a 13 capas de la litología utilizando la calculadora de atributos de *QGIS* y se generaron puntos distribuidos en toda la zona de estudio asignándoles valores de coordenadas X, Y, Z. Se determinó que el espesor (Z) de cada capa varía según la ubicación geográfica. Con los valores obtenidos se extrajo la altura para generar las capas subterráneas asegurando su coherencia con la topografía. La asignación del valor Z a la litología y su simplificación en el modelo se observa en la Figura 18.

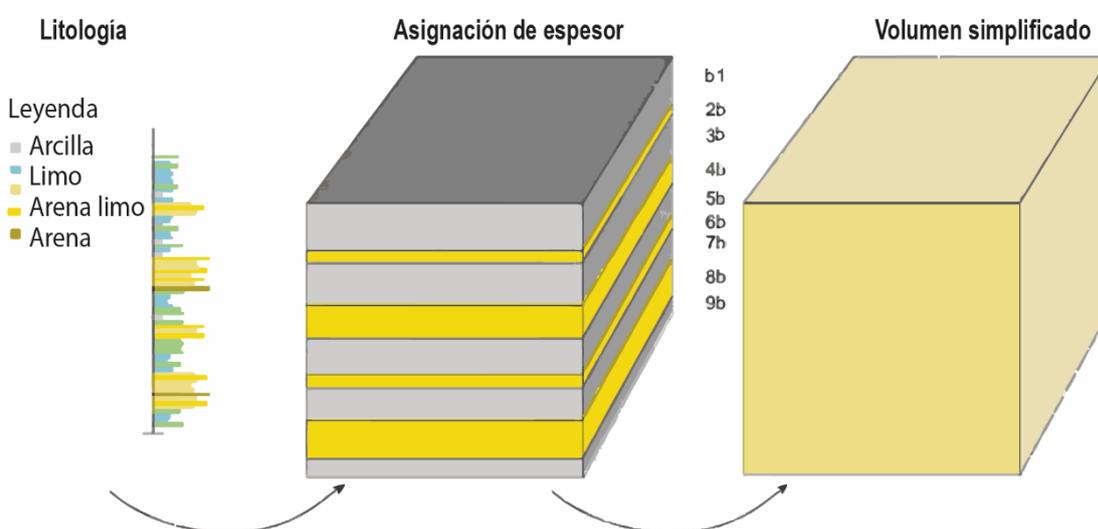


Figura 18. Esquema de asignación del espesor a la litología y su simplificación. Modificado de Brandenburg (2020).

Una vez creado el archivo *shapefile* se utilizó el programa *GOLDEN SURFER 3D* para convertirlo en un archivo gradiente GRD. Se aplicó la condición IF ($\text{Dato_Capa} \geq \text{Capa_Superior} - 0.01, \text{Dato_Capa}$) en *MODFLOW 6* para que las superficies no superen la topografía. A través de este proceso se garantizó que las superficies generadas no se interfieran entre sí y reflejen las características topográficas y litológicas del área de estudio.

En el modelo se definieron 12 capas (*layers*) debido a que la formación Volcánicos del Chimborazo (VCh) comprende dos miembros distintos. El primer miembro incluye los productos volcánicos del Chimborazo como la avalancha de escombros (VCh1) y el segundo miembro al flujo de lava del Chimborazo (VCh2) (Figura 19).

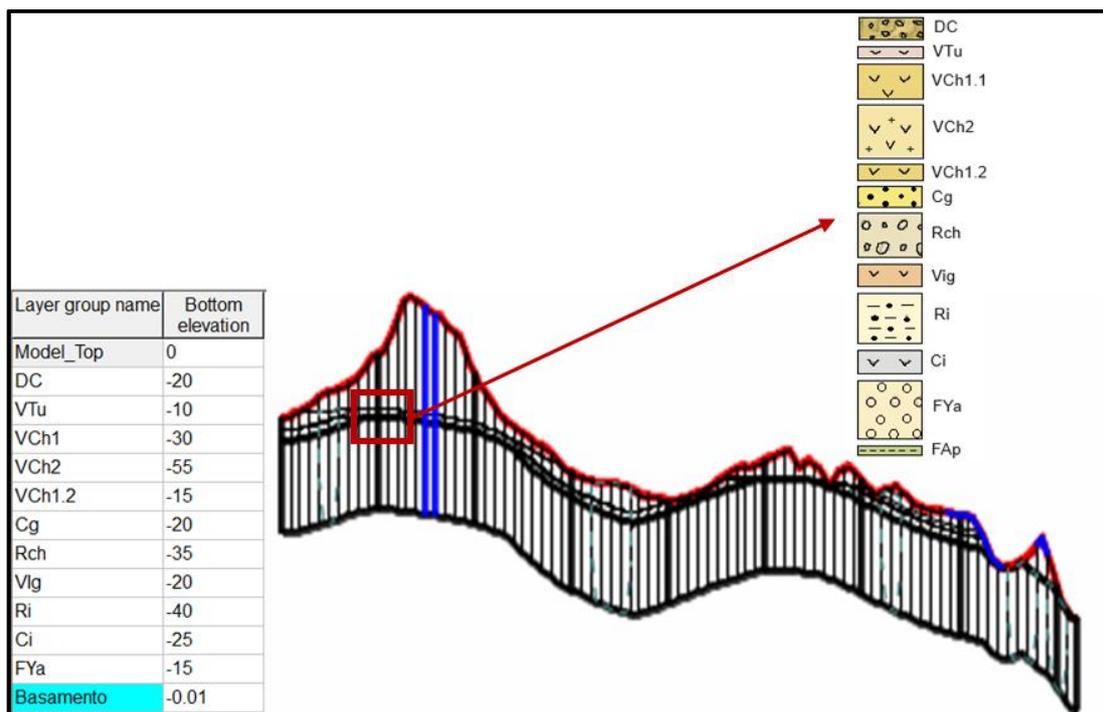


Figura 19. Modelación de la litología del área de estudio

3.3.1.4. Sistemas de Fallas

Las fallas geológicas se modelaron a través del paquete de drenaje *Drain Package (DRN)*, considerando que las fallas actúan como conductos naturales del agua (Figura 20). Se aplicó la siguiente fórmula considerando las coordenadas iniciales (7424E5, 98051E6), una cota inicial aproximada de 3794 msnm y un rumbo de falla de 45° con un buzamiento de 75° (Ecuación 13).

$$\begin{aligned}
 & 3794 - (1/\text{Sin}(\text{DegToRad}(-45))) * (\text{Sin}(\text{DegToRad}(75))) \\
 & * \text{Cos}(\text{DegToRad}(-45)) * (X - 42400) + \text{Cos}(\text{DegToRad}(-75)) \quad (\text{Ecuación 13}) \\
 & * \text{Cos}(\text{DegToRad}(-45)) * (Y - 9805100)
 \end{aligned}$$

A la conductancia del sistema de fallas se le asignó el valor de 1 debido a que es una zona de fracturas y discontinuidades, por lo que, suelen tener una conductividad hidráulica significativamente mayor (sin relleno) permitiendo un flujo de agua más rápido y en mayores cantidades (Figura 21).

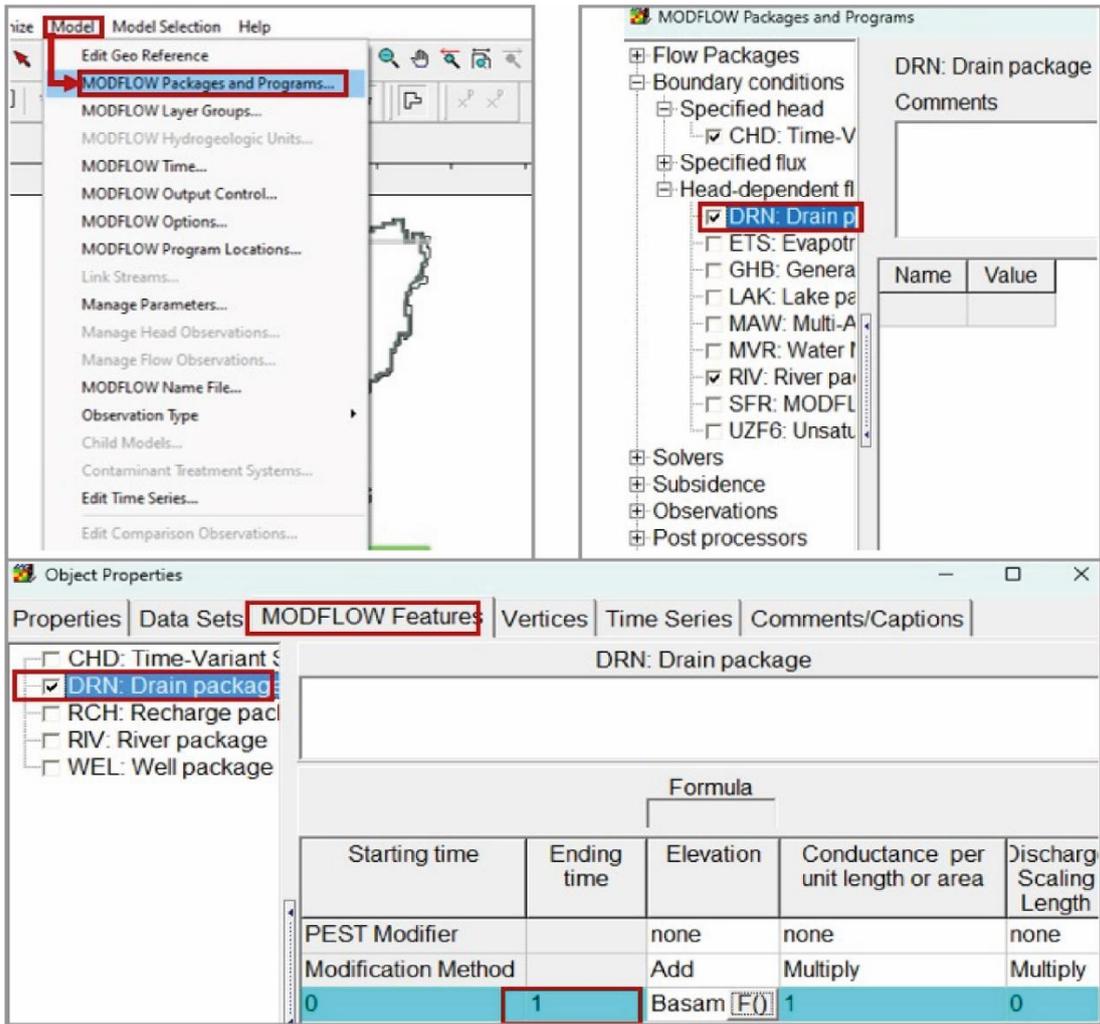


Figura 20. Modelación del Sistema de Fallas en el área de estudio

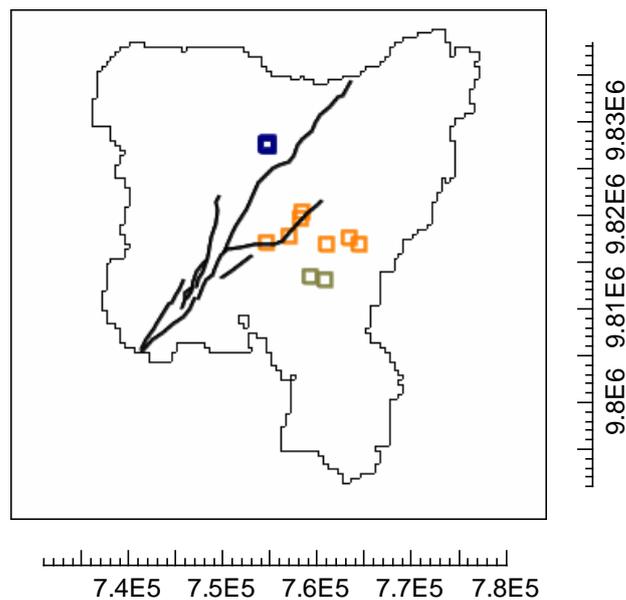


Figura 21. Paquete de fallas

3.3.1.5. Pozos de extracción (Descarga)

Se ingresaron los pozos de la siguiente forma: en el Norte (Llío) 7 pozos denominados Pozos Llío San Pablo (PLSP), en el Centro (Riobamba) 7 pozos denominados Pozos Riobamba (PR), y al Sur (Yaruquíes) 2 pozos denominados Pozos Yaruquíes (PYa). Se utilizó la herramienta *File-Import-Points* del programa *ModFlow 6*. La nominación se realizó a partir del menú *Controls (Root name)* y de *Well Package* (Figura 22). Para determinar que el pozo es de bombeo se ingresó en la opción *Data* el caudal de los pozos (Figura 23).

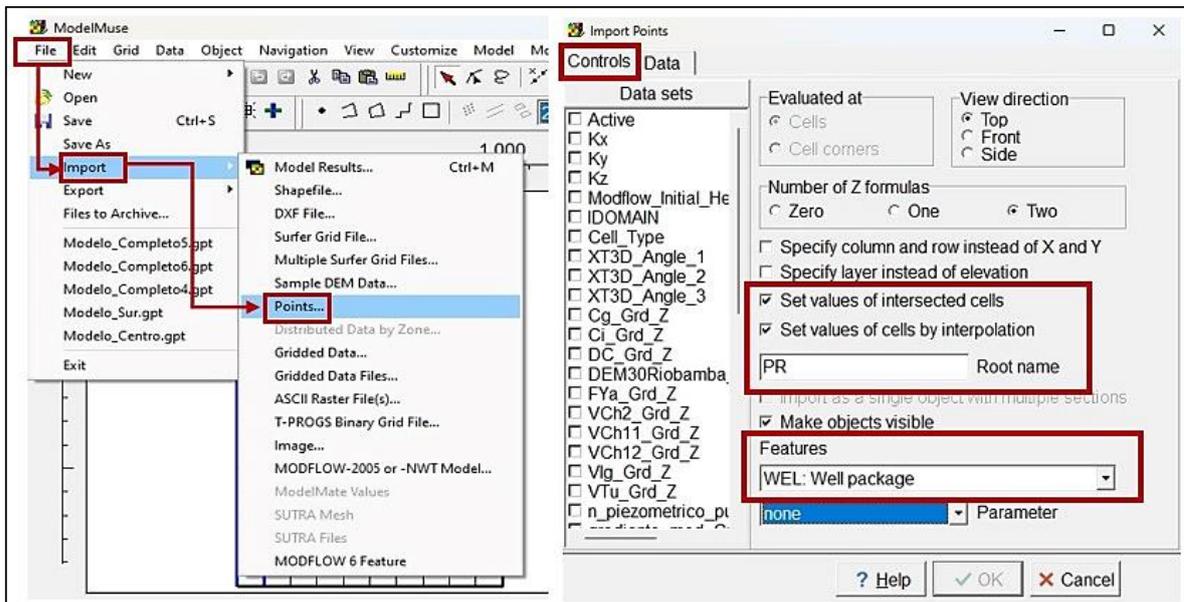


Figura 22. Ingreso de datos de pozos de extracción

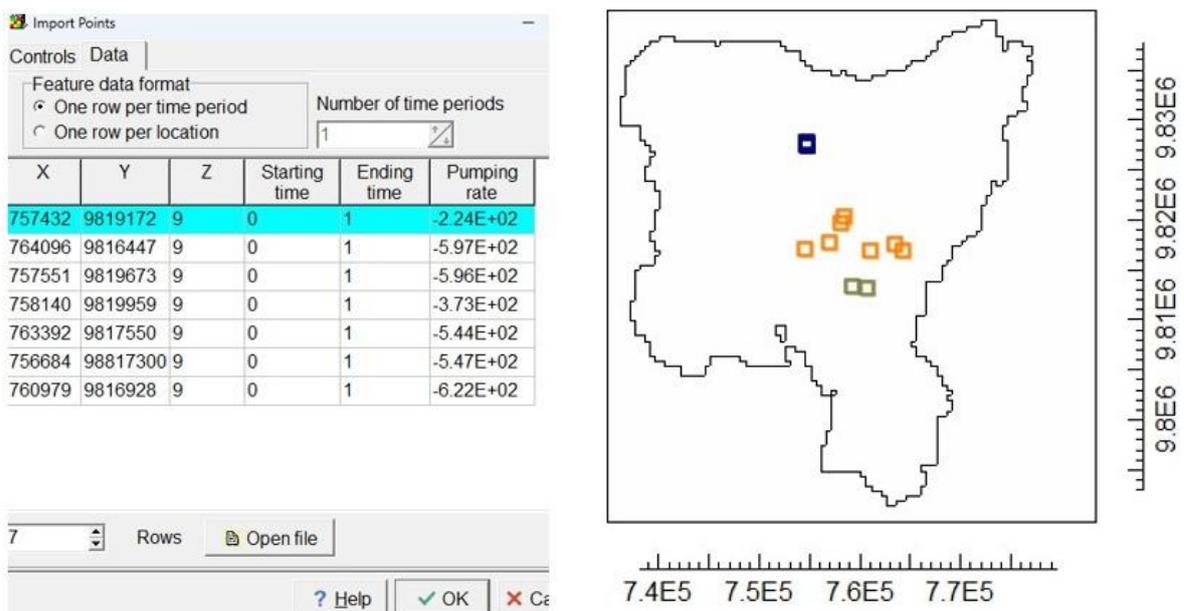


Figura 23. Modelación de pozos en la zona de estudio

3.3.1.6. Conductividad Hidráulica

Las informaciones de conductividad hidráulica (K) de Procel et al. (2023) se compararon con los valores bibliográficos de Health (1997) y la litología de cada formación geológica del área de estudio con el objetivo de obtener el valor de conductividad hidráulica representativa para el modelo matemático (Tabla 4).

Tabla 4. Conductividad de las formaciones modeladas en la CBRCH

| Formaciones | Abreviatura | Conductividad (Health, 1997) (m/día) | Conductividad (Procel et al., 2023) (m/día) | Conductividad Propuesta (m/día) |
|------------------------------|-------------|--------------------------------------|---|---------------------------------|
| Depósitos Cuaternarios | DC | 1000 | * | 1000 |
| Volcánicos del Tungurahua | VTu | 10 | * | 10 |
| Volcánicos del Chimborazo M1 | VCh1 | * | 0.5184 | 0.5184 |
| Flujo de lava del Chimborazo | VCh2 | 1 | * | 1 |
| Cangahua | Cg | 10 | * | 10 |
| Sedimentos del Río Chambo | RCh | 0.5 | * | 0.5 |
| Volcánicos del Igualata | Vig | 0.5 | * | 0.5 |
| Formación Riobamba | Ri | * | 0.18144 - 24.192 | 0.18144 |
| Formación Cizarán | Ci | 0.25 | * | 0.25 |
| Formación Yaruquíes | F.Ya | * | 3.9744 | 3.9744 |
| Basamento Hidrogeológico | BH | 0.0000001 | * | 1.00E-08 |

Cabe resaltar que el modelo consideró características de homogeneidad e isotropía, por lo que la conductividad hidráulica es constante en las tres direcciones (Kx, Ky, Kz). La asignación de este parámetro hidrogeológico se muestra en la Figura 24. La conductividad de cada capa utiliza la opción *Functions, Logical y Case* (Figura 25).

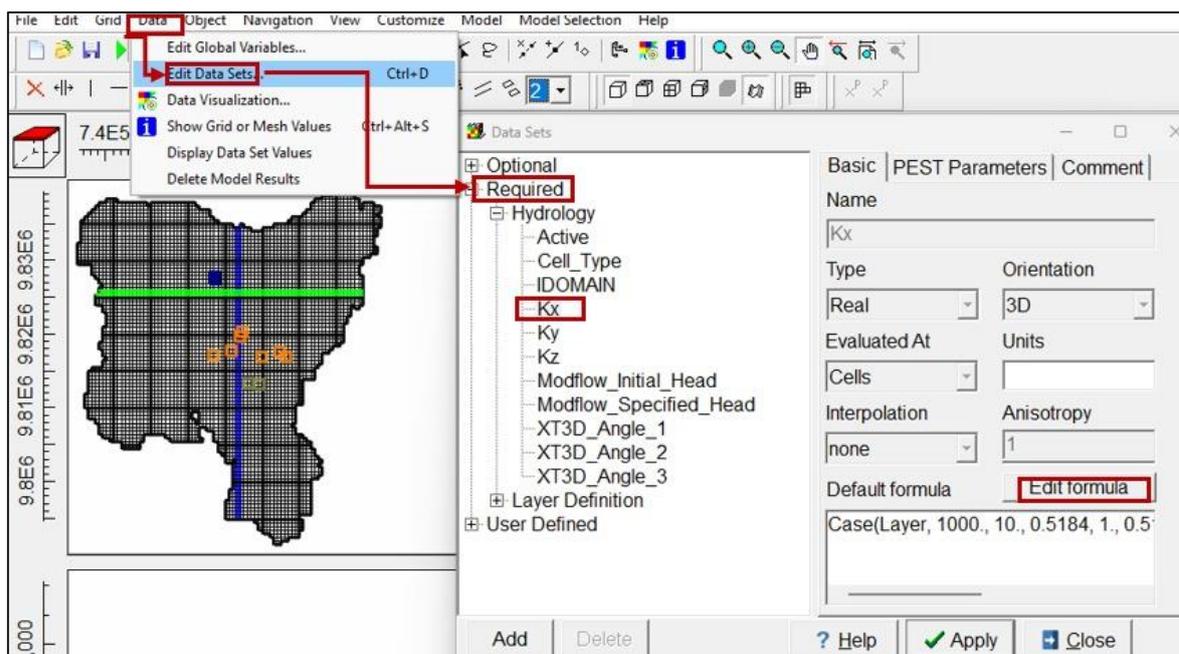


Figura 24. Ingreso de datos de la conductividad hidráulica de las formaciones de la CBRCH.

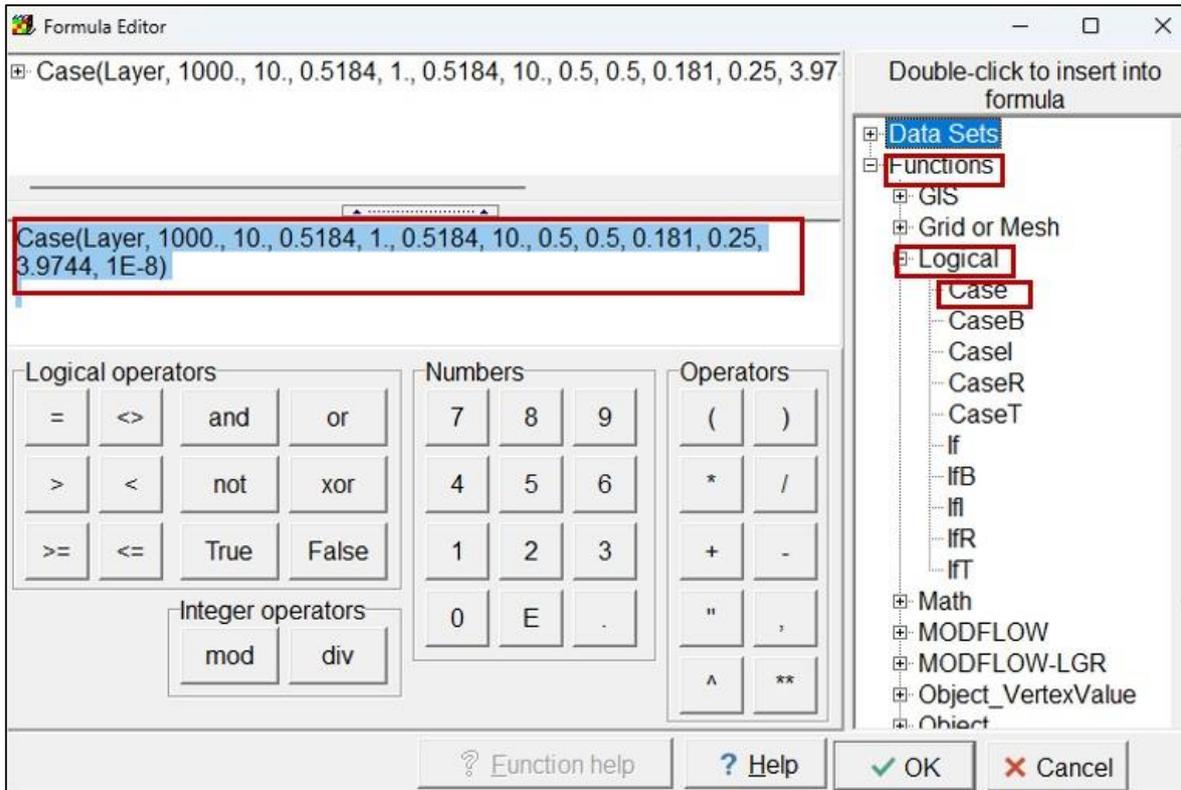


Figura 25. Valores de la conductividad hidráulica propuestos en la Tabla 4.

3.3.1.7. Río Chambo y red de drenaje

El archivo *shapefile* de la red de drenaje se cargó y activó en el paquete de ríos: *River Package (RIV)*. Para el ingreso de este parámetro fue necesario que la conductancia represente la capacidad del cauce del río de modo que permita el intercambio de agua entre el río y el acuífero subyacente. Esta conductancia fue calculada mediante la ecuación 14.

$$k_{Río} = \frac{k_{Capa} * A}{e} = \frac{1000(9.5 * 5500)}{10} = 5225000 \quad \text{(Ecuación 14)}$$

Donde, $k_{Río}$ es la conductividad hidráulica del río, a es el área del río, e representa el espesor de la capa, y k_{Capa} , la conductividad de la capa (Depósitos Cuaternarios DC). El área del río se obtuvo de la medición del largo (9.5 m) y ancho (5500 m) en *QGIS*. El cálculo del nivel base del río se basó en el dato de *River Stage*, mediante la opción *Model Top+5* (nivel cero + 5 m) (Figura 26).

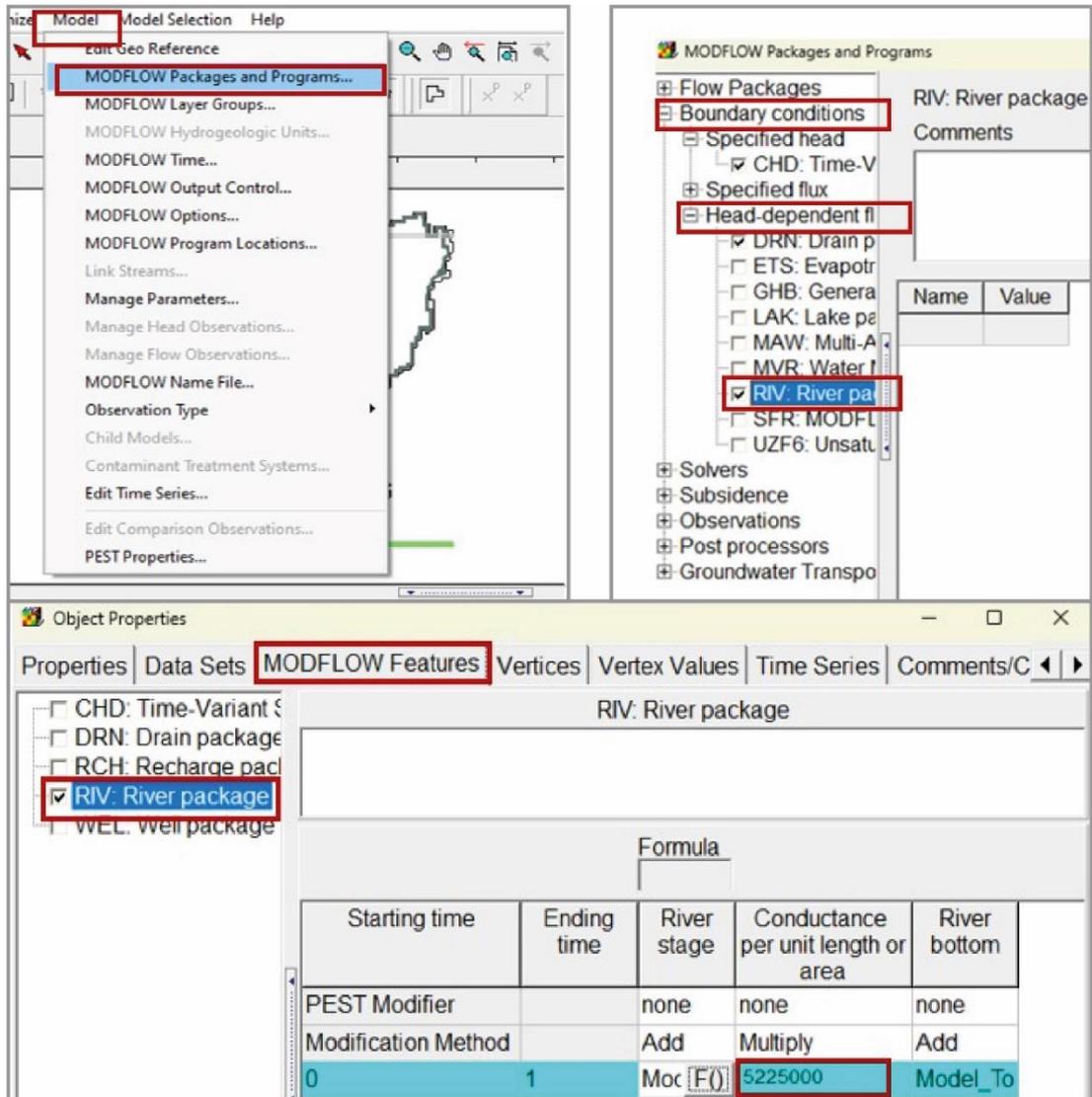


Figura 26. Ingreso y modelación de la red de drenaje

El río Chambo considerando que forma parte de la zona de descarga se modeló activando el paquete de drenaje *Drain Package (DRN)*, con un ancho de 40 m y largo de 56.000 m a través de la ecuación 15.

$$k_{RíoCh} = \frac{k_{Capa} * A}{e} = \frac{1000(40 * 56000)}{20} = 11200000 \quad (\text{Ecuación 15})$$

A partir de estas estimaciones se dibujó la red de drenaje y la zona de descarga (río Chambo) en el área de estudio. El procedimiento para asignación de drenaje se observa en la Figura 27 y su representación gráfica en la Figura 28.

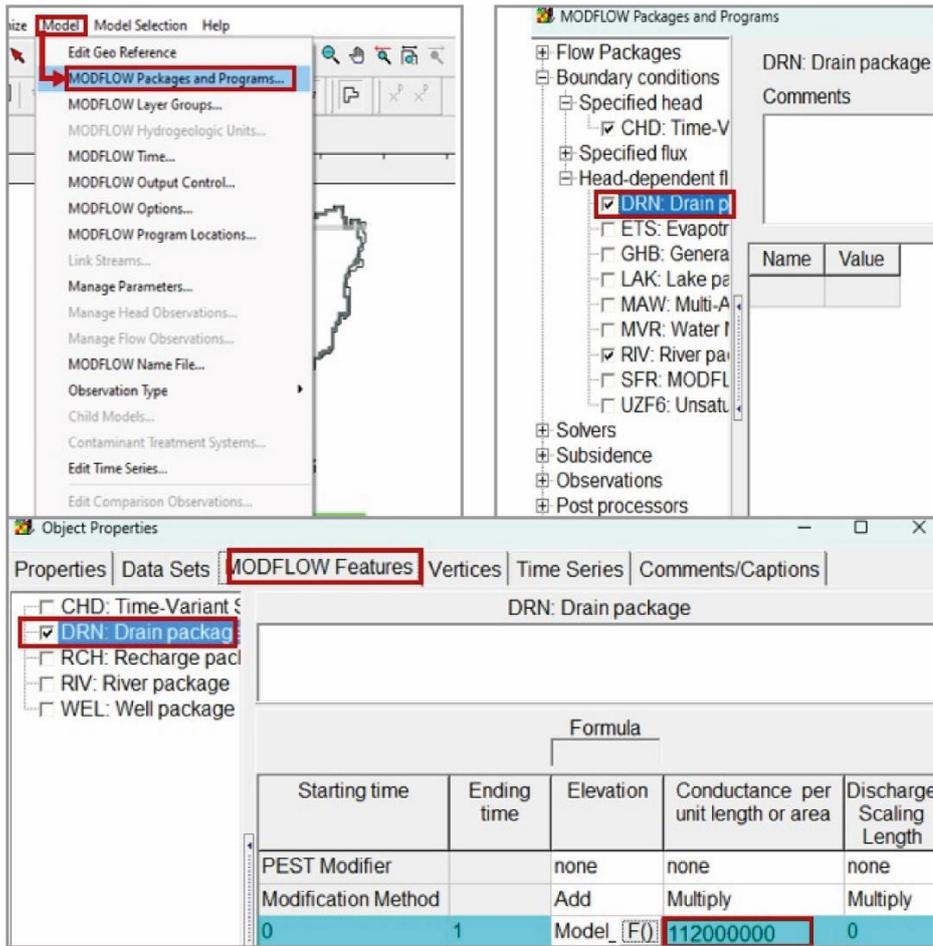


Figura 27. Incorporación y modelación del río Chambo

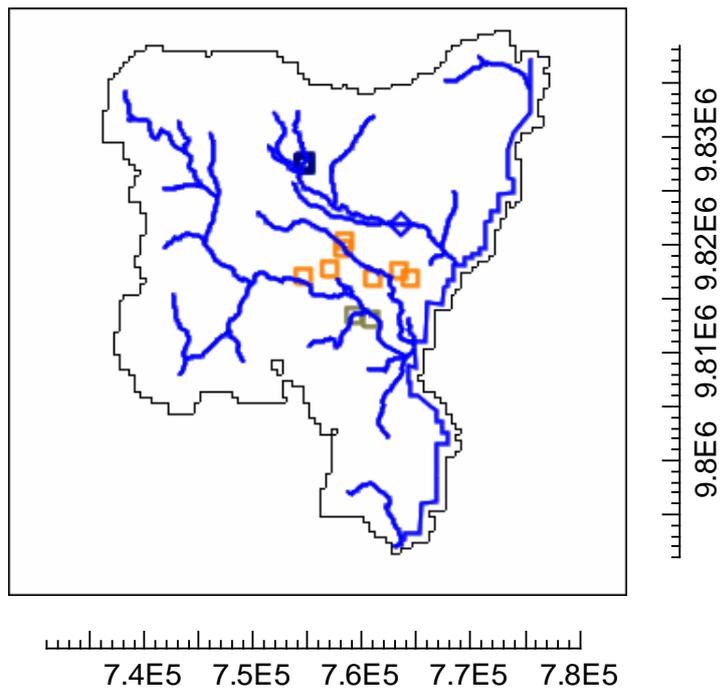


Figura 28. Paquete de drenaje de la CBRCH.

3.3.1.8. Niveles de agua (Freático y Piezométrico) y recarga

Los niveles de agua y la recarga se agregaron utilizando los paquetes de recarga *Recharge (RCH)* y nivel de agua *Time- Variant Specified - Head (CHD)*. Para representar el CHD o nivel freático se dibujaron polígonos dentro de cada zona y se le asignaron valores de acuerdo con los datos presentados en por Procel et al. (2018): en la Zona Norte 17.6 m, en la Zona Centro 53.3 m y en la Zona Sur 82 m (Figura 29).

The screenshot displays the MODFLOW software interface. The 'MODFLOW Packages and Programs' window is open, showing a tree view of packages. The 'DRN: Drain p' package is checked. The 'Object Properties' window is also open, showing the 'CHD: Time-Variant' package selected. The 'CHD: Time-Variant Specified-Head package' table is visible, with the following data:

| Starting time | Ending time | Starting head | Ending head |
|---------------------|-------------|---------------|-------------|
| PEST Modifier | | none | none |
| Modification Method | | Add | Add |
| 0 | 1 | 17 | 17 |

Figura 29. Ingreso de valores del nivel freático

Con respecto al nivel piezométrico, se ingresó una condición para que no exista interferencia con las superficies obtenidas, esta condición se refleja en la Figura 30.

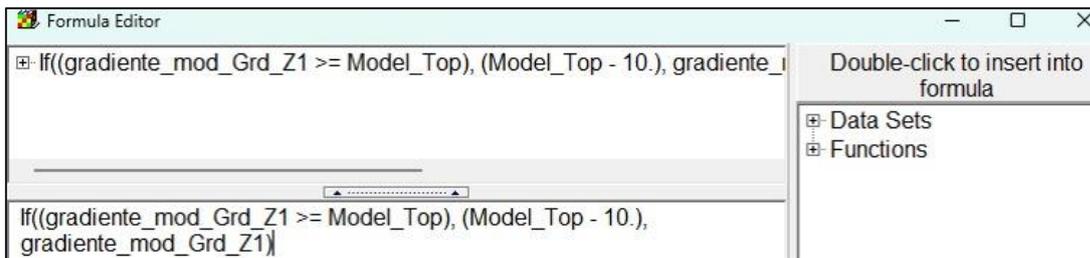


Figura 30. Nivel piezométrico en el área de estudio

En la estimación de la recarga se dibujaron 3 polígonos correspondientes a las zonas divididas del área de estudio. Se consideró la recarga de Procel et al. (2023): 0.00041315068 m³/día en la Zona Norte, 0.0000980822 m³/día en la Zona Centro y 0.0001693151 m³/día en la Zona Sur (Figura 31).

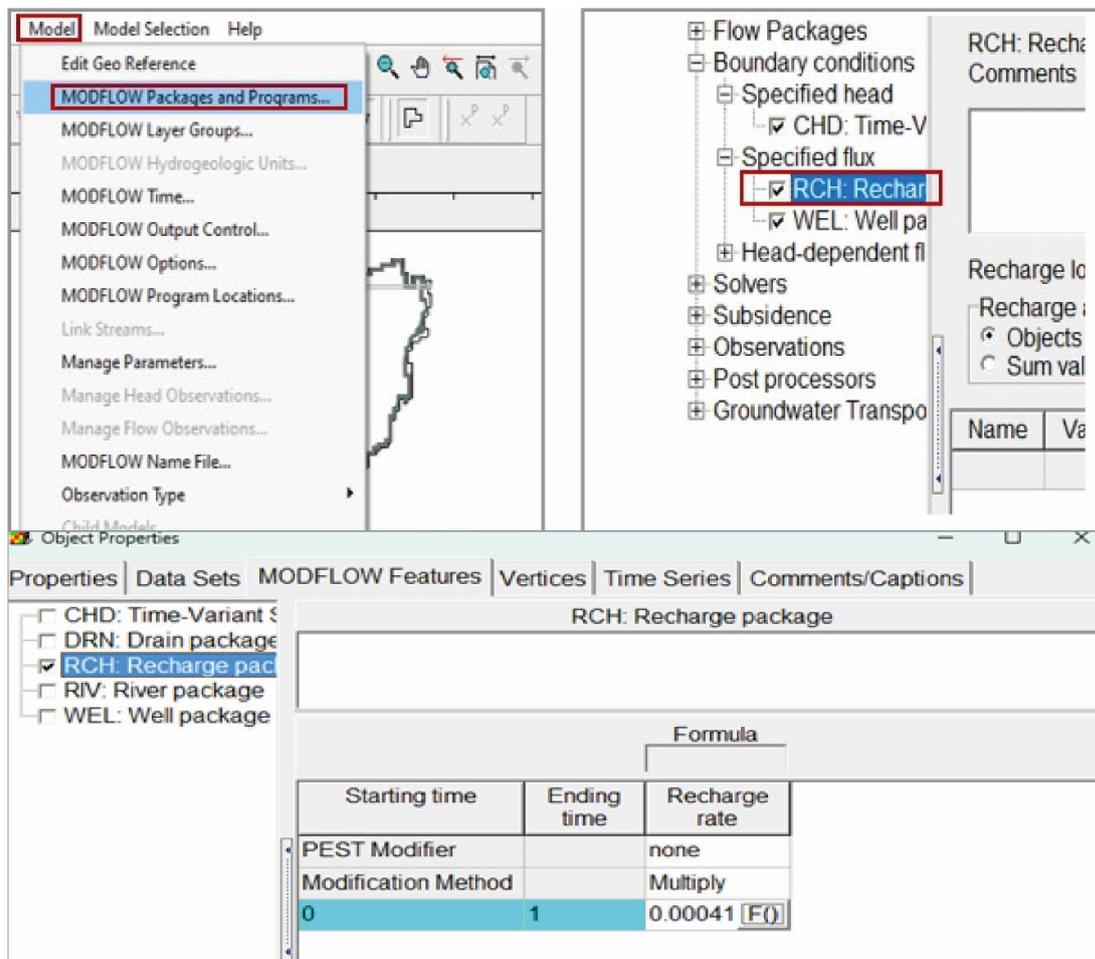


Figura 31. Ingreso de los datos de la recarga local

Al activar el paquete CHD y RCH el modelo se observa cómo se indica en la Figura 32a, y con todos los paquetes activos como se indica en la Figura 32b.

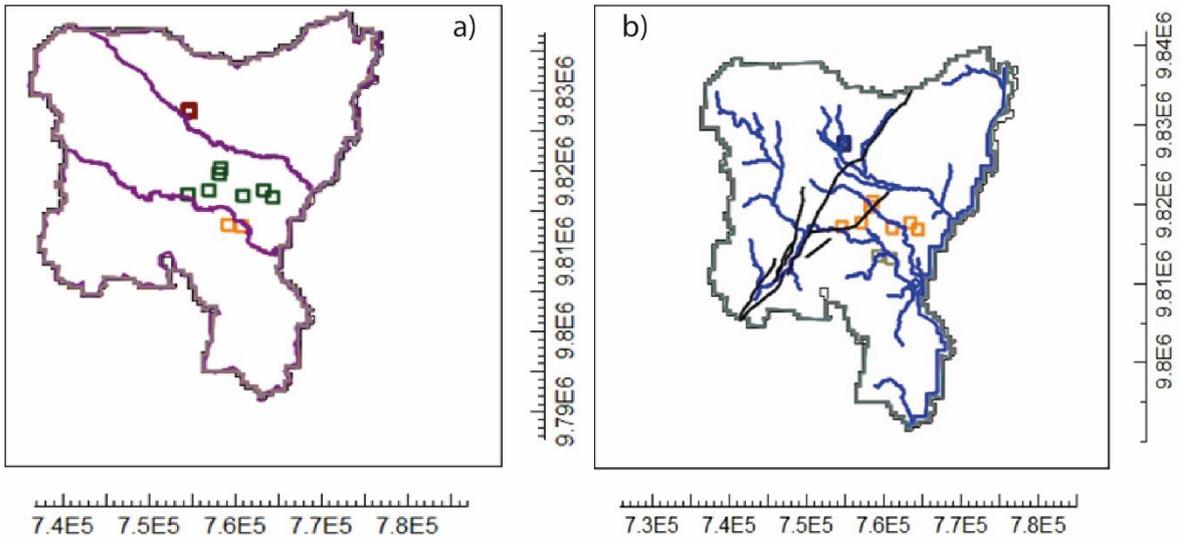


Figura 32. a) Modelo con el paquete CHD y RCH activos. b) Modelo preliminar con todos los paquetes de entrada activos.

4. RESULTADOS

4.1 Geología del área de estudio

4.1.2 Descripción local

La CBRCH se caracteriza por una segmentación litológica debido a la presencia del río Chambo, cuya trayectoria sigue la falla regional Peltetec (FP) (Procel, 2018; Núñez, 2021) (Figura 33). Esta falla divide a las rocas de la cuenca en rocas metamórficas del Jurásico de la Cordillera Real (al este del río) y rocas volcano-sedimentarias y volcánicas del Cenozoico del Valle Interandino (oeste del río) (Procel, 2018) (Figura 33). La CBRCH contiene productos volcanoclásticos, epivolcánicos y fluviales de los volcanes de la Cordillera Occidental y de la Cordillera Real y forma parte de la cuenca volcano-sedimentaria Alausí-Riobamba (Monzier et al., 1999).

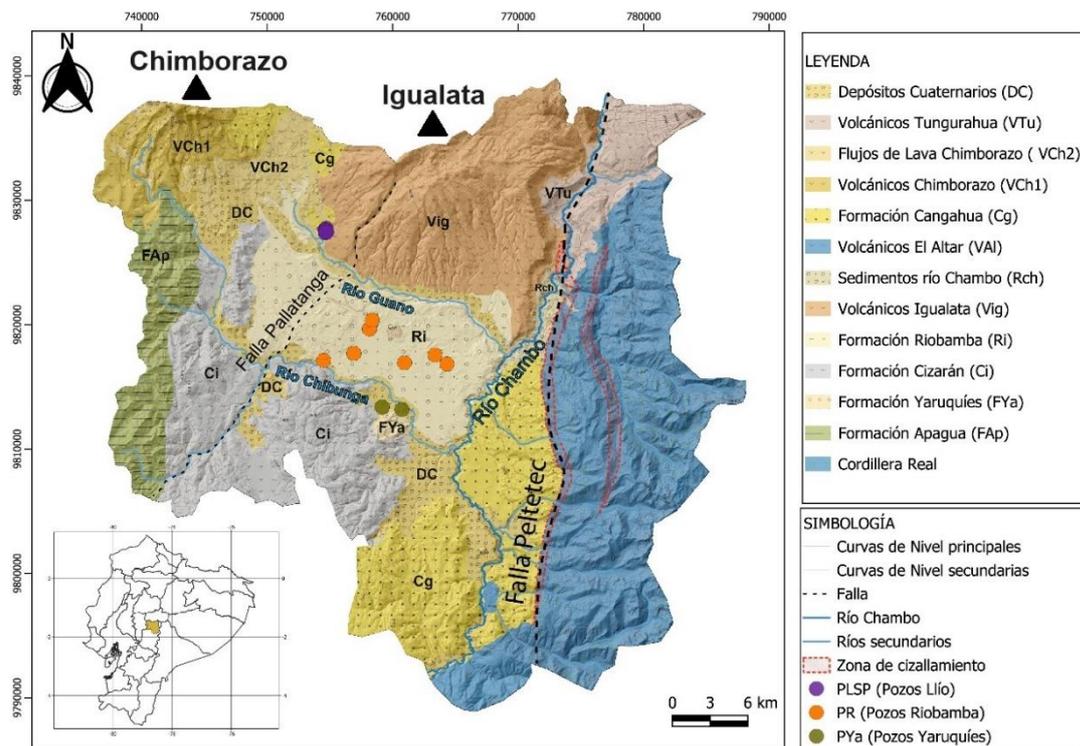


Figura 33. Formaciones y Unidades Geológicas del área de estudio. Modificado de Egúez et al. (2017), Bablon et al. (2018), Nuñez (2021).

Entre las formaciones que se encuentran en el área de estudio se tiene:

4.1.2.1 Formación Apagua

Esta formación se conforma de una facie turbidítica granocreciente que está constituida por areniscas de grano medio a grueso intercaladas con limolitas silicificadas y lutitas limosas (Vallejo, 2007) (Figura 34, Figura 33). Estas areniscas, clasificadas como litarenitas, contienen altos niveles de feldespatos, cuarzo y sericita, sin minerales máficos (Barba, 2006). Egüez (1986) y Wilkinson (1997) atribuyen a la Formación Apagua una edad de Eoceno Medio basada en el análisis de fauna foraminífera. Por otra parte, Dunkley & Gaibor (1997) determinan edades entre 37.8 ± 3.5 Ma (Eoceno Tardío) mediante trazas de fisión de la datación de una toba interestratificada en la secuencia turbidítica.



Figura 34. Formación Apagua: a) Turbiditas de la Formación Apagua ubicadas en la vía Latacunga – La Maná; b) Areniscas de la Formación Apagua ricas en feldespatos ubicadas en la vía Latacunga – La Maná. Tomado de Vallejo (2007).

4.1.2.2 Formación Yaruquíes (FYa)

Secuencia fluvial compuesta a la base por areniscas de grano fino pasando a conglomerados de composición andesítica de colores amarillos a rojizos y cuarcitas en la parte superior (Dunkley & Gaibor, 1977) (Figura 33). Estas cuarcitas se intercalan con areniscas rojas de grano medio y contienen clastos de andesita, cuarcita y arcillas. A través de la correlación estratigráfica, Dunkley & Gaibor (1977)

establecen que esta formación data del Paleógeno y Neógeno. Su espesor promedio calculado es de 68 metros (Figura 35, Tabla 3).

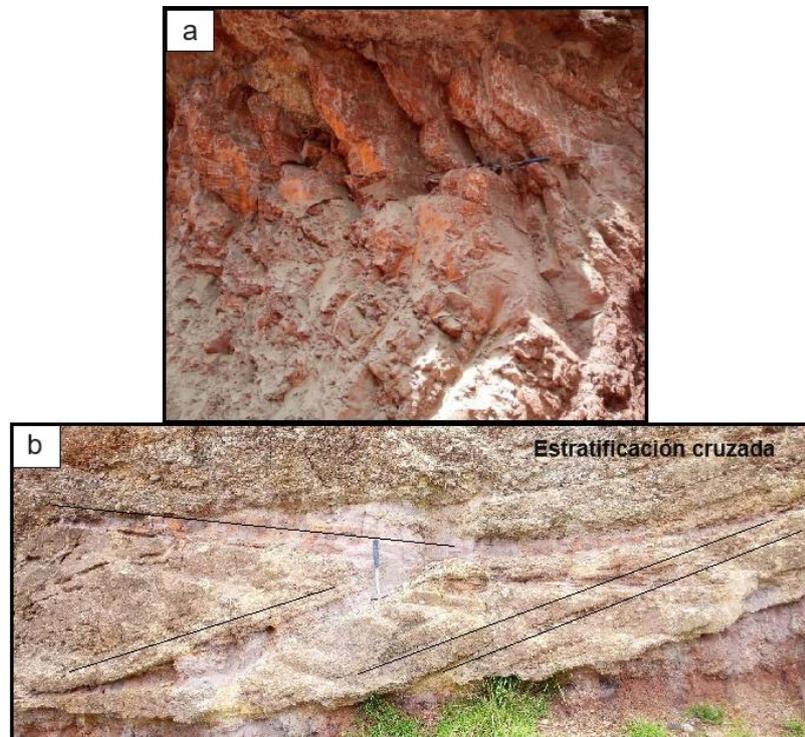


Figura 35. Formación Yaruquies: a) Areniscas; b) Canales con estratificación cruzada en surco de conglomerados y areniscas volcánicas. Tomado de Buenaño (2018).

4.1.2.3 Formación Cizarán (Ci)

Lavas andesíticas porfíricas y piroclastos de composición ácida e intermedia, así como brechas riolíticas andesíticas e ignimbritas generadas por un flujo de lahar (Dunkley & Gaibor, 1977). Su espesor promedio calculado es de 25 metros (Figura 32, Tabla 3).



Figura 36. Afloramiento en un paleolava en la Formación Cizarán. Tomado de Salguero (2017)

4.1.2.4 Formación Riobamba (Ri)

Se divide en dos miembros: El primer miembro consiste en estratos sedimentarios granodecrecientes, incluyendo areniscas, conglomerados soportados por matriz y limos que forman terrazas aluviales en los ríos Guano y Chambo (Lavenu et al., 1995). El segundo miembro está compuesto por rocas volcanoclásticas de grano medio procedentes de los volcanes Igualata, Chimborazo y Altar (Salguero, 2017) (Figura 33). Estratigráficamente, se encuentra sobre el primer miembro y bajo la Formación Cangahua. De acuerdo con Salguero (2017), según correlaciones estratigráficas esta formación corresponde al Plioceno. Tiene un espesor promedio calculado de 40 metros (Figura 37, Tabla 3).

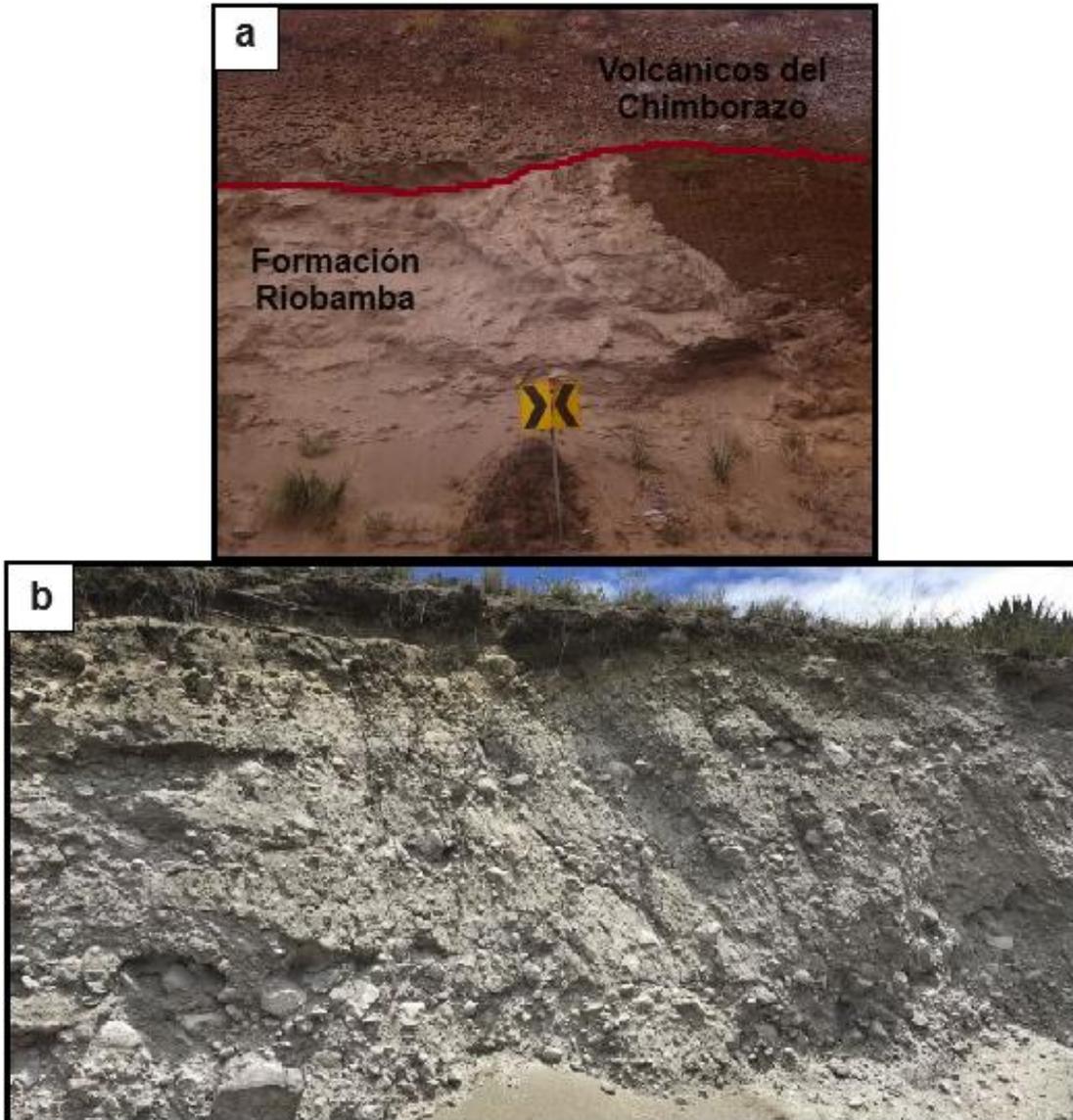


Figura 37. Formación Riobamba. Tomado de Procel (2018) y Buenaño (2018)

4.1.2.5 Volcánicos del Igualata (Vig)

Flujos de lava que tienen composición andesítica, brechas volcánicas con matriz arenosa, depósitos volcánicos de caída como cenizas, tobas y depósitos de lahar (Salguero, 2017) (Figura 33). Esta formación presenta un espesor promedio calculado de 20 metros (Figura 38, Tabla 3).



Figura 38. Volcánicos del Igualta. Tomado de Salguero (2017)

4.1.2.6 Sedimentos del río Chambo (Rch)

Terrazas aluviales que contienen conglomerados con una matriz arenosa y clastos con una composición andesítica, también existen limos presentes en la parte superior de la secuencia (Salguero, 2017) (Figura 33). Según Randel & Lozada (1976), se encuentran interstratificados con cenizas de volcanes como el Chimborazo, Altar y Tungurahua. En el área de estudio tiene un espesor promedio calculado de 35 metros (Figura 39, Tabla 3).

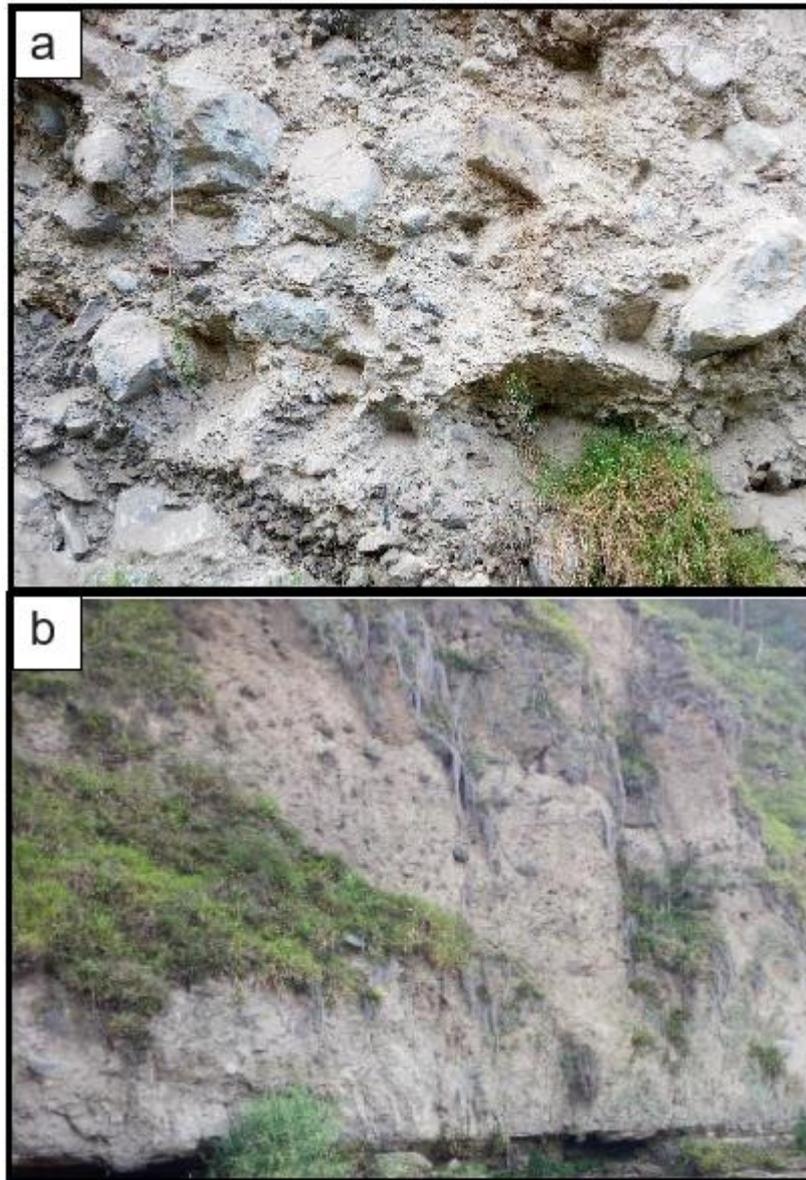


Figura 39. Sedimentos del Rio Chambo: a) brecha con clastos volcánicos andesíticos y metamórficos angulares; b) secuencia sedimentaria al margen del río Chambo. Tomado de Buenaño (2018).

4.1.2.7 Cangahua (Cg)

La Formación está compuesta principalmente de cenizas volcánicas re trabajadas, sedimentos fluviales y lacustres (Hall & Beate, 1991) (Figura 33). Es un depósito periclinal consolidado de color marrón (Clapperton, 1993). Tiene un espesor promedio calculado de 20 metros (Figura 40, Tabla 3).



Figura 40. Cangahua. Tomado de Procel (2018)

4.1.2.8 Volcánicos del Chimborazo (VCh2)

Contiene flujos de lava, la Ignimbrita Peñas Blancas y una avalancha de escombros resultante del colapso del volcán Chimborazo (Barba, 2006) (Figura 33, Figura 41). Esta capa tiene un espesor promedio calculado de 45 metros (Tabla 3).

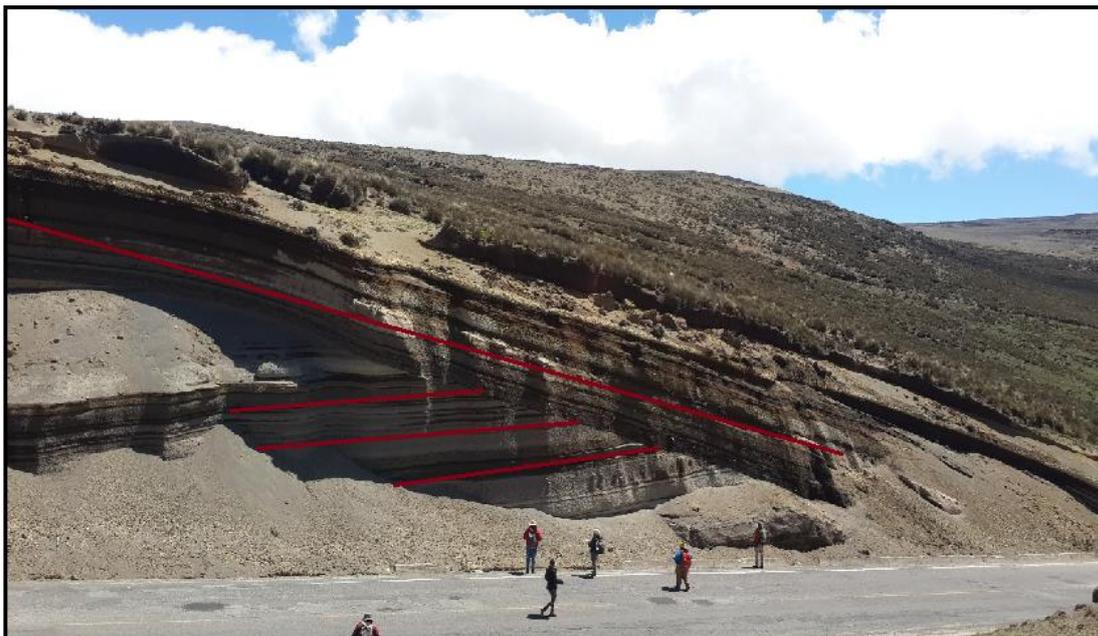


Figura 41. Volcánicos del Chimborazo. Tomado de Nuñez (2020)

4.1.2.9 Flujo de Lava del Chimborazo (VCh1)

Corresponde al primer miembro de los Volcánicos Chimborazo que se extiende desde el volcán Chimborazo hasta la localidad de Guano (Figura 33). Corresponde a un flujo de lava compuesto por andesitas piroxénicas porfiríticas vesiculares (Randel & Lozada, 1976). Esta capa tiene un espesor promedio calculado de 55 metros (Figura 42, Tabla 3).



Figura 42. Flujo de Lava de Chimborazo. Tomado de Barba (2006).

4.1.2.10 Volcánicos del Tungurahua (VTu)

Las terrazas están caracterizadas por la presencia de laminaciones dentro de mega bloques (Salguero, 2017) (Figura 33). Estas terrazas están compuestas por una matriz areno-limosa que varía en color de gris a rojizo, y contienen clastos basálticos de tamaño variable que oscila entre 10 y 50 cm. Estos clastos se originaron a partir del colapso de los volcanes Tungurahua I y II (Bablon et al., 2018). Tiene un espesor promedio calculado de 10 metros en el área de estudio (Figura 43, Tabla 3).

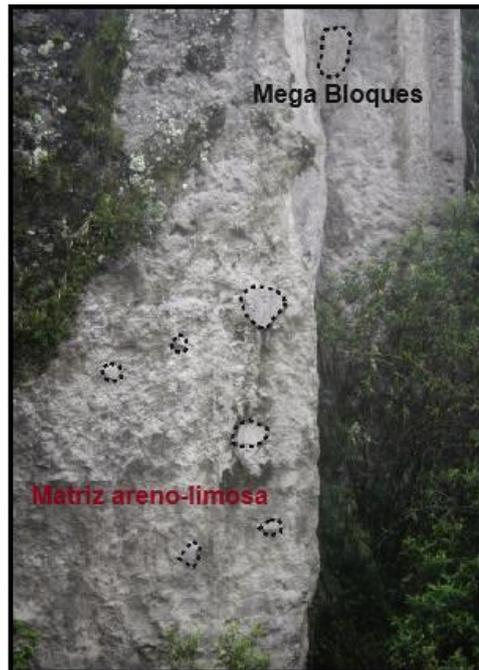


Figura 43. Volcánicos del Tungurahua. Tomado de Bablon et al. (2018).

4.1.2.11 Depósitos Cuaternarios (DC)

Los depósitos se dividen en dos tipos: aluviales y coluviales (Figura 33). Los depósitos aluviales consisten en gravas medias a gruesas intercaladas con material de lahares y tobas. Por otro lado, los depósitos coluviales están compuestos por clastos de tamaño milimétrico a métrico de composición andesítica en una matriz arenosa. (Salguero, 2017). En el modelo se usó un espesor promedio calculado de 20 metros (Figura 44, Tabla 3).

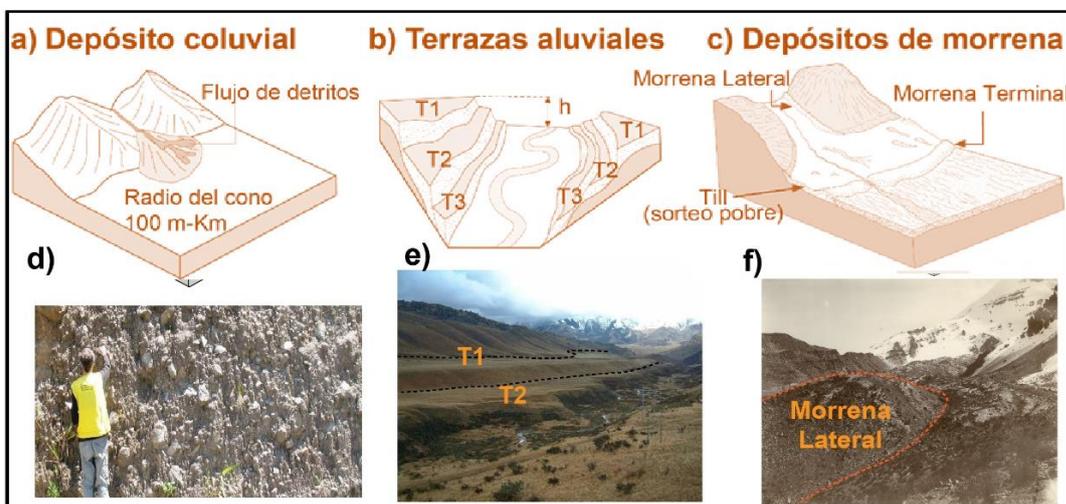


Figura 44. Depósitos Cuaternarios. Tomado de Núñez (2020).

4.1.3 Descripción litológica en el área de estudio

En este trabajo se realizó una descripción detallada de cuatro muestras de rocas pertenecientes a las formaciones geológicas: Yaruquíes, Riobamba y Flujo de lava del Chimborazo estimadas en el modelo preliminar matemático. Estas muestras fueron consideradas representativas y caracterizan las formaciones que contienen los pozos con los filtros considerados como pozos totalmente penetrantes.

4.3.1.1 Descripción Macroscópica

La muestra **CBRCH (Ya)** proviene de la formación Yaruquíes (Figura 45). Presenta un tamaño de grano que varía entre arena y grava (0.063 - 3 mm), con un color rojizo característico y una textura psamítica. La roca tiene una estructura polimodal clasto-soportada, donde los clastos polimícticos constituyen el 70% de la muestra. Estos clastos incluyen cuarzo (20%), feldespato (10%) y fragmentos de rocas con textura afanítica (40%). La matriz que representa el 30% restante está compuesta por granos finos que posiblemente corresponden a arena. Los clastos indican una morfología sub redondeada a redondeada con un mal grado de selección.

Se define como una arenisca madura debido a su contenido de cuarzo, feldespato y fragmentos de roca (Figura 45). Según estas características, corresponde a un acuífero confinado con una transmisividad de $1.6E-02$ m²/día (Procel et al., 2023), un espesor promedio de 15 m (Tabla 3), un coeficiente de almacenamiento de $2.0E-04$, conductividad hidráulica teórica de $1E0$ m/día (Health, 1983), conductividad hidráulica *in situ* de $3.9E0$ m/día (Procel et al., 2023) y porosidad efectiva de 0.4 (Davis, 1969).

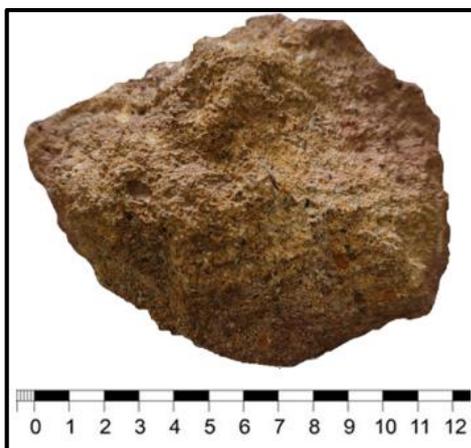


Figura 45. Muestra de mano CBRCH (Ya) de la formación Yaruquíes

La muestra **CBRCH (RI)** proviene de la formación Riobamba (Figura 46). Presenta una superficie lisa y homogénea, con un tamaño de grano inferior a $4\ \mu\text{m}$. El color de la muestra es predominantemente negro, con algunas zonas rojizas (debido a oxidación). Su estructura es masiva y presenta foliación con una matriz pelítica. Pese al tamaño extremadamente pequeño de los granos, se identificó fragmentos de cuarzo (5%), plagioclasa (5%) y minerales arcillosos (10%) con un alto grado de selección (Figura 46).

Esta muestra se define como una lutita (Figura 46). Corresponde a un acuífero semiconfinado con porosidad primaria, con una transmisividad de $6\text{E}+03\ \text{m}^2/\text{día}$ (Procel et al., 2023), un espesor promedio de 40 m (Tabla 3), un coeficiente de almacenamiento de $1.2\text{E}-04$, conductividad hidráulica teórica de $1\text{E}-04\ \text{m}/\text{día}$ (Health, 1983), conductividad hidráulica *in situ* de $1.8\text{E}-01\ \text{m}/\text{día}$ (Procel et al., 2023) y porosidad efectiva de 0.1 (Davis, 1969).



Figura 46. Muestra de mano CBRCH (RI) de la formación Riobamba

La muestra **CBRCH (RI2)** corresponde a la formación Riobamba. Presenta color negro y tamaño de grano que varía entre 0.063 y 1 mm. Posee una textura pelítica y una estructura masiva (Figura 47). A pesar del pequeño tamaño de clastos, se observó clastos de cuarzo de hasta 1 mm. Esta roca ha experimentado un metamorfismo bajo evidenciado por una foliación marcada. La muestra conserva las propiedades características de una arenisca como se muestra en la Figura 47.

Esta muestra se define como una meta arenisca (Figura 47). Corresponde a un acuífero semiconfinado con una transmisividad de $6\text{E}+03\ \text{m}^2/\text{día}$ (Procel et al., 2023),

espesor promedio de 40 m (Tabla 3), coeficiente de almacenamiento de $1.2E-04$, conductividad hidráulica teórica de $1E-02$ m/día (Health, 1983), conductividad hidráulica *in situ* de $1.8E-01$ m/día (Procel et al., 2023) y porosidad efectiva de 0.25 (Davis, 1969).

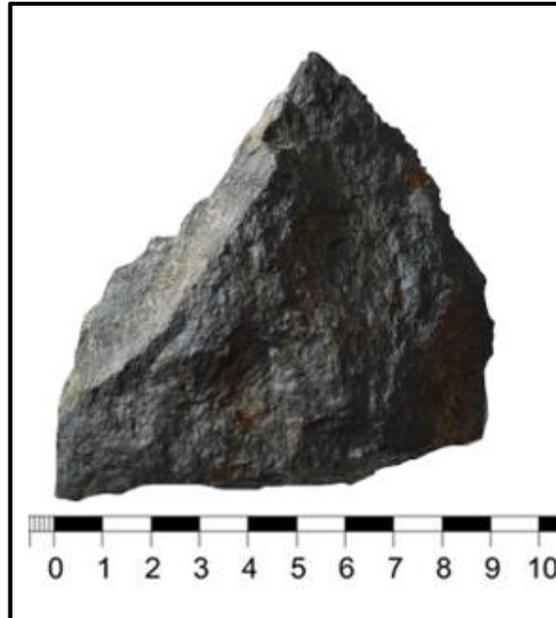


Figura 47. Muestra de mano CBRCH (RI2) de la formación Riobamba.

La muestra **CBRCH (LL)** proviene del flujo de lava del Chimborazo. Presenta un color gris oscuro y posee una textura porfirítica debido a la presencia de una matriz microcristalina (40%) y cristales (60%) con una estructura masiva (Figura 48). Los minerales principales incluyen plagioclasa (25%) y piroxenos (35%) (Figura 48).

Se define como una gabro-norita (Figura 48). Corresponde a un acuífero libre y fracturado localizado en el Flujo de lava de Chimborazo con una transmisividad de $1.0E+02$ m²/día (Procel et al., 2023), un espesor promedio de 30 m (Tabla 3), un coeficiente de almacenamiento de $9E-05$, conductividad hidráulica teórica de $1E0$ m/día (Health, 1983), conductividad hidráulica *in situ* de $5.1E-01$ m/día (Procel et al., 2023) y porosidad efectiva de 0.45 (Davis, 1969).



Figura 48. Muestra de mano CBRCH (LL) del flujo de lava del Chimborazo

4.3.1.2 Descripción Microscópica

La lámina delgada **CBRCH (Ya)** que proviene de la muestra de la Formación Yaruquíes presenta una composición constituida por una matriz (30%) y clastos (70%) (Figura 49). La matriz está compuesta por arena, mientras que los clastos se dividen en cuarzos monocristalinos (15%) y policristalinos (20%), fragmentos de roca (30%), minerales opacos (4%) y carbonato (1%). Los cuarzos, de forma xenomorfa, exhiben un relieve bajo y son incoloros en luz polarizada paralela (LPP), mientras que en luz polarizada cruzada (LPA) varían de grises a amarillentos del primer orden y muestran extinción ondulatoria (Figura 49). Los fragmentos de roca tienen formas subredondeadas a redondeadas de color negro tanto en LPP como en LPA. El tipo de contacto entre los granos es puntual, largo y cóncavo convexo. (Figura 49)

Dada la variabilidad en el tamaño de los clastos y su composición, la muestra se clasifica como una **arenisca conglomerática** (Figura 49).

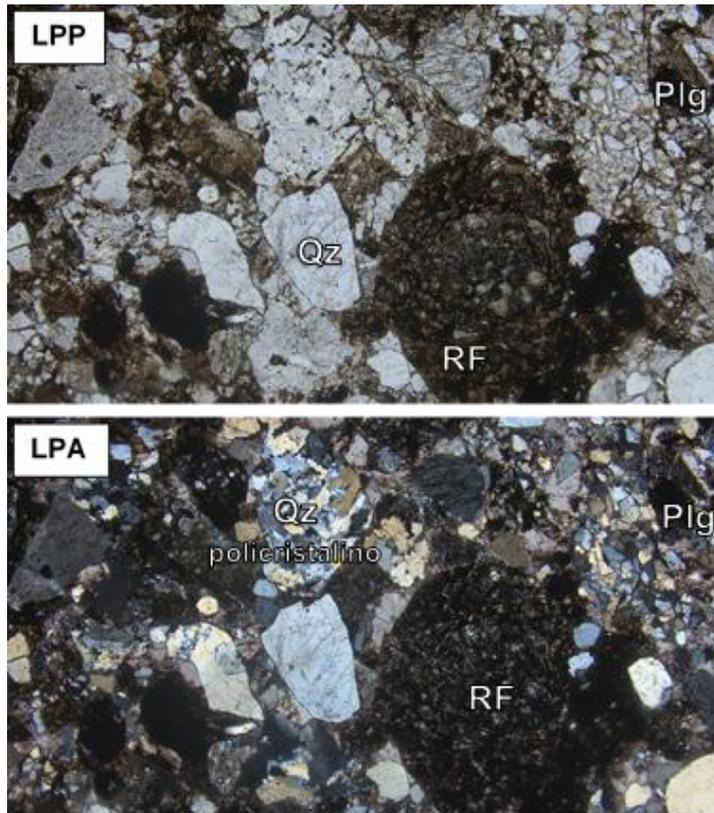


Figura 49. Lámina delgada CBRCH (Ya) de la formación Yaruquíes en luz polarizada plana y luz polarizada cruzada.

La lámina **CBRCH (RI)** que proviene de la muestra de la formación Riobamba presenta un grano muy fino, con tamaños que varían entre 0.025 mm y 0.05 mm (Figura 50). Su composición mineralógica incluye una matriz de sericita (20%), cuarzo (60%), minerales opacos (18%), carbonato (1%) y biotita (<1%). El cuarzo se distingue por ser incoloro en luz polarizada paralela (LPP) y por su baja birrefringencia en luz polarizada cruzada (LPA) (Figura 50). Los minerales opacos se identifican por su color negro tanto en LPP como en LPA (Figura 50). La biotita se reconoce por su color marrón, extinción paralela y alta birrefringencia (Figura 50).

Los clastos en la muestra exhiben un buen grado de selección, con formas que varían de subangulosas a subredondeadas, y presentan contactos largos y concavo convexos entre los granos (Figura 50). Debido al pequeño tamaño de los granos y la fisibilidad observada, esta muestra se clasifica como una **lutita** (Figura 50).

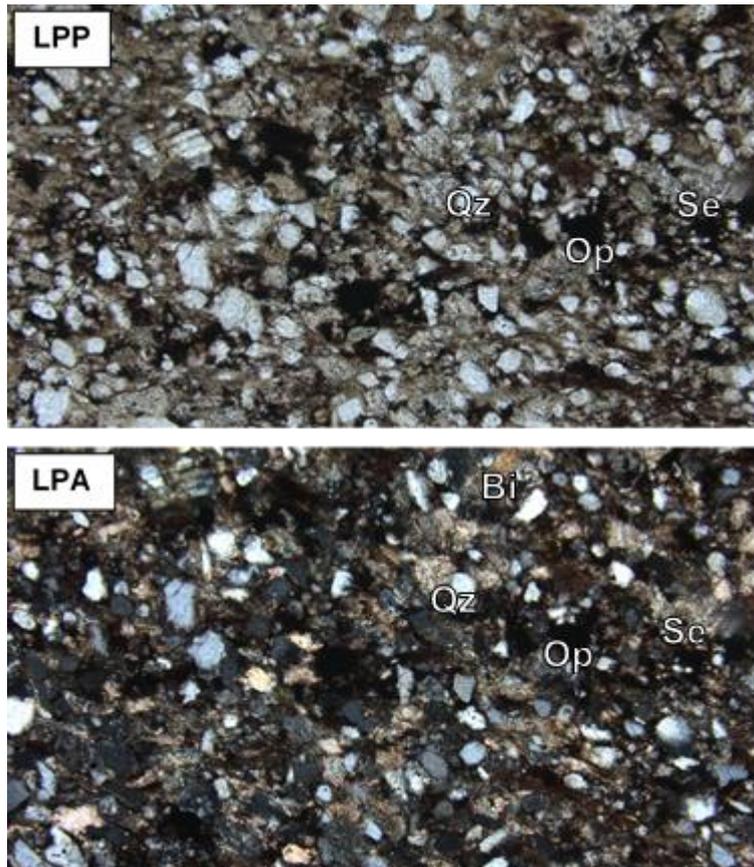


Figura 50. Lámina delgada CBRCH (RI) de la formación Riobamba en luz polarizada plana y luz polarizada cruzada

La lámina **CBRCH (RI2)** presenta tamaño de grano que varía entre 0.02 y 0.8 mm, exhibiendo una textura porfidoblástica. Se compone de matriz de arena fina (70%) y clastos (30%) (Figura 51). Los clastos están constituidos por cuarzo con extinción ondulatoria (10%), feldespato (7%) identificado por su macla de Carlsbad, incoloro, con relieve y baja birrefringencia, y fragmentos de rocas de forma subangulosa (5%) (Figura 51). Se observa biotita (8%) caracterizada por su color marrón, extinción moteada y exfoliación perfecta, que se encuentra alterándose a clorita. Finalmente, en la Figura 51 se observa que la muestra tiene una matriz sericítica reconocible por su color salmón y aspecto brillante.

Se clasifica esta muestra considerando su bajo grado de metamorfismo como una meta-arenisca de grano fino (Figura 51).

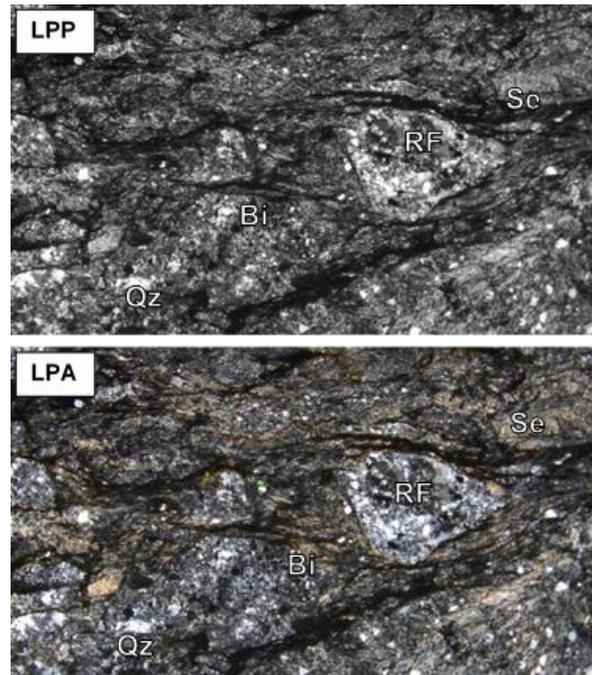


Figura 51. Lámina delgada CBRCH (R12) en luz polarizada plana y luz polarizada cruzada

La lámina delgada **CBRCH (LL)** proviene de la muestra del flujo de lava del Chimborazo (Figura 52). Presenta una composición equilibrada de matriz (50%) y clastos (50%), con una textura porfídica según el tamaño del grano, que varía entre 0.08 mm y 1 mm (Figura 52). La matriz está compuesta por plagioclasas orientadas al NW-SE con una textura microcristalina (Figura 52). Los cristales se componen principalmente de plagioclasa cálcico-sódica que muestra una textura poiquilítica (30%) identificada por su macla polisintética y baja birrefringencia. Como minerales acompañantes, se encuentran la enstatita (15%), reconocible por su clivaje a 87° y baja birrefringencia, y la augita (5%), identificada por su ángulo de extinción de 45° y alta birrefringencia (Figura 52).

Con base en la composición mineral y textura, la muestra CRBCH (LL) se clasifica como gabro-norita (Figura 52)

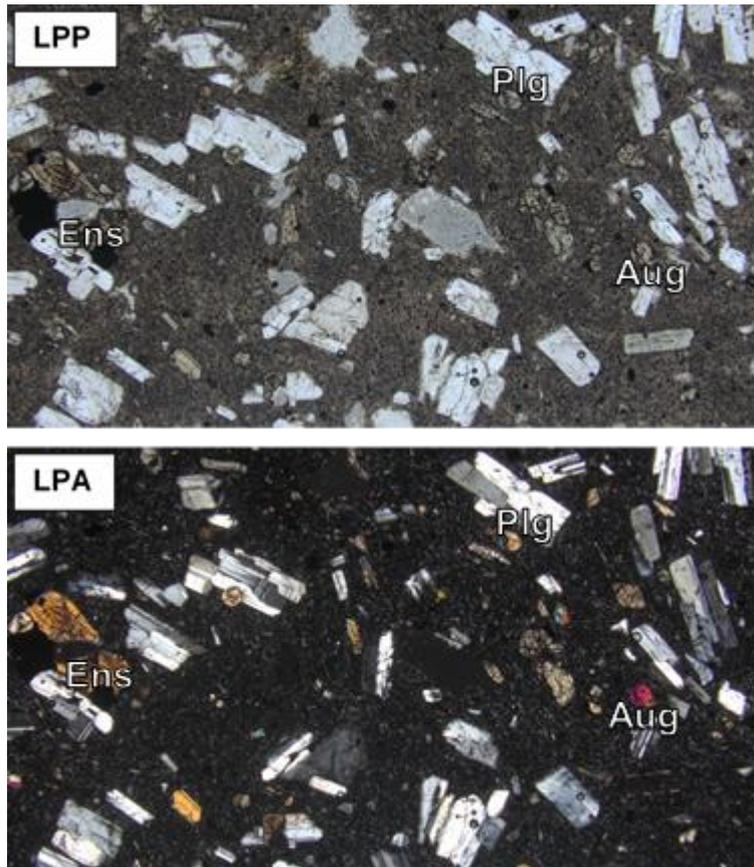


Figura 52. Lámina delgada CBRCH (LL) del flujo de lava del Chimborazo en luz polarizada plana y luz polarizada cruzada

4.2 Parámetros hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos de las formaciones se estimaron utilizando las ecuaciones de transmisividad y almacenamiento específico de las ecuaciones 2 y 3, respectivamente (Tabla 5). Este cálculo se realizó utilizando la conductividad hidráulica teórica de Freeze & Cherry (1979) de las muestras descritas en la sección anterior, las cuales representan las principales unidades hidrogeológicas que constituyen los acuíferos Llío-Guano, Riobamba y Yaruquíes.

Tabla 5. Parámetros hidrogeológicos (T y S) calculados para las formaciones que constituyen acuíferos en la CBRCH. K, conductividad hidráulica (m/día); b, espesor del acuífero (m); n_e , porosidad efectiva.

| Muestra | Formación Geológica | K (Procel et al., 2023) | b (Tabla 3) | n_e (Davis, 1985) | T (m ² /día) | S |
|-------------|-----------------------|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|----------|
| CBRCH (LL) | Flujo Lava Chimborazo | 5.1E-01 | 3.00E01 | 4.50E-01 | 1.00E02 | 9.00E-05 |
| CBRCH (RI) | Formación Riobamba | 1.8E-01 | 4.00E01 | 1.00E-01 | 6.00E03 | 1.20E-04 |
| CBRCH (RI2) | Formación Riobamba | 1.8E-01 | 4.00E01 | 2.50E-01 | 6.00E03 | 1.20E-04 |
| CBRCH (Ya) | Formación Yaruquies | 3.9E00 | 1.50E01 | 4.00E-01 | 1.60E-02 | 2.00E-04 |

Se determinó que la formación Riobamba presenta los valores más altos de transmisividad de 6.0E03 m²/día con respecto al Flujo de lava Chimborazo (1.00E02 m²/día) y formación Yaruquies (1.60E-02 m²/día) (Figura 53). El coeficiente de almacenamiento específico se correlaciona con estos resultados siendo mayor en Riobamba (1.20E-04) y menor en el Flujo de Lava del Chimborazo (9.00E-05 m²/día) (Figura 53). De acuerdo con estos valores, las formaciones constituidas por rocas de porosidad primaria y un mayor espesor presentarían los valores más altos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento. No obstante, es importante notar que la mayor conductividad hidráulica presenta la formación conformada por rocas basálticas de porosidad secundaria. Además, es esta formación, el Flujo de lava del Chimborazo, la que aporta la mayor cantidad de agua subterránea en la cuenca. Por lo que, se debe considerar las condiciones físicas de las formaciones geológicas que constituyen acuíferos como el espesor, litología, y conductividad hidráulica para evaluar los parámetros hidrogeológicos.

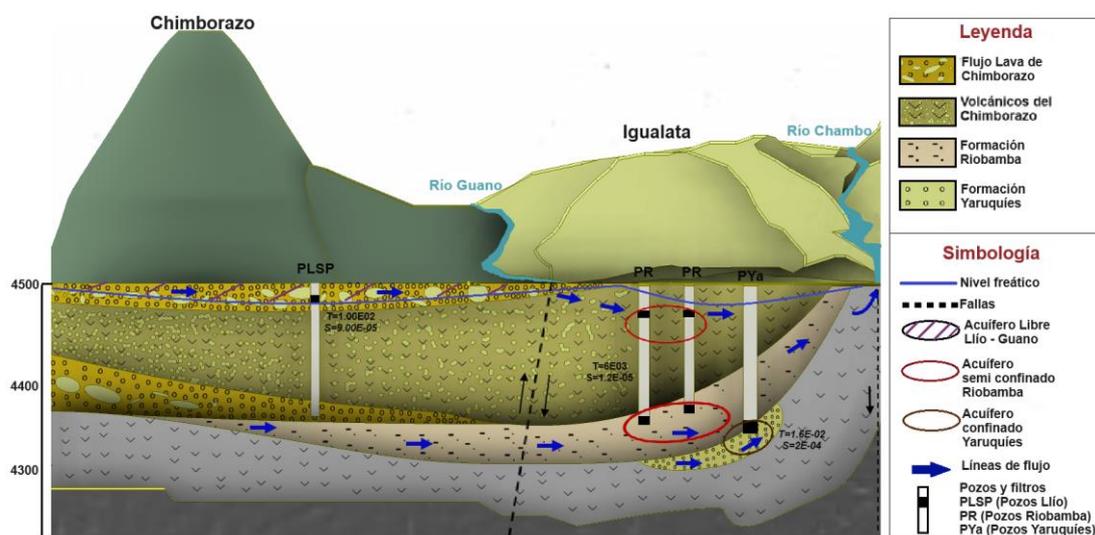


Figura 53. Perfil de los tipos de acuífero de la CBRCH

Adicionalmente, se determinó la velocidad de flujo del agua subterránea en las formaciones que constituyen acuíferos con base en el gradiente hidráulico y la conductividad hidráulica y la ecuación 9 (Tabla 6). La carga hidráulica se calculó restando la cota o elevación del pozo menos el nivel estático del agua.

Tabla 6. Estimación de la velocidad de flujo de agua subterránea en las formaciones que constituyen acuíferos.

| Pozo | Carga Hidráulica (m) | Δh (m) | ΔL (m) | Gradiente Hidráulico (i) | K (m/día) | V (m/día) | Cota (m.s.n.m) | N.E(m) |
|------------|----------------------|----------------|----------------|--------------------------|-----------|-----------|----------------|--------|
| Llío-Guano | | | | | | | | |
| PLSP 3 | 3.11E+03 | | | | | | 3120 | 49.5 |
| PLSP 5 | 3.10E+03 | 1.09E01 | 2.24E02 | 4.88E-02 | 5.1E-01 | 2.50E-02 | 3116 | 34.2 |
| Riobamba | | | | | | | | |
| PR4 | 2.75E+03 | 3.03E01 | 7.03E03 | 4.31E-03 | 1.8E-01 | 7.80E-04 | 2887 | 140.1 |
| PR2 | 2.72E+03 | 2.72E03 | 7.03E03 | 3.86E-01 | 1.8E-01 | 7.00E-02 | 2768 | 51.4 |
| Yaruquíes | | | | | | | | |
| PY1 | 2.76E+03 | 1.22E01 | 1.62E03 | 7.50E-03 | 9.9E+00 | 7.40E-02 | 2817 | 60.99 |
| PY2 | 2.74E+03 | | | | | | 2815 | 7116 |

De acuerdo con la Tabla 6, la velocidad de flujo del agua subterránea es mayor en la formación Yaruquíes () y menor en el flujo de lava Chimborazo (), siendo intermedia en la Formación Riobamba (7.2E-02 m/día). Es necesario considerar que tanto la formación Yaruquíes como la formación Riobamba presentan una mayor distancia entre pozos y pozos de mayor profundidad lo que condiciona la velocidad del agua.

4.3 Modelo Matemático

En este estudio, se desarrolló un modelo único que simula los 16 pozos y las diferentes litologías en formaciones geológicas, permitiendo una representación integral y detallada de las diversas características geológicas presentes en el área de estudio (Figura 54). Es importante mencionar que en el modelo matemático se utilizaron 11 formaciones geológicas definidas en la sección 4.1 y Tabla 3. No obstante, se consideró una subdivisión de la formación Volcánicos Chimborazo en 2 miembros VCh1 que corresponden a productos volcánicos del Chimborazo (p.e. avalancha de escombros) y VCh2 que corresponde al flujo de Lava del Chimborazo. Considerando esta subdivisión, se trabajó con 12 capas o *layers* para el modelamiento de la litología.

Las estructuras y espesores de las formaciones geológicas condicionan la existencia de tres acuíferos en el área de estudio: El acuífero Llíó-Guano de tipo libre y porosidad primaria cuyo flujo de agua subterránea proviene de la vertiente San Pablo (Procel et al., 2023); El acuífero de Riobamba que constituye un acuífero colgado con porosidad primaria localizado en los Volcánicos del Chimborazo y en la formación Riobamba donde es semiconfinado con porosidad primaria; El acuífero de Yaruquíes, un acuífero confinado con porosidad primaria (Figura 53).

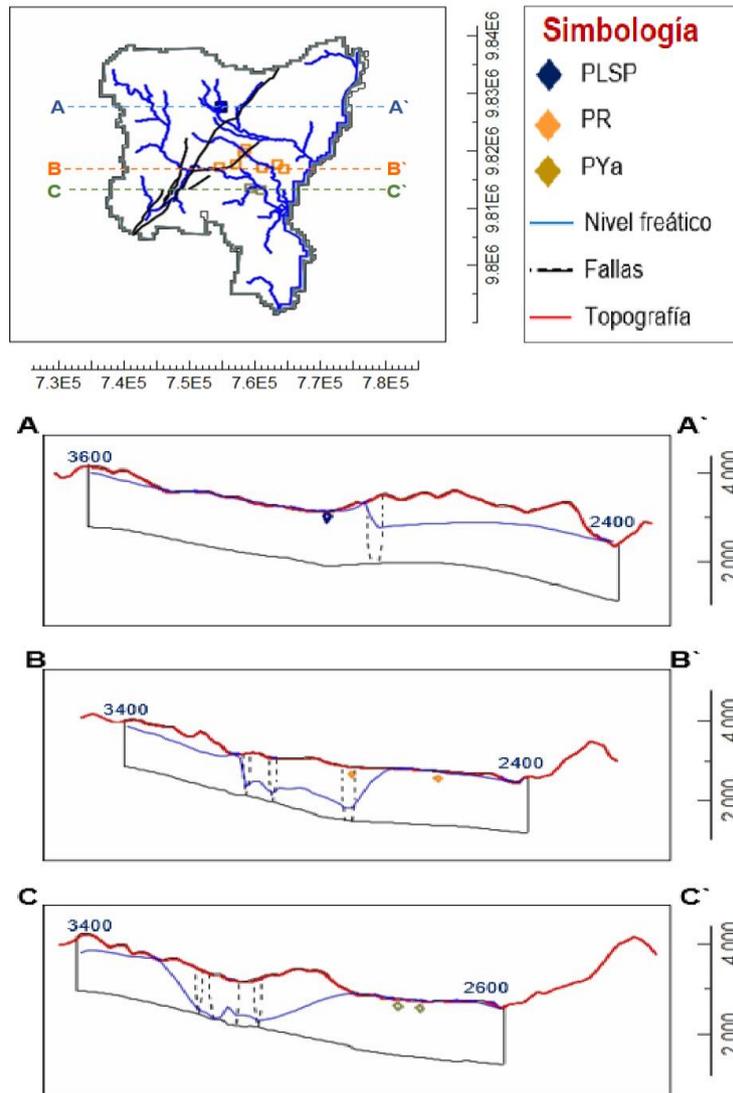


Figura 54. Ubicación de los pozos en la zona de estudio. Perfil A-A` zona norte (Llíó), Perfil B-B` zona centro (Riobamba), Perfil C-C` zona sur (Yaruquíes).

El modelo hidrogeológico generó los niveles de agua subterránea representados por isopiezas como se muestra en la Figura 55. Los resultados indican que la zona norte presenta los niveles más altos de agua de 4600 m a 3600 m debido a que existen 7 pozos con mayores caudales que vienen del Flujo de lava del Chimborazo. A medida

que el flujo desciende a la zona de descarga (Río Chambo), los niveles de agua disminuyen de 3600 m a 2400 m. Esto refleja que el flujo natural del agua subterránea tiene una dirección de noroeste a noreste desde las áreas de recarga (Volcán Chimborazo) hacia las de descarga (Río Chambo).

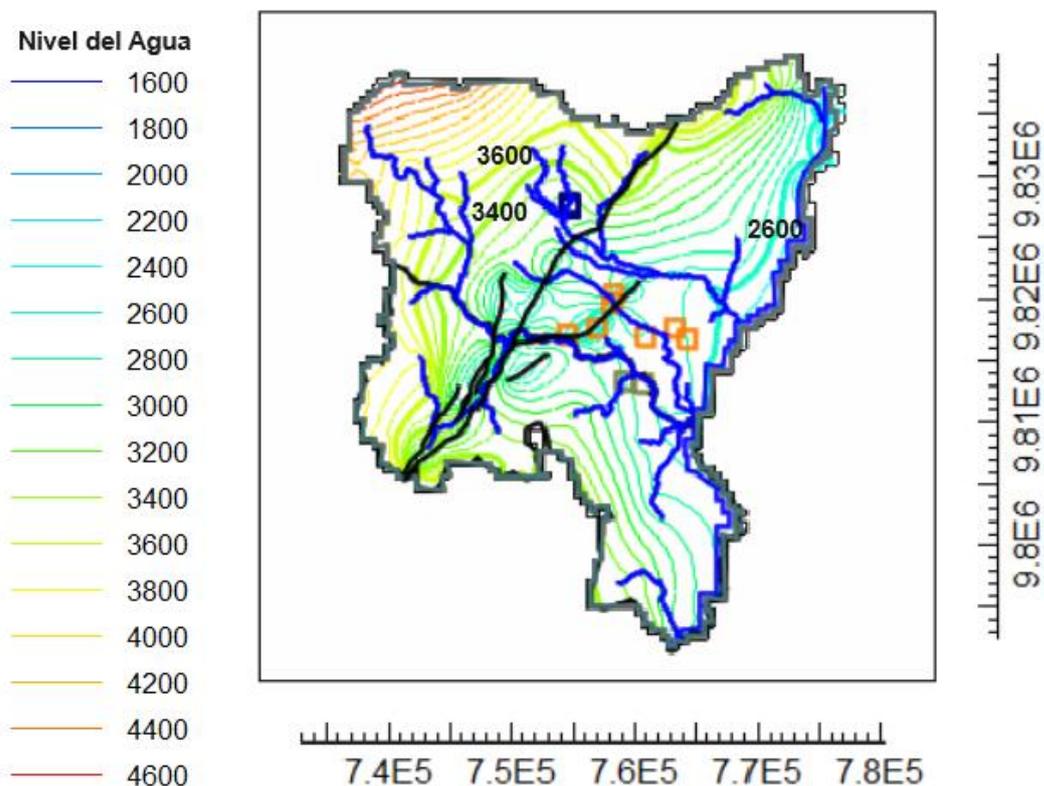


Figura 55. Nivel de agua representado por isopiezas en la CBRCH.

En la Figura 56A se observa en el perfil A-A', correspondiente a la zona norte (Llío-Guano), cómo el nivel de agua es el más alto y disminuye al atravesar el sistema de falla de Pallatanga debido a que se circula a través de dos medios con diferente conductividad hidráulica generando una disminución del nivel del agua de 3600 m a 2100 m y un subsecuente incremento a 2400 m hasta el área de descarga (Figura 56A). Este incremento se relaciona con la circulación del agua a través del depósito de avalancha del volcán Chimborazo que se conforma de rocas volcano-sedimentarias que forman lentes que almacenan agua.

En el perfil B-B' se muestra que el nivel de agua en Riobamba se encuentra más bajo con un rango de 3400 a 1600 m (Figura 56B). Esta disminución se relaciona con la presencia de acuíferos colgados que tienen un nivel de agua de 53 m de profundidad

y un segundo nivel de agua que se localiza a 140.1 m de profundidad (Procel et al. 2023).

En el perfil C-C', que representa la zona sur (Yaruquíes), el nivel de agua varía entre 3400 m y 2200 m. Estas variaciones implican también la presencia de un nivel acuífero profundo correspondiente al acuífero Yaruquíes que presenta un nivel de agua de 82.3 m (Figura 56C).

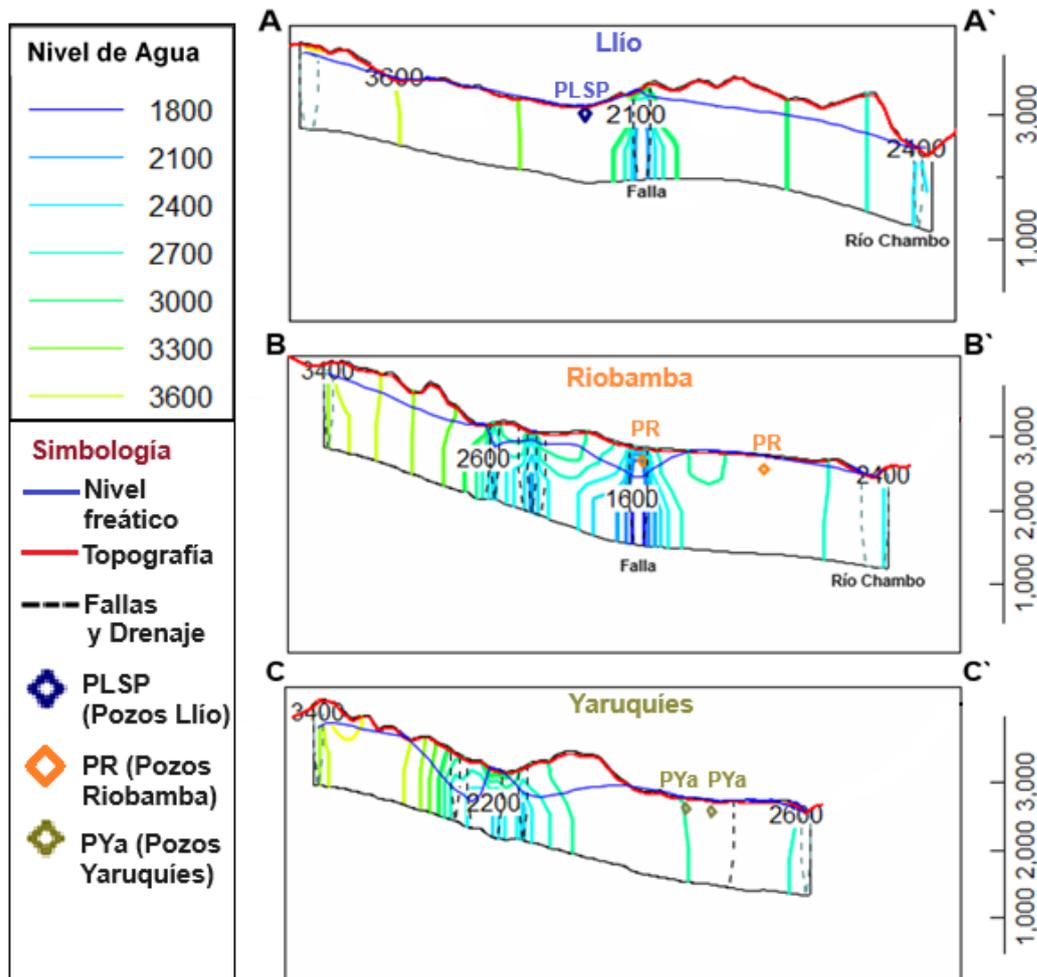


Figura 56. Nivel de agua representado por isopiezas en: Perfil A-A' zona norte (Llíó), Perfil B-B' zona centro (Riobamba), Perfil C-C' zona sur (Yaruquíes).

4.3.1 Balance Hídrico

La aplicación del modelo matemático permite el cálculo del balance hídrico de las entradas y salidas de agua en la CBRCH. Considerando los paquetes activos que se añadieron en el modelamiento como el sistema de drenaje y Río Chambo, los pozos,

la recarga local, la falla Pallatanga, los niveles de agua, y la ecuación 1, el cálculo del balance hídrico se determinó de acuerdo con la ecuación 16.

$$RCH = WEL + RIV + DRN + CHD \quad \text{(Ecuación 16)}$$

Donde, RCH es la recarga local, WEL los pozos, RIV el sistema de drenaje, DRN el río Chambo y la falla Pallatanga y CHD, el nivel del agua.

MODFLOW 6 estima el balance hídrico considerando las variables de la ecuación 16 obteniendo la resta de las entradas menos las salidas de 4.88×10^{-2} (Figura 57). Este valor se relaciona con el aspecto de que se consideró la recarga local como principal entrada de agua en la cuenca. Es decir, el balance hídrico indica que la cantidad de agua descargada de la cuenca supera la recarga local, conclusión que concuerda con lo indicado por Procel et al. (2023), e indica que el principal aporte hídrico proviene de la recarga regional que corresponde a la zona del volcán Chimborazo, lo que mantiene el equilibrio en la CBRCH.

| Entrada: | Salida: |
|----------------------------------|----------------------------------|
| WEL = 33397.4300 | WEL = 33397.4300 WEL-1 |
| DRN = 46563890599.1218 | DRN = 46563890599.1218 DRN-1 |
| RIV = 132751758.0566 | RIV = 132751758.0566 RIV-1 |
| RCH = 0.0000 | RCH = 0.0000 RCH-1 |
| CHD =111550169127.8327 | CHD =111550169127.8327 CHD-1 |
| TOTAL OUT =158246844882.4411 | TOTAL OUT =158246844882.4411 |
| IN - OUT = 4.8889E-02 | IN - OUT = 4.8889E-02 |
| PERCENT DISCREPANCY = 0.00 | PERCENT DISCREPANCY = 0.00 |

Figura 57. Cálculo del Balance Hídrico realizado en MODFLOW 6 considerando la recarga local.

5. CONCLUSIONES

- El modelo preliminar matemático sugiere que, al simular únicamente la recarga local, existe un flujo subterráneo desde la zona de recarga (Volcán Chimborazo) hacia la zona de descarga (Río Chambo). Los niveles de agua reflejan un mayor nivel en la zona norte (3600 m) y se puede llegar hasta los (2400 m) en la zona de descarga (Río Chambo), siguiendo un gradiente hidráulico ($2.6E-02$) influenciado por la topografía y la geología local.
- En la CBRCH existen 3 acuíferos que corresponden a Llío-Guano (acuífero libre) con porosidad secundaria cuyo flujo de agua subterránea proviene de la vertiente San Pablo. El acuífero de Riobamba es un acuífero colgado con porosidad primaria, localizado en los volcánicos del Chimborazo, por encima de la Formación Riobamba, con un nivel de agua a 53 metros de profundidad. Existe otro nivel de agua a 140.1 metros, correspondiente a un acuífero semiconfinado con porosidad primaria y secundaria. El acuífero de Yaruquíes que es un acuífero confinado con porosidad primaria, que presenta un nivel de agua a 82.3 metros.
- El sistema de fallas del modelo tiene un impacto significativo en los acuíferos, alterando la conductividad hidráulica y dirigiendo el flujo de agua subterránea. Esta estructura actúa como barrera hidráulica, reorientando el flujo y redefiniendo zonas específicas de recarga y descarga. Además, pueden interconectar diferentes acuíferos, afectando tanto la cantidad como la calidad del agua subterránea. En la figura 56, se observa una disminución del nivel de agua al atravesar la falla de Pallatanga, lo que evidencia su influencia directa en el nivel freático.
- De la descripción petrográfica de las muestras de roca se caracterizó a un gabro norita, una arenisca conglomerática, una lutita y una meta arenisca. La primera correspondiente al Flujo de Lava Chimborazo que presenta 2 tipos de piroxenos (Augita y Enstatita) característicos del volcanismo del Chimborazo. Esta muestra correspondería a un acuífero libre de Llío - Guano de porosidad secundaria. La lutita y meta arenisca pertenecen a la Formación Riobamba, estas muestras se asocian a un acuífero semiconfinado con porosidad primaria. La arenisca conglomerática pertenece a la Formación Yaruquíes, esta muestra corresponde a un acuífero confinado con porosidad primaria.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda construir un modelo matemático incluyendo la recarga regional de la CBRCH con el objetivo de establecer otro balance hídrico de la zona y compararlo con el realizado en este trabajo.
- Considerar como condición de borde las vertientes presentes en el área de estudio debido a que el mayor aporte de agua subterránea proviene de la vertiente San Pablo ubicada en el acuífero Lío – Guano.
- Es recomendable realizar un levantamiento de información sobre las propiedades y parámetros hidrogeológicos *in situ* con la finalidad de actualizar y mejorar el modelo matemático preliminar considerando las posibles variaciones temporales y espaciales.
- Se propone realizar el modelamiento matemático en estado dinámico, heterogéneo y anisótropo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arai, F. K., Pereira, S. B., & Gonçalves, G. G. G. (2012). Characterization of water availability in a hydrographic basin. *Engenharia Agrícola*, 32, 591-601. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000300018>
- Bablon, M., Quidelleur, X., Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., Lahitte, P., Liorzou, C., Bustillos, J. E., & Hidalgo, S. (2018). Eruptive chronology of Tungurahua volcano (Ecuador) revisited based on new K-Ar ages and geomorphological reconstructions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 357, 378-398. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.05.007>
- Barba, D. (2006). *Estudio vulcanológico del complejo volcánico Chimborazo-Ecuador* [B.S. thesis]. QUITO/EPN/2006.
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., & Vergara, W. (2006). Threats to Water Supplies in the Tropical Andes. *Science*, 312(5781), 1755-1756. <https://doi.org/10.1126/science.1128087>
- Brandenburg, J. P. (2020). *Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models*. The Groundwater Project. <https://books.gw-project.org/geologic-frameworks-for-groundwater-flow-models/>
- Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B. D., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1), Article 1. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Chidichimo, F., Mendoza, B. T., De Biase, M., Catelan, P., Straface, S., & Di Gregorio, S. (2018). Hydrogeological modeling of the groundwater recharge feeding the Chambo aquifer, Ecuador. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 020003. <https://doi.org/10.1063/1.5060683>
- Clapperton, C. M. (1993). Nature of environmental changes in South America at the Last Glacial Maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 101(3), 189-208. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(93\)90012-8](https://doi.org/10.1016/0031-0182(93)90012-8)
- Comité de la Subcuenca del río Chambo. (2015). *Aportes a la planificación para la gestión integral de recursos hídricos*. CESA. <http://cesa.org.ec/documentos/aportes-la-planificacion-la-gestion-integral-recursos-hidricos-contribucion-del-comite-la-subcuenca-del-rio-chambo-cesa-2015/>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea* (Vol. 1). Omega Barcelona.

- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*.
- Hofstede, R. G. M., Lips, J. M., & Jongsma, W. (1998). *Geografía, ecología y forestación de la Sierra Alta del Ecuador: Revisión de literatura*. Abya-Yala.
- INAMHI. (2017). *TIPOS DE CLIMA ECUADOR 2017*. Geoinformación Hidrometeorológica.
<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/geoinformacion-hidrometeorologica/>
- INEC. (2010). *Población y Demografía*. Instituto Nacional de Estadística y Censos.
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- Lavenu, A., Winter, T., & Dávila, F. (1995). A Pliocene–Quaternary compressional basin in the Interandean Depression, Central Ecuador. *Geophysical Journal International*, 121(1), Article 1. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03527.x>
- Liu, N. (2015). Emergence, concept, and understanding of Pan-River-Basin (PRB). *International Soil and Water Conservation Research*, 3(4), 253-260.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.10.003>
- Manahan, S. E. (2010). *Water Chemistry: Green Science and Technology of Nature's Most Renewable Resource*. CRC Press.
- Misstear, B., Banks, D., & Clark, L. (2017). *Water Wells and Boreholes*. John Wiley & Sons.
- Molle, F. (2009). River-basin planning and management: The social life of a concept. *Geoforum*, 40(3), 484-494. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2009.03.004>
- Núñez Caiza, G. R. (2021). *Caracterización Hidrogeoquímica e Isotópica de la Cuenca baja del río Chambo, Provincia de Chimborazo* [bachelorThesis, Quito, 2021.]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21335>
- Poeter, E., Fan, Y., Cherry, J., Wood, W., & Mackay, D. (2020, agosto 21). *Groundwater in Our Water Cycle*. Groundwater in Our Water Cycle; The Groundwater Project. <https://books.gw-project.org/groundwater-in-our-water-cycle/>
- Procel, S. (2018). *Ferramentas de gestão dos recursos hídricos: Estudo de caso na bacia do baixo Rio Chambo (Ecuador)* [Text, Universidade de São Paulo].
<https://doi.org/10.11606/T.44.2018.tde-06122018-153742>
- Procel, S., Núñez, G., Puebla, R., Hirata, R., Manciat, C., & Mendoza, B. (2023). Conceptual model of groundwater flow in a volcanic-sedimentary aquifer system of the Andean region of Chimborazo, Ecuador. *Journal of South*

- American Earth Sciences*, 131, 104641.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104641>
- Randel, R. P., & Lozada, F. (1976). *Mapa geológico del Ecuador, Hoja 69, Chimborazo* [Map]. Ministerio de Minería y Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico.
- Salguero, A. (2017). *Levantamiento geológico-estructural de la zona comprendida por la Hoja Topográfica de Guano Escala 1:50000, Provincia de Chimborazo*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19014>
- Sharp Jack. (2023). *A Glossary of Hydrogeology* (The University of Texas Austin, Vol. 1). The Groundwater Project. <https://gw-project.org/books/a-glossary-of-hydrogeology/>
- Thorntwaite, C. W., & Mather, J. R. (1955). *The Water Balance. Publications in Climatology* (Vol. 8). Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology.
- Trenberth, K. E., & Asrar, G. R. (2014). Challenges and Opportunities in Water Cycle Research: WCRP Contributions. En L. Bengtsson, R.-M. Bonnet, M. Calisto, G. Destouni, R. Gurney, J. Johannessen, Y. Kerr, W. A. Lahoz, & M. Rast (Eds.), *The Earth's Hydrological Cycle* (pp. 515-532). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8789-5_3
- Vallejo, C. (2007). *Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous-Paleogene)*. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005416411>
- Winston, R. (2023). *Getting Started with MODFLOW | The Groundwater Project* (1.^a ed., Vol. 1). <https://gw-project.org/books/getting-started-with-modflow/>

ANEXO I

Tabla 7. Recopilación bibliográfica de: (Naranjo, 2013), (Procel, 2023) y (Espinoza, 2022), donde se indica la ubicación de los 16 pozos y Parámetros hidrogeológicos. Q, caudal; K, conductividad hidráulica; T, transmisividad, Trec, transmisividad recalculada.

| POZOS | X | Y | Cota (msnm) | Litología | Ubicación | Espesor Formación(m) | Profundidad (m) (Naranjo, 2013) | Q(m3/día) (Procel, 2023) | Q(m3/día) (Naranjo, 2013) | k (m/día) (Naranjo, 2013) | k (m/día) (Espinoza, 2022) | k (m/día) (Procel, 2023) | k (m/día) Mínimo (Health, 1993) | k (m/día) Máximo (Health, 1993) | N.E (m) (Naranjo, 2013) | N.E (m) (Procel, 2023) | NE Promedio (m) | Carga Hidráulica (m) | T (m ² /día) | Trecup (m ² /día) | Tcalc (m ² /día) | S |
|---------------------------|--------|----------|-------------|---------------|------------------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|----------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------|
| Acuífero Lío Guano | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PLSP1 | 754485 | 9827333 | 3123 | V. Chimborazo | Cantón Guano | 150 | 88 | 4.75E+03 | 4.75E+03 | | | | 1.00E+01 | 1.00E-03 | 13.6 | 13.6 | 13.6 | 3109.4 | 8.21E-05 | | | |
| PLSP2 | 754446 | 9827230 | 3116 | V. Chimborazo | Cantón Guano | 150 | 97 | 5.36E+03 | 0.00E+00 | | | | 1.00E+01 | 1.00E-03 | 24 | 24 | 24 | 3092 | 8.21E-05 | | | |
| PLSP3 | 754395 | 9827005 | 3120 | V. Chimborazo | Cantón Guano | 150 | 50 | 1.21E+03 | 0.00E+00 | | | | 1.00E+01 | 1.00E-03 | 13.05 | 13.1 | 13.075 | 3106.925 | 8.21E-05 | | | |
| PLSP4 | 754395 | 9826998 | 3119 | V. Chimborazo | Cantón Guano | 150 | 168 | 3.97E+03 | 0.00E+00 | | | | 1.00E+01 | 1.00E-03 | 17 | 17 | 17 | 3102 | 8.21E-05 | | | |
| PLSP5 | 754449 | 9827230 | 3116 | V. Chimborazo | Cantón Guano | 150 | 224 | 8.21E+03 | 8.64E+03 | | | | 1.00E+01 | 1.00E-03 | 20 | 20 | 20 | 3096 | 8.21E-05 | | | |
| PLSP6 | 754386 | 9827228 | 3113 | V. Chimborazo | Cantón Guano | 150 | * | 3.97E+03 | 1.73E+03 | | | | 1.00E+01 | 1.00E-03 | 14.6 | 14.6 | 14.6 | 3098.4 | 8.21E-05 | | | |
| PLSP7 | 754424 | 9827142 | 3116 | V. Chimborazo | Cantón Guano | 150 | 75 | 2.33E+03 | 1.73E+03 | | | | 1.00E+01 | 1.00E-03 | 20.8 | 20.8 | 20.8 | 3095.2 | 8.21E-05 | | | |
| Acuífero Riobamba | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PR1 | 757432 | 9819172 | 2901 | F. Riobamba | Licán (Cantón Riobamba) | 60 | 221 | 2.24E+02 | 2.59E+02 | 8.00E-02 | 1.77E-02 | 1.77E-01 | 1.00E+00 | 1.00E-04 | 46.56 | 46.6 | 46.58 | 2854.42 | 3.52E+00 | 5.96E+00 | 1.06E+01 | 5.48E+02 |
| PR2 | 764096 | 9816447 | 2768 | F. Riobamba | San Martín de Veranillo | 60 | 222 | 5.97E+02 | 6.91E+02 | 5.47E+00 | 1.84E+00 | 1.84E+00 | 1.00E+00 | 1.00E-04 | 51.4 | 51.4 | 51.4 | 2716.6 | 2.96E+02 | 2.59E+02 | 1.10E+02 | 5.77E-06 |
| PR3 | 757551 | 9819673 | 2981 | F. Riobamba | Barrio Santa Ana de Tapi | 60 | 243 | 5.96E+02 | 6.91E+02 | 8.40E-01 | 2.58E-01 | 2.42E+01 | 1.00E+00 | 1.00E-04 | 49.53 | 49.5 | 49.515 | 2931.485 | 5.54E+01 | 1.37E+01 | 1.45E+03 | 9.76E-03 |
| PR4 | 758140 | 9819959 | 2887 | F. Riobamba | Barrio El Carmen (Riobamba) | 60 | 243.9 | 3.73E+02 | 4.32E+02 | 1.01E+00 | 2.73E+01 | 2.73E+01 | 1.00E+00 | 1.00E-04 | 140.13 | 140.1 | 140.115 | 2746.885 | 6.06E+01 | 2.31E+01 | 1.64E+03 | 2.19E-07 |
| PR5 | 763392 | 9817550 | 2746 | F. Riobamba | Barrio San Antonio vía Baños | 60 | 222.5 | 5.44E+02 | 6.33E+02 | 1.21E+00 | 5.14E-01 | 5.14E-01 | 1.00E+00 | 1.00E-04 | 34.19 | 34.2 | 34.195 | 2711.805 | 7.99E+01 | 4.24E+01 | 3.08E+01 | 2.17E-12 |
| PR6 | 756684 | 98817300 | 2871 | F. Riobamba | Liribamba | 60 | 255 | 5.47E+02 | 6.33E+02 | 6.88E+00 | 1.78E+00 | 1.78E+00 | 1.00E+00 | 1.00E-04 | 88.8 | 88.8 | 88.8 | 2782.2 | 4.13E+02 | 4.12E+02 | 1.07E+02 | 2.15E-24 |
| PR7 | 760979 | 9816928 | 2833 | F. Riobamba | Brigada Galápagos | 60 | 200 | 6.22E+02 | 7.20E+02 | 4.39E+00 | 9.06E-01 | 9.07E-01 | 1.00E+00 | 1.00E-04 | 49.43 | 49.4 | 49.415 | 2783.585 | 1.89E+02 | 1.43E+02 | 5.44E+01 | 3.30E-06 |
| Acuífero Yaruquíes | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PY1 | 758947 | 9812997 | 2817 | F. Yaruquíes | Shuyo | 68 | 151 | 8.64E+01 | 8.64E+01 | 1.00E-01 | 1.67E-02 | 1.90E-07 | 1.00E+00 | 1.00E-02 | 47.49 | 74.5 | 60.995 | 2756.005 | 2.41E-04 | | 1.29E-05 | |
| PY2 | 758994 | 9813514 | 2815 | F. Yaruquíes | Santa Cruz de Yaruquíes | 68 | 258.5 | 2.59E+03 | 3.31E+02 | 3.10E-01 | 7.19E-02 | 1.90E-07 | 1.00E+00 | 1.00E-02 | 52.32 | 90 | 71.16 | 2743.84 | 2.41E-04 | | 1.29E-05 | |

ANEXO II

Figura 58. Rangos de conductividad hidráulica y litología. Tomado de Heath (1983).

