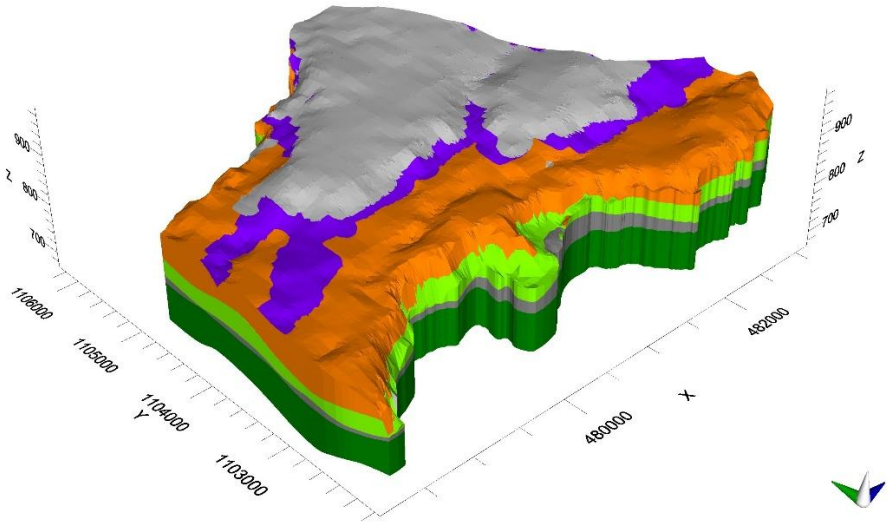
SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, RIEGO Y AVENAMIENTO | GOBIERNO DE COSTA RICA

BELEN GOBIERNO LOCAL

Dirección de Investigación y Gestión Hídrica

Unidad de Investigación Hidrogeológica

"MODELO NUMÉRICO PARA LOS ACUÍFEROS EXISTENTES EN EL CANTÓN DE BELÉN, HEREDIA, COSTA RICA"



Licitación Abreviada

2022LA-000014-0002600001

SENARA-DIGH-UIH-INF-044-2025

Agosto de 2025

Créditos

Compilador:	M Sc. Jonathan Chinchilla Cortés Unidad de Investigación hidrogeológica Dirección de Investigación y Gestión Hídrica
Geología, Hidrogeología y Modelación Numérica:	M Sc. Jonathan Chinchilla Cortés Unidad de Investigación hidrogeológica Dirección de Investigación y Gestión Hídrica M Sc. Michelle Arias Fernández Unidad de Investigación hidrogeológica Dirección de Investigación y Gestión Hídrica
Hidrología y Cuencas Hidrológicas:	M Sc. Sonia Castro Chacón Unidad de Gestión Sostenible de Acuíferos Dirección de Investigación y Gestión Hídrica
Uso del Suelo	M Sc. Katherine Briones Cambronero Unidad de Investigación hidrogeológica Dirección de Investigación y Gestión Hídrica
Coordinación Unidad de Investigación Hidrogeológica:	M Sc. Alonso Alfaro Martínez
Dirección de Investigación y Gestión Hídrica:	M Sc. Roberto Ramírez Chavarría

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Justificación 1
1.2 Propósito del informe 3
1.3 Objetivo general 3
1.4 Objetivos específicos 4
1.5 Ubicación geográfica administrativa 4
1.6 Subcuenca hidrográfica 6
1.7 Escala de trabajo 7
1.8 Período de análisis 8
1.9 Metodología de trabajo 9
1.9.1 Modelo hidrogeológico conceptual 11
1.9.2 Recarga Potencial y disponibilidad 12
1.9.3 Modelación numérica matemática 14
1.10 Antecedentes 19
1.11 Alcances y limitantes del estudio 22
1.11.1 Alcances 22
1.11.2 Limitantes 22
2. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA DEL CANTÓN DE BELÉN 24
2.1 Ubicación y descripción del área de estudio 24
2.2 División altitudinal y pendientes 26
2.3 Áreas de conservación 29
2.4 Zonas de vida 29
2.5 División por subcuencas y microcuencas 31
2.6 Características morfométricas de las cuencas 32
2.6.1 Microcuenca del Río Segundo 33
2.6.2 Microcuenca del Río Bermúdez 38
2.6.3 Microcuenca quebrada Seca – Río Burío 42

2.7 Climatología general del cantón 46
2.7.1 Información meteorológica 46
2.8 Aforos en cauces de ríos y quebradas 51
3. GEOLOGÍA 54
3.1 Marco Geológico Regional 54
3.1.1 Formación Lavas Intracañón 54
3.1.2 Depósitos de Avalancha Ardiente 55
3.1.3 Formación Barva 56
3.2 Geología Local 61
3.2.1 Registros litológicos de pozos 62
3.2.2 Perforaciones exploratorias 62
3.2.3 Cartografiado geológico y mapa de afloramientos 64
3.2.4 Modelo geológico local y perfiles geológicos 73
4. HIDROGEOLOGÍA 77
4.1 Inventario de pozos, manantiales y concesiones 77
4.1.1 Bases de datos institucionales 77
4.2 Modelo Hidrogeológico Conceptual 89
4.2.1 Acuífero en rocas volcánicas Colima 90
4.2.2 Acuitardo Tiribí 98
4.2.3 Acuífero en rocas volcánicas Barva 99
5. RECARGA POTENCIAL 105
5.1 Balance Hídrico de Suelos 105
5.1.1 Kv, Kp, Kfc y Profundidad de raíces 105
5.1.2 Fracción de lluvia interceptada por el follaje y coeficiente de retención (Cfo) 109
5.1.3 Capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente 109
5.2 Resultados de Recarga Potencial 110
5.2.1 Precipitación y evapotranspiración 110
5.2.2 Recarga 110
6. MODELACIÓN NUMÉRICA MATEMÁTICA DE ACUÍFEROS 114

6.1 Dominio del modelo y discretización horizontal 114
6.2 Superficies y capas del modelo 117
6.3 Propiedades hidráulicas de las capas 119
6.3.1 Conductividad hidráulica 119
6.3.2 Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico. 120
6.4 Condiciones de frontera 120
6.4.1 Recarga superficial 120
6.4.2 Celdas activas de flujo 121
6.4.3 Cargas Constantes 122
6.4.4 Ríos 122
6.4.5 Pozos de extracción 122
6.4.6 Manantiales 124
6.4.7 Tiempo de modelación 125
6.5 Escenario actual (datos climáticos al 2017) 126
6.5.1 Dirección de flujo, gradiente y cargas hidráulicas 126
6.5.2 Balance de agua subterránea 135
6.6 Escenarios de incremento de extracción de agua subterránea en los pozos y cambio climático (2050) 139
6.6.1 Escenario con un incremento del 30% de extracción de agua subterránea en los pozos 140
6.6.2 Escenario 2050 de cambio climático más el incremento en la extracción de agua subterránea en los pozos 149
7. CONCLUSIONES 160
8. RECOMENDACIONES 164
9. REFERENCIAS 168
ANEXOS 174

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del Cantón Belén. 5
Figura 2. Distritos en el cantón de Belén. 6
Figura 3. Cauces principales en el cantón de Belén. 7
Figura 4. Flujograma de relación entre los datos a utilizar y los datos resultantes. 14
Figura 5. Malla típica de un modelo de diferencias finitas. 16
Figura 6. Malla típica de un modelo de elementos finitos. 16
Figura 7. Pasos para el desarrollo de modelos numéricos. 18
Figura 8. Mapa general de ubicación del cantón de Belén dentro de la cuenca del Río Grande de Tárcoles. 24
Figura 9. Ubicación de cantones cercanos. 25
Figura 10. División altitudinal del cantón de Belén. 27
Figura 11. Mapa de porcentaje de pendientes del Cantón de Belén. 28
Figura 12. Áreas de Conservación en el Cantón de Belén. 29
Figura 13. Mapa de zonas de vida en el área de estudio. 30
Figura 14. Mapa de ubicación de microcuencas en la subcuenca del Río Virilla y el Cantón de Belén. 31
Figura 15. Curva Hipsométrica y frecuencia de altitudes, microcuenca del Río Segundo. 36
Figura 16. Jerarquización de cauces, microcuenca del Río Segundo. 37
Figura 17. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes, microcuenca del Río Bermúdez. 40
Figura 18. Jerarquización de cauces, microcuenca del Río Bermúdez. 41
Figura 19. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la microcuenca de Q. Seca – Río Burío. 44
Figura 20. Jerarquización de cauces, microcuenca de Quebrada Seca. 45
Figura 21. Ubicación de estaciones meteorológicas del IMN. 48
Figura 22. Registro de precipitaciones en el área de estudio y alrededores inmediatos. 49

Figura 23. Registro de temperaturas en el área de estudio y alrededores inmediatos. 50
Figura 24. Ubicación de aforos en el cantón de Belén. 52
Figura 25. Columna estratigráfica regional para el cantón Belén 58
Figura 26. Mapa geológico regional del cantón de Belén. 59
Figura 27. Mapa geológico del cantón de Belén. 60
Figura 28. Mapa geológico del cantón de Belén. 61
Figura 29. Ubicación de pozos registrados en la base de datos del SENARA, piezómetros exploratorios de la Municipalidad y perforaciones exploratorias de proyectos. 64
Figura 30. Mapa de afloramientos del área de estudio. 65
Figura 31. a y b) Lavas masivas asociadas a la Unidad Colima 67
Figura 32. a) Ignimbritas diaclasadas b) Lecho del río Bermúdez, brechas cafés a grisáceas. 69
Figura 33. a) Afloramiento de lavas y brechas 70
Figura 34. a y b) Aspecto general en afloramientos de la Unidad de tobas Barva (Miembro Carbonal) 71
Figura 35. Mapa Geológico actualizado del cantón Belén. 72
Figura 36. Perfiles geológicos A–A' y C–C'. 75
Figura 37. Perfiles Geológicos E–E' y G–G'. 76
Figura 38. Mapa de pozos y piezómetros en el cantón de Belén. SENARA (2023) 78
Figura 39. Ubicación de manantiales y concesiones, base de datos SINIGIRH. 82
Figura 40. Aprovechamientos de AyA y ASADA en el cantón de Belén. 87
Figura 41. Red de monitoreo de pozos y piezómetros. 88
Figura 42. Equipotenciales para el acuífero en rocas volcánicas Colima Superior. 94
Figura 43. Equipotenciales para el acuífero en rocas volcánicas Colima Inferior. 97
Figura 44. Equipotenciales para el acuífero en rocas volcánicas Barva. 102
Figura 45. Perfiles hidrogeológicos D–D' y H–H'. 103

Figura 46. Perfiles hidrogeológicos F–F′ y B–B′. 104
Figura 47. Mapa de usos del suelo en el cantón de Belén. 107
Figura 48. Mapa de recarga potencial, Cantón de Belén. 113
Figura 49. Mapa del dominio del modelo y celdas activas. 116
Figura 50. Superposición de horizontes generados 118
Figura 51. Zonas que representan la discretización vertical de unidades hidrogeológicas en el modelo numérico. 118
Figura 52. Pozos de extracción considerados en el modelo numérico del Cantón de Belén. 123
Figura 53. Condiciones de frontera en el modelo numérico. 125
Figura 54. Salida original de equipotenciales para el acuífero Bermúdez en el programa Visual Modflow Flex. 127
Figura 55. Equipotenciales modeladas para el Acuífero Bermúdez. 128
Figura 56. Perfil a lo largo de la fila 77. 129
Figura 57. Perfil a lo largo de la fila 65. 130
Figura 58. Gráfico de correlación entre cargas hidráulicas modeladas y cargas hidráulicas medidas en campo para el Acuífero Bermúdez. 131
Figura 59. Equipotenciales modeladas para el Acuífero Colima Superior 132
Figura 60. Gráfico de correlación entre cargas hidráulicas modeladas y cargas hidráulicas medidas en campo para el Acuífero Colima Superior. 133
Figura 61. Equipotenciales modeladas para el Acuífero Colima Inferior. Dirección de flujo hacia el suroeste. 134
Figura 62. Correlación entre cargas hidráulicas modeladas y cargas hidráulicas medidas en campo para el Acuífero Colima Inferior. 135
Figura 63. Gráfico de balance de masas para el sistema acuífero total en el escenario actual del Cantón de Belén (valores en m^3/d). 136
Figura 64. Balance de aguas subterráneas por unidad acuífera en litros por segundo. 138
Figura 65. Acuífero Bermúdez. Diferencias obtenidas entre la superficie actual y la generada con un 30% más de extracción 142

Figura 66. Acuífero Colima Superior. Diferencias obtenidas entre la superficie actual y la generada con un 30% más de extracción.....143
Figura 67. Acuífero Colima Inferior. Diferencias obtenidas entre la superficie actual y la generada con un 30% de extracción en pozos.....144
Figura 68. Acuífero Bermúdez. Abatimientos modelados en pozos y piezómetros. Escenarios de incremento de extracción del 30% y cambio climático 2050 + 30% de extracción.....146
Figura 69. Acuífero Colima Superior. Abatimientos modelados en pozos y piezómetros de monitoreo para los escenarios de incremento de extracción del 30% y cambio climático 2050 + 30% de extracción.....147
Figura 70. Acuífero Colima Inferior. Abatimientos modelados en pozos y piezómetros de monitoreo para los escenarios de incremento de extracción del 30% y cambio climático 2050 + 30% de extracción.....148
Figura 71. Abatimientos modelados para el Acuífero Bermúdez al considerar un incremento de la extracción del 30% y la disminución en la recarga potencial debida a cambios climáticos. 154
Figura 72. Diferencial obtenido para el Acuífero Colima Superior al restar a la superficie de agua actual la superficie generada considerando un 30% más de extracción en los pozos y los efectos del cambio climático para el escenario 2050. 155
Figura 73. Abatimientos registrados en el Acuífero Colima Inferior a partir de un incremento de extracción del 30% en los pozos y efectos del cambio climático para el escenario 2050..... 156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fases, técnicas y métodos aplicados en la investigación. 9
Tabla 2. Parámetros de entrada y salida en un modelo numérico. 17
Tabla 3. Estudios geológicos – hidrogeológicos, a escala regional. 20
Tabla 4. Estudios geológicos – hidrogeológicos en el cantón de Belén. 21
Tabla 5. Distribución de zonas altitudinales del Cantón de Belén. 26
Tabla 6. Rangos de pendientes en el cantón. 28
Tabla 7. Microcuencas que conforman el cantón de Belén y su respectiva área (km2). 31
Tabla 8. Tabla resumen de parámetros morfométricos – Río Segundo. 34
Tabla 9. Tabla resumen de parámetros morfométricos – Río Bermúdez. 39
Tabla 10. Tabla resumen de parámetros morfométricos – Quebrada Seca – Río Burío. 43
Tabla 11. Estaciones del IMN y del ICE con influencia en el área de estudio. 47
Tabla 12. Evapotranspiración Potencial a partir de las estaciones. 51
Tabla 13. Sitios de aforo en cauces del cantón de Belén. 53
Tabla 14. Detalle de los pozos de producción, base de datos del SENARA. . 79
Tabla 15. Detalle de los pozos de investigación, Municipalidad de Belén. 79
Tabla 16. Usos registrados para pozos en la Base de datos de SENARA. 80
Tabla 17. Caudales de concesiones según tipo de fuente, base de datos SINIGIRH. 81
Tabla 18. Extracción en acuíferos (pozos), base de datos SINIGIRH. 83
Tabla 19. Extracción a partir de manantiales, base de datos SINIGIRH. 84
Tabla 20. Aprovechamientos del AyA en el Cantón de Belén. 85
Tabla 21. Aprovechamientos de ASADAs en el Cantón de Belén. 86
Tabla 22. Parámetros hidráulicos del acuífero Colima Superior. 93
Tabla 23. Parámetros hidráulicos del acuífero Colima Inferior. 96
Tabla 24. Parámetros hidráulicos del acuífero en rocas volcánicas Barva (Miembro Bermúdez). 101

Tabla 25. Uso del suelo en la zona de estudio. 106
Tabla 26. Valores de Kv según uso del suelo. 106
Tabla 27. Valores de profundidad de raíces. 108
Tabla 28. Valores de Kp según la pendiente. 109
Tabla 29. Recarga potencial por unidad hidrogeológica, Cantón Belén. 111
Tabla 30. Clases de recarga potencial en función del rango. 112
Tabla 31. Valores de conductividad hidráulica utilizados en las unidades hidrogeológicas 119
Tabla 32. Recarga potencial anual de las unidades hidrogeológicas expresada en milímetros por año 121
Tabla 33. Balance de aguas subterráneas totales del sistema acuífero. 136
Tabla 34. Balance de aguas subterráneas por unidad acuífera (m3/d). 137
Tabla 35. Balance de aguas subterráneas por unidad acuífera (l/s) 138
Tabla 36. Descarga modelada en manantiales – Escenario actual vs. 30% de extracción adicional 149
Tabla 37. Variaciones proyectadas en la temperatura media y precipitación mensual para el año 2050 151
Tabla 38. Recarga potencial superficial para el escenario 2050 (l/s). 152
Tabla 39. Descarga modelada en manantiales – Escenario actual vs. 2050 + 30% de extracción adicional 158

RESUMEN

Mediante el trabajo de campo y el análisis de la información disponible en diversas instituciones se ha logrado actualizar y detallar el modelo geológico del cantón de Belén. Se ha verificado la existencia de rocas asociadas con la Formación Lavas Intracañón, ignimbritas y tobas de la Formación Depósitos de Avalancha Ardiente y lavas y tobas asociadas con los miembros Bermúdez y Carbonal de la Formación Barva.

El acuífero más superficial para la zona corresponde con el Miembro Bermúdez de la Formación Barva y en profundidad se localizan los acuíferos Colima Superior e Inferior. Los acuíferos se encuentran separados entre sí por los acuitardos Tiribí y Puente Mulas. En el sistema acuíferos desarrollado la dirección de flujo predominante es hacia el suroeste y predomina la recarga lateral como aporte de agua al sistema.

La recarga potencial superficial en el cantón de Belén es de 67,63 l/s. Esta recarga equivale al 9,53% de la precipitación total anual en este sector (709,66 l/s). Para el año 2050 se ha estimado una disminución en la recarga potencial superficial de aproximadamente un 8%.

Como insumos al modelo numérico de los acuíferos se recopiló la información de extracción de agua subterránea de las bases de datos del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), la Municipalidad de Belén, la Dirección de Agua del MINAE y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA).

Se corrió el modelo numérico para el sistema acuífero existente en el cantón de Belén, obteniendo coeficientes de correlación superiores a 0,95 y porcentajes de error inferiores al 10% en las equipotenciales generadas por la modelación para los distintos acuíferos.

A partir del modelo numérico construido para el escenario actual, se han desarrollado proyecciones futuras considerando el incremento en la extracción de los pozos y cambio climático en el 2050. Los efectos en los acuíferos existentes se analizan desde el punto de vista de cambios en el flujo

del agua subterránea, abatimientos en las cargas hidráulicas y disminución en la descarga de los manantiales.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Mediante acuerdo tomado en la Sesión Ordinaria No. 41-2021 del Concejo Municipal de Belén, celebrada el 13 de julio del 2021, se aprobó la moción para elaborar un balance hídrico y Plan Hídrico integral para el Cantón, justificada entre otros aspectos, en una serie de antecedentes o considerandos como los que a continuación se describen.

En Costa Rica más del 80% de la población se abastece con agua que proviene en forma directa (pozos) o indirecta (nacientes) de acuíferos, en el Valle Central las principales fuentes de agua corresponden con los acuíferos Colima y Barva. En el cantón de Belén esta situación es mucho más marcada, donde casi la totalidad del agua proviene de nacientes o pozos que se alimentan de los acuíferos antes mencionados.

En la actualidad, los recursos hídricos del Valle Central se encuentran sometidos a una importante demanda, incluidos los subterráneos, donde la extracción suele estar acompañada de cambios en el uso de la tierra aspecto que pone en riesgo la recarga del recurso hídrico subterráneo, de cual se suple el cantón de Belén. En este contexto, según estudios desarrollados por la *Global Water Partnership*, para el año 2050 se espera que, todos los países de Centroamérica, incluido Costa Rica, estén bajo estrés hídrico, lo que obliga al cantón de Belén a tomar previsiones.

Aunado a lo anterior, a través de la conducción Puente de Mulas, el agua extraída por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), a la altura del Cantón de Belén, abastece a cantones como Escazú, Santa Ana, Alajuelita y el sur de San José.

Por otra parte, la ausencia de balances hídricos del agua subterránea, específicos para el cantón de Belén, genera incertidumbre en cuanto a si, la extracción que realiza el AyA, así como otros operadores en el territorio de Belén, pueda a futuro incidir en la disponibilidad, provocando escasez o hasta desabastecimiento del líquido Adicionalmente, es de esperar que, el cambio climático afecte adversamente la recarga de los acuíferos Colima y Barva.

A nivel cantonal, se encuentra vigente el Plan Maestro del Acueducto Municipal 2010 – 2050, el cual establece, entre otros aspectos, la necesidad de elaborar un plan de gestión integral del recurso hídrico, aspecto que fue acordado hace más de 11 años y a la fecha aún no se ha llevado a cabo. Paralelamente, en julio del 2021 el SENARA presentó ante la Municipalidad los resultados hidrogeológicos que ha realizado la institución con respecto a los acuíferos Barva y Colima de los cuales se abastece el cantón. En esta presentación el SENARA recomendó a la Municipalidad la elaboración de un balance hídrico cantonal junto con un Plan de Gestión Hídrica Integral del cantón, como insumos necesarios para el establecimiento de políticas acertadas de protección del recurso hídrico subterráneo.

Es a partir de este contexto, que, en el mes de noviembre del 2022 la Municipalidad del cantón de Belén promovió la licitación abreviada 2022LA-000014-0002600001 denominada "Contrato interadministrativo para la contratación de servicios para la elaboración de la modelación numérica-matemática de las aguas subterráneas del cantón de Belén y el Plan Cantonal de Gestión de Recurso Hídrico para el cantón de Belén".

En atención a la licitación mencionada, el 29 de noviembre del 2022 el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), presentó su oferta de servicios para la elaboración del Modelo Numérico y Plan Cantonal de Recurso Hídrico, de conformidad con los términos del cartel indicados. Mediante documento 02520220003000022 del Sistema de Compras Públicas (SICOP), la Municipalidad de Belén procedió en fecha 30 de noviembre del 2022 a adjudicar al SENARA la licitación 2022LA-000014-0002600001 por un monto de ¢ 35 000 000,00 (treinta y cinco millones de colones exactos).

Una vez elaborado y aprobado el contrato respectivo en el mes de diciembre del 2022, mediante oficio AC-231-22 del Área de Acueducto Municipal y suscrito por el Ing. Eduardo Solano M., se da la orden de inicio al SENARA para elaborar los servicios contratados a partir del 19 de diciembre del 2022 por un plazo de tres años.

1.2 Propósito del informe

El estudio hidrogeológico de modelación numérica – matemática en el cantón de Belén abarca aspectos tales como la geología, modelo hidrogeológico, flujo del agua subterránea, estimación de la recarga potencial, modelación numérica en tres dimensiones y puesta en marcha de escenarios futuros según cambios en aspectos tales como la extracción o las condiciones climáticas.

Se persigue con este estudio, conocer el potencial de las aguas subterráneas en el cantón y su posible relación con la ocurrencia de cambios en la extracción y condiciones climáticas, por ejemplo, analizar el comportamiento de los acuíferos debido a un incremento en el caudal de extracción de pozos por parte de los operadores de sistemas de agua potable.

El conocimiento técnico científico que se genere, conformará también una herramienta de apoyo a la municipalidad, en la cual podrá basar la toma de decisiones para el desarrollo sostenible del territorio, la inversión y el crecimiento social bajo un marco de gestión y protección integral del recurso hídrico subterráneo.

A su vez, el estudio hidrogeológico de modelación numérica matemática representa la base técnica para el desarrollo del Plan Cantonal de Gestión de Recurso Hídrico de la Municipalidad, mismo que incorpora un portafolio hídrico para el cumplimiento de acciones e indicadores de ejes técnico–estratégicos a los cuales direccionar la gestión integral y urbana del recurso hídrico del cantón.

1.3 Objetivo general

Modelar numéricamente el flujo del agua subterránea en los acuíferos existentes en el cantón de Belén, como instrumento para conocer el balance de aguas subterráneas en la zona y mejorar la gestión y protección del recurso hídrico.

1.4 Objetivos específicos

- Actualizar la recarga potencial de los acuíferos dentro de la delimitación distrital de Belén, por medio de la Metodología de Balance Hídrico de Suelos, que permitirá conocer el potencial de aguas subterráneas y su relación con extracción y cambio climático.
- Evaluar por medio de un modelo numérico en 3D la dinámica de las aguas subterráneas ubicadas dentro de la delimitación distrital de Belén, ante diferentes condiciones de extracción y cambio climático, para recomendar los escenarios más sostenibles y favorables.

1.5 Ubicación geográfica administrativa

El área de estudio corresponde con el cantón 07 Belén de la provincia de Heredia, el cual se encuentra dividido en los distritos San Antonio, La Ribera y La Asunción. Limita al sur con los cantones Escazú y San José de la provincia San José, al este con los cantones Heredia y Flores de la provincia Heredia y al oeste con el cantón Alajuela de la provincia homónima. El área del cantón es de 12,38 km^2, su perímetro de 18,75 km y se extiende entre las coordenadas extremas 1101949,32 – 1106327,15 N y 478053,04 – 483163,16 E, de las hojas cartográficas Abra y Barva escala 1: 50 000 (figuras 1 y 2).

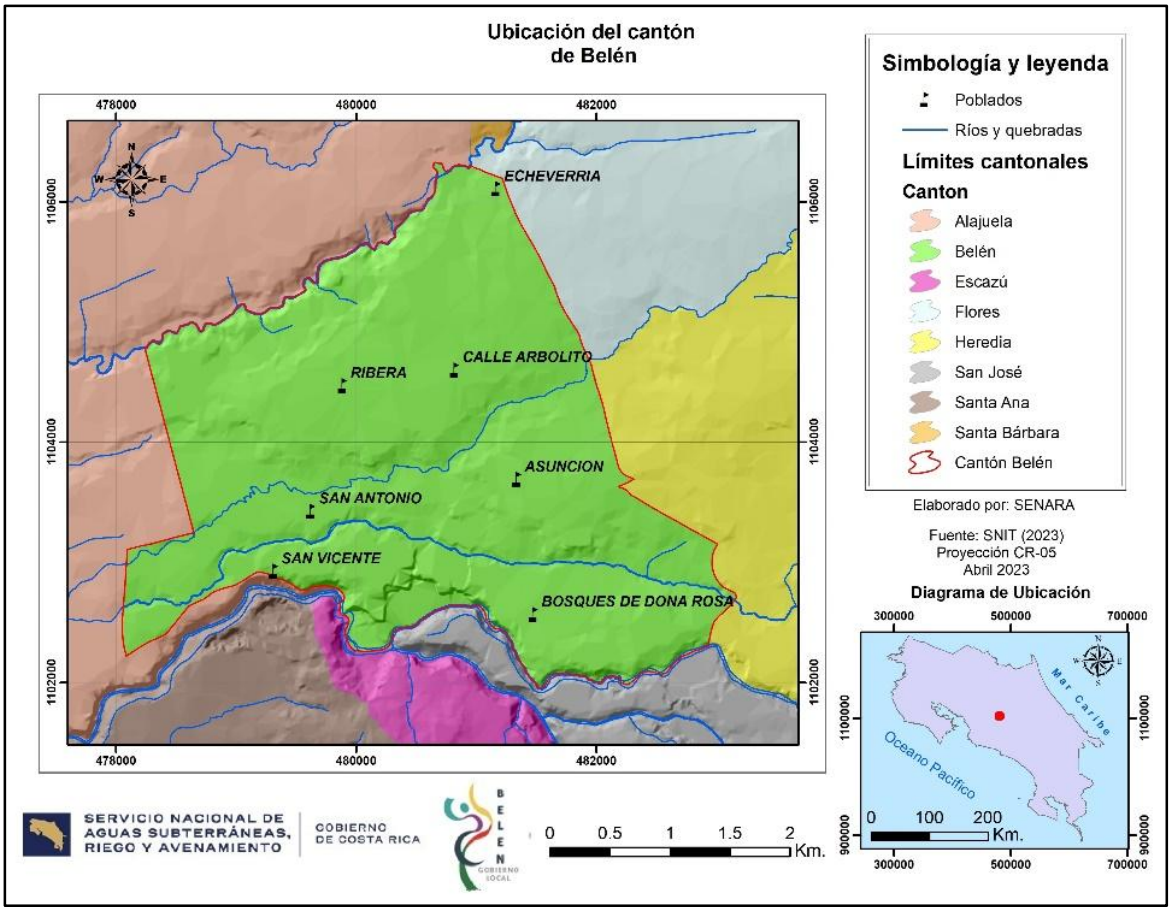


Figura 1. Mapa de ubicación del Cantón Belén.

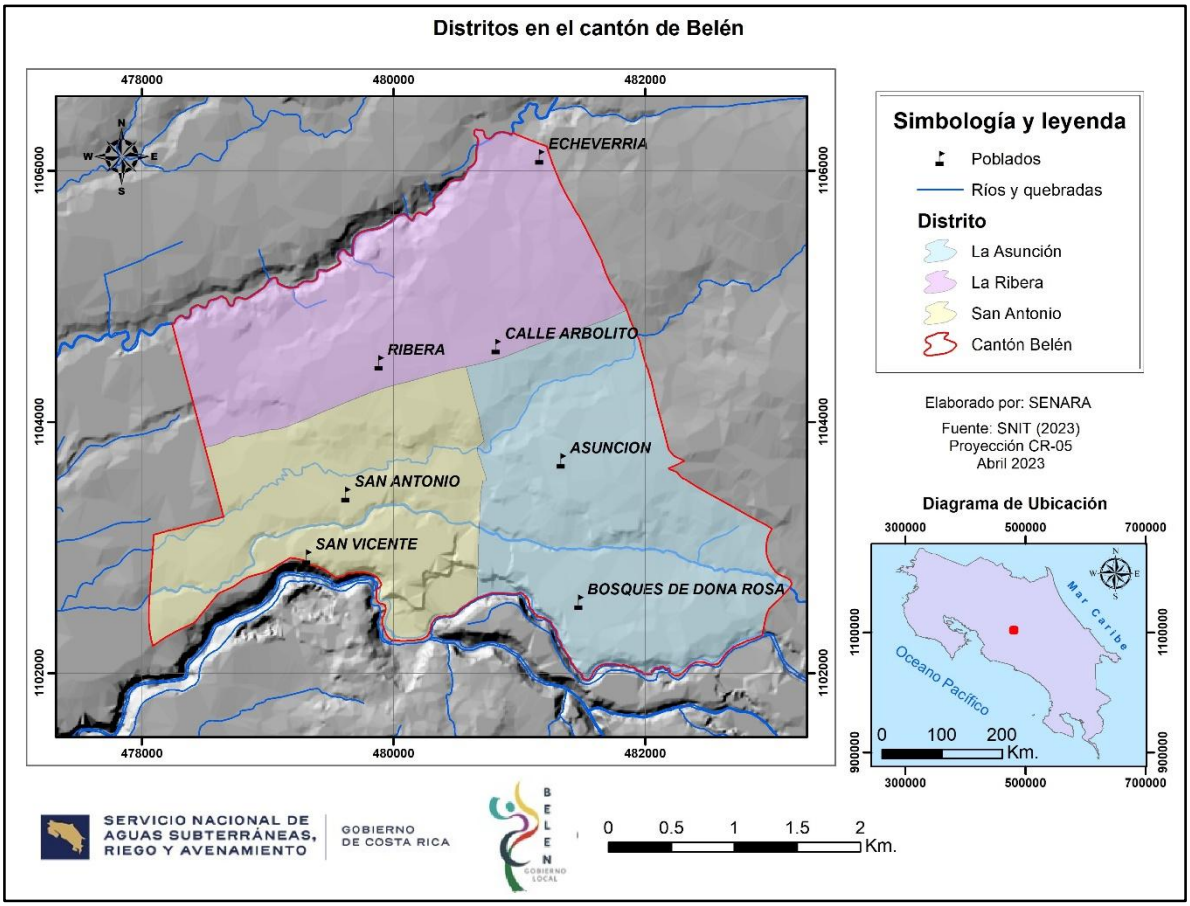


Figura 2. Distritos en el cantón de Belén.

1.6 Subcuenca hidrográfica

Según ITCR (2014), el cantón de Belén se ubica en la vertiente Pacífico del país, dentro de la subcuenca del río Virilla que, a su vez, forma parte de la gran cuenca del río Grande de Tárcoles que desemboca en el Océano Pacífico. A nivel del cantón los principales cursos de agua superficial corresponden con los ríos Segundo, Bermúdez, Virilla y Quebrada Seca, tal y como se observa en la figura 3.

Cabe mencionar que, en el apartado de caracterización biofísica del área de estudio se describen con detalle los parámetros morfométricos asociados con los ríos y quebradas presentes en la zona.

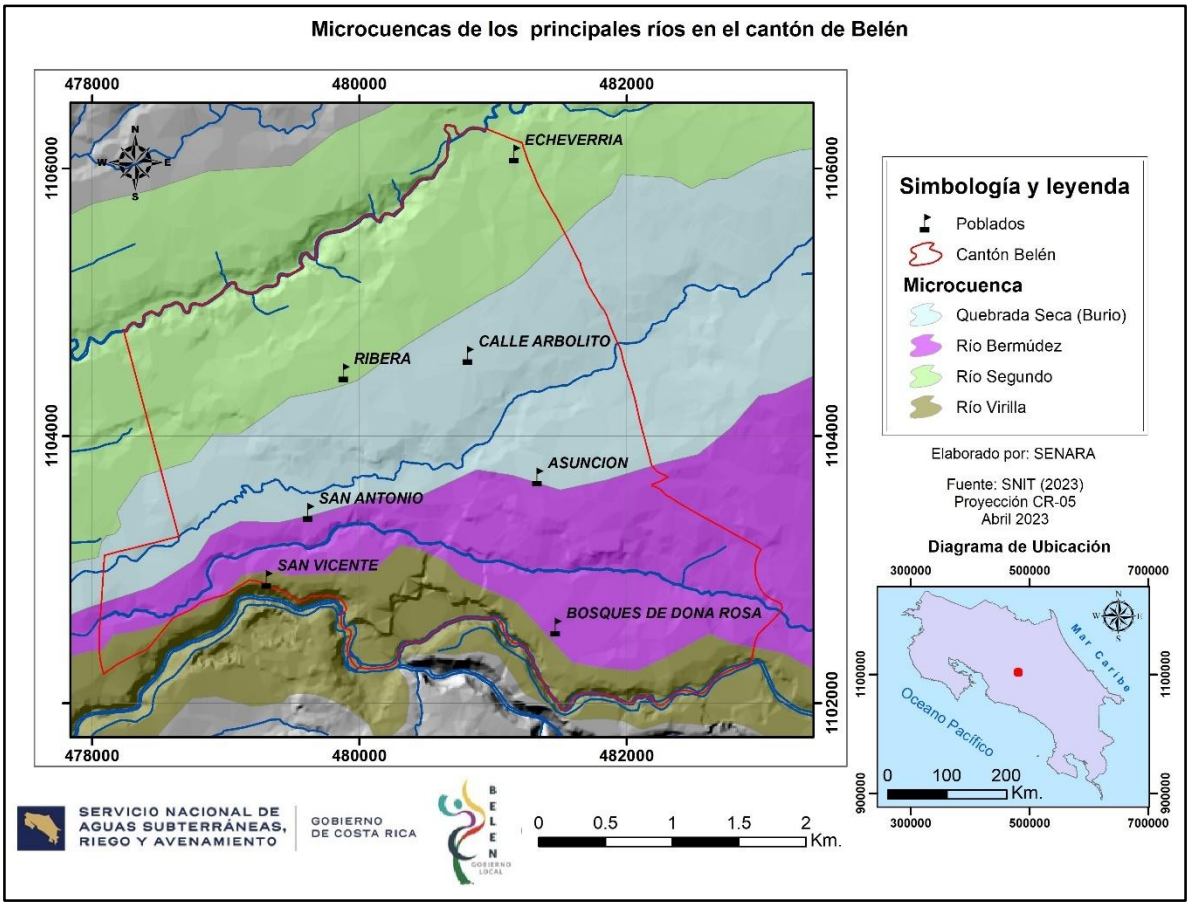


Figura 3. Cauces principales en el cantón de Belén.

1.7 Escala de trabajo

La base cartográfica que se ha utilizado para la elaboración de este estudio corresponde con las capas de ríos, caminos y curvas de nivel a escala 1: 25 000 en la proyección CRTM05. Esta información se ha tomado de la base de datos de geoservicios (OGC por sus siglas en ingles de *Open Geospatial Consortium*) del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT, 2023).

El modelo de elevación digital (MED) del terreno también ha utilizado las curvas de nivel disponibles a escala 1:25 000 del Instituto Geográfico Nacional y disponibles en SNIT (2023). Adicionalmente, los datos de campo y los levantamientos geológicos han sido georreferenciados mediante la utilización de GPS Trimble Juno SD y GPS Garmin 60csx.

Por otra parte, para la elaboración de los mapas raster asociados con el balance hídrico de suelos, se ha optado por utilizar un tamaño de celda de 10x10 metros al tomar en consideración que la base cartográfica a utilizar es a escala 1:25.000.

1.8 Período de análisis

Como parte de las labores realizadas por el SENARA en el cantón de Belén, durante los años 2023 y 2024 se llevaron a cabo varias visitas de inspección a manantiales y pozos de la zona. Estas se realizaron con el objetivo de verificar las ubicaciones reportadas en las distintas bases de datos, pero también, para inventariar aquellas fuentes que carecían de registro ante el SENARA.

A partir de abril del 2023 y hasta noviembre del 2024 se realizó el monitoreo de niveles en varios pozos como parte de los insumos necesarios en la construcción del modelo hidrogeológico conceptual y más aún para la correcta calibración del modelo numérico matemático.

En abril del 2023 se promovió la licitación reducida 2023LD-000007-0018800001 "Pruebas de infiltración, estudio de suelos y muestreo según demanda en los cantones Zarcero, Belén y Santa Bárbara". Esta licitación estuvo en ejecución durante el año 2023 y con los resultados obtenidos de suelos e infiltraciones se llevó a cabo el balance hídrico de suelos en el mes de diciembre de ese mismo año.

Durante el año 2023 fueron realizadas las labores de campo correspondientes con la verificación del cartografiado geológico y en ese mismo año se realizó la contratación No. 2023LD-000034-0018800001 mediante la cual se adquirió la licencia del programa para modelación numérica.

Las labores de modelación matemática en el programa especializado, incluidos los distintos escenarios de extracción y condiciones climáticas, fueron realizadas a partir del mes de enero del 2024.

El análisis de información, procesamiento de datos y redacción de los distintos apartados del estudio se realizaron a partir de febrero del 2023 y según la programación establecida para entrega en diciembre del 2024.

1.9 Metodología de trabajo

A continuación, de manera breve, en la tabla 1 se describen las variables que forman parte del presente estudio con las respectivas técnicas y materiales utilizados o aplicados. Posteriormente, se detallan las fases desarrolladas a lo largo del estudio en cada uno de los temas principales.

Tabla 1. Fases, técnicas y métodos aplicados en la investigación.

Fases		Técnicas/Métodos	Instrumentos	# sondeos, muestreos ejecutados, productos	Criterios de muestreos
Fase 1	Recopilación de información.	Definición del área de estudio. Análisis documental, análisis de bases de datos en instituciones, bibliotecas, otros. Solicitud de información a otras instituciones AyA, IMN, ICE, DA, MUnicipalidad.	Equipos de cómputo, vehículo, GPS, mapas.	Análisis de 7 bases de datos institucionales, base de datos Excel con información útil disponible.	Bases de datos institucionales con información relacionada (AyA, DA, SENARA, UCR, Municipalidad, ICE, IMN)
	Definición de sitios para ejecución de pruebas y	Revisión y análisis de información existente y definición de puntos potenciales para muestreo e infiltraciones.		Definición de 22 puntos para muestreo de suelos y pruebas de infiltración.	Pruebas existentes, litología, suelos y autorizaciones de propietarios.
Fase 2	Recolección de datos, trabajo de campo.	Inventario de fuentes (pozos y manantiales)	Equipos de cómputo, vehículo, GPS, mapas.	Bases de datos Excel e inventario en SENARA	Bases de datos en instituciones

		Monitoreo de niveles de agua en pozos.	Equipos de cómputo, vehículo, GPS, mapas.	Bases de datos Excel con niveles mensuales	Bases de datos excel
		Pruebas de infiltración método de doble anillo.	Anillos de hierro, cronómetro, mazo, regla, recipientes hojas de registro, cronómetro.	22 pruebas de anillos.	Litologías y tipo de suelo, pruebas preexistentes.
		Cartografiado geológico, medición y observación de estructuras.	Brújula, cinta métrica, GPS, piqueta, bolsas, cinta, hojas cartográficas.	Afloramientos en toda la zona de estudio. Mapas asociados.	Litología. Estructuras. Pendientes. Grado de meteorización. Accesibilidad. Mapas preexistentes.
		Muestreo de suelos.	Muestreador, equipo de laboratorio.	22 muestreos de suelo.	Geología. Tipo de suelo. Muestras existentes.
		Uso del suelo	Mapas y GPS	Verificación de uso en sitios	Accesibilidad, uso preliminar
Fase 3	Procesamiento y análisis de datos	Ensayos de laboratorio a suelos: procedimientos y protocolos específicos	Equipo de laboratorio.	5 tipos de ensayos de laboratorio para 22 muestras.	Geología. Tipo de suelo. Muestras existentes.
		Uso de programas informáticos, hojas electrónicas.	Equipo de cómputo. Programas OFFICE, ARCGIS, MODFLOW, otros.	Salidas como gráficos, imágenes. Archivos shp, grd, bases de datos, textos.	Disponibilidad. Licencias.

		Pruebas de infiltración anillos	Equipo de cómputo, programa excel	22 valores de conductividad hidráulica distribuidos en el área	Geología, tipo de suelo. Infiltraciones existentes.
		Uso de Suelo	Equipo de cómputo, programa ArcGis	1 mapa de uso del suelo	Área de estudio
		Balance Hídrico: método Schosinsky (2006).	Equipo de cómputo. ArcGis.	Mapa de recarga potencial y disponibilidad de recurso hídrico.	Disponibilidad de insumos y programas de cómputo.
		Modelación numérica-matemática	Equipo de cómputo, programa de modelación, ArcGis, bases de datos de insumos.	Modelo en estado estacionarios situación actual, escenarios de extracción y cambio climpatico.	Disponibilidad de insumos y licencia de programas. Necesidad Municipal.
Fase 4	Documento final	Según especificaciones.	Equipo de cómputo.	1 informe.	

1.9.1 Modelo hidrogeológico conceptual

Se entiende por modelo hidrogeológico conceptual, a la representación simplificada que describe las condiciones hidrogeológicas reales en una cuenca o área de estudio (Grijalva, 2011).

Inicialmente para este proyecto se realizó una recopilación bibliográfica sobre los trabajos geológicos e hidrogeológicos que se han realizado en la zona, procediendo a analizarlos e incorporar la información relevante para los fines del estudio. En el campo se identificaron los diferentes tipos de rocas que se ubican en el cantón y los resultados

obtenidos se representaron y ubicaron en mapas topográficos base con ayuda de sistemas de posicionamiento global. Para la construcción de los mapas geológicos, hidrogeológicos u otro tipo de información se utilizó el sistema de información geográfica ArcGIS 10.8.

A partir de la revisión de las bases de datos existentes en el SENARA, AyA y en la Dirección de Aguas del MINAE, así como de recorridos por el cantón, se han inventariado los pozos y manantiales existentes en el área.

La caracterización de la zona no saturada se realizó también en el año 2023 mediante la toma de muestras de suelo y pruebas de infiltración en las distintas unidades hidrogeológicas establecidas. El análisis de las muestras e interpretación de resultados se llevó a cabo en laboratorios especializados cuyos costos fueron cubiertos mediante el proceso de licitación 2023LD-000007- 0018800001.

A partir del mapa geológico y con la información de pozos cercanos, sondeos eléctricos verticales, recopilación bibliográfica, piezómetros de investigación existentes, e información recopilada en el campo, se construyeron perfiles geológicos detallados, a partir de los cuales se realizó una interpretación geológica e hidrogeológica para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual. La determinación del flujo del agua subterránea se generó para los acuíferos a partir de la interpolación de los niveles de agua registrados en los pozos de explotación o piezómetros de investigación.

1.9.2 Recarga Potencial y disponibilidad

La recarga potencial a los acuíferos se determinó mediante la metodología desarrollada por Schosinsky (2006), que consiste en un balance de humedad en suelos.

A través de la figura 4 se ilustra claramente el proceso mediante el cual, los parámetros básicos obtenidos en el campo y laboratorio, se interrelacionan y procesan para dar origen a los distintos factores que finalmente se incorporan en la ecuación de balance para obtener la recarga potencial.

Así, por ejemplo, a partir de las pruebas de infiltración, mapa de uso del suelo y modelo de elevación digital, se obtienen los factores fc, kp, kv y kfc que, en conjunto con los coeficientes de retención en el follaje y precipitación mensual, permiten la determinación del parámetro Pi (precipitación que infiltra) de la ecuación de balance.

$$Rp = Pi + HSi - HSf - ETR$$

Dónde:

- Rp = Recarga potencial mensual en mm/mes
- Pi = Precipitación que infiltra en mm/mes
- HSi = Humedad del suelo al inicio del mes en mm
- HSf = Humedad del suelo al final del mes en mm
- ETR = Evapotranspiración real en mm/mes

Por otra parte, al conocer la recarga potencial de los acuíferos y a la vez las extracciones que se realizan en la cuenca mediante pozos o manantiales, es posible determinar entonces mediante una sustracción, cual es la disponibilidad final de agua subterránea para el abastecimiento humano y de sus diversas actividades productivas.

La ejecución de esta metodología inicia con la recopilación de información meteorológica en el Instituto Meteorológico Nacional, Instituto Costarricense de Electricidad y SENARA, para calcular la precipitación en el área y estimar la evapotranspiración.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizará la ecuación de Blaney & Criddle (ONU, 1972 en Schosinsky, 2006) por medio de la siguiente ecuación:

$$ETP\ (mm/mes) = (8{,}10 + 0{,}46T)\ Ps$$

Donde:

- ETP = Evapotranspiración potencial en [mm/mes]
- T = Temperatura media mensual en [grados centígrados] (dato meteorológico)
- Ps = Porcentaje de horas de luz solar mensual, con respecto al año [%]

En el campo se realizan pruebas de infiltración mediante el método de doble anillo y muestreo de suelos para identificar sus características hidráulicas, además, mediante modelos de elevación digital se estimaron las pendientes del área y se utilizan fotografías aéreas y comprobaciones de campo para delimitar los usos de suelo.

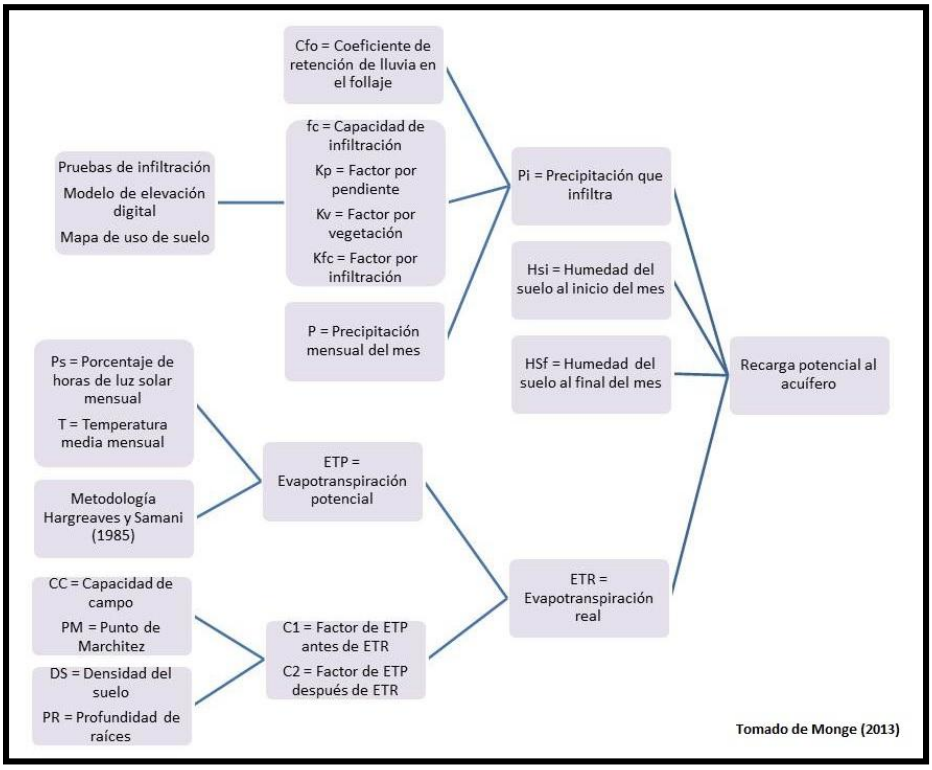


Figura 4. Flujograma de relación entre los datos a utilizar y los datos resultantes.

1.9.3 Modelación numérica matemática

Un modelo matemático simula el flujo subterráneo por medio de las ecuaciones que lo gobiernan, representando los procesos físicos que ocurren, junto con ecuaciones que describen las cargas o flujos a lo largo de las fronteras del modelo. Su uso es la mejor manera para realizar análisis o predicciones sobre las consecuencias de una acción (Anderson & Woessner, 2002).

Sahuquillo (1983) indica que los sistemas se pueden definir matemáticamente en cada momento por una serie de parámetros y variables.

Los parámetros describen componentes geométricos como forma y límites, o componentes físicos como transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Las variables por su parte describen la situación del sistema en cada momento y pueden ser alturas piezométricas, velocidad, etc.

Durante la ejecución de un modelo numérico de aguas subterráneas, se aplica en esencia la ecuación diferencial de continuidad que describe el movimiento del agua en un acuífero:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z}\right)=S_S \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

K = conductividad hidráulica

h = variación de la altura (carga hidráulica)

S = almacenamiento específico

El modelo matemático utiliza métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial. Los métodos más utilizados para obtener la solución de la ecuación son el de diferencias finitas y el de elementos finitos. La solución es obtenida para una serie de puntos discretos en el espacio y en el tiempo. En general, se supone que el medio está dividido en una malla de elementos prismáticos de base rectangular o poligonal (Sahuquillo, 1983).

En un modelo de diferencias finitas la malla típica de discretización del medio es mediante celdas rectangulares (figura 5), mientras que, los modelos de elementos finitos (figura 6) en lugar de utilizar redes rectangulares de nudos, dividen el acuífero en polígonos, generalmente triángulos. En ellas los triángulos intersectan en nudos que representan los puntos en los cuales de conocen los valores de análisis.

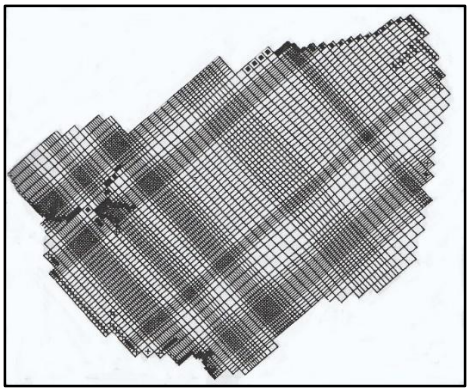


Figura 5. Malla típica de un modelo de diferencias finitas. Tomado de Anderson & Woessner (2002).

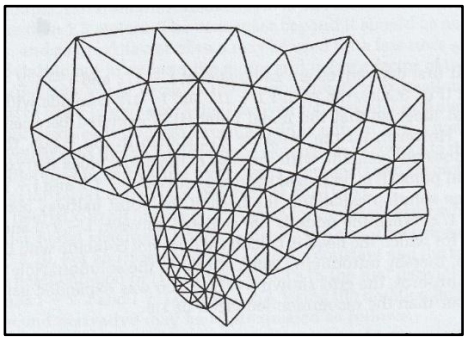


Figura 6. Malla típica de un modelo de elementos finitos. Tomado de Anderson & Woessner (2002).

Como componentes generales de un modelo matemático Gárfias (2010) menciona a las ecuaciones gobernantes, condiciones de frontera y condiciones iniciales. También, señala los parámetros generales de entrada y salida en un modelo (Tabla 2):

Tabla 2. Parámetros de entrada y salida en un modelo numérico.

Entradas	Salidas
Geometría del acuífero	Cargas y concentraciones
Propiedades del acuífero	Mapas de contornos
Mecanismos de recarga y descarga	Secciones transversales
Condiciones de frontera	Series temporales vs tiempo
Fuentes y sumideros	Flujos y velocidades
Propiedades de contaminantes	Recorrido de partículas
Cargas y concentraciones	

Fuente: Gárfias (2010)

Uno de los aspectos más importantes a definir en la modelación se relaciona con las condiciones de frontera o contornos del sistema acuífero. Anderson & Woessner (2002) indican que, en un modelo en estado estacionario las condiciones de frontera son responsables en gran parte del patrón de flujo obtenido. En ese sentido, según estos autores los contornos hidrogeológicos son representados por los siguientes tres tipos de condiciones matemáticas:

1) *Contorno de carga especificada (Tipo 1 o condición de Dirichlet):* la carga hidráulica es dada, por ejemplo, el nivel del mar.
2) *Contorno de flujo especificado (Tipo 2 o condición de Neumann):* la derivada de la carga (flujo) a través del contorno se encuentra especificada. Por ejemplo, zonas de recarga en los contornos o una condición de no flujo como es una divisoria de aguas.
3) *Contorno de flujo dependiente de la carga (Tipo 3, condición de Cauchy o de contorno mixto):* el flujo a través del contorno es calculado dando un valor de carga en el contorno. Se denomina de condición mixta debido a que relaciona las cargas en el contorno con el flujo en el

contorno. Por ejemplo, la representación de condiciones de efluencia o influencia en los ríos.

Anderson & Woessner (2002) han propuesto un protocolo con una serie de pasos recomendados para el desarrollo de los modelos numéricos matemáticos. El esquema de proceso respectivo se observa en la figura 7.

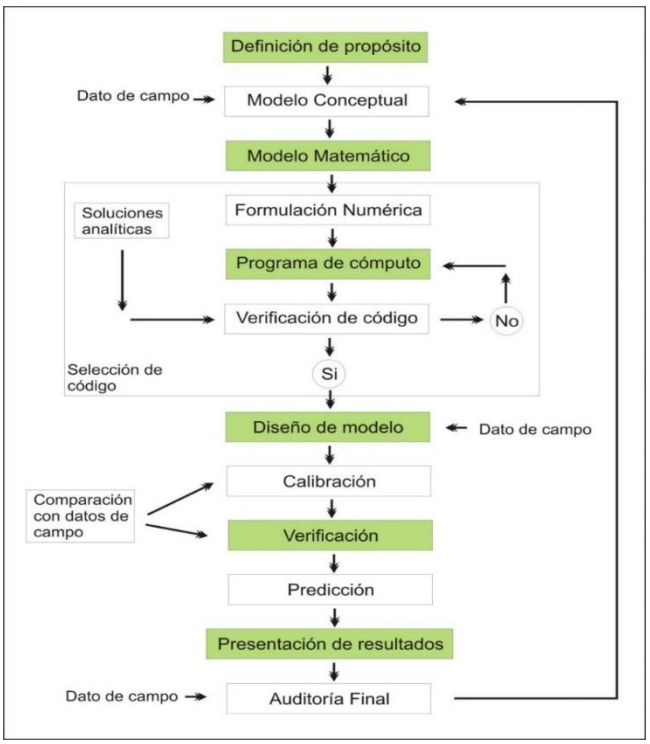


Figura 7. Pasos para el desarrollo de modelos numéricos. Tomado y modificado de Anderson y Woessner (2002).

Para la elaboración del modelo numérico – matemático en el cantón de Belén se utilizará el programa de cómputo Visual Modflow Flex Pro versión 9.0, basado en la teoría de diferencias finitas.

El modelado inicia con la construcción en el programa de una malla que permita representar espacialmente el acuífero y las distintas capas hidrogeológicas que se desea modelar. Es en esta malla en la cual se define la extensión de los acuíferos, las condiciones de frontera, cargas hidráulicas y parámetros hidráulicos del acuífero.

Con todos los parámetros de entrada ingresados en las celdas de la malla, se procede a correr el modelo en estado estacionario y se realiza en

cada celda los cálculos relacionados con las ecuaciones de flujo. Finalmente, a partir de los parámetros de entrada, la modelación determina las cargas hidráulicas en los diferentes sectores de los acuíferos modelados, que eventualmente pueden representarse como curvas equipotenciales. Estas curvas equipotenciales se comparan con valores tomados en campo para su adecuada calibración.

Una vez calibrado el modelo en estado estacionario, se procede a realizar la modelación a partir de distintos escenarios en las condiciones de extracción de aguas subterráneas y climáticas de la zona. Para la evaluación de las condiciones climáticas se utilizó como base el documento *Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America and the Caribbean in CMIP6 GCMs,* elaborado por Almazroui *et al.* (2021).

1.10 Antecedentes

La recopilación de información contempló estudios regionales realizados a nivel país o en algún sector del cantón, así como estudios específicos desarrollados en relación con temas específicos en geología, cronoestratigrafía e hidrogeología en los alrededores como dentro del perímetro que administra el gobierno local de Belén.

A nivel regional existe una serie de estudios enfocados en la estratigrafía del Valle Central (Echandi, 1981, Thiele & Vargas, 2017), Denyer & Arias (1991), así como en características hidrogeológicas de las unidades de rocas acuíferas existentes (SENARA – BGS, 1985). En la tabla 3, se describe brevemente los estudios regionales existentes, así como sus alcances.

Tabla 3. Estudios geológicos – hidrogeológicos, a escala regional.

Autor(es) y año	Área de cobertura	Temas de interés
Echandi, 1981.	Parte central y norte del Valle Central.	Formalización de la nomenclatura de las unidades volcánicas, características hidrogeológicas.
BGS – SENARA, 1985.	Valle Central.	Mapa hidrogeológico, características hidrogeológicas e hidráulicas de las rocas aflorantes en el Valle Central.
Protti, R., 1986.	Flanco Sur del Volcán Barva.	Geología del flanco Sur del Volcán Barva.
Denyer & Arias, 1991.	Región Central de Costa Rica.	Descripción detallada de la estratigrafía del Valle Central.
Arredondo, S & Soto, G., 2006	Parte alta Volcán Barva.	Cronoestratigrafía de la Formación Barva.
Ramírez, 2007	Valle Central.	Estimación de la recarga potencial de los acuíferos Colima y Barva, propuesta de zonificación de los acuíferos.
Sánchez, R et al., 2016.	Acuíferos Barva y Colima Superior.	Variación espacial de la composición de ^{222}RN en manantiales y pozos de la red de abastecimiento de agua potable.
SENARA, BCI & NEMUS, 2016.	Valle Central.	Modelación numérica e hidrogeológica del Valle Central.
Thiele & Vargas, 2017.	Sector Occidental del Valle Central.	Relaciones estratigráficas de las unidades volcánicas del piso del Valle Central.

A nivel local, para el área de estudio y alrededores, la Municipalidad de Belén ha liderado y financiado una serie de consultorías enfocadas específicamente en temas ambientales, relacionados con el manejo y disposición final de las aguas residuales (Consultores Centroamericanos, 2011), desarrollo e implementación de programas para mejorar la calidad de las aguas superficiales (UNA, 2012). Mientras que, en el área de hidrogeología existen varios documentos asociados a la delimitación de las zonas de protección de manantiales (Arredondo, 1995), de pozos de abastecimiento público del cantón de Belén elaborado por Vargas (2010), y el documento denominado "*Estudio hidrogeológico y de vulnerabilidad hidrogeológica mediante el método de DRASTIC para el cantón de Belén*", elaborado por SENARA (2016).

En la tabla 4, destacan los trabajos realizados por contenido, área de cobertura y relevancia de la información según temas.

Tabla 4. Estudios geológicos – hidrogeológicos en el cantón de Belén.

Autor(es) y año	Área de cobertura	Temas de interés
Arredondo, S., 1995.	Manantiales La Gruta, Los Sánchez, Ojo de Agua, Puente de Mula, San Antonio.	Delimitación de las zonas de protección de manantiales.
Universidad Nacional, 2012.	Cantón de Belén.	Propuesta para mejorar la calidad de las aguas superficiales del Cantón de Belén.
Consultores Centroamericanos en Ingeniería S.A, 2011.	Cantón de Belén	Diagnóstico de los sistemas de tratamiento de aguas residuales administrados por la municipalidad y/p privados. Propuesta de manejo integral de las aguas residuales.
Protti, R & Sojo, D., 2015.	Cantón de Belén	Mapa de vulnerabilidad a la contaminación acuífera a través del método GOD.
SENARA, 2016.	Cantón de Belén	Modelo conceptual. Recarga potencial. Análisis de vulnerabilidad, método Drastic.
Vargas, I., 2010	Pozos de abastecimiento público	Correlación de columnas estratigráficas de pozos. Zonificación de la vulnerabilidad. Determinación de zonas de protección de pozos y nacientes.
Astorga, A., Mende, A., Chávez, L., Jenkins, A.C., Gutiérrez, E, Varela, G & Hidalgo, G. INDECA Consultores, 2022.	Cantón de Belén	Mapas de geoaptitud con el factor hidrogeológico.

A partir del análisis de la información disponible, se determina que los estudios realizados por SENARA 2016, Vargas (2010) y Arredondo (1995), aportan resultados muy útiles para el desarrollo del presente estudio.

1.11 Alcances y limitantes del estudio

1.11.1 Alcances

A partir de la información técnica más reciente de tipo hidrogeológico que existe en el cantón de Belén, se ha logrado actualizar el modelo hidrogeológico del área, como insumo fundamental para el desarrollo de la modelación numérica. Adicionalmente, mediante la aplicación de la metodología desarrollada por Schosinsky (2006), se determinó la recarga potencial de los acuíferos y se generó el mapa de clases de recarga potencial para toda el área del cantón.

Una vez determinada la recarga potencial en la zona y conocidos los caudales de extracción reportados en las bases de datos del SENARA, Dirección de Agua del MINAE y AyA, se determinó la disponibilidad de caudal que podría ser utilizado para distintas actividades.

Finalmente, según las condiciones de frontera determinadas y las propiedades hidráulicas asignadas a cada unidad hidrogeológica, fue posible correr un modelo numérico – matemático en estado estacionario que describe las condiciones actuales del flujo subterráneo en los acuíferos existentes en el cantón. Este modelo numérico del panorama actual, sirvió de base para escenificar variaciones en los regímenes de extracción del agua subterránea y cambios de las condiciones climáticas, de tal manera que, se pudieran conocer los posibles efectos que se producirían sobre la dinámica del flujo del agua subterránea y la disponibilidad de este preciado líquido.

1.11.2 Limitantes

Durante la estructuración de la red de monitoreo de pozos se tuvo dificultades para obtener los permisos de varios propietarios. En distintas empresas los encargados se negaron al proceso o hicieron caso omiso de las solicitudes, lo cual dificultó la obtención de datos para el control de niveles en ciertos sectores de los acuíferos.

Para el análisis de disponibilidad hídrica existe diferencia entre la información de caudales concesionados en la Dirección de Agua del MINAE y los registrados en el SENARA. Adicionalmente, la ubicación de pozos y manantiales en las bases de datos del SENARA y la Dirección de Agua del MINAE en muchas ocasiones no coincide, lo que dificulta la detección de los elementos hidrogeológicos en campo, así como, la construcción de los modelos y el desarrollo de una red de monitoreo adecuada.

La información disponible sobre espesores y parámetros hidráulicos del acuífero Colima Inferior es muy escasa, lo que limitó en gran medida el desarrollo del modelo hidrogeológico y numérico de esta unidad acuífera.

En los cauces de los ríos Segundo, Burío, Bermúdez y Virilla se carece de aforos recientes con ubicación estratégica que ayude a determinar el comportamiento de estos cauces con respecto a los acuíferos, así como, los volúmenes de agua que eventualmente entran y salen al sistema a través de ellos.

2. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA DEL CANTÓN DE BELÉN

2.1 Ubicación y descripción del área de estudio

La caracterización comprende el diagnóstico biofísico de todo el cantón de Belén, que cuenta con un área de 12,38 km². El Cantón de Belén se encuentra localizado entre las coordenadas 1101949,32 – 1106327,15 N y 478053,04 – 483163,16 E, en las hojas cartográficas Abra y Barva 1:50000, enmarcado dentro de la gran cuenca hidrográfica del Río Grande de Tárcoles. (Figura 8).

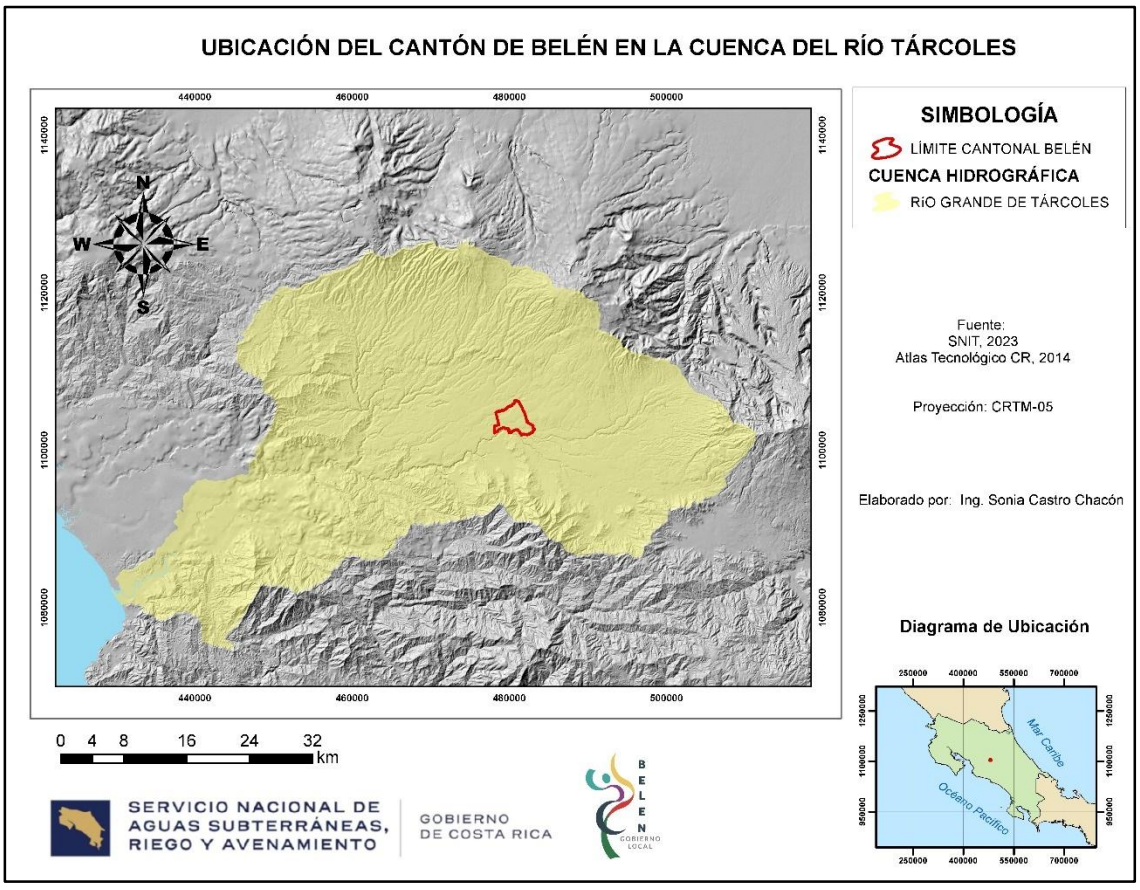


Figura 8. Mapa general de ubicación del cantón de Belén dentro de la cuenca del Río Grande de Tárcoles. Fuente: SNIT (2023).

El Municipio de Belén forma parte del Gran Área Metropolitana. Al norte de la región se localiza la zona industrial en desarrollo La Ribera, la cual

constituye un 18% del área de Belén. Belén está localizado al suroeste de la provincia de Heredia. Sus límites geográficos son: al Este con los cantones de Heredia y Flores, al Norte y Oeste con el cantón de Alajuela y al Sur con los cantones de San José, Escazú y Santa Ana. (Figura 9).

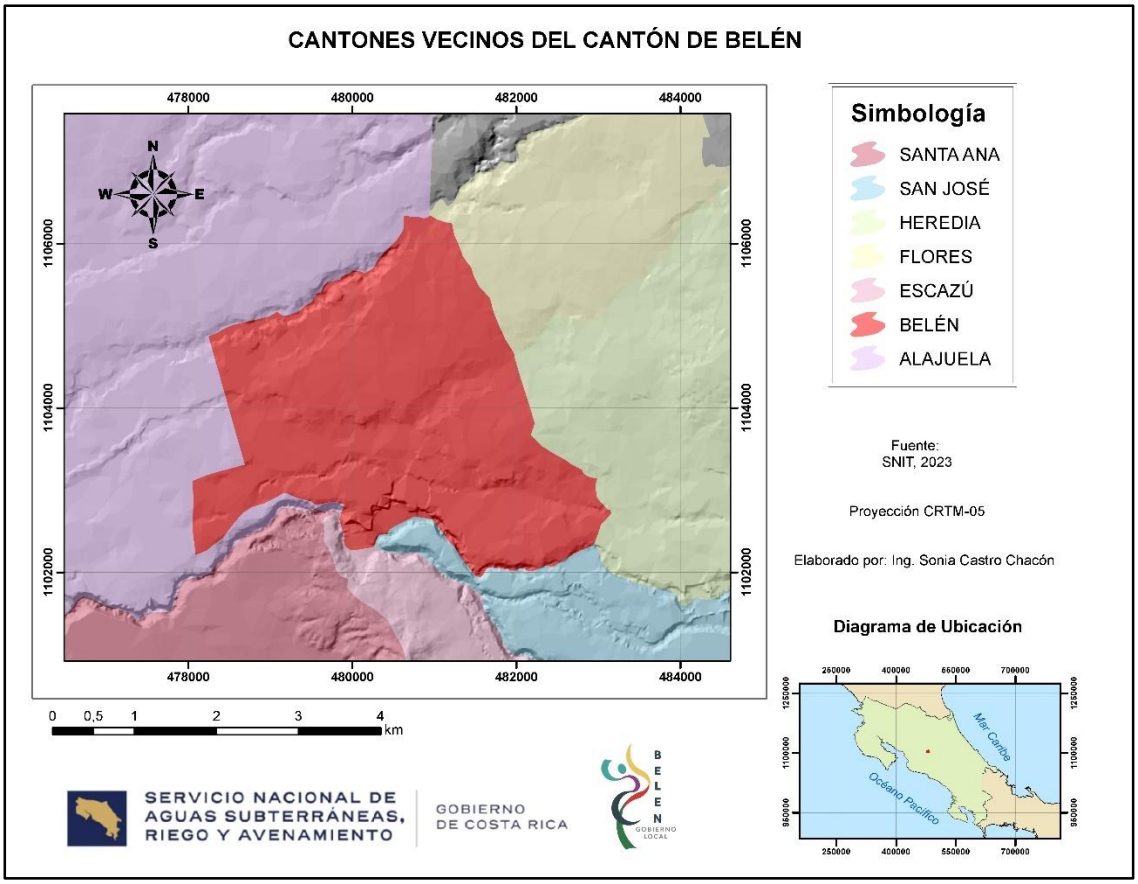


Figura 9. Ubicación de cantones cercanos. Fuente: SNIT (2023).

El cantón de Belén está compuesto por tres distritos, La Asunción, La Ribera y San Antonio (Figura 2).

- San Antonio (Ciudad), latitud 1103421 N, longitud 479622 O, elevación 912 msnm. Barrios: Chompipes (parte), Escobal, Calle La Labor (parte), San Isidro, San Vicente, Zaiquí.
- Ribera (Villa), latitud 1104466 N, longitud 479887 O, elevación 953 msnm. Barrios: Fátima, Fuente, Calle La Labor (parte), Vista Linda. Poblado: Echeverría (parte).

- Asunción (Villa), latitud 1103689 N, longitud 481338 O, elevación 945 msnm. Barrios: Arbolito, Bonanza, Bosques de Doña Rosa, Cariari (parte), Chompipes (parte).

2.2 División altitudinal y pendientes

El cantón se dividió en tres zonas de acuerdo a su distribución altitudinal (figura 10), se delimitaron con criterios de enfoque de cuencas (Tabla 5).

Tabla 5. Distribución de zonas altitudinales del Cantón de Belén.

Zona Altitudinal	Km²	Hectáreas	%
Alta (960-1010 m.s.n.m)	3,68	368,97	30%
Media (910-960 m.s.n.m)	5,82	582,38	47%
Baja (860-910 m.s.n.m)	2,86	286,90	23%
TOTAL	12,38	1.238,27	100%

Fuente: Elaboración propia (2023)

Con respecto a la división altitudinal se hace la siguiente descripción (figura 10 y tabla 5):

- Parte Alta: comprende desde la cota 960 m.s.n.m. hasta la cota 1010 m.s.n.m. y tiene un área de 3,68 km² (368,97 ha); representa el 30% del área total del cantón.
- Parte Media: comprende desde la cota 910 m.s.n.m. hasta la cota 960 m.s.n.m. y tiene un área de 5,82 km² (582,38 ha); representa el 23% del área total.
- Parte Baja: comprende desde la cota 860 m.s.n.m. hasta la cota 910 m.s.n.m. y tiene un área de 2,86 km² (286,90 ha); representa el 16,47% del área total.

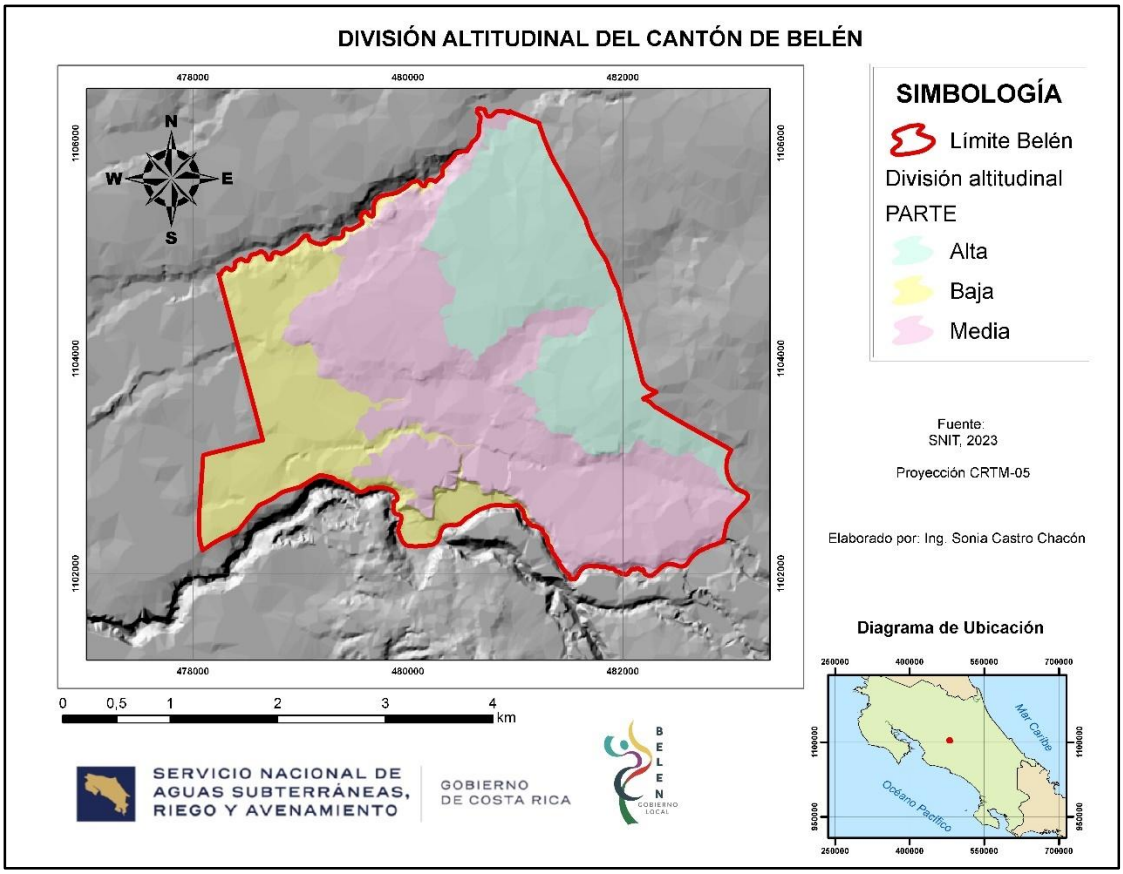


Figura 10. División altitudinal del cantón de Belén. Fuente: SNIT (2023)

En la tabla 6 se puede observar que en el cantón de Belén predominan las pendientes entre 0-8%, seguidas de las pendientes de 8-15% y en menor cantidad las pendientes mayores al 60%. En la parte media predominan las pendientes de 45-60% y en menor proporción las pendientes de 30-45%. En la figura 11 se observa la distribución porcentual en cuanto a pendientes y áreas, con respecto a todo el cantón.

Tabla 6. Rangos de pendientes en el cantón.

Rangos de pendiente (%)	Área en cada rango de pendiente (km²)
0 – 8%	8,65
8-15%	2,13
15-30%	11
30-45%	0,24
45-60%	0,1
>60%	0,15
TOTAL	12,37

Fuente: Elaboración propia, (2023).

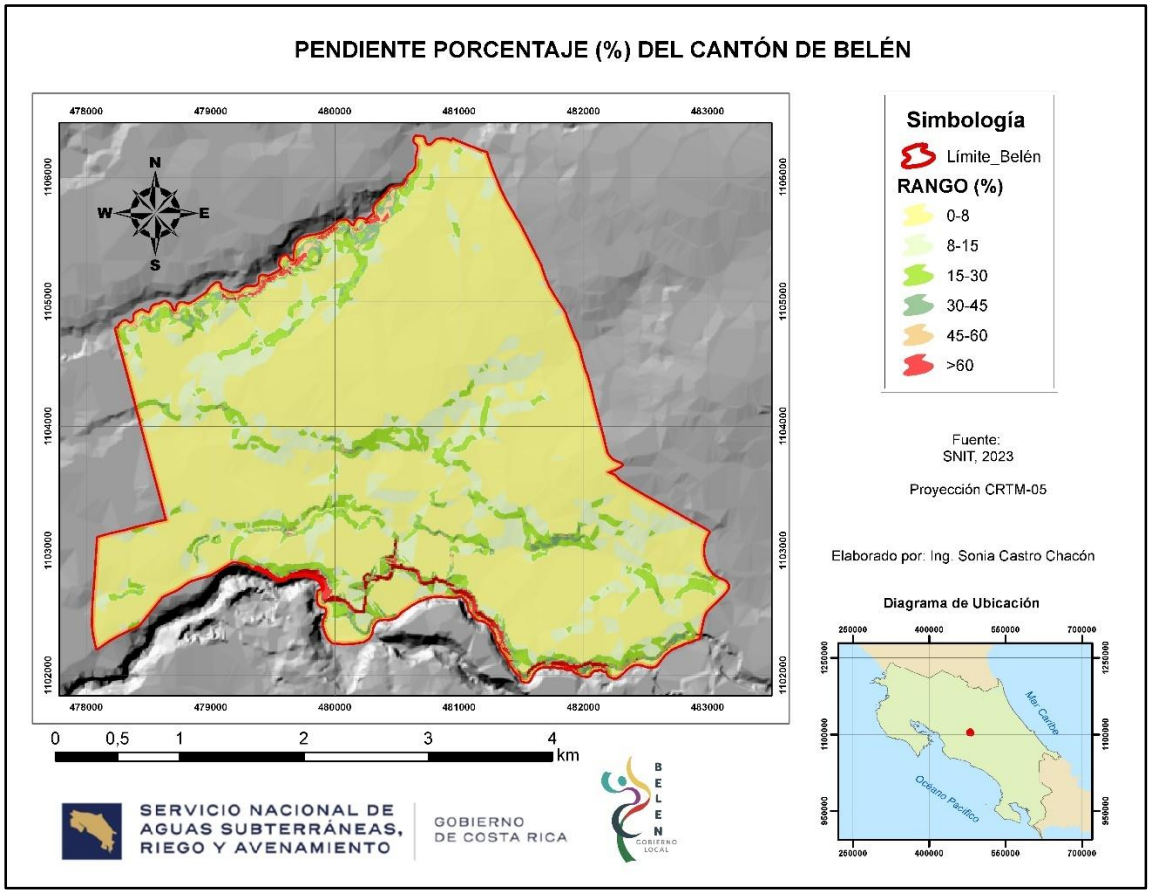


Figura 11. Mapa de porcentaje de pendientes del Cantón de Belén. Fuente: SNIT (2023).

2.3 Áreas de conservación

El Cantón de Belén se encuentra totalmente dentro de la zona de influencia del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central (ACCVC) (figura 12).

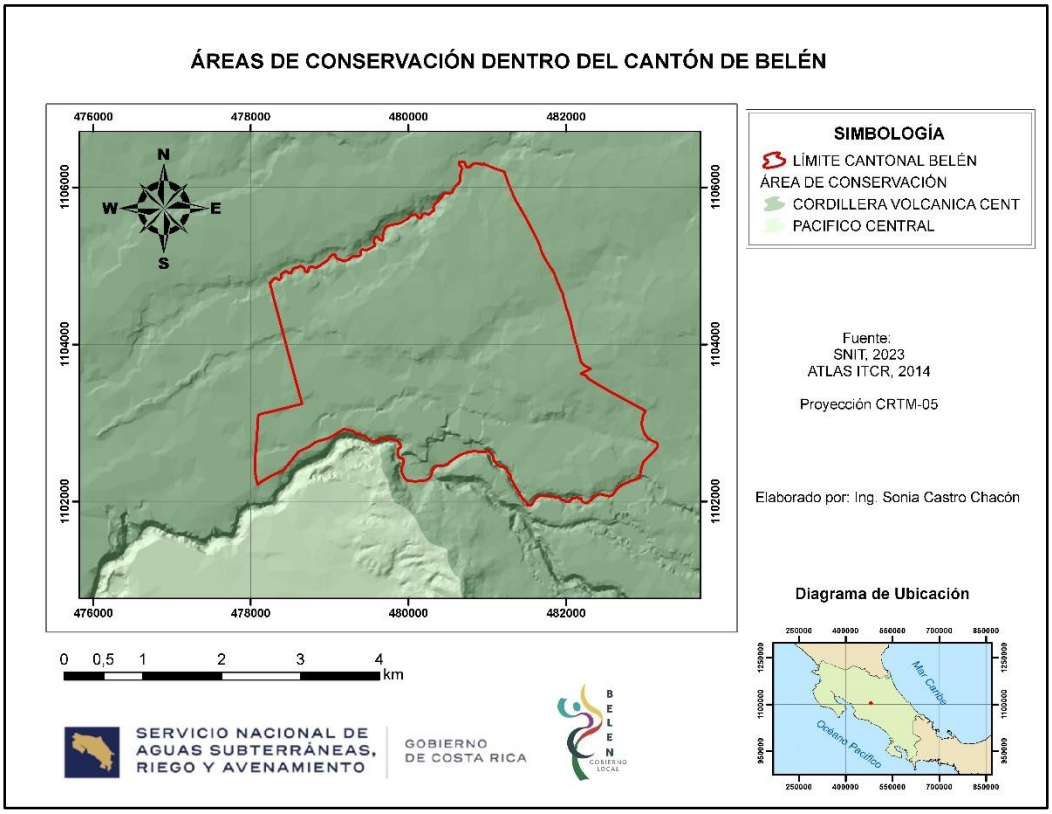


Figura 12. Áreas de Conservación en el Cantón de Belén. Fuente: SNIT (2023).

2.4 Zonas de vida

Las zonas de vida, tratan de un sistema de clasificación ecológica, en el que la aplicación práctica de la ecología requiere la cuantificación de variables que influyen en los distintos ecosistemas. Es por ello que, este sistema desarrollado por Holdridge (1947), se reviste de importancia al estar fundamentado en una estrecha relación entre el clima y la vegetación, a partir de lo cual el autor definió valores climáticos para identificar grupos de ecosistemas (Jiménez, 1993).

De acuerdo con la clasificación climática de Holdridge, en el cantón de Belén se define una zona de vida de Bosque Húmedo Premontano Tropical (figura 13).

Esta zona de vida se encuentra en dos áreas de Costa Rica, estas son valles intermontanos, el Valle de San Ramón y el densamente poblado Valle Central, desde San José hasta Turrúcares. Es un bosque estacional, semideciduo, de dos estratos y de mediana altura. Sus árboles del dosel son principalmente deciduos durante la estación seca y de unos 25 m de alto.

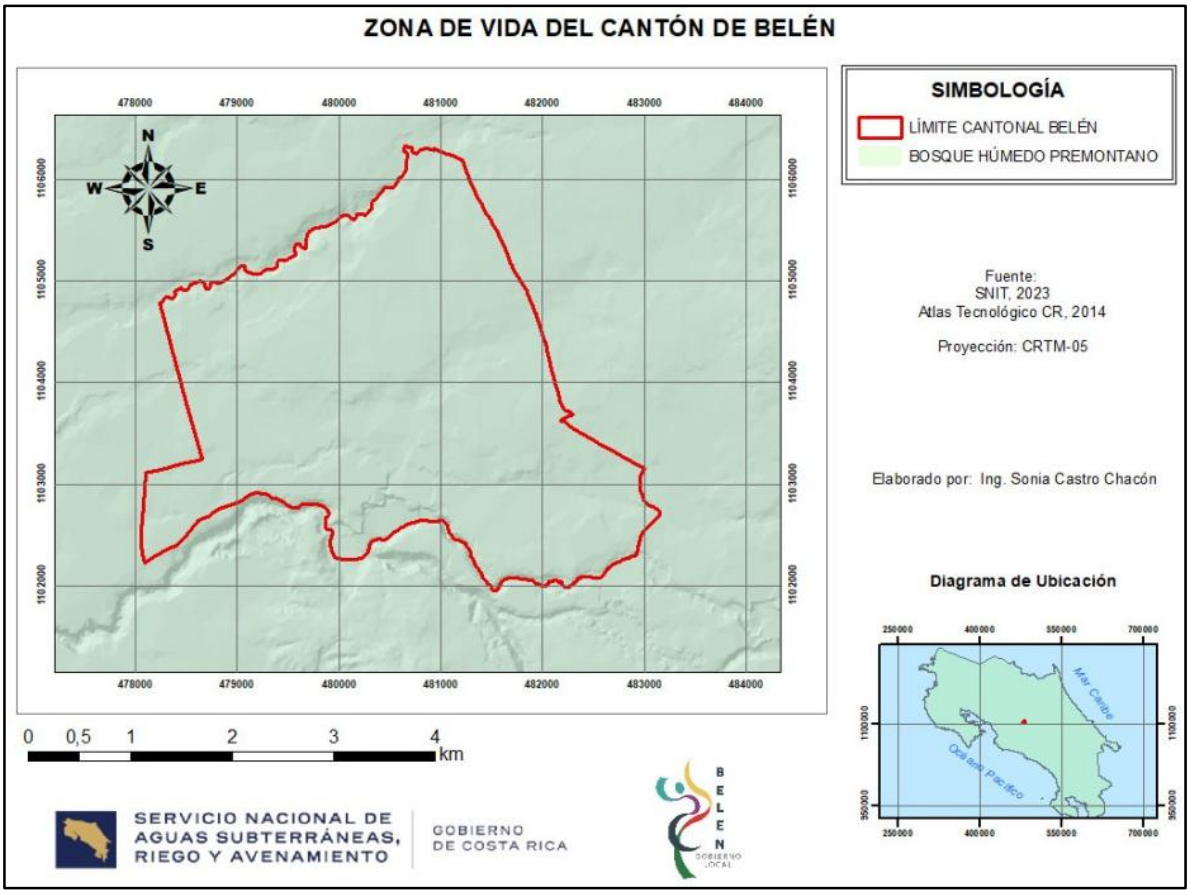


Figura 13. Mapa de zonas de vida en el área de estudio. Fuente: SNIT (2023)

2.5 División por subcuencas y microcuencas

En el área de estudio se encuentran los siguientes ríos principales: Río Bermúdez, Río Segundo, Quebrada Seca y Río Virilla. De esta forma, el cantón de Belén se encuentra subdividido en 4 microcuencas según se observa en las figuras 3 y 14, así como en la tabla 7.

Tabla 7. Microcuencas que conforman el cantón de Belén y su respectiva área (km2).

Microcuenca	Área de microcuenca (km²)	Área de la microcuenca dentro del cantón (km²)
Río Segundo	79,15	3,35
Río Bermúdez	52,34	3,61
Río Virilla	116,02	1,36
Quebrada Seca	22,24	4,05
TOTAL	269,77	12,38

Fuente: Elaboración propia (2023).

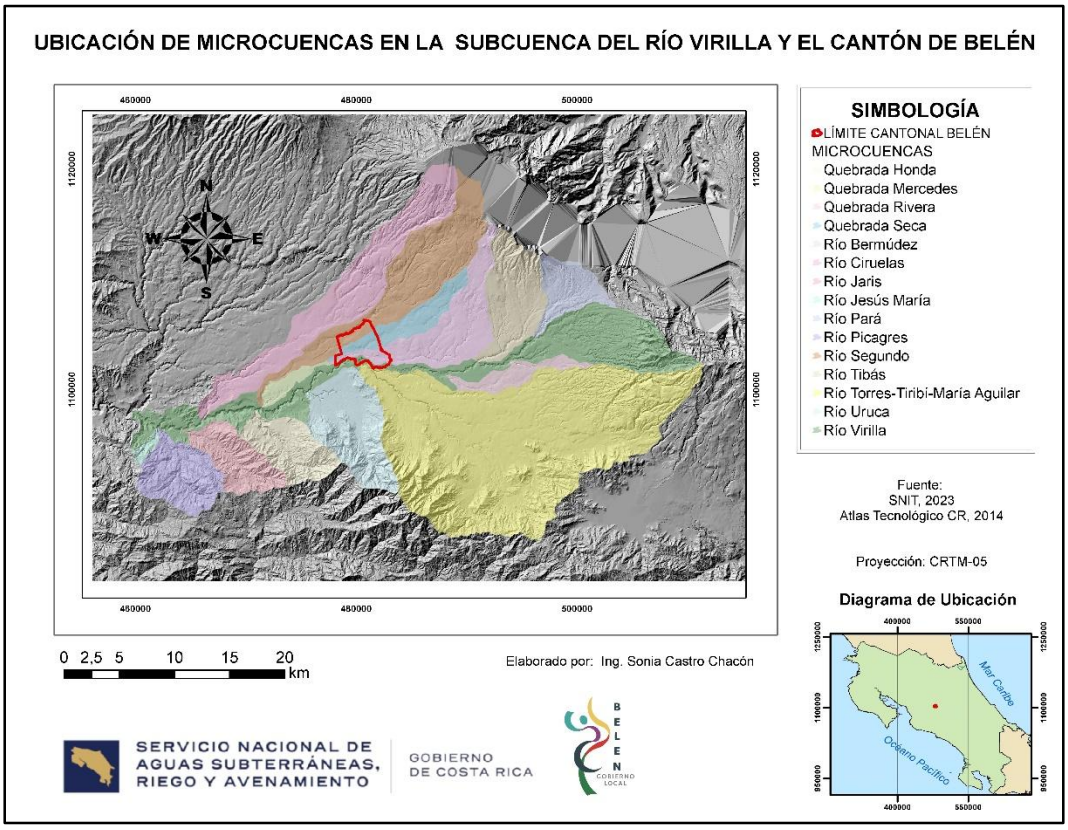


Figura 14. Mapa de ubicación de microcuencas en la subcuenca del Río Virilla y el Cantón de Belén. Fuente: SNIT (2023).

2.6 Características morfométricas de las cuencas

La geometría de la cuenca es el resultado de un proceso dinámico de tectonismo, erosión, sedimentación, flujo de energía y materia en el tiempo. Las principales fuentes de energía son los elementos meteorológicos (precipitación, viento) y los geológicos (tectonismo y vulcanismo). Las características morfométricas (áreas, longitudes, elevaciones y direcciones) de las cuencas son normalmente determinadas utilizando mapas topográficos o fotografías aéreas e instrumentos tales como curvímetros, reglas, cuadrículas o mesas digitalizadoras (Fallas, J. y Valverde, G., 1996).

En la actualidad se puede trabajar con datos precisos, confiables y el obtener esos datos es mucho menos engorroso que en el pasado, en este momento se cuenta con los Sistemas de Información Geográfica.

En cuanto a la fisiografía de la cuenca, está caracterizada por aspectos tales como: pendiente, elevación, orientación, relieve, forma, geometría del cauce. Cada una de dichas características puede delimitarse o cuantificarse a través de varios parámetros y expresiones. Por ejemplo, la pendiente puede ser descrita en términos de su longitud, grado, aspecto y rugosidad. Dichas características afectan la insolación, temperatura, formación y captación de precipitación, el crecimiento de la vegetación y el desarrollo del suelo. Es por esta razón que contemplar estos índices morfométricos es de gran importancia para la toma de decisiones en el tema de manejo de cuencas (Fallas, J. y Valverde, G., 1996)

La densidad de drenaje (longitud de canales por unidad de área) expresa la longitud de corrientes por km^2 de área (Delgadillo y Páez, 2008), indica la capacidad que presenta una cuenca para evacuar las aguas que discurren por su superficie. Generalmente una densidad de drenaje alta se asocia con materiales impermeables y relieves montañosos. A mayor densidad de drenaje, el tiempo de escorrentía es menor, por lo cual se considera como otro indicador de peligrosidad.

Este valor está controlado por las características litológicas (especialmente permeabilidad), estructurales de los materiales, vegetación y factores climáticos. Las mayores densidades de drenaje se encuentran en

rocas blandas de baja permeabilidad, zonas con escasa vegetación y aguaceros intensos y espaciados.

Importante mencionar que, una cuenca bien drenada generaría poca oportunidad de darle tiempo a la escorrentía superficial de infiltrarse y percolar a nivel subterráneo, lo que podría asociarse con acuíferos de bajo rendimiento o en su defecto que el volumen de recarga es pobre (Ruiz, 2001). Por el contrario, una densidad de drenaje baja refleja una cuenca pobremente drenada con una respuesta hidrológica lenta y materiales muy resistentes.

Se analizaron los índices morfométricos para las microcuencas presentes en la zona de estudio:

1. Río Segundo
2. Río Bermúdez
3. Quebrada Seca – Río Burío

En la zona de estudio también se encuentra la microcuenca del Río Virilla, pero esta no se consideró en el cálculo morfométrico, debido a que es muy poca el área que está dentro del Cantón de Belén, por lo que no representa un gran impacto.

2.6.1 Microcuenca del Río Segundo

En la tabla 8 se procede a describir los parámetros morfométricos que caracterizan a la microcuenca del Río Segundo.

Tabla 8. Tabla resumen de parámetros morfométricos – Río Segundo.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS, MICROCUENCA RÍO SEGUNDO		
TABLA RESUMEN		
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
DE LA SUPERFICIE		
Área	km^2	79
Perímetro	km	70
COTAS		
Cota máxima	m.s.n.m.	2418
Cota mínima	m.s.n.m.	676
CENTROIDE		
X Centroide	m	483095
Y Centroide	m	1109850
Z Centroide	m.s.n.m	1481
ALTITUD		
Altitud media	m.s.n.m.	1481
PENDIENTE		
Pendiente promedio de la cuenca	%	2%
DE LA RED HÍDRICA		
Longitud del cauce principal	km	33
Orden de red hídrica	UND	5
Longitud de la red hídrica	km	139
Pendiente media de red hídrica	%	2%
PARÁMETROS GENERADOS		
Índice de Compacidad Gravelius	Parámetro adimensional	2,2
Índice de Forma	Coeficiente adimensional	0,23
Factor de Forma	Parámetro adimensional	0,33

Fuente: Elaboración propia (2023)

2.6.1.1 Forma

La microcuenca presenta forma alargada (Factor de Forma Horton igual a 0,33) y un perímetro de 70 kilómetros. La forma alargada de la microcuenca indica que tiene mayor tiempo de concentración que las microcuencas que son anchas, da tiempo a que el agua infiltre, evapore y se reduce el riesgo a inundaciones. Además, tiene mayor capacidad de almacenamiento, mitiga la sequía y tiene mayor diversidad ecológica (Chow, V. T. 1964).

2.6.1.2 Altitud media

La curva hipsométrica es una herramienta que se utiliza para representar la distribución de las altitudes de una cuenca con respecto al área, la curva se construye a partir de los datos de elevación de la cuenca (Godoy, R. 2015). En la figura 15, se puede observar las inflexiones que hace la curva, donde se define por su relieve la parte alta, media y baja. Según la figura 15, la curva hipsométrica de la microcuenca del Río Segundo, corresponde a una cuenca en equilibrio, o sea que se encuentran en fase de madurez.

La microcuenca del Río Segundo va de los 2418 m.s.n.m. hasta los 676 m.s.n.m. La altitud media de dicha microcuenca es de 1481 msnm, la altitud más frecuente es de 920 msnm cerca de un 16% del total del área, mientras que la menos frecuente fue de 2316 msnm con cerca de un 4% del total del área.

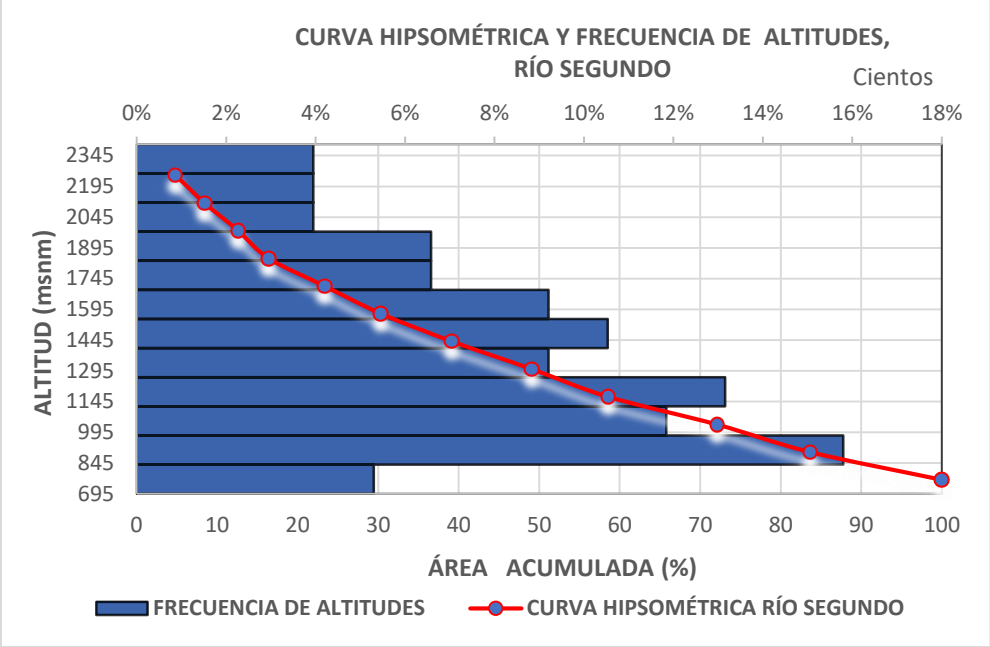


Figura 15. Curva Hipsométrica y frecuencia de altitudes, microcuenca del Río Segundo. Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.6.1.3 Longitud del cauce principal y pendiente media de la red hídrica (%)

La pendiente media de la red hídrica es de 2% y la longitud del cauce principal de 33 km.

2.6.1.4 Orden y número de corrientes

La microcuenca presenta un orden de corrientes número 5, lo que significa que es una red de drenaje extensa. Suele tener una mayor capacidad de almacenamiento, es más adecuada para la regulación del agua y el control de inundaciones (Chow, V. T. 1964) (Figura 16).

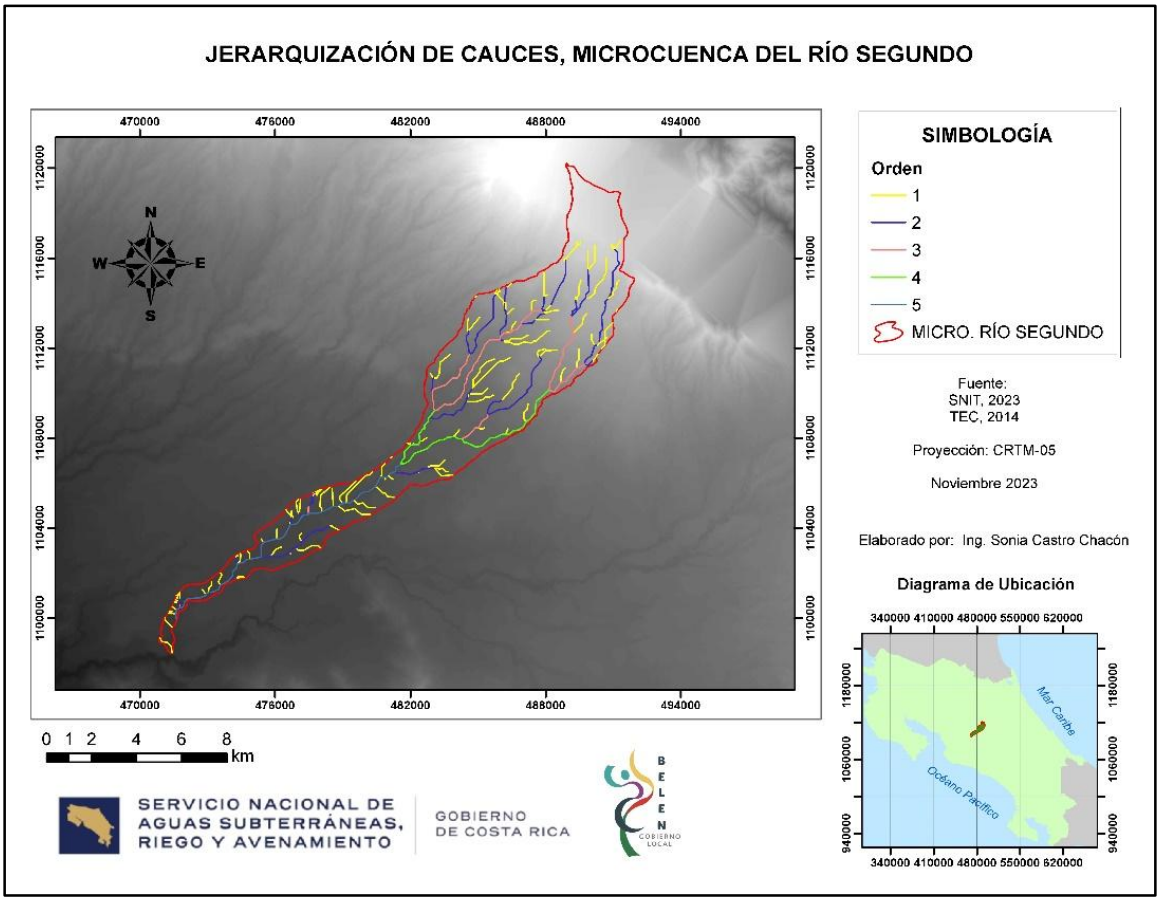


Figura 16. Jerarquización de cauces, microcuenca del Río Segundo.

2.6.1.5 Red de drenaje

El patrón de drenaje caracteriza la distribución espacial de los cauces en la microcuenca. Esta muestra un patrón de drenaje dendrítico, mismo que puede asociarse a la presencia de estratos horizontales y uniformemente resistentes, sedimentos no consolidados o rocas ígneas homogéneas donde no hay controles estructurales. Fallas y Valverde (1996) mencionan que, este tipo de drenaje es muy común.

2.6.1.6 Densidad de drenaje

Para el caso de la cuenca del Río Segundo, la densidad de drenaje es de 1,76 km de corriente/km^2 de área, valor que corresponde con una categoría de densidad moderada, por lo que su capacidad para evacuar las

aguas de escorrentía superficial es adecuada, así como de permitir la percolación de un porcentaje de escorrentía hacia los niveles acuíferos en profundidad.

2.6.2 Microcuenca del Río Bermúdez

En la tabla 9 se procede a describir los parámetros morfométricos que caracterizan a la microcuenca del Río Bermúdez.

2.6.2.1 Forma

La microcuenca presenta forma alargada (Factor de Forma Horton igual a 0,22) y un perímetro de 52 kilómetros. La forma alargada que presenta la microcuenca nos indica que, los escurrimientos superficiales que se generan se concentran más lentamente y discurren en general por un solo cauce principal, sin superar su capacidad de almacenamiento y transporte; y que la duración (tiempo de concentración) de los mismos es menor (Chow, V.T. 1964).

2.6.2.2 Altitud media

En la figura 17, se puede observar las inflexiones que hace la curva, donde se define por su relieve la parte alta, media y baja. Según esta figura, la curva hipsométrica de la microcuenca del Río Bermúdez corresponde a la de una cuenca en equilibrio, es un río viejo. La microcuenca del Río Bermúdez va de los 2280 msnm hasta los 870 msnm. La altitud media de la microcuenca es de 1428 msnm, la altitud más frecuente es de 1179 msnm cerca de un 31% del total del área, mientras la que la menos frecuente fue de 2079 msnm con cerca de un 2% del total del área.

Tabla 9. Tabla resumen de parámetros morfométricos – Río Bermúdez.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS, RÍO BERMÚDEZ		
TABLA RESUMEN		
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
DE LA SUPERFICIE		
Área	km^2	52
Perímetro	km	52
COTAS		
Cota máxima	m.s.n.m.	2280
Cota mínima	m.s.n.m.	870
CENTROIDE		
X Centroide	M	486730
Y Centroide	M	1107301
Z Centroide	m.s.n.m.	1428
ALTITUD		
Altitud media	m.s.n.m.	1428
PENDIENTE		
Pendiente promedio de la cuenca	%	5,25
DE LA FRED HÍDRICA		
Longitud del cauce principal	km	23
Orden de red hídrica	UND	5
Longitud de la red hídrica	km	126
Pendiente media de red hídrica	%	1%
PARÁMETROS GENERADOS		
Índice de Compacidad Gravelius	Parámetro adimensional	2
Índice de Forma	Coeficiente adimensional	0,23
Factor de Forma	Parámetro adimensional	0,22

Fuente: Elaboración propia (2023)

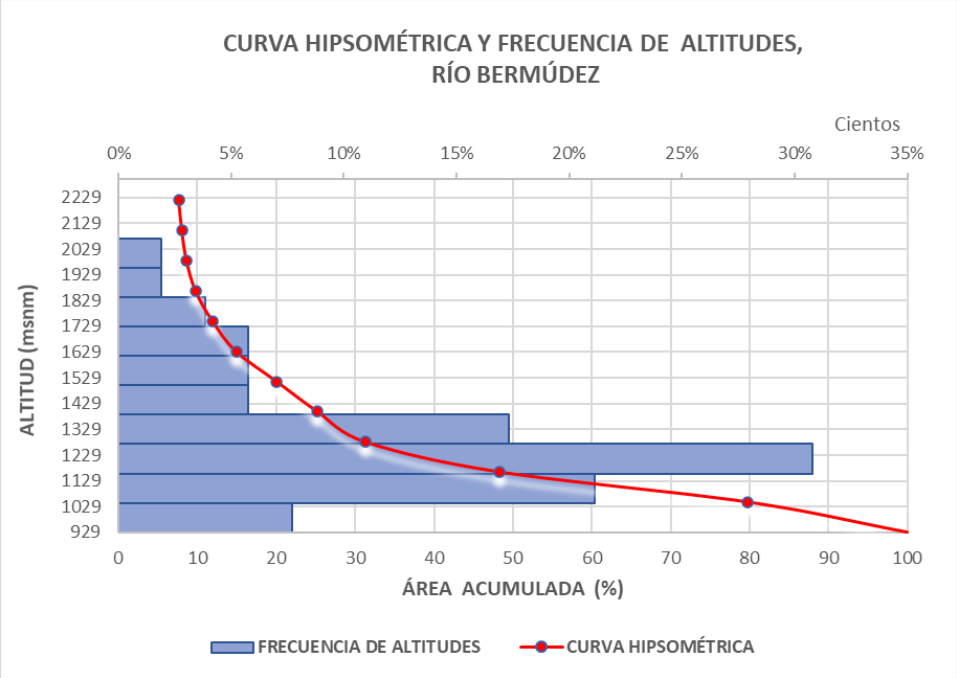


Figura 17. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes, microcuenca del Río Bermúdez. Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.6.2.3 Longitud del cauce principal y pendiente media de la red hídrica (%)

La pendiente media de la red hídrica es de 1% y la longitud del cauce principal de 23 km.

2.6.2.4 Orden y número de corrientes

La microcuenca presenta un orden de corrientes número 5, lo que significa que es una red de drenaje extensa. En ese sentido, suelen tener una mayor capacidad de almacenamiento, son más adecuadas para la regulación del agua y el control de inundaciones (Chow, V.T. 1964) (Figura 18).

2.6.2.5 Red de drenaje

La microcuenca muestra un patrón de drenaje predominante de tipo dendrítico, mismo que puede asociarse a la presencia de estratos horizontales y uniformemente resistentes, sedimentos no consolidados o

rocas ígneas homogéneas donde no hay controles estructurales. Fallas y Valverde (1996) mencionan que, este tipo de drenaje es muy común.

2.6.2.6 Densidad de drenaje

En este caso es de 2,42 km de corriente/km^2 de área, lo que nos indica que la densidad de drenaje es alta (Delgadillo y Páez, 2008). Este valor alto puede estar relacionado con la presencia de materiales más impermeables y podría indicar que la capacidad de percolación de las aguas de escorrentía hacia los acuíferos se ve disminuida.

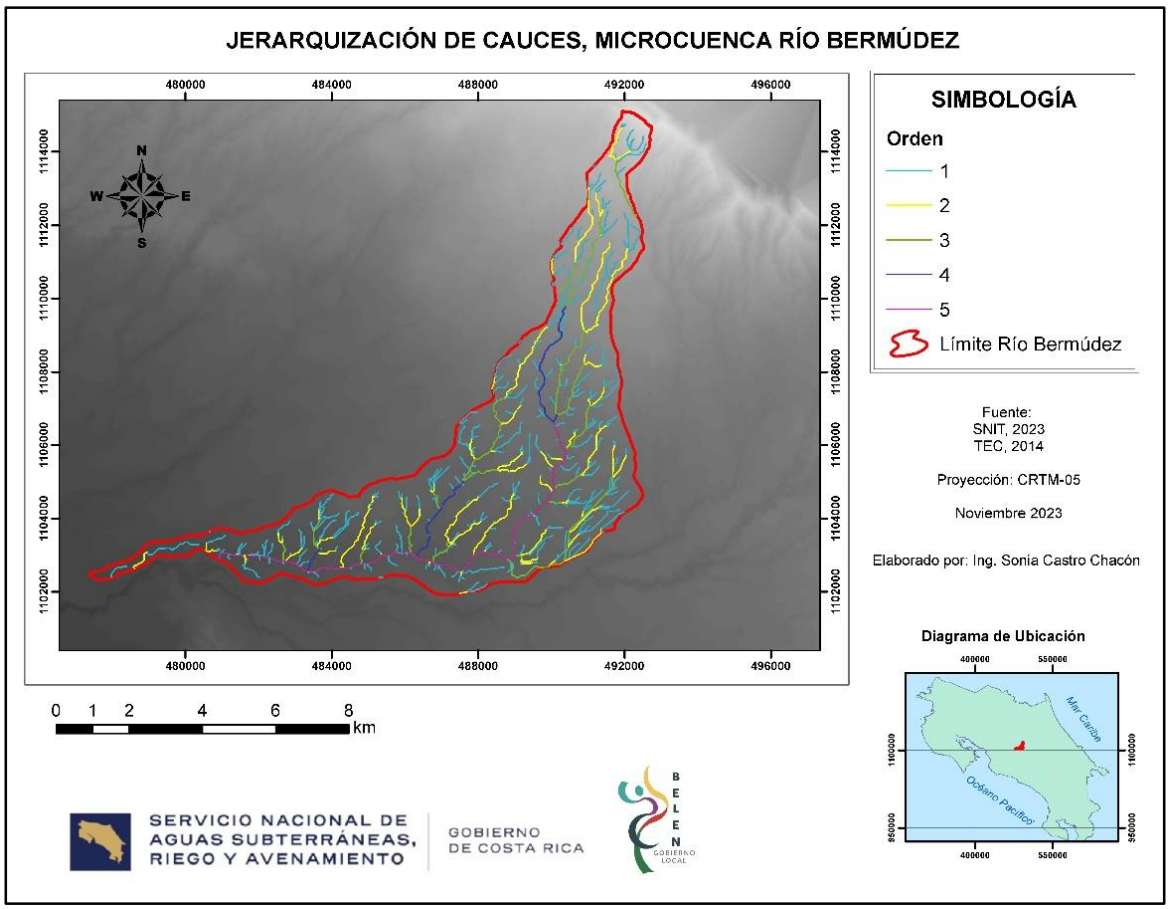


Figura 18. Jerarquización de cauces, microcuenca del Río Bermúdez.

2.6.3 Microcuenca quebrada Seca – Río Burío

En la tabla 10 se procede a describir los parámetros morfométricos que caracterizan a la microcuenca del Río Burío.

2.6.3.1 Forma

La microcuenca presenta forma alargada (Factor de Forma Horton igual a 0.09) y un perímetro de 44 kilómetros. En ese sentido, la forma alargada nos indica que la microcuenca tiene menos probabilidad a tener inundaciones. Sin embargo, es importante resaltar que, aunque la cuenca hidrográfica tenga una forma adecuada para transportar el agua en forma eficiente, en este caso en particular el hombre ha intervenido dichos espacios ribereños y estas intervenciones han alterado el ciclo natural del agua, lo que ha provocado un aumento en la frecuencia de inundaciones.

2.6.3.2 Altitud media

Según la figura 19, la curva hipsométrica de la microcuenca de la Quebrada Seca–Burío, corresponde a la de una cuenca en equilibrio, es un río viejo. Esta microcuenca va de los 1591 msnm hasta los 870 msnm. La altitud media de la microcuenca es de 1184 msnm, la altitud más frecuente es de 1120 msnm con un 18% del total del área, mientras la que la menos frecuente fue de 1270 msnm con cerca de un 5% del total del área.

2.6.3.3 Longitud del cauce principal y pendiente media de la red hídrica (%)

La pendiente media de la red hídrica es de 2% y la longitud del cauce principal de 18 km.

Tabla 10. Tabla resumen de parámetros morfométricos – Quebrada Seca – Río Burío.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS, QUEBRADA SECA-RÍO BURÍO		
TABLA RESUMEN		
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
DE LA SUPERFICIE		
Área	km^2	21
Perímetro	km	44
COTAS		
Cota máxima	m.s.n.m.	1591
Cota mínima	m.s.n.m.	870
CENTROIDE		
X Centroide	M	484286
Y Centroide	M	1106615
Z Centroide	m.s.n.m.	1184
ALTITUD		
Altitud media	m.s.n.m.	1184
PENDIENTE		
Pendiente media de la cuenca	%	12
DE LA RED HÍDRICA		
Longitud del cauce principal	km	18
Orden de red hídrica	UND	3
Longitud de la red hídrica	km	31
Pendiente media de red hídrica	%	2
PARÁMETROS GENERADOS		
Índice de Compacidad Gravelius	Parámetro adimensional	3
Índice de Forma	Coeficiente adimensional	0,23
Factor de Forma	Parámetro adimensional	0,09

Fuente: Elaboración propia (2023).

2.6.3.4 Orden y número de corrientes

La microcuenca presenta un orden de corrientes número 5 (Figura 20), lo que significa que es una red de drenaje extensa. Estas tienen una mayor capacidad de almacenamiento y son más adecuadas para la regulación del agua y el control de inundaciones. No obstante, como se mencionó anteriormente, en el área de drenaje de la Quebrada Seca – Río Burío se ha presentado una condición de desarrollo urbano que ha modificado el uso de la tierra, lo cual ha incrementado los volúmenes de escorrentía superficial. Estos volúmenes superan en eventos extremos la capacidad de transporte del cauce, provocando inundaciones en diferentes partes de la microcuenca.

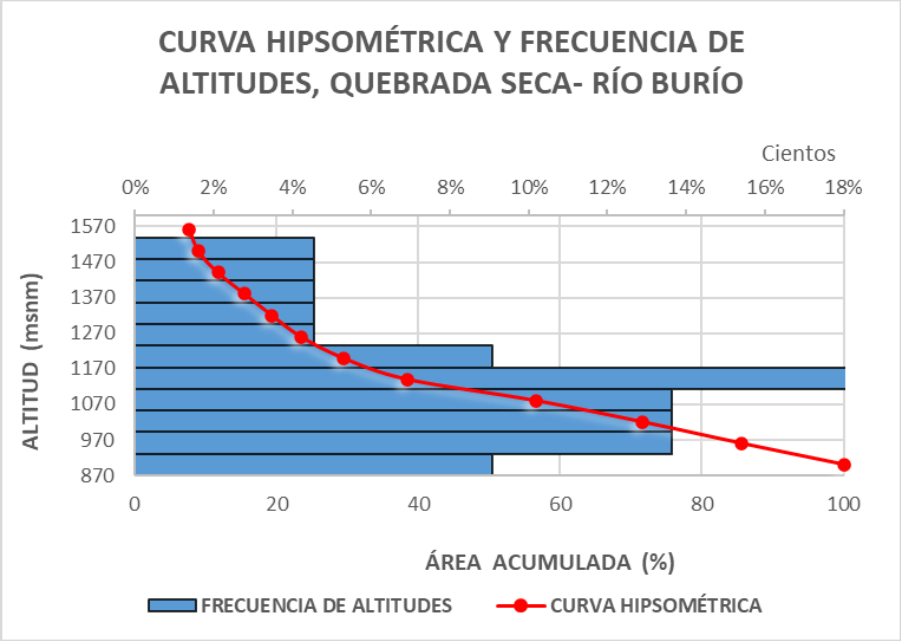


Figura 19. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la microcuenca de Q. Seca – Río Burío. Fuente: Elaboración propia (2023)

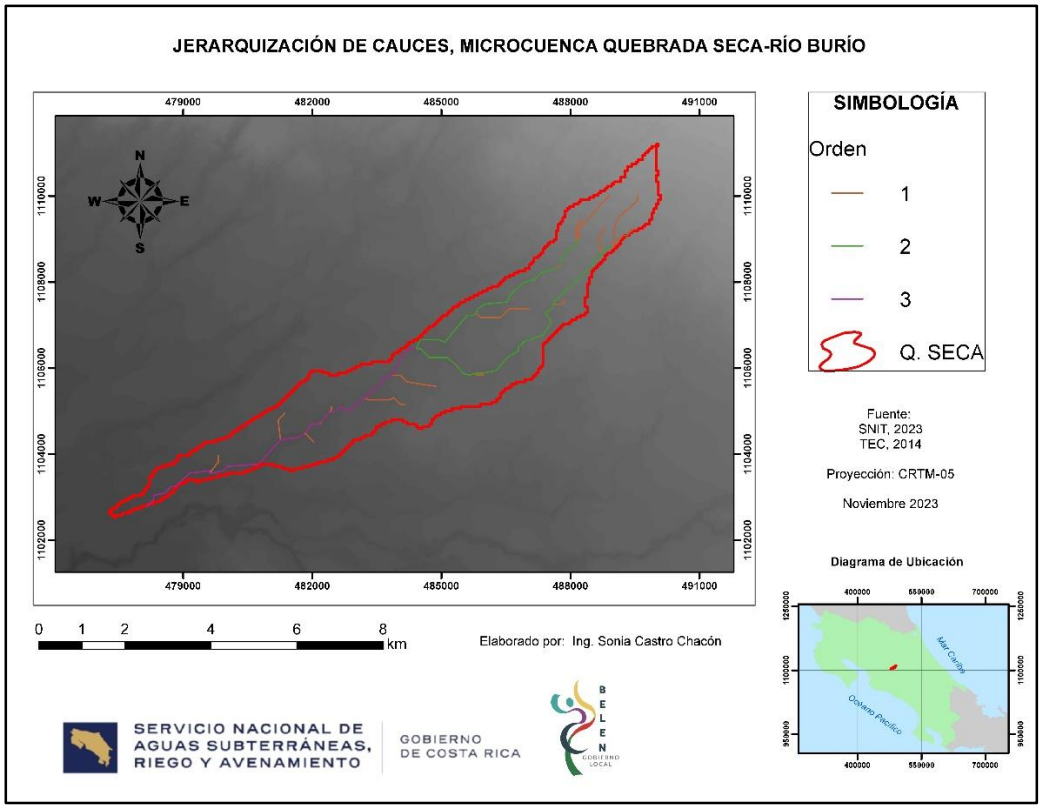


Figura 20. Jerarquización de cauces, microcuenca de Quebrada Seca.

2.6.3.5 Red de drenaje

El área de estudio muestra un patrón de drenaje dendrítico, el cual suele asociarse con sedimentos no consolidados o rocas ígneas homogéneas donde no hay controles estructurales.

2.6.3.6 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje (longitud de canales por unidad de área) expresa la longitud de corrientes por km^2 de área; en este caso es de 1,48 km de corriente/km^2 de área, lo que nos indica que la densidad de drenaje es moderada según Delgadillo y Páez (2008). Si bien es cierto, se podría considerar que su capacidad para evacuar las aguas de escorrentía superficial es adecuada, como se mencionó anteriormente, en ciertos sectores se ha presentado una condición de desarrollo urbano que ha modificado el uso de la tierra y con ello se han incrementado los volúmenes

de escorrentía superficial, que a su vez han provocado afectaciones a la población por inundaciones.

2.7 Climatología general del cantón

2.7.1 Información meteorológica

A partir de la consulta realizada ante el Instituto Meteorológico Nacional y en la Dirección de Ingeniería y Construcción, Grupo Hidroclimatología del Instituto Costarricense de Electricidad, se determina que, dentro del área de estudio se localiza la estación meteorológica Belén (84199), mientras que, en los alrededores cercanos a 7,5 km se ubican las estaciones Aeropuerto Juan Santamaría – media Pista (84169), Aeropuerto Pavas Este (84193), Santa Bárbara (84197) y Fabio Baudrit (84187), todas pertenecientes al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), con registros de temperatura y precipitación que varían del año 1997 a julio de 2023, así como las estaciones administradas por el ICE, a saber, Planta Térmica San Antonio (84142) y Planta Térmica Privada San Antonio (84144). (Anexo 3)

La tabla 11 muestra de manera general las características de las estaciones localizadas en la zona de estudio y alrededores más inmediatos, contiene las características e información de los registros asociados para el análisis de datos de precipitación y temperatura de las estaciones localizadas en el área de estudio y a una distancia de 3000 m con respecto al límite del cantón.

Los datos de las estaciones administradas por el ICE no se tomaron en cuenta en el presente estudio en virtud que no contienen datos de precipitación, además, el período de registro de la temperatura es muy muy corto (inferior a diez años) y no es coincidente con el de las otras estaciones a nombre del IMN.

Tabla 11. Estaciones del IMN y del ICE con influencia en el área de estudio.

Estación	Número	Períodos registrados		Datos de Precipitación	Datos de Temperatura
		Inicio	Fin		
Belén	84199	11/10/1995	01/07/2023	Sí	Sí
Aerop. Juan Santamaría, media pista	84169	12/08/1997	03/07/2023	Sí	Sí
Aerop. Pavas Este	84193	01/08/2008	03/07/2023	Sí	Sí
Santa Bárbara	84197	05/11/2007	21/04/2023	Sí	Sí
Fabio Baudrit*	84187	01/01/1995	31/07/2023	Sí	Sí
Planta Térmica San Antonio	84142	01/03/2008	01/10/2016	No	Sí
Planta Térmica Privada San Antonio	84144	01/03/2009	01/01/2013	No	Sí

* estación utilizada para completar series de datos de precipitación y temperatura.

A través de la construcción de Polígonos de Thiessen se definió el área de influencia de cada estación en la zona de estudio, para posteriormente determinar cuáles de ellas contaban con datos representativos del área (Figura 21).

Para las series de datos de las estaciones No.84199, 84169 y 84193, hubo que completarlas para poder contar con cuatro estaciones para llevar a cabo el balance hídrico de suelos, para tal fin se utilizó el método de rellenado conocido como Razón Normal, en ambos casos, para el período analizado se rellenó menos de un 7% de los campos. Las estaciones seleccionadas representan el clima de la zona de estudio, por cuanto han registrado eventos Niño y Niña, a través del tiempo y coinciden con los registros de precipitación y temperatura para el período 2007-2022.

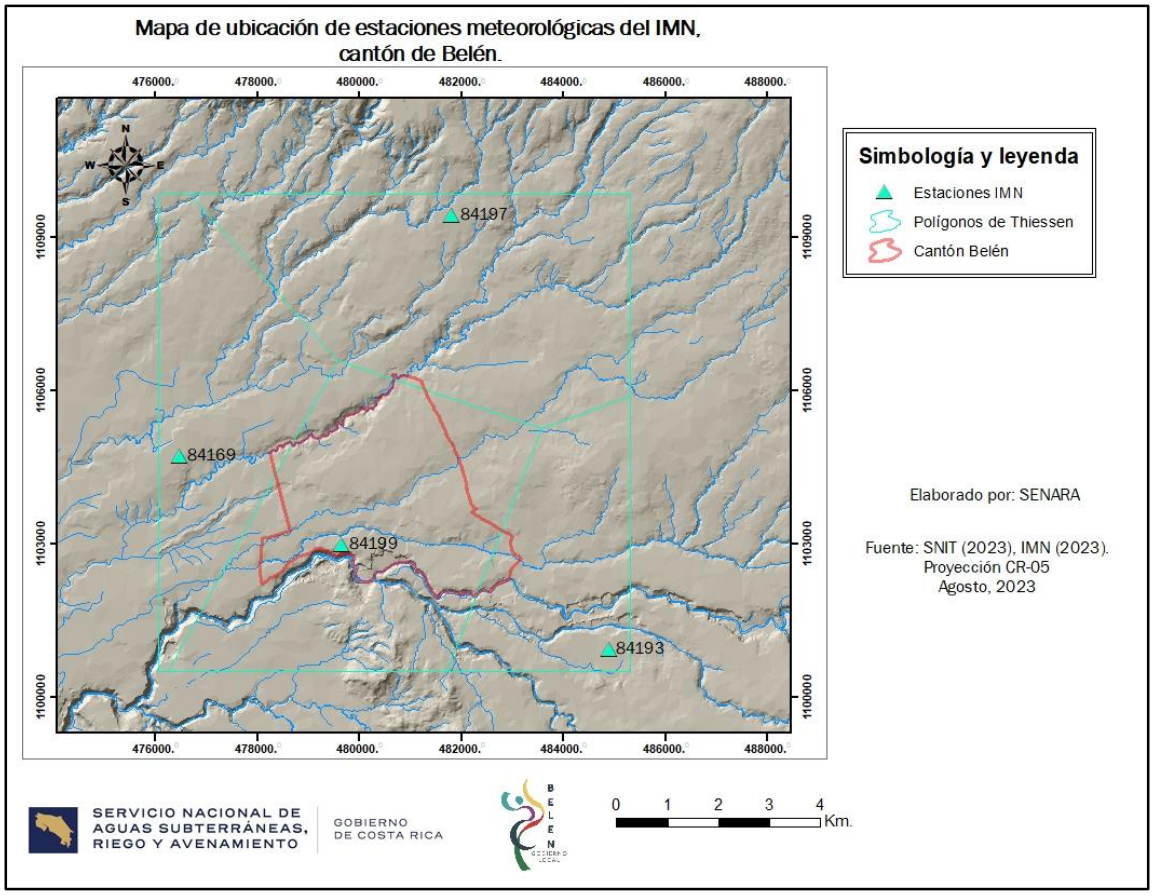


Figura 21. Ubicación de estaciones meteorológicas del IMN. Fuente: SNIT (2023) e IMN (2023).

2.7.1.1 Clima

De acuerdo con Coen (1967), el área de estudio forma parte de la subregión VC1 con un tipo de clima de meseta central, enlazado entre las faldas del Atlántico con las faldas del Pacífico. Este se caracteriza por la ocurrencia de lluvias moderadas y temperaturas frescas, con lluvia media anual de 1950 mm, temperatura máxima media anual de 27°C y mínima media anual de 18°C. El período seco se extiende por cinco meses, de diciembre a abril y un promedio de 129 días con lluvia.

- *Precipitación*

Las estaciones meteorológicas denominadas Belén, Aeropuerto Pavas Este y Aeropuerto Juan Santamaría – media pista, presentan un régimen de lluvias muy similar, aspecto que se asocia a la altitud de estas, que oscila entre 913 y 997 m.s.n.m y en sectores de relieve suave y ondulado, mientras

que la estación de Santa Bárbara alcanza registros de lluvia más altos al ubicarse por encima de los 1070 m.s.n.m y en una zona de relieve más abrupto e irregular.

En el gráfico de la figura 22 se destaca que, los meses más lluviosos corresponden con setiembre y octubre con promedios mensuales de 276,46 – 292,81 mm, mientras que en la época seca los registros mensuales de lluvia varían entre 4,23 y 12, 3 mm y en el mes de abril se refleja el inicio de la transición de la época seca a la lluviosa.

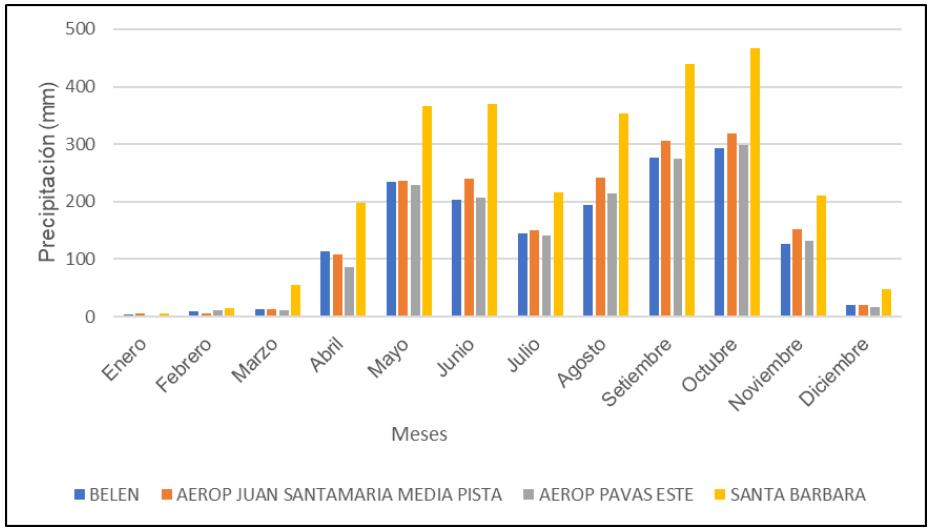


Figura 22. Registro de precipitaciones en el área de estudio y alrededores inmediatos. Fuente: IMN (2023)

- *Temperatura*

A partir del gráfico en la figura 23 se desprende que, las temperaturas más bajas se registran de agosto a octubre (20,71 – 22,44°C), aspecto asociado a los meses con mayor registro de precipitación, mientras que, a partir de diciembre son más cálidas, aspecto asociado a la disminución de las lluvias, siendo que de febrero a abril ocurren las temperaturas más altas del período (23,53°C).

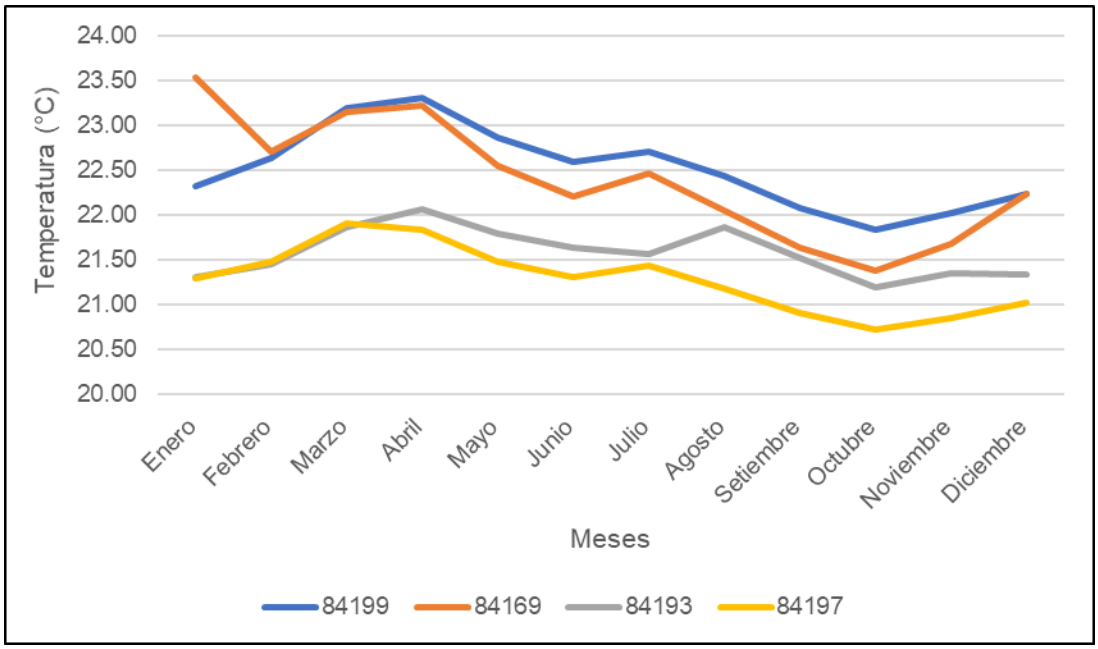


Figura 23. Registro de temperaturas en el área de estudio y alrededores inmediatos. Fuente: IMN (2023)

- *Evapotranspiración*

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), se utilizaron los datos de temperatura media mensual de las estaciones contenidas en la tabla 11 para el período comprendido entre el 2008 y el 2022.

Se aplicó la fórmula de Blaney & Criddle (ONU,1972) sugerida en la metodología para estimación de la recarga potencial desarrollada por Schosinsky (2006), que contempla además el porcentaje de horas de luz solar mensual.

$$ETP\ (mm/mes) = (8{,}10 + 0{,}46 \times T) \times Ps$$

ETP: evapotranspiración potencial en mm/mes.

T: temperatura media mensual en grados centígrados

Ps: porcentaje de horas luz solar mensual con respecto al año en porcentaje.

Tabla 12. Evapotranspiración Potencial a partir de las estaciones.

Mes	Evapotranspiración Potencial en mm.			
	Belén 84199	Aerop. Juan Santamaría, media pista. 84169	Pavas 84193	Santa Bárbara 84197
Enero	149,30	153,84	145,49	145,46
Febrero	138,27	138,52	134,2	134,32
Marzo	158,57	158,44	153,39	153,57
Abril	157,54	157,16	152,74	151,85
Mayo	164,04	162,72	159,64	158,39
Junio	159,04	157,49	155,24	153,94
Julio	164,31	163,28	159,62	159,13
Agosto	160,45	158,85	158,15	155,36
Setiembre	150,62	148,89	148,49	146,16
Octubre	151,31	149,55	148,85	147,01
Noviembre	144,19	142,92	141,71	139,93
Diciembre	148,47	148,43	145,11	143,92

Fuente: IMN (2023) y elaboración propia (2023)

De la tabla 12 anterior se desprende que, si bien todas las estaciones presentan datos de ETP muy similares, la estación de Santa Bárbara, localizada hacia el norte del cantón presenta datos levemente más bajos de ETP, entre 139,93 mm en noviembre hasta 159,13 mm, presentando julio el valor más alto. De manera general, en las cuatro estaciones la evapotranspiración se mantiene con valores altos de marzo a agosto con un máximo en el mes de julio (163,28-164,31 mm).

2.8 Aforos en cauces de ríos y quebradas

A partir de estaciones antiguas o proyectos del SENARA, se recopilaron datos de varios puntos de aforo en ríos que escurren a través del área de estudio. En total se cuenta con cuatro puntos de aforos con registros del 02 de febrero de 1970 a julio de 1995, específicamente en las microcuencas de los ríos Río Segundo, Burío y Bermúdez (Figura 24).

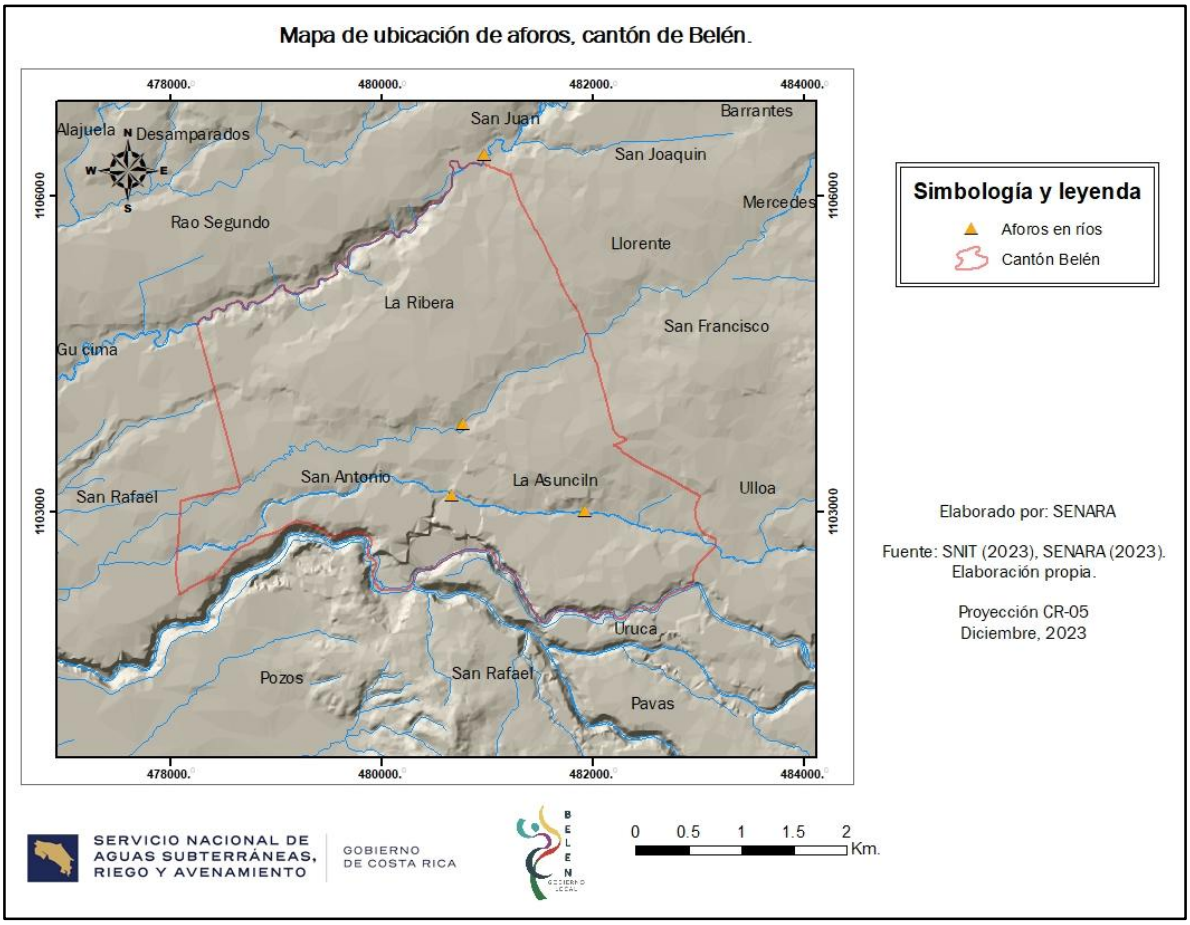


Figura 24. Ubicación de aforos en el cantón de Belén.

Los registros de aforos corresponden principalmente a medidas puntuales y no diferenciales tomadas en períodos distintos (Tabla 13 y Anexo 1), tal es el caso para los ríos Segundo y Burío, que no permiten desarrollar una trazabilidad del comportamiento de las aguas superficiales con respecto a las subterráneas. Por el contrario, con respecto al Río Bermúdez, se registran dos medidas en la misma fecha (06 de marzo de 1979), mostrando un aumento sustancial del caudal, por cuanto de 57 l/s aumenta a 264 l/s, pudiéndose evidenciar de manera preliminar, un comportamiento efluente del cauce. En este sentido es importante mencionar que, hacia el sur-este de La Asunción se localiza una serie de aproximadamente 10 manantiales (todas registradas en el SINIGIRH), que evidencian la salida de agua subterránea hacia la superficie, aspecto que refuerza un posible

comportamiento efluente del Río Bermúdez, donde el aumento de caudal está asociado al aporte de aguas subterráneas a este curso superficial.

Tabla 13. Sitios de aforo en cauces del cantón de Belén.

Longitud CRTM05	Latitud CRTM05	Caudal (l/s)	Fecha	Microcuenca
480969	480969	128	2/2/1970	Rio Segundo
480969	480969	1328	5/3/1981	Rio Segundo
481915	481915	57	6/3/1979	Rio Bermúdez
480666	480666	264	6/3/1979	Rio Bermúdez
480766	480766	8,6	17/7/1995	Rio Burío

Fuente: SENARA (2023)

La ejecución de aforos recientes en los cauces principales de los ríos Segundo, Burío, Bermúdez y Virilla no fue uno de los alcances que se plantearan para la ejecución de la actual modelación numérica en el cantón de Belén, sin embargo, se considera que, la existencia de datos de aforos diferenciales en estos cauces podría ayudar en la calibración y validación del modelo numérico desarrollado. En ese sentido, es recomendable que, a futuro y en la medida de las posibilidades de acceso, se diseñe una red de aforos en los cauces principales de estos ríos (Figura 3), que permita determinar, con mayor certeza, el comportamiento efluente – influente de estos cuerpos de agua, como insumo para la validación de los resultados obtenidos en el modelo numérico.

3. GEOLOGÍA

3.1 Marco Geológico Regional

En general se puede decir que las rocas que existen en el cantón de Belén son de origen volcánico, asociadas con la actividad del arco volcánico de Costa Rica durante el Neógeno y con el vulcanismo de la Cordillera Volcánica Central desarrollado durante el Cuaternario. La figura 25 muestra las relaciones estratigráficas entre las distintas unidades geológicas del área, mientras que, el mapa de la figura 26 muestra su distribución en el cantón. A continuación, se describen las unidades geológicas existentes.

3.1.1 Formación Lavas Intracañón

Según Echandi (1981), corresponde con lavas andesíticas, a veces vesiculares en coladas de 10 a 30 metros de espesor intercaladas con tobas y escasas brechas. Estas coladas afloran solamente en profundos valles cortados por el río Virilla y Tiribí. Se caracterizan por ser lavas andesíticas color negro a gris, con textura porfirítica vesicular y muy fracturadas. Localmente presenta intercalaciones de una toba de flujo brechosa, que corresponde con el Miembro Puente Mulas con 35 metros de espesor.

Kussmaul (2000), menciona que estas lavas son probablemente el producto de efusiones a lo largo de fisuras con dirección NE-SW hasta E-W, paralelo al río Virilla, e indica que la composición química de las lavas es diferente a la de los estratovolcanes de la Cordillera Volcánica Central y que se asemeja más a la de la Formación Avalancha Ardiente. Trabajos recientes indican que, es poco probable que estas rocas se originaran cerca del Virilla ya que se han encontrado hacia la cordillera (Ruiz et al, 2010). Según Arredondo & Soto (2006), esas fisuras eran paralelas al frente de la cordillera, más hacia el frente de la cordillera que del río Virilla, formando parte de la Paleo Cordillera Central.

Denyer & Arias (1991) datan esta formación hacia el Pleistoceno basal, siendo sobreyacida concordantemente por los depósitos de la Formación Avalancha Ardiente.

SENARA (2020) menciona que, esta formación ha sido ampliamente estudiada mediante perforaciones debido a su potencial para el aprovechamiento del agua subterránea. En ese sentido, Echandi (1981) la subdividió en tres miembros: el inferior es el Miembro Belén, el cual está compuesto por lavas andesíticas y andesíticas–basálticas, así como tobas, el Miembro Ignimbritas de Puente de Mulas es el intermedio y se trata de una ignimbrita de color gris oscura, con un núcleo denso en la parte central y hacia la base y el techo cambia a una toba. Finalmente, el miembro superior es el Miembro Linda Vista, el cual incluye lavas y brechas lávicas.

Hidrogeológicamente esta formación se clasifica como Formación Hidrogeológica Colima (Ramírez & Alfaro, (2002)), la cual se subdivide en dos miembros: Colima Inferior (Miembro Belén) y Colima Superior (Miembro Linda Vista).

La Formación Colima hospeda los acuíferos más importantes del Valle Central, Colima Inferior y Colima Superior (SENARA–BGS, 1985), los cuales junto con el acuífero de la Formación Barva, abastecen gran parte de la población.

3.1.2 Depósitos de Avalancha Ardiente

Kussmaul (2000) menciona que, aparentemente se trata de un solo flujo piroclástico que, de acuerdo al lugar y la posición vertical, presenta diferentes facies con diferentes grados de soldamiento. Hacia la base yace una capa de pómez con un espesor máximo de 3 metros, seguido por depósitos de flujos piroclásticos con un espesor promedio de 45 metros. La parte inferior de los flujos piroclásticos está muchas veces soldada, con grandes fiames de vidrio negro dentro de una matriz cinerítica de color gris claro. La facies de mayor extensión y espesor es el depósito de un flujo de escorias y cenizas, compuesto por grandes bombas negras escoriáceas con diámetros de hasta 1,8 m, pequeñas escorias de color café y pocos

fragmentos líticos en una matriz de ceniza gris poco consolidada. En la parte superior generalmente se encuentra una capa de ceniza gris pardusco que localmente es muy soldada.

Denyer & Arias (1991) mencionan que, su depositación, en forma discordante sobre las Lavas Intracañón, se inició después de un breve período (0,3 m.a) que permitió la formación de suelo en las lavas.

Fernández (1968) le llama Formación Tiribí y describe la sección tipo cerca de la desembocadura del Río Tiribí antes de la confluencia con el Río Virilla en la zona de La Electriona. Según Echandi (1981), esta formación funciona como un acuitardo debido a que tiene un potencial acuífero mucho menor comparado con el potencial de la Formación Lavas Intracañón. Echandi (1981), subdividió esta formación en tres miembros, Nuestro Amo, Electriona y La Caja.

3.1.3 Formación Barva

Corresponde con varias coladas de lava y depósitos piroclásticos que se originaron en la Cordillera Volcánica Central y que sobreyacen a la Formación Depósitos de Avalancha Ardiente (Denyer & Arias, 1991). Está compuesta por coladas de lavas andesíticas y andesíticas-basálticas con espesores que van desde 10 m hasta 80 m con intercalaciones de aproximadamente 10 m de ceniza y ocasionalmente lapilli (Echandi, 1981). Esta formación ha tenido gran importancia hidrogeológica por la presencia de abundantes manantiales al norte y oeste del Valle Central (SENARA-BGS, 1985).

Protti (1986) considera que, la Formación Barva comprende todos los tipos litológicos que constituyen el Estratovolcán Barva, por lo que, propone la siguiente denominación informal:

- Miembro Bermúdez: constituido por una serie de coladas de lava andesítica a basáltica.
- Miembro Carbonal: formado por tobas líticas y tobas poco consolidadas.

- Miembro los Bambinos: compuesto por una serie de coladas de lava andesítica de poca extensión.
- Miembro Porrosatí: constituido por un depósito de piroclastos de granulometría gruesa (arena media a gruesa).
- Miembro Los Ángeles: formado por una colada de lava andesítico-basáltica.
- Miembro Cráter: el cual corresponde con una unidad de cenizas y piroclastos gruesos de poco espesor.

El frente sur de las lavas andesítico basálticas del Miembro Bermúdez se ubica en el cauce del Río Bermúdez al este de la ciudad de Heredia, mientras que el Miembro Carbonal está constituido por tobas líticas y cenizas poco consolidadas y meteorizadas que cubren una gran extensión (Protti, 1981).

Arredondo & Soto (2006) indican que, las lavas del Miembro Bermúdez representan varios campos de coladas de lavas con un rango amplio de edades (270-40?ka), el Miembro Carbonal, en la parte superior del volcán ,puede tener edades en un rango de 40-27,4 ka, las lavas del Miembro Los Bambinos las dividen en dos sub-miembros (Inferior y Superior), un lahar intercalado entre ambos sub-miembros muestra una edad de 27,4 ka, el miembro podría tener en total un rango de 10-30 ka y a los piroclastos del Miembro Porrosatí le asignan una edad <15 ka, con base en la edad de tefras que sobreyacen a las lavas de Los Bambinos.

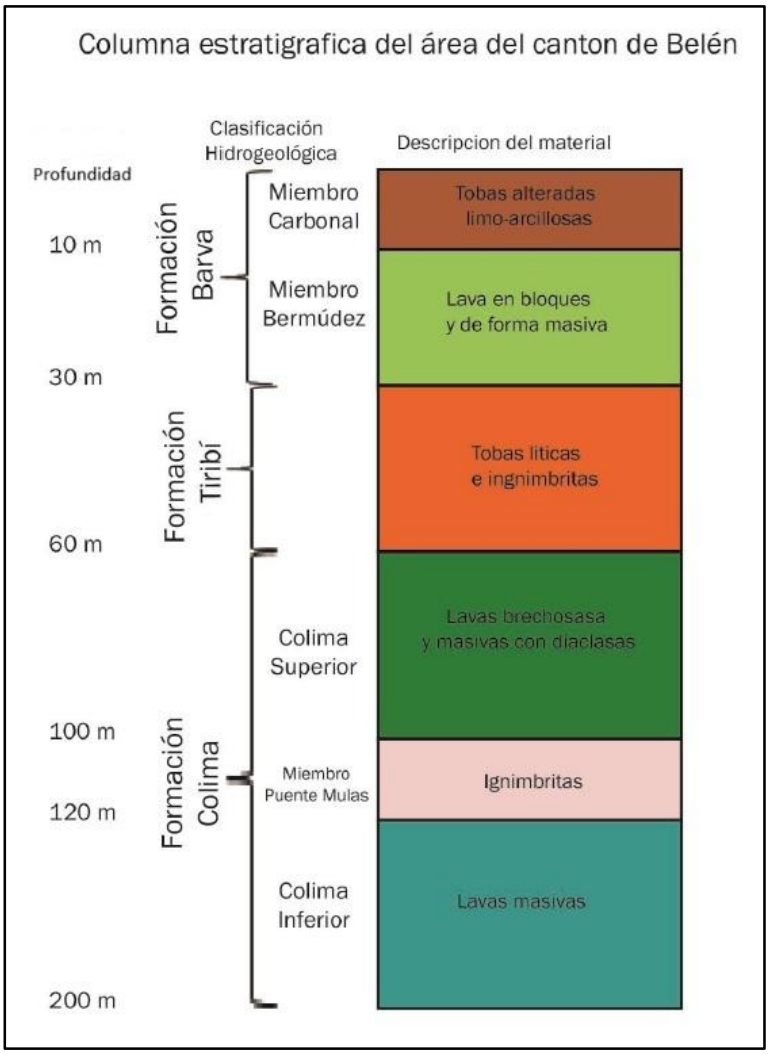


Figura 25. Columna estratigráfica regional para el cantón Belén. Tomada de SENARA (2016).

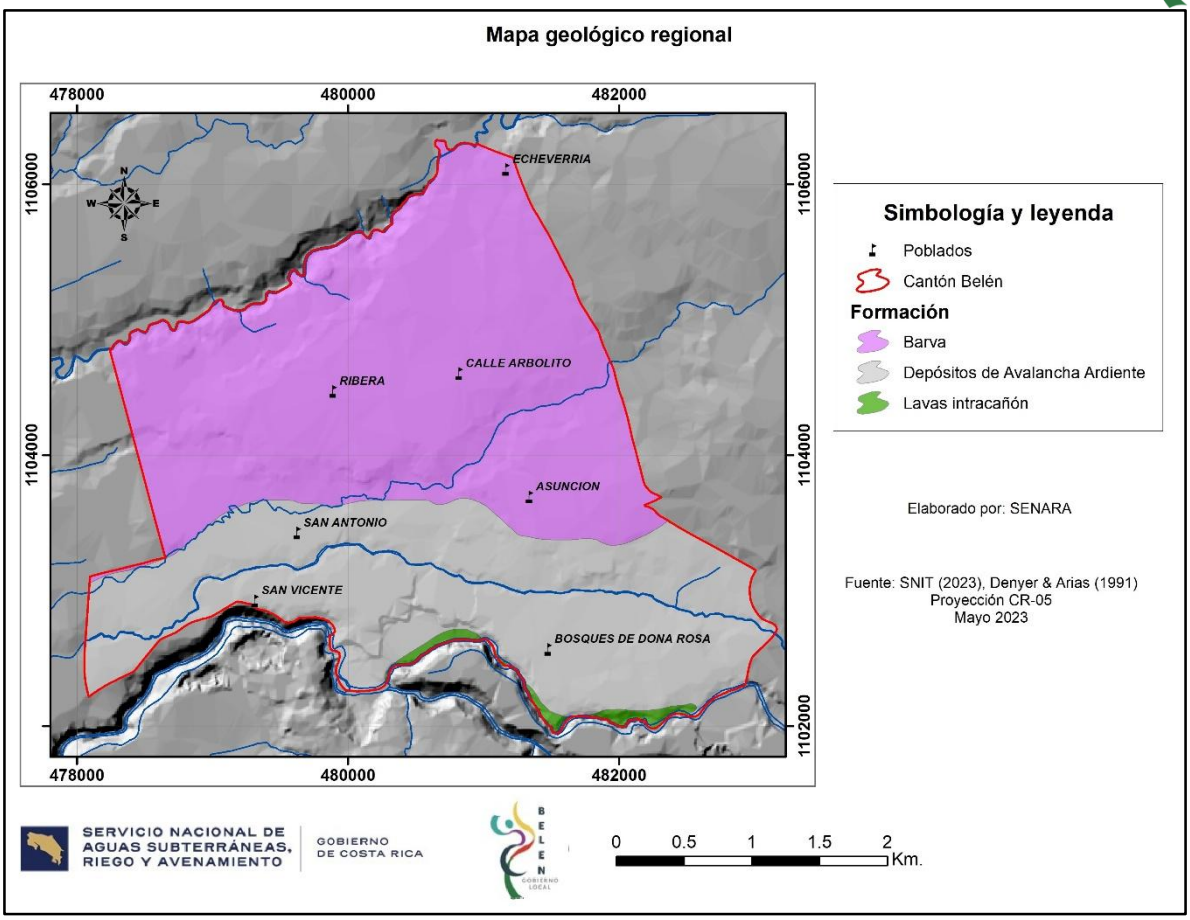


Figura 26. Mapa geológico regional del cantón de Belén. Tomado de Denyer & Arias (1991).

Importante mencionar que, para el cantón de Belén SENARA (2016), se realizó una actualización del mapa regional de la zona, logrando cartografiar con más detalle los límites entre las distintas formaciones geológicas e incluso diferenciar entre los distintos miembros asociados a la Formación Barva. El mapa de la figura 27 muestra el cartografiado de la zona realizado por SENARA (2016).

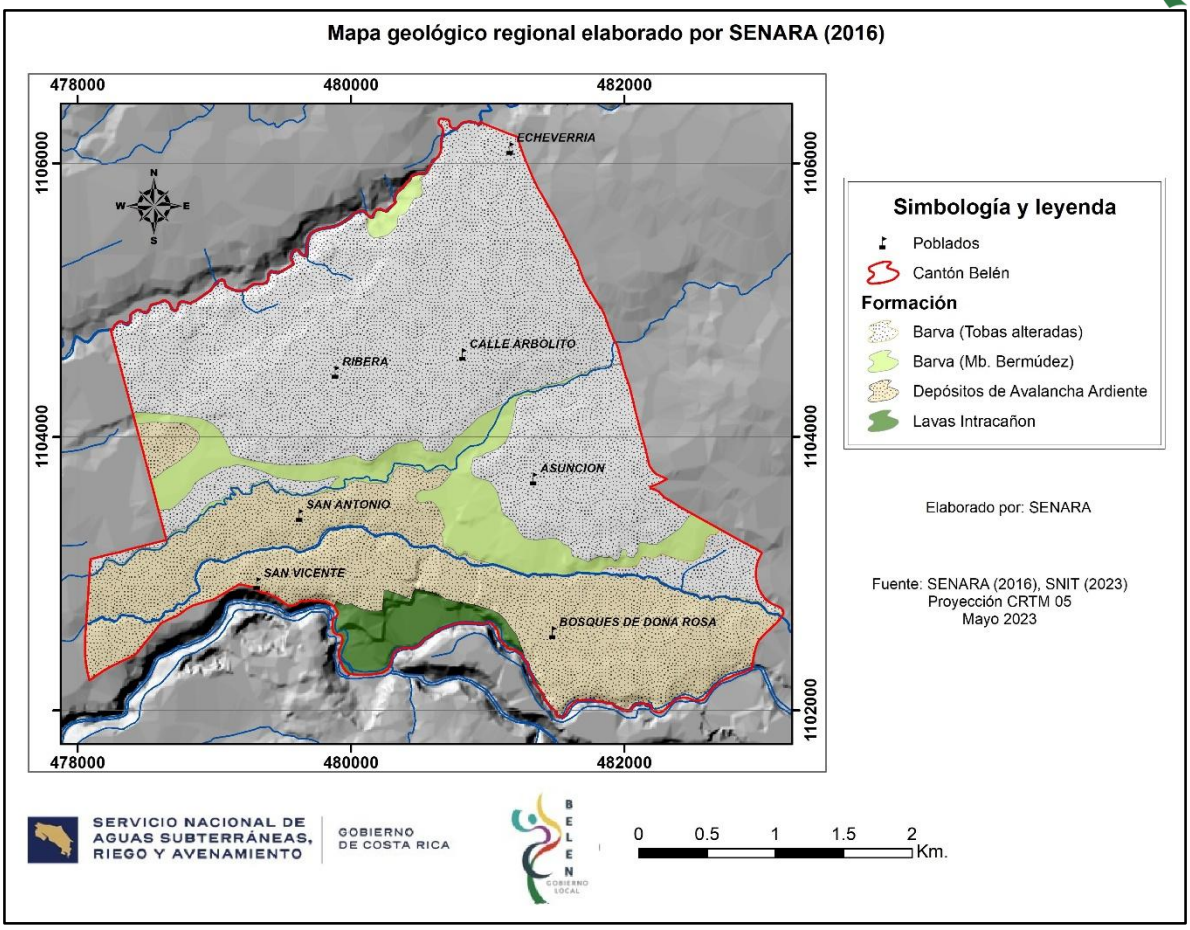


Figura 27. Mapa geológico del cantón de Belén. Tomado de SENARA (2016).

Finalmente, como parte de los trabajos realizados por Astorga *et al.* (2022) para la zonificación de fragilidad ambiental del cantón, se elaboró un mapa geológico bastante detallado que, también subdivide los miembros Carbonal y Bermúdez de la Formación Barva, pero, además extiende la presencia de la Formación Avalancha Ardiente en el sector nor-oeste del cantón y delimita con mayor detalle algunos depósitos fluviales asociados con cauces de ríos y quebradas. La figura 28 muestra el mapa elaborado por Astorga *et al.* (2022).

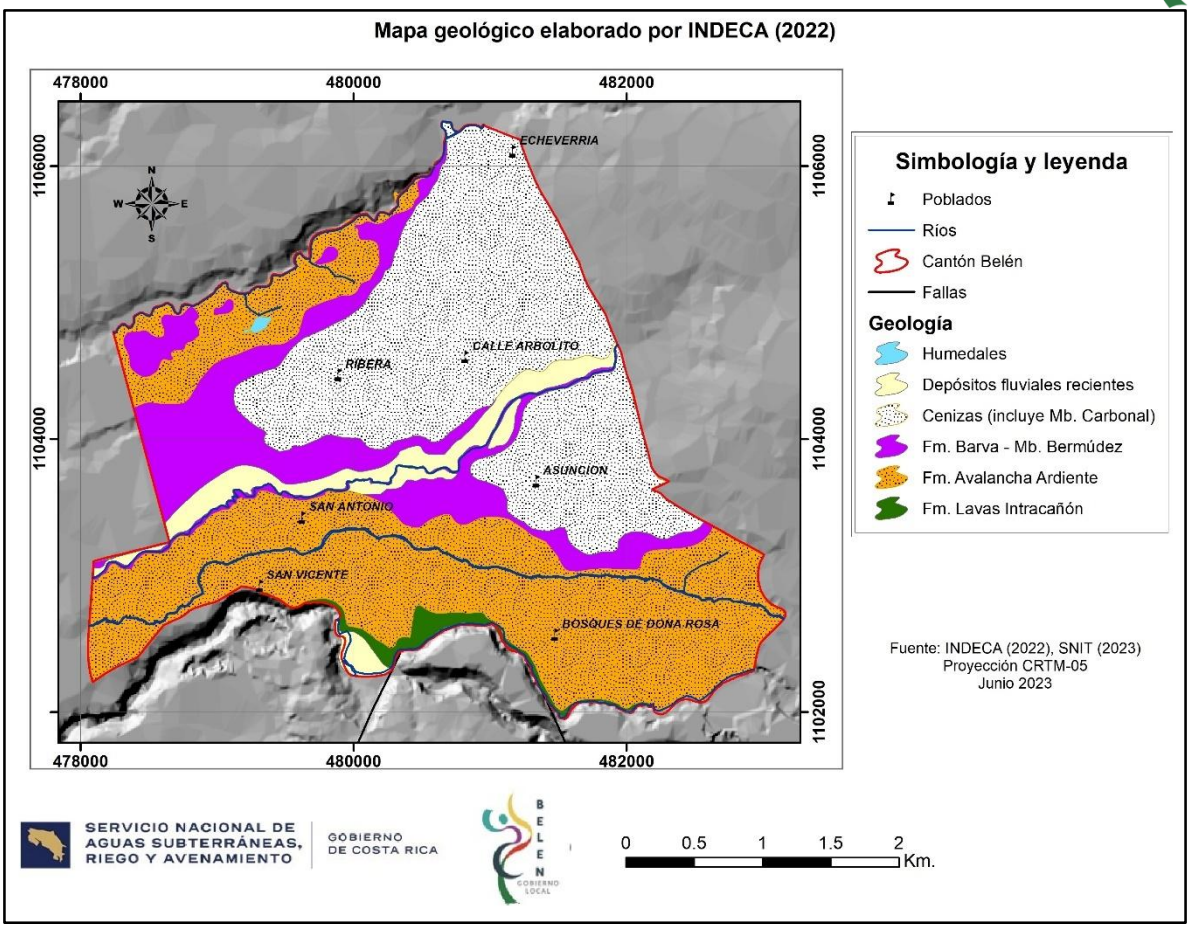


Figura 28. Mapa geológico del cantón de Belén. Tomado de Astorga *et al.* (2022).

3.2 Geología Local

Para la caracterización y actualización de la geología local en el Cantón de Belén, se ha tomado como base el mapa geológico elaborado por SENARA (2016). Este se actualizó y detalló al incorporar la información más reciente de los registros de pozos de producción de las bases de datos institucionales, la revisión de las perforaciones exploratorias existentes, un nuevo mapeo geológico con el levantamiento de afloramientos de roca y la caracterización de los suelos desarrollados.

A partir de la integración de la información se procedió a actualizar el modelo geológico para el cantón. En los siguientes apartados se describe la

información existente para la actualización y detalle de la geología local del área de estudio.

3.2.1 Registros litológicos de pozos

A julio del 2023 se tiene registro en la base de datos del SENARA de un total de 186 pozos localizados en el Cantón de Belén. Los usos reportados para estos pozos son variados e incluyen el abastecimiento público, la industria, usos domésticos, el riego, la actividad turística y en pocos casos la investigación.

Ahora bien, de todos los pozos registrados, solamente 106 cuentan con descripciones litológicas sobre los materiales perforados, cuya revisión ha sido fundamental para la actualización del modelo geológico en el cantón.

La distribución de los pozos registrados en el cantón se muestra en la figura 29 y en el anexo 1 se incluye la base de datos con el resumen de toda la información existente en los reportes de perforación consultados.

3.2.2 Perforaciones exploratorias

3.2.2.1 Perforaciones exploratorias municipales

En el cantón de Belén, como parte de la investigación realizada por la Municipalidad y SENARA (2016) para la elaboración del mapa de vulnerabilidad de los acuíferos, se cuenta con la información de 20 perforaciones exploratorias con profundidades entre los 12 y 26 metros. En el anexo 1 se puede consultar el resumen de la información litológica obtenida en estas perforaciones y en la figura 29 su distribución en el cantón. Debido a su profundidad, en ellas se describen principalmente materiales someros asociados con los miembros Carbonal y Bermúdez de la Formación Barva y con ignimbritas de la Formación Avalancha Ardiente, pero resulta interesante que, en algunas se registra muy bien la secuencia estratigráfica entre estas tres litologías.

Todas estas perforaciones fueron armadas como piezómetros y como parte de esta investigación, se retomó a partir del mes de abril del 2023 el monitoreo de niveles de agua subterránea.

3.2.2.2 Perforaciones exploratorias de proyectos

Por otra parte, en la base de datos de expedientes de proyectos que han sido presentados ante el SENARA por parte de desarrolladores particulares, se cuenta con valiosa información de perforaciones exploratorias que han sido realizadas a nivel local para valorar las condiciones de sitio en cada proyecto. En total se cuenta con la información de 36 perforaciones exploratorias, cuya ubicación en el cantón se muestra en la figura 29. El resumen de la información obtenida en cada perforación exploratoria se incorpora como parte del anexo 1 de este estudio.

Como muchas de estas perforaciones fueron realizadas con fines de evaluar temas de vulnerabilidad, la gran mayoría cuenta con profundidades entre 10 a 26 metros y describen materiales asociados con las tobas del Miembro Carbonal y lavas del miembro Bermúdez de la Formación Barva, así como tobas e ignimbritas de la Formación Avalancha Ardiente. Sin embargo, hacia el extremo sur del cantón, en la zona del Tajo Pedregal, se localizan piezómetros exploratorios con profundidades de hasta 100 metros que atraviesan los distintos miembros de la Formación Lavas Intracañón. La información de estos piezómetros profundos resulta valiosísima para la caracterización de los miembros de esta formación y la actualización del modelo geológico de la zona.

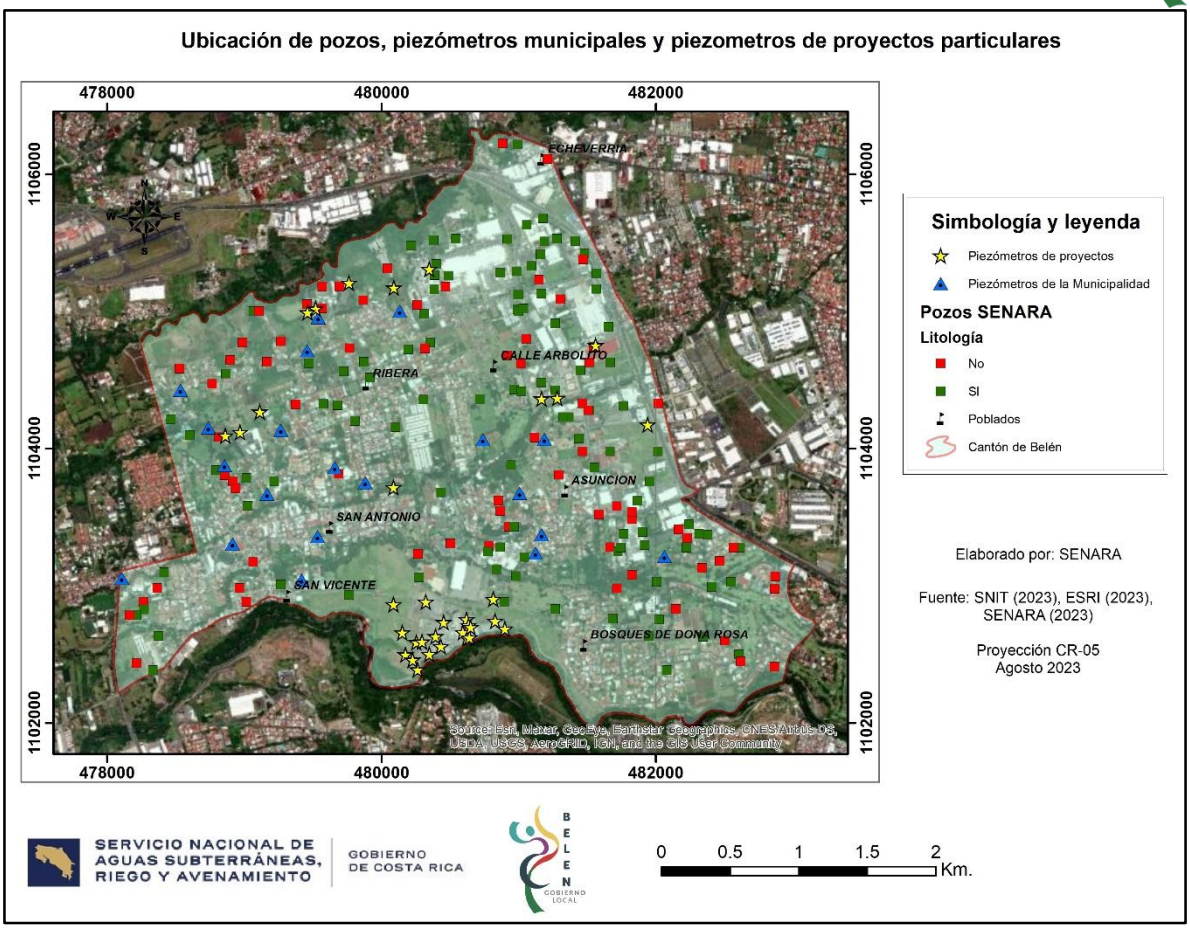


Figura 29. Ubicación de pozos registrados en la base de datos del SENARA, piezómetros exploratorios de la Municipalidad y perforaciones exploratorias de proyectos.

3.2.3 Cartografiado geológico y mapa de afloramientos

Como parte de la actualización del modelo geológico e hidrogeológico en el área de estudio, se llevó a cabo la verificación en campo de las distintas formaciones de roca que afloran a nivel de superficie en el cantón. Lo anterior, con el fin de detallar la ubicación de algunos contactos de roca y la distribución espacial de estas. Para el Cantón de Belén, se cuenta con un total de 104 afloramientos donde se han descrito los materiales. De estos, 53 afloramientos fueron descritos en el trabajo realizado por SENARA (2016) y 51 se realizaron como parte de esta investigación. El detalle de la descripción de cada afloramiento está en el anexo 1 (documento excel) y en la figura 30 se muestra la ubicación de cada sitio identificado.

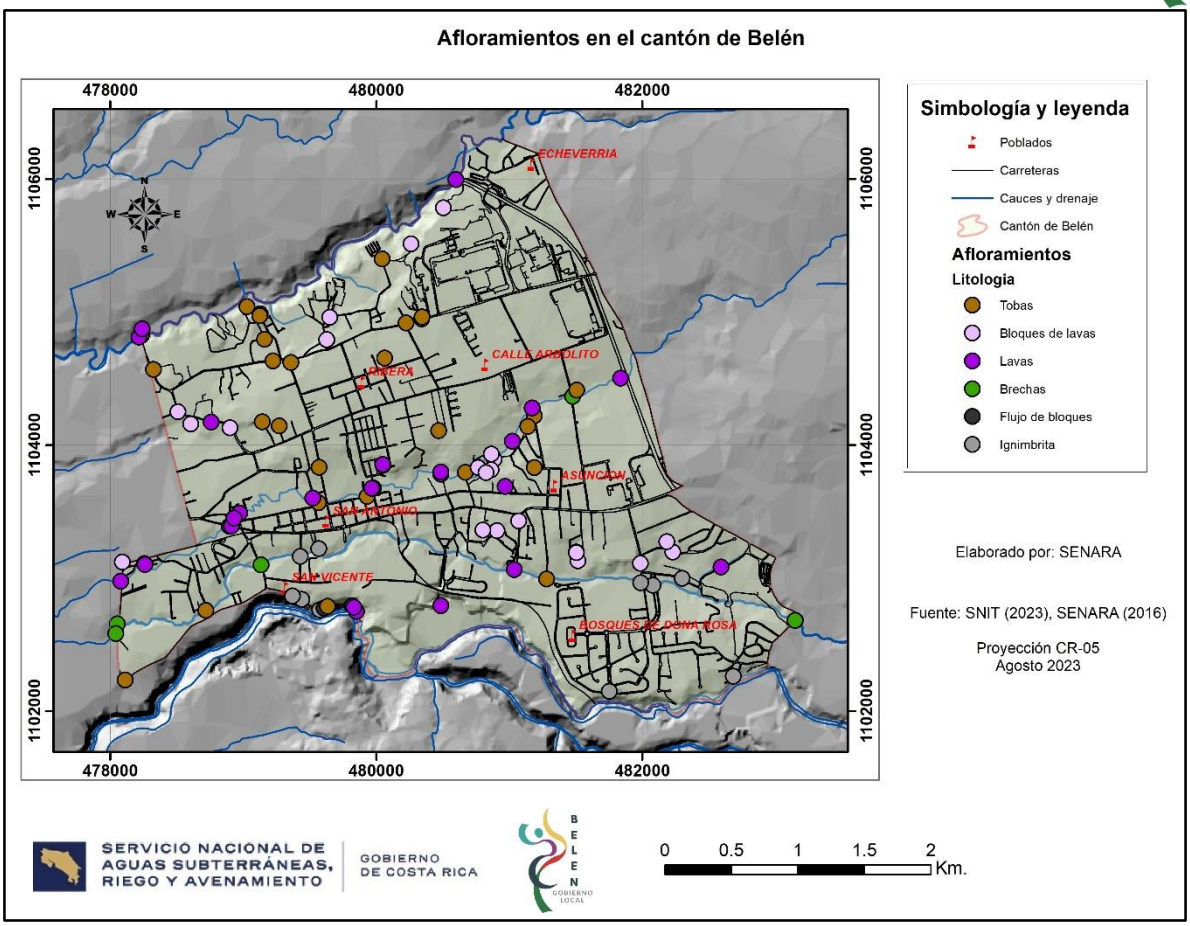


Figura 30. Mapa de afloramientos del área de estudio.

A continuación, se describe las unidades de roca cartografiadas a partir de los afloramientos en el campo, las perforaciones exploratorias y los registros litológicos de pozos.

3.2.3.1 Unidad de lavas, brechas volcánicas, tobas e ignimbritas Colima (Formación Lavas Intracañón)

Los afloramientos en superficie de esta unidad se encuentran muy localizados al sector sur del cantón en la zona del cañón del Río Virilla y Tajo Pedregal. Lo anterior, ya que se encuentra cubierta por los depósitos asociados a la Formación Depósitos de Avalancha Ardiente (Figuras 30 y 35).

En general corresponde con dos eventos o paquetes de lavas (Miembro Belén también conocido como Colima Inferior y Miembro Linda Vista o Colima

Superior) separadas entre sí por la presencia de un potente espesor de ignimbritas (Miembro Puente Mulas).

El paquete superior de lavas se describe predominantemente como andesitas duras, de textura afanítica porfirítica con fenocristales de plagioclasa y piroxenos milimétricos. Las perforaciones describen la presencia de brechas y escorias tanto hacia el techo como a la base de este paquete, con presencia de un núcleo masivo, fracturado, con vacuolas y planos de oxidación. Las tonalidades de las lavas son principalmente grises, aunque en ocasiones se describen tonos morados y cierto bandeamiento negruzco. En las brechas también se reportan colores rojizos y morados. En superficie meteorizada puede presentar un color pardo y tonos de gris oscuro a morado, con diaclasas de aberturas milimétricas y centimétricas sin rellenos.

Perforaciones exploratorias hacia el sector del Tajo Pedregal reportan espesores para este nivel superior entre los 39 y 76 metros, sin embargo, hacia el extremo norte del cantón su espesor parece incrementarse, siendo así que el pozo BA-643 indica un espesor de 127,5 metros o los pozos AB-2096 de 90 metros y el AB-454 de 91 metros.

La ignimbrita intermedia (Puente Mulas) se describe en las perforaciones principalmente como gris oscura a negra, densa, soldada y dura, rica en contenido de obsidiana o vidrio volcánico, con presencia de líticos, pómez y en ocasiones fracturada. En menor grado se ha descrito como una toba lítica fina o con presencia de lapilli, de color café y con desarrollo de paleosuelo arcilloso en la parte superior. Su espesor es variable, pero en la zona del Tajo Pedregal oscila entre 15 y 42 metros. El espesor mayor registrado es de 45 metros en el pozo AB-1603.

Las lavas inferiores se describen como andesíticas, de color negro, gris, rojizo o café, densas y fracturadas, aunque también con reportes de brechas muy porosos o vacuolares (vacuolas de hasta 3 cm.). En las fracturas es común el reporte de pátinas de manganeso y óxidos de hierro. Dentro de este paquete de lavas se reportan intervalos de roca meteorizada, paleosuelos arcillosos, presencia de tobas gruesas o finas con distintos grados de meteorización e ignimbritas de menor espesor. Solamente el pozo

AB-738 perforó completamente las lavas inferiores del Miembro Belén, reportando un espesor total de 136 metros hasta alcanzar el basamento sedimentario.

Cabe mencionar que, a nivel del cauce del Río Virilla los afloramientos de lavas suelen presentarse en forma masiva, con presencia de algunas diaclasas y con colores predominantemente en tonos de gris (figura 31).

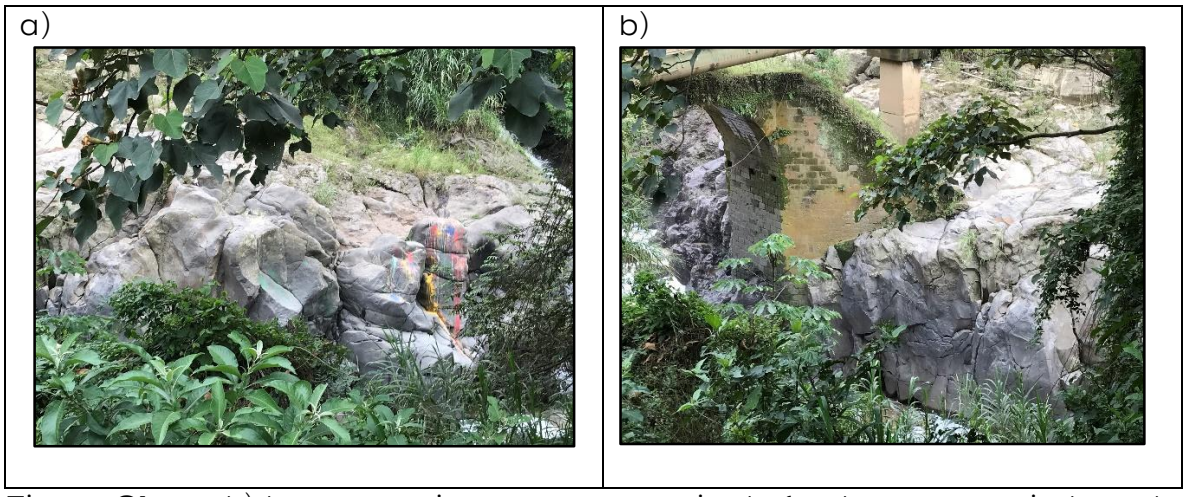


Figura 31. a y b) Lavas masivas con presencia de fracturas y asociadas a la Unidad Colima que afloran en l cauce del Río Virilla en el sector de Puente Mulas.

3.2.3.2 Unidad de tobas e ignimbritas Tiribí (Depósitos de Avalancha Ardiente).

Esta unidad se encuentra principalmente hacia el extremo sur del cantón, con importantes afloramientos a lo largo del Río Bermúdez. Adicionalmente, se ha cartografiado hacia el extremo NW del área de estudio, en donde se ha identificado en varias perforaciones exploratorias y pozos de producción (Figura 35).

Los afloramientos típicos de esta unidad corresponden con ignimbritas y tobas de color gris claro con abundante presencia de pómez y escorias vidriosas de color negro y tamaños centimétricos. En las ignimbritas es común la presencia de fiammes y estructuras de flujo en bandas o incluso vacuolas elongadas alineadas. También se ha registrado la presencia de minerales como plagioclasa, piroxenos y líticos de toba y lava en un

porcentaje inferior al 10%. Meteorizada la roca puede mostrar tonalidades de café e incluso blancuzcas según el grado de alteración.

El nivel de soldamiento y compactación de las ignimbritas y tobas es variado, y por ejemplo, hacia el sector de Puente Mulas se localizan hacia la base de esta unidad varios afloramientos de ignimbritas sumamente duras. En este mismo sector también se logró observar presencia de diaclasas, con aberturas de hasta 5 cm que generan un aspecto columnar en el afloramiento.

Hacia el techo de esta unidad se localizan también depósitos de tobas líticas de color café a café rojizo, meteorizadas con textura arcillosa y presencia de bloques ígneos de tamaños mm a cm. Varios afloramientos a lo largo del Río Bermúdez muestran la presencia de brechas volcaniclásticas color beige a gris, con matriz cenicienta en la que se observa la presencia de minerales de plagioclasa, piroxenos y pómez. Los bloques son de naturaleza ígnea, angulares a subredondeados y su soporte es principalmente flotante. La matriz representa entre un 30 a 70% de del depósito.

En los piezómetros exploratorios se han registrado hasta 20 metros de espesor para esta unidad, mientras que, en los pozos de explotación se observa que su espesor total es más potente. La mayoría reporta espesores entre 20 a 35 metros (por ejemplo, AB-1202, AB-1211, AB-1276, AB-1383, AB-1408 o AB-2158), pero otros registran espesores de hasta 52.5 metros (BA-643) e incluso 61 metros (AB-1497).

La presencia de paleosuelos arcillosos tanto hacia la base como al techo de esta unidad también ha sido reportada en algunos pozos de explotación (AB-1276, AB-2392).

a)



b)



Figura 32. a) Ignimbritas diaclasadas con aspecto columnar (AF-93 / 1102866 N / 479369 E). b) Lecho del río Bermúdez, brechas cafés a grisáceas con clastos líticos angulares de tamaños cm y dm, 30% de matriz (AF-81 / 1103099 N / 479133 E).

3.2.3.3 Unidad de lavas y brechas volcánicas Barva (Miembro Bermúdez de la Formación Barva)

Esta unidad aflora principalmente a lo largo del cauce del Río Burío (Quebrada Seca), sectores del Río Segundo y como bloques de tamaños decimétricos a métricos sobre áreas de la superficie del terreno al centro y norte del cantón, en donde se encuentra cubierta en parte por tobas de la Formación Barva (Figuras 33 y 35).

La composición predominante de las lavas es andesítica con textura afanítica porfitítica con presencia de cristales milimétricos de plagioclasas y piroxenos (hasta 70% de matriz). En los cauces aflora en forma masiva, de color gris claro en superficie sana y gris oscuro en superficie meteorizada, es común la presencia de abundantes vacuolas con tamaños milimétricos a centimétricos y puede presentar algunas texturas de flujo y desarrollo de lajas. Sobre el cuerpo masivo de las lavas se suele ubicar un espesor de entre 0,5 a 2 metros de brechas asociadas muy posiblemente con las autobrechas superiores de las coladas de lava. Es común la presencia de fracturas o diaclasas abiertas milimétricas a centimétricas en las que no se observan rellenos a excepción de arcilla en ciertos casos. Muy meteorizadas se

observan de color café y textura limo arcillosa, conservando aún la textura escoriácea y la presencia de vacuolas milimétricas sin relleno.

Por su ubicación y morfología, muy probablemente los afloramientos blocosos correspondan con frentes de coladas de lava. En estos afloramientos los bloques presentan tamaños decimétricos a métricos, con colores gris oscuro a negro y café rojizo en superficie meteorizada, composición andesítica a andesítica basáltica, texturas afaníticas porfiríticas con fenocristales mm de piroxeno, plagioclasa y cuarzo amorfo. Se observa hasta un 30% de vacuolas milimétricas con cierta orientación fluidal. En general los bloques se encuentran inmersos en una matriz de suelo limo arcilloso café y compacto.

En cuanto al espesor de esta unidad es variable, en los piezómetros exploratorios se han registrado hasta 16 metros, pero en los pozos de producción es posible observan su verdadera potencia, registrando espesores de varias decenas de metros como es el caso de los pozos AB-1211 (34 m), AB-1220 (79 m), AB-1234 (40 m), AB-2208 (46 m) o AB-1450 (58 m).

a)



b)



Figura 33. a) Afloramiento de lavas y brechas en el cauce del río Burío, cobertura de tobas en márgenes (AF-72 / 1104279 N / 481173 E) b) Afloramiento de bloques de lava sobre el terreno (AF-35 / 1103110 N / 481985 E).

3.2.3.4 Unidad de tobas Barva (Miembro Carbonal de la Formación Barva)

Esta unidad de localiza principalmente hacia el sector central y norte de cantón, cubriendo lavas y brechas asociadas al Miembro Bermúdez de la Formación Barva y depósitos ignimbríticos de la Formación Depósitos de Avalancha Ardiente (Figura 35). Sus afloramientos corresponden con tobas poco compactas de ceniza y líticos con colores café a beige, en ocasiones rojizas y naranja, de textura predominantemente limosa y poca arcilla (figura 34). Los fragmentos líticos son angulares y de composición volcánica con diferentes grados de alteración. En general, cuando se presentan líticos estos muestran un soporte por matriz y su contenido es variable, desde menos de un 5% hasta un 40% de bloques. El tamaño de los bloques también es variable, desde 1 a 15 mm aproximadamente. La presencia de pómez en estas tobas es escasa y no se han registrado escorias negras, rojizas o texturas fluidales.

Los registros existentes indican espesores variables, que en el caso de los piezómetros han alcanzado hasta 16 metros, pero en algunos pozos como el AB-2519, AB-1775 y AB-1432 se encuentran alrededor de los 20 metros. Los suelos residuales a partir de esta unidad son predominantemente limos con cierto contenido de arcilla y arena.

a)



b)



Figura 34. a y b) Aspecto general en muchos afloramientos de la Unidad de tobas Barva (Miembro Carbonal). Nótese la tonalidad café a rojizo.

Es importante mencionar que, durante las inspecciones de campo se realizaron observaciones en los cauces de la zona, especialmente en el Río Bermúdez y Río Burío (Quebrada Seca), con el objetivo de valorar la extensión

de los depósitos aluviales recientes asociados a ellos. Se observó que, estos depósitos (bloques, gravas y arenas de naturaleza ígnea, redondeados a subredondeados) se encuentran muy localizados a lo largo de los cauces y su extensión lateral es igualmente reducida, siendo que, en general en las márgenes los materiales que se cartografiaron fueron ignimbritas de la Formación Depósitos de Avalancha Ardiente o lavas, brechas de lavas y tobas asociadas con los materiales de la Formación Barva.

La figura 35 muestra el mapa geológico actualizado para el Cantón de Belén, el cual se ha construido a partir de la integración de los afloramientos levantados en campo, información de piezómetros exploratorios y pozos de explotación, así como criterios geomorfológicos. En este mapa se muestran las líneas de perfiles geológicos que serán descritos más adelante en el apartado de modelo geológico.

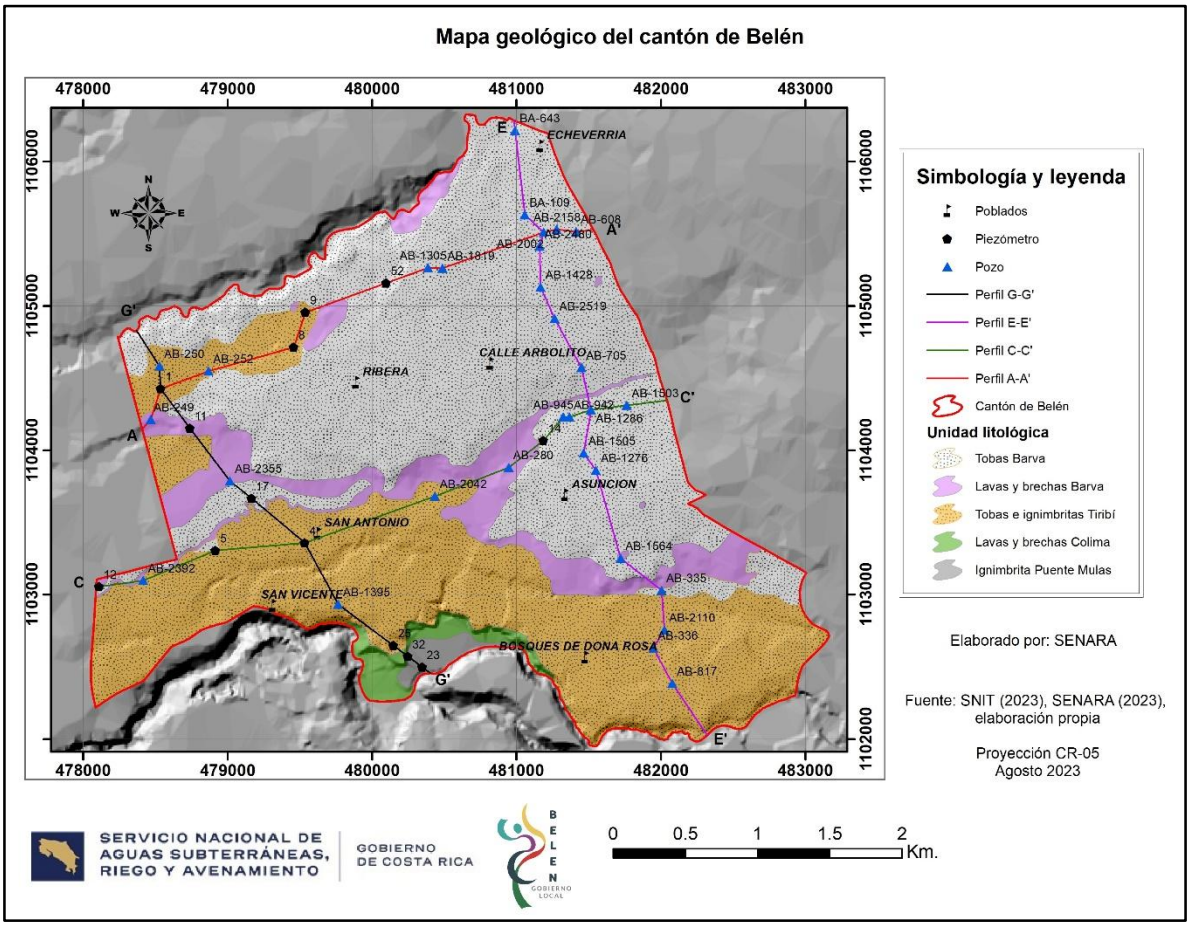


Figura 35. Mapa Geológico actualizado del cantón Belén.

3.2.4 Modelo geológico local y perfiles geológicos

En forma general, se puede considerar que, el basamento local en el Cantón de Belén lo constituyen las rocas ígneas (lavas, brechas, tobas e ignimbritas) asociadas con la Formación Lavas Intracañón. Su miembro inferior Belén, también conocido como Colima Inferior, se encuentra sobreyacido por las ignimbritas del Miembro Puente Mulas, las cuales registran espesores de entre 15 y 42 metros en el sector del Tajo Pedregal. Sobre las ignimbritas de Puente Mulas se ubican brechas y lavas del miembro Linda Vista (Colima Superior) de esta misma formación, que en el extremo sur del cantón presenta espesores de entre 36 a 76 metros pero que, hacia el norte del cantón incrementan su espesor hasta los 127 metros. Las rocas de esta formación únicamente afloran al sur del cantón en la zona del Río Virilla debido a que se encuentran cubiertas por unidades más recientes.

Cabe mencionar que, esta secuencia volcánica asociada con la Formación Lavas Intracañón, sobreyace un basamento más regional conformado por rocas de tipo sedimentario. Sin embargo, a nivel del cantón son muy pocos los pozos que han logrado alcanzarlo y por ello no se describe con detalle en este apartado. Por ejemplo, el pozo AB-738, describe a una profundidad de 218 metros y con un espesor de 28 metros, la presencia de brechas sedimentarias de color café púrpura.

Sobre las rocas del miembro Linda Vista de la Formación Lavas Intracañón se ubican depósitos de ignimbritas y tobas asociados con la Formación Depósitos de Avalancha Ardiente, también conocida como Tiribí. A nivel de la superficie estas rocas afloran principalmente hacia el sur del cantón y al extremo nor-oeste, sin embargo, los pozos de extracción la reportan en profundidad prácticamente en todo el cantón y su espesor predominante es de 20 a 35 metros, aunque se han registrado hasta 60 metros de estos materiales.

Hacia el sector central y norte del cantón, se registra la presencia de rocas asociadas con la Formación Barva. Las lavas del Miembro Bermúdez, de esta formación, sobreyacen a las ignimbritas de la Formación Avalancha Ardiente, cuentan con espesores de entre 34 a 79 metros (AB-1211 y AB-

1220) y sus frentes de coladas suelen generar relieves abruptos y blocosos en el terreno. Coronando la secuencia estratigráfica se localizan depósitos de cenizas y tobas líticas asociadas al Miembro Carbonal de la Formación Barva. Estos depósitos se encuentran cubriendo directamente las lavas del Miembro Bermúdez o también sobreyacer ignimbritas o tobas de las Formación Depósitos de Avalancha Ardiente. Su espesor es variable, pero en pozos como el AB-2519 o AB-1432 se encuentra alrededor de los 20 metros.

Cabe mencionar que, principalmente sobre los materiales asociados al Miembro Carbonal de la Formación Barva y Formación Depósitos de Avalancha Ardiente, se han desarrollado suelos predominantemente limosos, con ciertos contenidos de arcilla y arena, a partir de la meteorización de las tobas e ignimbritas. Depósitos aluviales se han identificado en forma muy localizada a lo largo de los principales cauces del área.

A continuación, se presenta una serie de perfiles geológicos que han sido ubicados en distintas zonas del área de estudio, con el objetivo de mostrar en profundidad el modelo geológico descrito según la distribución estratigráfica de las formaciones rocosas mencionadas (Figuras 36 y 37). Su ubicación se muestra en la figura 35.

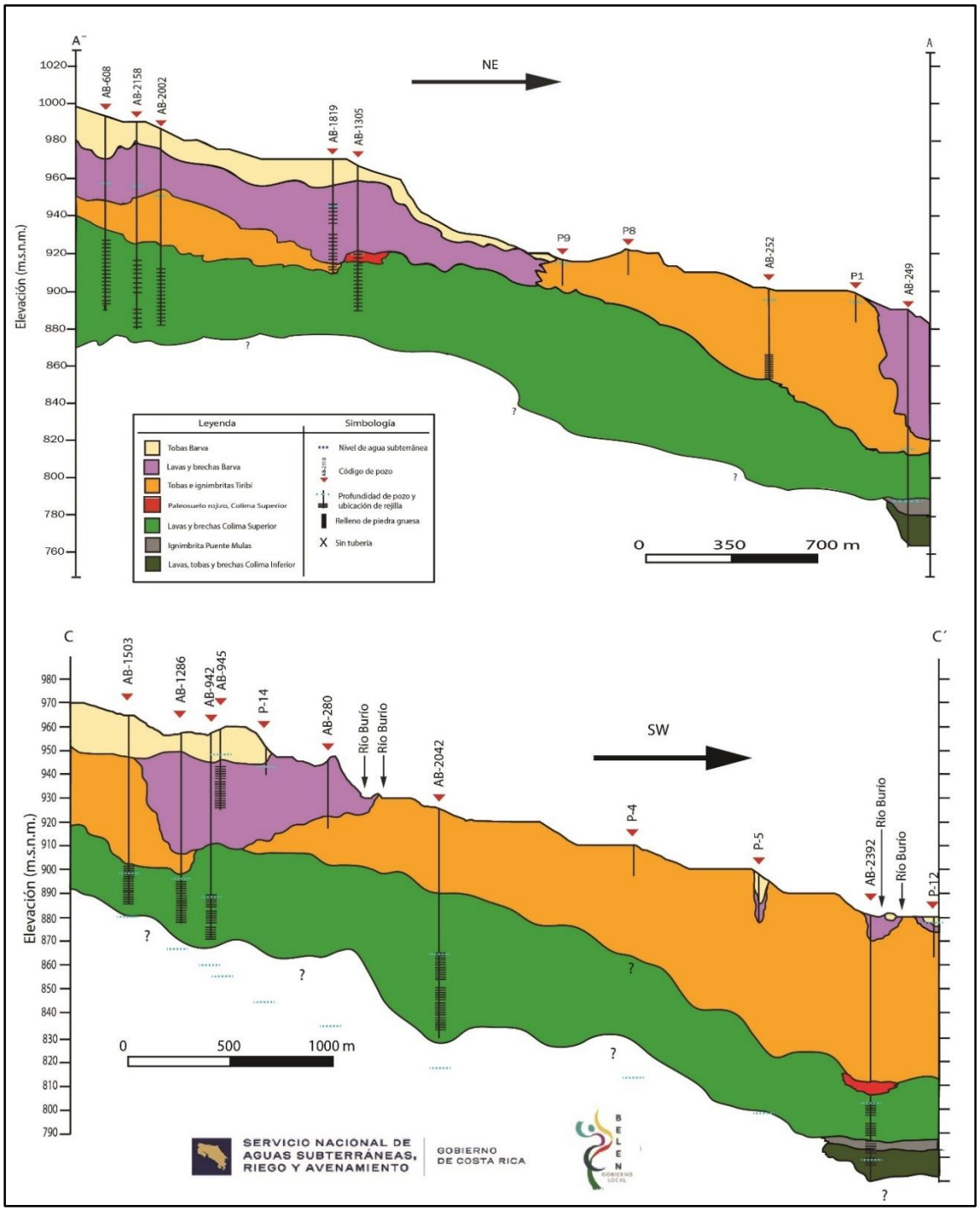


Figura 36. Perfiles geológicos A–A' y C–C'. Se observa la estratigrafía general del cantón, con el basamento de la Unidad de lavas y brechas Colima Superior, siendo sobreyacido por la Unidad de Tobas e ignimbritas Tiribí. Coronando la secuencia se ubican lavas y tobas asociadas con la Formación Barva. Nótese que la presencia de la Unidad Tiribí no es continua, como sucede en los pozos AB–942 y AB–1305, donde las lavas de Barva yacen directamente sobre lavas de Colima Superior.

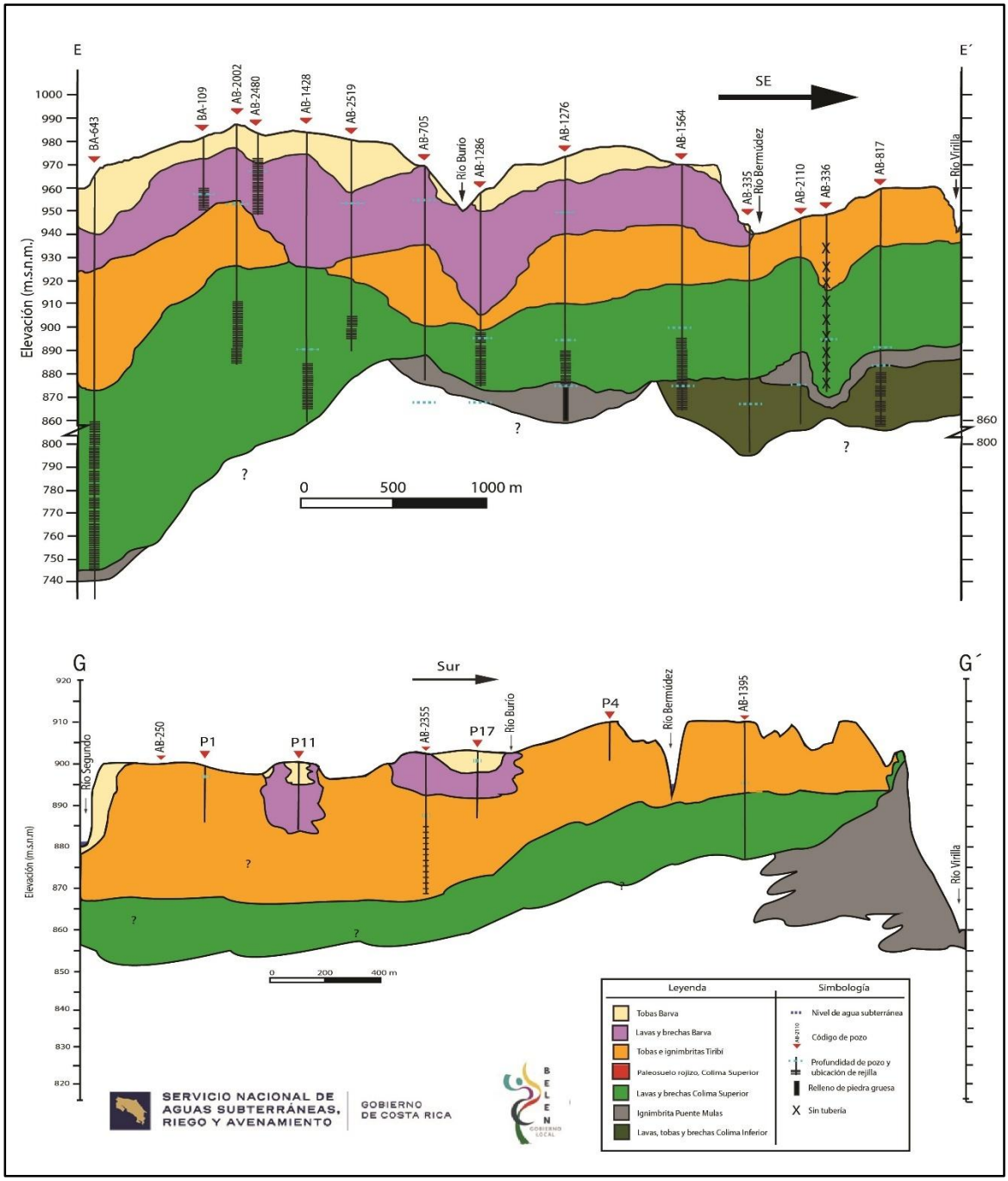


Figura 37. Perfiles Geológicos E–E' y G–G'. Se observa la estratigrafía geológica general del cantón, con el basamento de la Unidad Colima siendo sobreyacido por la Unidad de Tobas e ignimbritas Tiribí, y sobre esta, lavas y tobas de Barva. Nótese al extremo SE del perfil E–E' la presencia de Colima Inferior en el pozo AB–817.

4. HIDROGEOLOGÍA

A partir de la información registrada en las bases de datos institucionales e información de campo, se describen las principales características hidrogeológicas de las rocas presentes en el Cantón de Belén. Posteriormente, se integran todos los resultados de las pruebas y los análisis realizados junto con la información regional y las bases de datos, se construye el modelo hidrogeológico conceptual de la zona de estudio y se describe el potencial hídrico de cada unidad hidrogeológica.

4.1 Inventario de pozos, manantiales y concesiones

4.1.1 Bases de datos institucionales

4.1.1.1 Bases de datos del SENARA y SINIGIRH

- *Registros litológicos de pozos*

En la base de datos del SENARA se tiene un registro de 186 pozos dentro del perímetro del cantón de Belén (figura 38), de los cuales 166 corresponden con pozos de producción. Se registran 20 piezómetros de investigación a nombre de la Municipalidad de Belén, los cuales fueron perforados y armados en el año 2015 como parte de la investigación hidrogeológica para la elaboración del Estudio Hidrogeológico y de Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC para el cantón de Belén.

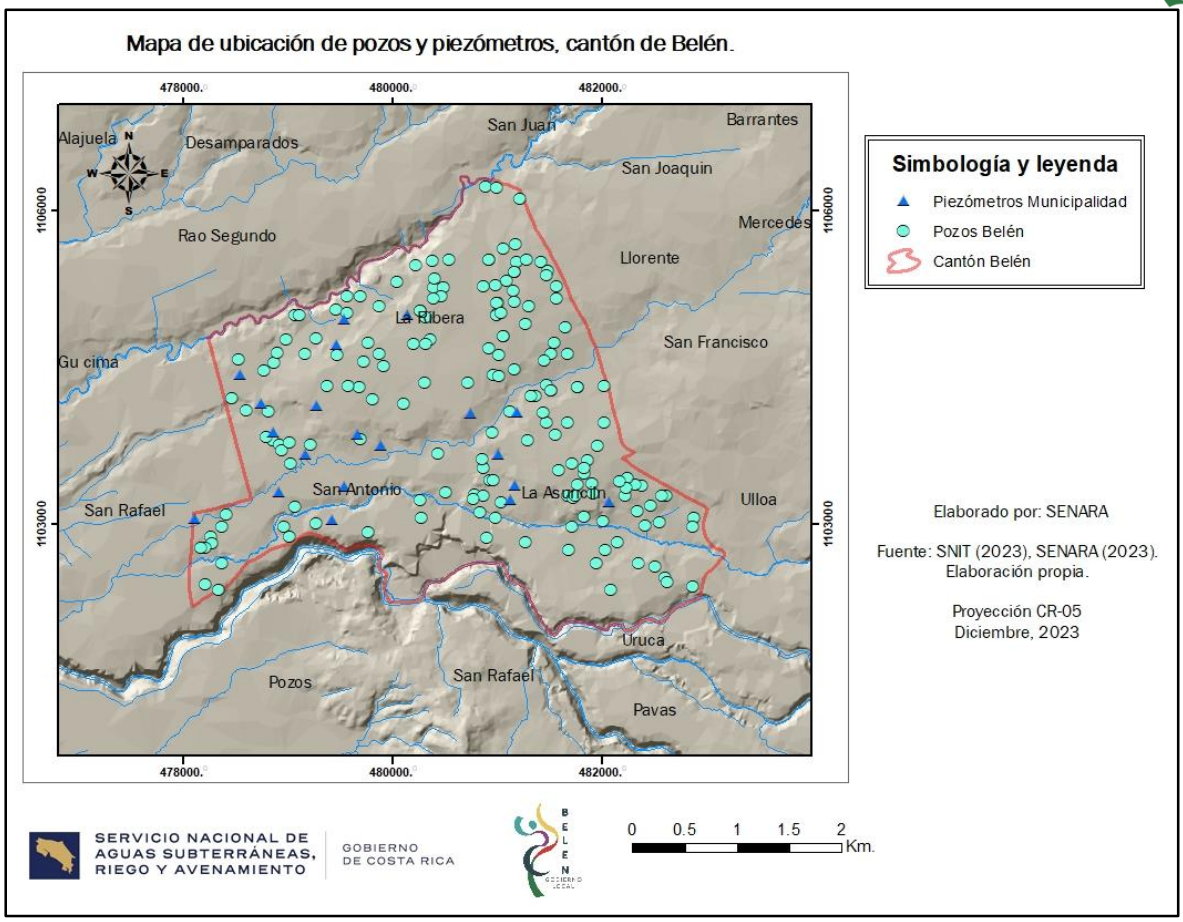


Figura 38. Mapa de ubicación de pozos y piezómetros en el cantón de Belén. SENARA (2023)

A partir de la tabla 14 se muestra que, 106 pozos de producción cuentan con litología, 86 de estos están armados y 96 presentan nivel del agua subterránea. Mientras que, 60 pozos de producción no registran litología, aunque 12 de estos están armados.

Tabla 14. Detalle de los pozos de producción, base de datos del SENARA.

Pozos de producción: 166			
Características	Cantidad	Características	Cantidad
Pozos con litología	106	Pozos sin litología	60
Pozos armados	86	Pozos armados	12
Pozos con nivel estático	96	Pozos con nivel estático	16

Fuente: SENARA (2023)

Los 20 pozos de investigación a nombre de la Municipalidad de Belén fueron armados, presentan litología, no obstante, solo 9 de ellos presentan nivel de agua subterránea (Tabla 15).

Tabla 15. Detalle de los pozos de investigación, Municipalidad de Belén.

Pozos de investigación: 20	
Características	Cantidad
Pozos con litología	20
Pozos armados	20
Pozos con nivel estático	9

Fuente: SENARA (2016)

- *Usos de los pozos de producción: bases de datos SENARA y SINIGIRH*
- **Base de datos SENARA**

Los principales usos registrados en la base de datos de SENARA se muestran en la tabla 16, abarcan desde abastecimiento público con un caudal de extracción de 232,75 l/s, doméstico e industrial, constituyendo estos tres usos los de mayor extracción en el cantón.

Tabla 16. Usos registrados para pozos en la Base de datos de SENARA.

Tipo de uso	Cantidad	Caudal extraído (l/s)	Observaciones
Abastecimiento público	18	232,75	AB-908 a nombre del AyA no indica caudal.
Doméstico	72	169,82	
Doméstico – Riego	2	2,5	
Comercial	1	5	
Industrial	38	166,39	11 pozos sin información de caudal.
Agroindustrial	2	1,6	1 pozo sin información de caudal.
Turístico	7	11	4 pozos sin información de caudal.
Riego	10	17,66	5 pozos sin información de caudal.
Varios	6	3,07	4 pozos sin información de caudal.
Investigación Municipalidad	20	0	
Investigación Privados	3	0	
Otros usos	6	1,89	5 pozo sin información de caudal.
No indica	1	No indica	1 pozo sin información de caudal.
Total	**186**	**611,68**	

Fuente: SENARA (2023)

- **Base de datos SINIGIRH**

De acuerdo con la plataforma del SINIGIRH (Anexo 1), se contabilizan 195 expedientes de concesiones de aprovechamiento de agua para distintos usos, para un total concesionado de 2482,32 l/s (Tabla 17), de los cuales 1878,16 l/s corresponde con recurso subterráneo y 604,16 l/s al recurso superficial.

Tabla 17. Caudales de concesiones según tipo de fuente, base de datos SINIGIRH.

Tipo de fuente	Cantidad de concesiones	Caudal extraído (l/s)
Acuíferos (Pozos)	147	1444,13
Nacimiento	30	434,03
Quebrada	10	4,16
Río	7	600
Ojo de Agua	1	0
Totales	**195**	**2482,32**

Fuente: SINIGIRH (2023)

En la figura 39 se muestra la ubicación de las concesiones y manantiales, se aclara que, las concesiones mostradas corresponden a los tipos de fuentes descritas en la tabla 17, mientras que, los manantiales son aquellos cuerpos de agua para los cuales la Dirección de Agua ha emitido un criterio, no obstante, no están concesionados.

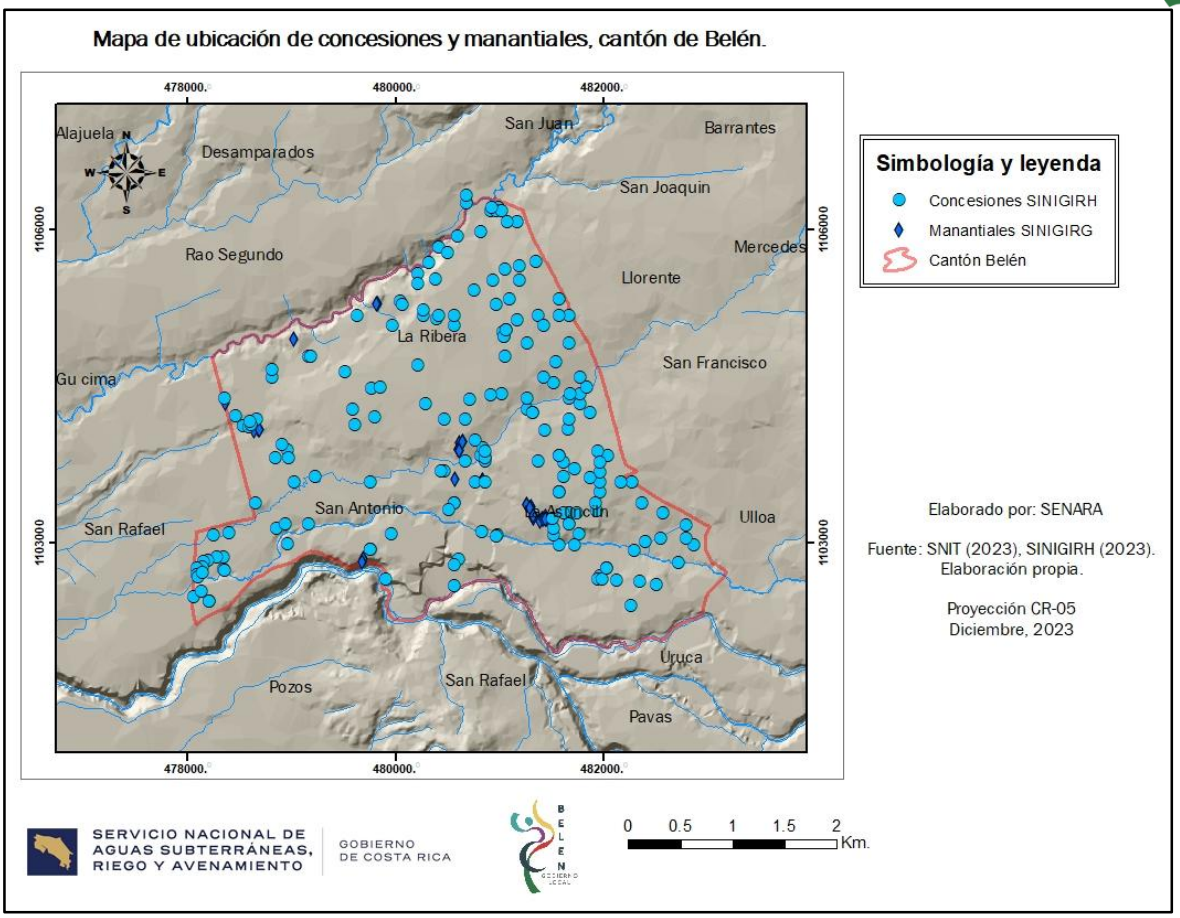
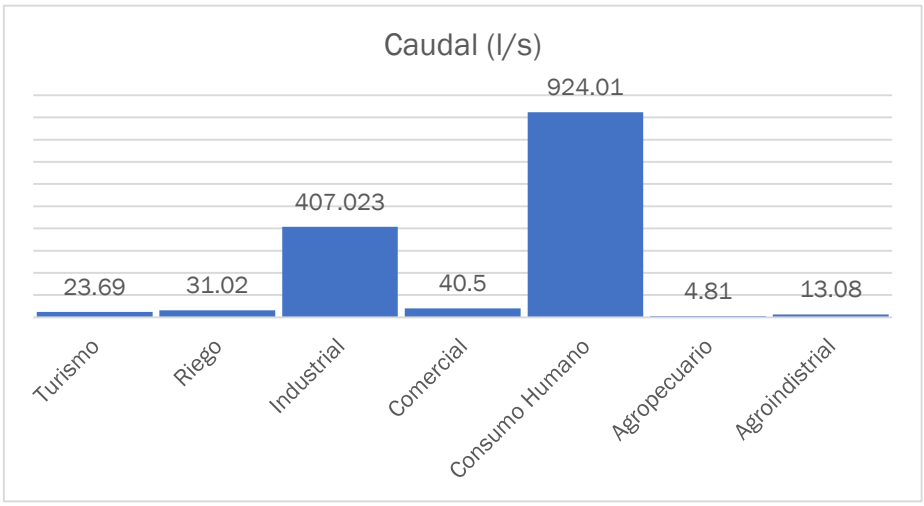


Figura 39. Ubicación de manantiales y concesiones, base de datos SINIGIRH.

A partir de la tabla 18 se desprende que, se registran 147 concesiones a partir de pozos, para un total de 1444,43 l/s, no obstante, 48 de estas no registran caudal, por cuanto corresponden con concesiones en estado de cancelado o cancelado por vencimiento. Los usos de consumo humano e industrial corresponden con el 92,16% del volumen total de extracción.

Tabla 18. Extracción en acuíferos (pozos), base de datos SINIGIRH.

Tipo de fuente	Acuífero (Pozo)
Cantidad de concesiones	147
Caudal de extracción (l/s)	1444,13



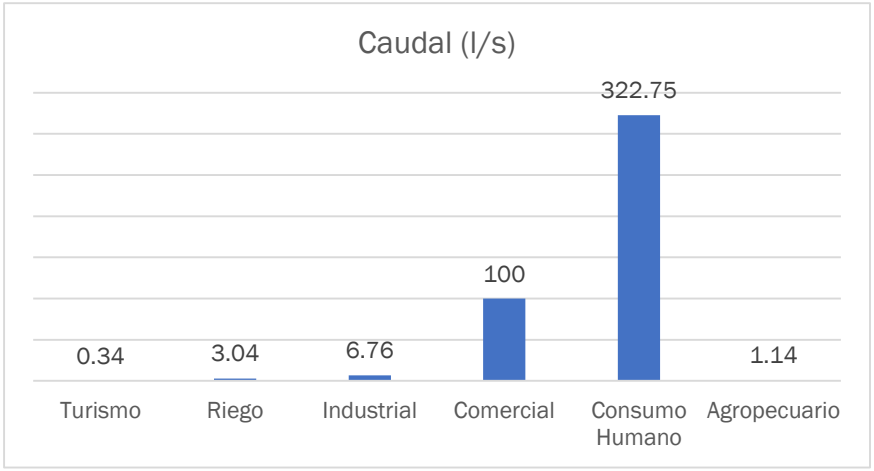
Fuente: SINIGIRH (2023)

Vale la pena aclarar que, para las concesiones asociadas a pozos, 117 están asociadas a un único uso, 28 presentan dos usos y solo 2 tienen tres usos.

Para el caso de nacimientos, se registra un total de 30 concesiones, de las cuales solo 15 consignan caudal de concesión para un total de 434,03 l/s (tabla 19). El 75,75% es utilizado para consumo humano en el cantón de Belén, seguido por el uso comercial con un 23,03%. Mientras que para las fuentes correspondientes a quebradas y ríos solo se consignan 10 y 7 concesiones respectivamente, siendo que el caudal de 4,6 l/s proveniente de quebradas es utilizado solo para riego y 600 l/s derivados de ríos para fuerza hidráulica.

Tabla 19. Extracción a partir de manantiales, base de datos SINIGIRH.

Tipo de fuente	Manantiales
Cantidad de concesiones	30
Caudal de extracción (l/s)	434,03



4.1.1.2 Base de datos del AyA (aprovechamientos AyA y ASADAS)

A través de los oficios UEN-GA-2023-00733 y UEN-GA-2023-02091 (Anexo 1), el AyA le facilitó al SENARA la información relacionada con aprovechamientos de pozos, manantiales o cauces que existen en el perímetro del Cantón de Belén y que son utilizados por el AyA o ASADAS para el abastecimiento público. A partir de la tabla 20 se desprende que, el AyA tiene 21 aprovechamientos para abastecimiento público en el cantón de Belén, de los cuales 15 corresponden con pozos de extracción y 6 con captaciones de nacientes.

Tabla 20. Aprovechamientos del AyA en el Cantón de Belén.

Código	Nombre	Latitud CRTM05	Longitud CRTM05	Uso	Tipo	Caudal (l/s)	Estado
MEA19P013	Ojo de Agua	1104169	478604	Abastecimiento Público	Naciente	166,3	En uso
MEA16AP003	Pozo CNP 1	1102668,6	478109,4	Abastecimiento Público	Pozo	33,7	En uso
MEA16AP004	Pozo CNP 2	1102708,5	478155,5	Abastecimiento Público	Pozo	89,7	En uso
MEA16AP005	Pozo CNP 3	1102738,3	478361,5	Abastecimiento Público	Pozo	36,8	En uso
MEA16AP006	Pozo CNP4	1102857	478354	Abastecimiento Público	Pozo	52,7	En uso
MEA16AP007	Pozo CNP5	1102860	478287	Abastecimiento Público	Pozo	81,5	En uso
MEA16AP008	Pozo CNP6	1102840	478213	Abastecimiento Público	Pozo	86,7	En uso
MEA16AP009	Pozo CNP7	1102817	478165	Abastecimiento Público	Pozo	91,6	En uso
MEA16AP010	Pozo CNP8	1102765	478158	Abastecimiento Público	Pozo	79,2	En uso
MEA16AP016	Pozo CNP9	1102738	478363	Abastecimiento Público	Pozo	41	En uso
MEA16AP017	Pozo CNP10	1102754	478106	Abastecimiento Público	Pozo	54	En uso
MEA16AP022	Pozo CNP11	1102691	478104	Abastecimiento Público	Pozo	39	En uso
MEA19AP001	Túnel 1 Puente Mulas	1102642	479884	Abastecimiento Público	Naciente	224,54	En uso
MEA19AP002	Túnel 2 Puente Mulas	1102798	479815	Abastecimiento Público	Naciente		En uso
MEA19AP005	Fuente Puente Mulas 2	1102692	479906	Abastecimiento Público	Naciente		En uso
MEA19AP006	Fuente Puente Mulas 3	1102656	479898	Abastecimiento Público	Naciente		En uso
MEA19AP007	Pozo Belén 1	1104096	478608	Abastecimiento Público	Pozo	98	En uso
MEA19AP009	Pozo Belén 3	1103172	478955	Abastecimiento Público	Pozo	36	En uso
MEA19AP010	Pozo Zamora	1103310	480501	Abastecimiento Público	Pozo	43,8	En uso
MEA19AP011	Pozo La Ribera (Intel)	1105515	480387	Abastecimiento Público	Pozo	58,7	En uso
MEA19AP012	Fuentes Zamora	1102742	480833	Abastecimiento Público	Naciente	130	En uso
					Total (l/s)	1443,24	

Fuente: AyA (2023)

De la tabla 20 se desprende que, un total de 1443, 24 l/s son extraídos de los mantos acuíferos, siendo que el 36,08 % (520,84 l/s) se aprovecha a través de nacientes y el 63,91% (922,4 l/s) a través de pozos de extracción a nombre del AyA.

A su vez, a partir de la información suministrada por el AyA, se registra un aprovechamiento a través de la ASADA de San Rafael de Alajuela, la fuente corresponde con la N 1 – Ojo de Agua, con un caudal captado de 80 l/s (Tabla 21).

Tabla 21. Aprovechamientos de ASADAs en el Cantón de Belén.

ASADA	Nombre	Latitud CRTM05	Longitud CRTM05	Uso	Tipo	Caudal (l/s)	Estado
San Rafael de Ojo de Agua	N 1 – Ojo de Agua	1103775	478598	Abastecimiento público	Naciente	80	En uso
					Caudal Total (l/s)	**80**	

Fuente: AyA (2023)

La ubicación de los aprovechamientos de AyA y ASADA existentes en el cantón de Belén se muestran en la figura 40. Desde el punto de vista de extracción de agua subterránea, todas las fuentes registradas a favor del AyA y ASADA se encuentran en operación.

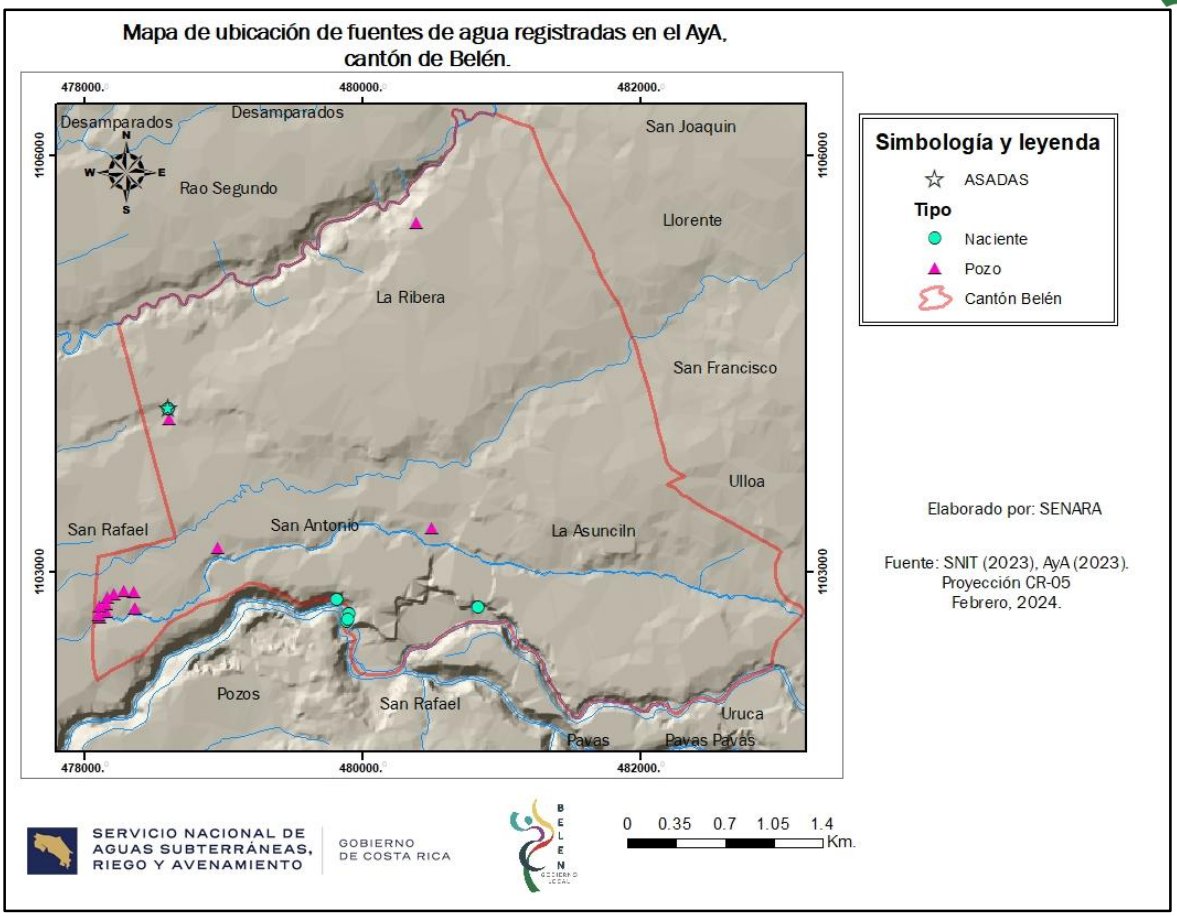


Figura 40. Aprovechamientos de AyA y ASADA en el cantón de Belén.

4.1.1.3 Red de monitoreo de pozos y piezómetros

A partir de la información de las bases de datos del SENARA. SINIGIRH, AyA y la Municipalidad de Belén, se realizó en campo el levantamiento de pozos y piezómetros en los cuales fuera posible realizar el monitoreo de los niveles estáticos y dinámicos de los acuíferos captados. En total se monitorearon 33 sitios, de los cuales 21 son pozos y 12 son piezómetros. La ubicación de los pozos y piezómetros monitoreados se observa en la figura 41 y el registro detallado de los niveles se incorpora como parte del anexo 1.

La información de los niveles se utilizó como parte de los insumos para construir las curvas equipotenciales de los acuíferos identificados en el modelo hidrogeológico, pero, además sirvió para la calibración de las cargas hidráulicas que en la etapa de modelación numérica de los acuíferos fueron estimadas por el programa de modelación. Como se observa en la figura 41 la distribución de los sitios monitoreados en el cantón no es uniforme y existen algunos sectores con vacíos de información, de manera que, es recomendable que investigaciones futuras se enfoquen en llenar esos vacíos, ya sea mediante la búsqueda y monitoreo de pozos ya existentes o también mediante la perforación de nuevos pozos de investigación.

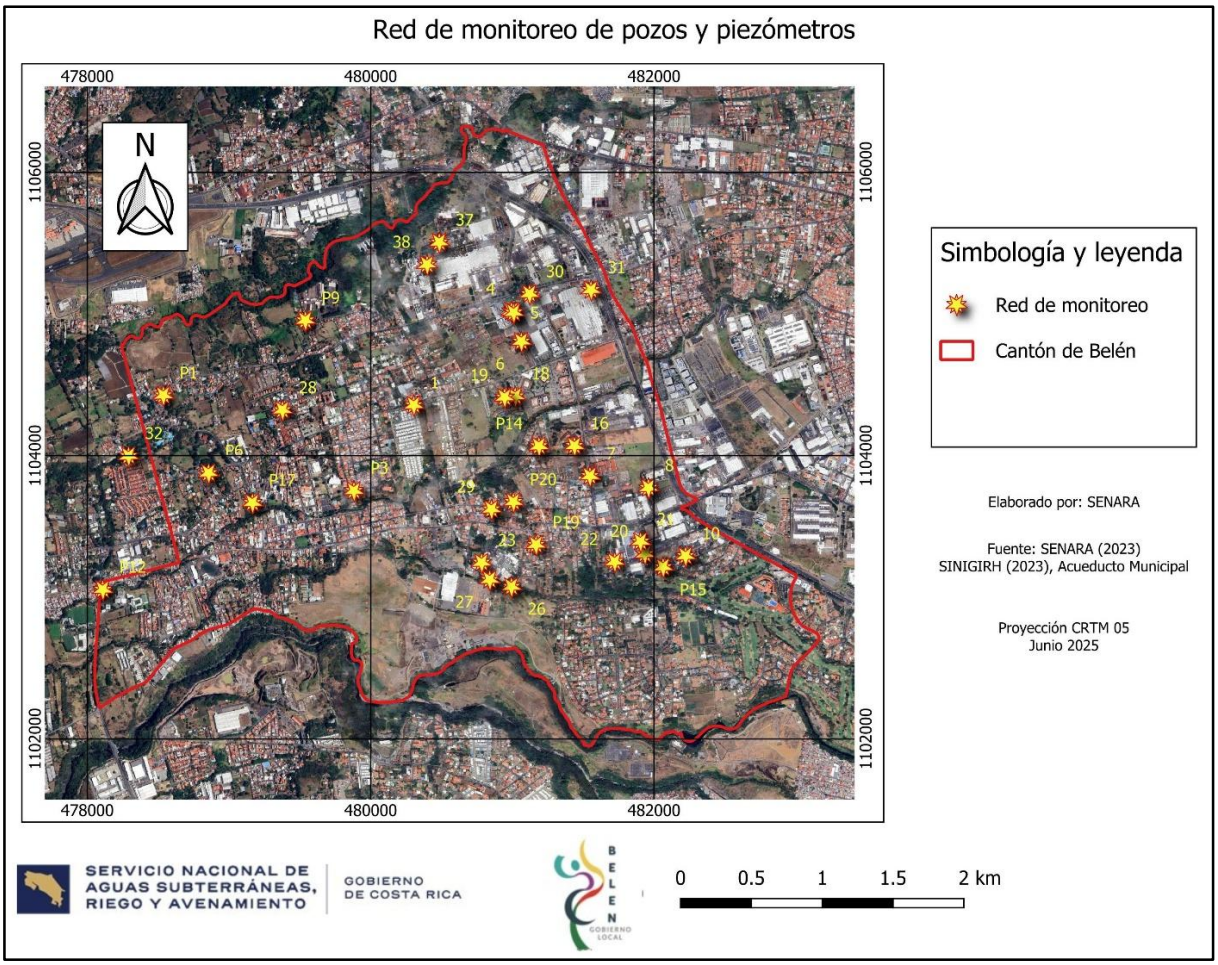


Figura 41. Red de monitoreo de pozos y piezómetros.

4.2 Modelo Hidrogeológico Conceptual

Como se observó en el apartado de modelo geológico, las rocas existentes en el cantón de Belén tienen, predominantemente, un origen de tipo ígneo (lavas, tobas e ignimbritas). En ese sentido, se ha determinado que, las lavas asociadas con el Miembro Bermúdez de la Formación Barva y con la Formación Lavas Intracañón, son las litologías principales que tienen la capacidad de generar acuíferos importantes en la zona de estudio.

En este contexto, el acuífero más superficial corresponde con las lavas del Miembro Bermúdez de la Formación Barva, las cuales, en gran parte se encuentran cubiertas por un espesor de varios metros de tobas alteradas a limos y arcillas asociadas con el Miembro Carbonal de esa misma formación. En todo el cantón, pero en profundidad, se localiza el acuífero más potente desarrollado en las lavas del Miembro Linda Vista de la Formación Lavas Intracañón (Colima Superior). Este acuífero más potente, en general se encuentra separado del acuífero superficial en la Formación Barva, por un espeso paquete de tobas e ignimbritas asociadas con la Formación Avalancha Ardiente (Tiribí). Si bien es cierto, en algunos sectores la Formación Tiribí confina y aisla al acuífero desarrollado en Colima Superior, en gran parte de los pozos analizados no sucede esta situación, por lo que, se considera que puede permitir la conexión hidráulica entre ambos acuíferos mediante la percolación vertical del agua subterránea desde Barva y hasta Colima Superior.

El acuífero más profundo de la zona se desarrolla en el Miembro Belén de la Formación Lavas Intracañón (Colima Inferior), el cual presenta un potencial menor que Colima Superior debido a la intercalación de paquetes de tobas con espesores variables. Separando a Colima Superior de la Inferior se localiza una ignimbrita predominantemente densa (Puente Mulas) que en la mayoría de los casos confina y aisla al acuífero Colima Inferior.

En este sistema, parte de la recarga a los acuíferos se genera a partir de la infiltración en el terreno de un porcentaje de la precipitación, la cual posteriormente percola verticalmente hasta los acuíferos más profundos,

como es el caso de Colima Superior con el aporte proveniente desde Barva, sin embargo, debemos recordar que, regionalmente en el valle central la extensión de estos acuíferos es mucho mayor y va más allá de los límites del cantón de Belén, por lo que, gran parte de la recarga en el cantón debe darse en forma lateral desde los mismos acuíferos a partir de flujos subterráneas con dirección predominante hacia el SW y que han sido recargados hacia las partes altas del sistema montañoso.

De modo muy general, la tendencia del flujo subterráneo en los distintos acuíferos es predominantemente hacia el suroeste. Para el caso del acuífero más superficial en las lavas del Miembro Bermúdez, su descarga se genera en numerosos manantiales, hacia algunos cursos de agua superficial, por extracción en pozos o por percolación vertical hacia unidades más profundas. Para el caso de Colima, su descarga se genera en numerosos pozos que la captan, en manantiales hacia el Río Virilla o continúa su flujo aguas abajo fuera de los límites del cantón.

Los perfiles hidrogeológicos de las figuras 45 y 46 muestran el modelo hidrogeológico general para distintos sectores del área estudiada.

Por otra parte, aunque en los párrafos anteriores se ha descrito en forma general el modelo hidrogeológico del área, a continuación, se describe con más detalle, ciertos parámetros hidrogeológicos que caracterizan a cada una de las unidades hidrogeológicas existentes en el cantón.

4.2.1 Acuífero en rocas volcánicas Colima

4.2.1.1 Colima Superior

Este acuífero se desarrolla en las lavas y brechas lávicas que conforman el Miembro Linda Vista de la Unidad Colima, por lo que, se considera primordialmente de tipo fracturado. Según los registros de pozos se extiende en profundidad a lo largo y ancho de todo el Cantón de Belén.

Este es el acuífero más potente y explotado en el área de estudio. Según la base de datos del SENARA se registran 85 pozos en los que este

acuífero es captado, con caudales de extracción reportados entre 0,41 y 28 l/s. Los pozos de AyA AB-1534 y AB-2336 reportan caudales extremos de 110 y 135 l/s respectivamente, sin embargo, estos pozos también se encuentran captando otros acuíferos, por lo que, su caudal puede tener cierta influencia de ellos. La mayoría de pozos con información reportan caudales de extracción menores a 5 l/s (65%), 24% se ubican entre 5 a 10 l/s, 5,5% entre 10 a 20 l/s y 5,5% mayores a 20 l/s.

Además, hacia el cañón del Río Virilla, en la zona de Puente de Mulas y Tajo Zamora, se presentan importantes manantiales, algunos captados para abastecimiento público, que registran caudales de explotación entre los 130 y hasta 224 l/s en conjunto según los registros aportados por el AyA.

El agua subterránea, en los pozos que captan únicamente este acuífero, suele ubicarse entre los 60 a 80 metros de profundidad, principalmente, no obstante, profundidades entre los 40 a 50 metros se registran hacia el sur del cantón, asociado muy posiblemente con la cercanía hacia la zona de descarga en el Río Virilla. Profundidades máximas del nivel de agua subterránea cercanas a los 100 metros o incluso mayores (93 – 102 m) se han registrado en varios pozos localizados hacia el norte del cantón y la zona central (AB-1428, AB-1711, entre otros).

El espesor saturado de este acuífero es muy variable y en algunos casos no se tiene total certeza de este, ya que muchas de las perforaciones que lo captan no son totalmente penetrantes. En general, predominan espesores de saturación entre los 20 a 50 metros, aunque pozos como el AB-2065 o AB-332 reportan espesores de saturación por debajo de los 10 metros. El menor espesor saturado se registró en el pozo AB-2047 con apenas 6 metros. Espesores de saturación entre los 50 a 70 metros se registran en pozos como el AB-1276, AB-1746 o AB-2111. El mayor espesor se reporta en el pozo BA-643 con 127 metros de saturación. Como suele suceder con acuíferos fracturados, sus características pueden variar fuertemente de un sitio a otro, es así como, en pozos como el AB-1395 o AB-909, las lavas del Miembro Linda Vista se reportan completamente secas.

Existen varios mecanismos de recarga para este acuífero en el cantón. Por una parte, en aquellas zonas donde el acuífero se comporta como libre, debe existir percolación vertical a partir de sectores más permeables y saturados en la Unidad Tiribí, y también, directamente desde el Acuífero Barva en aquellas áreas en donde no existe la Unidad Tiribí entre ambos acuíferos. No obstante, se considera que, para este acuífero en el Cantón de Belén, el aporte principal de agua debe darse lateralmente en profundidad a partir de sectores del mismo acuífero ubicados fuera del cantón y hacia el extremo nor-este.

En cuanto a la descarga, a nivel superficial se genera en los manantiales ubicados en la margen derecha del Río Virilla, también a través de los múltiples pozos que lo captan y un porcentaje importante continúa el flujo hacia el sur-oeste, fuera de los límites cantonales.

En cuanto al grado de confinamiento, algunos pozos reportan este acuífero como de tipo libre y otros como de tipo confinado (AB-1654 por ejemplo), no obstante, la condición de acuífero libre predomina en aproximadamente el 70% de los pozos analizados con información adecuada. No existe una distribución o localización preferencial dentro del cantón para los sectores donde el acuífero se reporta confinado, y en ese sentido, se considera que, el confinamiento puede estar relacionado en ciertos sectores, con zonas donde las coberturas de tobas e ignimbritas de la Unidad Tiribí sean más densas, menos permeables y menos fracturadas.

La tabla 22 muestra información existente sobre los parámetros hidráulicos de conductividad hidráulica y transmisividad, obtenida de pruebas de bombeo realizadas en pozos que captan exclusivamente a este acuífero.

Tabla 22. Parámetros hidráulicos del acuífero Colima Superior.

Pozo	Transmisividad (m^2/d)	Conductividad hidráulica (m/d)
AB-1286	130	6,19
AB-1305	107	3,56
AB-336	12900	569
AB-908	1098,45	119,7
AB-1741	108	3,2
AB-422	5418	245

Fuente: SENARA (2023)

El valor promedio de transmisividad es de 3293,6 m^2/d y conductividad hidráulica de 157,7 m/d, sin embargo, estos valores disminuyen a 1372 m^2/d y 75 m/d si en el análisis no se toma en cuenta el pozo AB-336, cuyos valores reportados se consideran muy altos con respecto a la información regional conocida. Como se observa en los datos anteriores, la heterogeneidad es importante, incluso de varios ordenes de magnitud, no obstante, esta situación suele ser normal en condiciones de acuíferos fracturados.

A partir de la información de pozos, piezómetros y manantiales existentes en la base de datos del SENARA y SINIGIRH, se generaron las curvas equipotenciales para este acuífero, que describen una dirección de flujo general hacia el suroeste (Figura 42). El gradiente hidráulico es variable, entre 0,013 a 0,08, aunque en general en la zona predomina un gradiente hidráulico cercano a 0,04. Importante señalar que, hacia el extremo sur del cantón, en la zona de Puente Mulas y alrededores, las curvas equipotenciales describen una dirección de flujo hacia el Río Virilla que pone en evidencia la descarga de agua subterránea que se genera en estos sectores a través de manantiales.

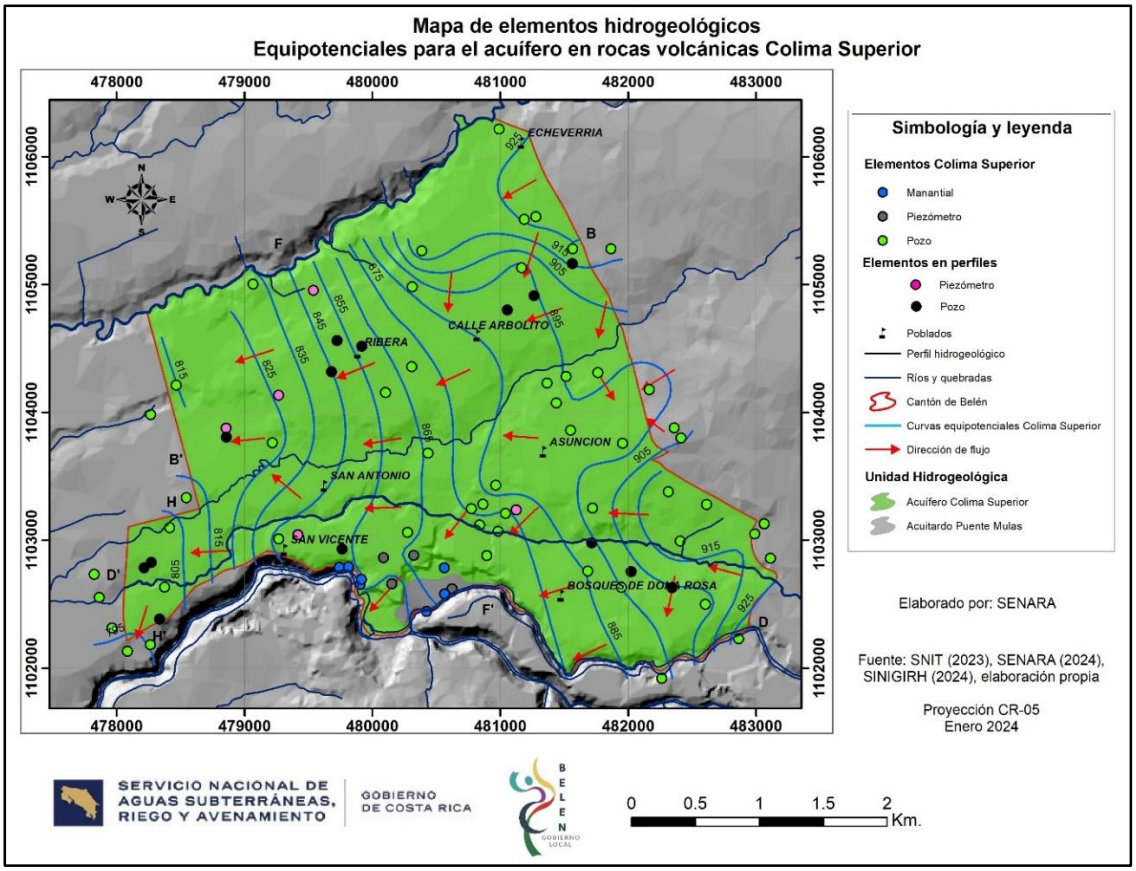


Figura 42. Mapa de elementos hidrogeológicos. Equipotenciales para el acuífero en rocas volcánicas Colima Superior.

4.2.1.2 Colima Inferior

Este acuífero se desarrolla en las lavas y brechas lávicas que conforman el Miembro Belén de la Unidad Colima, por lo que, se considera principalmente de tipo fracturado, sin embargo, la presencia de intercalaciones de tobas incorpora cierto comportamiento granular al sistema. Es probable que, la presencia de estas tobas, así como paleosuelos arcillosos, tenga influencia en la disminución del potencial de este acuífero en comparación con las lavas de Colima Superior.

Según la información regional y los registros de pozos, se extiende en profundidad en todo el cantón y se encuentra separado de Colima Superior por las tobas e ignimbritas asociadas al Miembro Puente Mulas, el cual presenta espesores entre los 5 y 45 metros y suele funcionar como techo y

sello al acuífero. No obstante, esta separación no es continua en toda el área de estudio, siendo así que, en varios sectores Puente Mulas está ausente en la secuencia estratigráfica, tal y como se ha reportado en los pozos AB-334, AB-1746, AB-738, entre otros. Adicionalmente, también se tienen reportes que indican cierta saturación en el mismo Puente Mulas (pozo AB-1383), relacionados posiblemente con sectores más fracturados o granulares en tobas.

Aunque este acuífero se extiende en todo el cantón, la profundidad de sus niveles de saturación, su menor potencial con respecto a Colima Superior y la existencia de restricciones a la perforación por parte de las instituciones competentes, han influido en que pocos pozos se encuentran captándolo en la actualidad. Para el Cantón de Belén, en SENARA se reportan únicamente 27 pozos donde se ha registrado este acuífero, y en el caso de aquellos donde lo captan exclusivamente, los caudales de explotación oscilan entre 0,1 l/s (AB-2110) a 9,5 l/s (AB-909). Otros pozos reportan caudales superiores, pero muy posiblemente se encuentran influenciados por el aporte de otros acuíferos captados simultáneamente.

El nivel del agua subterránea para este acuífero se ubica en general entre los 80 a 110 metros de profundidad, aunque algunos pozos lo registran alrededor de los 70 metros y en casos extremos a los 145 metros de profundidad. Por otra parte, su espesor saturado puede llegar hasta los 111 metros según el pozo AB-738, aunque para cada sitio este valor depende mucho de la penetración alcanzada por los pozos. Cabe mencionar que, a diferencia del acuífero Colima Superior, en ninguno de los pozos se reporta a este acuífero como seco.

Si bien es cierto, la mayoría de los pozos en este acuífero reporta algún grado de confinamiento de las aguas subterráneas, principalmente en aquellos sectores donde la ignimbrita de Puente Mulas se describe como densa o poco fracturada, no es posible indicar que este comportamiento sea totalmente homogéneo para todo el cantón, pues algunos pozos como el AB-

738 y el AB-908, ubicados al sur del cantón, describen a este acuífero como de tipo libre.

En cuanto a la recarga, al igual que en el Acuífero Colima Superior, se considera que, para este acuífero el aporte principal de agua en el cantón debe darse lateralmente en profundidad a partir de sectores del mismo acuífero ubicados fuera del cantón y hacia el extremo NE, en donde la recarga regional se ha dado desde las partes altas del sistema montañoso. Por otra parte, también puede existir un aporte por percolación vertical desde el Acuífero Colima Superior, básicamente en aquellos sectores donde el acuífero se comporte como de tipo libre y en los que, las ignimbritas o tobas de Puente Mulas están ausentes o no funcionan como sello al acuífero.

La descarga se genera en los pozos que lo captan, pero al menos a nivel del cantón, la mayor cantidad del flujo de agua continúa hacia el sur-oeste, fuera de los límites cantonales, en donde eventualmente llega a generar diversos manantiales, tal como el de Potrerillos en la zona de Alajuela.

La tabla 23 muestra información existente sobre los parámetros de conductividad hidráulica y transmisividad, obtenida en pruebas de bombeo realizadas en pozos que captan exclusivamente a este acuífero. El valor promedio de transmisividad es de 278 m^2/d y conductividad hidráulica de 9,5 m/d.

Tabla 23. Parámetros hidráulicos del acuífero Colima Inferior.

Pozo	Transmisividad (m^2/d)	Conductividad hidráulica (m/d)
AB-584	188.1	4.56
AB-908	368	11,7 (de 84 a 95 m en lavas) 2,56 (de 84 a 126 m en lavas y tobas)
AB-909		13,12 a 15,65 (en lavas de 71 a 93 m)

Fuente: SENARA (2023)

Como se observa en la figura 43, a partir de la información de pozos y piezómetros existentes en la base de datos del SENARA, se generaron las

curvas equipotenciales para este acuífero, que describen una dirección de flujo predominante hacia el suroeste. El gradiente hidráulico es variable, entre 0,08 a 0,009, aunque en general en la zona predomina un gradiente hidráulico cercano a 0,03. Como muestra la figura 43, hacia el extremo norte del cantón la densidad de pozos y piezómetros disminuye, por lo que, en parte de esos sectores no fue posible la construcción de equipotenciales.

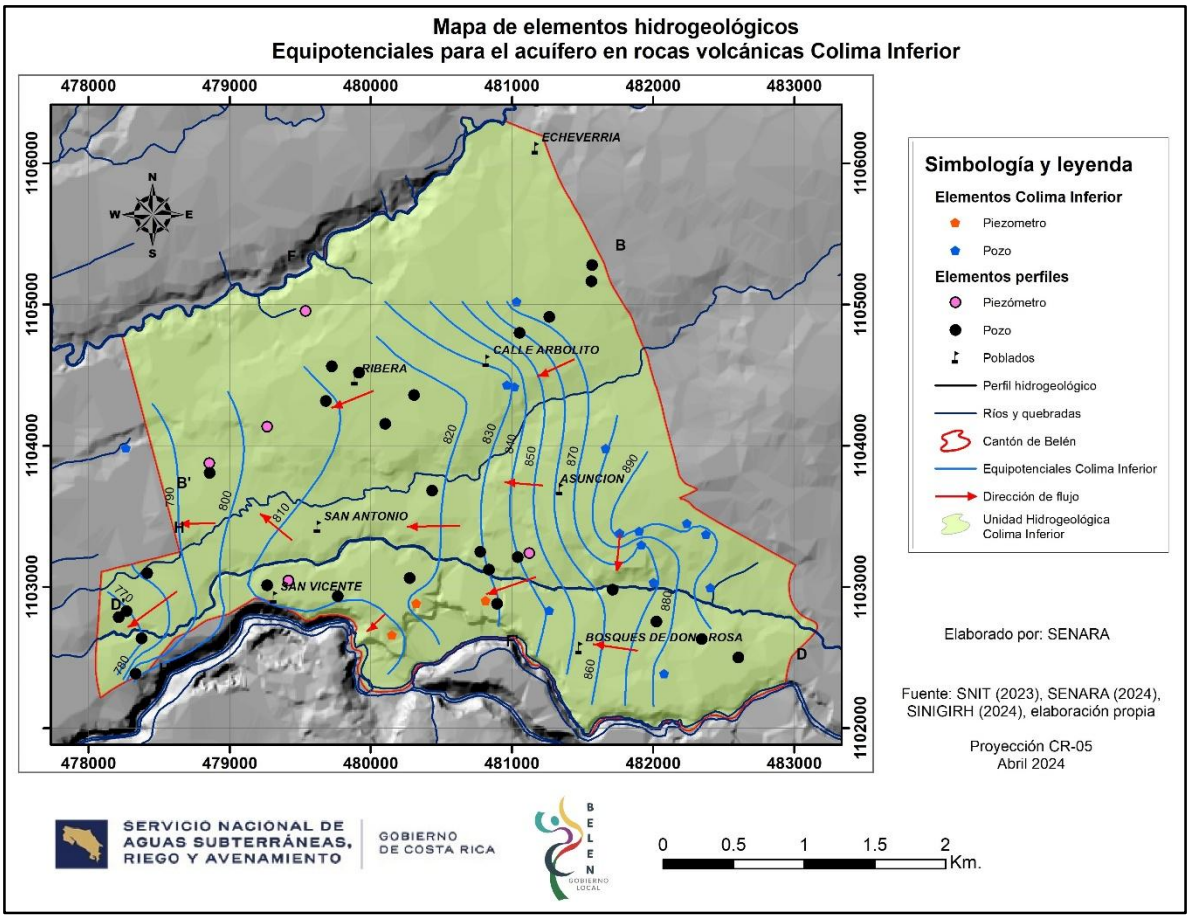


Figura 43. Mapa de elementos hidrogeológicos. Equipotenciales para el acuífero en rocas volcánicas Colima Inferior.

4.2.2 Acuitardo Tiribí

En general, esta unidad se encuentra cubriendo al acuífero desarrollado en rocas volcánicas Colima y lo separa del acuífero superior en lavas de la Formación Barva (Bermúdez), permitiendo una lenta percolación del agua subterránea debido a la existencia de conductividades hidráulicas muy bajas. El espesor de esta unidad en el cantón de Belén es variable, con un promedio de 20 m y hasta poco más de 60 metros en algunos sectores. En aquellas zonas donde se encuentra más soldada y compacta puede incluso llegar a confinar al Acuífero Colima. Su extensión no es totalmente uniforme en el cantón, siendo así que, en ciertos sectores desaparece, tal y como se observa en los perfiles A–A', E–E' y C–C' (figuras 36 y 37).

Tradicionalmente ha sido descrita como un acuitardo, es decir, una formación rocosa que almacena y transmite agua, pero en forma muy lenta, de manera tal, que no es posible realizar captaciones aprovechables en ella. Sin embargo, es de rescatar, que varios pozos existentes en el cantón presentan rejillas captando algunos niveles en esta unidad, e incluso, los pozos AB–252 y AB–2355 la captan exclusivamente, con caudales de 0,44 y 1,5 l/s respectivamente. Muy posiblemente, los sectores de esta unidad en que se presenta un mayor potencial acuífero se asocien con sectores granulares de tobas donde la presencia de finos sea menor, o también, con sectores de ignimbritas en los que el fracturamiento de la roca genera una porosidad secundaria adecuada para el transporte del agua.

Por su naturaleza, se considera que, el potencial acuífero en esta unidad es muy limitado, y los niveles de agua subterránea que se localizan son principalmente de tipo colgado (varios pozos como el AB–1544 incluso reportan que los niveles en ella se secan al bombear). Su recarga se da por infiltración directa de la precipitación o por percolación vertical desde el acuífero albergado en las lavas de Barva. Como se sugiere en el perfil hidrogeológico H (figura 45), la comunicación hidráulica con el acuífero en

lavas de Barva puede existir en ciertos sectores y con ello se da una cierta continuidad al flujo de los niveles del agua subterránea.

Únicamente en el pozo de investigación AB-909 se tiene un reporte de conductividad hidráulica para esta unidad, con un valor de 1,25 x 10^{-11} m/d, lo cual coincide con el bajo potencial acuífero descrito anteriormente. Por otro lado, en los pozos AB-252 y AB-2355 los niveles se reportan como libres, a una profundidad de 7,42 y 30 metros respectivamente y el espesor saturado promedio es de 40 metros.

Finalmente, a partir de los análisis de laboratorio se ha determinado que, la cobertura de suelos que se desarrolla sobre esta unidad se clasifica principalmente como limos o limos arenosos y en menor proporción como arcillas (muestra BE-12), además, los valores de conductividad hidráulica en estos suelos, determinada mediante la metodología de doble anillo, se ubican entre 0,025 a 1,02 m/d (Anexo 2).

4.2.3 Acuífero en rocas volcánicas Barva

Este acuífero se desarrolla básicamente en las lavas del Miembro Bermúdez de la Formación Barva, por lo que, se considera primordialmente de tipo fracturado. La presencia de brechas de lava y algunas tobas intercaladas incorporan materiales granulares al acuífero. En general se extiende hacia el norte de los ríos Bermúdez y Burío (Quebrada Seca), por lo que, en los pozos al sur de cantón no se registra este acuífero.

En la base de datos del SENARA se registran 47 pozos en los que este acuífero es captado, con caudales de extracción reportados entre 0,5 y 15,75 l/s. Además, se tiene el registro de 46 manantiales localizados principalmente en los frentes de coladas de lavas y en zonas de contacto con la Unidad Tiribí. El uso para los manantiales es variado y en ellos se registra según la base de datos del SINIGIRH, caudales de explotación entre 0,01 l/s y hasta 166,3 l/s como sucede en las captaciones del AyA en la zona de Ojo de Agua. Sobre esta unidad también se registran 14 piezómetros exploratorios que la caracterizan.

El agua subterránea, en los pozos que captan únicamente este acuífero, suele ubicarse entre los 20 y 35 metros de profundidad. Solamente en los pozos AB-1220 y AB-2208 se reportan niveles cercanos a los 40 metros de profundidad. Otros pozos con niveles más someros pueden asociarse con la cercanía a zonas de descarga en frentes de colada o a algún curso de agua superficial, tal es el caso del pozo AB-280 (Nivel estático Ne = 3,77 m) en la margen izquierda del Río Burío.

El espesor saturado de este acuífero es muy variable, siendo que el valor mínimo identificado fue de 3 metros (AB-2479) y el máximo de 53 metros (AB-823). Se debe mencionar que, en la mayoría de los pozos los niveles de saturación son menores que el espesor total del Miembro Bermúdez, e incluso, se han identificado pozos en los que este miembro se encuentra completamente seco (AB-279 o AB-1564).

Se considera que, existen varios mecanismos de recarga para este acuífero en el cantón. Por una parte, debe existir un aporte lateral desde sectores del mismo acuífero ubicados fuera del cantón hacia el extremo nor-este. También, se genera percolación del agua de precipitación que se ha infiltrado en las tobas del Miembro Carbonal o infiltración directa en aquellos sectores en los que las lavas afloran sobre el terreno. Sectores influentes, en ríos o quebradas del cantón, también aportan un porcentaje a la recarga del acuífero.

Por otra parte, la descarga se genera a nivel superficial en los abundantes manantiales que se distribuyen en el cantón, principalmente en las zonas frontales de coladas. Otra parte percola a través de la Unidad Tiribí hacia los acuíferos más profundos de Colima y también, se debe incluir la extracción que se realiza a través de los pozos que la captan. Otra parte de la descarga se genera a través de sectores efluentes en algunos cauces, como lo señala Gómez (1987) para el caso del Río Segundo.

Prácticamente todos los pozos analizados en el cantón reportan este acuífero como de tipo libre, cubierto en su mayoría por tobas meteorizadas asociadas al Miembro Carbonal de la Formación Barva. El espesor de esta

cobertura de tobas es variable y se ubica entre los 4 y hasta los 30 metros. La presencia de algunos pozos con niveles estáticos en tobas del Miembro Carbonal, puede indicar que, simplemente el nivel de saturación de las lavas continúa en zonas más permeables de las tobas, aunque tampoco se descarta la presencia muy local de cierto grado de confinamiento, tal es el caso de los pozos AB-945 o el AB-1930.

La tabla 24 muestra información existente sobre los parámetros hidráulicos de conductividad hidráulica y transmisividad, obtenida en pruebas de bombeo realizadas en pozos que captan exclusivamente a este acuífero. El valor promedio de transmisividad es de 420 m^2/d y el de conductividad hidráulica de 21.29 m/d.

Tabla 24. Parámetros hidráulicos del acuífero en rocas volcánicas Barva (Miembro Bermúdez).

Pozo	Transmisividad (m^2/d)	Conductividad hidráulica (m/d)
AB-2295	44	0,93
AB-2208	415	18,8
AB-747	432	13,62
AB-1339	160	11,4
AB-1234	1050	61,7

Fuente: SENARA (2023)

Como se observa en la figura 44, a partir de la información de pozos, piezómetros y manantiales existentes en la base de datos del SENARA y SINIGIRH, se generaron las curvas equipotenciales para este acuífero, que describen una dirección de flujo general hacia el suroeste. El gradiente hidráulico es variable, entre 0,009 a 0,03 y tiende a incrementarse hacia las zonas de descarga (0,1 a 0,2) donde coincide con frentes o borde de coladas de lava. Importante mencionar que, hacia el cauce del Río Segundo y algunos sectores del Río Burío, las curvas equipotenciales describen contornos que ponen en evidencia el comportamiento de tipo efluente que tienen los cauces en esos sectores (reciben agua del acuífero).

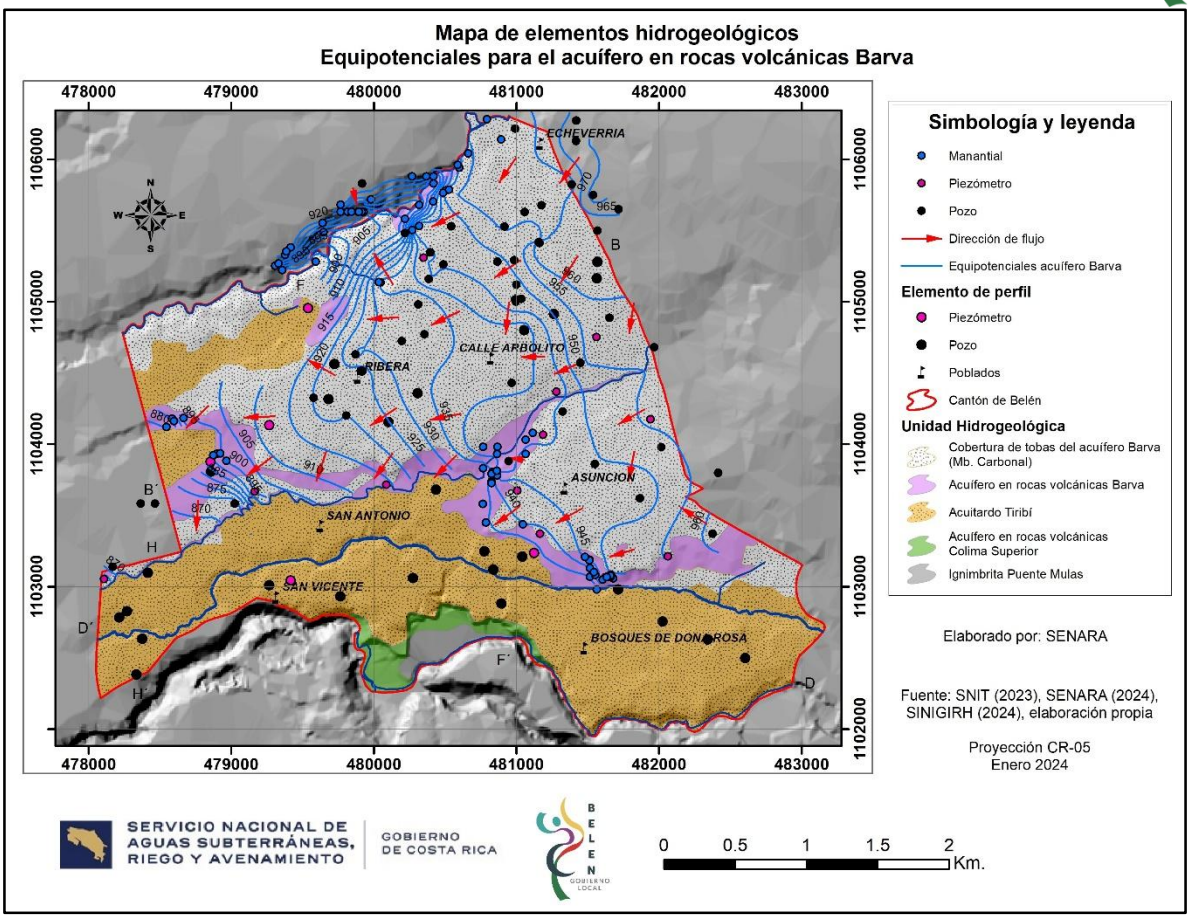


Figura 44. Mapa de elementos hidrogeológicos. Equipotenciales para el acuífero en rocas volcánicas Barva.

A partir de los análisis de laboratorio se determinó que, la cobertura de tobas asociada con el Miembro Carbonal de la Formación Barva desarrolla suelos que se clasifican como limos o limos arenosos, con conductividades hidráulicas entre 0,116 a 4,02 m/d. Por otra parte, los suelos desarrollados a partir de la meteorización de las lavas también se clasifican como limos a limos arenosos, con conductividades hidráulicas entre 0,029 a 0,123 m/d (Anexo 2).

Los perfiles hidrogeológicos D–D′, F–F′, B–B′ y H–H′ de las figuras 45 y 46 muestran el modelo hidrogeológico general para el Cantón de Belén.

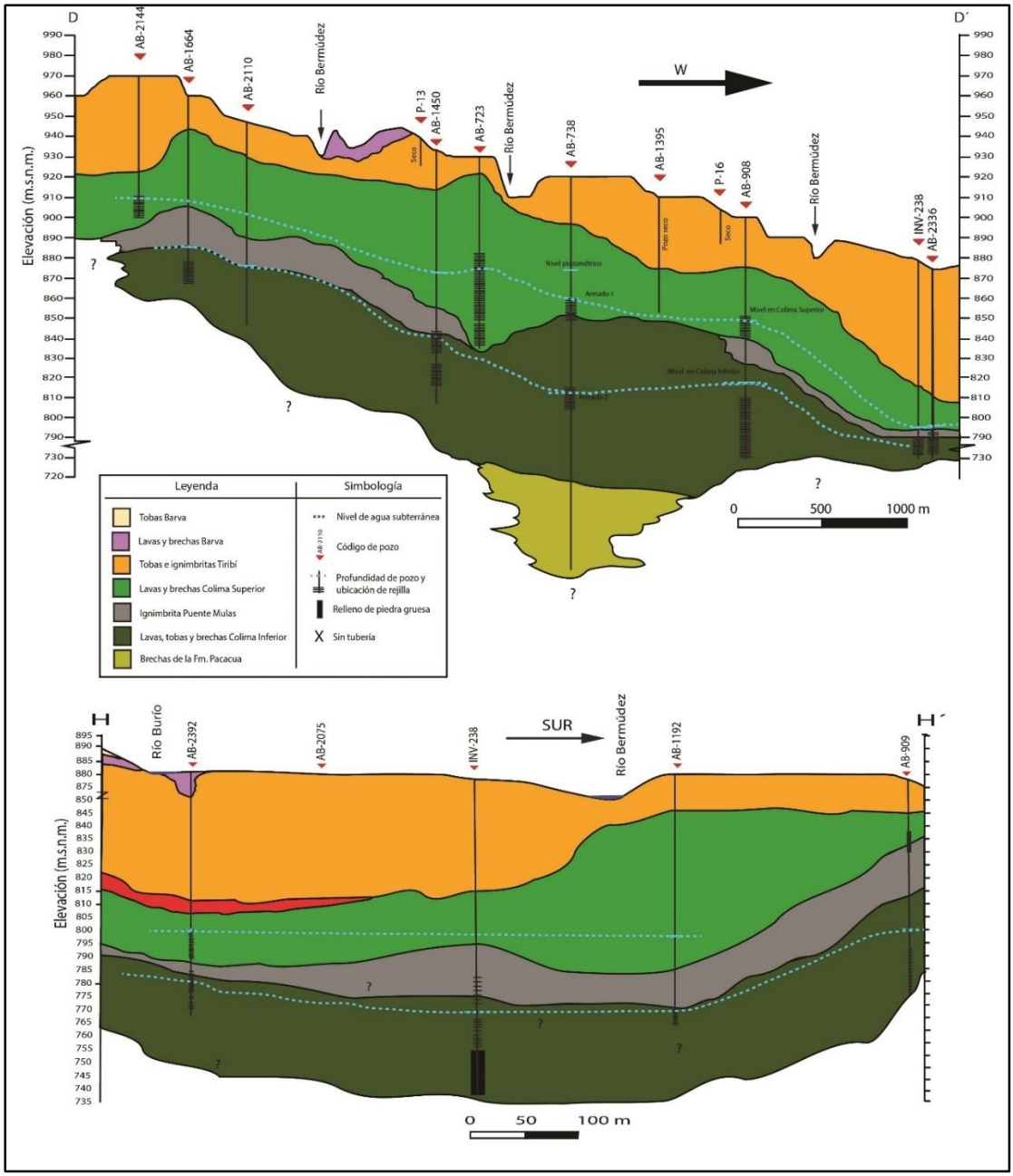


Figura 45. Perfiles hidrogeológicos D–D´ y H–H´. Hidroestratigrafía general de la zona, con el acuífero más somero en lavas y brechas de la Formación Barva, separado del acuífero más profundo en lavas y brechas Colima Superior mediante el acuitardo de tobas e ignimbritas Tiribí. Nótese la presencia de los niveles de saturación de agua subterránea con flujo preferencial al SW. En profundidad el acuífero en lavas y tobas Colima Inferior.

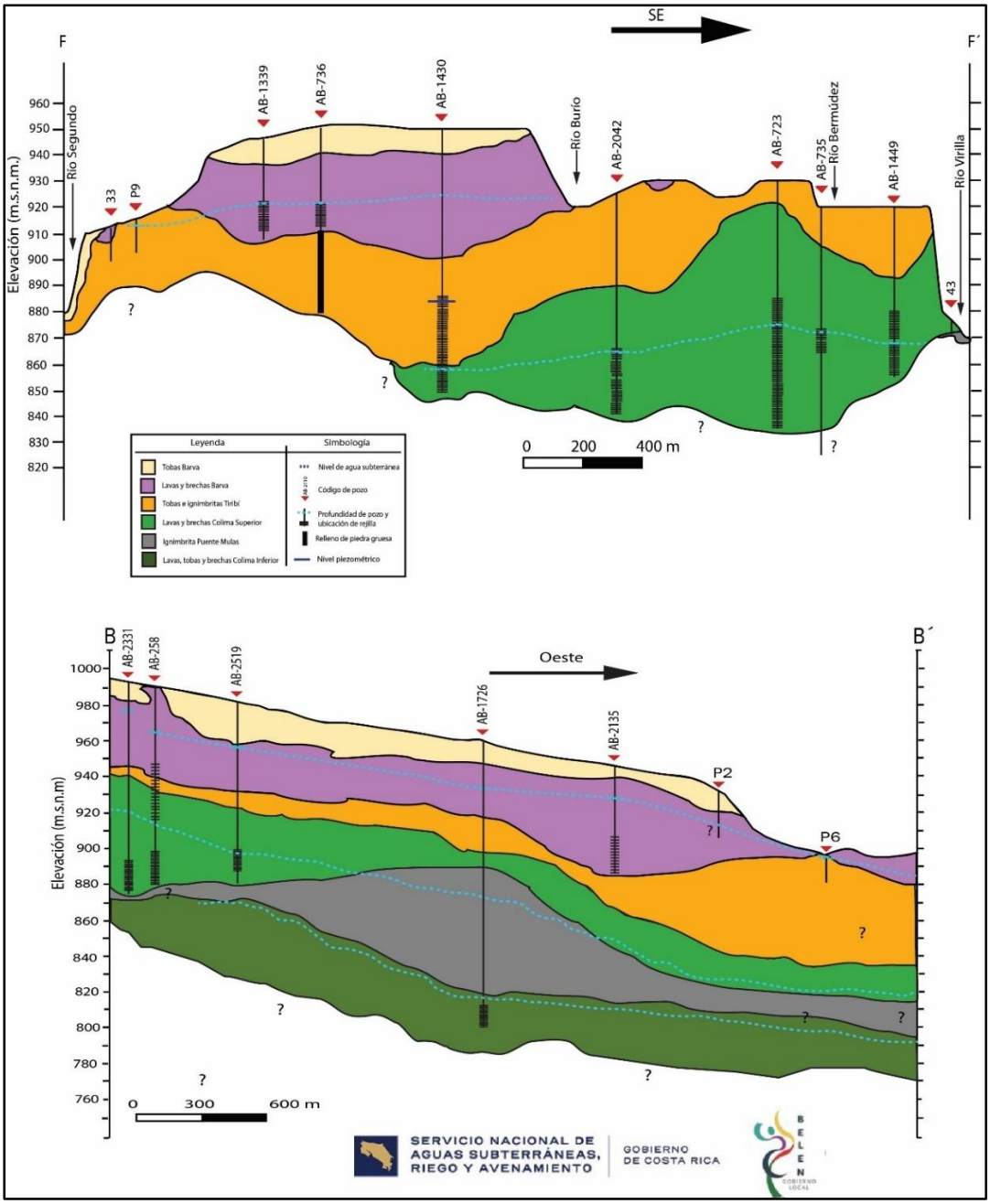


Figura 46. Perfiles hidrogeológicos F–F´ y B–B´. Hidroestratigrafía general de la zona, con el acuífero más somero en lavas y brechas de la Formación Barva, separado del acuífero más profundo en lavas y brechas Colima Superior mediante el acuitardo de tobas e ignimbritas Tiribí. Nótese la presencia de los niveles de saturación de agua subterránea con flujo preferencial al SW. En profundidad el acuífero en lavas y tobas Colima Inferior.

5.RECARGA POTENCIAL

5.1 Balance Hídrico de Suelos

Para la estimación de la recarga potencial a los acuíferos en la zona de estudio, se ha utilizado como primera herramienta la metodología desarrollada por Schosinsky (2006), la cual evalúa la recarga a partir de un balance hídrico de suelos, en el cual el agua de lluvia que se infiltra en el terreno y completa su ciclo, eventualmente puede percolar, alcanzar y recargar los niveles acuíferos.

Para el procesamiento de la información y el desarrollo de las distintas ecuaciones que involucra esta metodología, se construyeron los mapas de los distintos parámetros y se aplicó el álgebra correspondiente mediante la utilización del sistema de información geográfica ArcGis 10.5. Se utilizó un tamaño de celda de 10 x 10 metros para todos los mapas raster involucrados en este análisis tomando en consideración la escala de trabajo 1:25 000.

Por otra parte, la unidad básica de balance que se ha utilizado para determinar la recarga potencial, corresponde con los polígonos asociados a las diversas litologías en el área.

Los parámetros básicos de entrada en esta metodología se describen a continuación y se muestran los valores asignados a cada uno de ellos.

5.1.1 Kv, Kp, Kfc y Profundidad de raíces

Se elaboró el mapa de uso de suelo para todo el cantón por parte de la Geógrafa Katherine Briones Cambronero, funcionaria de la Unidad de Investigación Hidrogeológica. A partir de este mapa se determinó que los usos de suelo que predominan en la zona de estudio corresponden con urbano, mixto, pastos y pastos con árboles. Otros usos en la zona de estudio son los bosques, terrenos descubiertos como tajos y cultivos de diversos

tipos. Las áreas y porcentajes por tipo de uso se muestran en la tabla 25, mientras que la distribución de todos los usos en la figura 47.

Tabla 25. Uso del suelo en la zona de estudio.

Clasificación Uso de suelo	Área (m^2)	Porcentaje del área de estudio
Bosque	1 051 842,34	8,49
Cobertura con pastizal	1 631 336,24	13,17
Terrenos cultivados	565 438,37	4,57
Cuerpo de agua	208 734,37	1,69
Urbano	4 949 679,26	39,97
Uso mixto	2 047 247,13	16,53
Terreno descubierto	307 732,07	2,49
Pasto con árboles	1 620 706,47	13,09
Total		100

El mapa de uso de suelo se reclasificó con respecto a la tabla 26, para la asignación del parámetro Kv.

Tabla 26. Valores de Kv según uso del suelo.

Clasificación de Uso de suelo	Kv
Terreno descubierto	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Uso mixto	0,12
Cobertura con pastizal	0,18
Bosque	0,20
Urbano	0
Cuerpo de agua	0
Pasto con árboles	0,19

Fuente: Schosinsky (2006) y Ramírez (2007)

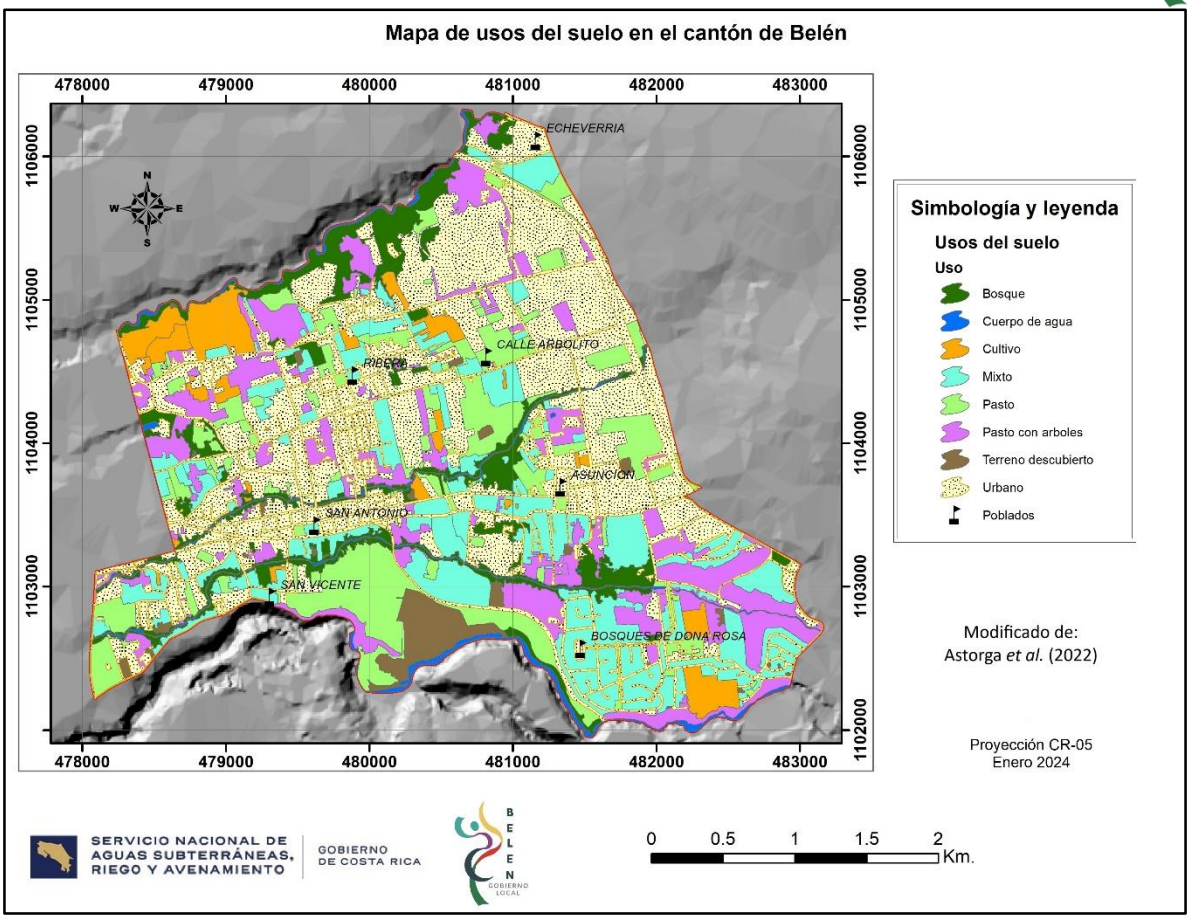


Figura 47. Mapa de usos del suelo en el cantón de Belén.

A partir del mapa de uso de suelo, también se asignaron los valores de profundidad de raíces, los cuales se muestran en la tabla 27.

Tabla 27. Valores de profundidad de raíces.

Uso de suelo	Profundidad de raíces (m)
Terreno descubierto	0
Cuerpo de agua	0
Cultivo de hortalizas Cultivos chile y tomate Maíz Tomate Cafe Café con sombra Lechuga Tiquisque y maíz Cítricos naranja	0,25 1,25 1,35 1,25 1,2 1,4 0,25 1,35 1,5
Bosque	2,5
Uso mixto	0,45
Pasto con árboles	0,45
Cobertura con pastizal	0,40
Urbano	0

Fuente: FAO (2006), Jiménez (2002), Sáchez *et al.* (2010), Laclau (2012), Schosinsky (2006), Huber & Trecaman (2000), Fonseca (2003) y Ramírez (2007).

Para definir el parámetro de Kfc, se consideraron 54 pruebas de infiltración doble anillo distribuidas en las distintas litologías cartografiadas (Anexo 2). En este caso, la asignación de valores de fc y posterior Kfc se realizó a partir de la media geométrica de los resultados de las pruebas ubicadas en cada litología, tomando como base el mapa geológico de la zona de estudio.

En el caso del parámetro Kp, se realizó un Modelo de Elevación Digital del terreno, a partir de las curvas 1:25 000 disponibles en la plataforma del SNIT, se elaboró un mapa de pendientes y se procedió a reclasificar el mapa con base a los siguientes valores (Tabla 28).

Tabla 28. Valores de Kp según la pendiente.

Descripción de pendiente	Pendiente (%)	Factor Kp
	<0,02	0,35
Muy plana	0,02 – 0,06	0,30
	0,06 – 0,3	0,25
Plana	0,3 – 0,4	0,20
	0,4 – 1	0,175
Algo plana	1 – 2	0,15
Promedio	2 – 7	0,10
Fuerte	>7	0,06

Fuente: Modificado de Schosinsky (2006).

5.1.2 Fracción de lluvia interceptada por el follaje y coeficiente de retención (Cfo)

Según la metodología Schosinsky (2006), para el caso de bosques se asume un Cfo de 0,2, mientras que para otros usos este coeficiente es de 0,12. Adicionalmente, en forma conservadora se ha asignado a las zonas con uso urbano un coeficiente de 1 tomando en consideración la impermeabilización del terreno, y para los cuerpos de agua, este coeficiente se ha asignado como 0.

5.1.3 Capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente

Para el manejo de los datos asociados con los parámetros de capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente de suelos, se ha optado por utilizar para cada litología el valor de la media geométrica de los resultados de CC, PM y DA de los ensayos de suelo que se ubican en cada una de ellas.

Se consideraron 30 muestras a lo largo del área de estudio y se tomó como base el mapa geológico, para asignar los valores por litología asociada. La información completa de las muestras se puede consultar en el Anexo 2.

Finalmente, una vez elaborados los mapas raster para cada parámetro y realizada el álgebra de mapas para estimar la recarga potencial según

Schosinsky (2006), se aplicó la metodología desarrollada por SENARA para la elaboración de estudios hidrogeológicos de planes reguladores (publicada en el periódico oficial La Gaceta No. 137 del 16 de julio del 2015), para clasificar la zona en cinco clases de recarga potencial a través del método de rango, donde los intervalos se definen tomando el valor máximo y mínimo de recarga y dividiendo entre el número de clases.

5.2 Resultados de Recarga Potencial

5.2.1 Precipitación y evapotranspiración

Como fue mencionado en el apartado 2.7 Clima, los parámetros meteorológicos de precipitación y temperatura a utilizar en el análisis de recarga potencial fueron tomados a partir de las estaciones del Instituto Meteorológico Nacional Belén (84199), Aeropuerto Juan Santamaría – media Pista (84169), Aeropuerto Pavas Este (84193) y Santa Bárbara (84197).

Para cada uno de los doce meses se generó el correspondiente mapa raster de precipitación y evapotranspiración potencial que luego se utilizó en el álgebra de mapas de la metodología. El tamaño de celda para estos raster es de 10 x 10 metros según la escala de trabajo. Para los datos de precipitación y temperatura se han construido isoyetas para cada mes a partir de la interpolación con el método kriging de los datos registrados en las distintas estaciones. A partir de estas isoyetas se han construido los mapas raster respectivos.

5.2.2 Recarga

Mediante la aplicación sistemática de la metodología desarrollada por Schosinsky (2006), se fueron obteniendo para el Cantón de Belén los distintos mapas raster con información mensual de retención de lluvia,

precipitación que infiltra, escorrentía, evapotranspiración real y humedades iniciales, finales y disponibles, cuya integración permitió determinar para cada pixel el valor de la recarga potencial mensual. La sumatoria de los doce raster de recarga potencial mensual permitió finalmente establecer la recarga potencial anual en la zona de estudio.

La tabla 29 muestra los valores de recarga potencial obtenidos para cada unidad hidrogeológica, así como el total para el cantón de Belén.

Tabla 29. Recarga potencial por unidad hidrogeológica, Cantón Belén.

Unidad hidrogeológica	Área para estimación de recarga	Caudal	Caudal
	(m^2)	(l/año)	(l/s)
Barva (Miembro Carbonal)	2811200	$1{,}0757 \times 10^9$	34,11
Barva (Miembro Bermúdez	846900	$0{,}1119 \times 10^9$	3,55
Tiribí	3125800	$0{,}9252 \times 10^9$	29,34
Colima	127500	$0{,}0198 \times 10^9$	0,63
Ignimbrita Puente Mulas	400	$0{,}0851 \times 10^6$	0,0027
TOTAL			**67,63**

Fuente: Elaboración propia con base en Schosinsky (2006).

A partir del balance hídrico de suelos se establece que, la recarga potencial total en el cantón de Belén es de 67,63 l/s. Esta recarga equivale apenas al 9,53% de la precipitación total anual en este sector (709,66 l/s).

Como se observa en la tabla 29, la mayor parte de la recarga potencial superficial se genera en tobas asociadas con el Miembro Carbonal de la Formación Barva (34,11 l/s equivalentes al 50,4%), seguida de la Unidad Tiribí con 29,34 l/s equivalentes al 43,38%. La unidad de lavas Bermúdez de la Formación Barva representa el 5,25% de la recarga potencial. La recarga en otras unidades se ubica por debajo del 1%, debido tanto a su poca extensión superficial, como al hecho que se relacionan en su mayoría con zonas descubiertas, en las que las condiciones de suelos y parámetros de recarga no son las adecuadas para la estimación.

Otro aspecto importante a mencionar es que, gran parte del área de las unidades se ha visto disminuida para la recarga, debido a que en la actualidad se encuentran impermeabilizadas por el desarrollo urbano. Esta situación es especialmente evidente en los materiales asociados con las tobas del Miembro Carbonal de la Formación Barva, en donde gran cantidad de industrias y comercio se localizan hacia el extremo noreste de los distritos Rivera y Asunción.

La figura 48 corresponde con el mapa de recarga potencial para el Cantón de Belén, el cual ha sido categorizado siguiendo la metodología desarrollada por SENARA para la elaboración de estudios hidrogeológicos de planes reguladores, publicada en el periódico oficial La Gaceta No. 137 del 16 de julio del 2015.

En la zona de estudio el valor máximo de recarga obtenido fue de 625,49 mm y el mínimo de 0 mm, por lo que, las cinco clases de recarga potencial se establecen según lo mostrado en la tabla 30.

Tabla 30. Clases de recarga potencial en función del rango.

Clase	Recarga potencial	Rango (mm)
1	Muy baja	0 – 125,098
2	Baja	125,098 – 250,196
3	Media	250,196 – 375,294
3	Alta	375,294 – 500,392
5	Muy alta	500,392 – 625,49

Se debe aclarar que, en la figura 48 las zonas que se presentan como de mínima recarga, se encuentran asociadas predominantemente con zonas urbanas o terrenos descubiertos, cuyas condiciones propias restringen la recarga potencial que en ellos se podría generar, así como, la determinación de un valor de recarga mediante el álgebra de mapas y la aplicación de la metodología Schosinsky (2006). Dentro de estos sectores también se incluyen sectores catalogados como ríos o lagunas. En todo caso, se considera que, dadas las condiciones propias de estas áreas, para efectos de

ordenamiento territorial se pueden aplicar lineamientos recomendados para áreas de baja y muy baja recarga potencial.

Las categorías de recarga potencial media predominan hacia el sur del cantón, en materiales asociados con la Unidad Tiribí, mientras que, las categorías de recarga muy alta y alta se han determinado principalmente en zonas cubiertas por tobas del Miembro Carbonal de la Formación Barva, en donde el uso de suelo predominante es mixto, de pastos y pastos con árboles dispersos.

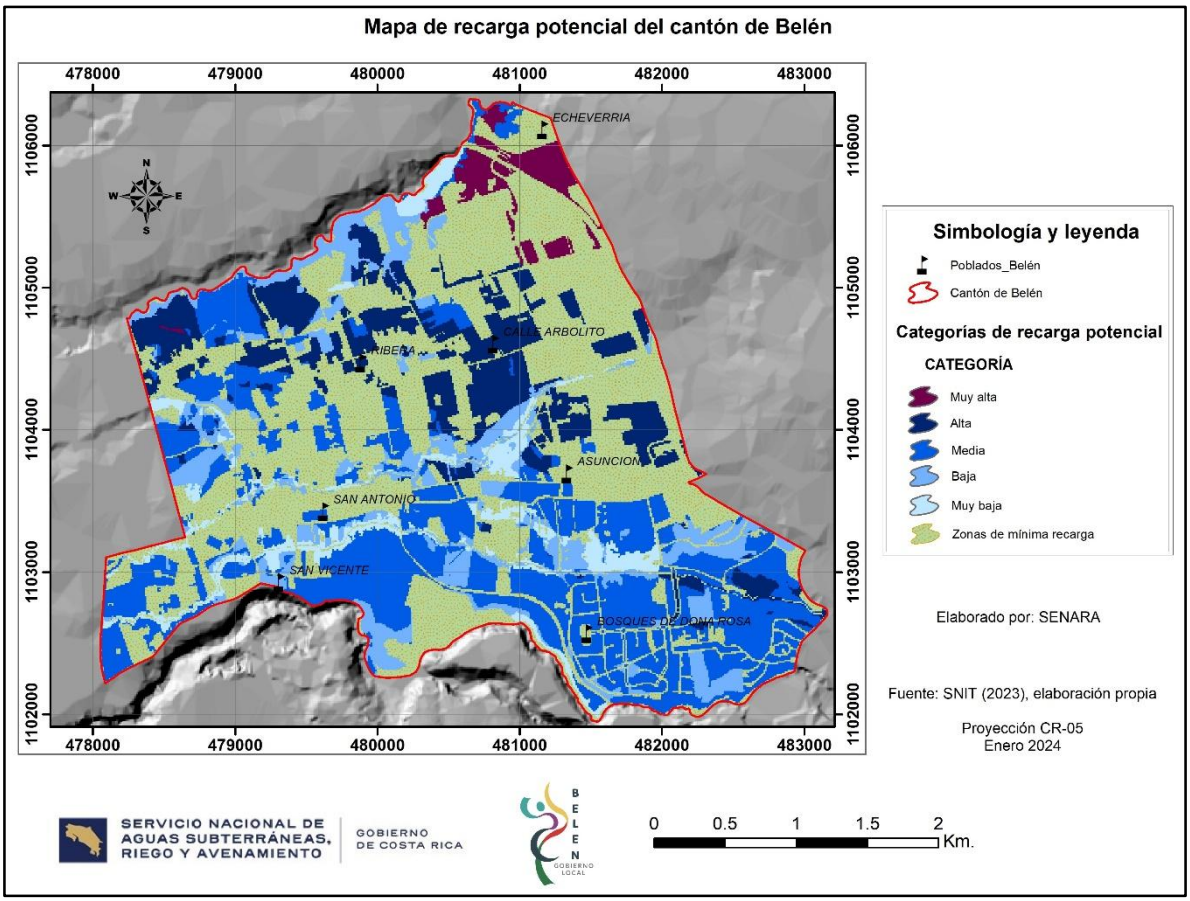


Figura 48. Mapa de recarga potencial, Cantón de Belén.

6.MODELACIÓN NUMÉRICA MATEMÁTICA DE ACUÍFEROS

La modelación numérica matemática se ha realizado para el sistema acuífero existente en el Cantón de Belén, el cual se encuentra constituido por los acuíferos Barva (Miembro Bermúdez), Colima Superior (Miembro Linda vista) y Colima Inferior (Miembro Belén), incluida la cobertura superficial de tobas del Miembro Carbonal perteneciente a la Formación Barva y los acuitardos intermedios de la Formación Tiribí y el Miembro Puente Mulas.

El modelo se ha corrido en estado estacionario, utilizando el código para modelamiento de aguas subterráneas MODFLOW 2005, basado en diferencias finitas y desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Además, se ha utilizado la interfase gráfica Visual MODFLOW Flex 10.0 64 bit con licencia adquirida a Waterloo Hydrogeologic.

6.1 Dominio del modelo y discretización horizontal

Es importante aclarar que, si bien es cierto el Cantón de Belén cuenta con un área aproximada de 12,38 km^2, para fines del modelo numérico y hacia el extremo oeste del cantón, la delimitación de las celdas activas a modelar se extendió más allá de los límites cantonales. Esto, con el objetivo de incluir al Río Virilla como una condición de frontera en ese sector, pero, además para suavizar los contornos del área de modelación, debido a que se ha identificado que, el programa tiende a generar inconsistencias hacia bordes del modelo con irregularidades muy marcadas. De esta forma, el área de celdas activas a modelar es de 13,14 km^2. (Figura 49)

En forma general se puede indicar que, la zona activa modelada se encuentra definida por los siguientes límites:

- Superficie del terreno, obtenida del modelo de elevación digital generado para el sitio, el cual se construyó a partir de las curvas de nivel 1: 25 000 disponibles en el SNIT.
- El cauce del Río Virilla hacia el extremo sur del cantón y el cauce del Río Segundo hacia el extremo norte.
- Hacia los extremos este y oeste los límites cantonales, los cuales como se mencionó anteriormente, han sido suavizados levemente para evitar las irregularidades en fronteras. Cabe mencionar que, al construir las superficies de las distintas unidades hidrogeológicas, la información utilizada de pozos, sondeos eléctricos y otros, se extendió hasta 500 metros más allá de estos límites, de manera que, el corte de las celdas activas no tuviera inconsistencias por efecto de borde en la información.
- Las superficies de los pisos, para cada una de las unidades hidrogeológicas, se construyeron a partir de la interpolación con el método kriging de las elevaciones de contactos entre formaciones geológicas, tomadas de los pozos de explotación, piezómetros de investigación, sondeos eléctricos y perfiles geológicos. Con las curvas resultantes, se generaron posteriormente imágenes raster .tiff, que a su vez fueron convertidos a archivos .grd, los cuales se pueden cargar en el programa Visual Modflow Flex 10.0.
- Para el caso del acuífero Colima Inferior, la superficie del piso se consideró igual a la superficie del piso del Acuitardo Puente Mulas menos 70 metros. Lo anterior, porque únicamente se cuenta, dentro de la delimitación del cantón, con un pozo que alcanzó el basamento sedimentario, y por lo tanto no hay información suficiente para generar esta superficie mediante interpolación. Por otra parte, con el espesor de 70 metros, se logra cubrir la extensión total de los pozos que se encuentran captando este acuífero.

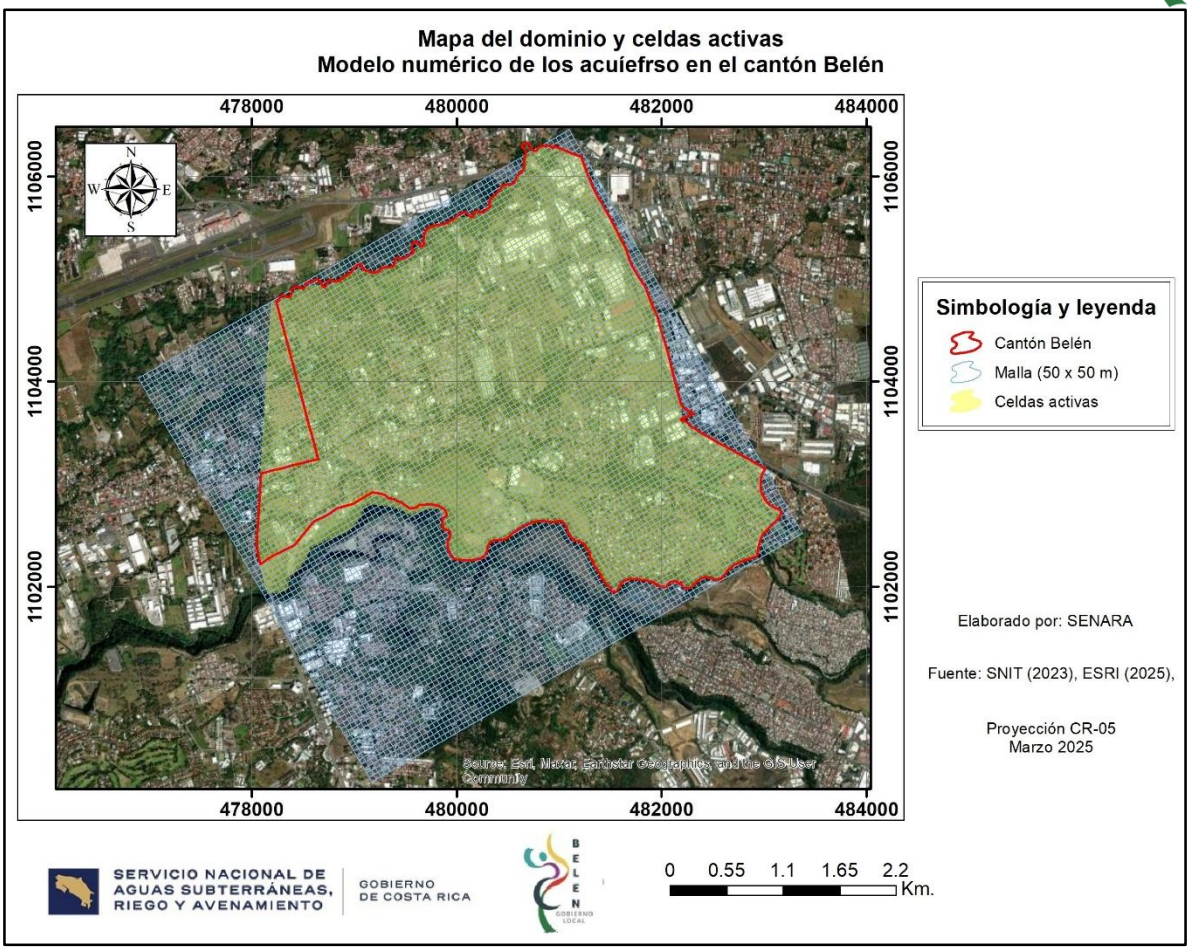


Figura 49. Mapa del dominio del modelo y celdas activas.

Para la construcción de la malla del dominio, se definió un tamaño de celda uniforme de Δx=50 m y Δy=50 m (área de 2500 m^2 por celda). Esta configuración ha dado como resultado un total de 8827 celdas organizadas en 97 columnas con orientación NW–SE y 91 filas orientadas SW–NE.

Como se observa en la figura 49, la malla del dominio abarca un área superior a la elegida para la modelación numérica, debido a que, en este paso el programa Visual Modflow Flex únicamente permite introducir la información para la construcción de polígonos regulares en la malla. Sin embargo, si se debe aclarar que, en el programa únicamente se consignan como celdas activas un total de 5256, que son aquellas contenidas dentro

de los límites de los acuíferos a modelar. Aquellas celdas, fuera de estos límites, no se consideraron dentro de los análisis matemáticos del programa.

Por otra parte, se ha dado una orientación a la malla del dominio hacia el SW, buscando de esta forma que el eje X de esta malla (filas) sea aproximadamente paralelo con la dirección de flujo principal del agua subterránea que se determinó con las curvas equipotenciales construidas para cada acuífero en el modelo hidrogeológico.

6.2 Superficies y capas del modelo

Como fue mencionado, el modelo numérico comprende los distintos acuíferos y acuitardos que se identificaron en el cantón de Belén, en ese sentido, a partir de la información de pozos, piezómetros exploratorios, sondeos eléctricos y perfiles hidrogeológicos, mediante interpolación de datos de elevación se construyeron 7 superficies u horizontes que representan la superficie del terreno y los pisos de cada unidad hidrogeológica (Figura 50).

Entre cada uno de los horizontes construidos se desarrolló una zona o capa que se asocia con las distintas unidades hidrogeológicas modeladas (Miembro. Carbonal de la Formación Barva, Miembro Bermúdez (acuífero) de la Formación Barva, Formación Tiribí (acuitardo), Miembro Linda Vista o Colima Superior (acuífero), Miembro Puente Mulas (acuitardo) y Miembro Belén o Colima Inferior (acuífero). En la figura 51 se muestra la discretización vertical del área con los horizontes construidos para el modelo numérico.

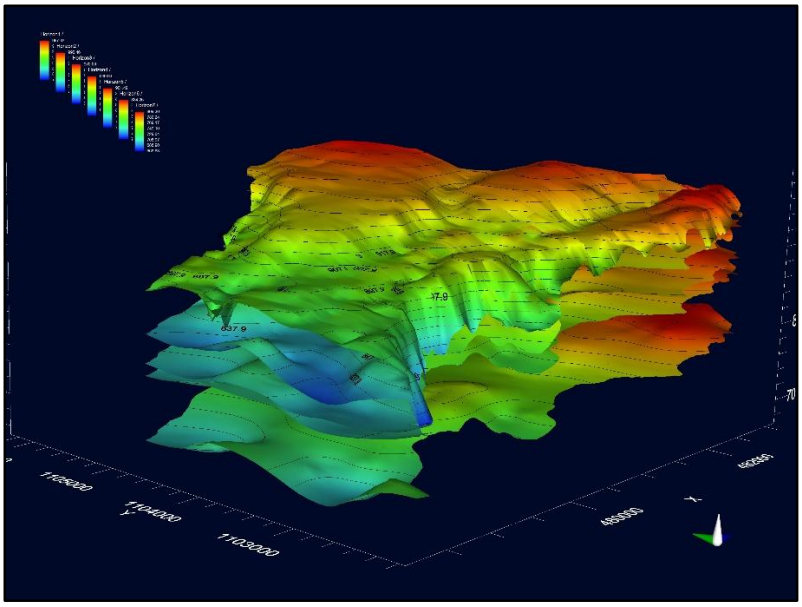


Figura 50. Superposición de horizontes generados para la superficie del terreno y los pisos de cada una de las unidades hidrogeológicas definidas en el modelo numérico.

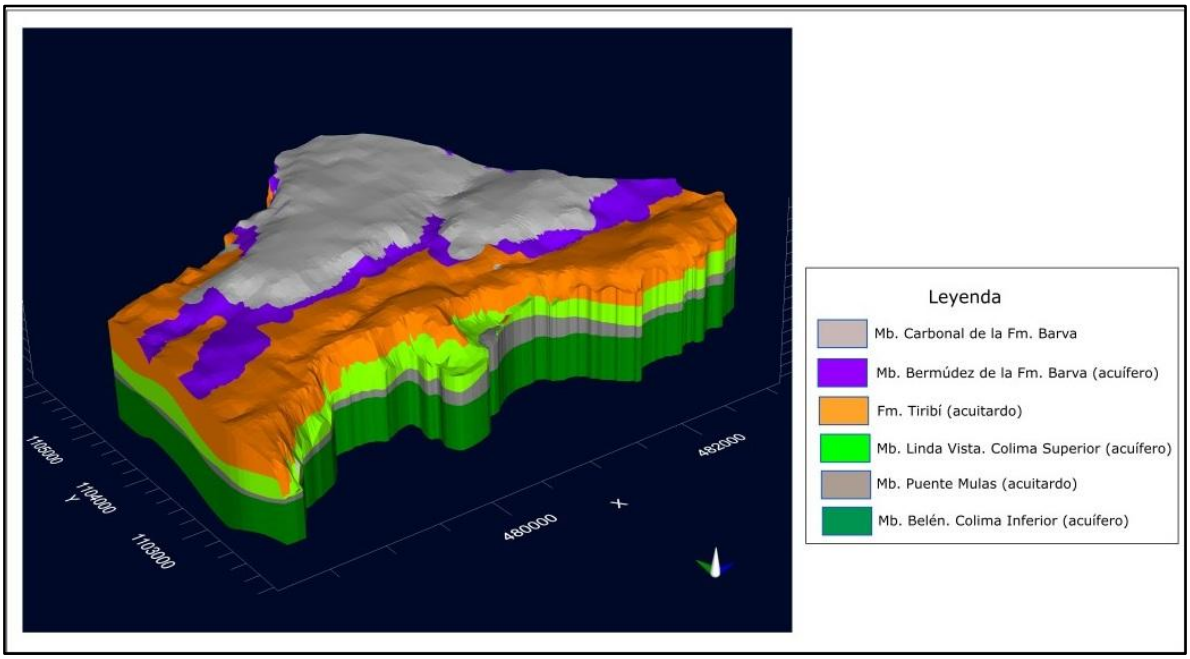


Figura 51. Zonas que representan la discretización vertical de unidades hidrogeológicas en el modelo numérico.

6.3 Propiedades hidráulicas de las capas

6.3.1 Conductividad hidráulica

Los valores de conductividad hidráulica para cada una de las unidades hidrogeológicas, han sido asignados a partir del promedio en registros de pruebas de infiltración o ensayos de bombeo que se han efectuado en los acuíferos o acuitardos, y de los cuales se tuvo conocimiento en esta investigación. En la tabla 31 se muestra el resumen de los valores de conductividad hidráulica utilizados para cada eje de la zona o unidad hidrogeológica modelada. Para el eje Z, por convención, se asigna un valor con un orden de magnitud menor al indicado al considerar una relación de anisotropía horizontal – vertical de 10:1.

Tabla 31. Valores de conductividad hidráulica utilizados en las unidades hidrogeológicas

Unidad hidrogeológica	Tipo de material	Kx (m/d)	Ky (m/d)	Kz (m/d)
Miembro Carbonal de la Formación Barva	Tobas	0.313	0.313	0.0313
Miembro Bermúdez de la Formación Barva (acuífero)	Lavas fracturadas	20	20	2
Formación Tiribí (acuitardo)	Tobas e ignimbritas	$3{,}92\times10^{-10}$	$3{,}92\times10^{-10}$	$3{,}92\times10^{-11}$
Colima Superior (acuífero)	Lavas fracturadas	75	75	7,5
Miembro Puente Mulas (acuitardo)	Tobas e ignimbritas	$5{,}5\times10^{-10}$	$5{,}5\times10^{-10}$	$5{,}5\times10^{-11}$
Colima Inferior (acuífero)	Lavas fracturadas y tobas	20	20	2

Fuente: Pruebas de infiltración o pruebas de bombeo en pozos o piezómetros de exploración.

Cabe mencionar que, para el caso de las unidades Tiribí y Puente Mulas, los valores de conductividad hidráulica asignados se ubican en el orden de 10^{-10} y 10^{-11} m/d, precisamente con el objetivo de conferir a estas unidades el comportamiento de acuitardo. Por otra parte, en las unidades

acuíferas el valor de k se ha ajustado levemente con respecto al promedio y siempre dentro del mismo orden de magnitud, con el objetivo de lograr una mejor correlación entre los datos de cargas simulados por el programa y los monitoreados en la red de pozos.

6.3.2 Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico

La modelación numérica realizada para el escenario actual fue desarrollada en estado estacionario, en el cual no hay variación de la carga con respecto al tiempo y por lo tanto los valores de coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico no son considerados por la ecuación de flujo al momento de estimar las cargas hidráulicas en cada celda del modelo. Debida a lo anterior, para efectos del modelo del escenario actual, se ha optado por dejar los valores predeterminados que incorpora el programa Visual Modflow Flex para coeficiente de almacenamiento (0,1) y rendimiento específico (Sy=0,2).

Es importante aclarar que, si bien es cierto para el modelo en estado estacionario no se han consideran los valores de coeficiente de almacenamiento, a partir de las características hidráulicas observadas, la condición de confinamiento si ha sido definida para cada una de las unidades hidrogeológicas o zonas que conforman el modelo. De esta forma, las zonas Carbonal y Bermúdez han sido consideradas como unidades libres o inconfinadas, mientras que, para las unidades Tiribí, Colima Superior, Puente Mulas y Colima Inferior se han considerado como confinadas.

6.4 Condiciones de frontera

6.4.1 Recarga superficial

Para el área de la modelación numérica se ha definido en cada unidad hidrogeológica, la recarga potencial anual con base en la metodología Schosinsky (2006). Estos valores de recarga, cuya información puede

observarse en la tabla 32, se ingresan en el programa de modelación numérica expresados en milímetros por año.

Tabla 32. Recarga potencial anual de las unidades hidrogeológicas expresada en milímetros por año

Unidad hidrogeológica	Recarga potencial anual (mm/año)
Miembro Carbonal de la Formación Barva	382,64
Miembro Bermúdez de la Formación Barva (acuífero)	132,19
Formación Tiribí (acuitardo)	296
Colima Superior (acuífero)	155,82
Miembro Puente Mulas (acuitardo)	212,86

El valor de esta condición de frontera tipo 2 le es asignada en el modelo desde la parte superior de las celdas que conforman el dominio activo de cada unidad a modelar. Es importante aclarar, que este valor representa la recarga potencial anual, pero se basa en los promedios mensuales, de tal forma que, incluye tanto los períodos de estiaje como los picos de la época lluviosa.

Ahora bien, dado que las unidades Tiribí y Puente Mulas han sido consideradas en el modelo como acuitardos con muy baja conductividad hidráulica, para no generar inconsistencias de cargas se ha optado en el modelo por no aplicarles recarga superficial a estas zonas.

6.4.2 Celdas activas de flujo

El dominio activo del modelo en donde se determinarán las cargas y flujo del agua subterránea, corresponde exclusivamente con la zona amarilla mostrado en la figura 49. Celdas fuera de esta zona amarilla forman parte de la malla del dominio del modelo, pero en ellas no se lleva a cabo la determinación de cargas hidráulicas por parte del programa.

6.4.3 Cargas Constantes

Las cargas constantes, en un modelo numérico, representan caudales que deben ingresar o salir del sistema para lograr mantener en un sitio específico una carga hidráulica determinada. En ese sentido, para modelar los caudales de recarga y descarga lateral que existe en los tres acuíferos definidos en este modelo (Bermúdez, Colima Superior y Colima Inferior), hacia los sectores este y oeste, en el límite de las celdas activas, se han delimitado líneas de carga constante a las cuales se asignaron los valores de carga hidráulica a partir de las equipotenciales de flujo del agua subterránea que fueron elaboradas en el modelo hidrogeológico para cada acuífero. La ubicación de estas líneas de carga constante puede observarse con mayor detalle en la figura 53.

6.4.4 Ríos

Los cauces principales, en el Cantón de Belén, corresponden con el Río Segundo, Río Virilla, Río Bermúdez y Río Burío (Quebrada Seca). Estos ríos fueron considerados en el modelo como una frontera tipo 3 de río, para las cuales se ha optado porque el programa calcule en forma automática los valores de conductancia en función de las características morfológicas e hidráulicas de cada cauce. En estas fronteras, se debe asignar como parámetros físicos las elevaciones del fondo del río (*bottom*), el espejo de agua (*stage*) y el ancho del cauce, y como parámetro hidráulico el valor de conductividad hidráulica representativo. En la asignación de los parámetros físicos han sido considerados el modelo de elevación digital de la zona (archivo .grd) junto con las fotografías aéreas disponible.

6.4.5 Pozos de extracción

La información de pozos de extracción fue tomada a partir de los registros existentes en la base de datos del SENARA, sin embargo, dados los requerimientos del programa, se incluyeron exclusivamente aquellos pozos

para los cuales se logró establecer con adecuada certeza los valores de profundidad, ubicación de rejillas y caudales de extracción. A partir de esto, la base de datos de pozos de extracción ingresada en el Visual Modflow Flex consiste en un total de 145 pozos, dentro de los que se incluyen los pozos utilizados tanto por la Municipalidad de Belén como por Acueductos y Alcantarillados.

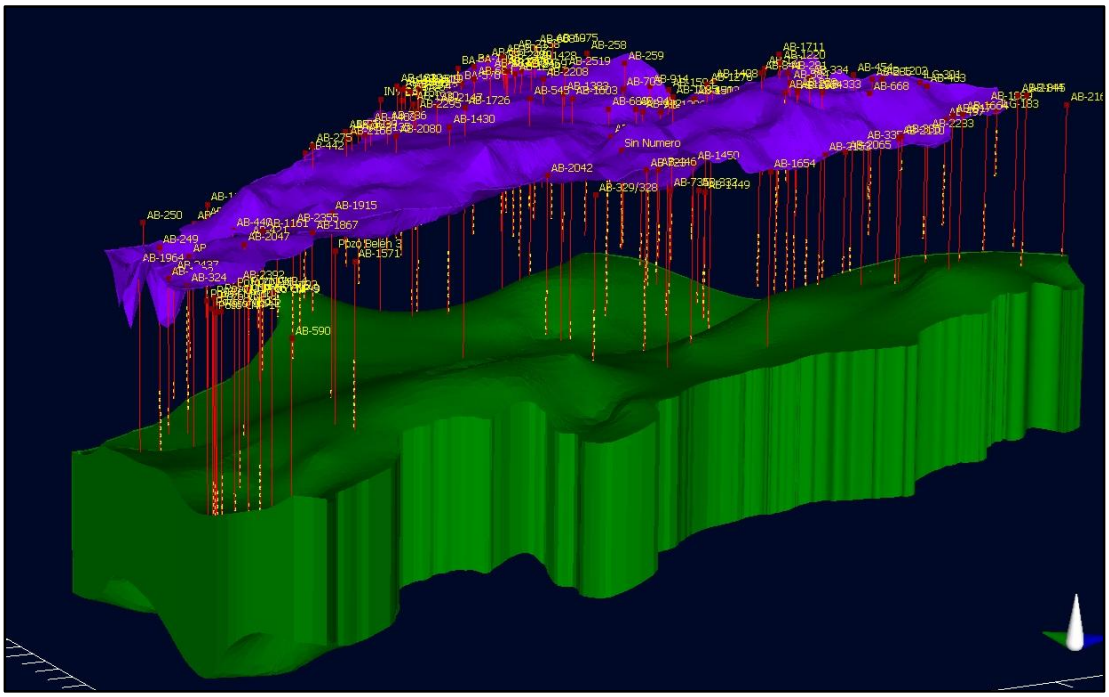


Figura 52. Pozos de extracción considerados en el modelo numérico del Cantón de Belén. Zona en morado corresponde con el acuífero del Miembro Bermúdez de la Formación Barva y la zona en verde corresponde con el Acuífero de Colima Inferior. Las zonas o unidades hidrogeológicas intermedias se han removido para una mejor visualización.

La figura 52 muestra la totalidad de pozos que han sido incorporados como parte de la extracción de agua subterránea en el cantón. La base de datos con información de caudales, profundidades y ubicación de rejillas puede revisarse en el anexo 5.

6.4.6 Manantiales

En el Cantón de Belén se cuenta con registros de manantiales asociados a los acuíferos Bermúdez y Colima Superior. Estos manantiales se han incorporado al modelo numérico utilizando la herramienta de frontera drain, de manera que, representen para cada acuífero asociado un caudal de salida igual a la descarga del acuífero en estos manantiales. En total, para el acuífero del Miembro Bermúdez se han considerado 19 manantiales y para el Acuífero Colima Superior 7 manantiales. Dentro de estos manantiales se incorporan las captaciones de la Municipalidad de Belén, Acueductos y Alcantarillados y concesiones o dictámenes de tipo particular. La información de estos manantiales se incluye dentro del anexo 5.

Las condiciones de frontera descritas anteriormente pueden observarse en la figura 53.

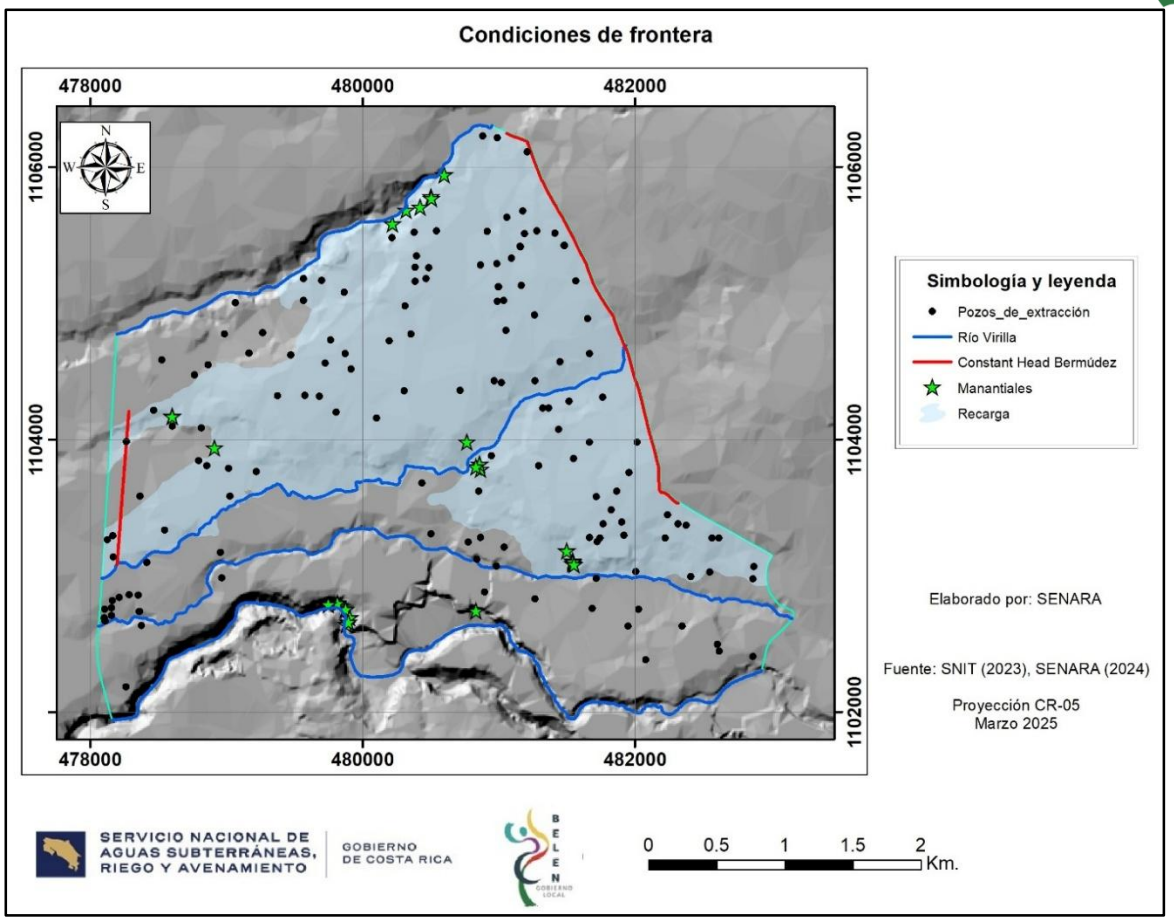


Figura 53. Condiciones de frontera en el modelo numérico. Las cargas constantes (constant head) para los acuíferos Colima Superior e Inferior no se observan por ubicarse en profundidad.

6.4.7 Tiempo de modelación

El tipo de corrida inicial en el modelo numérico es estacionario, para el cual el programa por defecto asigna un tiempo de modelación de 1 día. Por otra parte, la fecha de inicio para el modelo numérico fue configurada para el 01 de enero del 2023, que corresponde con el tiempo cero en la modelación.

6.5 Escenario actual (datos climáticos al 2017)

El escenario actual considera las condiciones de frontera y propiedades hidráulicas descritas anteriormente. En ese sentido, la recarga potencial estimada fue obtenida a partir de la información climática disponible, que en este caso considera los registros de precipitación y temperatura hasta el año 2022.

6.5.1 Dirección de flujo, gradiente y cargas hidráulicas

Las figuras 55, 59 y 61 representan las curvas equipotenciales generadas por la modelación numérica para cada uno de los acuíferos existentes en el Cantón de Belén.

6.5.1.1 Miembro Bermúdez de la Formación Barva

Como se observa en las figuras 54 y 55, las equipotenciales generadas por el programa muestran una dirección de flujo predominante hacia el sur-oeste, con gradientes hidráulicos entre 0,13 a 0,01. Los gradientes hidráulicos menores se ubican hacia el centro del cantón, mientras que, los gradientes mayores se ubican hacia ciertas zonas de descarga del acuífero como es la cercanía con algunos manantiales o cauces como el Río Segundo. Es importante mencionar que, hacia el extremo noreste del cantón y en el sector central, varias curvas equipotenciales presentan una configuración que evidencia el comportamiento efluente de los cauces de los ríos Segundo y Burío (Quebrada Seca) en esos sectores (el acuífero les aporta agua). En forma general, se observa una coincidencia adecuada entre las equipotenciales generadas por el modelo numérico y las construidas en el apartado de modelo hidrogeológico (sección 4.2.3).

Las figuras 56 y 57 representan dos secciones a lo largo de las filas 65 y 77 de la malla del dominio. En estas se logra observar la discretización vertical del modelo y la ubicación de la tabla de agua asociada con el Acuífero Bermúdez. Nótese como la profundidad de agua subterránea asociada con

este acuífero disminuye notablemente hacia el suroeste del cantón, en donde incluso se asocia como manantiales importantes como es el caso de Ojo de Agua (Figura 56, fila 77)

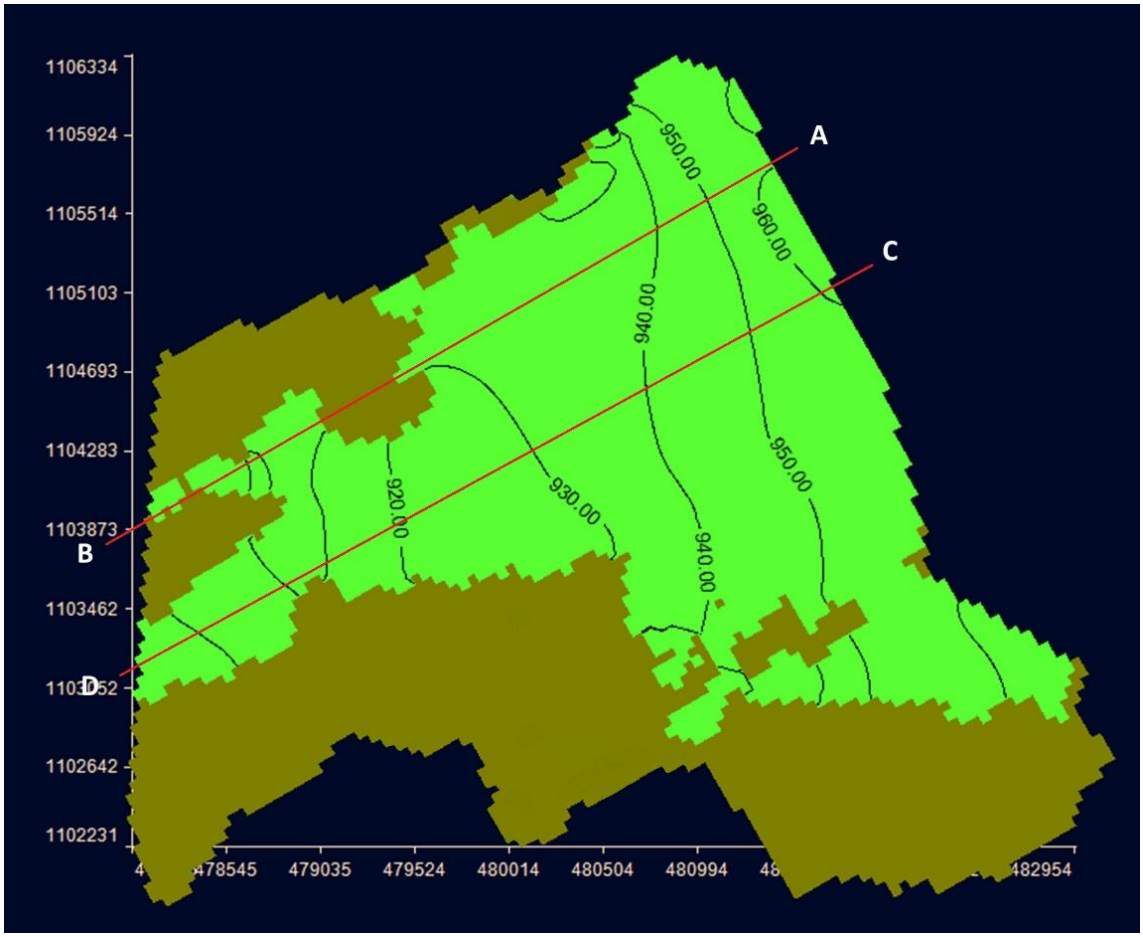


Figura 54. Salida original de equipotenciales para el acuífero Bermúdez en el programa Visual Modflow Flex. Nótese la ubicación de las secciones A–B (Fila 77) y C–D (Fila 65).

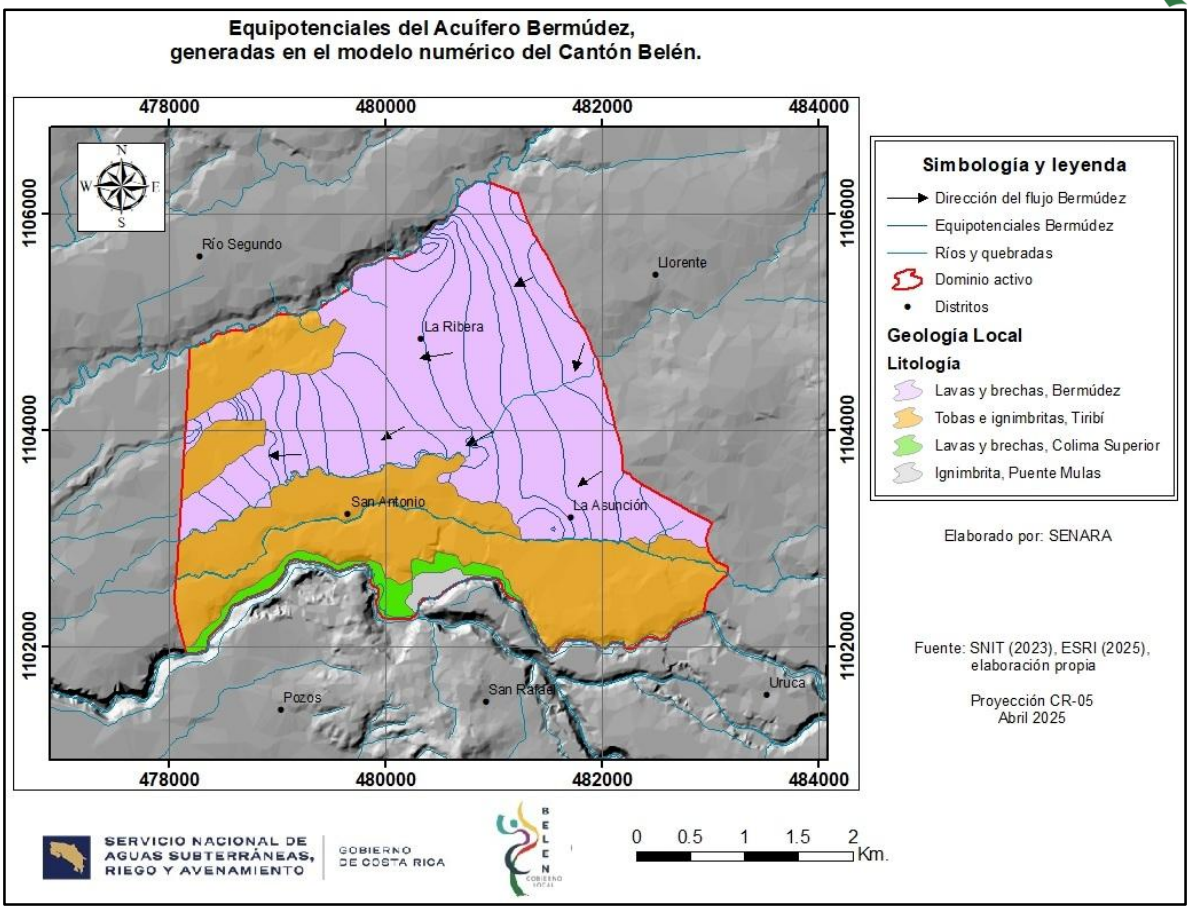


Figura 55. Equipotenciales modeladas para el Acuífero Bermúdez. Nótese la tendencia general de las líneas de flujo hacia el suroeste. Por otra parte, la configuración de varias equipotenciales pone en evidencia el comportamiento efluente de los cauces de los ríos Segundo y Burío en el extremo noreste y central del cantón (el acuífero descarga agua a estos cauces).

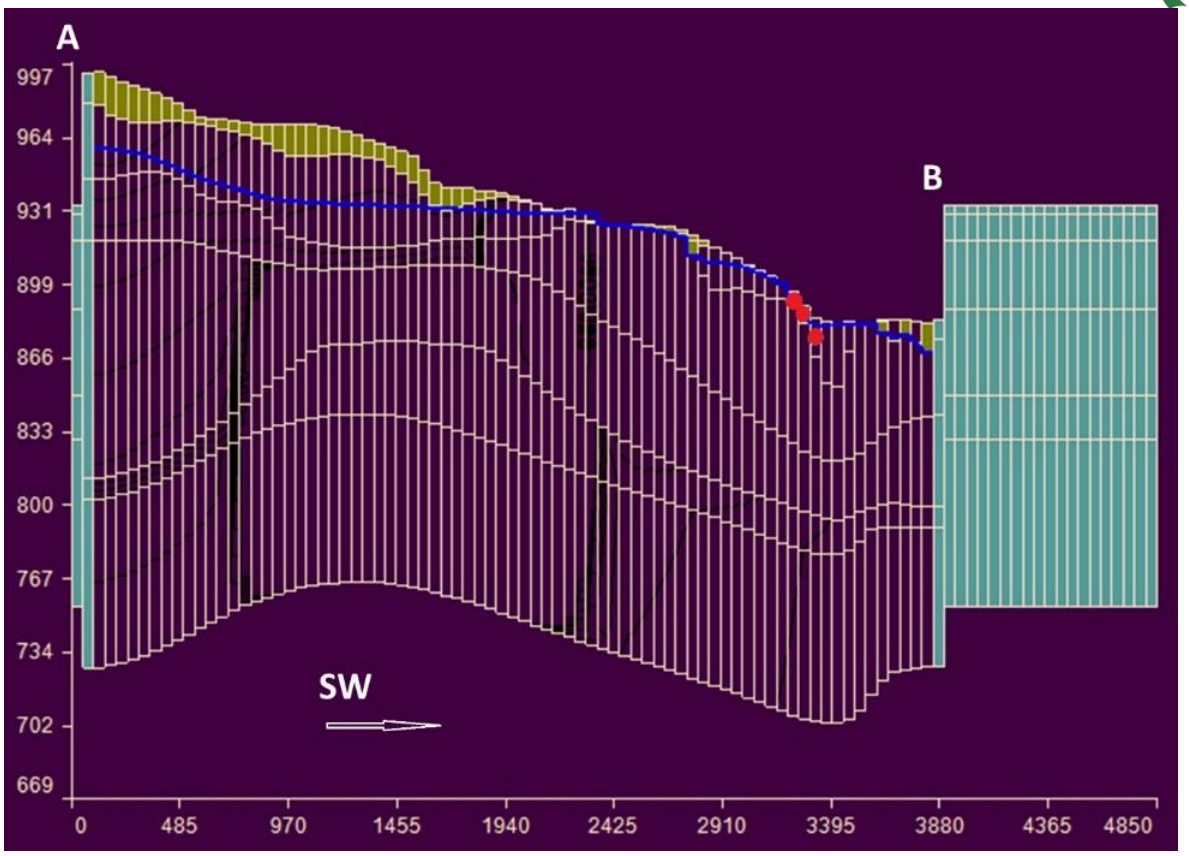


Figura 56. Perfil a lo largo de la fila 77. Se observa las discretización vertical de las unidades hidrogeológicas y la tabla de agua asociada con el Acuífero Bermúdez (línea azul en zona 2). Hacia el suroeste este nivel se localiza muy cerca de la superficie e incluso se asocia con algunos manantiales captados (Ojo de agua – puntos rojos).

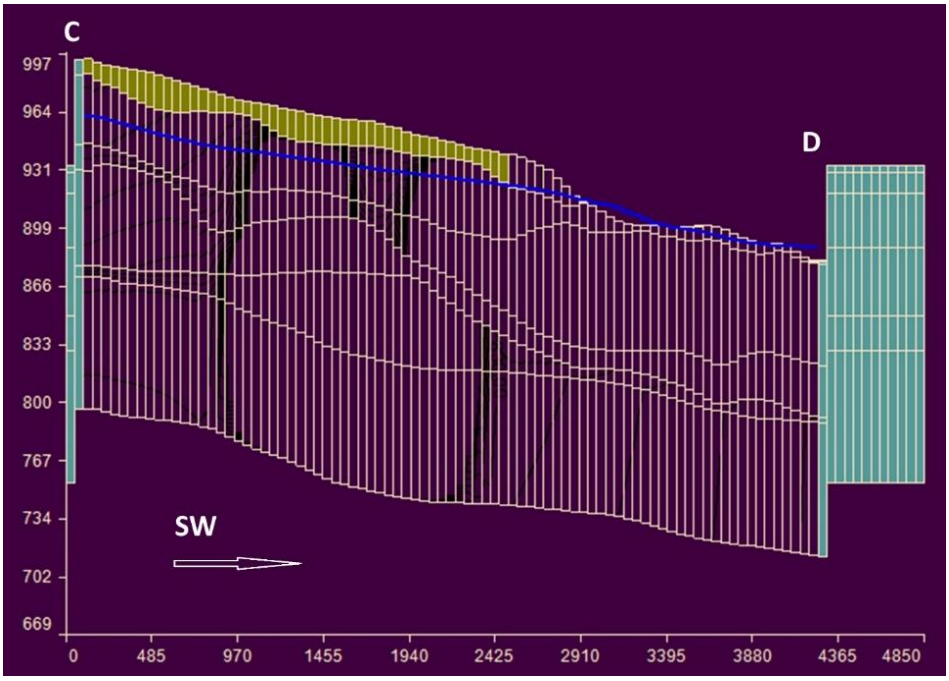


Figura 57. Perfil a lo largo de la fila 65. Nótese que la mayor parte de la zona 1 (Miembro Carbonal) se encuentra seca (celdas marrones), a excepción de un sector hacia la parte central en donde se observa comunicación hidráulica con la tabla de agua de la zona 2 (Acuífero Bermúdez). En este mismo sector se observa la tabla levemente sobre la superficie, lo cual podría asociarse con la posible presencia de manantiales no registrados en las bases de datos.

- *Cargas hidráulicas (Modeladas vs. Observadas / Miembro Bermúdez)*

El gráfico de la figura 58 representa la correlación entre cargas hidráulicas modeladas por el programa y las cargas hidráulicas que fueron medidas en los pozos de monitoreo. Para la calibración de este acuífero la red de monitoreo utilizada consta de 13 sitios, incluyendo pozos de extracción y piezómetros de exploración. Según se observa en el gráfico, el coeficiente de correlación presenta un buen ajuste con un valor de 0,97 y el porcentaje de error se ubica bajo el 10% (8,89%). Los mejores ajustes se dan hacia la parte alta del cantón (extremo noreste), mientras que, hacia la parte central es donde se observan las mayores divergencias, sin embargo, es importante señalar que, precisamente en este sector central del cantón es donde se cuenta con menos pozos para el monitoreo de cargas en sitio.

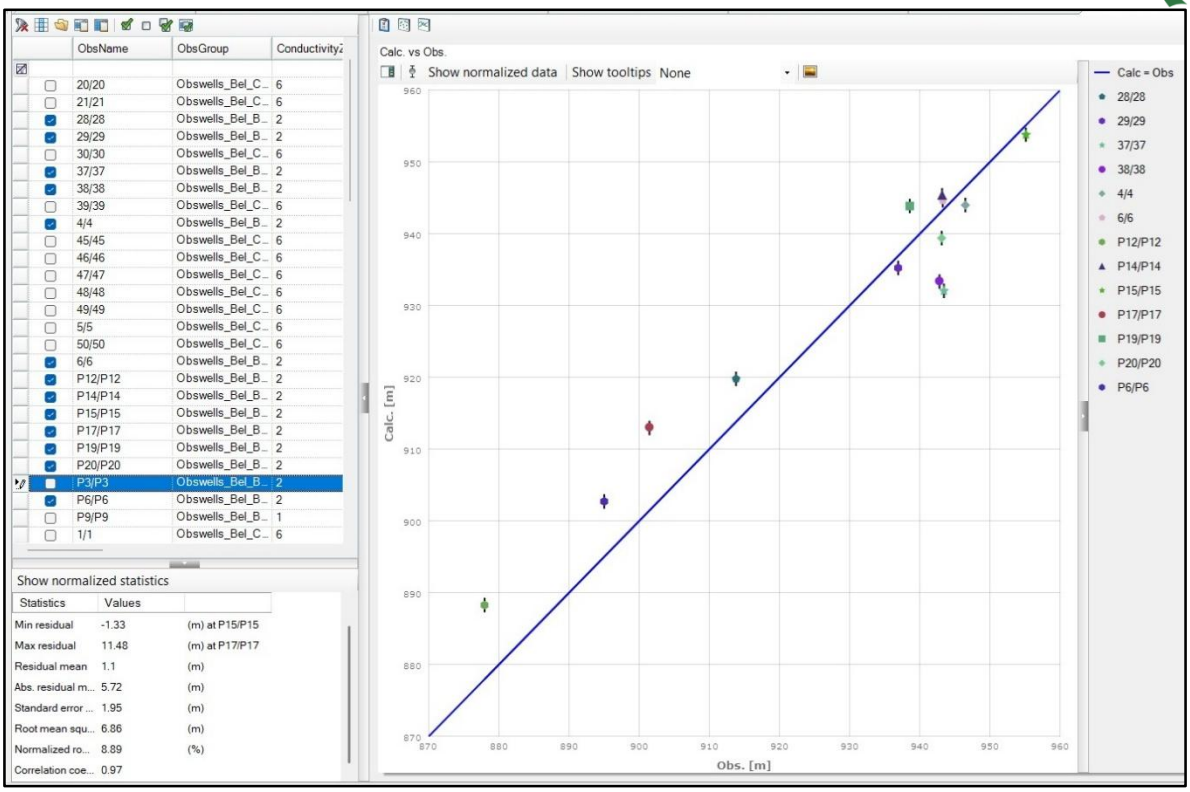


Figura 58. Gráfico de correlación entre cargas hidráulicas modeladas y cargas hidráulicas medidas en campo para el Acuífero Bermúdez.

6.5.1.2 Colima Superior

La figura 59 corresponde con las equipotenciales generadas por el programa de modelación para el acuífero desarrollado en lavas y brechas de Colima Superior.

La dirección de flujo predominante es hacia el suroeste y presenta un gradiente hidráulico entre 0,016 a 0,03. Con respecto al cauce del Río Virilla, las curvas equipotenciales muestran un comportamiento de tipo efluente del cauce (el acuífero descarga al río), lo cual es particularmente evidente en la zona de Puente Mulas y coincide con el modelo hidrogeológico conceptual que se tiene para este cauce.

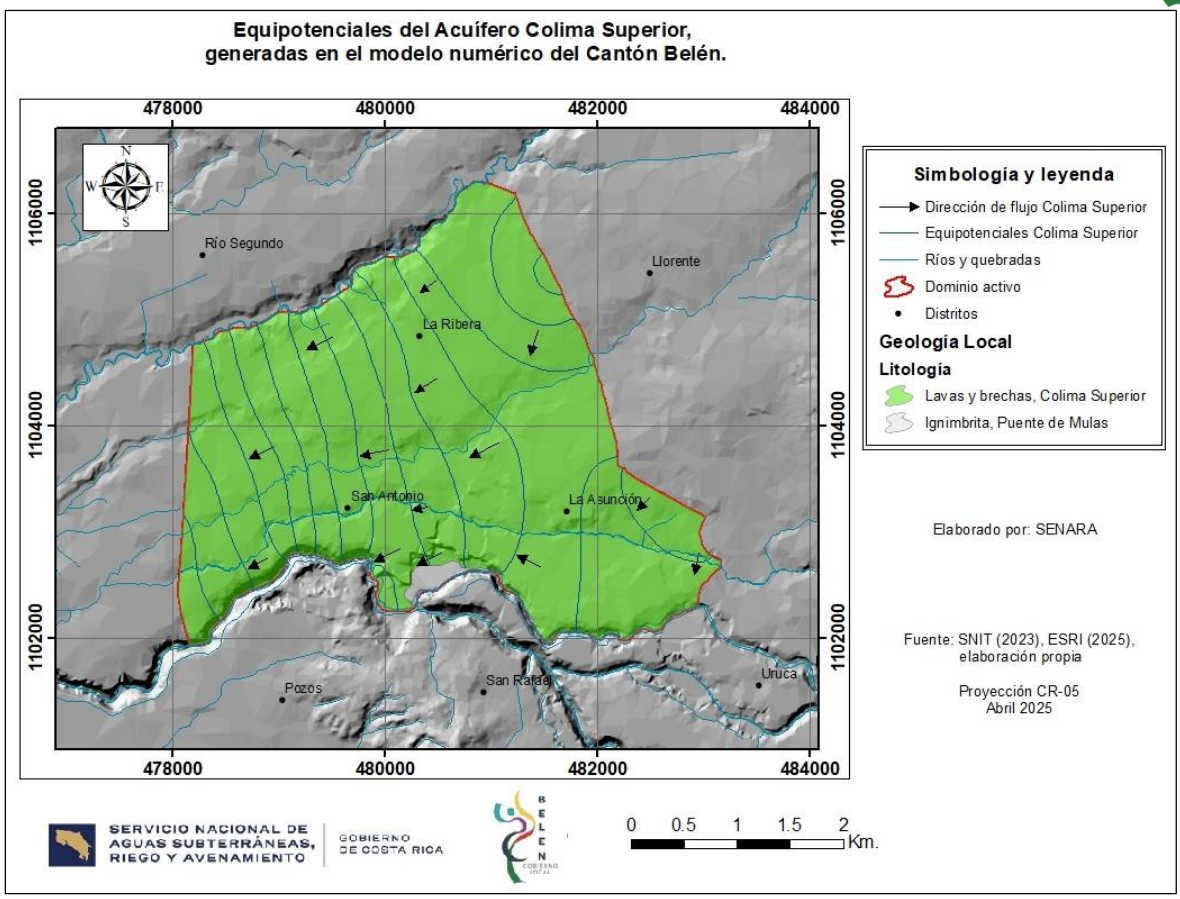


Figura 59. Equipotenciales modeladas para el Acuífero Colima Superior. Dirección de flujo hacia el suroeste. La descarga hacia el Río Virilla se evidencia principalmente en el sector de Puente Mulas, al sur del cantón.

En general se considera que, existe una adecuada coincidencia entre las equipotenciales generadas por el modelo numérico y las construidas en el apartado de modelo hidrogeológico para este acuífero (sección 4.2.1).

- *Cargas hidráulicas (Modeladas vs. Observadas / Colima Superior)*

La correlación entre cargas hidráulicas modeladas y medidas en pozos para el acuífero Colima Superior se muestra en la figura 60. En total, para la calibración de los datos de este acuífero se utilizaron los registros de nivel de 21 pozos de extracción. Se considera que, existe un buen ajuste de los datos al tomar en consideración el coeficiente de correlación de 0,96 con un

porcentaje de error menor al 10% (8,65%). Es importante mencionar que, hacia la parte central del cantón no se cuenta con pozos de monitoreo, de manera que, hacia estos sectores se limita la capacidad de correlación con las cargas hidráulicas generadas por el programa.

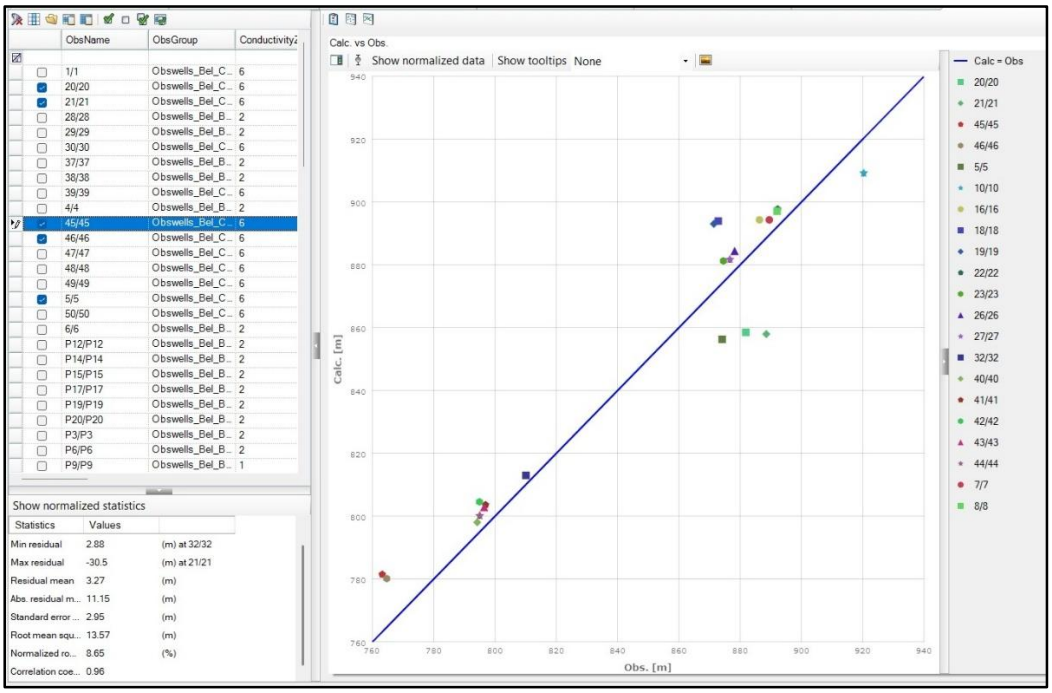


Figura 60. Gráfico de correlación entre cargas hidráulicas modeladas y cargas hidráulicas medidas en campo para el Acuífero Colima Superior.

6.5.1.3 Colima Inferior

La figura 61 muestra las equipotenciales modeladas por el programa para el Acuífero Colima Inferior. Su dirección de flujo predominante es también hacia el suroeste con gradientes hidráulicos entre 0,005 a 0,05 aproximadamente. En este acuífero las equipotenciales no muestran ningún tipo de relación con los cursos de aguas superficiales, pero si resulta interesante la concentración del flujo hacia el extremo inferior suroeste del modelo, en donde se ubican los mayores gradientes y coincide con la zona en la que actualmente se ubican varios pozos del AyA.

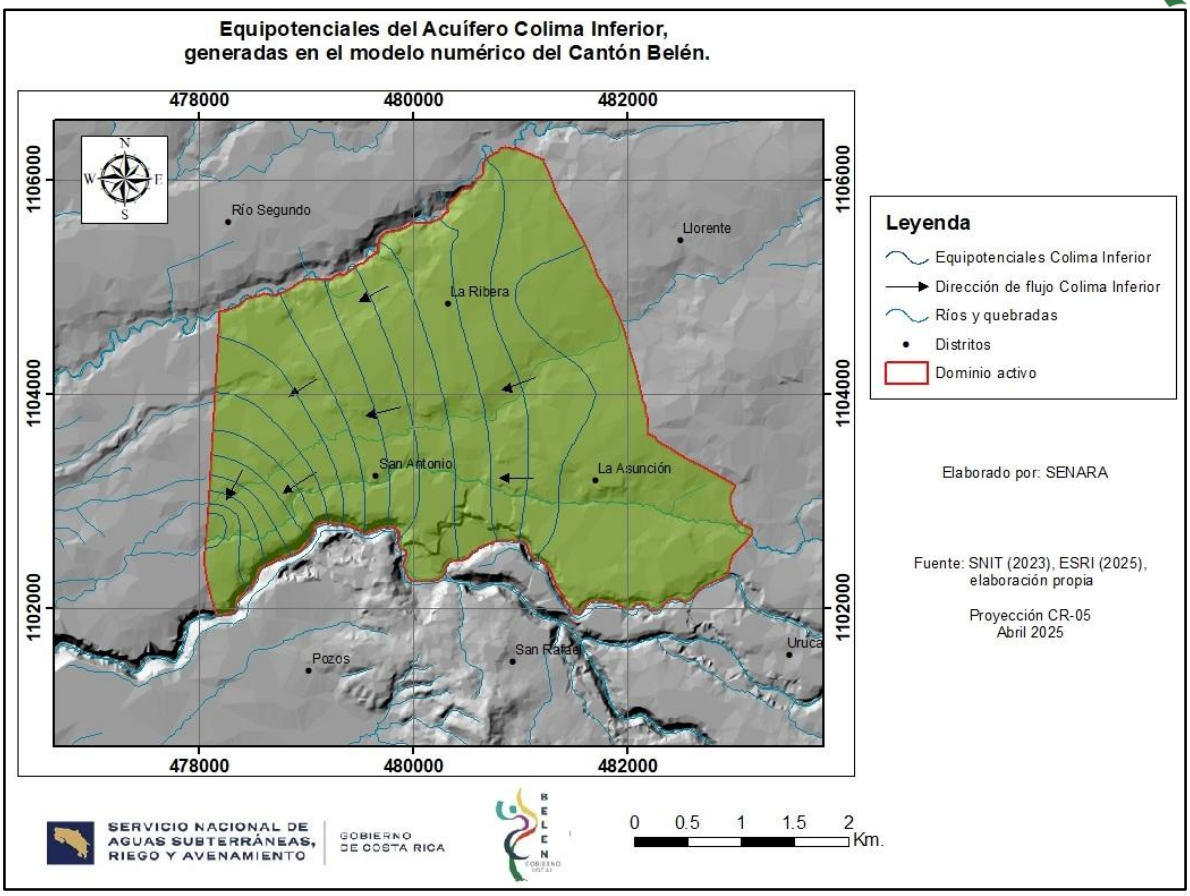


Figura 61. Equipotenciales modeladas para el Acuífero Colima Inferior. Dirección de flujo hacia el suroeste. En este caso las equipotenciales no muestran interacción con los cursos de agua superficial. Nótese la concentración de flujo hacia el extremo suroeste del dominio.

- *Cargas hidráulicas (Modeladas vs. Observadas / Colima Inferior)*

La correlación entre cargas hidráulicas modeladas y observadas para Colima Inferior se observa en el gráfico de la figura 62. Es importante mencionar que, en este acuífero es donde se cuenta con la menor cantidad de pozos para calibración, lo cual evidentemente afecta el análisis comparativo que se realiza, así como los porcentajes y coeficientes de correlación obtenidos. Por ejemplo, hacia los sectores arriba de las cotas 820 únicamente se cuenta con dos pozos para comparación. Aun así, en este

acuífero se obtuvo un ajuste adecuado con un coeficiente de correlación de 0,96 y un porcentaje de error bajo el 10% (9,7%), aunque es posible que la falta de más datos para comparación pueda estar influenciando el incremento en el porcentaje de error.

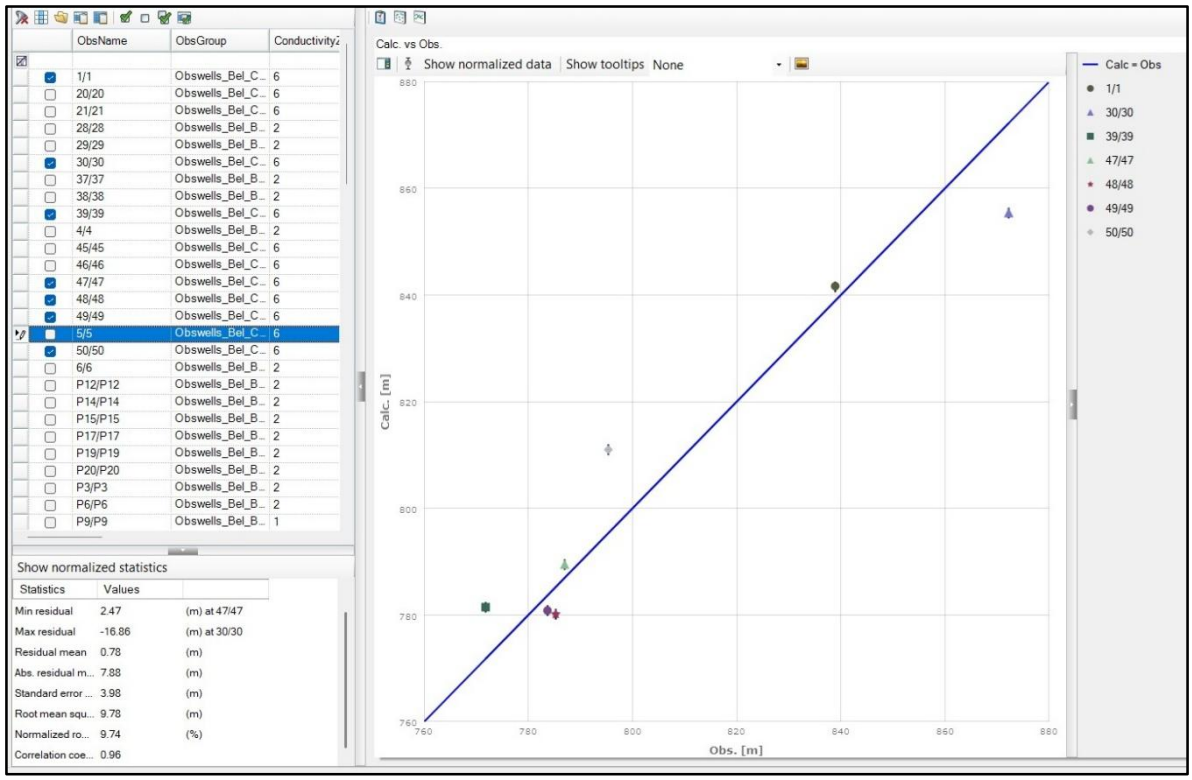


Figura 62. Gráfico de correlación entre cargas hidráulicas modeladas y cargas hidráulicas medidas en campo para el Acuífero Colima Inferior.

6.5.2 Balance de agua subterránea

Una vez corrido con éxito el modelo numérico, el balance de masas, que representa las entradas y salidas de agua subterránea a cada una de las unidades hidrogeológicas presentes en el sistema acuífero que se desarrolla en el cantón de Belén, es generado automáticamente por el programa Visual Modflow Flex como uno de los productos en la ventana de resultados. La figura 63 muestra los resultados del balance de masas general de la modelación numérica en el cantón de Belén, y en ella se puede observar que

el cambio en el almacenamiento del sistema es igual a cero, con las entradas y salidas totales equilibradas, tal y como corresponde a un análisis en estado estacionario.

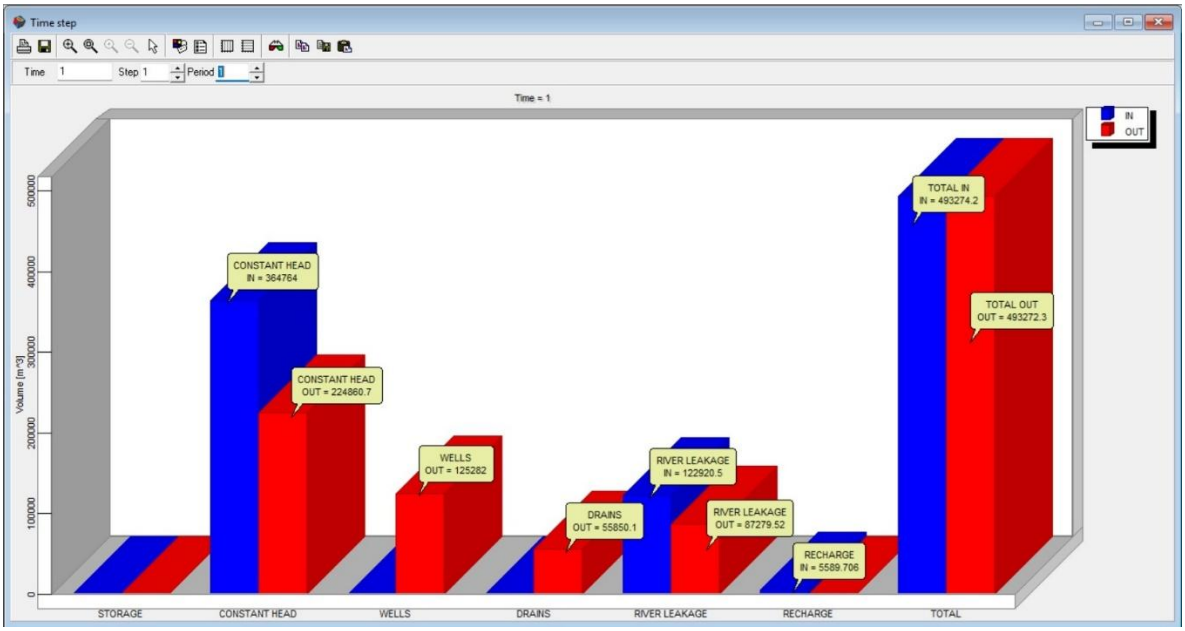


Figura 63. Gráfico de balance de masas para el sistema acuífero total en el escenario actual del Cantón de Belén (valores en m^3/d). Nótese las entradas al sistema representadas por barras de color azul y las salidas, representadas por barras de color rojo.

La tabla 33 muestra un resumen de los datos obtenidos en el balance de aguas subterráneas totales del sistema acuífero.

Tabla 33. Balance de aguas subterráneas totales del sistema acuífero.

	Almacenamiento	Recarga lateral (constant head)	Pozos	Ríos	Manantiales (Drains)	Recarga superficial	Total
Entradas (m^3/d)	0	364764	0	122920,5	0	5589,70	493274,2
Salidas (m^3/d)	0	224860,7	125282	87279,52	55850,1	0	493272,3
Entradas (l/s)	0	4221,8	0	1422,69	0	64,69	5709,19
Salidas (l/s)	0	2602,55	1450.02	1010,17	646,4	0	5709,17

Fuente: Modelación numérica actual.

Como se observa en el gráfico de la figura 63 y la tabla 33, la principal entrada al sistema se genera por recarga lateral, aunque también los ríos, con su comportamiento efluente e influente a lo largo de sus cauces, tienen una influencia muy importante en cuanto a la entrada y salida de agua subterránea de los acuíferos. Los manantiales y pozos por su parte se representan únicamente como salidas de agua subterránea desde los acuíferos. Finalmente, es de resaltar que, la recarga superficial con 6,.69 l/s, representa únicamente el 1,13% de las entradas al sistema.

6.5.2.1 Balance de agua subterránea por Unidad Acuífera

La tabla 34 presenta el resumen de las entradas y salidas de agua subterránea en cada una de las unidades hidrogeológicas presentes en el Cantón de Belén. Para un manejo más adecuado de los datos, la tabla 35 muestra estos mismos valores, pero expresados en litros por segundo.

Tabla 34. Balance de aguas subterráneas por unidad acuífera (m^3/d).

METROS CÚBICOS POR DÍA								
Balance	**Frontera**	**Carbonal**	**Bermúdez**	**Tiribí**	**Colima Superior**	**Puente Mulas**	**Colima Inferior**	**Totales**
Entrada	Recarga Superficial	589,49	4777,80	222,40	0,00	0,00	0,00	5000,20
Entrada	Recarga lateral	0,00	17497,00	0,00	272780,0	0,00	74485,0	364762,0
Entrada	Ríos	1991,70	17491,00	236,49	103200.0	0,00	0,00	120927,49
Entrada	Manantial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Entrada	Pozos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total entrada		**2581,19**	**39765,8**	**458,89**	**375980,0**	**0,00**	**74485,0**	**493270,8**
Salida	Recarga Superficial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Salida	Recarga lateral	0,00	-3760,40	0,00	-221100,0	0,00	0,00	-224860,4
Salida	Ríos	-23,40	-8452,10	-0,21	-78804,0	0,00	0,00	-87279,71
Salida	Manantial	0,00	-23336,0	0,00	-32514,0	0,00	0,00	-55850,0
Salida	Pozos	0,00	-6516,10	-1598,4	-42380,0	-604,8	-74182,0	-125281,30
Total salida		**-23,40**	**-42064,6**	**-1598,6**	**-374798,0**	**-604,8**	**-74182,0**	**-493271,41**

Fuente: Modelación numérica actual.

Tabla 35. Balance de aguas subterráneas por unidad acuífera (l/s)

LITROS POR SEGUNDO								
Balance	Frontera	Carbonal	Bermúdez	Tiribi	Colima Superior	Puente Mulas	Colima Inferior	Totales
Entradas	Recarga Superficial	6,82	55,30	2,57	0,00	0,00	0,00	57,87
Entradas	Recarga lateral	0,00	202,51	0,00	3157,18	0,00	862,09	4221,78
Entradas	Ríos	23,05	202,44	2,74	1194,44	0,00	0,00	1399,62
Entradas	Manantial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Entradas	Pozos	0,00	0,00	0,00	0.00	0,00	0,00	0,00
Total entradas		**29,87**	**460,25**	**5,31**	**4351,62**	**0,00**	**862,09**	**5709,15**
Salidas	Recarga Superficial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Salidas	Recarga lateral	0,00	-43,52	0,00	-2559,03	0,00	0,00	-2602,5
Salidas	Ríos	-0,27	-97,83	0,00	-912,08	0,00	0,00	-1010,18
Salidas	Manantial	0,00	-270,09	0,00	-376,32	0,00	0,00	-646,41
Salidas	Pozos	0,00	-75,42	-18,50	-490,51	-7,00	-858,59	-1450,02
Total salidas		**-0,27**	**-486,86**	**-18,50**	**-4337,94**	**-7,00**	**-858,59**	**-5709,16**

Fuente: Modelación numérica actual.

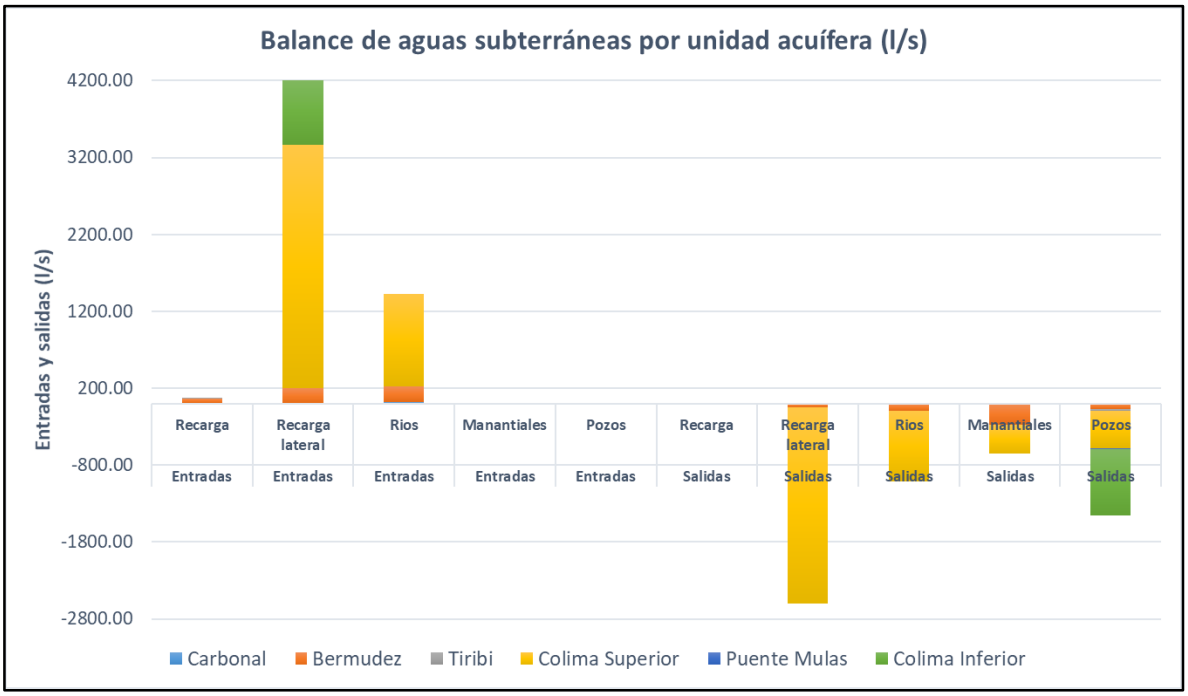


Figura 64. Balance de aguas subterráneas por unidad acuífera en litros por segundo.

En el gráfico de la figura 64 se observa que, la mayor entrada de agua al sistema se genera por la recarga lateral de los acuíferos Colima Superior e Inferior, aunque es sustancialmente mayor la asociada al Acuífero Colima Superior (3157 l/s). La influencia de los ríos se evidencia en las entradas y salidas reportadas para los acuíferos Bermúdez y Colima Superior, aunque también en este caso, se denota la mayor cantidad de descarga por ríos asociada al Acuífero Colima Superior a través de cauce del Río Virilla.

Como parte de las salidas del sistema se observan los manantiales asociados a los acuíferos Colima Superior y Bermúdez (total de 646,4 l/s), así como, la extracción por pozos en los acuíferos Bermúdez, Colima Superior y Colima Inferior.

Con respecto a la salida por pozos, se observa que, las extracciones actuales en el acuífero Bermúdez representan aproximadamente un 38% de la recarga lateral, mientras que, en el Acuífero Colima Superior, esta extracción representa actualmente un 15,53% de la recarga lateral. La condición más restringida se observa en el Acuífero Colima Inferior, en la cual la extracción actual por pozos se encuentra por encima del 90% de la recarga lateral modelada. Este aspecto, si bien es de atención, debe servir como un punto de partida para el desarrollo de futuros controles o prácticas de investigación, ya que, se debe recordar que el Acuífero Colima Inferior es precisamente el que cuenta con menor información de pozos, parámetros hidráulicos e incluso de morfología dentro del sistema acuífero del cantón.

6.6 Escenarios con incremento de extracción de agua subterránea en los pozos y cambio climático (2050)

Una vez modeladas las condiciones actuales de los acuíferos en el Cantón de Belén, es posible iniciar con la puesta en práctica de escenarios que simulen los posibles efectos que se generarían en los acuíferos a partir de cambios en las condiciones futuras, ya sean estos de naturaleza ambiental

o antrópica. En ese sentido, se ha optado por correr dos escenarios para la zona de estudio, el primero, considerando únicamente un incremento de extracción en los pozos del 30% sobre el caudal que actualmente se extrae, y un segundo escenario, en el cual también se incrementa un 30% en los caudales de extracción actual, pero adicionalmente, se simula la disminución en los caudales disponibles debido a una posible caída en la recarga potencial, generada a partir de cambios en la condiciones climáticas de temperatura y precipitación. En ambos escenarios, las propiedades hidráulicas de los acuíferos y su morfología, así como las condiciones de frontera como ríos y manantiales se han mantenido constantes con respecto al escenario actual.

6.6.1 Escenario con un incremento del 30% de extracción de agua subterránea en los pozos

Según la información reportada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), para el 2025 se tiene registrada en el Cantón de Belén una población aproximada de 27 370 personas. Si se considera un comportamiento lineal en el crecimiento de la población del cantón, según los datos estadísticos existentes en el INEC desde el año 2000, se estima que, para el año 2050 la población aproximada del cantón será de 35157 personas, lo que representa un incremento de aproximadamente un 28,45% sobre la población actual.

Sobre la base de este posible crecimiento poblacional, es que se ha definido para los pozos incluidos en el modelo numérico, tanto de abastecimiento público como de uso privado, un incremento conservador del 30% en los caudales de extracción que actualmente registran los pozos.

El caudal total de extracción por pozos modelado en el escenario actual es de 125 282 m^3/d (1450,02 l/s), de manera que, con el incremento del 30% aplicado a cada pozo, el caudal de extracción total en el sistema acuífero pasa a ser de 16286,2 m^3/d (1885,01 l/s). Con este caudal

resultante se ha corrido nuevamente el modelo, con el objetivo de observar los posibles efectos que tiene este incremento de extracción en las condiciones de flujo y la ubicación de las cargas hidráulicas, es decir, determinar si a partir de las extracciones se generan caídas en los niveles del agua subterránea de los distintos acuíferos y cuál es su magnitud.

6.6.1.1 Dirección de flujo y abatimientos proyectados

Es importante mencionar que, en general para todos los acuíferos modelados la tendencia predominante en la dirección del flujo del agua subterránea se mantuvo sin variaciones considerables, de manera que, el análisis de los efectos generados por la extracción adicional, se realizará principalmente por comparación entre las cargas hidráulicas antes y después de correr los escenarios.

Las figuras 65, 66 y 67 muestran para cada acuífero modelado, los diferenciales obtenidos entre la superficie de agua actual modelada y la superficie modelada una vez aplicado el incremento en los caudales.

La figura 65 corresponde con el Acuífero Bermúdez y en ella se observa que, en general predominan para toda el área los abatimientos menores a 1 metro de magnitud, incrementándose entre 1 a 2 metros hacia el sector central oeste y con sectores puntuales de abatimientos mayores a los tres metros, concentrados ya sea en zonas de descarga de manantiales o en las cercanías de los límites del acuífero, en donde los espesores saturados tienden a disminuir. Hacia el sector oeste, precisamente en las cercanías de los manantiales de Ojo de Agua, se registra puntalmente uno de los mayores abatimientos, lo cual es un importante indicador para el establecimiento de medidas de control y monitoreo del acuífero en el futuro.

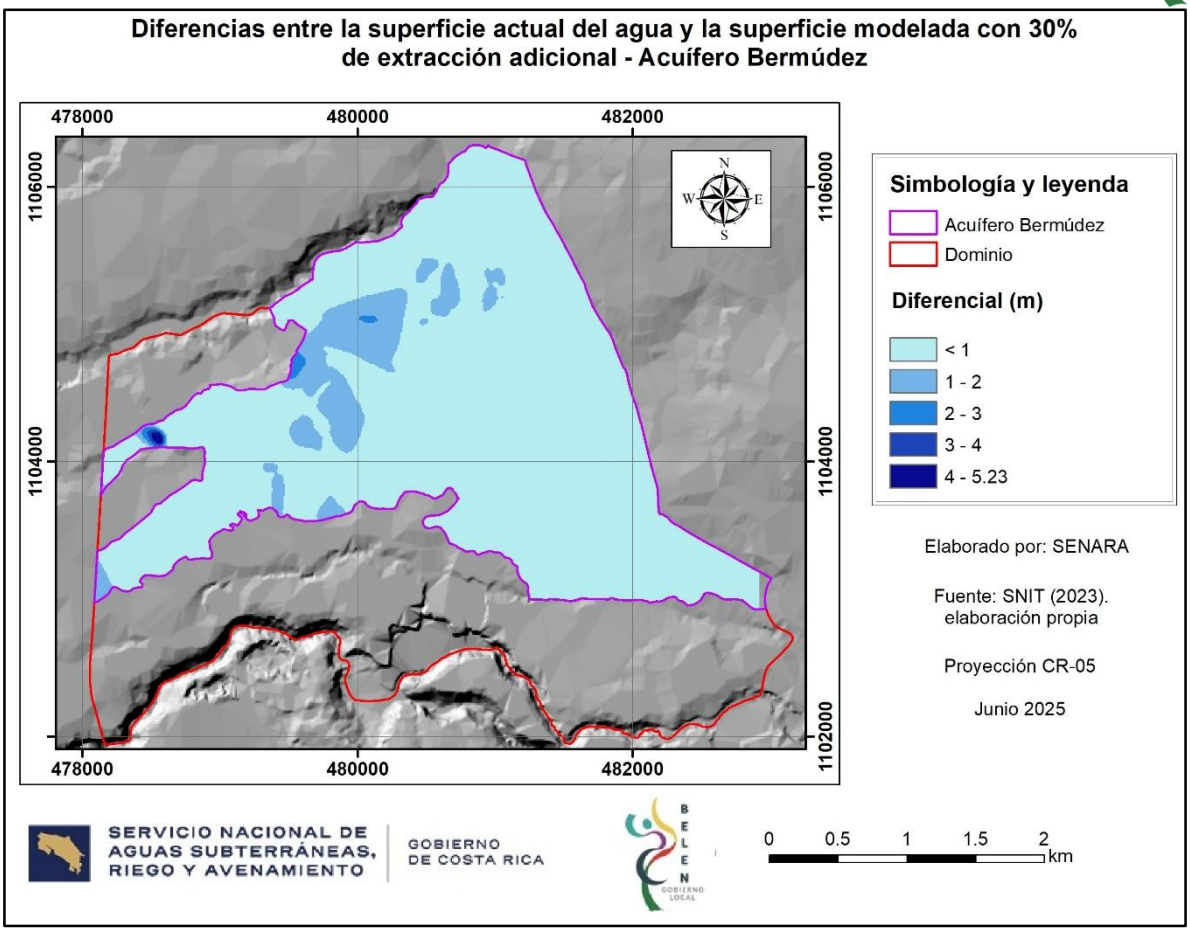


Figura 65. Mapa que muestra para el Acuífero Bermúdez, las diferencias obtenidas al restar la superficie generada por las equipotenciales del modelo con un 30% más de extracción, con respecto a las equipotenciales del modelo actual. Se observan sectores con abatimientos entre uno y hasta cinco metros.

Los diferenciales entre la superficie de agua actual del Acuífero Colima Superior y la superficie modelada con un incremento del 30% de extracción se muestran en la figura 66. En este caso, prácticamente para toda el área de estudio se observa que los abatimientos en el nivel del agua subterránea se ubican por debajo de un metro. Únicamente se registran abatimientos mayores a 1,5 metros en dos sectores puntuales al noreste y suroeste del dominio, sin embargo, estos sitios se localizan en los bordes del dominio, donde precisamente la fiabilidad del modelo tiende a bajar. Se considera que,

el potencial Acuífero en Colima Superior es consistente con los resultados obtenidos en el abatimiento mostrado en las cargas hidráulicas.

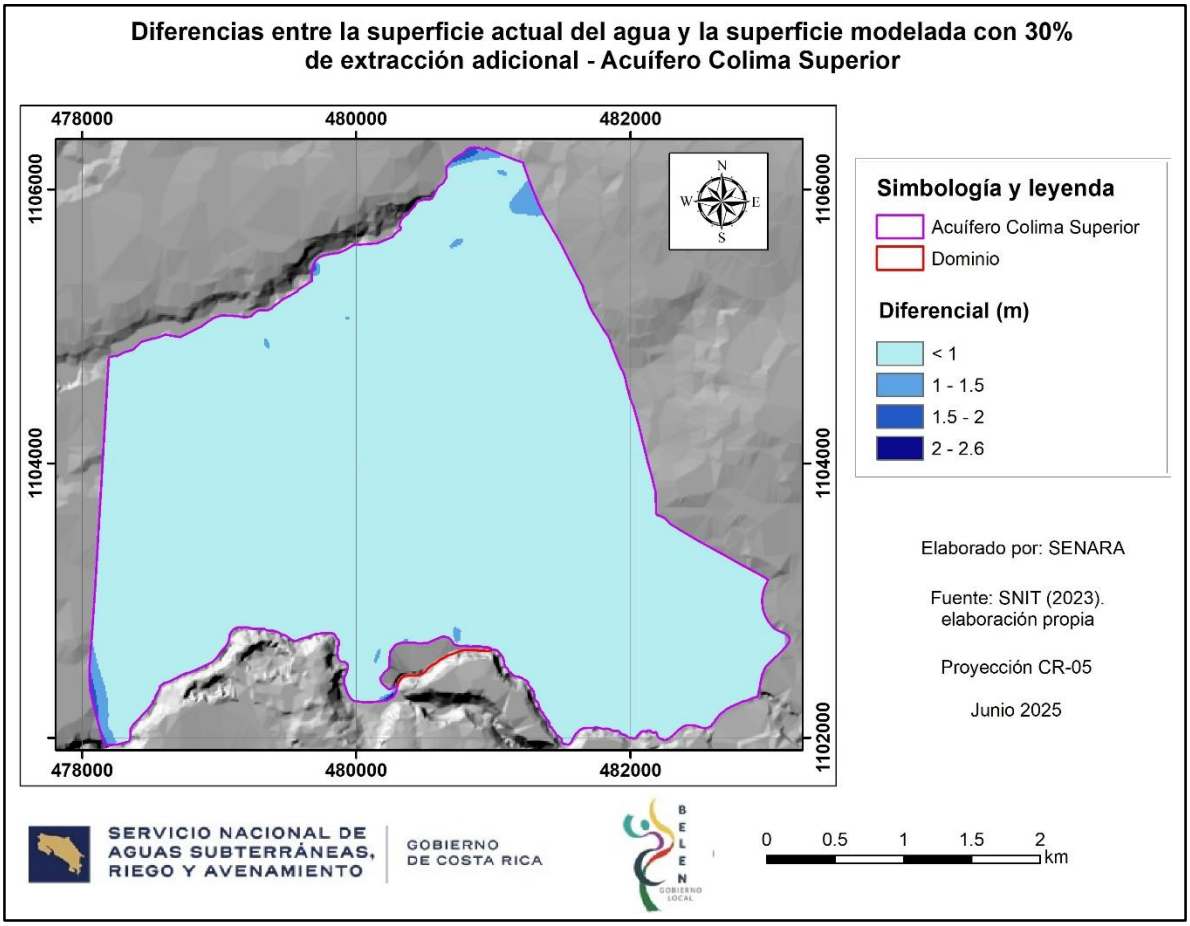


Figura 66. Diferencial obtenido para el Acuífero Colima Superior al restar a la superficie de agua actual la superficie generada considerando un 30% más de extracción en los pozos. Prácticamente en toda el área los abatimientos se ubican por debajo de un metro.

En la figura 67 se observan los abatimientos generados para el Acuífero Colima Inferior al incrementar la extracción por pozos en un 30%. Según la modelación numérica, en este acuífero es donde se registran los mayores efectos por incremento de extracción, observando una caída considerable de los niveles a partir del área central del cantón e incrementándose hacia el sector suroeste. Como se observa en la figura 67, hacia el sector central del cantón los abatimientos del nivel se ubican entre

los 4 a 12 metros, pero estos se incrementan sustancialmente en el extremo suroeste donde se dan caídas del nivel de hasta 24 metros.

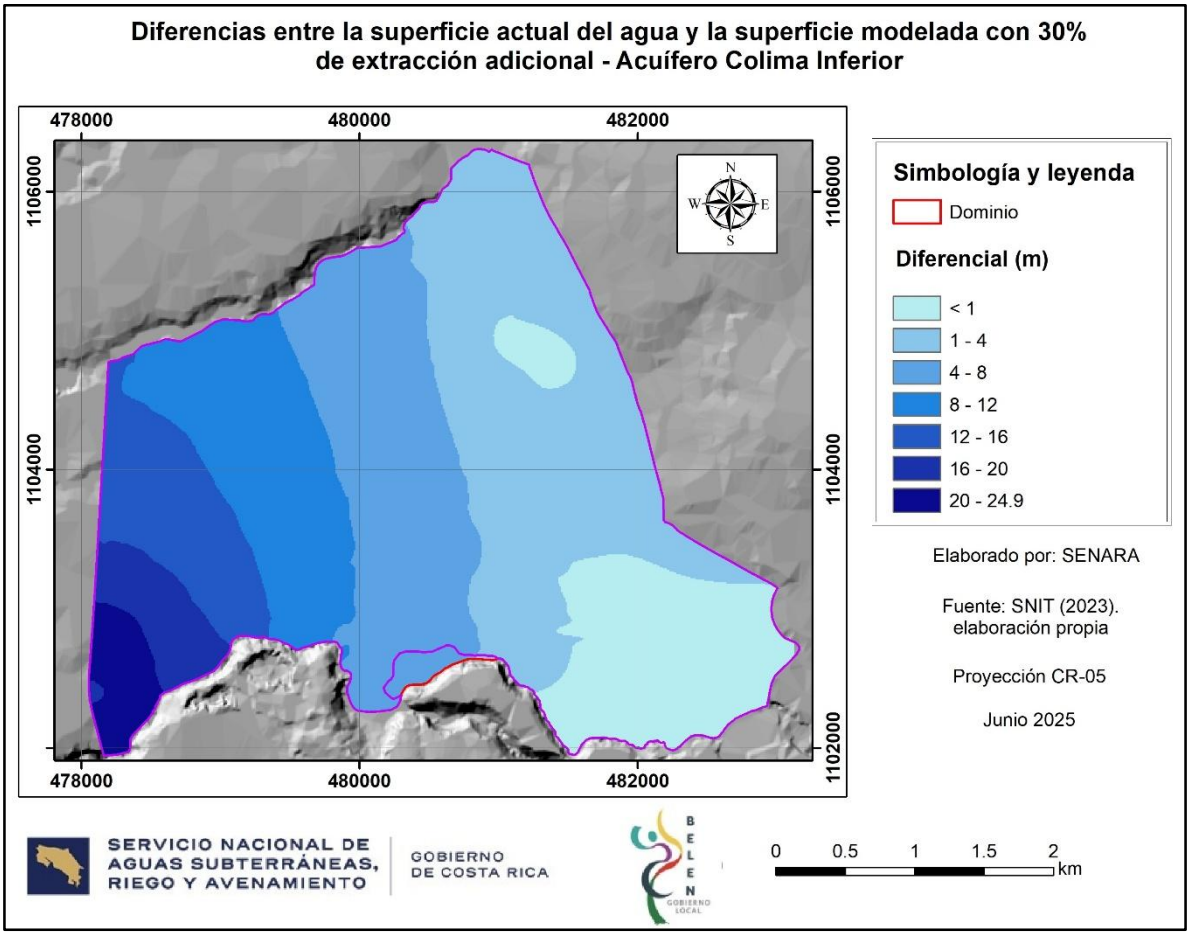


Figura 67. Abatimientos registrados en el Acuífero Colima Inferior a partir de un incremento de extracción del 30% en los pozos. Los abatimientos mayores se registran hacia el sector suroeste del cantón.

Es importante recordar que, en este acuífero se generan importantes extracciones de agua subterránea para el abastecimiento poblacional, y en ese sentido, se ha observado que, el incremento del 30% en los caudales ha llegado a generar un efecto importante en las cargas hidráulicas del acuífero. Estos resultados son de especial interés, principalmente para el establecimiento de mejores medidas de control y monitoreo en cuanto al comportamiento futuro de este acuífero.

Por otra parte, al ser la unidad acuífera más profunda en el cantón, cuenta con información más escasa en cuanto a sus parámetros hidráulicos y espesores, lo cual evidentemente limita las capacidades del modelo para representar el comportamiento acuífero ante la ocurrencia de distintos escenarios. En ese sentido, es necesario realizar inversiones para la investigación y manejo de este acuífero. El monitoreo continuo de sus niveles, así como, la determinación de su espesor real en distintas áreas del cantón, el análisis y variabilidad espacial de sus parámetros hidráulicos de transmisividad, coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica, deben ser aspectos que se aborden en el futuro para actualizar los resultados de las modelaciones.

6.6.1.2 Abatimientos proyectados en pozos de monitoreo

Se ha seleccionado para cada acuífero modelado una serie de pozos y piezómetros de monitoreo, ubicados en sectores estratégicos del cantón, con el objetivo de representar de una forma más clara y familiar para el lector, cuál será el efecto esperado en los niveles de agua subterránea una vez corridos los distintos escenarios. Los gráficos de las figuras 68, 69 y 70 muestran los pozos y piezómetros seleccionados en cada acuífero y la ubicación de los niveles del agua, tanto en el escenario actual como en los escenarios de incremento del 30% del caudal y cambio climático 2050 más 30% de extracción.

En el gráfico de la figura 68, que corresponde con el Acuífero Bermúdez, se puede observar que, todos los abatimientos registrados en los pozos son menores a un metro, e incluso en el piezómetro ubicado en el Residencial Manantiales, al este del cantón, no se llegan a registrar abatimientos. El mayor abatimiento para este escenario se registra en el piezómetro de monitoreo ubicado en las instalaciones de INTEL al noreste del cantón, con una caída de 95 centímetros.

Para el Acuífero Colima Superior (figura 69), los pozos graficados muestran abatimientos en el orden de centímetros. Pozos como los ubicados

en las instalaciones de Wavin, al este del cantón, registran posibles abatimientos inferiores a los 10 centímetros, mientras que, los mayores abatimientos se registran en los pozos ubicados en el Colegio CIT, sector central sur del cantón con un estimado de 83 cm, y en el pozo de la ASADA Paso de las Garzas, ubicado fuera del cantón en el extremo oeste, con un total de 55 centímetros. En todo caso, los abatimientos en este escenario se mantienen por debajo de 1 metro para Colima Superior.

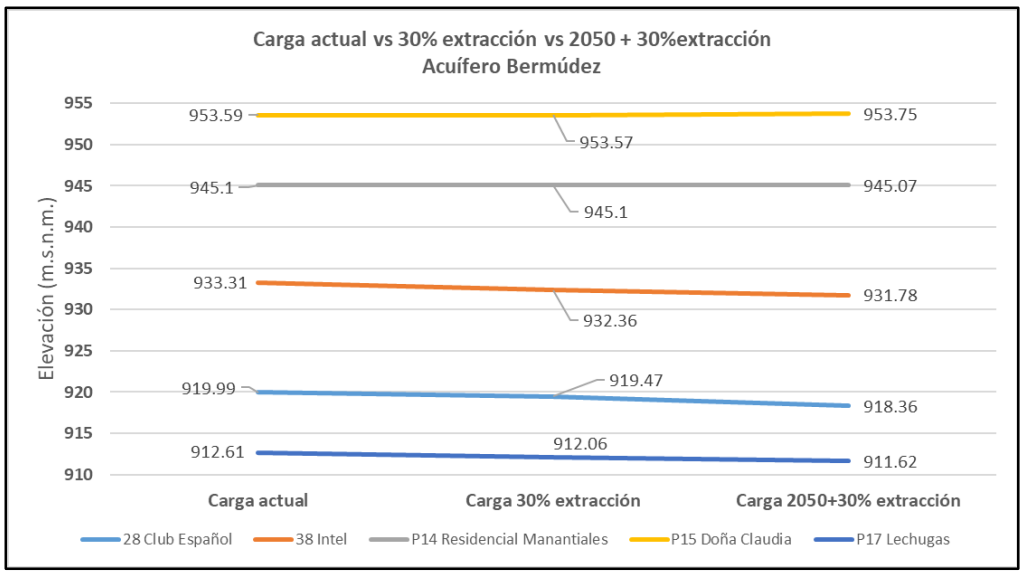


Figura 68. Acuífero Bermúdez. Abatimientos modelados en pozos y piezómetros de monitoreo para los escenarios de incremento de extracción del 30% y cambio climático 2050 + 30% de extracción.

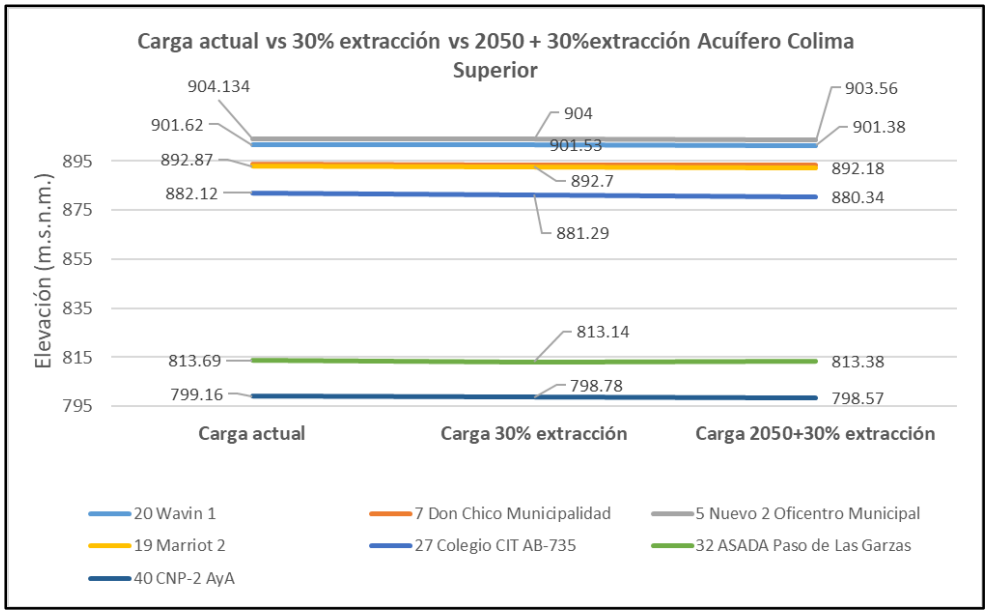


Figura 69. Acuífero Colima Superior. Abatimientos modelados en pozos y piezómetros de monitoreo para los escenarios de incremento de extracción del 30% y cambio climático 2050 + 30% de extracción.

Los pozos del Acuífero Colima Inferior son los que registran los mayores abatimientos del escenario (figura 70). Como se indicó anteriormente, los pozos ubicados hacia el este del cantón (Los Mangos Arboleda y Plásticos Modernos) muestran abatimientos por debajo de los 10 metros, mientras que, hacia el extremo oeste los abatimientos modelados se incrementan y superan incluso los 20 metros de caída en el nivel.

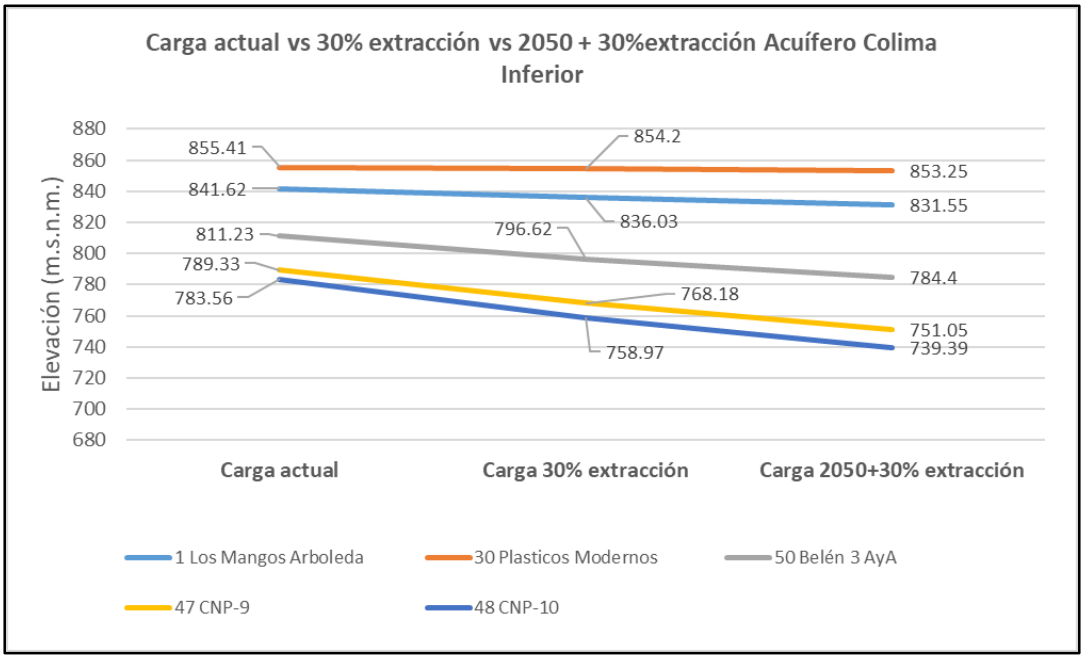


Figura 70. Acuífero Colima Inferior. Abatimientos modelados en pozos y piezómetros de monitoreo para los escenarios de incremento de extracción del 30% y cambio climático 2050 + 30% de extracción.

6.6.1.3 Caudales de descarga en los manantiales

En cuanto a la descarga de los acuíferos a través de los manantiales, el modelo actual estimó una descarga total del sistema acuífero de aproximadamente 55850,1 m^3/d (646,41 l/s). Una vez corrido el escenario con el incremento del 30% en la extracción de pozos, el caudal total de salidas a través de los manantiales fue de 54858,4 m^3/d (634,9 l/s), lo que representa una disminución en la descarga total por manantiales de aproximadamente un 1,77% con respecto al escenario actual.

Ahora bien, en la tabla 36 se observa la caída en los volúmenes de descarga de los manantiales desglosada para cada una de las unidades hidrogeológicas en que se ubican.

Tabla 36. Descarga modelada en manantiales – Escenario actual vs. 30% de extracción adicional

Unidad Acuífera	Descarga actual (m^3/d)	Descarga 30% (m^3/d)	% disminución
Bermúdez	23336	22552	3,3
Colima Superior	32514	32306	0,64
TOTAL	55850	54858	1,77
Unidad Acuífera	Descarga actual (l/s)	Descarga 30% (l/s)	% disminución
Bermúdez	270,09	261,01	3,3
Colima Superior	376,32	373,91	0,64
TOTAL	646,41	634,92	1,77

Fuente: Elaboración propia con base en la modelación numérica.

Al desglosar los caudales de descarga en manantiales según la unidad acuífera en que se desarrollan, resulta evidente que, el efecto de un incremento en los caudales de extracción de pozos será más evidente en la disminución de la descarga de manantiales de la Unidad acuífera Bermúdez, en donde la disminución aproximada de los caudales será de un 3,3% en comparación con la disminución del 0,64% que podría generarse en los manantiales de Colima Superior. Este aspecto se asocia con las características acuíferas de cada unidad acuífera.

6.6.2 Escenario 2050 de cambio climático más el incremento en la extracción de agua subterránea en los pozos

El clima es el factor principal que gobierna la variabilidad espacio-temporal en la recarga de agua subterránea y la precipitación es el elemento climático que más directamente afecta esta recarga (Amananbu et al. (2020).

Ahora bien, la recarga del agua subterránea también está influenciada por otros aspectos como la intensidad de las lluvias y no solo la cantidad, dado que, ciertas intensidades pueden inhibir la infiltración en el subsuelo, así mismo, descensos en las aguas subterráneas pueden estar influenciados por cambios en la evapotranspiración asociados con el calentamiento global

(Bellot & Chirino, 2013; Scanlon et al., 2005; Touhami et al., 2013 y Bloomfield et al. (2019) en Amananbu et al., 2020).

Diversos estudios han demostrado que las aguas subterráneas son vulnerables directamente al cambio climático debido a la disminución en la recarga, e indirectamente a otros factores como el uso del suelo, cambios en la cobertura y explotación para irrigación de cultivos.

A nivel nacional, el IMN (2012) realizó una serie de pronósticos con escenarios de cambio climático para distintos sectores del país. Estos pronósticos, basados en posibles escenarios de emisiones, son el resultado de 5 modelos climáticos (4 globales y 1 regional) corridos con horizontes de tiempo cada treinta años (2011–2040 corto plazo, 2040–2070 mediano plazo y 2070–2100 largo plazo).

Más recientemente Almazroui et al. (2021), a través del Proyecto de Modelos de Intercomparación Acoplados Fase 6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*), que según sus criterios presentan una mejor resolución que los Modelos de Circulación General (*General Circulation Models*), analizaron las proyecciones de cambio climático en temperatura y precipitación a partir de un conjunto de 31 modelos sobre la zona de Estados Unidos, América Central y el Caribe. Este estudio, basado en los Escenarios de trayectorias Socioeconómicas Compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways*) para estimar las emisiones de efecto invernadero, realiza proyecciones a corto, mediano y largo plazo para los periodos 2021 – 2040, 2041 – 2060 y 2080 – 2099 respectivamente.

Para la región del Sur de Centro América, la cual incluye a Costa Rica, Almazroui et al. (2021), proyectan para la temperatura media anual y para el escenario más crítico incrementos promedio de alrededor de 0,85 °C a corto plazo, 1,78 °C a mediano plazo y hasta 4,11 °C a largo plazo con respecto al clima de referencia actual. En el caso de las precipitaciones, se proyectan disminuciones promedio del 1,52% a corto plazo, 5,88% a mediano plazo y

18,64% a largo plazo con respecto al clima actual y para el escenario más crítico.

Almazroui et al. (2021), reportan para la región del Sur de Centro América y para los escenarios más conservadores, los cambios proyectados para la temperatura media y la precipitación en forma mensual, lo cual permite que las variaciones en la recarga potencial al acuífero sean evaluadas mediante la metodología Schosinsky (2006) con más certeza.

Con respecto a las proyecciones a utilizar, Amananbu et al. (2020) señalan que, las proyecciones futuras en la evaluación de los cambios del agua subterránea deben enfocarse más en pronósticos de corto y mediano plazo, en lugar de pronósticos a largo plazo que suelen involucrar alta incertidumbre y por lo tanto no se consideran adecuados para el establecimiento de políticas de protección serias. A partir de esto, en este trabajo se ha optado por utilizar un escenario a mediano plazo según los rangos utilizados por Almazroui et al. (2021), seleccionando en ese sentido los parámetros de precipitación y temperatura asociados con el año 2050.

La tabla 37 muestra en forma mensual las variaciones proyectadas por Almazroui et al. (2021) en la temperatura media y la precipitación del año 2050.

Tabla 37. Variaciones proyectadas en la temperatura media y precipitación mensual para el año 2050

PRECIPITACIÓN (mm)												
PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Cambio proyectado al 2050 (%)	+0,07	-0,15	– 0,07	+0,11	– 0,05	– 0,05	– 0,09	– 0,03	– 0,09	+0,13	+0,11	+0,03
TEMPERATURA (°C)												
PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Cambio proyectado al 2050 (°C)	+1,75	+2,25	+1,75	+1,75	+1,75	+1,75	+1,75	+1,75	+1,75	+1,75	+1,75	+1,75

Fuente: Almazroui et al. (2021)

Como se observa en la tabla 37, las proyecciones de precipitación para el año 2050 muestran aumentos y disminuciones a lo largo del año. Siete meses proyectan una disminución entre el 3 al 15% con respecto a las lluvias actuales, aunque otros meses como octubre y noviembre muestran incrementos de hasta un 13%. En cuanto a la precipitación, estos pronósticos de incremento compensan en cierta medida la caída en precipitaciones que se pronostica principalmente para los meses tradicionalmente más secos.

La temperatura por su parte, es constante en describir aumentos entre 1,75 a 2,25 °C. Este comportamiento en la temperatura es un aspecto muy importante a considerar, debido a que implica directamente un aumento en la evapotranspiración potencial, que a su vez repercute negativamente sobre la posible recarga potencial a los acuíferos.

Para efectos de la modelación numérica, mediante álgebra de mapas se ha realizado para cada raster de temperatura o precipitación considerado en el análisis de recarga potencial actual, los incrementos o disminuciones proyectados por Almazroui et al. (2021). Una vez obtenidos los nuevos mapas raster de temperatura y precipitación, mediante la metodología Schosinsky (2006,) se calculó la recarga potencial para el escenario del año 2050. En la tabla 38 se muestra el valor de recarga potencial en l/s para cada unidad y su comparativa con los valores actuales.

Tabla 38. Recarga potencial superficial para el escenario 2050 (l/s).

Unidad hidrogeológica	Escenario actual (l/s)	Escenario 2050 (l/s)
Barva (Miembro Carbonal)	34,11	31,42
Barva (Miembro Bermúdez	3,55	3,95
Tiribí	29,34	26,18
Colima Superior	0,63	0,60
Ignimbrita Puente Mulas	0,0027	0,0022
TOTAL	67,63	62,15

Fuente: Elaboración propia con base en Schosinsky (2006).

Los valores de recarga potencial de la tabla 38 para el año 2050, expresados en mm/año, fueron los asignados a cada unidad en la modelación numérica, como condición de frontera de recarga para simular las variaciones en la recarga superficial debido a cambios en las condiciones climáticas. Como se observa en esta tabla, la recarga superficial total en el sistema disminuyó un 8,1% con respecto al escenario actual.

Por otra parte, dado que en el Cantón de Belén la entrada de agua subterránea más importante a los acuíferos se genera en forma de recarga lateral, para efectos de la modelación con cambio climático, también se optó por disminuir, en ese mismo porcentaje, los volúmenes de entrada de recarga lateral que se genera a cada acuífero en el escenario actual. Esta simulación se realizó a través de un incremento en los caudales de extracción de los pozos, de manera que, la caída en la recarga lateral se reflejara en la modelación numérica como una salida adicional del volumen de agua subterránea, a través de los pozos. De esta forma, se han afectado tanto las entradas al sistema de recarga superficial como recarga lateral, a su vez, se ha considerado un incremento en la extracción de los pozos del 30% sobre el caudal que actualmente se extrae.

6.6.2.1 Dirección de flujo y abatimientos proyectados

Las figuras 71, 72 y 73 muestran para cada acuífero modelado, los diferenciales obtenidos entre la superficie de agua actual modelada y la superficie modelada una vez aplicado el incremento en los caudales y la disminución en la recarga debido al cambio climático.

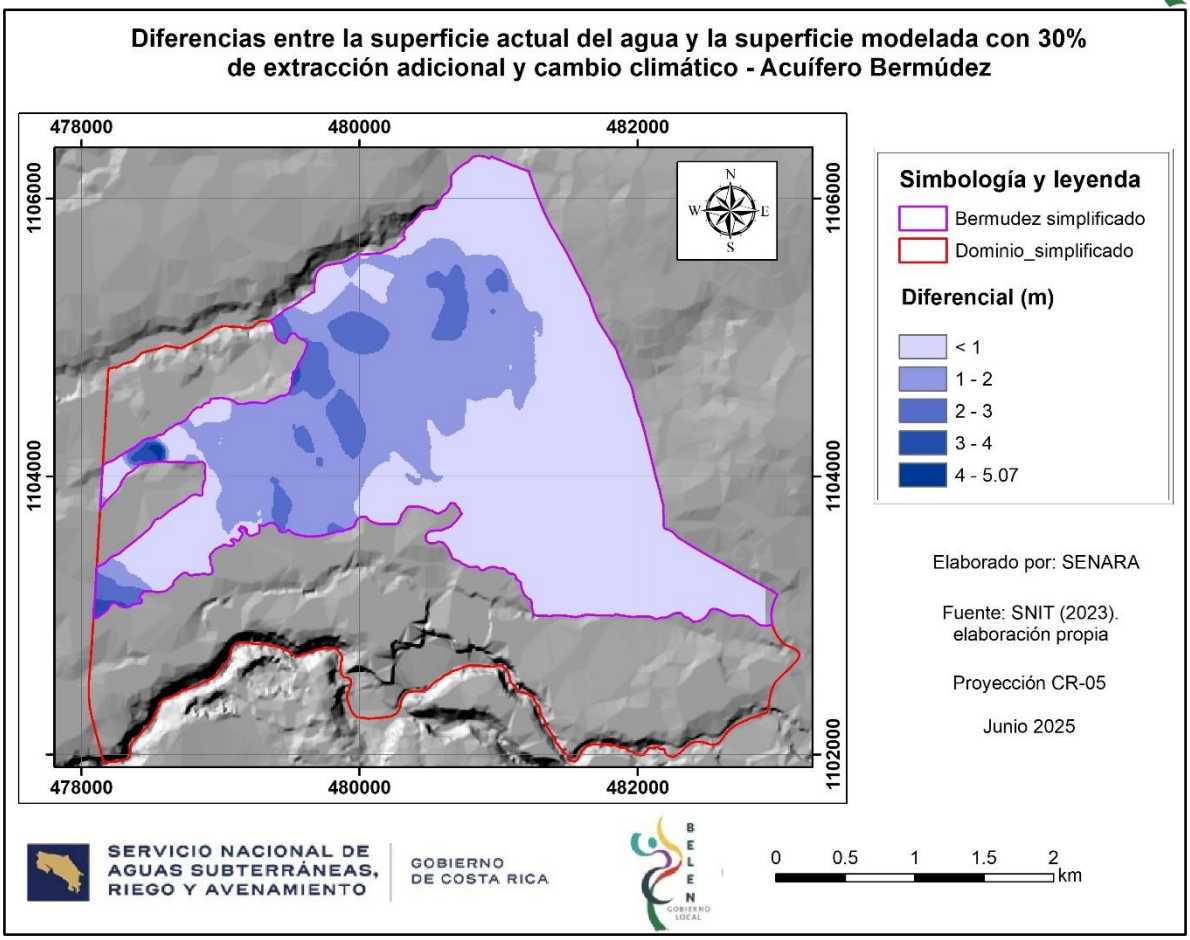


Figura 71. Abatimientos modelados para el Acuífero Bermúdez al considerar un incremento de la extracción del 30% y la disminución en la recarga potencial debida a cambios climáticos. Nótese el incremento en la extensión de zonas con abatimientos de hasta 2 metros.

Para el caso del Acuífero Bermúdez se observa que, las zonas con abatimientos de hasta dos metros de magnitud se han incrementado considerablemente con respecto al escenario anterior, incluso, las zonas con caídas de nivel de hasta 3 metros ya empiezan a tener una presencia mayor hacia el sector central norte del cantón. En el extremo oeste del cantón, en las cercanías de los manantiales de Ojo de Agua y otros, las zonas con abatimientos mayores a los tres metros se han extendido, aunque su magnitud se ha mantenido por debajo de los 5 metros aproximadamente.

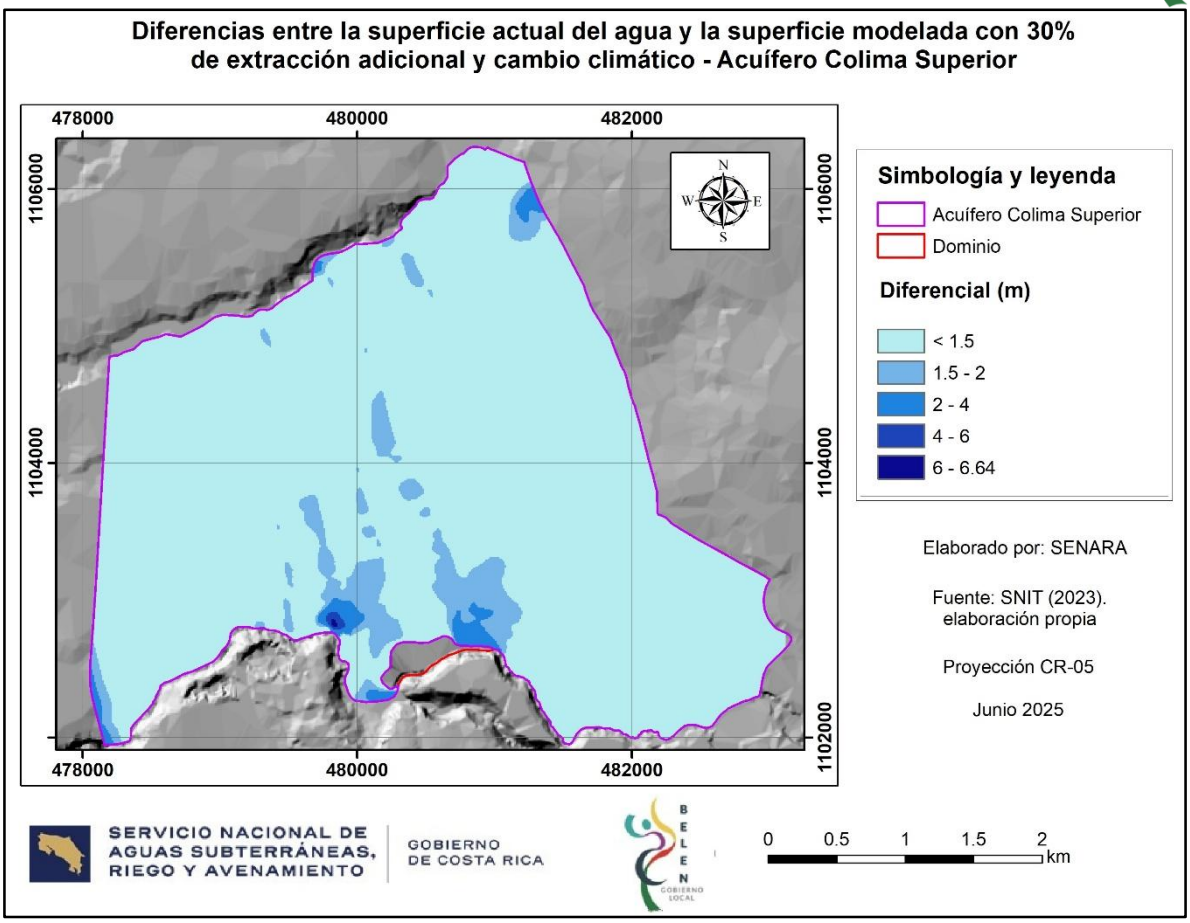


Figura 72. Diferencial obtenido para el Acuífero Colima Superior al restar a la superficie de agua actual la superficie generada considerando un 30% más de extracción en los pozos y los efectos del cambio climático para el escenario 2050.

La figura 72 muestra los abatimientos para el Acuífero Colima Superior. En general, los abatimientos registrados se ubican por debajo de 1,5 metros, pero en este caso destaca la ocurrencia hacia el sector central sur del cantón, de una zona con abatimientos de hasta 4 y 6 metros de magnitud. Estos sectores coinciden en parte con la ubicación de manantiales donde descarga este acuífero, de manera que, es importante mantener un monitoreo en estas zonas de descarga. La disminución en las cargas hidráulicas se relaciona con el comportamiento variable del acuífero debido

a la disminución en su espesor saturado, así como, a la configuración de las zonas de descarga modeladas en el área de manantiales.

Los abatimientos registrados para el Acuífero Colima Inferior se observan en la figura 73. Al igual que en el escenario anterior, se observa que los efectos de un incremento en la extracción, asociados a cambios en las condiciones climáticas, tienden a ser más severos para este acuífero. Si bien es cierto, el comportamiento es similar en cuanto a que los abatimientos mayores se desarrollan en el sector oeste del cantón, su magnitud si es mayor al escenario del 30%, pues en este caso se registra un amplio sector con caídas de nivel cercanas a los 40 metros.

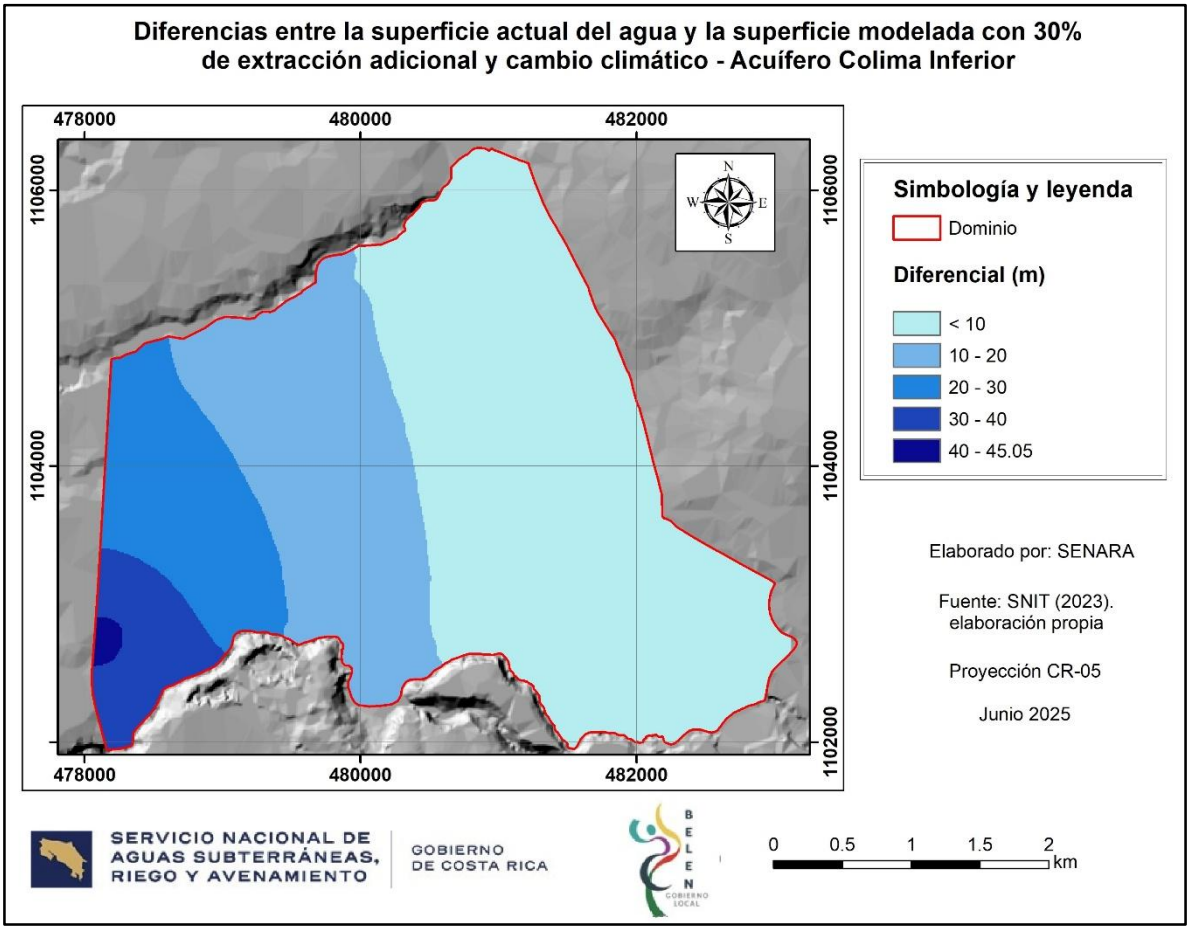


Figura 73. Abatimientos registrados en el Acuífero Colima Inferior a partir de efectos de cambio climático e incremento de extracción en pozos.

6.6.2.2 Abatimientos proyectados en pozos de monitoreo

En los gráficos de las figuras 68, 69 y 70 del escenario anterior es posible observar para los mismos pozos seleccionados, los abatimientos que se generarían en el escenario de cambio climático 2050.

Como se observó en el mapa de diferenciales para el Acuífero Bermúdez, la zona con abatimientos mayores al metro de magnitud se hace más extensa en el cantón, y en ese sentido se observa que, para este escenario el pozo ubicado en el club español y el piezómetro de Intel ya registran abatimientos superiores a 1,5 metros con respecto al escenario actual (figura 68). En el escenario que consideraba únicamente incremento del 30% de extracción, ninguno de los pozos graficados superaba el metro de abatimiento.

En el caso de los pozos seleccionados para el Acuífero Colima Superior (figura 69), si bien es cierto se registra un incremento de los abatimientos con respecto al escenario anterior, estos son de varios centímetros y en general se mantienen por debajo de un metro de magnitud. Únicamente el pozo AB-735 ubicado en el colegio CIT registra caídas en el nivel de 1,78 metros con respecto al escenario actual. Este pozo se localiza precisamente en los sectores hacia el centro y sur del cantón en el que según el mapa de la figura 72 se registraron caídas de nivel de entre 1,5 a 2 metros.

Finalmente, en los pozos del Acuífero Colima Inferior localizados al oeste del cantón (figuras 70 y 73) es donde se registran los abatimientos de nivel más potentes, ubicándose en el rango de caída entre los 26 y 44 metros. El seguimiento a estos pozos y el monitoreo del comportamiento de estos sectores acuíferos resulta importante para el manejo adecuado del recurso hídrico, al tomar en consideración que, precisamente en este sector es donde se localizan varios de los pozos de abastecimiento público más importantes del área.

6.6.2.3 Caudales de descarga en los manantiales

Al correr el escenario considerando el cambio climático para el 2050, más un incremento en la extracción de pozos del 30%, el caudal total de salidas a través de los manantiales fue de 51608 m^3/d (597,32 l/s), lo que representa una disminución en la descarga total por manantiales de aproximadamente un 7,59% con respecto al escenario actual (Descarga de 646,41 l/s).

En la tabla 39 se observa la caída para el escenario 2050 de los volúmenes de descarga en los manantiales, desglosada para cada una de las unidades hidrogeológicas en que se ubican.

Tabla 39. Descarga modelada en manantiales – Escenario actual vs. 2050 + 30% de extracción adicional

Unidad Acuífera	Descarga actual (m^3/d)	Descarga 30% (m^3/d)	% disminución
Bermúdez	23336	21773	6,69
Colima Superior	32514	29835	8,23
TOTAL	55850	51608	7,59
Unidad Acuífera	Descarga actual (l/s)	Descarga 30% (l/s)	% disminución
Bermúdez	270,09	252,00	6,69
Colima Superior	376,32	345,31	8,23
TOTAL	646,41	597,31	7,59

Fuente: Elaboración propia con base en la modelación numérica.

Según la información mostrada en la tabla 39, la combinación de los efectos del cambio climático junto con el incremento en la extracción de los pozos, genera una importante disminución en los caudales de descarga para los manantiales ubicados en ambas unidades acuíferas. La disminución en ambas unidades es superior al 5% con respecto a los caudales actuales, y en este escenario, incluso se observa que el efecto es más severo sobre los manantiales asociados con el Acuífero Colima Superior, en donde la disminución de caudal se estimó aproximadamente en un 8,23%. Para Colima Superior la disminución en la recarga lateral y su efecto en la caída del espesor saturado del acuífero, tiende a generar un mayor impacto en los

caudales de los manantiales debido a la configuración de las zonas de descarga en estos sectores. Se considera que, para efectos de gestión hídrica futura, es importante el monitoreo y control de las extracciones que se realicen aguas arriba del cantón, pues estas podrían eventualmente llegar a afectar la recarga lateral de los acuíferos en Belén.

7. CONCLUSIONES

Geología e Hidrogeología

- ✓ La geología en el cantón de Belén se compone de un basamento local constituido por rocas ígneas (lavas, brechas, tobas e ignimbritas) asociadas con la formación Lavas Intracañón (Colima). Sobre las rocas de las lavas Intracañon se ubican depósitos de ignimbritas y tobas asociados con la formación Depósitos de Avalancha Ardiente (Tiribí).
- ✓ Las rocas de la formación Barva, específicamente del miembro Bermúdez (lavas fracturadas), se localizan hacia el sector central y norte del cantón, en donde sobreyacen a las ignimbritas de la formación Avalancha Ardiente. Sobre la secuencia se ubican tobas asociados con el miembro Carbonal de la formación Barva.
- ✓ El acuífero más superficial en la zona de estudio corresponde con las lavas del miembro Bermúdez de la formación Barva, las cuales en gran parte se encuentran cubiertas por tobas alteradas del miembro Carbonal.
- ✓ En profundidad se localiza el acuífero más potente del cantón, el cual se desarrollado en las lavas del miembro Linda Vista de la formación Lavas Intracañón (Colima Superior), este acuífero se encuentra separado del acuífero superficial en la formación Barva, por tobas e ignimbritas asociadas con la formación Avalancha Ardiente (Tiribí), la cual se comporta como un acuitardo.
- ✓ El acuífero más profundo se desarrolla en el Miembro Belén de la formación Lavas Intracañón (Colima Inferior), el cual presenta un potencial acuífero menor que Colima Superior debido a la intercalación de tobas.
- ✓ La dirección de flujo predominante en los acuíferos es hacia el SW y la recarga principal se genera en forma lateral a partir de flujos subterráneas con dirección predominante al SW que han sido recargados hacia las partes altas del sistema montañoso.

- ✓ La recarga potencial superficial en el cantón de Belén es de 67,63 l/s. Esta recarga equivale al 9,53% de la precipitación total anual en este sector (709,66 l/s).
- ✓ La descarga en los acuíferos Bermúdez y Colima Superior se genera por medio de manantiales, a través de pozos, hacia cursos de agua superficial o continúa su flujo aguas abajo fuera de los límites del cantón de Belén.
- ✓ El registro de concesiones del SINIGIRH reporta un caudal total aprovechado de 2482,32 l/s, de los cuales 1444,13 l/s se extraen mediante pozos, 434,03 l/s se captan en nacientes y 604,16 l/s corresponden con fuentes superficiales (ríos o quebradas). Predomina el uso de consumo humano, industrial y comercial.

Modelación Numérica – Escenario climático actual

- ✓ Las equipotenciales generadas en la modelación numérica son consistentes con el modelo hidrogeológico del cantón y sus cargas hidráulicas muestran coeficientes de correlación adecuados.
- ✓ El balance de masas para el escenario actual, corrido en estado estacionario, muestra las entradas y salidas del sistema equilibradas en 5709 l/s.

Modelación Numérica – Escenario con un incremento del 30% de extracción de agua subterránea en los pozos

- ✓ En el acuífero Bermúdez predominan los abatimientos menores a 1 metro, con algunas áreas de abatimientos entre 1 a 2 metros hacia el sector central del cantón. Esta disminución en las cargas hidráulicas se relaciona con un comportamiento variable del acuífero en función del espesor saturado.
- ✓ Para el acuífero Bermúdez abatimientos mayores a 3 metros se modelan en un pequeño sector en las cercanías de Ojo de Agua, debido a una

disminución en el espesor saturado del acuífero y a la configuración de la zona de descarga modelada en ese sector.

- ✓ En el acuífero Colima Superior se registran abatimientos menores a 1 metro prácticamente en toda su área debido a sus características acuíferas de espesor saturado y recarga favorables para el agua subterránea.
- ✓ Los efectos más severos del escenario, con abatimientos que pueden superar los 20 metros, se registran en el acuífero Colima Inferior, específicamente hacia el sector SW del cantón, en donde es captado a través de 11 pozos para abastecimiento público administrados por el AyA.
- ✓ Los altos abatimientos en Colima Inferior se relacionan con valores de conductividad hidráulica que limitan la respuesta del acuífero ante los caudales de extracción del campo de pozos del AyA y otros pozos registrados hacia la parte norte y nor-este del cantón.
- ✓ El incremento del 30% de extracción de agua subterránea en los pozos, provoca una disminución del 3,3% en la descarga de los manantiales del acuífero Bermúdez y de 0,64% en los asociados al acuífero Colima Superior, aspecto asociado a las características acuíferas de cada unidad.

Modelación Numérica – Escenario 2050 de cambio climático más el incremento en la extracción de agua subterránea en los pozos

- ✓ Para el acuífero Bermúdez la zona con abatimientos de agua subterránea entre 1 a 2 metros se incrementa en el área central del cantón, y en los alrededores de Ojo de Agua se han extendido los abatimientos mayores a 3 metros. Esta extensión en la caída de las cargas hidráulicas se relaciona con un comportamiento variable del acuífero en función del espesor saturado y la configuración de las zonas de descarga modeladas.
- ✓ En el acuífero Colima Superior predominan los abatimientos menores a 1.5 metros, sin embargo, hacia el sector central sur se desarrollan áreas con abatimientos superiores a los 2 metros en correspondencia con la ubicación de las zonas de descarga de los manantiales captados para

abastecimiento público. La disminución en las cargas hidráulicas se relaciona con el comportamiento variable del acuífero debido a la disminución en su espesor saturado. En las zonas cercanas a los manantiales, esta disminución se asocia a la configuración de la zona de descarga modelada en combinación con la disminución del espesor saturado del acuífero.

- ✓ En el sector SW del cantón, los abatimientos para el acuífero Colima Inferior son cercanas a los 40 metros, reflejando el mismo comportamiento descrito en el escenario de incremento de extracción del 30%.
- ✓ Para los manantiales del acuífero Bermúdez el caudal de descarga del agua subterránea disminuye en 6.69% y para los manantiales del acuífero Colima Superior en 8.23%, siendo esta última la más elevada debido a un mayor efecto en razón de la configuración de la zona de descarga combinada con la disminución de los espesores saturados del acuífero Colima Superior para estos sectores.

8.RECOMENDACIONES

- <u>A la Municipalidad de Belén</u>
  - Habilitar en todos los pozos municipales una línea de aire que permita realizar, en forma adecuada y segura, el monitoreo de los niveles estáticos y dinámicos en sus pozos de abastecimiento, ya sea de forma manual o por medio de instrumentación con sensores automáticos en tiempo real.
  - Restaurar las tapas metálicas y candados para la protección de varios pozos de investigación que fueron construidos durante la elaboración del estudio hidrogeológico de vulnerabilidad del año 2016.
  - Colocar en todos los pozos del acueducto municipal hidrómetros para llevar un control de los caudales de extracción y registro de los mismos.
  - Mantener actualizado el estudio del agua no contabilizada para la optimización del uso del recurso hídrico subterráneo.
  - Que la Municipalidad de Belén, a través del personal que administra el acueducto, lidere el proceso de homologación de las bases de datos de pozos y manantiales a través de trabajo de campo y oficina, para actualizar la cantidad de fuentes existentes, su ubicación precisa y sus caudales de extracción. Este trabajo debe contar con la participación de la Dirección de Agua del MINAE, SENARA y AyA.
  - Que la Municipalidad de Belén mantenga la red de monitoreo de pozos y piezómetros diseñada en este estudio y lleva a cabo la ejecución de pruebas de bombeo en sus pozos para calibrar y actualizar el modelo numérico a través del tiempo.
  - Por parte de la Municipalidad de Belén se debe construir infraestructura de aforo en las captaciones e implementar un programa de aforo mensual que permita monitorear los caudales en los manantiales de abastecimiento público que actualmente capta.

- Diseñar una red de aforos diferenciales en los cauces de los ríos principales (Río Segundo, Bermúdez, Burío y Virilla) que permitan detallar el comportamiento efluente – influente de estos cuerpos de agua.

- A la Dirección de Agua del MINAE

- Que la Dirección de Agua del MINAE notifique a los usuarios sobre la obligación de habilitar la línea de aire de los pozos existentes en el Cantón de Belén, de conformidad con el reglamento de perforación, por cuanto muchos pozos privados carecen de línea de aire, lo que imposibilita la medición de sus niveles estáticos o dinámicos.
- Que la Dirección de Agua emita lineamiento de restricción a la profundidad de perforaciones exploratorias de particulares con el fin de evitar la captación del acuífero de Colima Inferior en el territorio del Cantón de Belén, el cual, por su importancia estratégica para el país está considerado como reserva hídrica para abastecimiento hídrico de agua potable, según se indica en el oficio SENARA-DIGH-0084-17 del 08 de agosto del 2017.

- Al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
  - Que el AyA lleve a cabo la ejecución de pruebas de bombeo en sus pozos mediante las cuales se evalúe la transmisividad, conductividad hidráulica y coeficientes de almacenamientos de los acuíferos captados. Esta información es necesaria para mantener un manejo sostenible de los acuíferos, particularmente del acuífero Colima Inferior.

- Gestión del recurso hídrico

  A partir de los resultados obtenidos en la modelación numérica, específicamente en cuanto al análisis de abatimientos generados, cambios en las direcciones de flujo y disminución en la descarga de los

manantiales, se emiten las siguientes recomendaciones en cuanto a la gestión del recurso hídrico del cantón:

- *Acuífero Bermúdez de la Formación Barva*:
  - Se recomienda a la Dirección de Agua del MINAE no autorizar más perforaciones que capten este acuífero, al tomar en consideración la disminución en la descarga de los manantiales y los abatimientos en los niveles del agua subterránea.
  - Se recomienda a la Municipalidad de Belén mejorar las captaciones en los manantiales que son utilizados para el abastecimiento poblacional, de manera que, logren captar un porcentaje mayor de la descarga natural que se genera en estos sitios.

- *Acuífero Colima Superior:*
  - Se le recomienda a la Dirección de Agua del MINAE permitir, tanto para uso privado como para uso público, el incremento en la extracción de pozos de hasta un 20% sobre los caudales de extracción actual modelados en este estudio. Al respecto, es importante mantener las condiciones de recarga lateral actual modeladas para los sectores aguas arriba del cantón, por lo que, se debe dar continuidad a las recomendaciones sobre impermeabilización de zonas de recarga y perforación de pozos emitidas por el SENARA desde el año 2007 en su estudio "Recarga Potencial del Acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica" (Anexo 1).

    Ahora bien, dentro del cantón de Belén se ubican las siguientes zonas o áreas de reserva acuífera:

    1) Área de Reserva Acuífera de Puente Mulas según acuerdo del AyA No. 2010-023 del 26 de enero del 2010 y acuerdo del Comité

Técnico Interinstitucional (Dirección de Agua, AyA, SENARA) del 18 de octubre de 2011.

2) Zonas internas de restricción A, B, C y D dentro del Área de Reserva Acuífera de Puente Mulas según acuerdo del AyA No. 2010-023 del 26 de enero del 2010 y acuerdo del Comité Técnico Interinstitucional (Dirección de Agua, AyA, SENARA) del 18 de octubre de 2011.
3) Zona de Regulación a la perforación sujeta a la presentación de estudio hidrogeológico en SENARA según oficio DIGH-CIR-004-2012 del 15 de mayo del 2012.

Debido a lo anterior, las solicitudes de pozos que se realicen dentro de estas zonas, ya sea por parte de particulares u operadores de abastecimiento público, deben cumplir con lo estipulado en el acuerdo del AyA No. 2010-023, del Comité Técnico Interinstitucional del 18 de octubre del 2011 y el oficio de SENARA DIGH-CIR-004-2012.

- *Acuífero Colima Inferior:*
  - Por su importancia estratégica para el país, mantener la restricción de perforación existente para este acuífero, de manera que, se mantenga como reserva hídrica para abastecimiento poblacional de agua potable, según se indica en el oficio SENARA-DIGH-0084-17 del 08 de agosto del 2017.
  - Se recomienda a la Dirección de Agua del MINAE, permitir el incremento en las extracciones de hasta un 10% sobre los caudales de extracción actual modelados en este estudio.

9. REFERENCIAS

ALMAZROUI, M., ISLAM, M. N., SAEED, F., SAEED, S., ISMAIL, M., EHSAN, M. A., DIALLO, I., O´BRIEN, E., ASHFAQ, M., MARTINEZ-CASTRO, D., CAVAZOS, T., CEREZO-MOTA, R., TIPPETT, M. K., GUTOWSKI, W. J., ALFARO, E., HIDALGO, H. G., VICHOT-LLANO, A., CAMPBELL, J. D., KAMIL, S., RASHID, I. U., SYLLA, M. B., STEPHENSON, T., & BARLOW, M. (2021). *Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America and the Caribean in CMIP6 GCMs.* Recuperado de https://link.springer.com/article/10.1007/s41748-021-00199-5

AMANAMBU, A. C., OBAREIN O. A., MOSSA, J., Li L., AVENI S. S., BALOGUN, O., OBEYAMIJI, A. & OCHEGE, F. (2020). *Groundwater system and climate change: Present status and future considerations*. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169420306235

ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. (2002): *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. California, United States of America*: Academic Press.

ARREDONDO, S. (1995): Delimitación de zonas de protección a los acuíferos en el área de influencia de los manantiales La Gruta, Los Sánchez, Ojo de Agua, Puente de Mula y San Antonio. – Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento.

ARREDONDO, S. & SOTO, G. (2006): Edad de las lavas del Miembro Los Bambinos y sumario cronoestratigráfico de la Formación Barva. *Revista Geológica de América Central*, (34-35), 59-71.

ASTORGA, A., MENDE, A., CHÁVEZ, L., JENKINS, A.C., GUTIÉRREZ, E.., VARELA, G. & HIDALGO, C. (2022): Informe de Zonificación de

Fragilidad Ambiental del cantón de Belén. Heredia. Costa Rica. Informe técnico de INDECA CONSULTORES a la Municipalidad de Belén. Versión de informe final integrado. Contratación Directa 2019CD – 000005 – 0002600001, 249 p.

ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS (2023): Base de datos de aprovechamientos en pozos y nacientes de la UEN Gestión Ambiental y la Subgerencia de Sistemas Delegados (SAGA) del AyA. Oficio UEN-GA-2023-02091.

CHOW, V. T. (1964): Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill

COEN, E. 1967. Algunos Aspectos sobre Climas de Costa Rica. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

CONSULTORES CENTROAMERICANOS (2011): Plan maestro de recolección, tratamiento y disposición de las aguas residuales del cantón de Belén (PMAS). Licitación Abreviada No. 2009-LA-00010-01. Municipalidad de Belén.

DELGADILLO, A. y PÁEZ, G. (2008): Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas. En: Ferrer, C. y Dugarte, M. (editores). Plan de desarrollo urbano del municipio Antonio Pinto Salinas bajo el enfoque de gestión de riesgo. Caracterización de la cuenca del valle de Mocotíes. Mérida. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) – Fundación para la Prevención de los Riesgos del estado Mérida (FUNDAPRIS). Inédito.

DENYER, P., & ARIAS, O. (1991): Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* (12), 1-59.

ECHANDI, E. (1981): Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del Río Virilla (Tesis de Licenciatura) Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

FALLAS, J. y VALVERDE, G., (1996): Análisis Morfométrico y Fisiográfico de la cuenca hidrográfica. Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.

FERNÁNDEZ, M., (1968): Las Unidades hidrogeológicas y los manantiales de la vertiente norte de la cuenca del río Virilla. 45 págs.

GARFIAS, J., (2010): Modelación Numérica de Aguas Subterráneas y Transporte de Contaminantes usando MODFLOW [Material del aula]. Modelación numérica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

GRIJALVA, A. (2008): Hidroestratigrafía del acuífero del valle del río Yaqui, Sonora. (Tesis profesional, Universidad de Sonora). Recuperado de http://repositorioinstitucional.uson.mx/bitstream/handle/unison/1198/grijalvamontoyaadrianl.pdf?sequence=1&isAllowed=y

GODOY, R. (2015): El impacto de la globalización en la economía costarricense. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.

HOLDRIDGE, L.R. (1947). Determination of plant world formations from simple climatic .data. Science, 105 (2727), 367-368. 45

INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL (2012). Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica. Recuperado de http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/EscenariosCambioClimatico/escenariosCCRegionalizados2012.pdf

ITCR, 2014: Atlas Digital de Costa Rica 2014. – Instituto Tecnológico de Costa Rica.

JIMÉNEZ, H. (1993). Anatomía del sistema de ecología basada en zonas de vida de L.R Holdridge. Costa Rica: Centro Científico Tropical.

KUSSMAUL, S., (2000): Estratigrafía de las rocas ígneas. – En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S., (Ed): *Geología de Costa Rica*. – Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago. 63–86.

MONGE, M., (2013): Estudio hidrogeológico y balance hídrico de los acuíferos de playa Potrero y playa Brasilito, Santa Cruz, Guanacaste.– Universidad de Costa Rica [Tesis Lic.].

PROTTI, R., (1986): Geología del flanco sur del volcán Barva. *Bol. Vulcanol.* UNA (17), 23–31.

RAMÍREZ, R. & ALFARO. A., (2002): Mapa de Vulnerabilidad Hidrogeologica de una parte del Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* (27), 53–60.

RUIZ, J., (2001): Hidrología, evolución y visión sistémica, la morfometría de las cuencas como aplicación. UNELLEZ. Barinas, Venezuela, 298 págs.

RUIZ, P., GAZEL, E., ALVARADO, G., CARR, M., SOTO, G., (2010): Caracterización geoquímica y petrográfica de las unidades geológicas del macizo del Volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* (43), 37–66.

SAHUQUILLO, A., (1983): Modelos en hidrogeología subterránea. En E. Custodio y R. Llamas. (Eds.), *Hidrología subterránea* (247–280). Barcelona, España: Ediciones Omega S.A..

SCHOSINSKY, G., (2006): Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central, 34–.35. p 13–30.

SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS RIEGO Y AVENAMIENTO – BRITISH GEOLOGICAL SURVEY., (1985): Mapa hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica. Gran Bretaña, escala 1: 50 000.

SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS RIEGO Y AVENAMIENTO., (2016): Estudio Hidrogeológico y de vulnerabilidad hidrogeológica mediante el método DRASTIC para el cantón de Belén. 57 páginas. (Informe Interno SENARA).

SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS RIEGO Y AVENAMIENTO., (2006). Variables para la estimación de caudal de extracción por pozos según uso reportado (Informe interno 1). San José, Costa Rica: Autor.

SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, RIEGO Y AVENAMIENTO., (2020). Estudio hidrogeológico para la cuenca del río Grande, Alajuela, Costa Rica. Recuperado de https://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterraneas/estudios/Estudio%20Hidrogeologico%20Rio%20Grande_SENARA.pdf

SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS RIEGO Y AVENAMIENTO., (2023): Archivo nacional de pozos. [Base de datos]. Recuperado de http://base-digh.senara.or.cr/

SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DEL RECURSO HÍDRICO. (2023): DA_Concesiones - DA_Dictámenes. [Base de datos]. Recuperado de http://mapas.da.go.cr/mapnew.php

SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN TERRITORIAL. (2023). Curvas de nivel a escala 1: 25000. [Base de datos]. Recuperado de https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6Mjc=&nombre=IGN%20Cartograf%C3%ADa%201:25mil

SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN TERRITORIAL. (2023). Curvas de nivel a escala 1: 25000. [Base de datos]. Recuperado de https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6Mjc=&nombre=IGN%20Cartograf%C3%ADa%201:25mil

THIELE, K. y VARGAS, A. (2017): Actualización volcanoestratigráfica del piso del valle Central, de Costa Rica, específicamente la denominada Formación Colima y sus miembros (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

UNIVERSIDAD NACIONAL (2012): Programa para mejorar la calidad de las aguas superficiales en el cantón de Belén. Universidad Nacional – Municipalidad de Belén.

VARGAS, I. (2010): Delimitación de las zonas de protección de los pozos de abastecimiento público del cantón de Belén. Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología.

ANEXOS

Anexo 1: Base de datos de pozos / Base de datos piezómetros privados y municipalidad / Aforos SENARA / Base de datos concesiones SINIGIRH / Caudales SENARA / Oficio UEN-GA-2023-00733 / Oficio UEN-GA-2023-02091 / Afloramientos / Red de monitoreo / Oficio SENARA-DIGH-0084-17 / Acuerdo del AyA No. 2010-023 / Acuerdo del Comité Técnico Interinstitucional del 18 de octubre del 2011 / Oficio de SENARA DIGH-CIR-004-2012 / Recarga potencial del acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica.

Anexo 2: Base de datos pruebas de infiltración proyectos / Informe de análisis de suelos y pruebas de infiltración licitación reducida 2023LD-000007-0018800001 "Pruebas de infiltración, estudio de suelos y muestreo según demanda en los cantones Zarcero, Belén y Santa Bárbara" / Base de datos análisis de suelos proyectos.

Anexo 3: Información meteorológica.

Anexo 4: Recarga potencial superficial escenario actual / Recarga potencial superficial escenario 2050.

Anexo 5: Pozos extracción modelación / Manantiales modelación