



**DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y GESTIÓN HÍDRICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN**

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y DE VULNERABILIDAD HIDROGEOLOGICA
MEDIANTE EL METODO DRASTIC PARA EL CANTON DE BELEN**

OCTUBRE 2016

ELABORADO POR:

Geól. Daniela Herra Herrera
Unidad de Gestión Hídrica

REVISADO POR:

Geól. Clara Luz Agudelo Arango
Jefa Unidad de Gestión Hídrica

APROBADO POR:

Ing. Carlos Romero Fernández
Jefe Dirección de Investigación y Gestión Hídrica



INDICE

Antecedentes.....	4
Objetivo General.....	5
Objetivo específicos.....	5
Actividades.....	5
Geología e hidrogeología Regional.....	6
Formación Lavas intracañón.....	6
Formación Avalancha Ardiente.....	6
Formación Barva.....	6
Geología e hidrogeología Local.....	7
Estudios hidrogeológicos presentados a SENARA.....	8
Pozos Base de datos SENARA.....	9
Afloramientos campo.....	9
Piezómetros perforados por Municipalidad.....	13
Mapa Hidrogeológico del Cantón.....	14
Análisis de suelos.....	15
Permeabilidad zona no saturada.....	16
Porosidad y otros parámetros.....	20
Tiempos de transito	24
Perfiles hidrogeológicos.....	27
Modelo conceptual.....	31
Vulnerabilidad acuíferos.....	33
Conclusiones.....	54
Recomendaciones.....	55
Bibliografía.....	57



Antecedentes

Como parte del desarrollo que se ha estado llevando a cabo el cantón de Belén y este teniendo una cantidad considerable de fuentes de agua que le dan sustento a sus habitantes, varios estudios se han llevado a cabo con el fin de corroborar la vulnerabilidad intrínseca que existe en el cantón.

En primera instancia se tiene el Estudio para la delimitación de las zonas de protección de los pozos de abastecimiento público de Municipalidad de Belén, realizado por la Universidad de Costa Rica Julio del 2009 y avalado por SENARA.

Así mismo, y debido al aumento del desarrollo de proyectos urbanísticos y comerciales, con una fuerte inversión económica, se han realizado por parte de interesados estudios hidrogeológicos puntuales los cuales han sido presentados ante el SENARA para su respectiva valoración y aprobación.

En el 2015 el SENARA en acuerdo con la municipalidad, dada a la basta información que se estaba presentado en el cantón y la no coincidencia de los resultados de los estudios hidrogeológicos puntuales con el mapa de vulnerabilidad a nivel cantonal, procedió a realizar una nueva revaloración de la vulnerabilidad a la contaminación acuífera del cantón de Belén utilizando para ello la metodología DRASTIC.

Para dicha labor, la Municipalidad realizó la contratación de 20 perforaciones exploratorias en sitios sin información, previamente identificados por SENARA.

Así mismo el SENARA realizó, mediante la contratación de servicios del geólogo David Chacón Robles, un procesamiento de los datos existentes en el cantón, la verificación de la geología superficial, de las condiciones de afloramiento de las nacientes, el control de los pozos exploratorios perforados y la realización de pruebas de infiltración y suelos.

La geóloga Daniela Herra Herrera del SENARA realiza la integración y análisis de la información procesada y de la nueva información levantada, con el cual se obtiene el presente “Mapa DRASTIC de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos del cantón de Belén”, el cual corresponde al MAPA OFICIAL a aplicar para el cantón.



Objetivo General:

Reevaluar la condición de vulnerabilidad hidrogeológica a la contaminación acuífera del cantón de Belén mediante el método DRASTIC.

Objetivos Específicos:

1. Definir características hidrogeológicas y generar el modelo hidrogeológico conceptual del cantón de Belén.
2. Generar una base de datos con la información hidrogeológica del cantón de Belén.
3. Valorar las condiciones de tiempo de tránsito de contaminantes bacteriológicos.
4. Definir la vulnerabilidad a la contaminación por medio del método DRASTIC para el cantón de Belén.

Actividades:

1. Verificación de la geología de Campo del Cantón de Belén.
2. Inspección, control y análisis de 20 perforaciones exploratorias o piezómetros contratados por la municipalidad de Belén.
3. Inspección de zona de afloramientos de nacientes e identificación de las características geológicas de los sitios de afloramiento.
4. Levantamiento en campo de la ubicación de nacientes y pozos y actualización de los registros de SENARA.
5. Realizar pruebas de infiltración y de suelos
6. Analizar la información de los pozos según los registros del SENARA en el cantón de Belén.
7. Revisión de estudios hidrogeológicos realizados en el cantón de Belén para la documentación en base de datos de la información existente en cuanto a: geología local, pruebas de infiltración, análisis de suelos, parámetros hidráulicos de acuíferos, tiempos de tránsito, vulnerabilidad.
8. Verificar con la información recopilada y las nuevas perforaciones los perfiles hidrogeológicos realizados y elaborar nuevos perfiles.
9. Elaborar el mapa techo de los acuíferos superficiales en el cantón y mapa de permeabilidades.
10. Valoración de tiempo de tránsito en 15 zonas del cantón.

GEOLOGIA E HIDROGEOLOGÍA REGIONAL:



El área de estudio se encuentra en la zona del Valle Central de Costa Rica, basados en múltiples estudios se determina que en la zona las principales formaciones geológicas corresponden a: Formación Lavas Intracañón, Formación Avalancha Ardiente y Formación Barva (**Figura 1**).

- **Formación Lavas Intracañón**

Según Echandi (1982), consiste en una formación volcánica con alrededor de siete coladas de 10 a 30 metros de espesor, que afloran solamente en profundos valles cortados por el río Virilla y Tiribí. Se caracterizan por ser lavas andesíticas color negro, con textura porfirítica vesicular y muy fracturada. Localmente presenta intercalaciones de una toba de flujo brechosa, que corresponde con el Miembro Puente Mulas con 35 metros de espesor. Echandi (1982), estima el espesor total de esta formación en cien metros.

Hidrogeológicamente esta formación se clasifica como Formación Hidrogeológica Colima (Ramírez & Alfaro, (2002)), la cual se subdivide en dos miembros: Colima Inferior, y Colima Superior [Schosinsky & Vargas, (1999)].

- **Formación Avalancha Ardiente**

Constituida por depósitos de pómez, de caída en la base de hasta 3 m de espesor (Kusmmaul 1988,), seguidos por flujos de ceniza, lapilli, y bloques. Ignimbritas grises con “fiames” de obsidiana y pómez (cm-mm), depósitos de caída coronan la secuencia. (Echandi, 1982).

Denominada Formación Tiribí por Echandi (1982), subdividido en tres miembros, Nuestro Amo, Electriona, y La Caja. Krushensky (1972), determina que se trata de una serie de flujos bien distribuidos, donde predominan las nubes ardientes, con un espesor promedio, que varía de 45 a 150 metros y su extensión longitudinal alcanza los 40 km al norte y noroeste del Valle Central.

- **Formación Barva**

Consiste de varias coladas y depósitos piroclásticos provenientes de la Cordillera Volcánica Central. Se presenta en forma de promontorios que sobresalen por sobre la planicie de ignimbritas. Denyer & Arias, (1991), la caracterizan como lavas andesíticas y andesito – basálticas, con espesores de 10 m hasta 80 m, con intercalaciones ocasionales de ceniza y lapilli que pueden llegar a tener espesores de hasta 10 m.

Dengo & Chaverri, (1951), se refiere a una corriente discontinua de lava, en forma de bloques sueltos, y frecuentemente formando montículos desde el W de San Antonio de Belén hasta más allá de Cebadilla, San Rafael de Ojo de Agua.

Hidrogeológicamente está constituida por lo que conoce como Miembro Carbonal y Miembro Bermúdez.



Para efecto del presente estudio se tratará las unidades en el área de estudio de acuerdo a su denominación hidrogeológica.

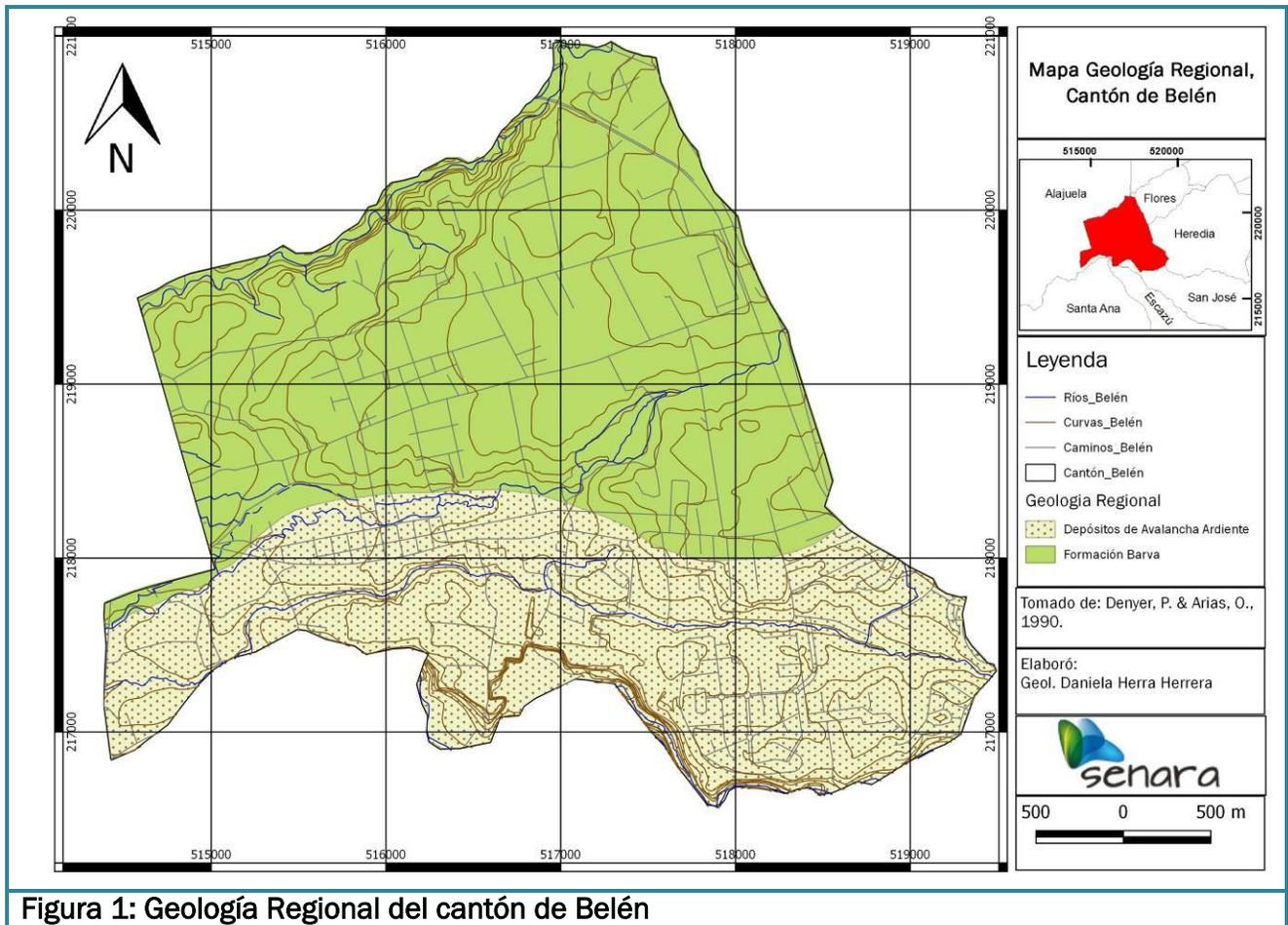


Figura 1: Geología Regional del cantón de Belén

GEOLOGIA E HIDROGEOLOGÍA LOCAL:

Para la elaboración del mapa geológico local del cantón de Belén se revisó la información geológica presente en los diferentes estudios hidrogeológicos presentados y revisados a la fecha por el SENARA.

Así mismo, se revisó la información de los diferentes reportes de perforación para cada uno de los pozos perforados en el cantón y de los piezómetros perforados por la municipalidad.

De igual forma se realizaron giras de campo para la observación de afloramientos y conocer la geología presente en el cantón, y su asociación con la geología Regional.



A continuación se indica el análisis de la información utilizada para la generación del mapa geológico del cantón.

1. Estudios hidrogeológicos presentados y revisados por SENARA para el cantón de cantón Belén.

A la fecha el SENARA, ha pronunciado en relación a 40 estudios hidrogeológicos (**ver Anexo 1**), realizados por particulares, para la valoración de las condiciones de vulnerabilidad y tiempos de tránsito locales.

Respecto a la geología local, muchas de los estudios realizaron perforaciones exploratorias de poca profundidad (entre 4 m a 10 m) para verificar las características de la zona no saturada en el sitio de interés y determinar si existe presencia de niveles de agua a dicha profundidad), levantamiento de afloramientos, asimismo, personeros de la Unidad de Gestión Hídrica del SENARA realizaron inspecciones en campo para corroborar la geología aflorante indicada en los estudios y verificar las condiciones de las perforaciones.

La mayoría de las propiedades donde se define la unidad Carbonal, se describen como arcillas muy plásticas de baja permeabilidad, en algunos sectores se encuentran clastos líticos milimétricos, esta unidad aflora principalmente en el sector central y norte del cantón según la distribución de las propiedades consultadas.

Las lavas que afloran en algunas de las propiedades se describen como afanitas porfíricas, presentan vacuolas las cuales no presentan conexión entre ellas, se observa fenocristales de plagioclasas, negra cuando se presentan sanas y cafés meteorizadas, estas lavas se asocian al Miembro Bermúdez de la formación Barva, se encuentran aflorando en el cauce de los ríos, así como en bloques métricos en superficie.

La ubicación de los bloques de lava se da principalmente en las propiedades cercanas al cauce Quebrada Seca y al sureste del cantón en el río Bermúdez.

También se describen tobas e ignimbritas asociadas a la formación Tiribí, las tobas se presentan muy alteradas mostrando una textura limo arcilloso, presentan baja permeabilidad, las ignimbritas se muestran sanas, masivas, ubicadas principalmente en las propiedades que se encuentran en la parte sur del cantón.

La Formación Colima superior, según los estudios presentados corresponde a lavas y brechas lávicas, masivas, presenta alta permeabilidad secundaria, aflorando principalmente al sur del Cantón de Belén, principalmente en la propiedad de Pedregal en las cercanías del río Virilla donde se encuentran expuestas producto de la explotación del tajo.



2. Pozos con información con descripción hidrogeológica en Belén:

Según la base nacional de pozos y nacientes del SENARA, para el cantón de Belén hay un total de 116 pozos que cuentan con información litológica. **(Anexo 2)**

La mayoría de las descripciones litológicas de las perforaciones, indica la presencia de una capa superior de espesor métrico de arcillas y tobas, asociado con la meteorización del miembro Carbonal de la Formación Barva y la Formación Tiribi. La ubicación de los pozos que presentan la capa de tobas asociada al Miembro Carbonal se encuentra distribuida principalmente en la zona central y norte del cantón; mientras que al sur del cantón, se indica la presencia de capas métricas de arcillas y toba, las cuales sobre yacen capas de ignimbritas asociadas con la Formación Tiribi (Avalancha Ardiente).

Además, es posible determinar la presencia de varias capas de lava en las diferentes perforaciones, las cuales se correlacionan con la Formación Barva y Lavas Intracañón, la Formación Barva en la parte central y norte, las lavas Intracañón ubicadas en la parte sur.

Siendo los acuíferos presentes en la zona de interés corresponden a los acuíferos Barva (Miembro Bermudez), Colima Superior y Colima Inferior, encontrándose el acuífero Barva como el más superficial y en las zonas que no se desarrolla el Barva, el más superficial corresponde al Colima Superior. Ambos acuíferos se encuentra separados por las tobas e ignimbritas de la Formación Tiribi y a su vez el Colima Superior se encuentra separado del Colima Inferior por las ignimbritas del miembro Puente Mulas.

Es importante tener presente que la mayoría de los pozos que poseen información litológica, muestran la existencia de capas métricas de tobas y arcillas sobreyaciendo al resto de las capas definidas, lo cual es de suma importancia a la hora de definir la vulnerabilidad de los acuíferos presentes en el cantón.

3. Afloramientos en campo.

Para tener una mejor interpretación de la geología presente en el cantón de estudio, el geólogo David Chacón, realizó giras de campo con el objetivo de localizar y describir afloramientos geológicos en el cantón y generó un mapa de afloramientos **(Figura 2)**.



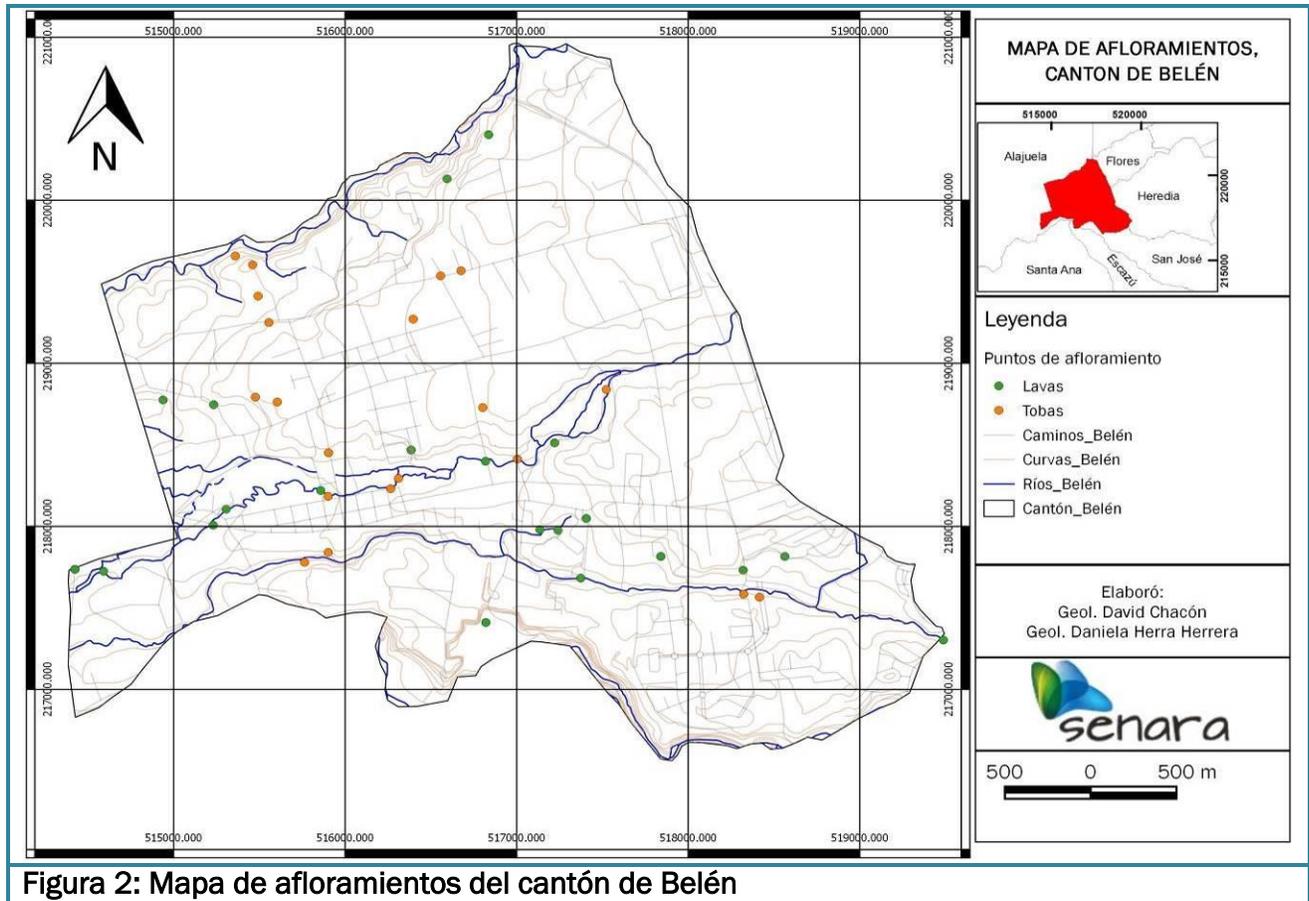


Figura 2: Mapa de afloramientos del cantón de Belén

Posteriormente la litología que se describe en el afloramientos se correlaciona con la con las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio. A continuación se describe las diferentes unidades geológicas observadas en los diferentes afloramientos ubicados en campo:

Unidad de lavas intracañón:

Según lo observado en campo, los afloramientos son masivos, presenta algunas fracturas, las cuales no se encuentran rellenas, los afloramientos presentan espesores observadas en campo de hasta 4,5 m.

Presenta una textura afanítica porfírica, se observa fenocristales de plagioclasa, algunos piriboles, por lo cual se asocia efectivamente con andesita o andesita basáltica.

Los afloramientos tipos de esta unidad se encuentran principalmente en el cauce del Río Virilla, en el sector de puente de Mulas, así como en todo el trayecto del camino que lleva a las instalaciones de la empresa pedregal (antiguo tajo ver fotografías 1 y 2), donde se observa claramente el afloramiento de esta unidad, por lo cual este punto se puede definir como el afloramiento tipo para el cantón.





Unidad de tobas e ignimbritas:

Esta unidad aflora en la parte sur de la zona de estudio, el afloramiento tipo se encuentra en las coordenadas 518415 E/ 217565 N, el cual corresponde a un corte de carretera, de unos 2,5 metros de altura.

La roca presenta coloración grisácea, macroscópicamente presenta una matriz cenicienta, con fiamez centimétricos, cristales de plagioclasa, algunos piriboles, la misma corresponde a una Ignimbrita.

En la zona también se encuentran una capa superior de tamaño métrico de tobas y arcillas las cuales presenta una coloración amarillenta, en los cauces del río se observa la presencia de material que engloba clastos centimétricos de otros materiales, así como la presencia de alguno fiames (Ver fotografías 3 y 4).



En todo el cauce del Río Bermúdez se logra observar la presencia de la mezcla de clastos y fiamez dentro de una matriz de cenicienta.



Cerca del corte de carretera observado en la fotografía 3 cuando se realizó una prueba de infiltración, al momento de preparar el sitio se observó que en el suelo se encontraba muchos clastos con fiames, lo que corrobora que esta zona aflora ignimbritas.

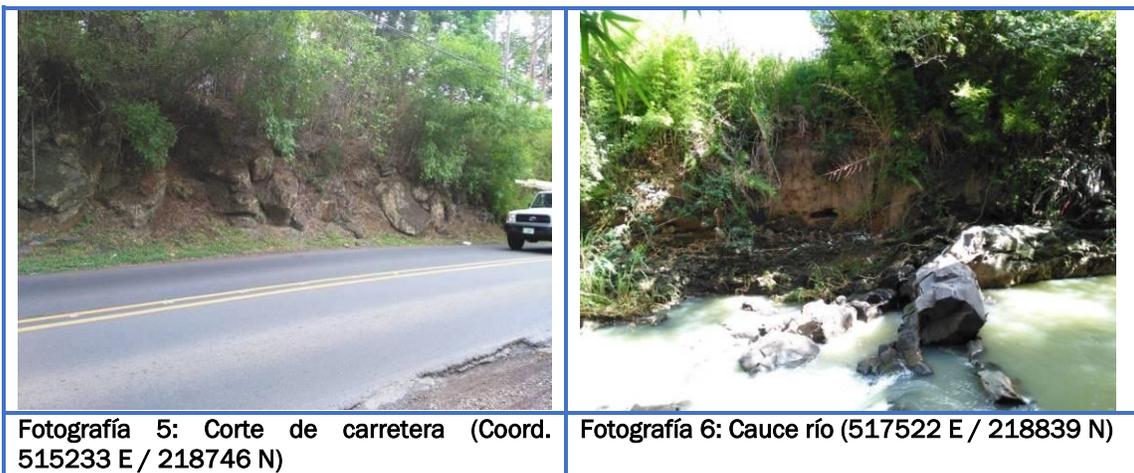
Esta unidad al poseer tobas e ignimbritas se asocia con la formación Avalancha Ardiente.

Unidad de Lavas Bermúdez:

Aflora como bloques de lava y en forma masiva, los bloques de lava corresponden posiblemente con las partes terminales de una colada, los bloques se presentan angulares a sub-angulares denotando poco transporte, con tamaños métricos. (Ver fotografía 5).

Los afloramientos masivos se localizan principalmente en el cauce de la Quebrada Seca y otras quebradas cercanas ubicadas en la parte central y norte, así como al sureste en el Río Bermúdez. (Ver fotografía 6).

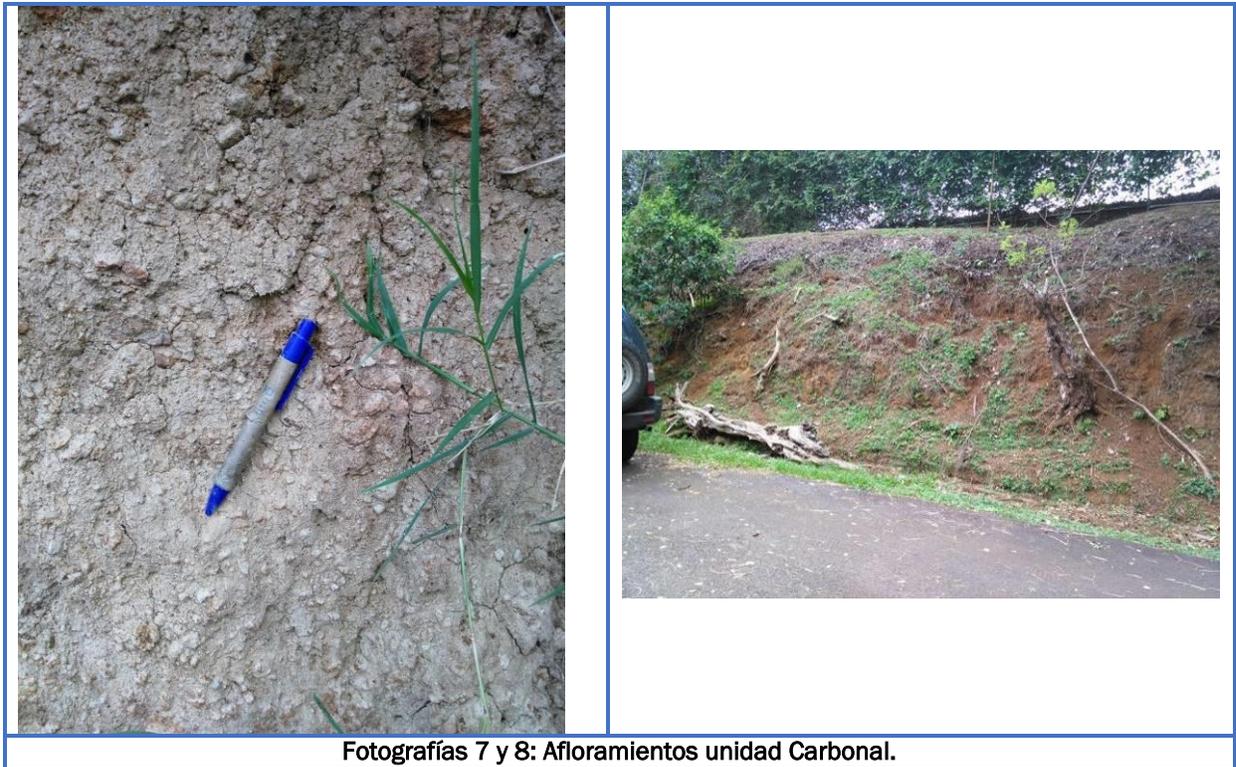
Para todos los afloramientos, se presentan una textura afaníticas porfíricas, con plagioclasas tabulares y presencia de piriboles, se observa una coloración grisácea cuando se encuentran sanas, meteorizadas una coloración amarillenta. Se clasifica como una andesita o andesita-basáltica.



Unidad de Tobas

Se define como una capa de coloración amarillento, de espesor variable, en algunos puntos presentan clastos milimétricos meteorizados, posiblemente pómez (Ver fotografías 7 y 8).





Presenta una textura granular y poca plasticidad al tocarse con la mano, espesores máximos observados en campo de 3,5 m.

Algunos informes de perforación indican que esta unidad se asocia con la unidad Carbonal, la cual se asocia con meteorización de las tobas de la Formación Barva.

4. Piezómetros perforados por la Municipalidad y supervisados por SENARA

Así mismo, aunado a la información que se tenía, la Municipalidad de Belén realizó la contratación para la perforación de 20 piezómetros en las distintas zonas de vulnerabilidad (extrema, alta y media), con el fin de obtener mayor cantidad y mejor calidad de información, para actualizar correctamente el mapa de vulnerabilidad; la localización de dichas perforaciones se realizó en base a las recomendaciones de SENARA de los lugares que se necesitaba recabar información, en el **Anexo 3** se muestra la información que se obtuvo de las perforación.

Estas perforaciones mostraron que la capa superior que cubre la zona está constituida por tobas alteradas a material de arcilla y limos, lo cual corresponde a la alteración y meteorización del Miembro Carbonal y Formación Tiribi.



Mapa Hidrogeológico Cantón Belén

Con la información obtenida de cada uno de expedientes revisados por el SENARA, las litologías presentes en los informes de pozos, y los afloramientos observados en campo, se logra definir la distribución en el cantón de cada una de las formaciones y unidades geológicas presentes en el cantón de Belén y que se observan en el **Figura 3**.

El mapa geológico muestra que la principal unidad corresponde a las tobas del miembro Carbonal de la Formación Barba, el cual se encuentra distribuido aproximadamente en un 60% del total del territorio, luego la otra formación que abarca gran distribución en el cantón corresponde a las tobas e ignimbritas de la Formación Tiribí, ubicándose principalmente en la parte sur de la zona de estudio.

En una menor escala se encuentra las lavas del miembro Bermúdez y luego las lavas Intracañón de la Formación Colima Superior, las primeras asociadas a la Quebrada Seca y el Río Bermúdez y las otras al Río Virilla.

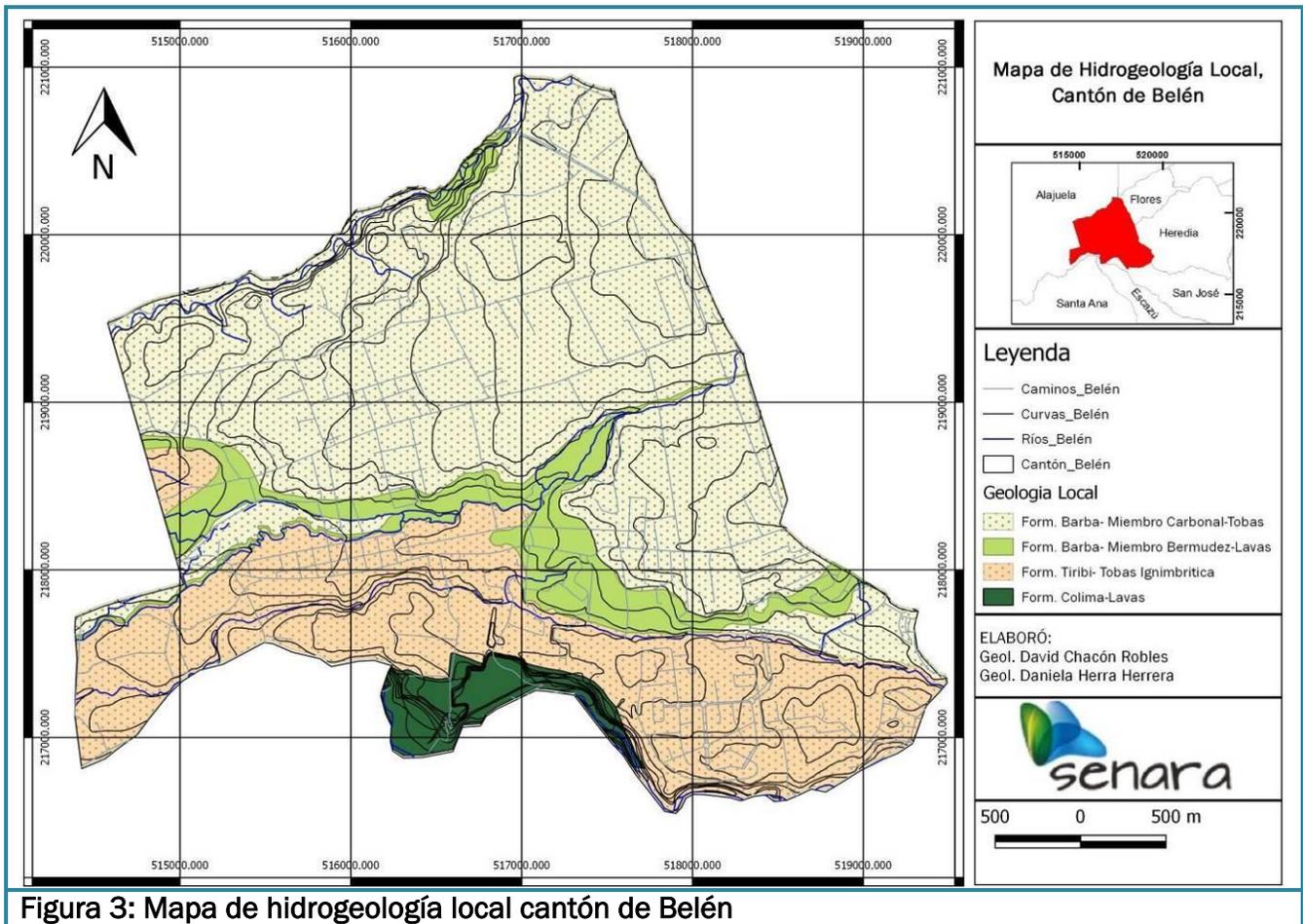


Figura 3: Mapa de hidrogeología local cantón de Belén



En la **Figura 4** se presenta una columna estratigráfica la cual muestra cada una de las unidades hidrogeológicas presentes en el cantón.

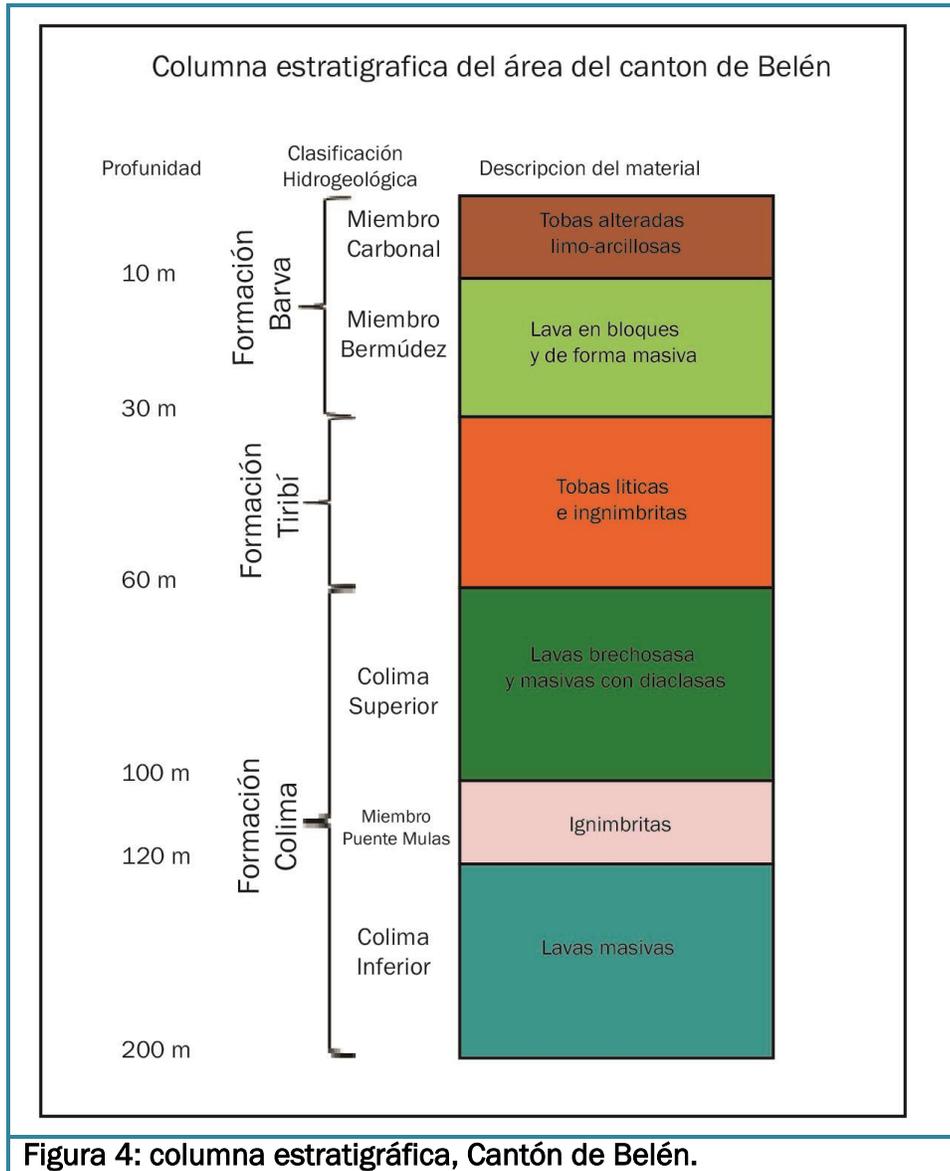


Figura 4: columna estratigráfica, Cantón de Belén.

ANÁLISIS DE SUELOS:

Como parte de conocer las características de la zona no saturada, específicamente la capa superior, se procedió a realizar pruebas de porchet, así como, análisis de suelos que incluyen: porosidad, CC (Capacidad de Campo), PM (Punto de Marchitez), Ph, Clasificación textural del suelo, densidad aparente, densidad real.

Los análisis realizados ayudaran a determinar los tiempos de tránsito en la zona no saturada, lo cual servirá de complemento para de definir la vulnerabilidad en el cantón.



Permeabilidad de la zona no saturada

- *Pruebas de Infiltración realizadas en campo por SENARA:*

El geólogo David Chacón por parte de SENARA, realizó 15 pruebas de infiltración, procurando tener una buena distribución en todo el cantón, las pruebas fueron realizadas por el método de porchet, la cual utiliza la siguiente configuración:

$$K = (R/2(t_2 - t_1)) * \ln(2h_1 + R / 2h_2 + R)$$

Dónde:

R= Radio, H=Carga hidráulica.

Bajo la anterior configuración, los valores de permeabilidad para cada una de las pruebas de infiltración realizadas en campo se indican en el **cuadro 1**.

Cuadro 1: Pruebas de infiltración realizadas por el SENARA					
Pruebas de Infiltración	Longitud E	Latitud N	K (cm/mim)	K (m/día)	Observación
Prueba 1	517596	218493	0,01224	0,1763	Parque Muni
Prueba 2	517697	219334	0,04782	0,6886	Oficentro Cafetal
Prueba 3	517155	220428	0,01029	0,1482	Cervecería-Rotonda
Prueba 4	516704	219963	0,01224	0,1763	Arreo
Prueba 5	515822	219595	0,01397	0,2011	Potrero Cargil
Prueba 6	515529	219462	0,03804	0,5477	Parque humedal
Prueba 7	514787	219037	0,03646	0,5251	La casona del pollo
Prueba 8	515230	218495	0,00201	0,0298	Sapriisa
Prueba 9	515994	218792	0,09899	1,4254	Iglesia Ángel cerca
Prueba 10	516763	218928	0,03864	0,5564	Comedero Ganado
Prueba 11	517088	218361	0,04182	0,6022	Nacientes Muni
Prueba 12	517491	217771	0,05235	0,7538	Don Wiliam
Prueba 13	516084	218206	0,01029	0,1482	Casa ANDE
Prueba 14	515108	217343	0,0092	0,1324	Rumba
Prueba 15	518408	217545	0,00282	0,0406	Cariari

Las memorias de cálculos y gráficos para cada una de las pruebas realizadas se indican en el **Anexo 4**.

- *Pruebas de infiltración estudios hidrogeológicos presentados a SENARA:*

Como complemento a las pruebas de infiltración realizadas por SENARA, y con el objetivo de obtener una mayor distribución de valores de permeabilidad, se revisó las pruebas aportadas en los distintos estudios hidrogeológicos presentados a SENARA.

Es importante indicar que no hay una homogeneidad en el método utilizado para determinar las permeabilidades, ya que se encuentran pruebas de anillos, Horslev, le Franck.



Las resultados de las pruebas de permeabilidad presentados en los diferentes estudios hidrogeológicos presentados a SENARA se indican a en el **cuadro 2**.

Cuadro 2: Pruebas de infiltración en estudios presentados a SENARA				
Expediente Estudio	Longitud X	Latitud Y	K (m/día)	Metodo
Exp-79-13	517572	218977	0,55	Porchet
Exp-79-13	517499	219206	0,05	Porchet
Exp-182-13	514963	218269	0,05	Porchet
Exp-182-13	514920	218361	0,1	Porchet
Exp-141-14	516932	218497	1,2	Porchet
Exp-228-14	516950	218351	0,07	Porchet
Exp-12-14	515175	219526	1,2	Porchet
	515477	219420	0,7	Porchet
EXP-002-2014	515696	219125	0,13	Porchet
	515696	219125	0,13	
EXP-107-2011	517916	219100	0,003	Porchet
			0,002	
EXP-154-2011	516701	217161	0,12	Porchet
			0,04	
EXP-153-2012	517438	218886	0,20	Porchet
			0,10	
EXP-225-2014	517824	219359	0,23	Porchet
	517894	219373	0,35	
Exp-47-14	516933	217525	0,07	Horslev
	516214	217686	0,02	Horslev
	516379	217795	0,02	Horslev
	516360	217472	0,07	Horslev
	516689	217835	0,09	Horslev
	516708	217647	0,08	Horslev
	516478	217277	0,06	Horslev
Exp-03-14	517761	219057	0,04	le franck
Exp-116-14	516297	219697	0,01	Anillos
Exp-155-14	516850	218500	0,03	Anillos
Exp-218-14	515073	218344	0,10	le franck
Exp-218-14	514975	218395	0,08	le franck
Exp-211-14	515073	218344	0,10	le franck
Exp-211-14	514975	218395	0,08	le franck
Exp-116-2013	516350	219630	0,012	le franck



- *Pruebas de Infiltración realizadas por Ingeotec para el estudio de la Municipalidad:*

Además como parte de los nuevos piezómetros solicitados por la municipalidad se realizaron pruebas de permeabilidad tanto en superficie, como en profundidad con mediciones de carga variable Horslev, los resultados de estas pruebas se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3: Pruebas de infiltración solicitadas por la municipalidad		
N° Piezómetro	Permeabilidad Carga Variable m/d	Permeabilidad superficie m/d (0,50-0,80)
P1	5 m: no hay descenso	0,0514
	10 m: 0,0643 arcilla plastica	
P2	5 m: 0,00542 toba alterada	0,0235
	10 m: 0,193 toba alterada arcilla	
	25 m: 0,0245 lava andesitica alterada	
P3	5 m: 0,043	0,042
	10 m: 0,00111	
	20 m: 0,0140	
P4	5 m: nada roba alterada	0,0213
	10 m: 0,0683 toba alterada arcilla	
	15 m:	
P5	5 m: 0,00194	lastre polideportivo
	10 m: 0,0149	
	20 m: fuga total	
P6	5 m: 0,0110 arcilla plastica	0,0514
	10 m: 0,093 toba alterada arcilla	
	15 m:	
P7	5 m: 0,00221 toba alterada arcilla	0,0514
	10 m: 0,0364 toba alterda arcilla	
	20 m: no hubo	
P8	5 m: 0,185 arcilla plastica ???	0,0245
	15 m: 0,0295 arcilla plastica	
	15 m:	
P9	5 m: no hay dato	0,021
	10 m: 0,027 arcilla plastica	
	15 m:	
P10	5 m: 0 arcilla plastica	0,0206
	10 m: 0,00335	
	15 m:	
P11	5 m: no hay dato lava Bermudez	0,0469
	10 m: fuga total lava andesitica Bermudez	



	15 m:	
P12	5 m: 0,0434 bloque andesítico	0,0149
	10 m: 0,00677 ignimbrita sana	
	15 m: 0,0895 ignimbrita sana	
P13	5 m: 0,149	0,021
	10 m: 0,00132	
	15 m:	
P14	5 m: 0,0135 arcilla plástica carbonal	0,0575
	10 m: 0,00221 lava escoracea Bermudez	
	15 m:	
P15	5 m: 0,0954 arcilla plástica	0,021
	10 m: 0,0251 arcilla plástica carbonal	
	15 m:	
P16	5 m: 0,0273 arcilla plástica	0,0197
	10 m: 0,0418 roca alterada arcilla	
	15 m: 0,0277 roca alterada arcilla	
P17	5 m: 0,0272 toba alterada arcilla carbonal	0,0347
	10 m: 0,0202 arcilla plástica Tiribi	
	15 m:	
P18	0,0148 arcilla plástica Tiribi	0,0217
	10 m: 0,0490 arcilla plástica Tiribi	
	15 m:	
P19	5 m: 0,00132 arcilla plástica Tiribi	
	10 m: 0,00198	

Para efectos de homogenizar los valores de permeabilidad en el cantón, se toma para análisis los valores obtenidos por medio del método Porchet, tanto de las pruebas realizadas por SENARA, como las presentadas en los estudios hidrogeológicos así como las perforaciones y estudio solicitado por la municipalidad.

Basados en los resultados que se obtuvieron por este método, se procede a definir clases, que permitan clasificar, de acuerdo a la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de U.S.A, los resultados en permeabilidades lentas y moderadamente lenta.

Según los resultados obtenidos asociados a las clases definidas, se considera que la permeabilidad para el cantón de Belén es entre lente y moderadamente. (**Cuadro 4**).

Cuadro 4: Clasificación permeabilidad Belén		
Clases (m/d)	Frecuencia	Clasificación
0,035-0,42	37	Lenta
0,42-0,81	11	Moderadamente lenta
Basado en el Servicio de Conservación de Suelos de U.S.A		



Los resultados de porosidades determinadas en laboratorio, para los diferentes estudios se indican en el **cuadro 5**:

Cuadro 5: Porosidades presentes en estudios presentados a SENARA			
Propiedad Belén	Coordenadas		Porosidad (%)
	Longitud X	Latitud Y	
Exp-79-13	517572	218977	50,00
Exp-79-13	517499	219206	50,00
Exp-182-13	514963	218269	58
Exp-182-13	514920	218361	58
Exp-03-14	517761	219057	46
Exp-116-14	516297	219697	23
Exp-155-14	516850	218500	26
Exp-218-14	515073	218344	41
Exp-218-14	514975	218395	26
Exp-169-2010	516900	218273	54
Exp-107-2011	517916	219100	44
Exp-153-2012	517423	218881	52
Exp-225-2014	517894	219373	59
Exp-48-2014	519050	217950	54
Exp-004-15	515000	218500	50

Como completo a las porosidades ya determinadas, y con intención de conocer otros parámetros adicionales, se tomó 8 muestras distribuidas en toda la zona de estudio para análisis en el laboratorio del Instituto Nacional de Innovación y Transferencias en Tecnologías Agropecuarias (INTA). Los parámetros que fueron analizados corresponden a: pH, capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM), densidad aparente (Da), densidad real (Dr), Porosidad.

La mayoría de las muestras fueron tomadas cerca de los puntos donde se desarrollaron las pruebas de infiltración, a profundidades entre los 10-20 cm.

Los resultados de los análisis a las muestras se indican en el **cuadro 6**.

Cuadro 6: Resultados análisis de suelo cantón Belén laboratorio INTA.													
Muestra Camp.	Coordenadas		Ph	Texturas			Text.	Ret-Humed (Atmosfs)			D.a	D.Real	% Porosidad
	Long. X	Lat. Y		arena	Arcilla	Limo		0,33 (C.C.)	15,0 (P.M.)	A. Útil			
1	514787	219037	5,2	30,0	34,0	36,0	FA	38,0	21,0	16,99	1,2	2,2	47,3
2	517088	218361	5,9	32,0	36,0	32,0	FA	38,2	21,7	16,48	0,9	1,9	50,8
3	515108	217343	6,1	34,0	32,0	34,0	FA	38,0	20,9	17,14	1,2	2,2	44,7



4	518408	217545	5,9	32,0	34,0	32,0	FA	39,1	21,7	17,41	1,0	2,0	50,8
5	517155	220428	5,8	30,0	32,0	38,0	FA	38,2	22,0	16,18	0,9	1,9	53,8
6	517800	219009	5,4	30,0	30,0	40,0	FA	37,9	21,7	16,22	1,0	1,9	49,7
7	516509	219308	5,6	28,0	34,0	38,0	FA	38,4	20,9	17,49	1,3	2,3	44,3
8	516084	218206	5,8	32,0	34,0	34,0	FA	38,4	20,7	17,63	1,0	2,0	48,8
D.a.: Densidad aparente. D. Real.: Densidad Real. C.C.: Capacidad de Campo. P.M.: Punto de Marchitez. A. Util.: Agua Util. Fuente: Laboratorio INTA.													

Así mismo por el estudio realizado por la municipalidad se realizaron análisis de la porosidad eficaz de los suelos en los piezómetros, así como, porosidad de algunos fragmentos de roca, los resultados se muestran en el **cuadro 7**.

Cuadro 7: Pruebas de porosidad en suelo y roca por Ingeotec para la Municipalidad de Belén		
N° Piezómetro	Porosidad eficaz suelo %	Porosidad Roca en profundidad%
P1	30	
P2	26	17 m: 6%, 21 m: 4%
P3	29	6 m: 31, 19%, 50m: 30%
P4	29	10,5 m: 46%
P5	29	14 m: 2%
P6	27	
P7	32	7,40 m: 6%
P8	29	8,5 m: 23%
P9	27	
P10	27	
P11	30	4 m: 5%
P12	30	14,5 m: 26%
P13	32	7,20 m: 32%
P14		10,5 m: 3%
P15	30	2,50 m: 3%, 10,50 m: 3%
P16	26	19 m: 5%
P17		7,50m: 6%
P18		10,5 m: 18%, 13,50m: 4%

Los resultados de los análisis realizados por SENARA, indican que la capa superior de suelo presente en el cantón de Belén corresponde a material franco-Arcilloso, con porosidades entre los 40-50 %, presentan un pH cercano a los 6, correspondiendo con suelos poco ácidos.

Sin embargo, las porosidades eficaces tomadas por el estudio de la municipalidad son entre los rangos de 26% y 30% muchos menores, estos datos fueron tomados a distintas profundidades entre 0.5 m y 2 m; sin embargo más adelante se va observar que aunque son menores porosidades los espesores de las capas tiene mayor influencia en los tiempos de tránsito.



Con base a estos datos se elaboró un mapa del cantón con los datos de porosidades (Figura 6), donde para un mejor manejo de los datos, se usaron los rangos entre 20 y 40% y porosidades mayores a 40% para la zonificación de la porosidad.

Como se puede observar, la mayor parte del cantón presenta porosidades mayores a 40 %, mientras que la zona al oeste del cantón presenta una concentración de las porosidades entre 20-40%.

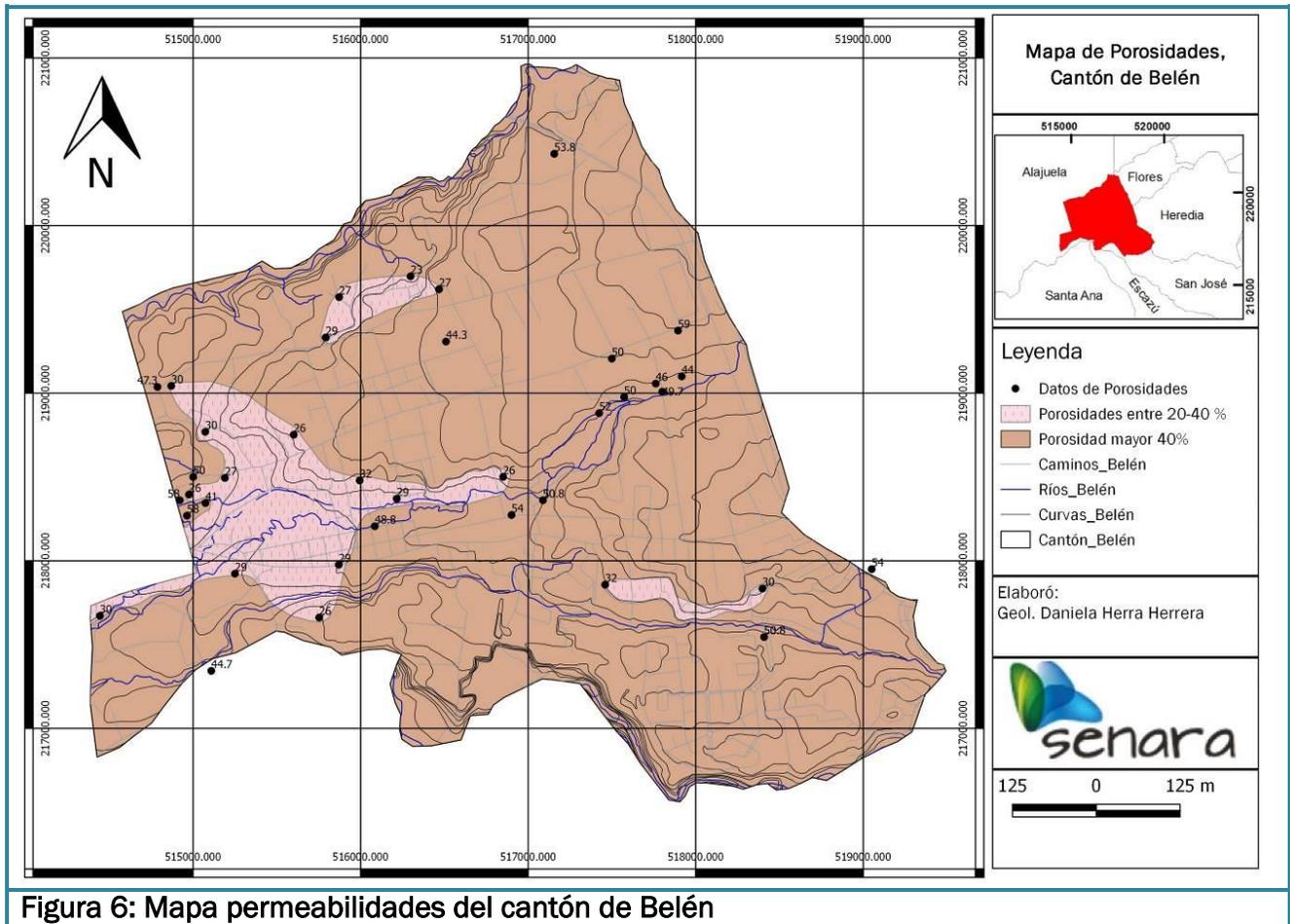


Figura 6: Mapa permeabilidades del cantón de Belén

Espesores de suelo

Como parte del análisis de los tiempos de tránsito, en base a los pozos que se ubican en el cantón, así como, de las perforaciones de piezómetros realizadas por la municipalidad y de los perfiles hidrogeológicos realizados en este estudio, se realizó el mapa de espesores de suelos o coberturas; el cual se realizó haciendo una valoración promedio de los datos y definiendo dos clases, aquellos espesores que fuera de 0 a 10 m y los espesores mayores a 10 m.

En la Figura 7 se muestra principalmente que la mayor parte del cantón está conformado por suelos con espesores mayores a los 10 m y en aquellas áreas que muestran



espesores menores, están ubicadas en sitios cercanos a afloramientos las lavas de la Formación Barva.

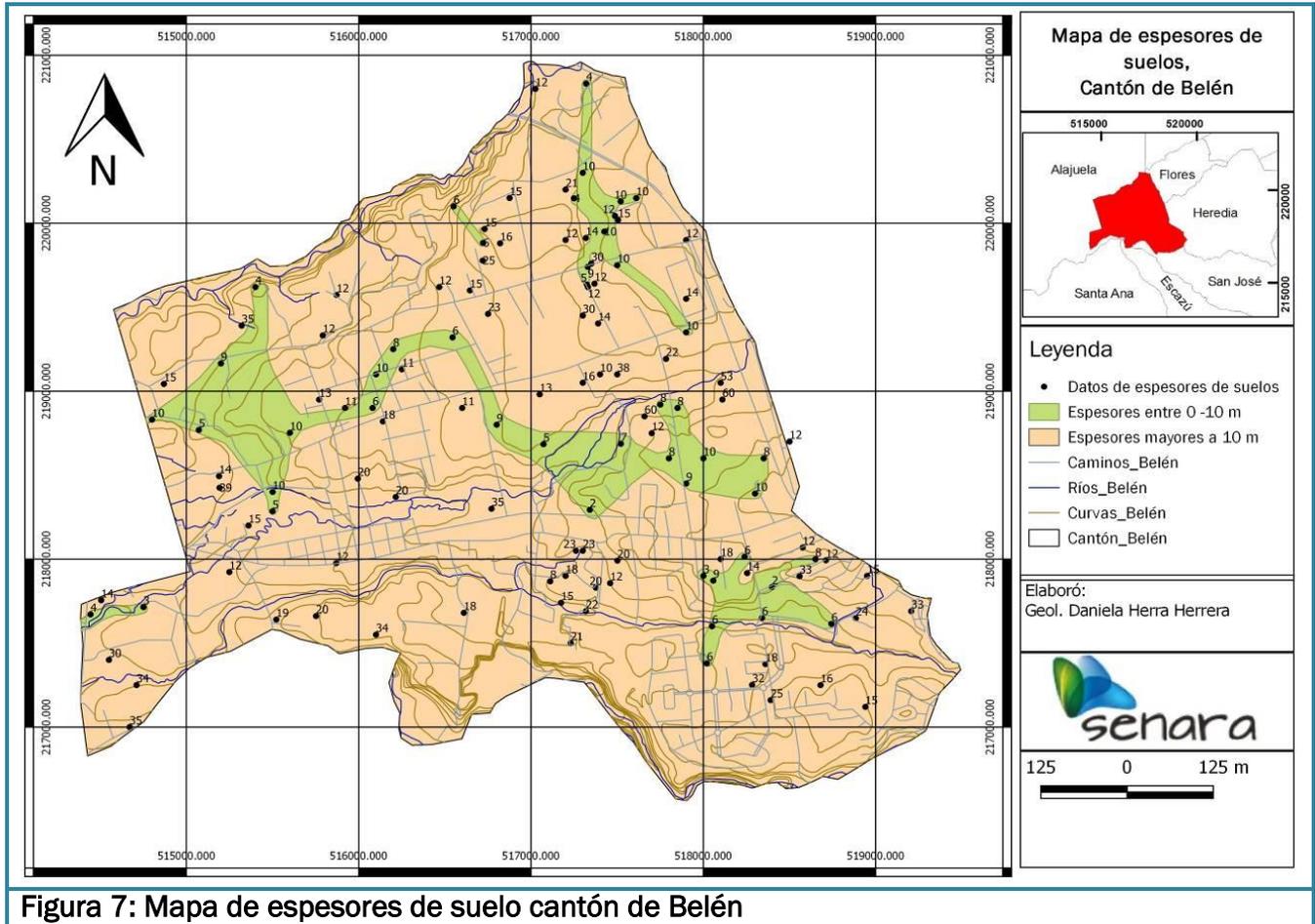


Figura 7: Mapa de espesores de suelo cantón de Belén

Tiempos de transito:

Un elemento de gran importancia en la revisión de la información respecto al cantón de interés, corresponde la determinación del tiempo de tránsito en la zona no saturada, lo cual, ayudará a definir las zonas más propensas a la contaminación dentro la zona de estudio, así como, evaluar de una forma más precisa la vulnerabilidad en el cantón.

Como en los parámetros anteriores, se realiza la búsqueda de la información aportada en los estudios hidrogeológicos, así como la determinación del tiempo de tránsito con la información generada por parte del SENARA.

Basados es estas dos premisas, se obtiene los tiempos de tránsito de sustancias bacteriológicas para alcanzar la zona saturada en la zona de interés. Se indican en el **cuadro 8**, los tiempos de transito aportados en los estudios revisados en SENARA.



Cuadro 8: Tiempos de Transito estudios Hidrogeológicos presentados a SENARA,						
Expediente Estudio	Longitud X	Latitud Y	Porosidad (%)	Permeabilidad (m/día)	Espesor (m)	Tiempos Transito (días)
Exp-79-13	517572	218977	50	0,55	11	5,23
Exp-79-13	517499	219499		0,05		0,17
Exp-182-13	514963	218269	58	0,05	10	29,3
Exp-182-13	514920	218361	30	0,1	12,5	64,2
Exp-225-2012	517824	219359	59	0,35	14	23,6
	517894	219373	30	0,23	10	13,04
Exp-153-2012	517438	218886	52	0,20	6,5	9,24
				0,10		

Del cuadro presentado anteriormente, se deja claro que son cortos los tiempos de tránsito para diferentes estudios, en los cuales, la permeabilidad se obtuvo en campo por medio del método Porchet, las porosidades se obtuvieron en laboratorio mediante análisis de muestra de suelo.

Se obtiene por parte del SENARA tiempos de tránsito para diferentes puntos, utilizando para ello espesores de los pozos más cercanos a los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración y porosidad, los espesores corresponden principalmente con el material de la capa superior, igualmente se realizó para los puntos de donde la municipalidad realizo las perforaciones, los resultados obtenidos se indican en los cuadros 9 y 10:

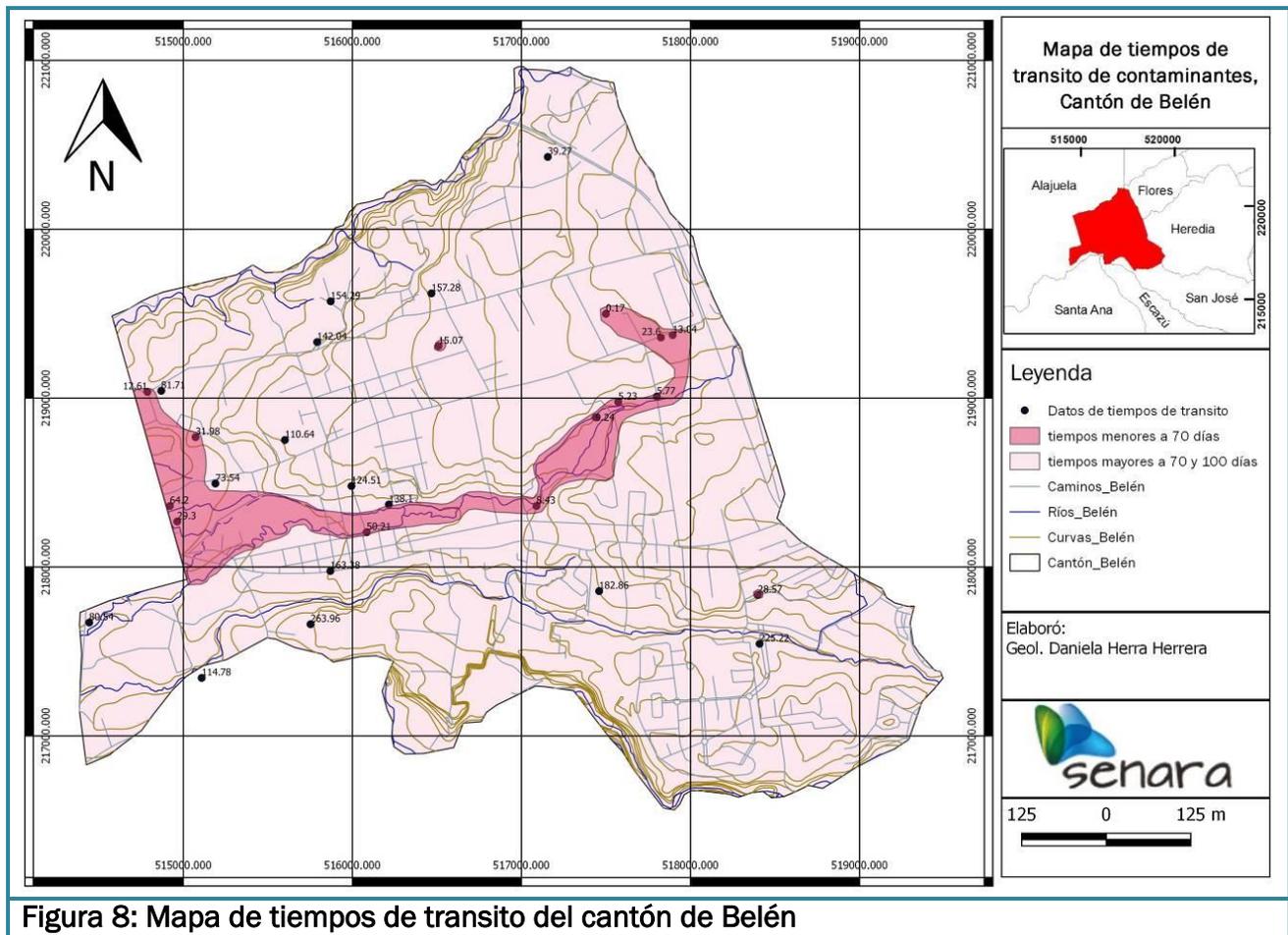
Cuadro 9: Calculo de tiempos de transito basados en pruebas realizadas en SENARA.						
Muestra	Longitud X	Latitud Y	Porosidad (%)	Permeabilidad (m/día)	Espesor (m)	Tiempo tránsito (días)
1	514787	219037	47,3	0,5251	14	12,61
2	517088	218361	50,8	0,6022	10	8,43
3	515108	217343	44,7	0,1324	34	114,78
4	518408	217545	50,8	0,0406	18	225,22
5	517155	220428	53,8	0,1370	10	39,27
6	517800	219009	49,7	0,6886	8	5,77
7	516509	219308	44,3	0,1763	6	15,07
8	516084	218206	48,8	0,1482	15,25	50,21

Cuadro 10: Calculo de tiempos de transito basados en perforaciones de la municipalidad.						
Perforación	Coordenadas lamber		Porosidad eficaz (%)	Permeabilidad (m/día)	Espesor (m)	Tiempo tránsito (días)
P1	219043	514869	0,051	30	14	81,71
P2	218752	515600	0,024	26	10	110,64



P3	218370	516215	0,042	29	20	138,10
P4	217976	515869	0,021	29	12	163,38
P6	218494	515189	0,051	27	14	73,54
P7	218479	515994	0,051	32	20	124,51
P8	219332	515791	0,025	29	12	142,04
P9	219573	515871	0,021	27	12	154,29
P10	219620	516467	0,021	27	12	157,28
P11	218769	515072	0,047	30	5	31,98
P12	217671	514443	0,015	30	4	80,54
P13	217857	517459	0,021	32	12	182,86
P15	217834	518398	0,021	30	2	28,57
P16	217661	515752	0,020	26	20	263,96

Con base en los datos se elaboró un mapa de tiempos de tránsito para observar la distribución de estos a lo largo del cantón (**Figura 8**).



Las zonas cercanas a la quebrada seca se presentan tiempos de tránsito cortos menores a los 70 días y en el resto del cantón de entre 70 a 230 días. Por otro lado, los valores menores a 140 están asociados al acuífero Barva y los superiores a 140 días están asociados al acuífero Colima Superior.

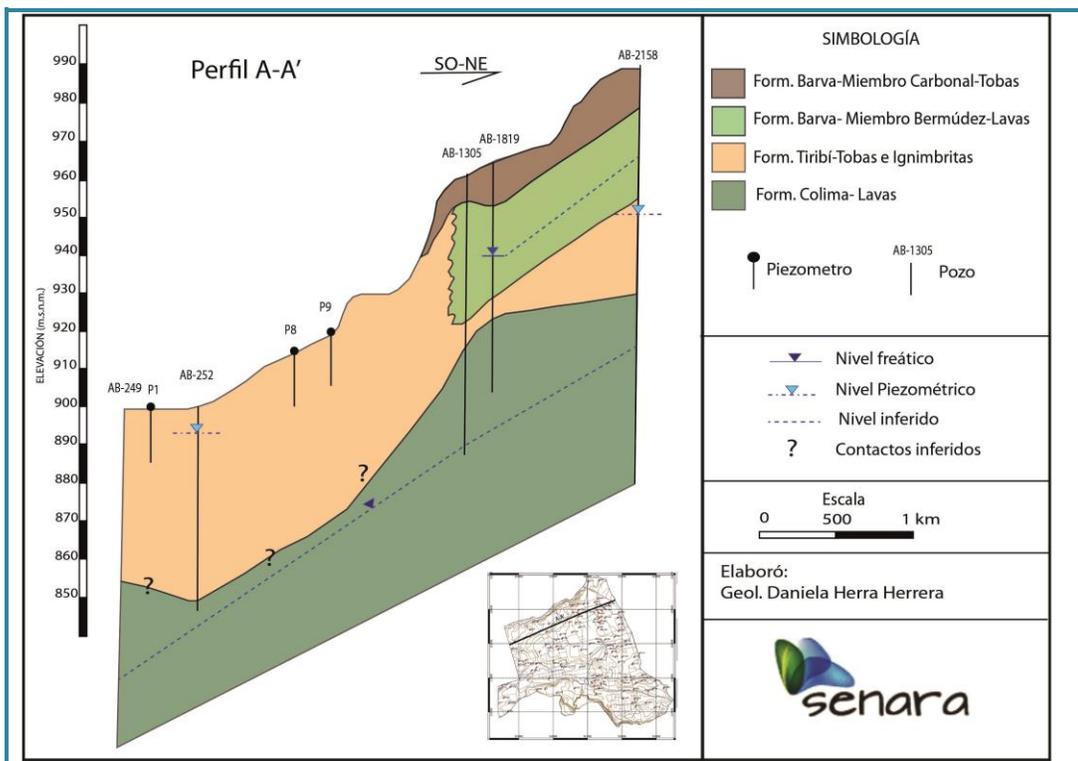
Resulta de importancia en la planificación territorial, el considerar los espesores someros de cobertura que protegen el acuífero Barva, dado que la remoción de material para la conformación de los terrenos podría acarrear un cambio en el comportamiento de los acuíferos pasando de una condición protegida a sustancias bacteriológicas a una vulnerable a dichas sustancias.

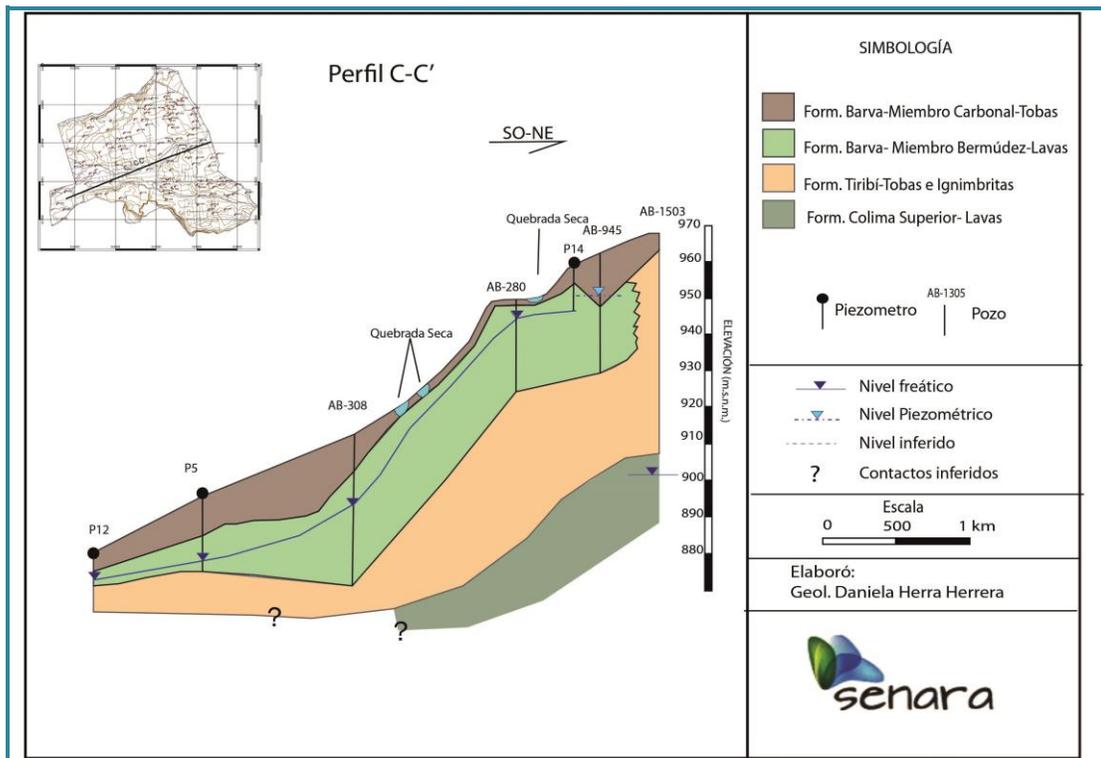
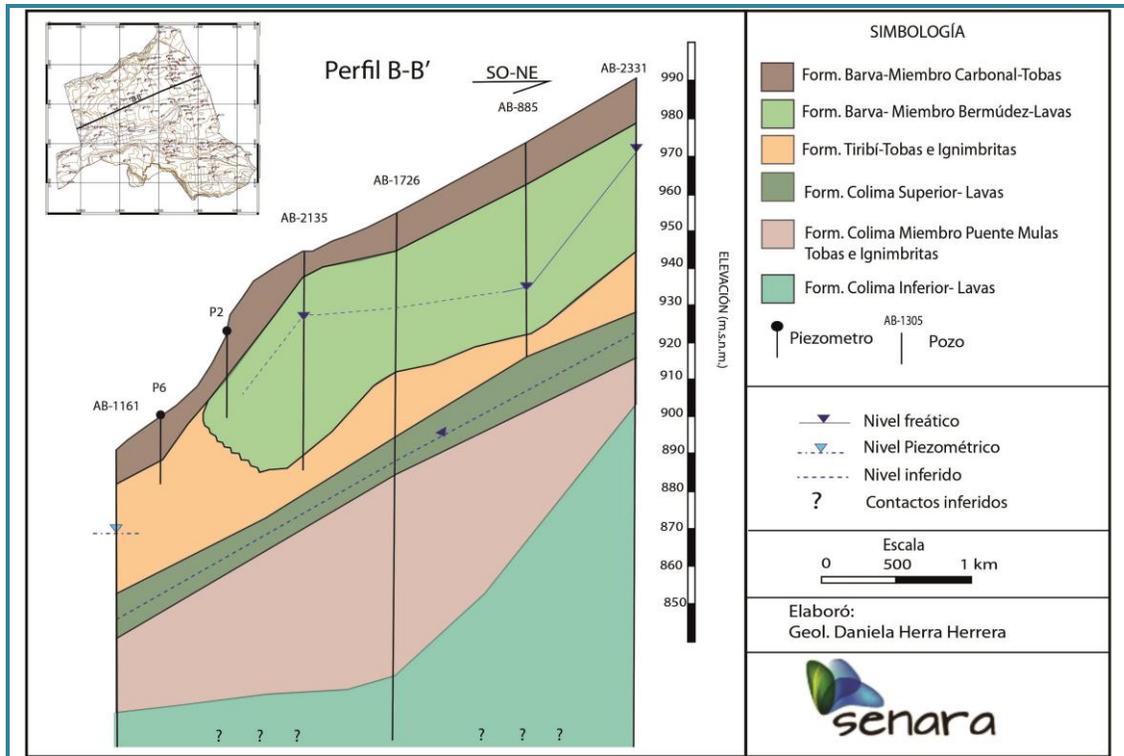
PERFILES HIDROGEOLOGICOS:

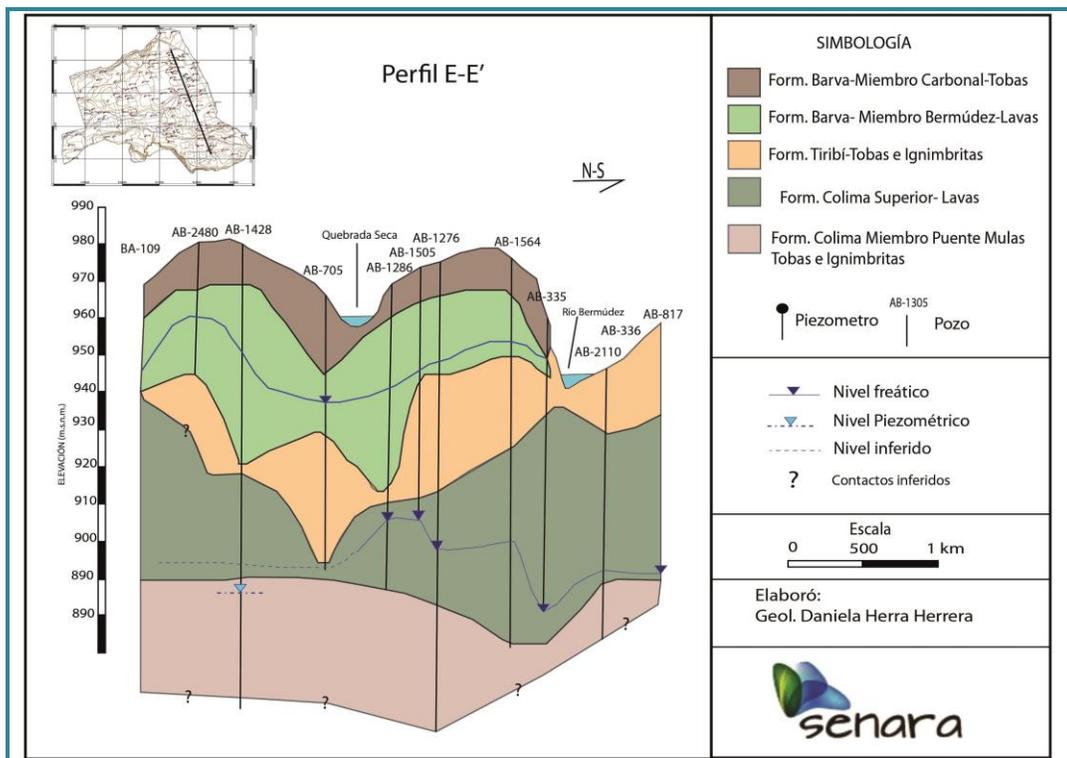
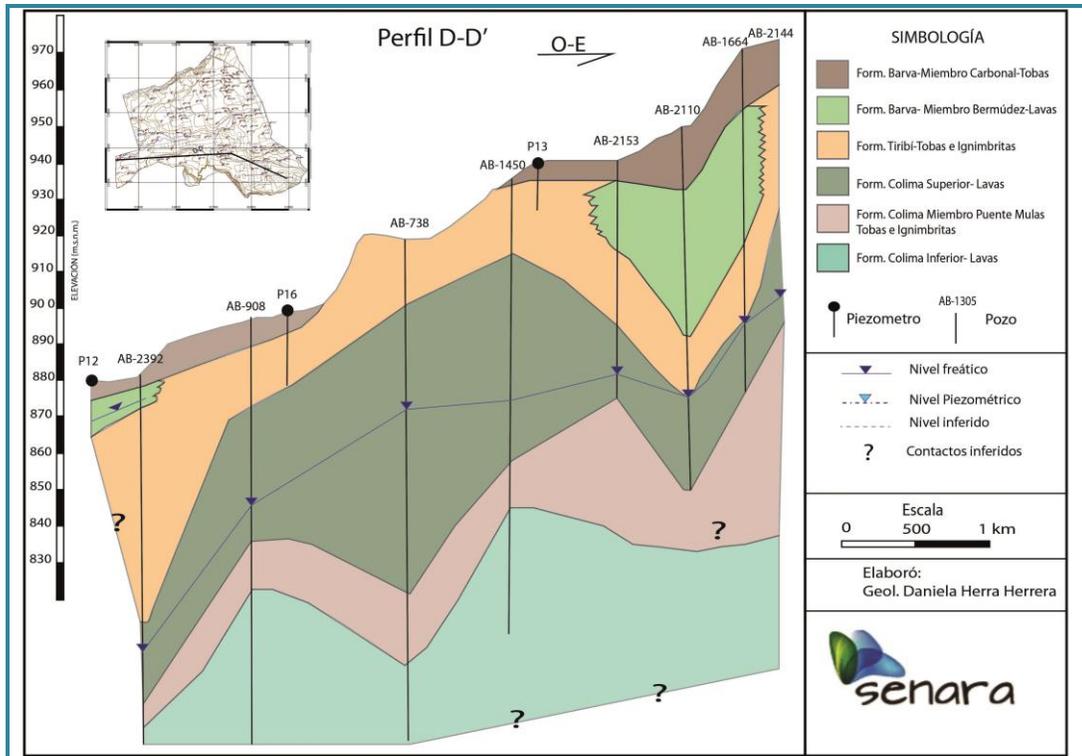
Para una comprensión precisa de las condiciones hidrogeológicas presenten en el cantón de Belén, se realizó una serie de perfiles hidrogeológicos en diferentes zonas de interés.

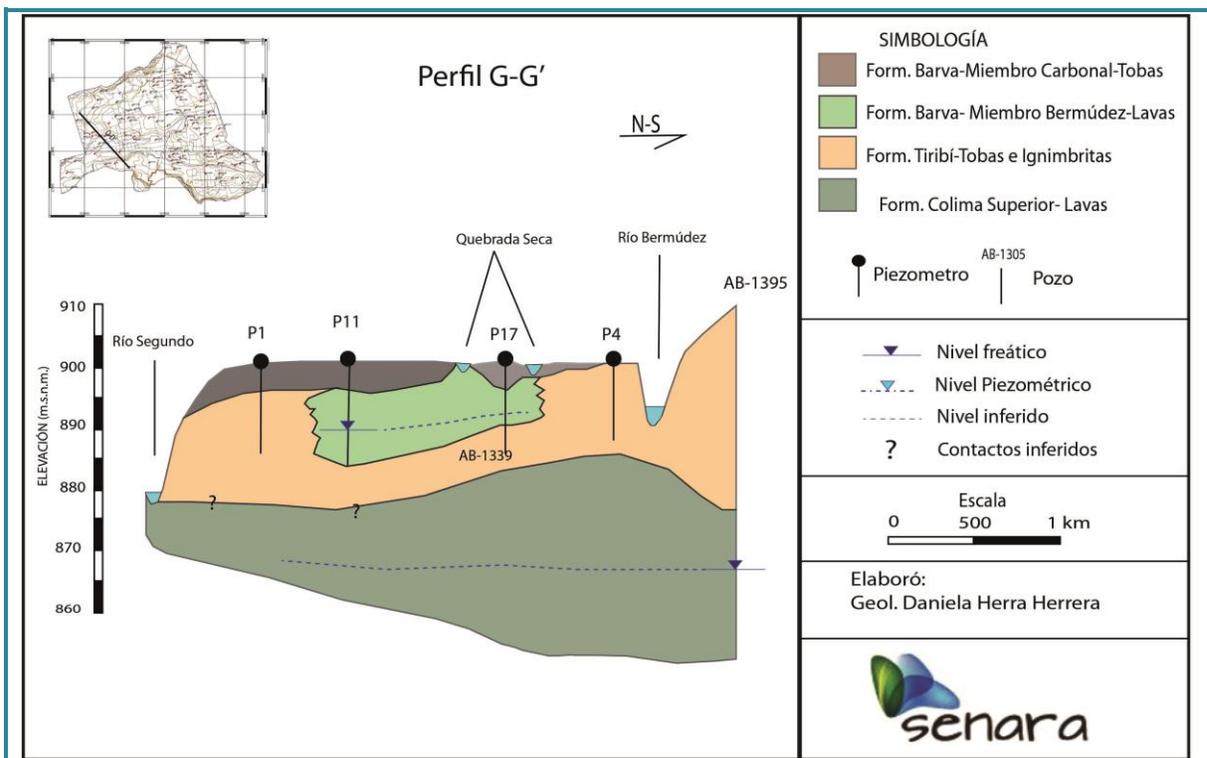
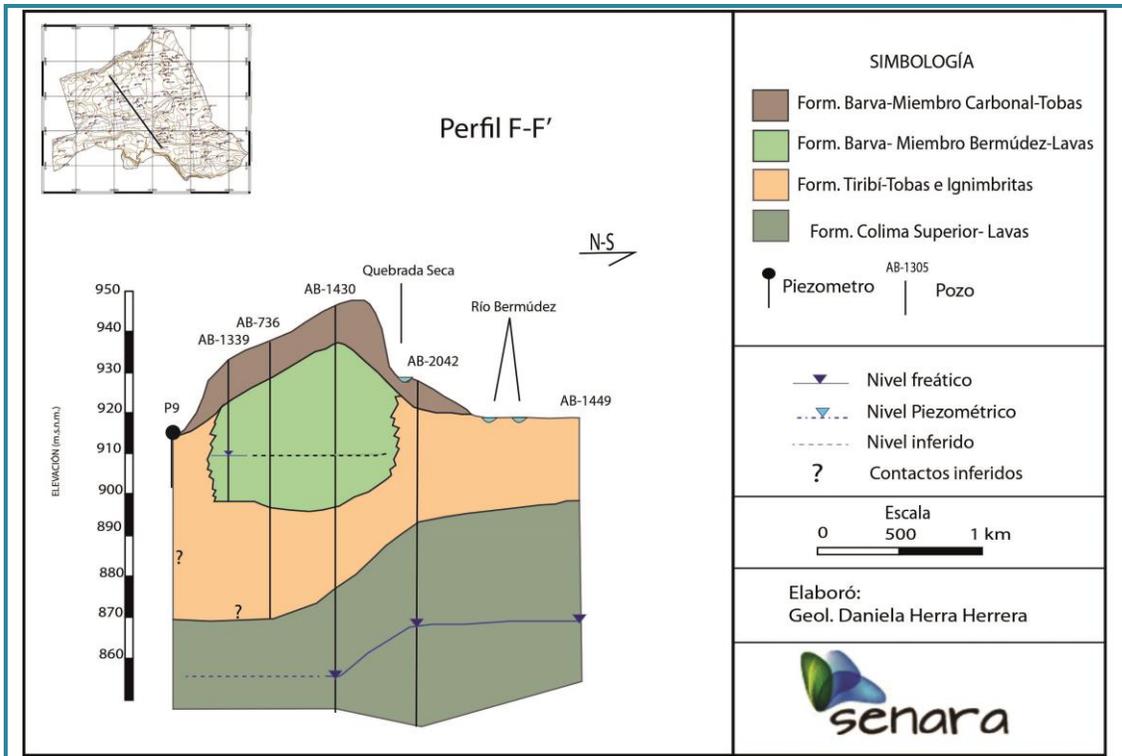
Se basan en los diferentes pozos con información de perforación, ubicados dentro de la zona de interés, así como, de los piezómetros realizados por la municipalidad.

Los perfiles muestran en secuencia el comportamiento hidrogeológico en profundidad, de norte a sur y de oeste a este.









Ya de forma más general en el cantón, los diferentes perfiles muestran la existencia de la Unidad Carbonal distribuida sobre toda la zona de interés, esta unidad corresponde con tobas/arcillas, presentando espesores variables en todo el cantón.

Vemos también hacia el norte del cantón la formación Barva lo correspondiente al Miembro Bermúdez, empieza aparecer al noreste, y luego atraviesa la parte central del cantón hasta llegar a la parte oeste cerca de donde queda el parque de La Amistad, además, se observa también que el acuífero Barva (Mb. Bermúdez) es el que se ubica de manera más superficial con nivel de profundidad del agua entre 10 y 30 m aproximadamente.

Al sureste del cantón en el perfil D-D', nos muestra la presencia de estas lavas de Bermudez, sin embargo los reportes de perforación indican que se encuentran secas.

La Formación Tiribi se encuentra presente en profundidad en todo el cantón, la cual es guía de separación entre los acuíferos Barva y Colima Superior. Además, cubre lo que es la parte norte del cantón en la zona de la Rivera y la parte sur, dando protección al acuífero Colima Superior.

MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGICO

Con la información de los perfiles hidrogeológicos, informes de perforación, piezómetros y afloramientos de campo, es posible indicar la existencia principalmente de 3 unidades hidrogeológicas siendo estas, Barva, Tiribi y Colima. Bajo estas unidades descansan otras dos unidades hidrogeológicas de importancia (Puente Mulas y Colima Inferior) pero que para efectos del presente estudio no se analizan, por no ser parte del objeto del mismo.

La formación Barva se presenta mediante las unidades Miembro Carbonal y Miembro Bermúdez. Las tobas del Miembro Carbonal como hemos visto en los perfiles y en el trabajo de campo, se localizan en toda el área de estudio principalmente en la parte norte y central del cantón.

Las lavas del Miembro Bermúdez que constituyen el acuífero Barva, afloran principalmente en los cauces de los ríos cercanos como lo son la Quebrada Seca y el Río Bermúdez, así como, en los frentes de colada de lava que se encuentran en el área de estudio. Como se observa, el acuífero Barva ocupa la mayor parte del cantón, viene desde la parte noreste siguiendo hacia la parte central y este, y terminando en algunos puntos al oeste como lo es en la zona de Ojo de Agua y teniendo continuidad en zona de la ruta hacia Lindora en el parque La Amistad, este acuífero se considera como libre para la zona de Belén.



La unidad Tiribi, se ubica parte norte en la margen izquierda del Río Segundo, así como al sur del cantón de Belén, entre el río Bermúdez hasta el Río Virilla, se presenta como tobas e ignimbritas con presencia de fiames de tamaños centimétricos y corresponde a la base del acuífero Barba y techo del acuífero Colima Superior.

Subyaciendo esta unidad encontramos al acuífero Colima Superior, el cual se encuentra cubierto por la formación Tiribi donde en algunos sectores produce cierto confinamiento pero también presenta de condiciones de tipo libre; luego del Río Bermúdez, las mayoría de pozos en este sector capta este acuífero.

Mediante la realización de los perfiles hidrogeológicos, así como, en base la geomorfología y geología del cantón, se pudo delimitar los acuíferos propensos a los procesos de contaminación en el cantón siendo estos, el acuífero Barva y el acuífero Colima Superior (Figura 9).

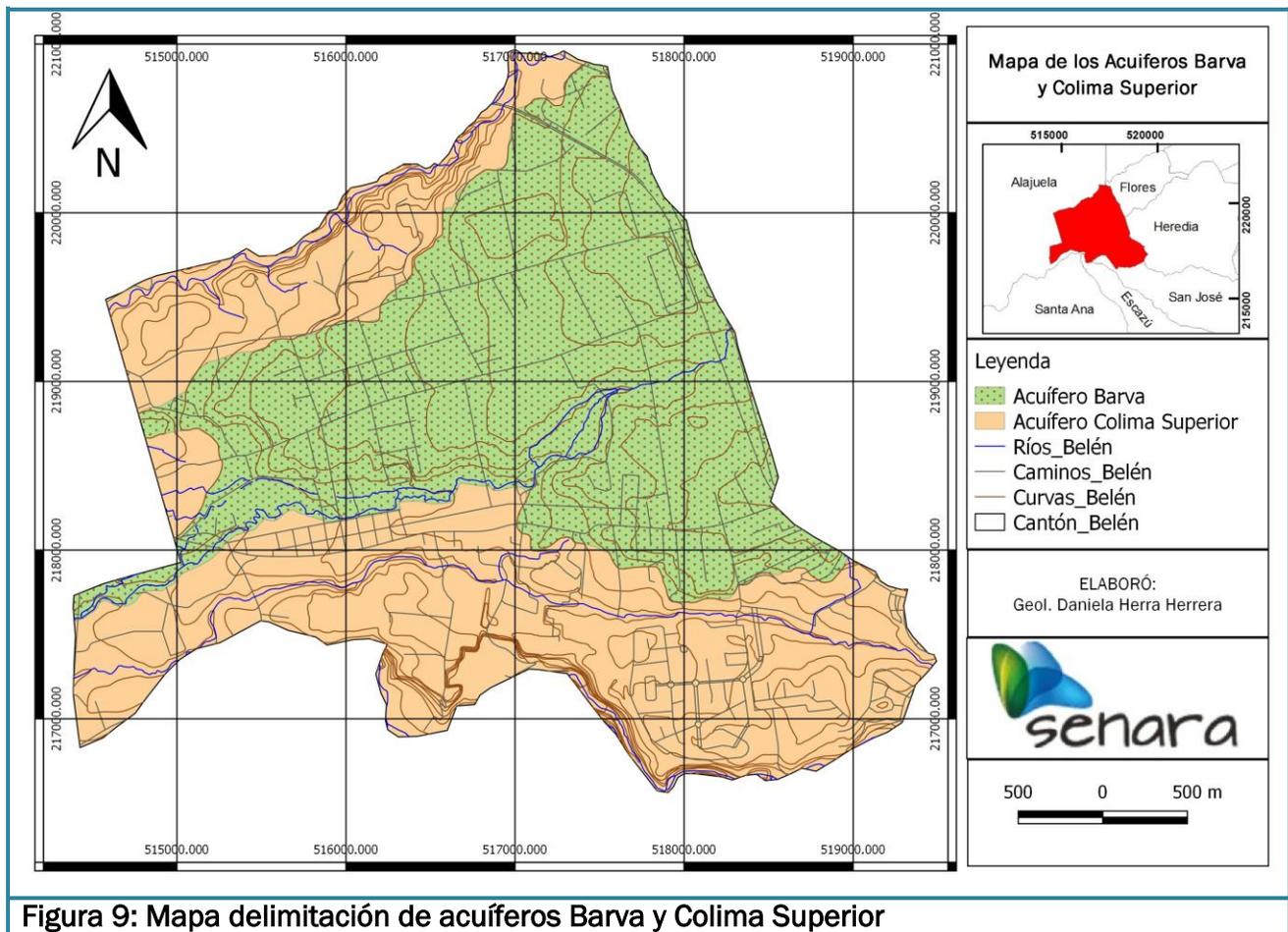


Figura 9: Mapa delimitación de acuíferos Barva y Colima Superior



VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUIFEROS EN EL CANTON DE BELEN

Como parte del análisis de la vulnerabilidad del cantón de Belén, se procedió a realizar esta valoración en base a dos de las metodologías existentes para análisis de vulnerabilidad, como lo son la metodología GOD y DRASCTIC. Como veremos muchas de las zonas van mantener una clasificación de vulnerabilidad igual en ciertas áreas, sin embargo en otras no, dado que DRASTIC tiene más variables y es de mayor detalle de análisis que GOD.

Para el análisis de ambas metodologías, se realizaron inspecciones de campo y perfiles hidrogeológicos, se utilizó la información de los pozos de la zona, piezómetros realizados por la municipalidad, así como, los estudios que se presentaron en el SENARA, con esta información se revaloró el modelo hidrogeológico local para la determinación en detalle de las condiciones de vulnerabilidad acuífera, la cual fue definida para la unidad acuífera más superficial o expuesta en el cantón, siendo al noreste y central el acuífero Barba y al norte y el sur el acuífero Colima Superior.

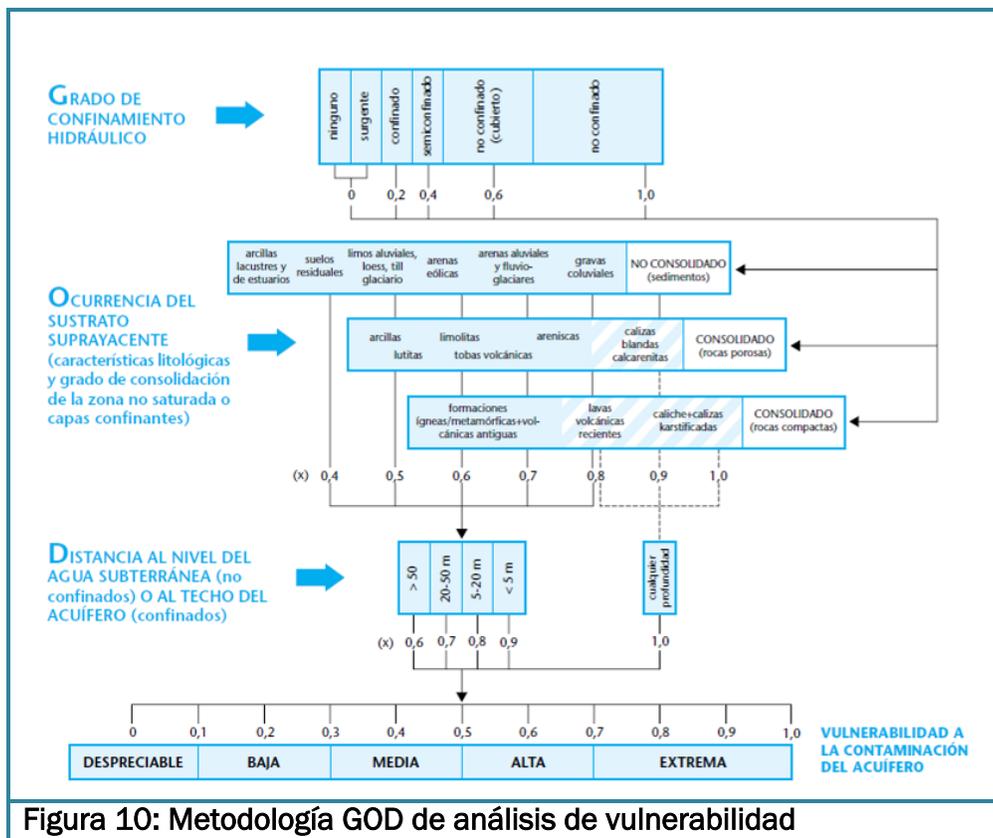
➤ Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos por la metodología GOD

La metodología GOD se basa en la metodología que fue desarrollada en 2002 (Foster & Hirata), trata de ser simple y sistemática; y se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a tres variables, que son las que nominan el acrónimo:

- G: Grado de confinamiento Hidraulico. Tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea.
- O: Ocurrencia del Sustrato suprayacente. Litología de la zona no saturada. Se evalúa teniendo en cuenta el grado de consolidación y las características litológicas y como consecuencia, de forma indirecta y relativa, la porosidad, permeabilidad y contenido o retención específica de humedad de la zona no saturada.
- D: Distancia del nivel de agua. Profundidad del agua subterránea o del acuífero.

Estos tres parámetros se multiplican para obtener una valoración de la vulnerabilidad de 0 (despreciable) a 1 (extrema): $GOD = G \cdot O \cdot D = 0-1$ (**Figura 10**)





En **Anexo 5**, se presenta la tabla con todos los parámetros utilizados, así mismo se indica que para cada uno de los mapas elaborados, los trazos de los polígonos se realizaron en base a las distancias que había entre los datos así como de utilizar como guía el trazo de las curvas de nivel.

A continuación se presenta el análisis para cada uno de los parámetros que compone el G.O.D. para el cantón de Belén:

Parámetro G (Grado de Confinamiento):

Para este parámetro, se indica la presencia de tres tipos de grado de confinamiento:

- Semi confinado
- No confinado cubierto
- No confinado o Libre

La mayor parte del territorio presenta una condición no confinado cubierto, esto por la presencia en la mayor parte del cantón por el acuífero Barva (Mb. Bermúdez) el cual se encuentra cubierto y protegido por las tobas del Mb. Carbonal. A los puntos donde



imperaba la presencia del acuífero Barva se determinó asignar un valor del parámetro de confinamiento como 0.7, esto debido a como se observó que los materiales de cobertura presentan bajos espesores, tiempos de tránsito cortos, así como, otros factores del suelo que lo hacen susceptible a posible contaminación, por lo que los materiales de cobertura no le brindan una protección efectiva.

Para las zonas donde impera el acuífero Colima Superior se determinó asignar un valor de 0.4 definido como semi confinado, debido a que por medio de la información de pozos así como los perfiles realizados, se identifica que el acuífero Colima Superior se presenta como libre con condiciones locales de confinamiento.

En el caso de la parte sur donde se encuentra el Tajo de Pedregal, por condiciones de exposición del acuífero por la remoción del material que mantenía al acuífero Colima de semiconfinado en el sitio, se determina que para el parámetro de confinamiento este es no confinado o libre por lo cual se asigna un valor de 1, así mismo, se le asigna la condición de no confinado o libre con valores de 1 a otros puntos donde el nivel de acuífero Barva se encuentra más superficial o expuesto.

La distribución del parámetro G, para todo el cantón de Belén se indica en el **Figura 11.**

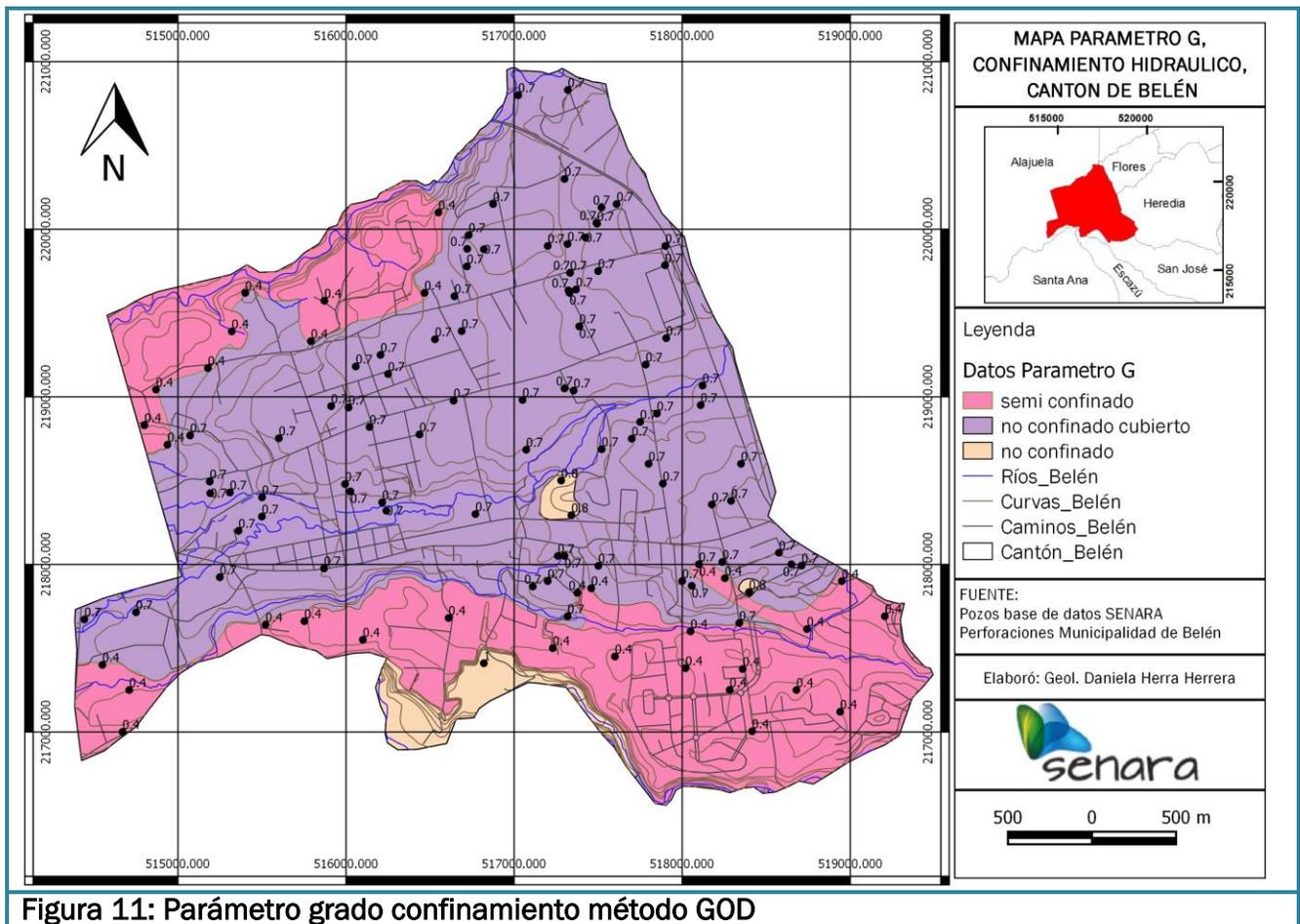


Figura 11: Parámetro grado confinamiento método GOD

Parámetro O (Ocurrencia del Sustrato):

Para este parámetro la mayor parte de la cobertura del sustrato está constituida por tobas, tanto del Mb. Carbonal como de la Formación Tiribi. Sin embargo para las tobas del Mb. Carbonal que cubren el acuífero Barva se les asignó un valor de 0.65 referente a tobas volcánicas recientes. Mientras a la Fm. Tiribi que está constituida por tobas e ignimbritas se le asignó un valor de 0.5 referido a arcillas, ya que parte de este material se presenta de forma alterada limo-arcillosa.

Para la zona del Tajo Pedregal por su condición de acuífero expuesto se le determina que su sustrato es de lavas recientes (Colima) y se le asigna un valor de 0,8., igualmente algunos puntos cerca de la quebrada Seca donde los pozos reflejan la presencia de lavas del acuífero Barva muy cerca de la superficie.

La distribución del parámetro O, en la zona de interés, se puede observar en el **Figura 12**.

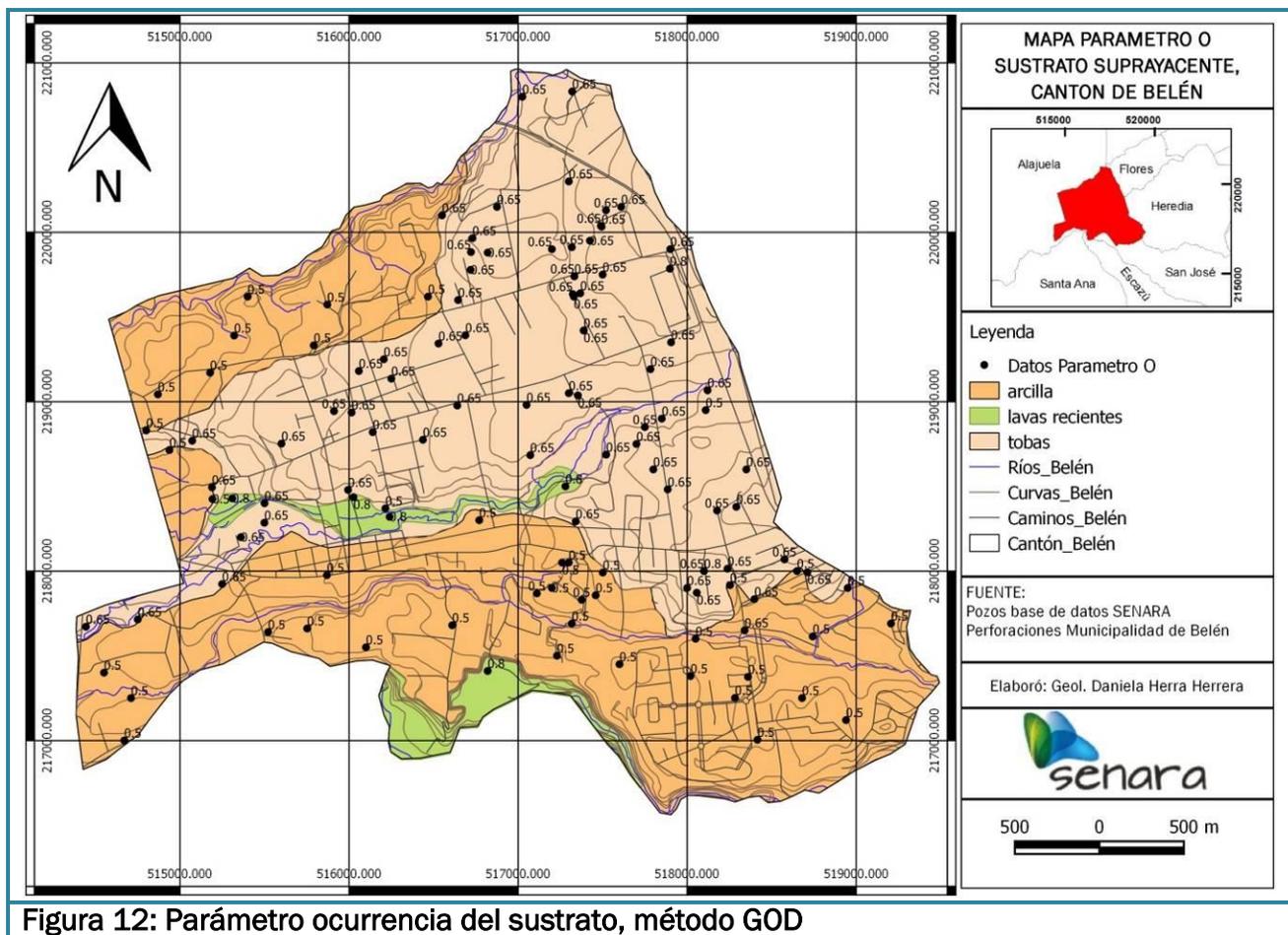


Figura 12: Parámetro ocurrencia del sustrato, método GOD

Parámetro D (Distancia al nivel freático):

El parámetro de distancia profundidad del nivel de agua se vio mucha variabilidad en el cantón, esto debido a que en muchos de los pozos se presentaba mezclas de acuíferos ya que algunas perforaciones se encuentran captando tanto el Acuífero Barva como los Colimas.

Sin embargo en base a delimitación que se realizó de ambos acuíferos así como la información de los pozos, se definió que las profundidades para el acuífero Barva ronda mayormente en dos grupos, uno que se le asignó el valor de 0.8 ya que son profundidades que van entre 5 y 20 m, y el otro valor de 0.7 correspondiente a profundidades 20 a 50 m. Las área donde el valor se asignó es 0.6 corresponde a profundidades del nivel de agua mayor a los 50 m, coincidiendo con los niveles del Acuífero Colima.

Los sitios con valores denominados 0.9 son donde los niveles de agua se encuentra más superficiales correspondiente unos con cercanías a la rivera de los ríos, y otro con el Tajo Pedregal, esto debido a la remoción de material que se dio en el lugar y que mantiene expuesto el acuífero Colima Superior.

La distribución del parámetro D, en la zona de interés, se puede observar en el **Figura 13**.



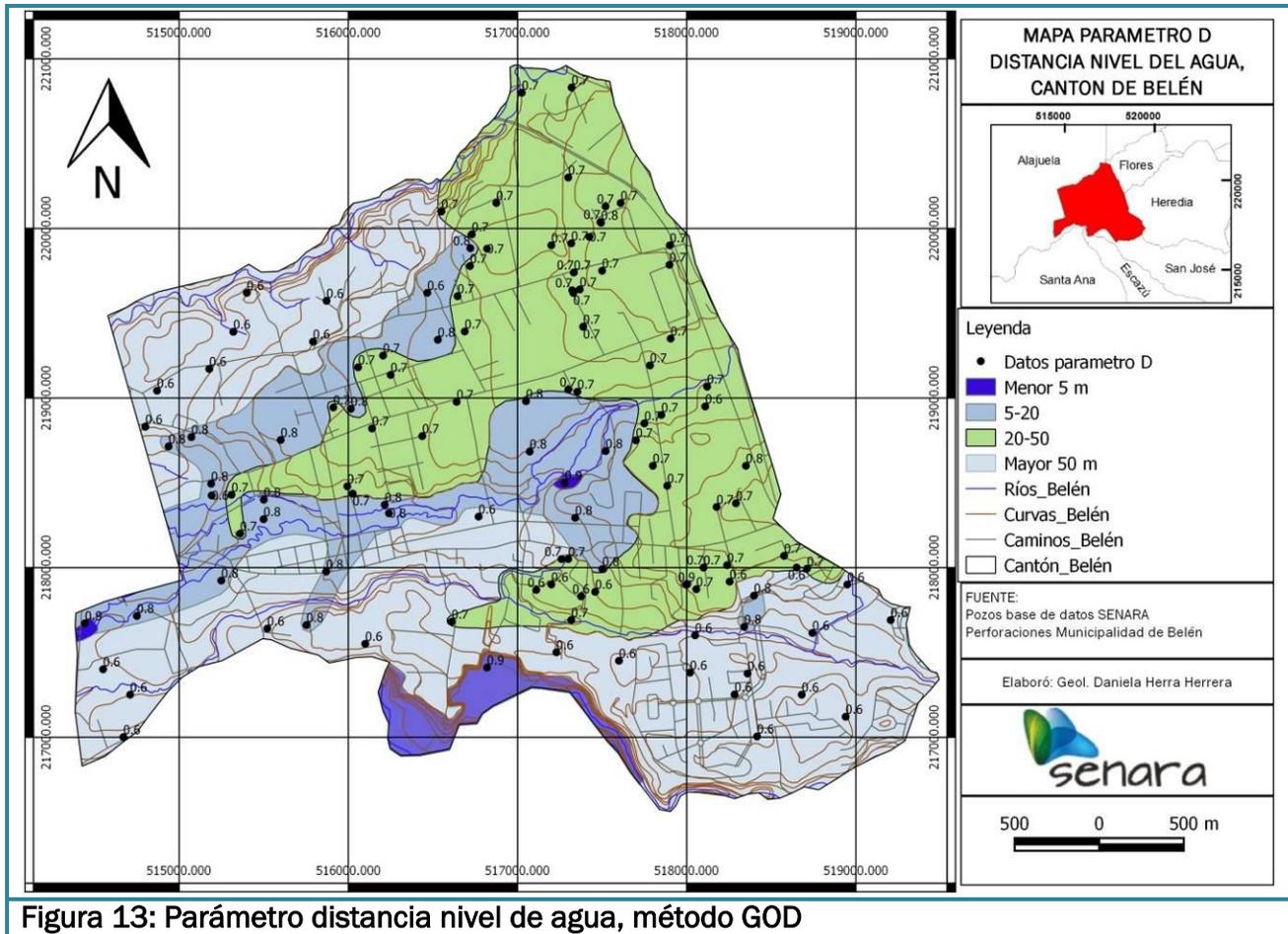


Figura 13: Parámetro distancia nivel de agua, método GOD

Con la multiplicación de cada uno de los diferentes parámetros que conforman el G.O.D., se obtiene el mapa de vulnerabilidad a la contaminación en el cantón de Belén, tanto para el acuífero de Barva como el acuífero de Colima, el respectivo mapa se observa en el **Figura 14**.

Como se observa se determinaron 4 zonas de vulnerabilidad, donde la vulnerabilidad baja está determinada para aquella área donde se tiene presencia del acuífero Colima, esto coincide con la información corroborada en campo y con las perforaciones, ya que el acuífero Colima en esas áreas presenta grandes espesores de material que le dan protección.

La zona con vulnerabilidad media, corresponde aquella que conforma el acuífero Barva, este resultado nos respalda la información que se ha ido corroborando respecto a la cobertura que tiene este acuífero la cual por las características que los suelos han presentado, los mismos tienden a ser susceptibles a posibles contaminaciones, más si esta cobertura es removida, información que es corroborada y respaldada con los resultados de tiempos de tránsito.



Las Zonas con vulnerabilidad Alta, corresponde a dos puntos asociados a niveles de acuífero Barva muy superficial donde se encuentran nacientes presentes.

La zona con vulnerabilidad extrema, corresponde al área que abarca el Tajo Pedregal, esto por motivo de las condiciones de destape que se dieron al acuífero Colima Superior, dejándolo en un estado susceptible a la contaminación.

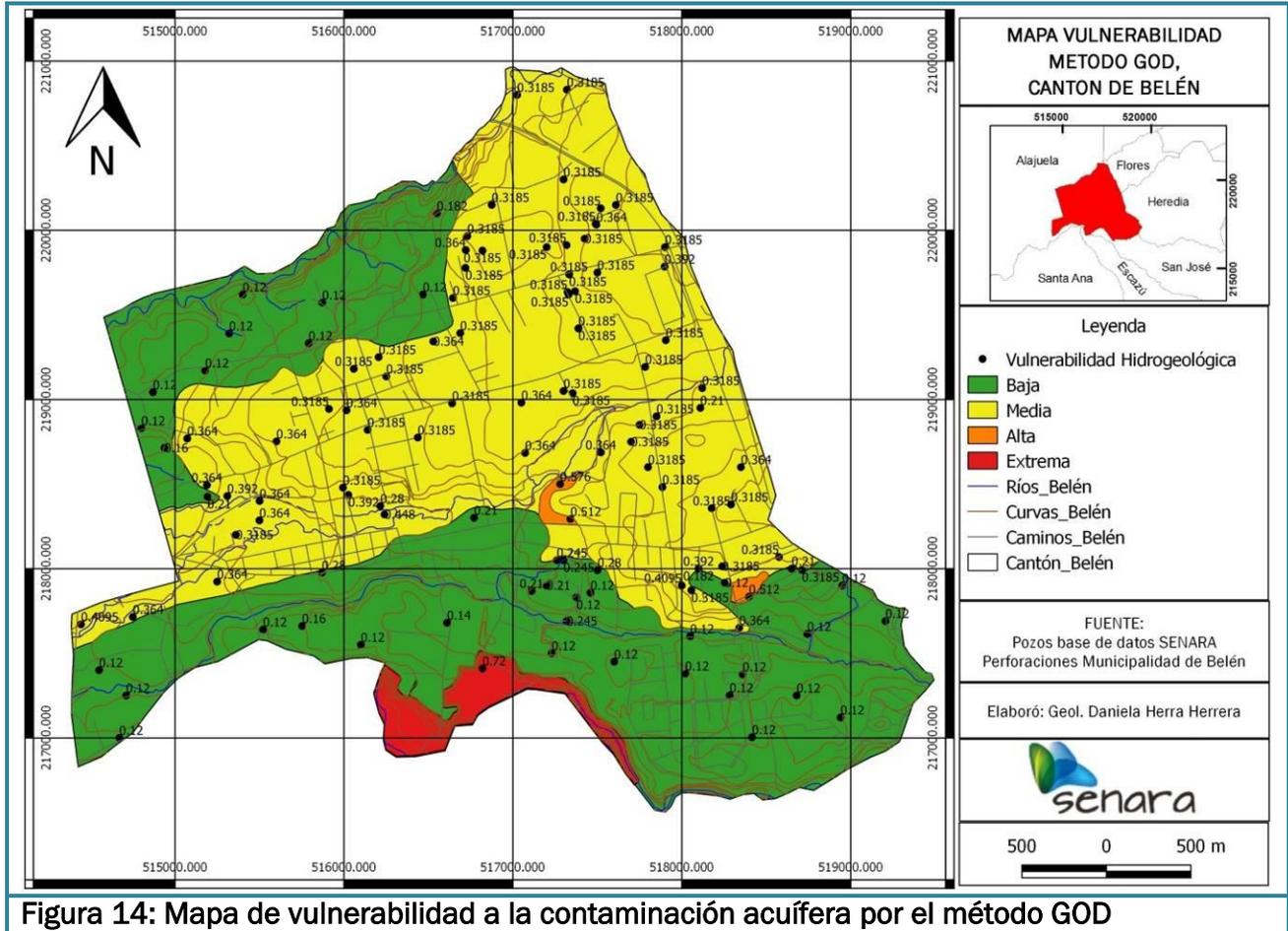


Figura 14: Mapa de vulnerabilidad a la contaminación acuifera por el método GOD

➤ **Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos por la metodología DRASTIC**

El método DRASTIC es un modelo empírico desarrollado por Aller et al (1987) para Environmental Protection Agency, EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos).

Es un método que se basa en la asignación de índices que van de 1 (menor vulnerabilidad) a 10 (mayor vulnerabilidad), de acuerdo a las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC:

- **D:** Profundidad del agua subterránea.
- **R:** Recarga neta.
- **A:** Litología del acuífero.
- **S:** Tipo de suelo.
- **T:** Topografía.
- **I:** Naturaleza de la zona no saturada.
- **C:** Conductividad hidráulica del acuífero.

Asimismo, aparte de la asignación de valores de 1 a 10 para cada parámetro, se utiliza un valor de ponderación el cual varía de 1 a 5, se asignan según su influencia dentro de la evaluación de la vulnerabilidad. Posteriormente ambos índices se multiplican y se suman los siete resultados para obtener una valoración final, según se indica en la siguiente expresión:

$$\text{DRASTIC} = (D_r \cdot D_w) + (R_r \cdot R_w) + (A_r \cdot A_w) + (S_r \cdot S_w) + (T_r \cdot T_w) + (I_r \cdot I_w) + (C_r \cdot C_w)$$

r: indica factor de clasificación o valoración. **w:** indica factor de ponderación.

Los factores de ponderación para cada uno de los índices mencionados anteriormente se indican en la cuadro 11:

Cuadro 11: Factores de ponderación							
Tipo	Variable						
	D _w	R _w	A _w	S _w	T _w	I _w	C _w
Intrínseca	5	4	3	2	1	5	3

La suma del total de las multiplicaciones de los parámetros y sus factores de ponderación, dan resultados entre 23 a 230, con lo cual se determina el tipo de vulnerabilidad, como se observa en la cuadro 12:



Cuadro 12: Rangos de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca			
Grado vulnerabilidad DRASTIC	Valor DRASTIC	Calificación	Correlación con Vulnerabilidad GOD
Muy bajo	23-64	1	Despreciable
Bajo	64-105	2	Bajo
Moderado	105-146	3	Medio
Alto	146-187	4	Alto
Muy alto	187-230	5	extremo

Se indica en la tabla el grado de vulnerabilidad de DRASTIC relacionado a la clasificación del método GOD.

Para el caso del cantón de Belén, se determina el valor para cada uno de los parámetros que conforman el DRASTIC, basados en el análisis de información que se posee, en este caso se utilizó la información de pozos, las perforaciones más recientes llevadas a cabo por la municipalidad, así como, la corroboración de la misma mediante los perfiles hidrogeológicos y el modelo hidrogeológico, igualmente se utilizó la información del estudio de recarga a los acuíferos Barba y Colima Superior elaborado por SENARA.

En **Anexo 6**, se presenta la tabla con todos los parámetros utilizados, así mismo se indica que para cada uno de los mapas elaborados, los trazos de los polígonos se realizaron en base a las distancias que había entre los datos así como de utilizar como guía el trazo de las curvas de nivel.

Análisis del parámetro D_r (Profundidad del agua subterránea) :

Se refiere a la distancia que existe entre la superficie del suelo y el nivel freático. Este valor se obtiene de la revisión de la información presente en los informes de perforación de los diferentes pozos, los valores a asignar se indican en la cuadro 13:

Cuadro 13: Profundidad del nivel del agua.	
Profundidad (m)	Valoración D_r
0 - 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2
> 30,5	1

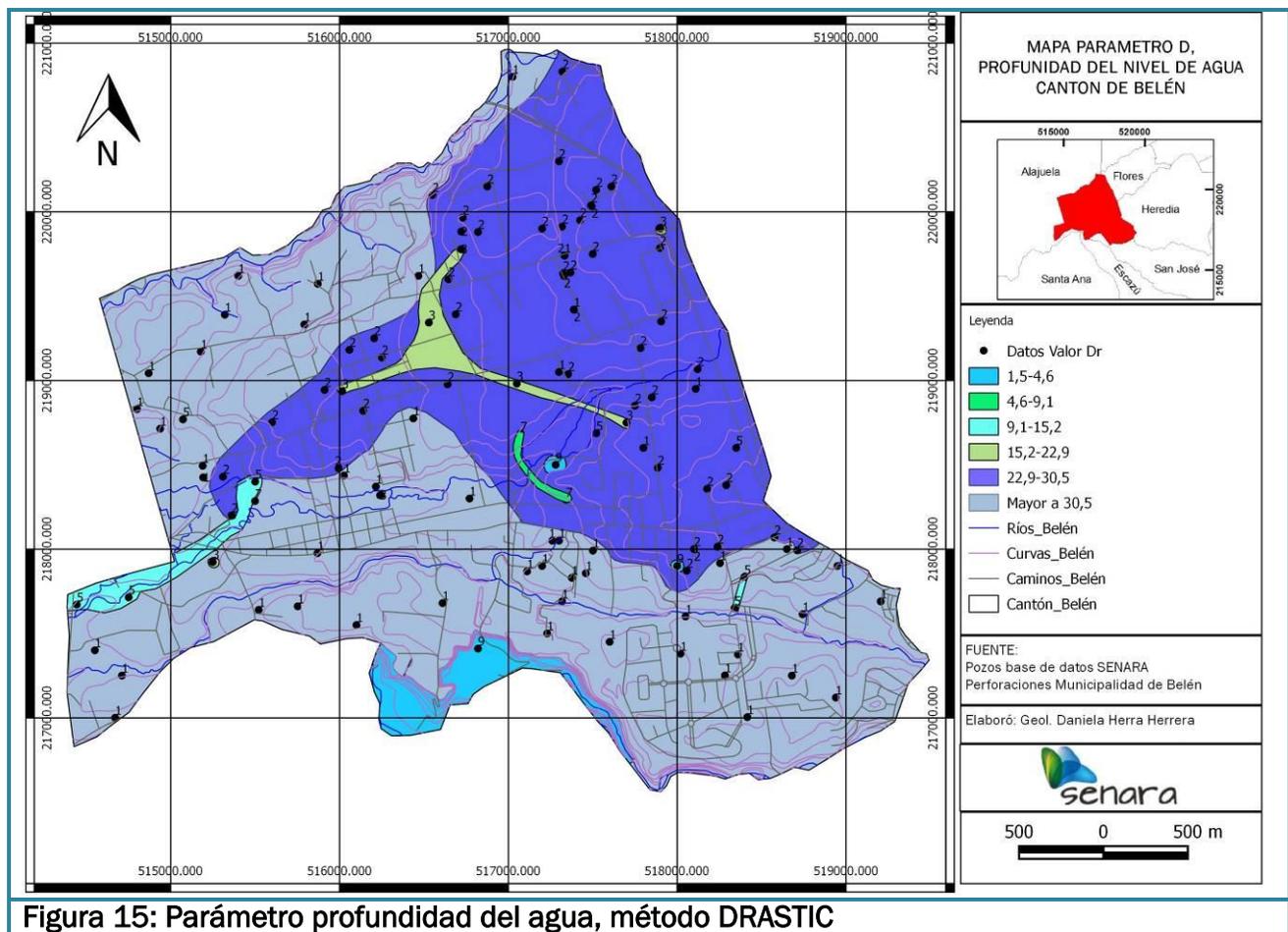


Para el caso del cantón de Belén, en base a la perforaciones y los piezómetros, se pudo determinar que se presentan una alta variación de las profundidades del nivel del agua en los acuíferos con rangos de Dr de 9 a 1, sin embargo en la mayor parte del cantón se presentan profundidades de niveles mayores a los 30 m de profundidad, las cuales coinciden con parte del acuífero Colima Superior así como otras zonas donde se presenta el acuífero Barva, seguidos de la parte central y este con profundidades entre 15,2 a 30,5 m, correspondiente propiamente al acuífero Barva.

En menores fracciones se encuentran profundidades más superficiales, algunos casos aislados con profundidades no menores a 4 m asociado a pozos cercanos a afloramientos de los frentes de coladas de Barva.

En el caso de la parte sur cantón se encuentra lo que corresponde al Tajo Pedregal, el cual por la particularidad de que el sitio, de exposición del acuífero Colima Superior, se presentan los niveles más superficiales.

La distribución del parámetro D, en la zona de interés, se puede observar en el **Figura 15**.



Análisis del parámetro R_r (Recarga neta):

Se refiere al volumen de agua total que recarga el acuífero. Este valor se obtiene al realizar el balance hidrológico, los valores a asignar según recarga obtenida en estudio se observa en la cuadro 14:

Cuadro 14: Recarga neta	
Recarga (mm)	Valoración R_r
0 - 50	1
50 - 103	3
103 - 178	6
178 - 254	8
> 254	9

Para el caso de nuestro interés, según el estudio de recarga para los acuíferos Barva y Colima, se determina que la recarga para el sector donde se ubica el cantón de Belén, se definieron dos valores de recarga. Esto debido a que por la presencia de dos acuíferos, la recarga no es igual para los mismos; el acuífero Barva es el que se recarga de manera inmediata, esto debido a que se encuentra de más superficial en la zona, mientras que el acuífero Colima al encontrarse en mayor profundidad su recarga se da en la zonas alta del volcán Barva.

Por lo tanto para el acuífero Barva presenta recargas en un rango de 207,89 - 571,85 mm/año (SENARA, 2007), por lo que se asigna un valor de 9, mientras que para el acuífero Colima se estima recarga menores 50 mm, por lo que se le asigna un valor de 1 para el parámetro R.

Se destaca que para el área del Tajo de Pedregal por sus condiciones de encontrar expuesta, su recarga si es inmediata por lo que se asigna un valor de 1 en esta área.

La distribución del parámetro R, en la zona de interés, se puede observar en el **Figura 16**.



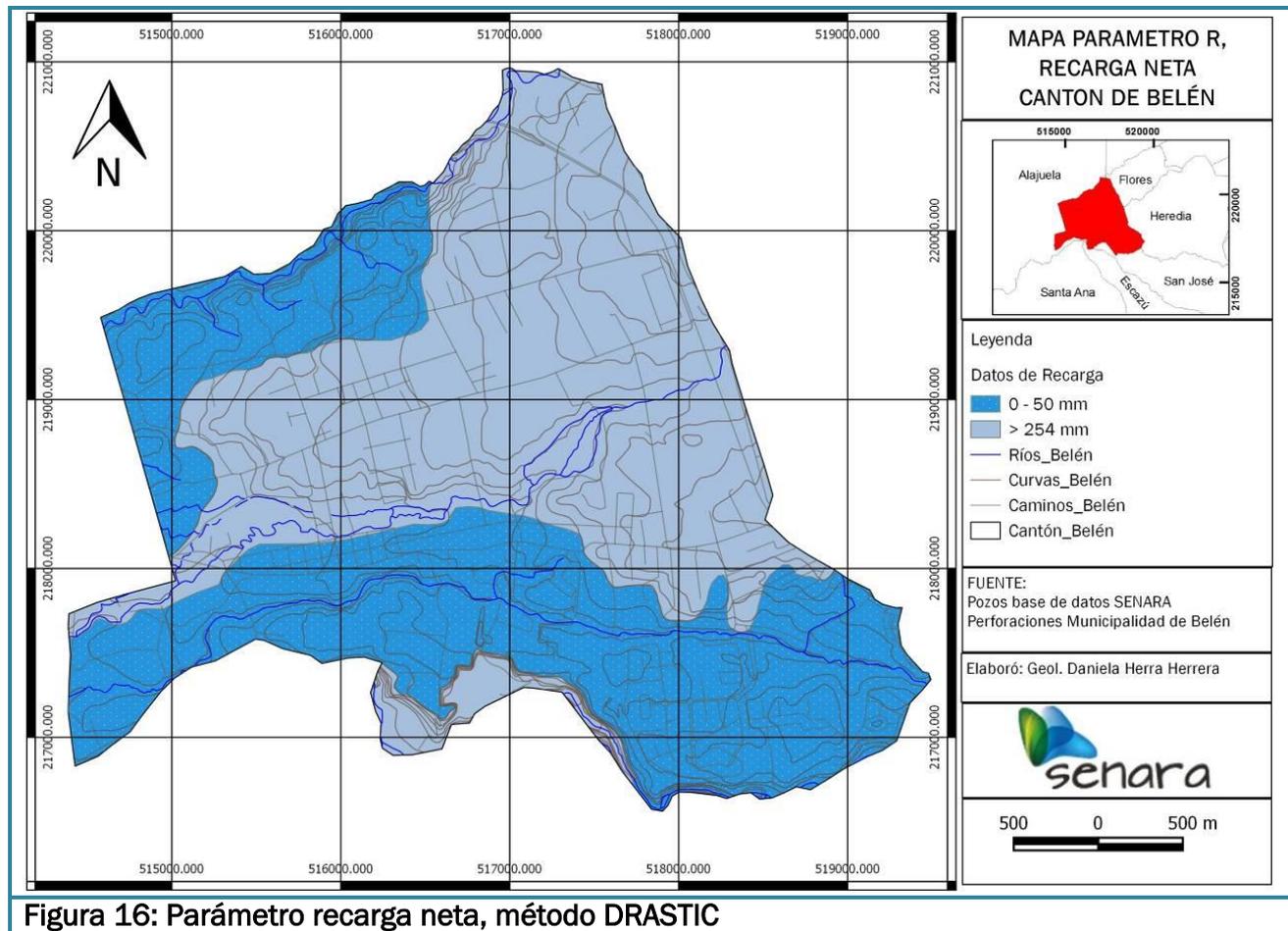


Figura 16: Parámetro recarga neta, método DRASTIC

Análisis del Parámetro A_r (Formación geológica que constituye el acuífero).

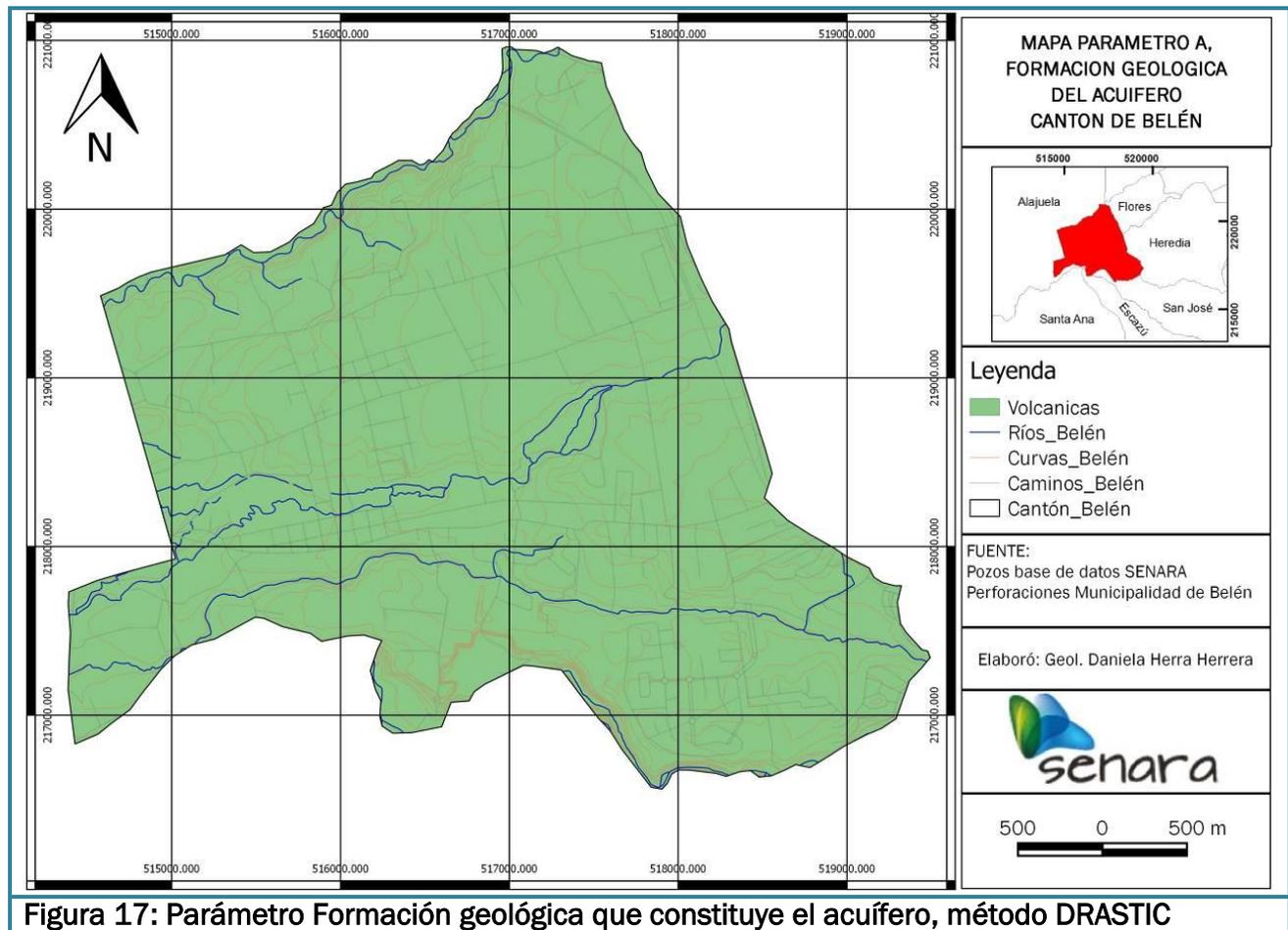
Indica el tipo de material que alberga el acuífero. La estratigrafía presente en los informes de perforación de los diferentes pozos detalla esta información, los valores a asignar según el tipo de material que alberga el acuífero se indica en la cuadro 15.

Cuadro 15: Formación geológica que constituye el acuífero.		
Litología del acuífero	Valoración A_r	Valor Típico A_r
Lutita masiva	1-3	2
Metamórfica/Ígnea	2-5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3-5	4
Till glacial	4-6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5-9	6
Arenisca masiva	4-9	6
Caliza masiva	4-9	6
Arena o grava	4-9	8

Volcanicas	2-10	9
Caliza kárstica	9-10	10

Según análisis de los informes de perforación para los diferentes pozos perforados en el cantón de Belén, se determina que las litologías donde se albergan los diferentes acuíferos corresponden a material volcánico andesitas, basaltos o andesitas basálticas (Acuífero Barva y Acuífero Colima), los valores asignados para el parámetro A es de 9 correspondiente a rocas volcánicas.

La distribución del parámetro A, en la zona de interés, se puede observar en el **Figura 17**.



Análisis del parámetro S_r (cubierta edáfica bajo la superficie del terreno).

Corresponde al tipo de cobertura de suelo que tiene la superficie en estudio. Esta información se obtiene de la estratigrafía de los piezómetros, los parámetros de clasificación se observan en la cuadro 16:

Cuadro 16: Cubierta edáfica bajo la superficie del terreno.	
Tipo de suelo	Valoración S_r
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

De igual forma, con la revisión de los diferentes informes de perforación, la mayor parte de la cubierta corresponde con arcillas no compactadas según nos muestra las opciones del cuadro anterior, las cuales se refieren a la alteración de lo que corresponde las tobas del Miembro Carbonal y las tobas e ignimbritas de la Formación Tiribi, por lo cual se da una valoración S_r de 1. De igual forma, la clasificación de muestras de suelo en el laboratorio del INTA indica la presencia de suelo franco arcilloso, lo que permite clasificar esta variable.

En las partes cercanas a la lavas aflorante de Barva (Mb. Bermudez), donde la cubierta edáfica es poca (menos de 2 m de espesor según las perforaciones), se dio una clasificaciones de delgado o ausente, con un valor de S_r de 10.

Así mismo, para la zona del Tajo Pedregal debido al área descubierta del acuífero Colima Superior se le asigna el valor de cobertura delgada o ausente, con un valor de S_r de 10.

La distribución del parámetro S_r , en la zona de interés, se puede observar en el **Figura 18**.



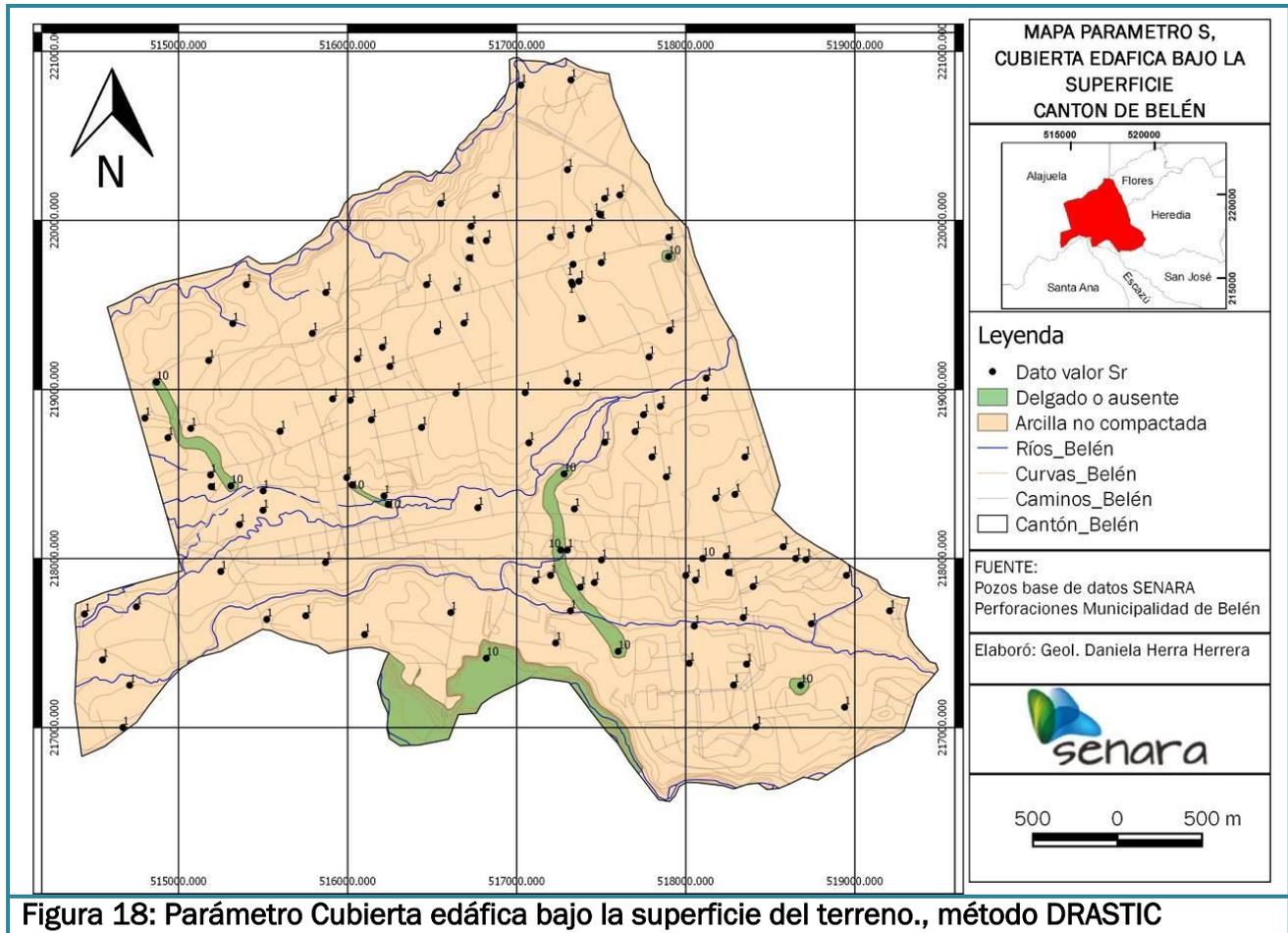


Figura 18: Parámetro Cubierta edáfica bajo la superficie del terreno., método DRASTIC

Análisis del parámetro T_r (pendiente del terreno).

Se refiere a la pendiente topográfica de la zona de estudio. Esta información se obtiene a partir de las curvas topográficas la clasificación para este parámetro se indica en la cuadro 17:

Cuadro 17: Pendiente del terreno	
Pendiente (%)	Valoración T_r
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
> 18	1

Con base en las curvas de nivel se realizó un DEM (Modelo de elevación digital) con el programa ArcGIS 10.3.1, el cual brinda la elevación del terreno en el cantón (**Anexo 7**). Con base a esta información y la ubicación de los pozos y de las perforaciones, se



definieron zonas de pendiente para poder asignarles un dato de valoración Tr. La distribución del parámetro T, en la zona de interés, se puede observar en el **Figura 19**.

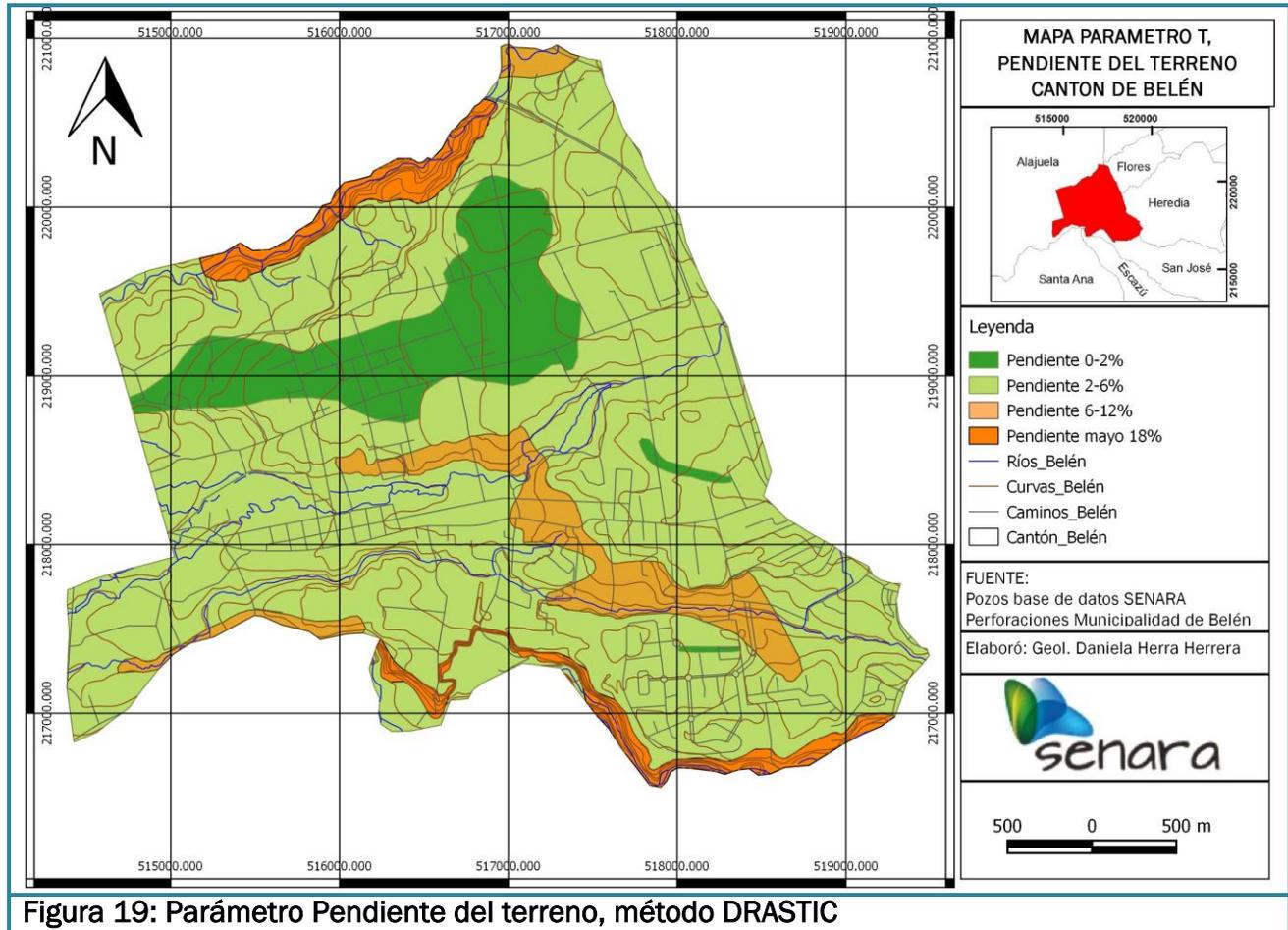


Figura 19: Parámetro Pendiente del terreno, método DRASTIC

Análisis del parámetro I_r (Naturaleza de la zona no saturada).

Hace referencia al material que conforma la zona superior del acuífero que no está saturada de agua. Esta información se obtiene de la estratigrafía descrita en los diferentes informes de perforación de pozos presentes en el área de estudio.

El valor a asignar según el tipo de material que se encuentra en la zona no saturada para el sitio de interés se indica en la cuadro 18.

Cuadro 18: Tipo de material geológico de la zona no saturada.	
Naturaleza de la zona no saturada	Valor típico I_r
Capa confinante	1
Cieno-arcilla	3
Lutita	3

Caliza	6
Arenisca	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	6
Arena o grava con contenido de arcilla	6
Metamórfica/Ígnea	4
Grava y arena	8
Basalto	9
Caliza kárstica	10

A partir del modelo hidrogeológico planteado, así como la delimitación del acuífero Barva (Miembro Bermúdez) y el acuífero Colima Superior, se determinó a definir la zona superior al acuífero.

Las áreas donde se presenta el acuífero Barva, según la cobertura que presenta referido a tobas alteradas del Miembro Bermúdez, se le asignó un valor I_r de 3, correspondiente a arcillas.

La clasificación definida como basaltos son aquellas áreas que mostraban afloramientos y presencia de las lavas de Barva en superficie, asignándoseles un valor I_r 9, igualmente para la parte sur correspondiente al Tajo Pedregal.

Para el área que abarca el acuífero Colima Superior, por su cobertura de tobas e ignimbritas de la Formación Tiribi, así como las tobas del Miembro Bermúdez, se le asignó un valor I_r 1, correspondiente a capa confinante, dado que el acuífero se presenta semiconfinado.

La distribución del parámetro I , en la zona de interés, se puede observar en el **Figura 20**.



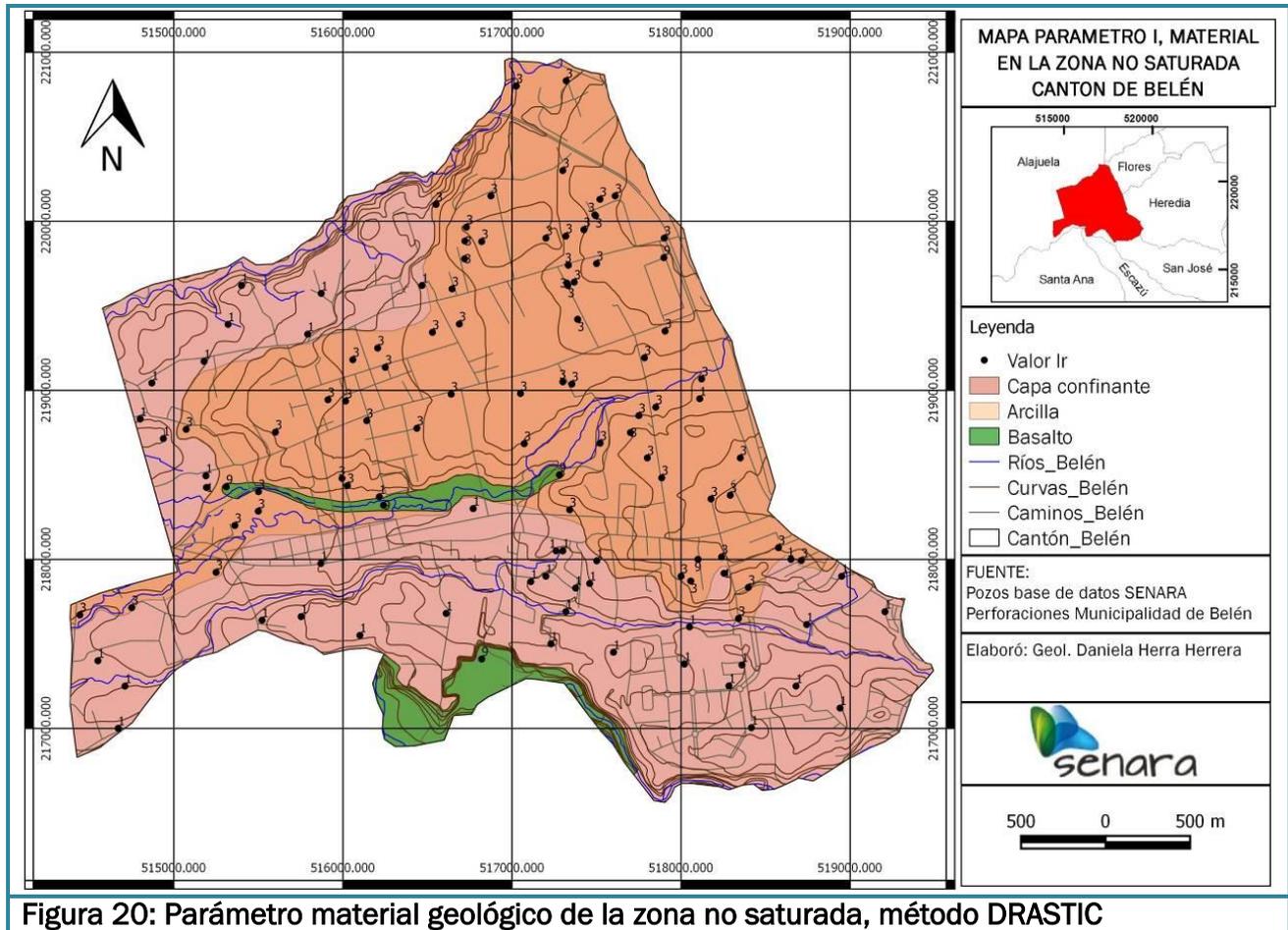


Figura 20: Parámetro material geológico de la zona no saturada, método DRASTIC

Análisis del parámetro C_r (conductividad hidráulica del acuífero).

La conductividad hidráulica es la facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido, en este caso agua, según los valores de permeabilidad obtenidas en campo, se clasifica las unidades geológicas según se indica en la cuadro 19.

Cuadro 19: Conductividad hidráulica del acuífero.	
Conductividad hidráulica (m/día)	Valoración C_r
0,04 - 4,08	1
4,08 - 12,22	2
12,22 - 28,55	3
28,55 - 40,75	6
40,75 - 81,49	8
> 81,49	10

Con base en la información de pruebas de bombeo que presentaba algunos de los pozos en la zona de Belén (**Anexo 8**) y separando los mismos correspondientes a captaciones del Acuífero Barva y el Acuífero Colima, se pudo realizar una valoración Cr 3 donde las conductividades entre los 12.22 y 28.55 m/día corresponde a las áreas del acuífero Barva; mientras que las zonas con valores de permeabilidad mayores a 80 m/día corresponden al acuífero Colima Superior se le asignó un valor Cr 10.

La distribución del parámetro C, en la zona de interés, se puede observar en el **Figura 21**.

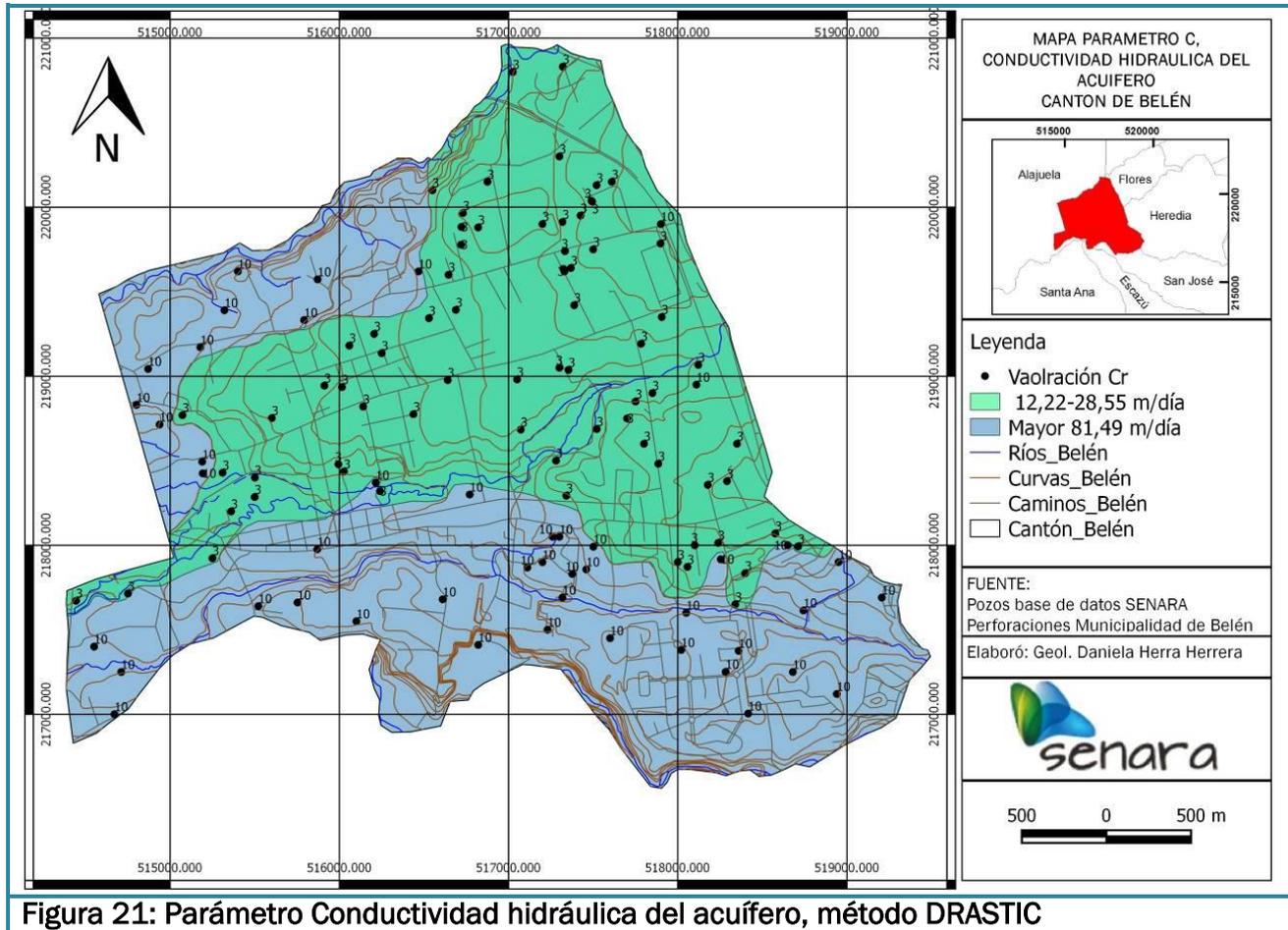


Figura 21: Parámetro Conductividad hidráulica del acuífero, método DRASTIC

Con los resultados obtenidos para cada uno de los anteriores parámetros, se aplica la fórmula:

$$\text{DRASTIC} = (D_r \cdot D_w) + (R_r \cdot R_w) + (A_r \cdot A_w) + (S_r \cdot S_w) + (T_r \cdot T_w) + (I_r \cdot I_w) + (C_r \cdot C_w)$$

La multiplicación de cada uno de los valores obtenidos para cada parámetro y su multiplicación por el valor de ponderación, obteniéndose el resultado que se muestra en el **Figura 22**.

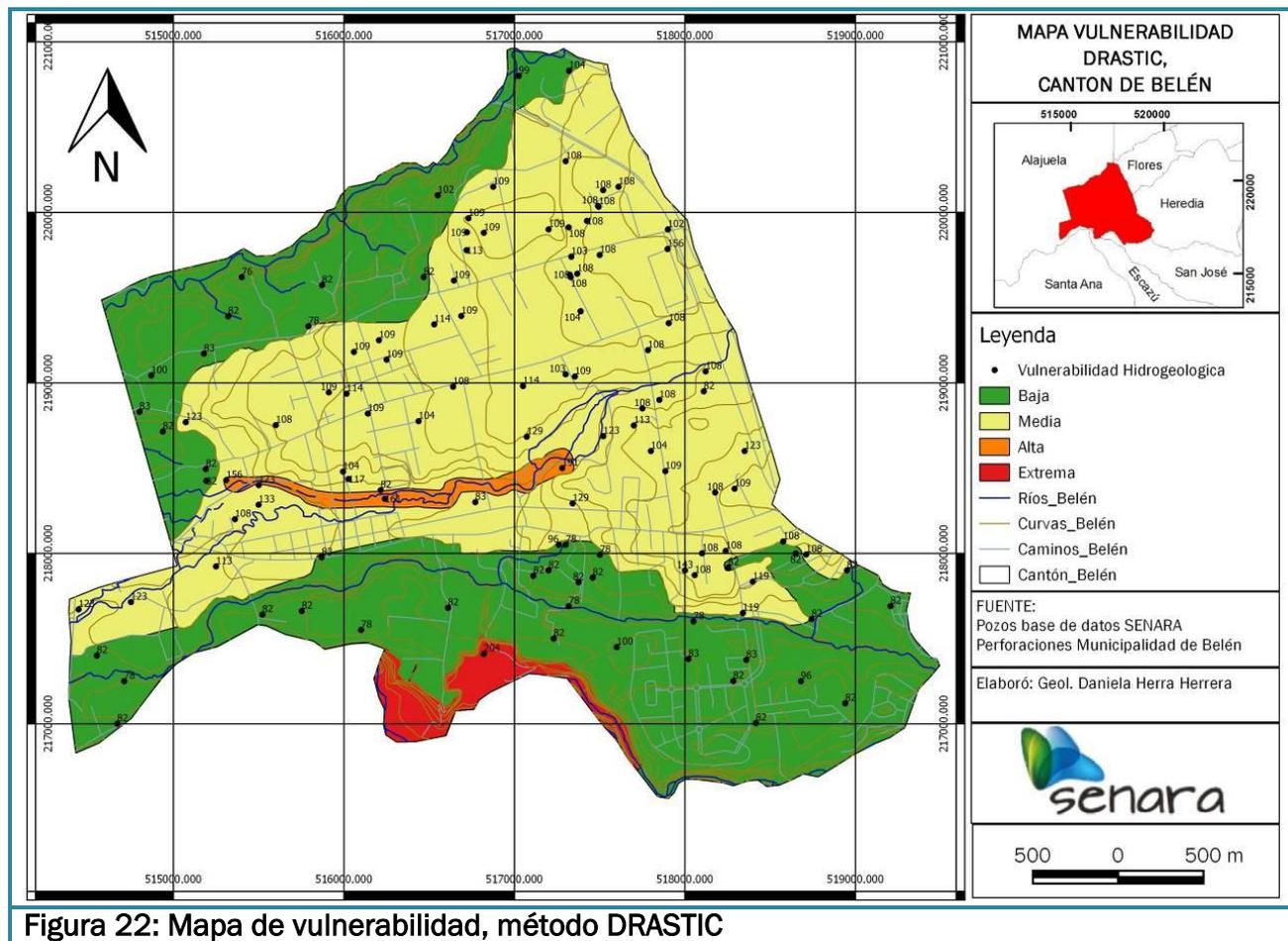
Como se observa en el mapa, las partes norte y sur del cantón con **vulnerabilidad baja** corresponde a las zonas donde se ubica el acuífero Colima Superior, el cual se comporta como acuífero semiconfinado a libre, con niveles de agua a profundidades mayores de 50 m y con espesores aproximados de 40 m de coberturas de material de tobas de ignimbritas, hace que este acuífero tenga un menor riesgo a la contaminación.

La **vulnerabilidad media** está localizada en la parte central y este del cantón y corresponde al acuífero Barva, el cual presenta una condición de acuífero de tipo libre o no confinado cubierto, con profundidades de agua menores a los 30 m. Los materiales que lo recubre o le brinda algún grado de protección, corresponden a materiales de tobas y tobas alteradas, cuyos espesores en algunas sectores son menores a los 10 m; así mismo, estos materiales presentan condiciones permeables y rápidos tiempos de tránsito por lo que son propensos a que los contaminantes filtren y puedan llegar al acuífero Barva, así mismo, a través de estos materiales se da recarga directa al acuífero Barva.

Las zonas con **vulnerabilidad Alta** corresponden aquellas en las que la cobertura del acuífero Barva es delgada o casi nula, coincidiendo mayormente a zonas de afloramientos de bloques de lava en las zonas cercanas a la quebrada Seca principalmente, el acuífero es libre y con niveles de agua someros.

La zona con **vulnerabilidad extrema** recae en el área del tajo Pedregal, esto debido a las condiciones de exposición que se tiene del acuífero Colima Superior por la remoción de su capa protectora y los niveles de agua someros.





CONCLUSIONES

1. La geología local del cantón de Belén está conformada principalmente por tobas del Miembro Carbonal, las cuales cubren casi por completo todo el cantón, seguida en la lavas del Miembro Bermúdez donde se alberga el acuífero Barva afloran en los principales cauces respectivamente la Quebrada Seca y el Río Bermúdez, así como, en otros zonas donde se presentan como frentes terminales de coladas de la Formación Barva. Las tobas e ignimbritas de la Fm. Tiribi se evidencian hacia la parte sur, al igual que las lavas Intracañón que conforman el acuífero Colima Superior.
2. Hidrogeológicamente el cantón de Belén está conformado por 4 unidades hidrogeológicas, siendo estas tobas del Miembro Carbonal que abarcan la parte este y central del cantón y cubren al Miembro Bermúdez que corresponde al Acuífero Barba; bajo esta unidades se conforma la tobas ignimbritas de Tiribi que dan protección al acuífero Colima Superior que se encuentra a mayor profundidad.
3. La información de perforaciones y piezómetros en el cantón de Belén, muestra que los espesores de suelos o capa de cobertura para el Acuífero Barva anda en un rango de 0 a 10 m y para el resto del cantón los espesores de cobertura con mayores a 10 m.
4. Los análisis de las pruebas de permeabilidad de suelo mostraron que estos se encuentran entre los rangos de permeabilidades lentas y moderadamente lentas, siendo está ultima la que abarca la mayor área en la zona. La variabilidad de algunos datos de permeabilidad utilizados, se puede prever que se debe a la forma en que se pudo haber realizado la prueba Porchet, es decir si hubo saturación del suelo previamente o remoción de la capa superior orgánica, por decir algunos factores.
5. La parámetros de porosidad de los suelos del cantón se estima que andan entre los rango de 40-50 %, la variabilidad de estos respecto a los tomados en el estudio de la municipalidad puede deberse al análisis realizado en laboratorio y a que estos fueron tomados en profundidades entre 0.5 m a los 2 m.
6. Se determinó a partir de los tiempos de tránsito para contaminantes bacteriológicos en el cantón de Belén, que en las zonas con espesores de cobertura para el acuífero Barva menores a los 10 m, no se tiene una suficiente protección del acuífero.
7. Mediante el modelo hidrogeológico planteado se determinó que la mayor cantidad de área del cantón de Belén está asentada sobre el acuífero Barva, mientras que una fracción del norte y sur del cantón se encuentra el acuífero Colima Superior.



8. La vulnerabilidad del acuífero se realizó mediante dos metodologías respectivamente la GOD y DRASTIC, siendo ambas muy concordante, así mismo las condiciones de tiempo de tránsito y de cobertura del acuífero Barva, por lo que ambos métodos reflejan la vulnerabilidad existente de este acuífero donde remover la cobertura para la conformación de terrenos, puede incrementar el riesgo de contaminación.
9. Con la metodología GOD, se definió cuatro zonas de vulnerabilidad, baja para las áreas que conforman el acuífero Colima Superior con grandes espesores de cobertura, media para las zonas donde se presenta el acuífero Barva cubiertos por Tobas de Carbonal; vulnerabilidad alta para dos puntos donde se muestra afloramientos del acuífero Barva cercano a naciente y rivera de los ríos.
10. Con la metodología DRASTIC, igualmente se definieron cuatro zonas de vulnerabilidad, donde la baja corresponde al acuífero Colima, la vulnerabilidad media se da en la mayor parte del cantón que abarca el acuífero Barva y para vulnerabilidad alta se centra en la rivera de la parte central de la quebrada seca.
11. Para ambos mapas la vulnerabilidad extrema se centra en la zona donde se ubica el Tajo Pedregal, esto debido a las condiciones de taje y exposición del acuífero Colima Superior en esa área, lo cual lo hace ser altamente susceptible a la contaminación.
12. El mapa de vulnerabilidad de DRASTIC corresponde al MAPA OFICIAL es de aplicación con la matriz de protección de acuífero vigente.

RECOMENDACIONES

- a) Es recomendable que las actividades urbanísticas, comerciales o industriales en la zona del cantón que se ubican en media y alta vulnerabilidad, se solicite el uso de planta de tratamiento o alcantarillado sanitario, esto relacionado a los tiempos de tránsito de contaminantes cortos arrojados en los análisis. Para estas zonas no se recomienda el uso de tanques sépticos convencionales.
- b) Para el desarrollo de actividades contaminantes (tóxicas) la municipalidad debe solicitar estudio hidrogeológico detallado para determinar el riesgo de afectación de los acuíferos bajo las condiciones impuestas.
- c) Se recomienda a la municipalidad implementar un programa de monitoreo de los piezómetros perforados y de los pozos de uso de abastecimiento público administrados por la municipalidad, con el fin de llevar un registro del comportamiento de los niveles de agua en la zona. Es recomendable la instalación de equipos de monitoreo en tiempo real en algunos de los pozos a monitorear.



- d) Se recomienda continuar con el programa de monitoreo de calidad de aguas en la red del acueducto, y analizar el comportamiento histórico de los pozos y nacientes, para identificar si existe algún comportamiento o tendencia anómala en la calidad del agua.
- e) Realizar el levantamiento de cargas contaminantes en el cantón y en conjunto con el mapa de vulnerabilidad de DRASTIC, elaborar el mapa de riesgo de contaminación del acuífero.
- f) Cotejar los resultados de riesgo de contaminación con los análisis de agua, con el fin de identificar si existen zonas de conflicto o impactadas y definir la implementación de mejoras para la protección del recurso hídrico.
- g) Ajustar el programa de monitoreo de calidad de agua de los pozos y nacientes de abastecimiento público, con especial énfasis en análisis en función de las posibles sustancias contaminantes producto de las actividades que se desarrollen aguas arriba de dichos sitios, esto con base en los mapas de cargas contaminantes y de riesgo al acuífero indicados anteriormente.
- h) El mapa de vulnerabilidad elaborado por la metodología DRASTIC es de aplicación en conjunto con la “Matriz de criterios de uso del suelo según la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos”.
- i) Para efectos del proceso de Plan Regulador el mapa de vulnerabilidad de DRASTIC es el oficial a incluirse en el proceso y las medidas de manejo corresponden a las indicadas en la matriz de criterios.
- j) Se recomienda a la municipalidad analizar si procede la realización de la fase 3 de la metodología general para la elaboración de los estudios hidrogeológicos para los planes reguladores publicado en La Gaceta 137 del 16 de julio del 2015, para la definición de políticas de manejo del cantón.
- k) Igualmente, se recomienda a la municipalidad la implementación a futuro de alcantarillado sanitario en todo el cantón.



BIBLIOGRAFÍA

- ALLER, L.; BENNET, T.; ET AL (1987): DRASTIC, a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA, Report 600/2-87-035; 1-455.
- DENGO, G & CHAVERRI, O.H., (1951): Reseña geológica de la región S.O. de la meseta Central de Costa Rica. Revista Universidad de Costa Rica 5, 313-326
- DENYER, P. & O. ARIAS. 1991. Estratigrafía de la región central de Costa Rica. Revista Geológica de América Central 12: 1-59.
- ECHANDI E., E., 1981: Unidades volcánicas de la vertiente N de la cuenca del río Virilla. – TesisLic. ECG-UCR, 123 p.
- FOSTER, S., HIRATA, R., GOMES, D., DELIA, M., PARIS, M., 2002: Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales.- 115 págs. Banco Mundial, Berlín.
- KRUSHENSKY, RD., 1972: Geology of the Istaru Quadrangle, CR.-Geol. Survey Bull. 1358, 46p., Washington.
- KUSSMAUL, S. 1988: Comparación petrológica entre el piso volcánico del Valle Central y la Cordillera Central de Costa Rica. Ciencia y Tecnología 12(1-2): 109-116.
- RAMÍREZ, R. & ALFARO. A., 2002: Mapa de Vulnerabilidad Hidrogeológica de una parte del Valle Central de Costa Rica. Revista Geológica de América Central 27: 53-60.
- RAMIREZ, R., (2007): Recarga Potencial del Acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica, SENARA. Informe. 41 págs.
- VARGAS, I., 2009. Estudio para la delimitación de las zonas de protección de los pozos para abastecimiento público, Municipalidad de Belén.- 70 págs. UCR-Senara-Municipalidad de Belén, San José [Inf. interno].

