

MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUIFERO POTRERO-CAIMITAL, NICOYA, GUANACASTE, COSTA RICA.

Pamela M. García^{1} y Clara L. Agudelo².*

¹Programa Posgrado Centroamericano en Geología, Apdo. 2014-2060 UCR, San José, Costa Rica

²Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento, Apto 5262-100 San José, Costa Rica.

Recibido agosto 2014; aceptado setiembre 2014

Abstract

The Potrero-Caimital aquifer system, located in the province of Guanacaste, has been defined as an unconfined aquifer composed of three layers: the top layer of sandy-clay soil, the layer of gravel and sand with a thickness approximately 20m, underlain by the layer of soil and weathered and fractured lavas, all located on the foundation developed in the Nicoya Complex. A model was obtained by the lithological information of 42 wells registered in SENARA. The study area has values of transmissivity (T) between 37-2824 m²/d and a range of hydraulic conductivity (K) between 2-175 m/d was defined. The hydraulic conductivity was increased toward the colluvium. Thicker materials tend accumulate near the mountains, while the fines are transported further. The total groundwater recharge, obtained from the water balance, is 1.560,93 l/s. Based on the record levels in 13 wells monitored by SENARA, static levels of the aquifer system were established.

Resumen

El sistema acuífero Potrero-Caimital, ubicado en la provincia de Guanacaste, ha sido definido como un acuífero libre, compuesto por tres capas: en la parte superior una capa de suelo areno-arcilloso, una capa de gravas y arenas de un espesor de 20 m aproximadamente, subyacente por una capa de suelos y lavas meteorizadas y fracturadas, las cuales se ubican sobre el basamento desarrollado en el Complejo de Nicoya. Un modelo fue obtenido mediante la información litológica de 42 pozos registrados en SENARA. La zona de estudio posee valores de transmisividad (T) de 37-2824 m²/d y se definió un rango de valores de conductividad hidráulica (K), entre los 2-175 m/d. La conductividad hidráulica se incrementó en dirección a los coluvios. Los materiales más gruesos tienden acumularse cerca de las montañas, mientras los más finos son transportados más lejos. La recarga total al acuífero, obtenida del balance hídrico, es de 1.560,937 l/s. Con base en el registro de niveles en 13 pozos monitoreados por el SENARA, se establecieron los niveles estáticos del sistema acuífero.

Key words: Acuífero, modelo, Potrero-Caimital, static level, water balance, gauging, wells.

Palabras clave: Acuífero, modelo, Potrero-Caimital, nivel estático, balance hídrico, aforo, pozos.

* Autor para correspondencia: pmgs19@gmail.com o clara.agudelo99@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

La actividad turística en Guanacaste se ha incrementado, causando un aumento en el consumo de agua, tanto para uso doméstico como para recreación [6]. Ésta es la única zona climática en el país donde existen marcadas diferencias en la precipitación a lo largo del año, lo que resulta en frecuentes sequías durante la época e inundaciones en la época lluviosa que causan daños a cultivos, infraestructura y asentamientos humanos [10].

Debido al déficit de agua superficial en época seca, el riego de los cultivos se realiza mediante extracción de agua subterránea por medio de pozos de bombeo y solo para el 2003, se contabilizó un volumen de extracción de 632019 m³ [8]. Esta situación, aunada a las bajas precipitaciones en la zona de interés, pone en peligro el recurso hídrico subterráneo, del que se abastecen numerosas poblaciones que se asientan en la región, tales como Nicoya, Hojancha, Curime, Caimital, Dulce Nombre, Caimitalito, La Fortuna y Hondores [8].

La demanda de agua es atendida por el sistema de acuíferos Potrero y Caimital, los cuales forman en conjunto un sistema de acuífero aluvial intermontano. Este sistema acuífero se caracteriza por ser coluvio aluvial heterogéneo con capas y lentes de diferentes granulometrías que varían entre materiales arcillosos, arenosos y gravosos. En la parte superior del acuífero se identifica una capa areno arcillosa bastante continua con un espesor que varía entre 3 y 12 m, que podría en algunos sectores formar condiciones de confinamiento o semiconfinamiento cuando contienen los niveles piezométricos que se encuentran entre 1 y 7m de profundidad, y libres o freáticos cuando los niveles están por debajo de esa capa arcillosa [8]. Las características físicas del medio, sus propiedades hidrodinámicas, las condiciones climatológicas impuestas y la demanda desorganizada imperante, tornan el ambiente subterráneo vulnerable a la sobreexplotación hídrica y a la contaminación de sus aguas debido al escurrimiento superficial de agroquímicos empleados en la actividad agrícola anteriormente detallada.

El Plan de Manejo del Río Potrero identificó que existe una disminución de caudal y un deterioro en la calidad del agua superficial del Río Potrero, lo cual ha causado un problema de abastecimiento en cantidad y calidad a los usuarios de agua de la ciudad de Nicoya, ya que ésta se abastece de una toma superficial en el río. La razón de este problema ha sido la administración inadecuada del recurso hídrico en la cuenca, una débil fiscalización y una falta de compromiso de los usuarios y autoridades gubernamentales [1]. Ante la situación, muchos especialistas e iniciativas gubernamentales plantean la necesidad de contar con políticas verdaderas de gestión integral del recurso hídrico, la que a su vez requiere contar con tecnologías, metodologías y herramientas de vanguardia que permitan alcanzar dichos objetivos.

Por lo anterior, surge la necesidad de conocer la dinámica de las aguas subterráneas del sistema acuífero Potrero-Caimital mediante un modelo que permita cuantificar la disponibilidad real del medio, así como los efectos de posibles escenarios a futuro, muy probables de ocurrir. La modelación matemática de interrelaciones hídricas dentro de un sistema cualquiera, constituye la principal herramienta de la gestión integral de los recursos hídricos. Sin embargo, para obtener resultados óptimos acordes a la realidad, es necesario desarrollar una interpretación adecuada y elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual, tema central del presente artículo, para lo cual se consideraron algunos estudios de importancia, tales como los realizados en el 2003 por Agudelo [8], los cuales brindan información general de pruebas de bombeo y monitoreo de niveles estáticos registrados por el SENARA desde 2005. Además de la campaña hidrogeológica realizada entre los años 2011-2012, esta información permitirá a los usuarios e instituciones vinculadas con el manejo sostenible del recurso hídrico, contar con información actualizada y de importancia dentro

de un programa de planificación, gestión y protección del uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas a desarrollar.

II. CARACTERISTICAS GENERALES DEL AREA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra en la Península de Nicoya, en el distrito de Nicoya y Hojancha, cantón de Nicoya, provincia de Guanacaste, Costa Rica. Se localiza entre las coordenadas de proyección CRTM05 111000-1120000 N, 332000-344000 E, en la Hoja Matambú escala 1:50000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), Figura 1.

Este sistema acuífero constituye la fuente fundamental de suministro de agua para las poblaciones de Curime, Zompopa, Dulce Nombre, Gamalotal, Caimital y Caimitalito.

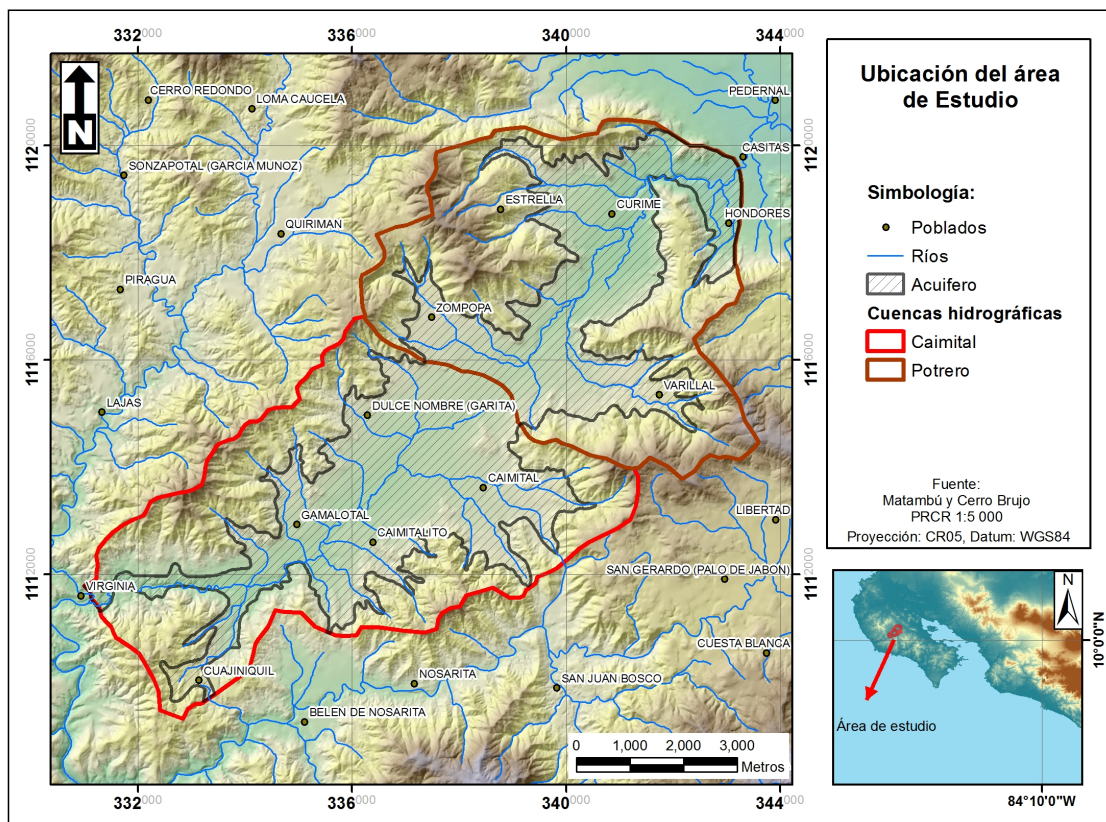


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio.

2.2 Geología

La geología del área de estudio está comprendida por las siguientes formaciones geológicas mostradas en la figura 2.

Complejo de Nicoya. El complejo de Nicoya representa tanto el basamento regional como el local (geológico e hidrogeológico) en los alrededores del área de estudio. En general los afloramientos se encuentran bastante meteorizados [6].

Las litologías estudiadas corresponden a flujos de basaltos en almohadilla y masivos, caracterizados por presentar un color que varía de gris oscuro a negro en las superficies frescas y tonos que varían de café oscuro a rojizo en las patinas de meteorización [6].

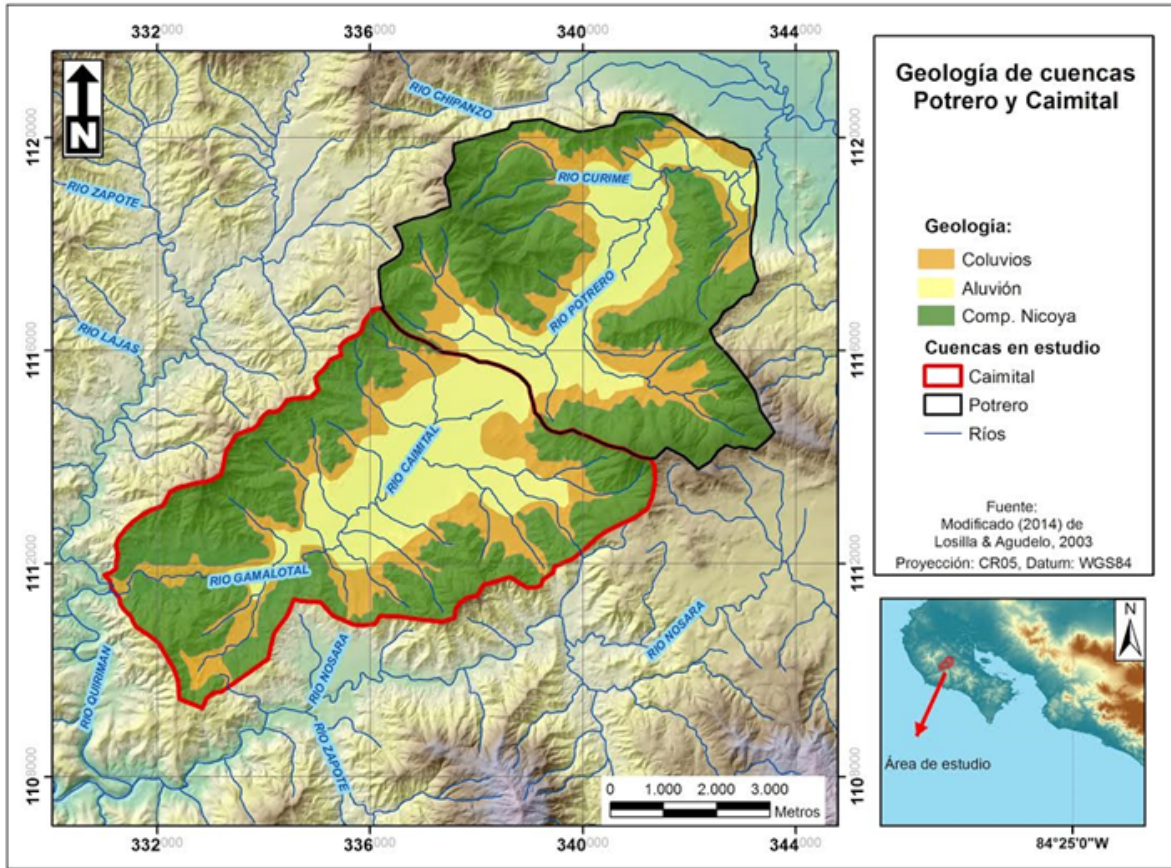


FIGURA 2. Geología del área de estudio

Formación Sabana Grande. Está compuesta mayoritariamente de pelagitas silíceas interestratificadas con radiolarita, lutita silícea, lutita calcárea y arenisca fina calcárea de edad Cretácico superior. Su espesor es variable y alcanza desde decenas hasta miles de metros y sobreyace a los basaltos de la Formación del Complejo de Nicoya [7].

Dep3sitos Aluviales. Se encuentran en las zonas planas del área de estudio, y responden a procesos de erosión y sedimentación relacionados a la geodinámica externa. Los dep3sitos aluviales varían de limos laminados con cantos métricos, con contenidos variables de arcilla. Los litoclastos en general son basaltos, pedernales o radiolaritas del Complejo de Nicoya [6].

El espesor del coluvio aluvial varía, según litologías de perforaciones de pozos, entre unos pocos metros y hasta aproximadamente 40 m y casi toda la superficie del valle está cubierto por una capa de materiales arcillo limosos de baja permeabilidad, de entre 3-12 m de espesor. Bajo esta capa arcillosa se reportan predominantemente aluviones más gruesos con intercalaciones de capas arcillosas. Bajo los dep3sitos coluvio aluviales se encuentran las rocas del Complejo de Nicoya que conforman su basamento [8].

III. RESULTADOS

3.1 Meteorología

Se realizó un análisis de regionalización de las variables meteorológicas, a fin de definir y cuantificar el potencial hídrico de entrada al sistema acuífero estudiado. Para ello, se tomaron en cuenta los datos meteorológicos de precipitación, temperatura máxima, mínima, brillo solar,

velocidad del viento, evapotranspiración y humedad relativa, siendo estos obtenidos de estaciones meteorológicas cercanas al punto de análisis.

Toda la información fue obtenida del Instituto Meteorológico Nacional y de la empresa agrícola "La Costeña", siendo las estaciones meteorológicas empleadas la Estación Agrícola Nicoya y la Costeña.

El área de estudio se caracteriza por ser una zona semiárida, con un periodo húmedo comprendido entre los meses de abril y octubre, que son los meses que presentan mayor precipitación, en tanto que la época seca abarca los meses de noviembre a marzo. Los valores máximos alcanzados en mayo y octubre corresponden a una lámina media mensual de 370.20 y 473.30 mm, respectivamente (Figura 3).

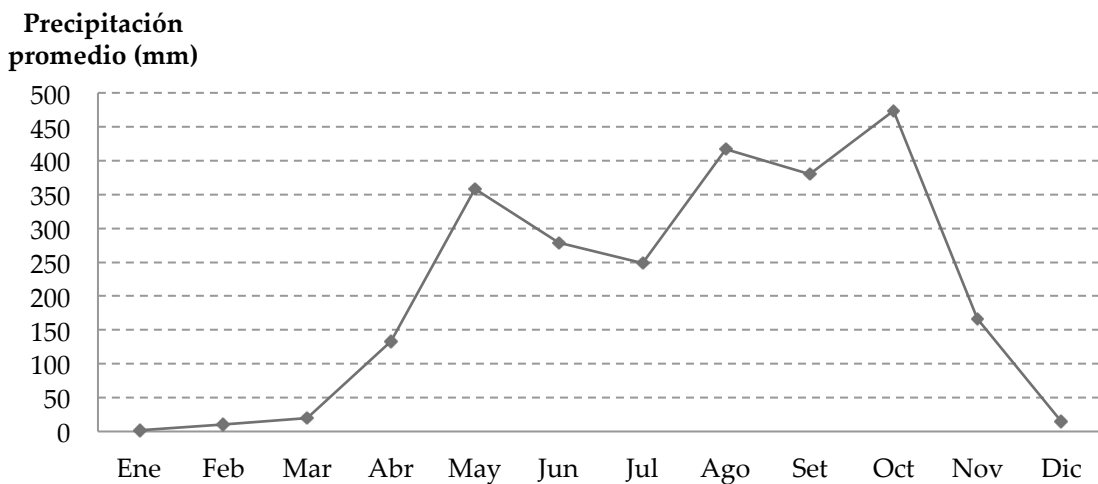


FIGURA 3. Precipitación promedio mensual, estación La Costeña.

La humedad relativa varía de un mínimo de 62 % a un máximo de 87 %, correspondiendo estos extremos al período seco y lluvioso, respectivamente. La humedad relativa entre diciembre y marzo presenta un rango de 62 % a 73 %, mientras que en los meses de abril a noviembre el rango varía de 65 % a 87 %.

La temperatura media anual para la región del acuífero es de 27,1 °C, con fluctuaciones entre los meses más cálidos que van de enero a mayo, y los meses más fríos de junio a diciembre. El mes de abril es el que registra la mayor temperatura 28.9 °C.

El brillo solar es una variable meteorológica de importancia para el desarrollo de las actividades antrópicas como la agricultura. Este parámetro varía en un rango total de 4,8 a 8,9 horas de sol durante el año, siendo los meses de verano o secos con mayor luminosidad al día, variando en un rango de 7,9 a 8,9 horas. Por otro lado, las horas de sol se distribuyen en un rango de 4,8 a 8 horas durante la época húmeda del año, entre los meses de abril a noviembre.

Finalmente, la evapotranspiración total anual se estimó en 1364.9 mm/año. Este valor es más alto durante marzo y abril con valores comprendidos entre 107.3 mm y 135.5 mm. Los valores más bajos de evapotranspiración se ubican en los meses más lluviosos (mayo – noviembre), con un rango de 119 mm to 98.1 mm (Cuadro 1).

CUADRO 1. Evapotranspiración potencial total promedio (mm) para la cuenca del sistema Potrero-Caimital

ETP	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Prom	115,9	115,6	135,5	133,5	119,0	105,7	112,5	115,9	104,1	101,7	98,1	107,3	1364,9

3.2 Balance Hídrico

En el área de estudio se realizaron una serie de aforos diferenciales, pruebas de infiltración, análisis de información meteorología, balance hídrico, etc., a fin de cuantificar los flujos de entrada y de salida del sistema acuífero.

Recarga. El acuífero es recargado directamente como infiltración desde la precipitación y por medio de la recarga lateral, producto de la infiltración en las montañas.

La recarga directa ocurre desde los depósitos Aluviales y Coluviales, los cuales están compuestos por aluviones, capas de arcilla y suelos arenosos. Para definir esta variable, se realizaron cálculos de balance hídrico sobre cada uso de suelo, estimando la recarga natural como un porcentaje de precipitación, después de contabilizar la evapotranspiración. El método empleado para realizar estos cálculos fue el desarrollado por Schosinsky [11]. Este método aproxima la recarga usando la infiltración y los datos mensuales de precipitación.

Cuatro usos principales de suelo se establecieron dentro de las cuencas a las cuales pertenece el sistema acuífero. El mayor uso en el sistema acuífero Potrero-Caimital corresponde a pastos y el menor es el uso urbano, el cual se considera como depreciable para los cálculos de recarga (Cuadro 2).

CUADRO 2. Clasificación de uso del suelo.

Uso	Área		Porcentaje
	(m ²)	(km ²)	(%)
Área urbana	1.169.400,91	1,17	1,63
Cultivos	3.890.376,97	3,89	5,43
Bosques	29.467.055,57	29,47	41,13
Pastos	37.123.252,69	37,12	51,81
Total	71.650.086,14	71,65	100,00

A fin de abarcar la mayor extensión de análisis y como parte del desarrollo de la presente investigación, se realizaron 20 pruebas de infiltración mediante ensayos tipo anillos concéntricos o método de Müntz [4], las cuales fueron distribuidas en toda el área de estudio (Figura 4).

Dichas pruebas se realizaron en colaboración con el SENARA durante octubre y noviembre del 2012 (Cuadro 3). Así mismo, la base de datos de Fuentes [6] se utilizó con el objetivo de seguir sumando mayor información en el área de estudio (Cuadro 4).

Las pruebas de infiltración realizadas permitieron obtener las velocidades de infiltración sobre la parte más superficial del acuífero, en tanto que los parámetros agronómicos obtenidos del análisis de suelos, contribuyeron a determinar la tasa de recarga del acuífero estudiado. En función de los cuatro tipos de uso de suelos, las texturas, el análisis del suelo, las pruebas de infiltración y de la clasificación de las pendientes topográficas, se han definido las diferentes zonas de recarga del sistema acuífero Potrero-Caimital.

CUADRO 3. Resultado de pruebas de infiltración y análisis de suelos.

Código	Este	Norte	Uso de Suelo	Unidad	Acuífero	Velocidad de infiltración		Capacidad de Campo	Punto de Marchitez	A. Útil	Densidad aparente
						(mm/d)	(cm/min)	(%)	(%)	(%)	(g/cc)
GAR-1	331.300	1.111.101	Bosque	Coluvio	Caimital	3059,45	0,212	38,16	20,12	18,04	1,21
GAR-2	336.185	1.112.248	Pasto			217,69	0,015	39,93	21,64	18,29	1,19
GAR-3	334.800	1.111.831	Cultivo			494,29	0,034	42,83	22,09	20,74	1,14
GAR-4	338.946	1.113.971	Forestal			797,27	0,055	38,95	21,17	17,78	1,27
GAR-5	335.484	1.114.830	Pasto	Complejo	Caimital	434,69	0,030	39,87	21,14	18,73	1,15
GAR-6	335.529	1.114.831	Bosque			1793,15	0,125	37,95	20,39	17,56	1,18
GAR-7	337.000	1.113.735	Cultivo	Aluvión	Caimital	93,55	0,006	38,21	21,45	16,76	1,19
GAR-8	337.081	1.113.639	Bosque			489,30	0,034	40,01	22,35	17,66	1,12
GAR-9	336.539	1.114.204	Pasto			143,89	0,010	37,74	20,06	17,68	1,21
GAR-10	337.703	1.115.962	Forestal			187,66	0,013	42,75	22,34	20,41	1,12
GAR-11	339.718	1.117.308	Bosque	Coluvio	Potrero	10346,76	0,719	43,57	22,45	21,12	1,12
GAR-12	339.647	1.117.148	Pasto			11,37	0,001	43,91	21,77	22,14	1,13
GAR-13	337.533	1.116.755	Cultivo			763,74	0,053	42,36	21,97	20,39	1,14
GAR-14	338.544	1.116.642	Forestal	Complejo	Potrero	129,86	0,009	44,06	22,89	21,17	1,12
GAR-15	338.806	1.117.875	Forestal			1186,01	0,082	39,87	20,45	19,42	1,16
GAR-16	341.711	1.116.202	Pasto			267,19	0,019	43,81	21,65	22,16	1,09
GAR-17	338.822	1.117.882	Bosque			509,30	0,035	41,04	22,87	18,17	1,11
GAR-18	339.303	1.115.674	Cultivo	Aluvión	Potrero	108,95	0,008	42,86	21,69	21,17	1,09
GAR-19	340.037	1.117.215	Bosque			195,54	0,014	40,74	22,06	18,68	1,12
GAR-20	340.325	1.119.265	Pasto			93,01	0,006	43,85	21,62	22,23	1,09

CUADRO 4. Resultado de pruebas de infiltración, Fuentes (2006).

Nº Prueba	Este	Norte	(mm/d)	(cm/min)
FU-1	339.408	1.119.436	680	0,047
FU-2	340.318	1.119.060	86	0,006
FU-3	341.906	1.119.822	3500	0,243
FU-4	341.705	1.115.672	1040	0,072
FU-5	339.374	1.114.610	950	0,066
FU-6	342.449	1.119.383	300	0,021
FU-7	341.178	1.118.914	230	0,016

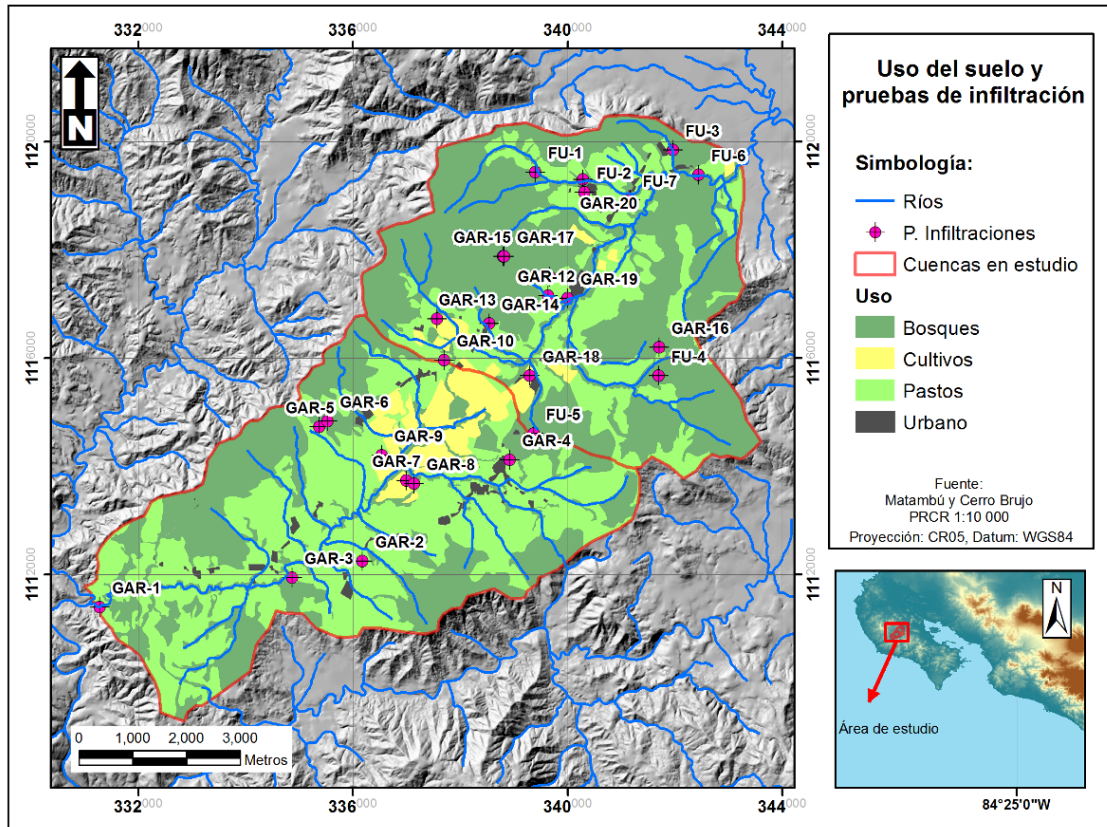


FIGURA 4. Mapa de uso de suelo y ubicación de pruebas de infiltración.

Nueve zonas de recarga se definieron, siendo la zona con mayor velocidad de infiltración la correspondiente a bosques, con un valor de 3278.89 mm/d. En segundo lugar se hallan los cultivos, con un valor de infiltración de 763.74 mm/d; mientras que la zona de pastos presenta una velocidad media máxima de 285.98 mm/d.

Una vez definidos todos los parámetros descritos, y de acuerdo a la metodología indicada, se procedió al cálculo del coeficiente de infiltración por textura de suelos para las nueve zonas de recarga (Cuadro 5).

Finalmente, luego de realizar los nueve balances hídricos de humedad de suelo se obtuvo una recarga potencial de 49.225.376,36 m³/año, empleando la hoja electrónica elaborada por Schosinsky [11].

Ríos. El área de estudio incluyó los Ríos Caimital y Potrero. Durante la estación lluviosa, de acuerdo a la información de monitoreo de niveles en pozos, el nivel freático del sistema acuífero alcanza sus niveles máximos en 2.79 mbns para el acuífero Potrero y 8.88 mbns para el acuífero Caimital. Lo anterior cuando el nivel de descarga se incrementó a 1.84 m³/s para el Río Potrero (medido en la toma del A y A, coordenadas CRTM05 1119628 N-343195 E) y a 2.87 m³/s para el Río Caimital (medido en el punto de salida de la cuenca, coordenadas CRTM05 1111781 N-330991 E), en el mes de Octubre.

Durante la estación seca, el nivel desciende a 6.21 mbns para el acuífero Potrero y 10.75 mbns para el acuífero Caimital, conforme al decrecimiento de las descargas a 0,12 m³/s para el Río Potrero y 0,021 m³/s para el Río Caimital, en el mes de abril (Figuras 5 y 6).

CUADRO 5. Coeficiente de infiltración por textura del suelo y parámetros para el balance hídrico

Parámetro	Zona de Cultivos		Zona de Pastos			Zona de Bosques			
	ZC.2	ZC.3	ZPA.1	ZPA.2	ZPA.3	ZB.2	ZB.3	ZB.4	ZB.5
Área (km ²)	3,56	0,47	7,06	4,20	2,15	6,91	14,64	8,83	4,52
Velocidad de infiltración (mm/día)	101,25	763,74	51,00	165,00	285,98	255,23	849,40	1793,00	3278,00
Tasa e capacidad de infiltración	Baja	Media	Muy Baja	Baja	Media	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Capacidad de Campo (%)	40,54	42,36	38,28	40,25	30,47	42,28	40,06	37,95	38,16
Punto de Marchitez (%)	21,7	21,97	21,76	21,20	16,47	21,86	21,53	20,39	20,12
Densidad aparente (g/cc)	1,14	1,14	1,13	1,17	1,12	1,11	1,17	1,18	1,21
Capacidad de infiltración fc (mm/día)	101,25	763,74	51,19	165,78	285,98	254,23	849,40	1793,15	3278,89
Fracción que infiltra por pendiente (Kp)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Fracción que infiltra por textura de suelo (Kfc)	0,49	0,93	0,32	0,62	0,74	0,72	0,95	1,00	1,00

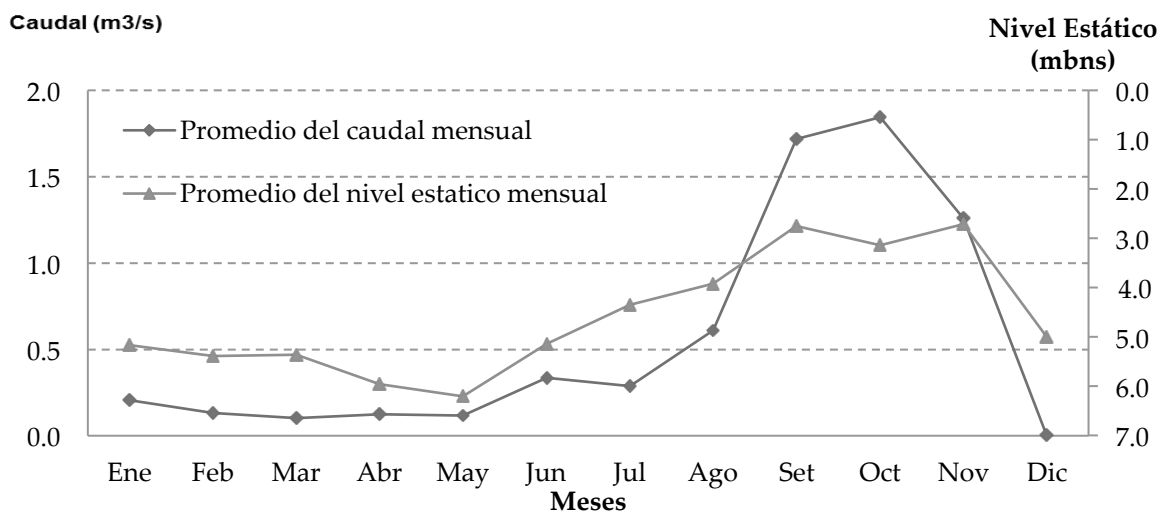


FIGURA 5. Relación entre aguas subterráneas y aguas superficiales, acuífero Potrero.

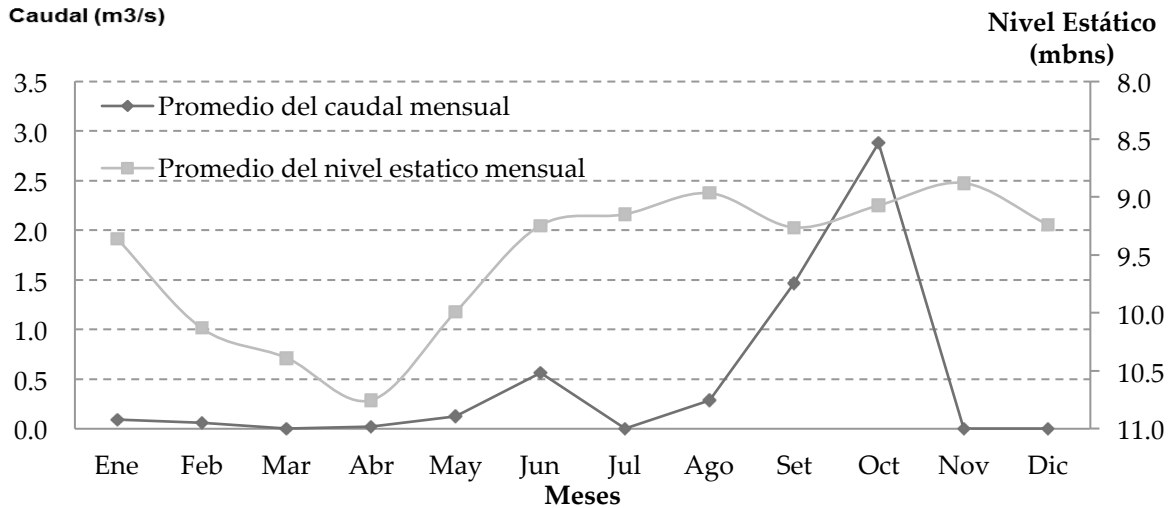


FIGURA 6. Relación entre aguas subterráneas y aguas superficiales, acuífero Caimital

En este análisis se estimó que el tiempo de tránsito del agua superficial hacia el acuífero y viceversa se da en aproximadamente un mes.

3.3 Contexto hidrogeológico

En la península de Nicoya se han desarrollado acuíferos importantes solo donde se cumple alguna de las siguientes condiciones [9] (Figura 7):

- Presencia de rocas competentes y diaclasadas, de origen sedimentario. Las formaciones que presentan las características adecuadas para transmitir y almacenar agua son sobre todo las formaciones Sabana Grande y Barra Honda.
- Presencia de una zona de falla y/o fracturas, debido al fuerte tectonismo sufrido por las rocas de la región y a la distribución de las fracturas. Aunque este tipo de acuífero existe en la Península de Nicoya, no existen acuíferos con estas características en el área de estudio.
- Presencia de aluviones de espesor importante. Los aluviones con estas características que pueden almacenar y transmitir agua son depósitos recientes y por tanto, se forman acuíferos someros, susceptibles en alguna medida a contaminación.

Límites del acuífero. El sistema acuífero Potrero–Caimital se caracteriza por ser un medio poroso libre, constituido principalmente por los cantos rodados, limos laminados y capas de arcilla de las unidades de Aluvi3n y Coluvio. Este limita por el noreste con el cauce del Río Potrero, y por noroeste y este por el Cerro La Cruz y Cerro Grande, respectivamente. Ambos pertenecen a los basaltos y algunas lutitas, calizas silíceas y radiolaritas del Complejo de Nicoya.

El acuífero se estrecha hacia el sur, al ser flanqueado por los Cerros Zompopa y Varillal, constituidos también por los basaltos del Complejo de Nicoya y se ensancha hacia sus flancos compuestos por el Cerro Mendoza y Cerro Molinillo, alrededor de los poblados Dulce Nombre (Garita) y Caimital. Estas cumbres también se hallan constituidas por las rocas del Complejo de Nicoya. Por otro lado, hacia el noreste y suroeste, entre los poblados Gamalotal y Fila Caballos el acuífero se estrecha debido a los Cerros Divisadero y Cerro Ojochilla, los cuales se hallan uno frente al otro y constituyen el Complejo de Nicoya, y vuelve a estrecharse aún más hacia el

suroeste, en las inmediaciones del Cerro Colegallal, debido a las unidades de basaltos del Complejo de Nicoya que lo limitan.

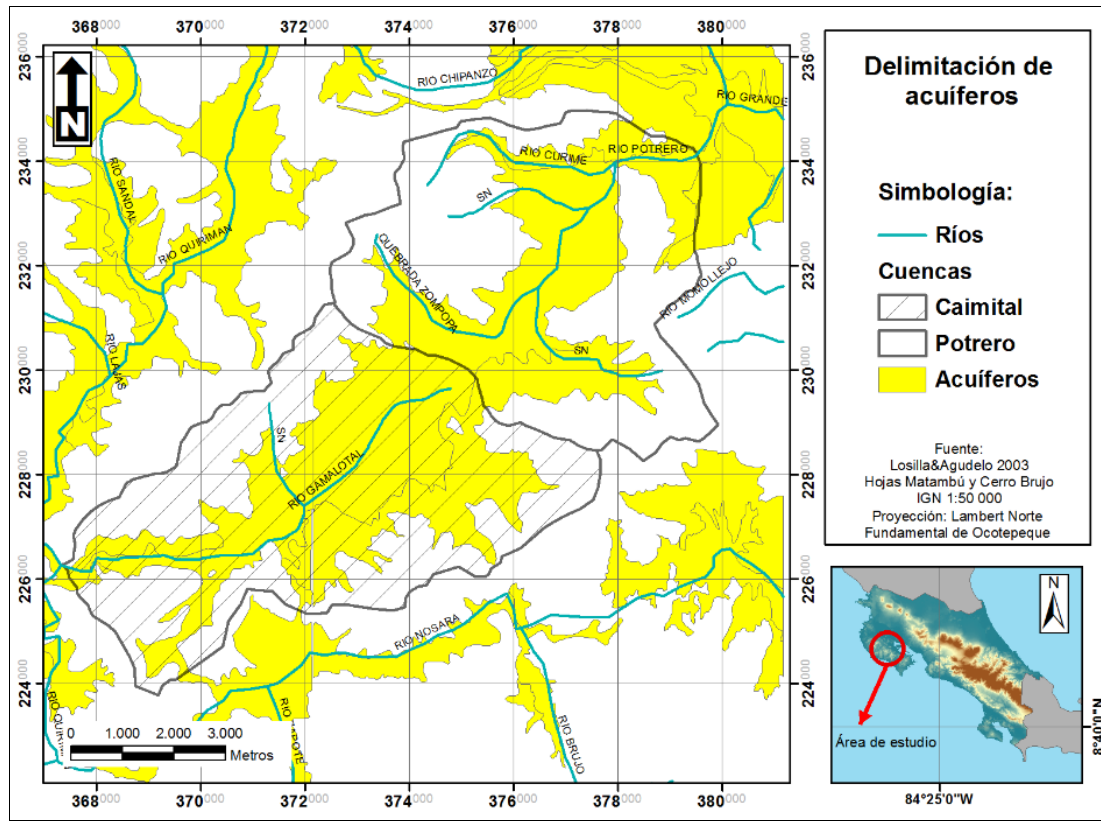


FIGURA 7. Acuíferos presentes en la zona de estudio.

Flujo del agua subterránea. Las fluctuaciones estacionales en la superficie freática han sido monitoreadas por un periodo de 9 años, desde 2005 a 2013 para 13 pozos y del 2011-2013 para 24 pozos. Estos monitoreos indican que el nivel del agua subterránea está entre 0.4 y 29.22 m bajo el nivel de la superficie. En esta zona, los hidrogramas muestran una ciclicidad en la variación del nivel freático, pues en la zona norte del área de estudio, muy cerca al Río Potrero, el nivel freático se halla entre 1.30 – 9.75 mbns, ascendiendo entre los meses de abril y mayo (periodo lluvioso), y descendiendo en los meses de diciembre a marzo (Figura 8).

Hacia el suroeste, al centro del área de estudio, cerca del Río Caimital el nivel fluctúa entre 2.70-4.78 m, siendo los meses de recarga del acuífero los meses de abril y mayo (periodo lluvioso), y los de descarga en los meses de diciembre a marzo (Figura 9).

Más al sur, en las inmediaciones de los cerros Colegallal y Divisadero, el nivel freático alcanza su punto máximo en el mes de octubre (periodos lluviosos) y su punto mínimo o descarga del acuífero en el mes de febrero (período seco) (Figura 10).

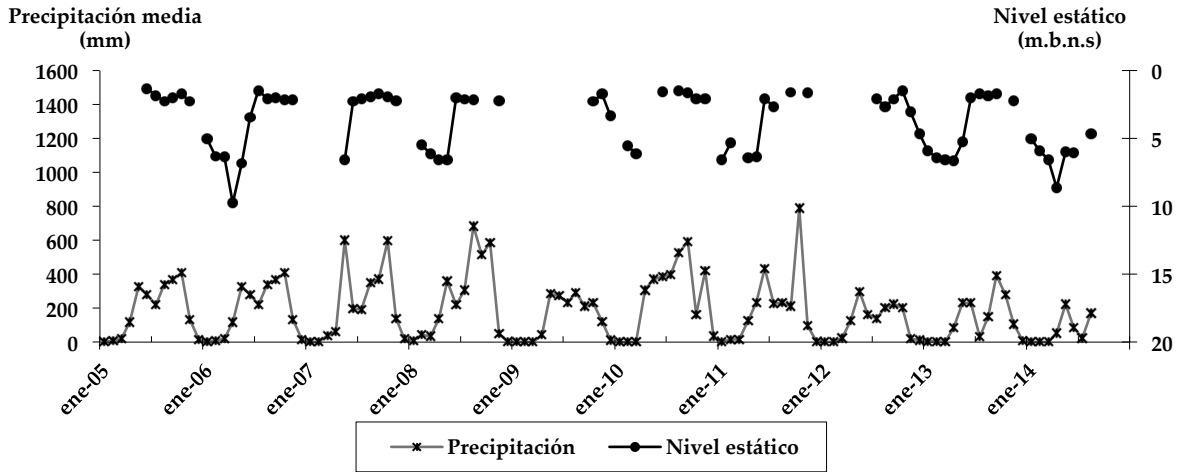


FIGURA 8. Hidrograma del pozo Marielo coordenadas 1119714 N-342275 E

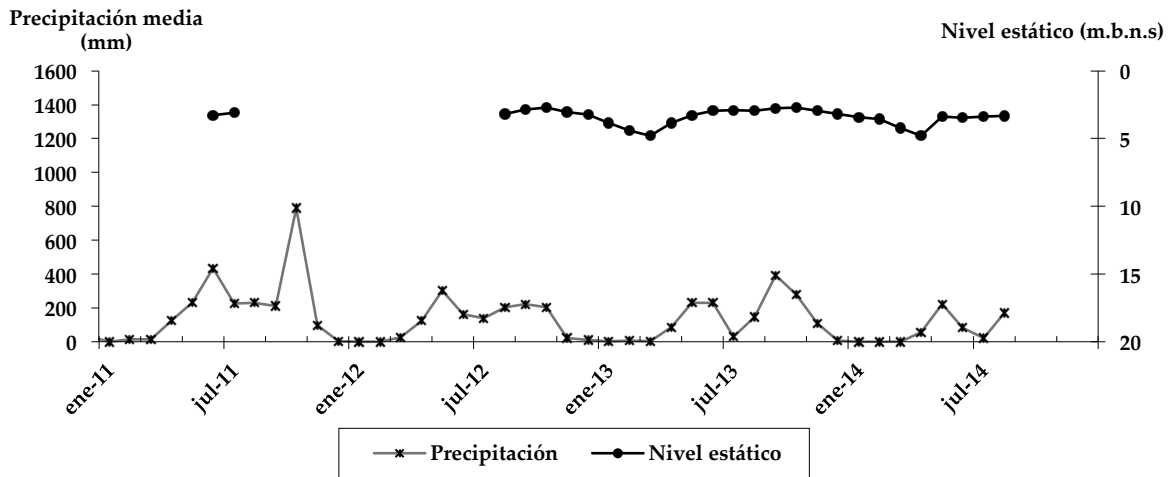


FIGURA 9. Hidrograma del pozo AyA Caimital 6, coordenadas 1114006 N-338077 E

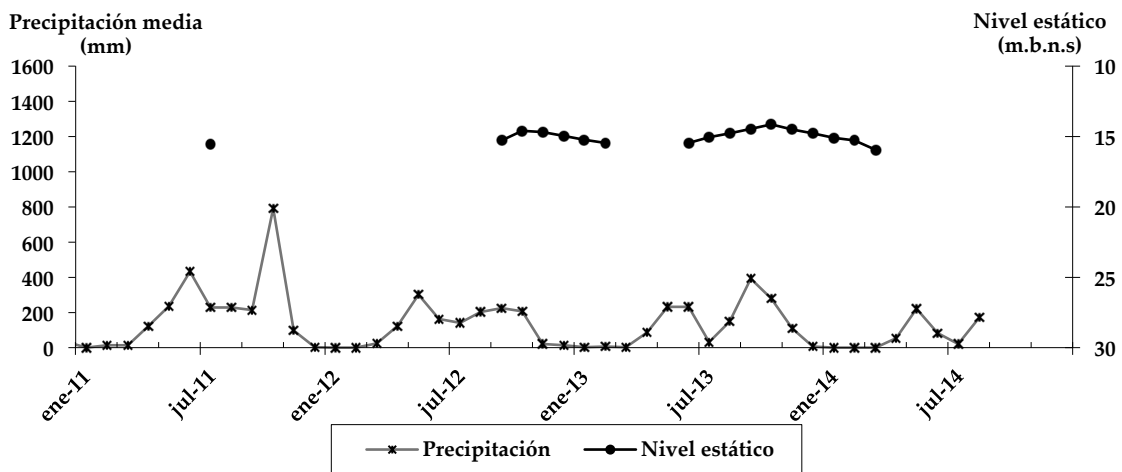


FIGURA 10. Hidrograma del pozo José Fernando Oriones, coordenadas 1112184 N-334356 E

Los datos recolectados durante todo el monitoreo de nueve años, muestran que las fluctuaciones estacionales del nivel del agua subterránea son más notorias donde el nivel freático

es menos profundo. Los niveles del agua empiezan a crecer con el inicio del periodo lluvioso, alrededor de 1 a 2 meses después de las lluvias. El descenso de las aguas subterráneas tiene igual comportamiento: empieza en el final de la estación lluviosa en las áreas de agua subterránea poco profundas. El efecto en el sistema acuífero es estacional.

Propiedades hidrodinámicas del acuífero. Del Archivo Nacional de Pozos y Nacientes del SENARA, se seleccionaron un total de 92 pozos que se ubicaron dentro del área de estudio, de los cuales, 42 de ellos poseen descripción litológica y 49 poseen valores de transmisividad (T), los cuales fueron estimados en su mayoría a través de Theis – Jacob [7] y algunos mediante pruebas de recuperación. Estos pozos fueron reagrupados en función a la capa a la que pertenecen, es decir, a la posición de las rejillas en el estrato respectivo, obteniéndose así 35 pozos pertenecientes a la capa 2 y 8 pozos pertenecientes a la capa 3 (Cuadro 6 y Cuadro 7).

Los valores calculados de transmisividad se hallan dentro del mismo rango de orden magnitud, con mediana variabilidad. Esto corresponde al grado de anisotropía horizontal y vertical presente en cada una de las capas del acuífero.

Con los valores mostrados anteriormente, se elaboraron mapas de isotransmisividad para el acuífero (Figura 11) a fin de obtener los respectivos mapas de isoconductividad hidráulica, empleando mapas de isoespesores como denominador común. Esto permitió caracterizar, con base en la transmisividad y el espesor del acuífero, un acuífero con valores de conductividad muy heterogeneos, la cual aumenta hacia la zona de los coluvios (Figura 12). Puede afirmarse que la capa constituida por el complejo de Nicoya corresponde a una baja transmisividad, y se considera esta como una capa no productiva.

CUADRO 6. Valores de caudal, transmisividad y capacidad específica según la capa coluvio aluvial

Código	Este	Norte	Caudal (l/s)	Transmisividad (m ² /d)	Capacidad específica (l/s/m)
INV-86	339934	1117313	3,00	37,83	0,38
MT-257	340214	1119333	1,00	40,00	0,40
MT-197	336608	1112855	2,00	50,00	0,50
MT-374	340283	1119829	0,75	50,85	0,51
MT-410	339444	1115871	1,50	51,72	0,52
MT-98	336060	1115176	0,25	60,00	0,60
MT-339	337241	1115835	2,00	64,52	0,65
MT-172	341700	1119947	2,80	68,29	0,68
MT-401	341793	1120107	2,00	66,67	0,67
MT-352	340239	1119133	1,00	100,00	1,00
MT-355	339909	1115796	2,00	100,00	1,00
MT-343	336669	1114795	28,00	143,59	1,44
CJ-8	333305	1110052	1,50	150,00	1,50
MT-247	338089	1113983	10,00	160,00	1,60
INV-117	341059	1118910	8,00	169,85	1,70
MT-145	340413	1117723	0,97	194,00	1,94
MT-356	339975	1117580	1,00	200,00	2,00
MT-265	336592	1114228	35,00	257,00	2,57
MT-344	336560	1115175	28,00	287,18	2,87
INV-121	339749	1116980	9,00	293,16	2,93
MT-168	340513	1117973	18,70	311,67	3,12
MT-147	340563	1118173	20,30	338,33	3,38
MT-253	338159	1113714	5,00	500,00	5,00
MT-351	338071	1113559	1,20	600,00	6,00
MT-229	337275	1115095	0,83	54,00	0,05
MT-233	339034	1115787	0,83	160,00	1,60
MT-228	337856	1116172	0,83	275,00	2,75
MT-230	337381	1115835	0,83	116,00	1,16
MT-74	338209	1113623	0,43	142,00	1,42
MT-231	339171	1115741	0,83	692,00	6,92
MT-353	341047	1118873	10,00	1130,00	11,30
MT-169	337794	1116052	0,83	1202,00	12,02
MT-182	337826	1115994	0,83	1963,00	19,63
MT-234	339201	1115614	1,82	2824,00	28,24

CUADRO 7. Valores de caudal, transmisividad y capacidad específica según la capa Complejo de Nicoya

Código	Este	Norte	Caudal (l/s)	Transmisividad (m ² /d)	Capacidad específica (l/s/m)
MT-409	341572	1120160	1,00	7,09	0,07
MT-280	337461	1116675	0,80	7,27	0,07
MT-124	340814	1118903	0,44	8,83	0,09
MT-347	342465	1119721	0,50	10,00	0,10
MT-364	339760	1117510	0,50	12,50	0,13
MT-416	342506	1119591	4,00	13,52	0,14
MT-371	339570	1119316	0,50	16,67	0,17
MT-367	340314	1118848	1,00	28,57	0,29

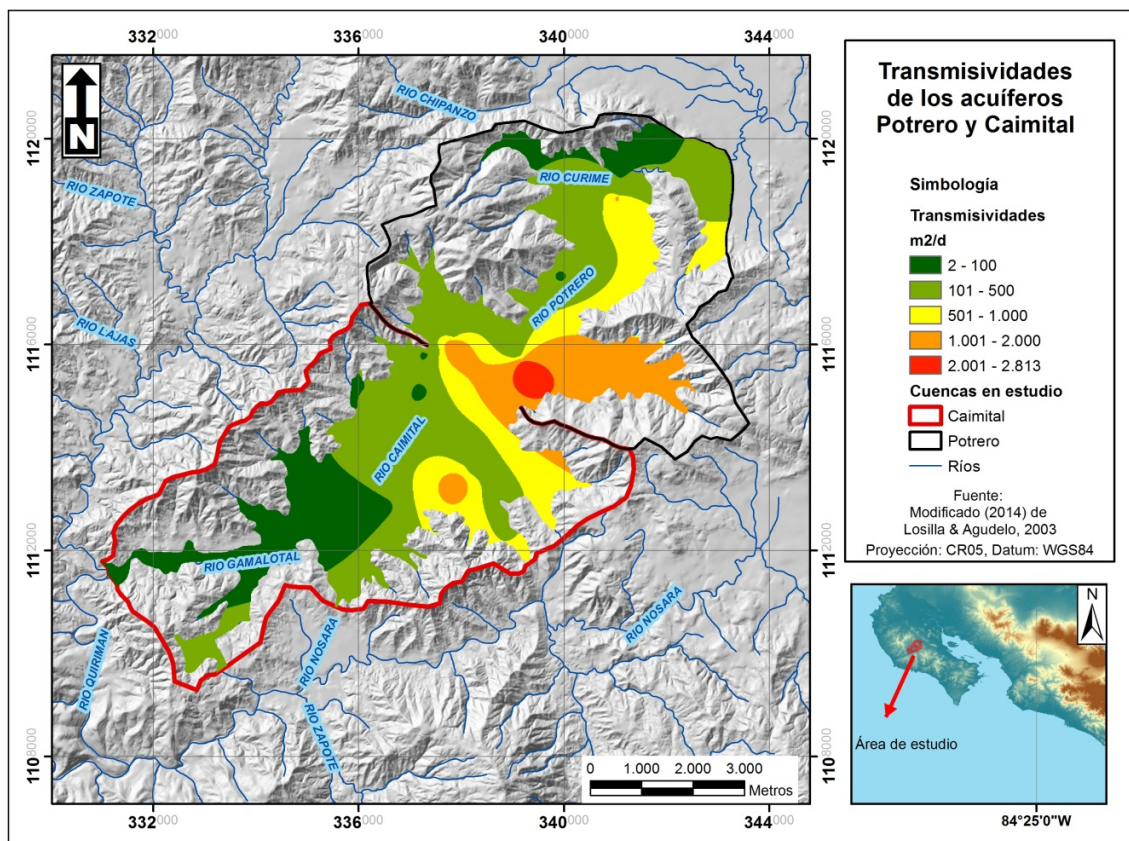


FIGURA 11. Mapa de distribución de la transmisividad.

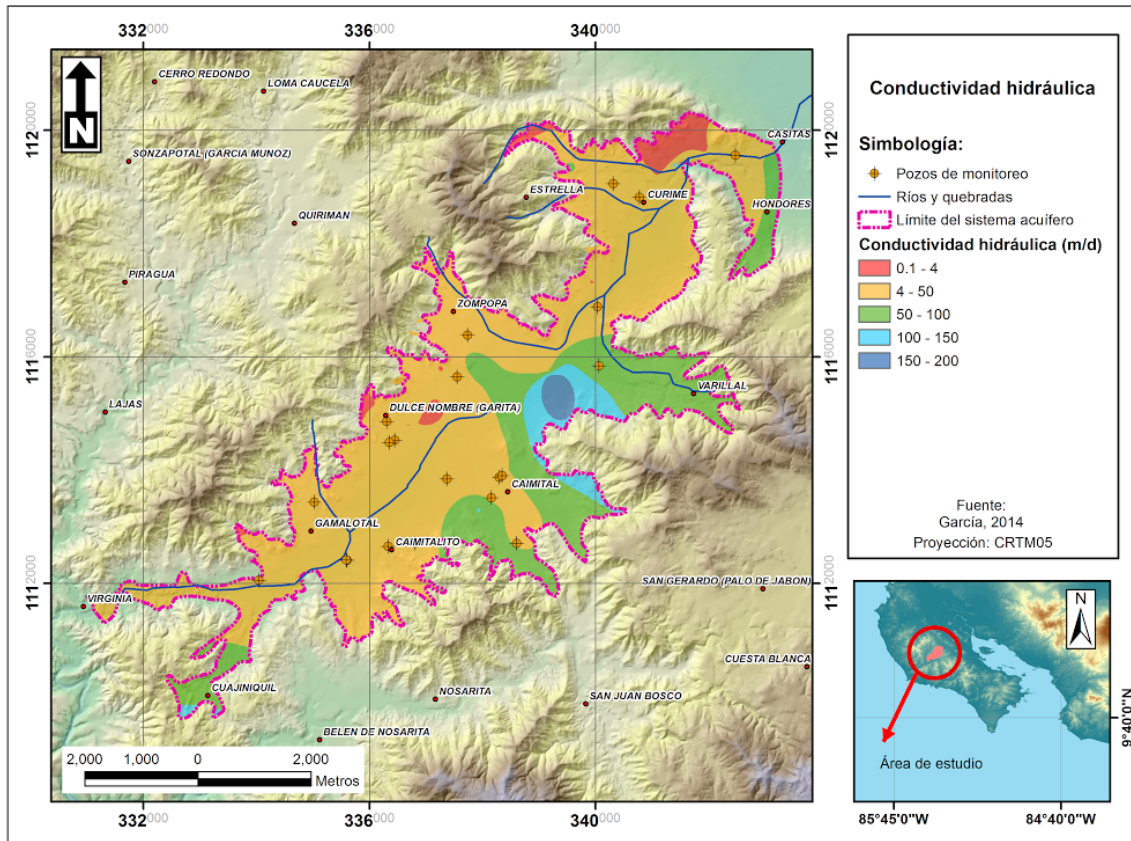


FIGURA 12. Mapa de distribución de la conductividad hidráulica.

IV. DISCUSIÓN

Unidades hidroestratigráficas

Estas unidades fueron definidas como unidades geológicas de propiedades hidrogeológicas similares y fueron definidas tres para el sistema acuífero Potrero–Caimital.

La primera unidad, una capa arcillosa bastante continua, se identificó con espesores que se definieron en función de la litología de pozos y los perfiles hidrogeológicos, la cual varía entre 1 y 11 m, en la parte superior del sistema. Ella podría formar, en algunos sectores, condiciones de confinamiento cuando el nivel freático se halla por encima, o libre cuando él se halla por debajo de la capa. Para esta unidad no se hallaron pozos que permitieran calcular la transmisividad y rendimiento específico, por lo que a fin de realizar la modelación del sistema acuífero se utilizaron valores asumidos procedentes de la capacidad de infiltración.

La segunda unidad la constituyen las gravas y arenas de los depósitos aluviales y coluviales. De acuerdo a las pruebas de bombeo practicados a pozos sobre esta unidad, se determinó que estos materiales poseen altas propiedades hidrodinámicas, definiendo así un acuífero muy productivo en reservas hídricas, donde la transmisividad varía entre los 37 y 2,824 m²/d.

La tercera unidad del acuífero la constituye el basamento rocoso, formado por la unidad geológica denominada Complejo de Nicoya. Esta capa hidroestratigráfica está compuesta por dos zonas, la superior constituida por basaltos fracturados donde la transmisividad varía entre los 5,6-28,6m²/d y la inferior, por materiales de muy baja transmisividad tales como los basaltos sanos. El

límite entre el basamento y la capa de arenas de los depósitos aluviales fue obtenido mediante la litología de pozos analizados en este estudio.

El espesor del acuífero se incrementa desde zonas de baja elevación hasta las faldas de las formaciones ígneas del Complejo de Nicoya y la conductividad hidráulica de la segunda unidad se incrementa en esa misma dirección. Esta tendencia se explica, principalmente, por el hecho de que los materiales más gruesos tienden a acumularse cerca de las montañas, mientras que los materiales más finos son transportados más lejos.

Perfiles geológicos

De acuerdo a los cortes realizados, es posible identificar tres capas en las cuales se da una predominancia de materiales coluvio aluviales, sobreyacidos por una capa de arcillas y subyacidos por los materiales del complejo de Nicoya, basaltos alterados y sanos. Se elaboraron 8 perfiles los cuales se muestran en la figura 13.

El corte A-B mostrado en la figura 13, se realizó en dirección suroeste-noreste abarcando los pozos MT-197, MT-265, MT-238, MT-410, MT-364, MT-356, MT-124, MT-363, MT-148, MT-409, MT-401 y MT-347. No fue posible identificar la divisoria de aguas que divide al sistema acuífero Potrero-Caimital en los acuíferos Potrero y Caimital debido a la inexistencia de pozos en este sitio. Sin embargo, en este perfil es posible identificar la preferencia de dirección del agua subterránea, pudiendo concluir que existe una dirección preferencial hacia el suroeste en el acuífero Caimital, entre los pozos MT-197, MT-265 y MT-238 y hacia el noreste en el acuífero Potrero, entre los pozos MT-410, MT-364, MT-356, MT-124, MT-363, MT-148, MT-409 y MT-401.

En los otros perfiles realizados fue posible identificar la misma secuencia descrita de arcilla, aluvión y basaltos del complejo de Nicoya, los cuales varían en su espesor (Figura 15).

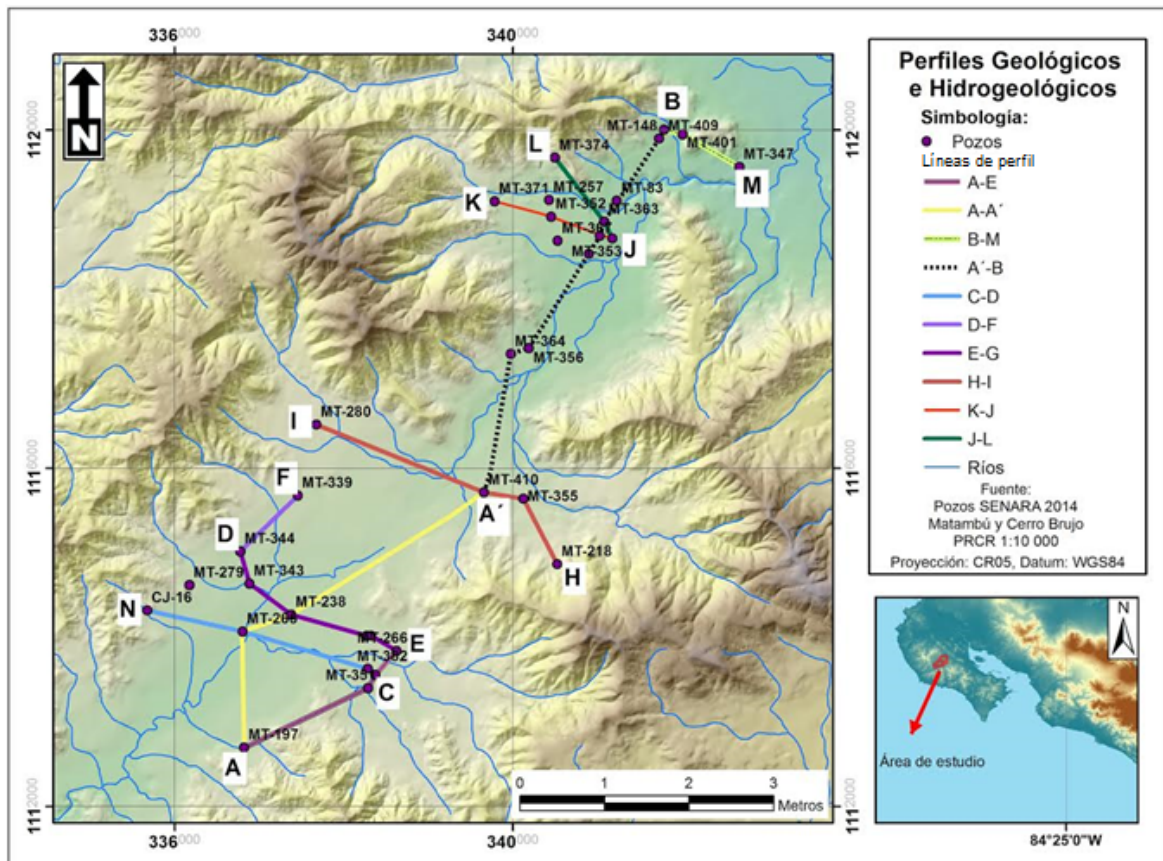


FIGURA 13. Ubicación de los perfiles realizados

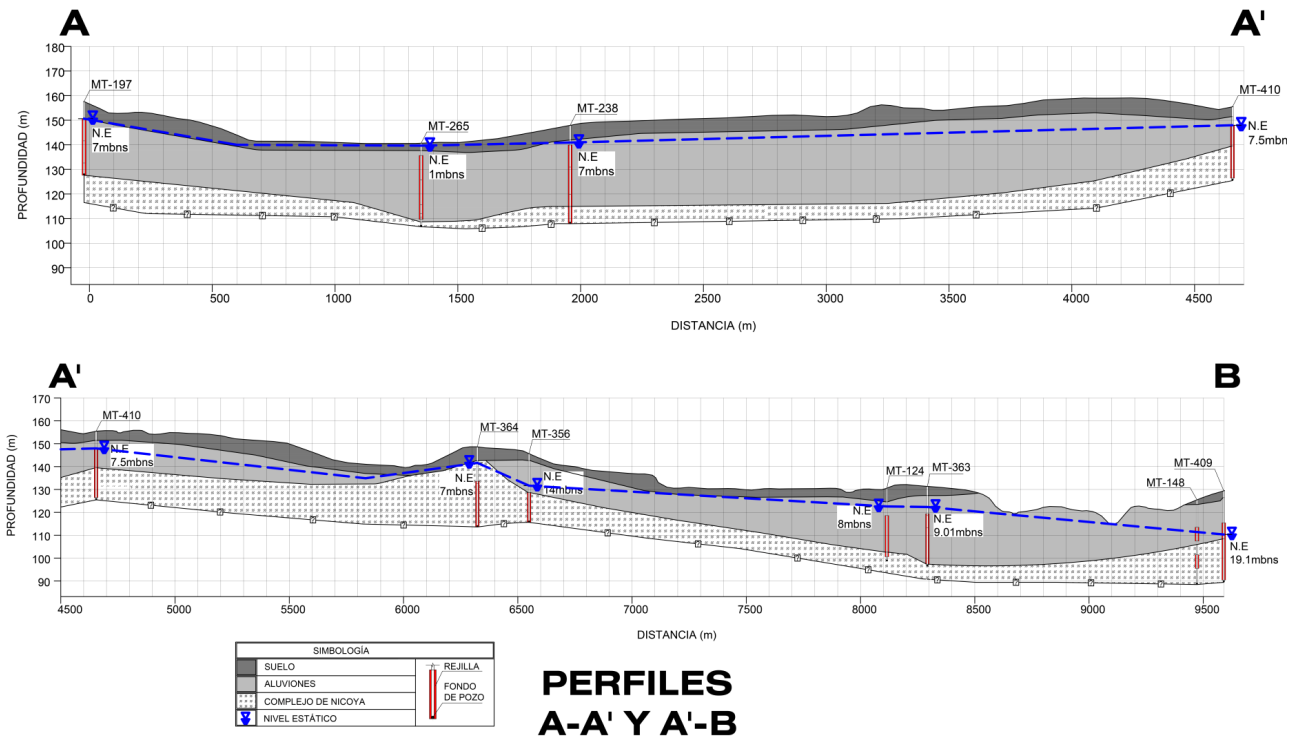


FIGURA 14. Perfil longitudinal hidrogeológico A-B

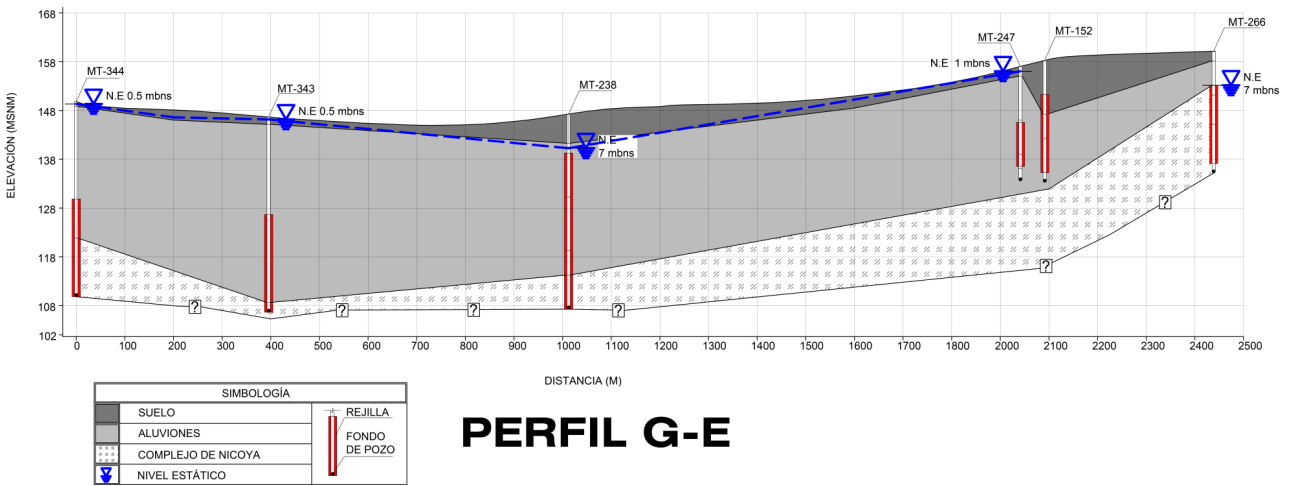


FIGURA 15. Perfil hidrogeológico G-E

Flujos de intercambio entre el acuífero y los ríos

Los ríos incluidos en el área de estudio son considerados fronteras o características internas, que están medianamente conectadas al acuífero. El flujo base proveó sólo un 29 % a la descarga total del Río Potrero, de acuerdo con la técnica de separación entre el flujo base y el caudal superficial (Figura 16).

Caudal (l/s)

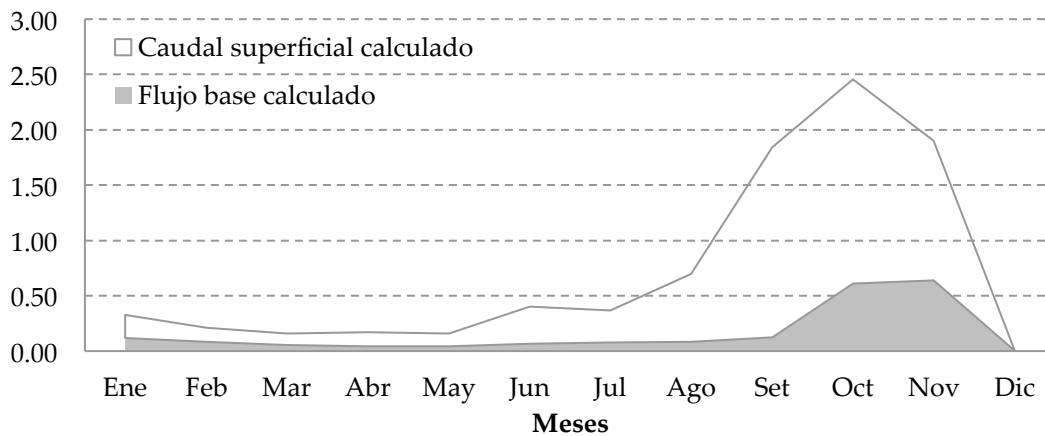


FIGURA 16. Flujo base del Río Potrero, período 1973-2004.

En función del índice de flujo base, se pudo clasificar el caudal que transita por el punto de aforo ubicado en la toma del AyA como de régimen discreto, pues un valor de 0.17 indica un aporte de agua subterránea muy pequeño en el tiempo. Este índice resultó de dividir el caudal de máxima sequía 0.10 l/s (marzo) y el caudal promedio del río 0.56 l/s [3].

Otra importante característica de estos ríos es que sus lechos están secos incluso durante la estación lluviosa. La tabla de agua está muy profunda y esto hace que se desconecten desde los lechos impidiendo así que la descarga del río se presente en esta región.

La inclusión de estas corrientes en el modelo fue útil porque ellas proveen puntos de control en el modelo, dado que si la descarga ocurre a través de ellas, esto implicaría una sobreestimación de las cargas hidráulicas en esa área.

Se espera que la descarga de un río decrezca durante la temporada seca con la caída del nivel freático y las fluctuaciones estacionales dependerán del régimen de precipitación del respectivo año. La descarga total del Río Caimital alcanzó sus niveles máximos en la estación lluviosa con un caudal de 106.039 m³/d (Septiembre); en tanto que el Río Potrero presentó un caudal más reducido para esa misma época alcanzando sólo 126.490 m³/d (Octubre).

Fronteras hidráulicas

Las fronteras que limitan el acuífero se presentan en la figura 17. Una de ellas son las condiciones ficticias tomadas al noreste y suroeste del sistema acuífero, es decir al inicio y final de éste, entre las inmediaciones de los cerros, la Cruz y Grande y cerros Colegallal y Divisadero.

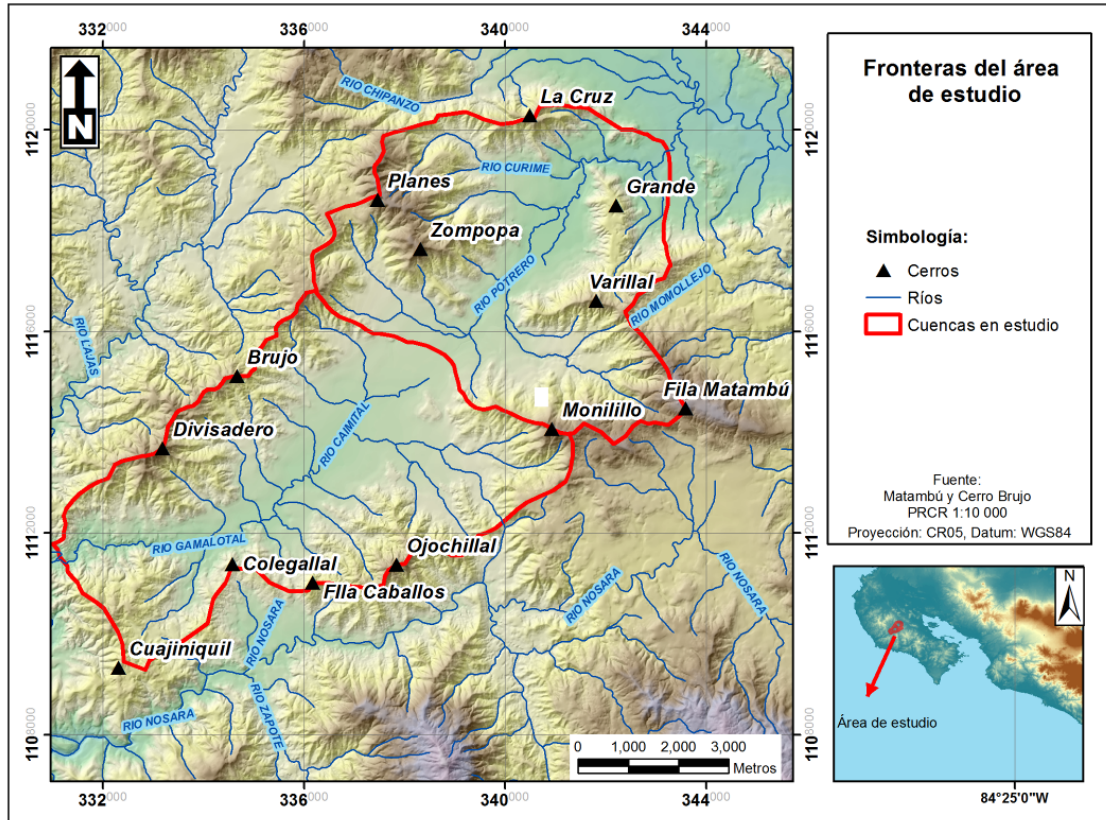


Figura 17. Fronteras del acuífero

Se tiene una frontera física en las formaciones rocosas de los cerros Brujo y Zompopa al oeste del acuífero y los Cerros Varillal, Molinillo y la Fila Caballos al este. Esta unidad flanquea al acuífero en ambas márgenes, y al hallarse constituido por rocas ígneas altamente meteorizadas, con cierto grado de fracturamiento y además, de algunas rocas sedimentarias, se puede inferir que toda esta unidad se comporta como una fuente de aguas subterráneas que aportan sus flujos a la unidad aluvional y coluvial del acuífero.

Otras condiciones de frontera se hallan ubicadas al interior del área de estudio y la constituyen las corrientes superficiales de los ríos, las cuales se comportan como sumideros de agua subterránea durante el periodo lluvioso, dadas las condiciones de efluencia del acuífero.

V. CONCLUSIONES

En la zona de estudio, el uso de suelo que prevalece es bosque, el cual se ubica en las zonas más altas y en unidades geológicas de bajo potencial acuífero. Así mismo, éste uso de suelo se ubica en las áreas definidas como de alta recarga, las cuales aportan al recarga al acuífero mediante flujo subsuperficial. Seguido a éste uso, se encuentran los pastos y los cultivos, los cuales se ubican en las zonas de coluvios y sobre el aluvión, coincidentes con las áreas más bajas.

Según el análisis de suelos y pruebas de infiltración realizados en 20 sitios, fue posible definir 9 zonas de recarga, siendo la zona con mayor velocidad de infiltración la correspondiente a bosques, con un valor de 3.278,89 mm/d. En segundo lugar se hallan los cultivos, con un valor de infiltración de 763,74 mm/d. Mientras que la zona de pastos presenta una máxima velocidad media de 285,98 mm/d.

Los ríos presentes en el área de estudio están expuestos a la contaminación, no solo por las actividades relacionadas a la agricultura, sino también debido a las fuentes de origen humano y animal, haciéndolos vulnerables para el consumo humano. Sin embargo el Río Potrero es utilizado por el AyA para el abastecimiento público de Nicoya, el cual es tratado en la planta potabilizadora previo a su distribución.

El sistema acuífero Potrero-Caimital es un acuífero libre, y está constituido principalmente por depósitos coluvio aluviales cubiertos por arcillas y suelos, los cuales podrían, en algunos sectores, formar condiciones de confinamiento cuando el nivel freático se halla por encima de esta capa, o libre cuando éste se halla por debajo de la misma.

El acuífero presenta una variación de los niveles entre el periodo seco y lluvioso, con recuperación y conservación de su nivel estático, al completar el ciclo en mayo, mes donde inicia la recarga, mostrando con ello que no existe sobre-explotación del sistema. Del análisis realizado permite inferir que el tiempo de tránsito del agua superficial hacia el acuífero y viceversa se da en aproximadamente un mes.

Las fluctuaciones estacionales en la superficie freática han sido monitoreadas por un periodo de 9 años, desde 2005 a 2013 para 13 pozos y del 2011-2013 para 24 pozos. Estos monitoreos indican que el nivel del agua subterránea está entre 0,40 y 29,22m bajo el nivel de la superficie.

El sistema acuífero tiene un área de aproximadamente 73km² el valle y el acuífero coluvio aluvial es de forma elongada, con un ancho promedio de 1,5 km y una longitud aproximada de 12 Km. El área del sistema acuífero podría variar dependiendo de las fluctuaciones del nivel del agua subterránea, siendo de aproximadamente 34Km². El espesor del acuífero se incrementa desde zonas de baja elevación hasta las faldas de las formaciones ígneas del Complejo de Nicoya, el espesor promedio del mismo es de 20-30m.

De acuerdo al balance hídrico de aguas subterráneas, se obtuvo una recarga potencial de 49.225.376,36 m³/año. Es decir, aproximadamente 1.560,93 l/s, de los cuales en función del área 726,06 l/s corresponden a recarga directa sobre el sistema acuífero, y 834,87 l/s corresponden a recarga lateral, proveniente de la precipitación que infiltra en las montañas.

La zona de estudio posee valores de transmisividad (T) de 37 a 2824 m²/d. Se definió un rango de valores de conductividad hidráulica (K), entre los 2 y 175 m/d. La conductividad hidráulica se incrementó en dirección a los coluvios. Esta tendencia es explicada por el hecho de que los materiales más gruesos tienden a acumularse cerca de las montañas, mientras que los materiales más finos son transportados más lejos.

VI. REFERENCIAS

1. Asociación para el desarrollo sostenible del área de conservación Tempisque, Plan de Manejo del Río Potrero, Nicoya 2004, 165 págs.
2. Alvarado, G.E; Denyer, P., En: Implications for the Caribbean Region of the high-Mg volcanic rocks in the Costa Rican ophiolite complexes: The case of the Tortugal, komatiitic-like. -Zbl. Geol. Palaont. Teil I. En: Fuentes, P., 2006: Caracterización hidrogeológica y análisis de la vulnerabilidad del acuífero de la cuenca del Río Potrero en Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. (Tesis maestría).
3. Boni, C., Mastrorilla, L. y Petilla, M, Scomposizione della portata dei corsi d'acqua dell'Appennino Marchigiano con il metodo delle portate mensili caratteristiche. Geologia Applicada e Idrogeologia, Italia 1993, Vol.28, 1993.

4. Custodio, E. y Llamas, M., Hidrogeología Subterránea, ed. Omega S.A. Barcelona, España, 1983, 1155 págs.
5. Denyer, P., Los complejos oceánicos de Costa Rica: con énfasis en las penínsulas de Nicoya y Santa Elena Tesis de doctorado en geología, Universidad de Costa Rica: Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2010.
6. Fuentes, P., Caracterización hidrogeológica y análisis de la vulnerabilidad del acuífero de la cuenca del Río Potrero en Nicoya, Guanacaste, Costa Rica, Tesis de maestría en hidrogeología, Universidad de Costa Rica: Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2006.
7. Linkimer, L., & Aguilar, T., 2000: Estratigrafía sedimentaria- En: Fuentes, P., Caracterización hidrogeológica y análisis de la vulnerabilidad del acuífero de la cuenca del Río Potrero en Nicoya, Guanacaste, Costa Rica, Tesis de maestría en hidrogeología, Universidad de Costa Rica: Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2006.
8. Losilla, M.; Agudelo, C., Rendimiento seguro y susceptibilidad a la contaminación del acuífero coluvio aluvial de las cuencas altas de los Ríos Potrero y Caimital, Nicoya, Guanacaste, CR. 2003, 117 págs.
9. Mora, D., Aspectos hidrogeológicos de la Península de Nicoya, Tesis de maestría en Geología, Universidad de Costa Rica: Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 1978.
10. Programa Estado de la Nación, Decimotercero Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Programa Estado de la Nación San José, 2007.
11. Schosinsky, G., Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.- Rev. Geol. Amér. Central. 2006, 34-35: 13-30.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a Clara Agudelo Arango y Carlos Romero Fernández, por el apoyo en la ejecución del presente estudio, por la mediación en el suministro de información y en la coordinación de las pruebas de campo realizadas en representación de la Dirección de Gestión e Investigación de Aguas Subterráneas del SENARA. Al personal técnico del SENARA que apoyó la obtención de información de campo, a Rodolfo Arguedas León y a David Chacon Robles.

A Edwin Rafael, por su colaboración, constante apoyo y motivación.

A Jorge Suarez por la intervención en la digitalización de los mapas.