

Caracterización hidrogeológica de la microcuenca del río Colón, departamento de La Libertad

Hydrogeological characterization of the Colón river micro-basin, department of La Libertad

Adiel E. Molina^{1,2*} y Dagoberto Arévalo^{1,2}

¹Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San Salvador, El Salvador

²Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador

*Autor para contacto: md07002@ues.edu.sv

(Recibido: 16/09/2023; aceptado: 24/11/2023)

ABSTRACT: A characterization of the water resources of the Colón river microbasin, located northwest of the city of San Salvador, was performed to determine the main hydrochemical characteristics of the water sources, the relationship between surface and groundwater was investigated, the water balance of the microbasin was calculated, and a conceptual hydrogeological model of the water system was made. The hydrochemical data indicate that surface and groundwater are mainly calcium bicarbonate or magnesium bicarbonate and calcium or magnesium sulfate or chloride. From the water balance it's estimated that the potential recharge to the aquifer system is approximately 24.23 million m³/year. The conceptual hydrogeological model of the microbasin shows that the aquifers are mainly made up of rocks and deposits of volcanic origin. Two aquifers were identified, a shallow one, captured by dug wells, and a deeper one, captured by drilled wells.

Keywords: Colón river; hydrogeology; hydrochemistry; lithology; water balance; potential recharge; hydrogeological conceptual model.

RESUMEN: Se realizó una caracterización de los recursos hídricos de la microcuenca del río Colón, ubicada al Noroeste de la ciudad de San Salvador, mediante la cual se determinaron las características hidroquímicas principales de las fuentes de agua, se indagó sobre la relación entre las aguas superficiales y subterráneas, se realizó un cálculo del balance hídrico de la microcuenca y se elaboró un modelo hidrogeológico conceptual del sistema hídrico. Los datos hidroquímicos indican que las aguas superficiales y subterráneas son principalmente bicarbonatadas cálcicas o magnésicas y sulfatadas o cloruradas cálcicas o magnésicas. Del balance hídrico se estima que la recarga potencial al sistema acuífero es de aproximadamente 24,23 millones de m³/año. El modelo hidrogeológico conceptual de la microcuenca muestra que los acuíferos están constituidos principalmente por rocas y depósitos de origen volcánico. Se identificaron dos acuíferos, uno superficial, captado por pozos excavados y otro más profundo, captado por pozos perforados.

Palabras clave: río Colón; hidrogeología; hidroquímica; litología; balance hídrico; recarga potencial; modelo hidrogeológico conceptual.



Introducción

El Salvador es uno de los países más pequeños del continente americano (21 040,79 km²) y al mismo tiempo, uno de los más densamente poblados (273 hab/km²) (DIGESTYC, 2008). La existencia de estos extremos, sumado a otras problemáticas socio-históricas, han provocado que exista una enorme presión en el uso de los recursos naturales en general y del recurso hídrico en particular.

La microcuenca del río Colón, se extiende por un área de 67,55 km², con elevaciones que van desde los 1878 m.s.n.m. en su parte más alta, parte del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS), hasta los 450 m.s.n.m. en su parte más baja, en el Distrito de Riego de Zapotitán (DRZ), parte del valle homónimo. Geográficamente comprende los municipios de Santa Tecla, Colón, San Juan Opico y Ciudad Arce, pertenecientes al departamento de La Libertad. En los últimos 20 años esta región del país ha experimentado notables cambios en cuanto a demografía y urbanización, concentrando a la fecha una gran actividad comercial, agropecuaria, industrial y residencial (Fig. 1).

El río Colón y sus tributarios, que se extienden en una red dendrítica, cuyo canal principal tiene aproximadamente 28 km de longitud, constituyen el recurso superficial más importante dentro de la microcuenca homónima; mientras que, a nivel subterráneo, los acuíferos que subyacen a esta microcuenca forman parte del sistema acuífero de la subcuenca del río Sucio. Las investigaciones previamente realizadas, así como los resultados de numerosas perforaciones de pozos, indican que estos acuíferos poseen muy buenos rendimientos, especialmente en las cotas topográficas más bajas de esta microcuenca; razón por la cual, en algunos estudios técnicos, se ha propuesto que estos acuíferos pueden servir a futuro como una fuente de suministro de agua potable para el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) (ANDA, 2023).

Metodología

Análisis de información climatológica

Las características climáticas de la microcuenca del río Colón se obtuvieron a partir de la revisión de las series históricas de Precipitación y Evapotranspiración Potencial (ETP) de El Salvador, según la información contenida en el balance hídrico Integrado y Dinámico (BHID) (MARN, 2006). La distribución espacial de la precipitación se analizó mediante el Método de Thiessen Mejorado o Modificado; mientras que, para el caso de la ETP, el análisis de la distribución espacial dentro de la misma únicamente se realizó mediante el método de Thiessen. Para ambos casos, este análisis se realizó a través de las herramientas de interpolación contenidas en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Análisis de información geológica e hidrogeológica

Los datos geológicos e hidrogeológicos utilizados para la investigación en cuestión se obtuvieron principalmente de ANDA-COSUDE (2008), Baxter, (1984), Guevara Retana (2011), Ferrés (2014), Lexa et al. (2019), Martínez (2018) y Weber et al. (1978), junto con diversos reportes de perforaciones de pozos, construidos y/o supervisados por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) en los últimos 30 años y archivados en sus bases de datos históricos (ANDA, s.f.). Esta información se contrastó con las observaciones hechas in-situ durante las actividades de campo (pruebas de permeabilidad e inventario y muestreo hidroquímico en fuentes de agua).

La información geológica base fue traducida a columnas y perfiles litológicos. Estos perfiles permitieron apreciar mejor la secuencia litológica y estratigráfica que subyace a la microcuenca del río Colón. Al mismo tiempo, a partir de la información hidrogeológica base se obtuvieron algunas características de las formaciones acuíferas (espesores, piezometría, líneas de flujo, parámetros hidráulicos, entre otros). Estos dos grupos de información sirvieron como insumo para la generación del modelo conceptual del sistema acuífero bajo el área de interés.

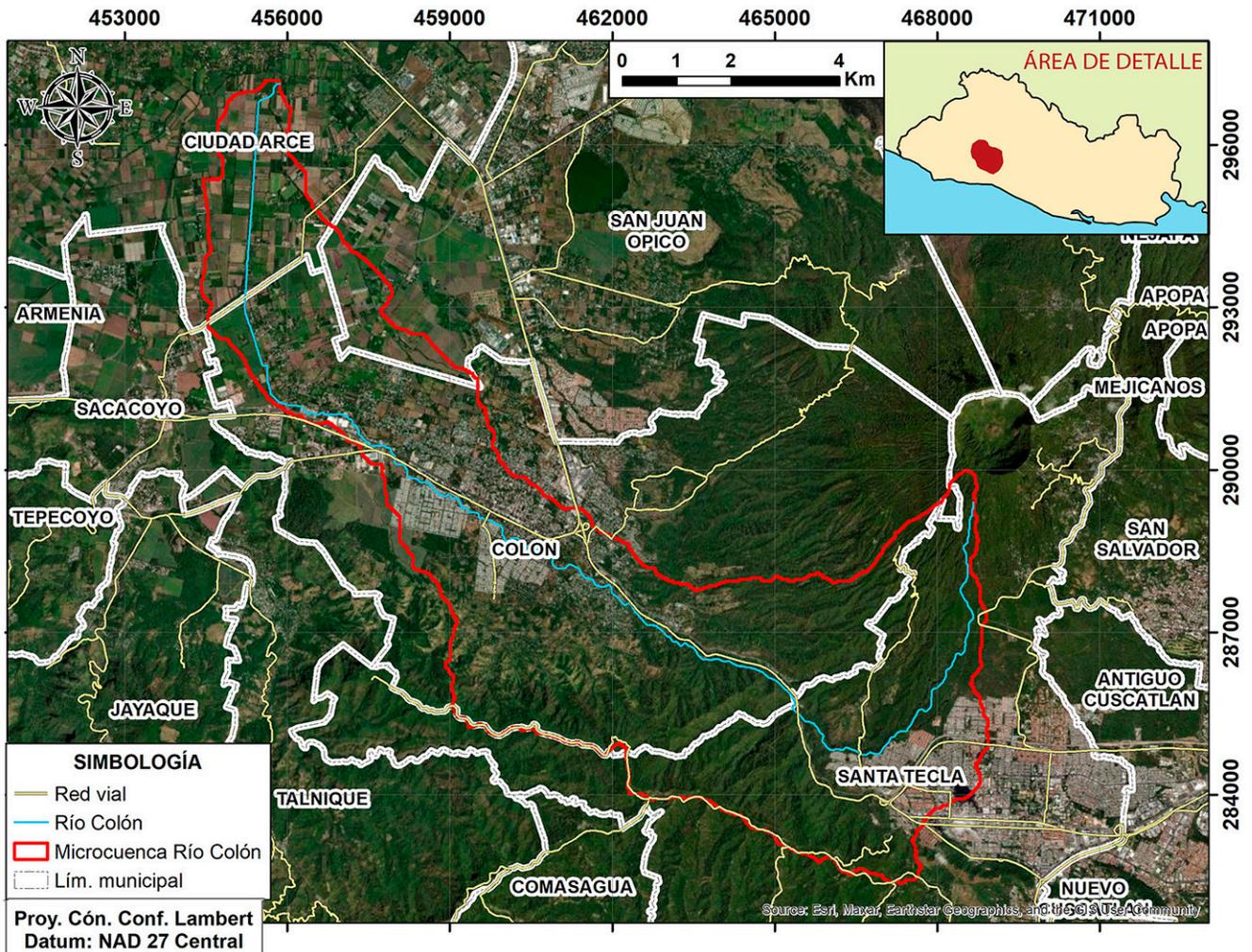


Fig. 1: Ubicación del área de investigación (modificado de OpenStreetMap).

Inventario de fuentes de agua

A partir de la información bibliográfica, mencionada en la sección anterior y de los recorridos de campo, se hizo una identificación preliminar de las fuentes de agua ubicadas dentro y en las inmediaciones, fuera de la microcuenca del río Colón; estas últimas se consideraron dentro del análisis para mejorar el diseño final de las zonas límite (fronteras) del modelo conceptual del sistema acuífero. Las fuentes de agua identificadas para este inventario se pueden agrupar de la siguiente manera: 91 pozos perforados, 54 pozos excavados (artesanales), 1 manantial y el cauce principal del río Colón.

Muestreo de parámetros fisicoquímicos en fuentes de agua

Se realizó un muestreo fisicoquímico en fuentes de agua, seleccionadas aleatoriamente, representativas de los diferentes sectores de la microcuenca del río Colón (cuenca alta, media y baja), para poder clasificar las aguas superficiales y subterráneas dentro de la misma. Se tomaron 16 muestras de agua cruda en total, colectadas en dos campañas, en época seca

(abril/2021) y lluviosa (octubre/2021), en 8 sitios (6 muestras en pozos perforados profundos y 2 muestras en el cauce del río Colón) (Cuadro 1). En cada sitio se realizaron mediciones *in-situ* (pH, sólidos totales disueltos (TDS), salinidad, conductividad eléctrica (CE)), utilizando un medidor KKKMOON EZ-9909 y se colectaron muestras para análisis de iones mayoritarios en laboratorio (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-).

Estimación de la recarga potencial al acuífero

Para la estimación de la recarga potencial (RP) dentro de la microcuenca del río Colón se aplicó el método del balance hídrico de Schosinsky (Schosinsky, 2006), el cual requiere de la estimación y/o cálculo de diversos parámetros climáticos y de algunas condiciones del terreno dentro de la microcuenca del río Colón, tales como:

a) Parámetros climáticos: Resultados del cálculo de precipitación media y ETP mensual dentro de la microcuenca (Cuadro 2).

b) Infiltración básica del suelo (fc): Valor de permeabilidad del suelo saturado en sus primeros 30 cm de profundidad. Obtenida en campo mediante pruebas de permeabilidad en sitios representativos de las condiciones generales de suelo y geología de la microcuenca.

c) Factor de pendiente (Kp): Del mapa de pendientes generado para la microcuenca.

d) Factor de vegetación (Kv) y profundidad de raíces (PR): El factor Kv, se evaluó a partir del mapa de uso de suelo de El Salvador Corine Land Cover 2010 (MAG-UES, 2010), asignando a cada categoría un valor Kv según lo establecido por Gil (2007), Junker (2006) y Schosinsky (2006). Los valores de PR se tomaron de Schosinsky (2006) y USDA-NRCS (2016).

e) Factor de Textura de suelo (Kfc), Densidad de suelo (DS), Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM): El factor Kfc, se evaluó a partir de los resultados de las pruebas de permeabilidad realizadas, calculándose un factor por cada prueba realizada, según lo establecido por Schosinsky (2006). Los valores DS, CC y PM se tomaron de Schosinsky (2006).

f) Coeficiente de infiltración (Ci): Suma de los factores Kp, Kv y Kfc, es el factor por el cual hay que multiplicar la precipitación mensual para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo.

Con todos estos parámetros se calcularon 18 balances hídricos, establecidos en función de 18 polígonos de “uso de suelo-geología”, previamente identificados como representativos de las condiciones existentes en esta microcuenca. Las unidades de uso de suelo-geología se definieron a partir de las descripciones del Mapa de uso de suelo de El Salvador Corine Land Cover 2010 (MAG-UES, 2010) y el Mapa Geológico de El Salvador (Weber et al., 1978).

Para las pruebas de permeabilidad realizadas como insumo para el desarrollo del balance hídrico, se utilizó el método del Permeámetro de Guelph, con un equipo de marca SOILMOISTURE®. Los sitios donde se realizaron las 18 pruebas se muestran en la figura 2.

Cuadro 1

Detalle de los sitios de muestreo FQ, microcuenca del río Colón.

ID	Coordenadas Lambert		Elevación (msnm)	Tipo fuente	Prof. (m)	NE (m)
	Norte (m)	Oeste (m)				
R CPP-01	294 081	455 536	458	Pozo perforado	80,0	0,0
R CPP-02	289 279	461 245	573	Pozo perforado	156,0	71,36
R CPP-03	285 059	466 565	849	Pozo perforado	300,0	163,43
R CPP-04	290 003	458 600	522	Pozo perforado	68,58	25,91
R CPP-05	287 427	463 212	673	Pozo perforado	210,98	153,09
R CPP-06	287 619	459 346	577	Pozo perforado	182,88	78,64
R CR-01	295 126	455 363	453	Río	-	-
R CR-02	284 757	466 705	856	Río	-	-

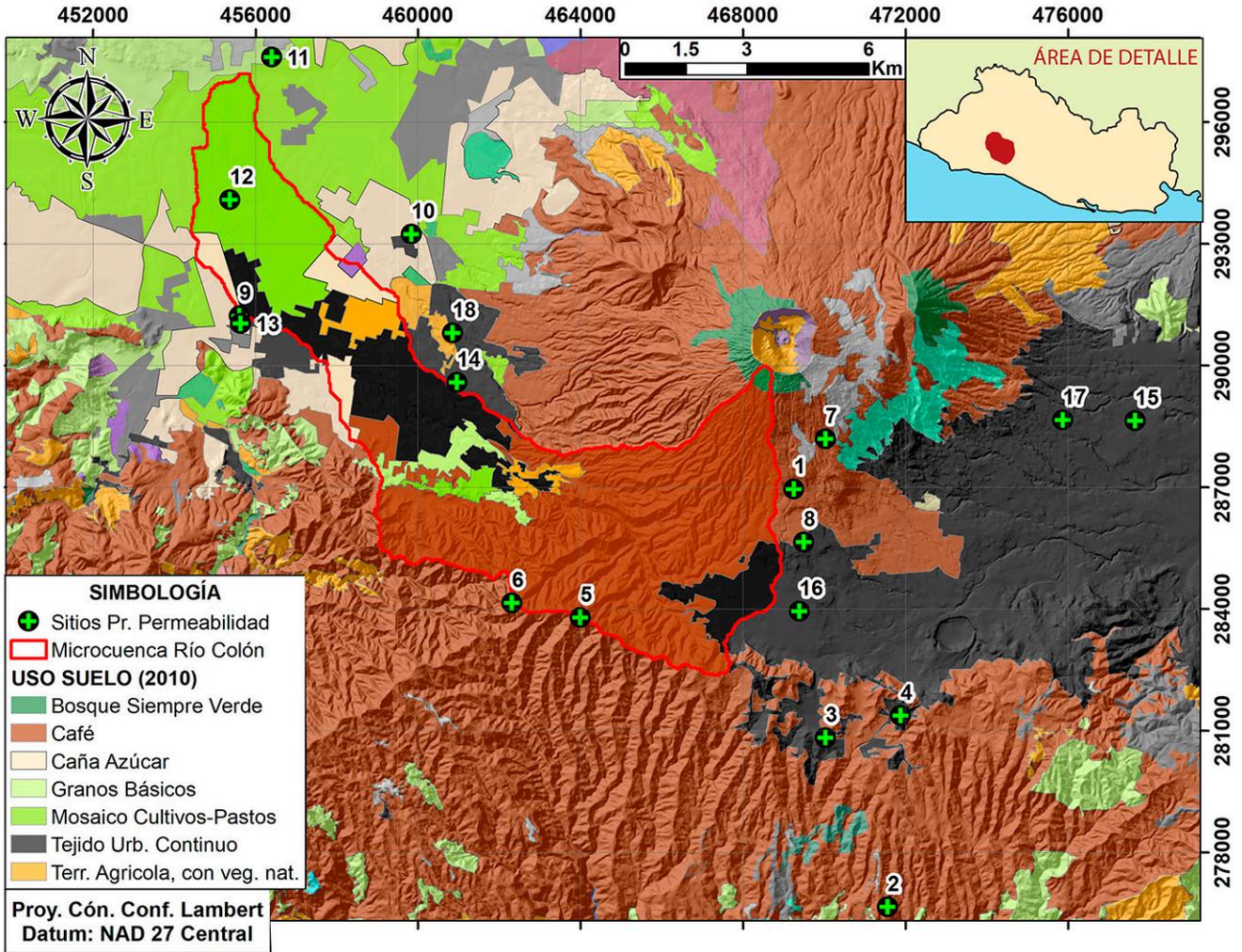


Fig. 2: Ubicación de pruebas de permeabilidad en la microcuenca del río Colón (cobertura de uso de suelo modificado de MAG-UES, 2010).

Cuadro 2

Precipitación y ETP media mensual, microcuenca río Colón.

Río Colón	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Precipitación (mm)	6	2	15	55	175	310	312	341	325	179	35	10	1762
ETP (mm)	125	129	157	160	153	142	154	150	132	131	121	119	1673

Resultados

Características climáticas del área de estudio

A partir de los registros del BHID (MARN, 2006) y aplicando los Métodos de Thiessen y de Thiessen Mejorado, se obtuvieron las series de Precipitación media y Evapotranspiración Potencial media (ETP), dentro de la microcuenca del río Colón (Cuadro 2).

Características geológicas

La geología de El Salvador es relativamente reciente, una cuarta parte del territorio nacional data del Pleistoceno y tres cuartas partes están cubiertas por rocas del Terciario, predominando las de época pliocénica; existen terrenos más antiguos de edad cretácica y origen sedimentario marino, pero solamente cubren un 5 % del territorio nacional (Torrecilla y Ramírez, s.f.). El mapa geológico de El Salvador (Weber et al., 1978), agrupa estas unidades de acuerdo a Formaciones y Miembros, de las cuales, dentro de la microcuenca del río Colón, se identifican las siguientes, ordenadas de menor a mayor antigüedad (Fig. 3):

a) Formación San Salvador

Miembro s2: Rocas volcánicas de edad Pleistoceno, en forma de Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas. Cubre el 11 % de la microcuenca, concentrado en pequeños sectores al NE.

Miembro s3'a: Depósitos volcánicos de edad Holoceno, en forma de Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas (“tobas color café”). Cubre el 9 % de la microcuenca, distribuido en pequeños sectores dispersos.

Miembro s4: Depósitos volcánicos de edad Holoceno, en forma de Tierra blanca: piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas (s3'b). Cubre el 3 % de la microcuenca, concentrado al SE.

Miembro s5'c: Depósitos volcánicos de edad Holoceno, en forma de Cenizas volcánicas y tobas de lapilli, en algunos casos sobre los miembros s3'a y s4. Cubre el 34 % de la microcuenca, concentrado en toda la parte central.

Miembro Q'f: Depósitos sedimentarios de edad Holoceno (Cuaternario) de tipo acuáticos con intercalaciones de piroclastitas. Cubre el 19 % de la microcuenca, concentrado al NW.

b) Formación Cuscatlán

Miembro c1: Depósitos volcánicos de edad Plio-cuaternario, en forma de Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, en algunos casos de tipo Ignimbritas. Cubre el 3 % de la microcuenca, concentrado al S.

Miembro c3: Rocas volcánicas de edad Pleistoceno, en forma de Efusivas básicas-intermedias. cubre el 2 % de la microcuenca, concentrado al S.

c) Formación Bálsamo

Miembro b1: Depósitos volcánicos de edad Mioceno, en forma de Epiclastitas volcánicas y piroclastitas; localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas. Cubre el 2 % de la microcuenca, concentrado en el sector SE.

Miembro b3: Rocas volcánicas de edad Plioceno, en forma de Efusivas básicas-intermedias. Cubre el 15 % de la microcuenca, concentrado desde el S hacia el SE.

En la figura 3, se observan al menos tres sistemas de fallas, entre visibles y supuestas, que atraviesan la parte media-alta de la microcuenca del río Colón, las cuales muy probablemente influyen en el comportamiento hidráulico del acuífero en dichos sectores.

Características hidrogeológicas

De acuerdo con el Mapa Hidrogeológico de El Salvador (ANSA-COSUDE, 2008), en la microcuenca del río Colón se identifican las siguientes unidades hidrogeológicas (Fig. 4):

a) **Acuífero volcánico fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción:** Constituida por rocas volcánicas de carácter andesítico-basáltico, con intercalaciones de materiales piroclásticos, que incluyen flujos y coladas de lavas provenientes de centros eruptivos locales (CVSS); pueden presentar conductividades hidráulicas medianas-altas, en función

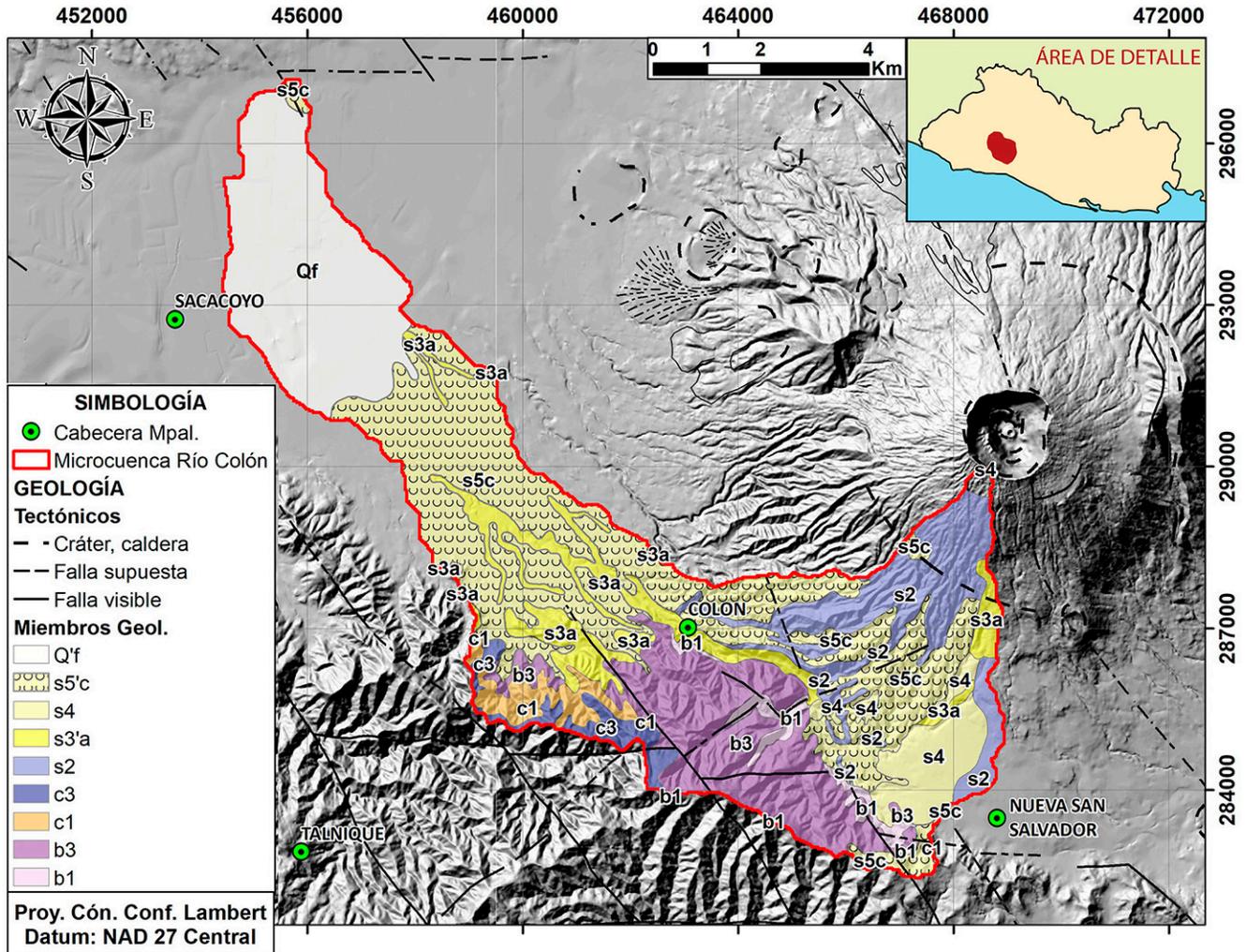


Fig. 3: Geología de la microcuenca del río Colón (modificado de Weber et al., 1978).

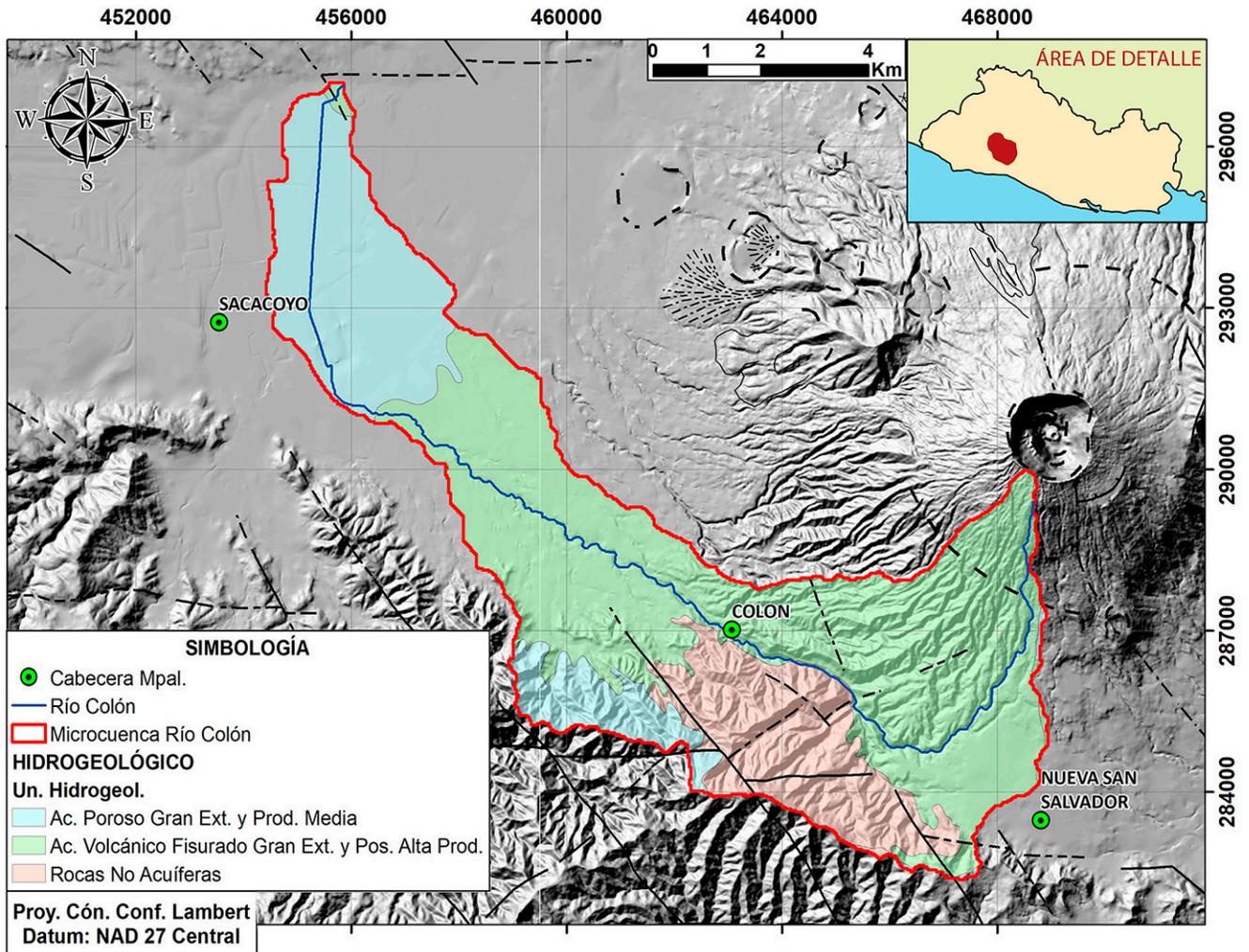


Fig. 4: Hidrogeología de la microcuenca del río Colón (modificado de ANDA-COSUDE, 2008).

de su porosidad secundaria (fracturamiento). Litológicamente, se trata de depósitos y rocas volcánicas de la Formación San Salvador, que datan del Pleistoceno-Holoceno. Comprende el 59 % del área de la microcuenca y dentro de ella, los pozos perforados pueden alcanzar profundidades de hasta 230 m, con producciones que varían entre los 30 - 80 L/s (ANDA, s.f.); en esta misma unidad se ha identificado la ocurrencia de un manantial que aflora entre bloques de rocas fracturadas, dentro del centro recreativo “Los Chorros”, del cual se han registrado caudales históricos de aproximadamente 30 L/s (ANDA, s.f.).

b) Acuífero poroso de gran extensión y productividad media: Constituida por materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapilli, tobas), con granulometrías que van de finas a gruesas, acumulados en valles al pie de las cimas de la microcuenca (Valles de San Andrés y Zapotitán); sus conductividades hidráulicas varían de medianas a bajas, en función de su grado de cementación o compactación. Litológicamente, se trata de depósitos volcánicos de las Formaciones Cuscatlán y San Salvador, que datan del Plioceno y del Holoceno, respectivamente. Comprende el 25 % del área de la microcuenca y dentro de ella, aunque los pozos perforados no superan los 100 m de profundidad, suelen presentar una producción similar a la de la unidad anterior (20 - 80 L/s) (ANDA, s.f.).

c) Rocas no acuíferas: Compuesta por flujos de lavas, intercalados con tobas aglomeradas, brechosas y lahares cementados; con conductividades hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad. Afloran en algunos sectores

montañosos de la microcuenca (Cordillera del Bálsamo) y se considera que conforman el basamento de los acuíferos en la zona de estudio. Litológicamente, se trata de depósitos y rocas volcánicas de la Formación Bálsamo, que datan del Plioceno. Comprende el 16 % del área de la microcuenca y por las características de ocurrencia de esta unidad, dentro de ella sólo se identificó un pozo perforado, que resulta ser el de mayor profundidad total dentro del área de estudio (330 m), con una producción de aproximadamente 20 L/s (ANDA, s.f.).

En cuanto a los parámetros hidráulicos del sistema acuífero, el análisis de los informes finales de perforación de algunos pozos ubicados dentro de la microcuenca del río Colón (ANDA, s.f. y Guevara Retana, 2011), muestra lo siguiente:

Transmisividad (T): varía en órdenes de magnitud, entre 1×10^2 - 1×10^4 m²/d. Los mayores valores de T se han encontrado en pozos ubicados en el sector de Lourdes, Colón, en la parte media de la microcuenca (Fig. 5). Los perfiles litológicos de estos pozos, que suelen tener profundidades totales >170 m, muestran que las formaciones acuíferas interceptadas se componen de secuencias de rocas volcánicas, con indicios de fracturamiento y depósitos de materiales piroclásticos, en algunos casos con indicios de meteorización (sedimentos aluviales). Por otra parte, algunos de los pozos ubicados en el sector del DRZ, en la parte baja de la microcuenca, que suelen tener profundidades totales <100 m, presentan los menores valores de T. En este caso, los perfiles litológicos de los mismos, muestran que las formaciones acuíferas interceptadas se componen de materiales piroclásticos, en algunos casos con indicios de meteorización (sedimentos aluviales y arcillas). La presencia de estas series de materiales arcillosos, podría ser uno de los factores que condiciona los valores de conductividad hidráulica y T del sistema acuífero en la parte baja de esta microcuenca, con respecto a la parte media de la misma.

Piezometría y dirección de flujo: El análisis de los niveles freáticos en los pozos perforados profundos (>100 m de profundidad total) muestra una gran variación en toda la extensión de la microcuenca del río Colón (Fig. 5). En la parte baja de la microcuenca, correspondiente al sector del DRZ y el límite occidental del casco urbano de Lourdes, Colón, el nivel freático se encuentra a <10 m de profundidad desde el nivel del terreno, llegando a observarse condiciones de surgencia (“pozos artesianos”) en varios de estos pozos. Este fenómeno, que también fue reportado por Guevara Retana (2011) en ciertos sectores de la subcuenca del río Sucio, puede deberse a la presencia de estratos arcillosos intercalados con sedimentos aluviales, que sirven como capas confinantes de un acuífero profundo. En la parte media de la microcuenca, principalmente en los sectores de los cascos urbanos de Lourdes y de la ciudad de Colón, los niveles del sistema acuífero se profundizan, encontrándose entre los 14 - 90 m, variación que mantiene una correlación directa con la topografía de la microcuenca. La parte media-alta de la microcuenca, es la que cuenta con menor cantidad y mayor dispersión espacial de pozos perforados, así como ocurrencia de manantiales; en este sector, que coincide con las áreas montañosas del CVSS y de la Cordillera del Bálsamo, se tiene registro de niveles freáticos que oscilan entre los 100 - 163 m de profundidad. Para este acuífero, captado por los pozos perforados profundos, se observa una tendencia de flujo radial desde los sectores del CVSS y la Cordillera del Bálsamo, en la parte alta de la microcuenca, hasta alcanzar los sectores menos escarpados de la misma. En la parte media de la microcuenca, el flujo, se distribuye en tres direcciones principales, SE-NO (desde el CVSS hacia el sector de Colón), N-S (desde el CVSS hacia el sector de Santa Tecla) y SO-NE (desde la Cordillera del Bálsamo hacia el sector de Santa Tecla). En la parte media de la microcuenca se identifica una componente de flujo radial que se superpone al flujo proveniente de la parte alta de la microcuenca, antes descrito. Finalmente, desde la parte media hacia la parte baja de la microcuenca el patrón predominante de flujo es SE-NO (Fig. 5).

En el caso de los pozos excavados (hechos “a mano”), como se observa en la figura 6, estos se ubican solamente en la parte media y baja de la microcuenca del río Colón. Se trata de pozos, cuyas profundidades totales <50 m, medidos desde el nivel del terreno y cuyos niveles freáticos varían entre 0,36 - 36,22 m; de lo cual se deduce que no logran captar el acuífero más profundo, captado por los pozos perforados de mayor profundidad. En este acuífero más superficial, al igual que en el caso del acuífero profundo, se observa una correlación directa entre la profundidad del nivel freático con el incremento en la cota topográfica dentro de la microcuenca; esto también se evidencia en el hecho de que los pozos ubicados en la parte media de la microcuenca han tenido que ser excavados hasta alcanzar una mayor profundidad total (>36 m). En este acuífero superficial, se observa una tendencia de flujo radial desde la parte media de la microcuenca hasta la parte baja; dentro de ese patrón destaca un rumbo de flujo predominante en dirección SE-NO-NE (Fig. 6), que coincide parcialmente con lo reportado por Martínez Estrada (2018).

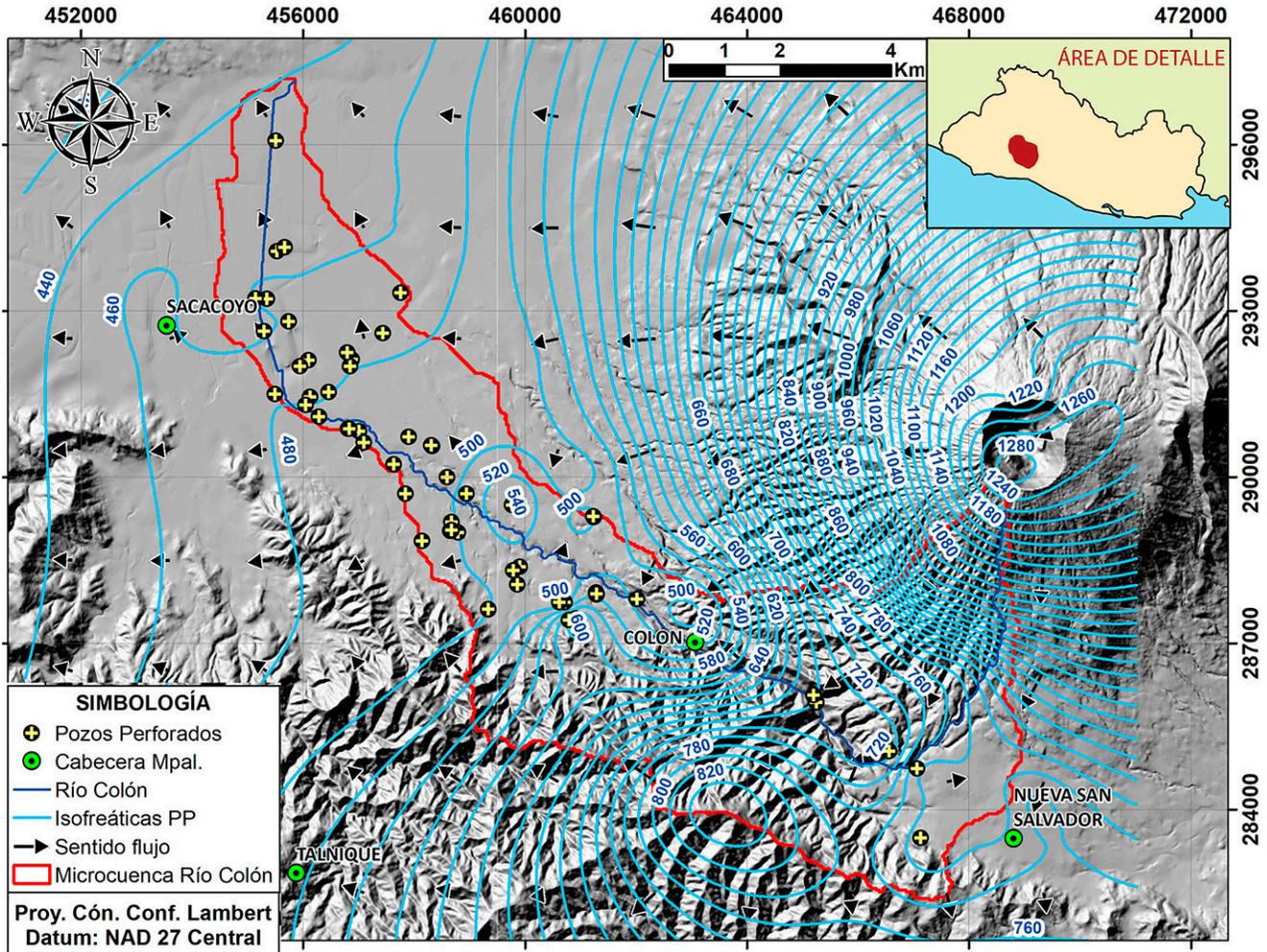


Fig. 5: Isofreáticas y líneas de flujo (pozos perforados), microcuenca río Colón.

Modelo conceptual del sistema acuífero

Los resultados de la caracterización geológica e hidrogeológica de la microcuenca del río Colón permiten inferir que el sistema acuífero bajo esta microcuenca está compuesto por dos formaciones acuíferas, las cuales pueden describirse de la siguiente manera:

Acuífero superficial, captado por los pozos excavados identificados dentro de la microcuenca. Albergado en materiales granulares poco consolidados (depósitos sedimentarios y piroclastos), formados por la meteorización de materiales volcánicos preexistentes. Al estar siendo explotado principalmente para usos domésticos y agrícolas, en pocos casos para usos industriales, se tiene muy poca información técnica sobre las características del mismo, siendo el trabajo de Martínez (2018) el que más recientemente ha tratado de caracterizar esta formación. Parece tratarse de un acuífero de mediana-baja producción (generalmente <5 L/s), con valores $T < 1 \times 10^2$ m²/d, de al menos 36 m de espesor y que se extiende principalmente en la parte media y baja de la microcuenca. Al estar directamente bajo la superficie topográfica y no tener indicios sobre la existencia de una capa confinante, se considera que es de tipo libre. En Martínez (2018), parece haberse identificado parte de esta formación, para la cual se proponen espesores >40 m, fuera del área de la microcuenca del río Colón.

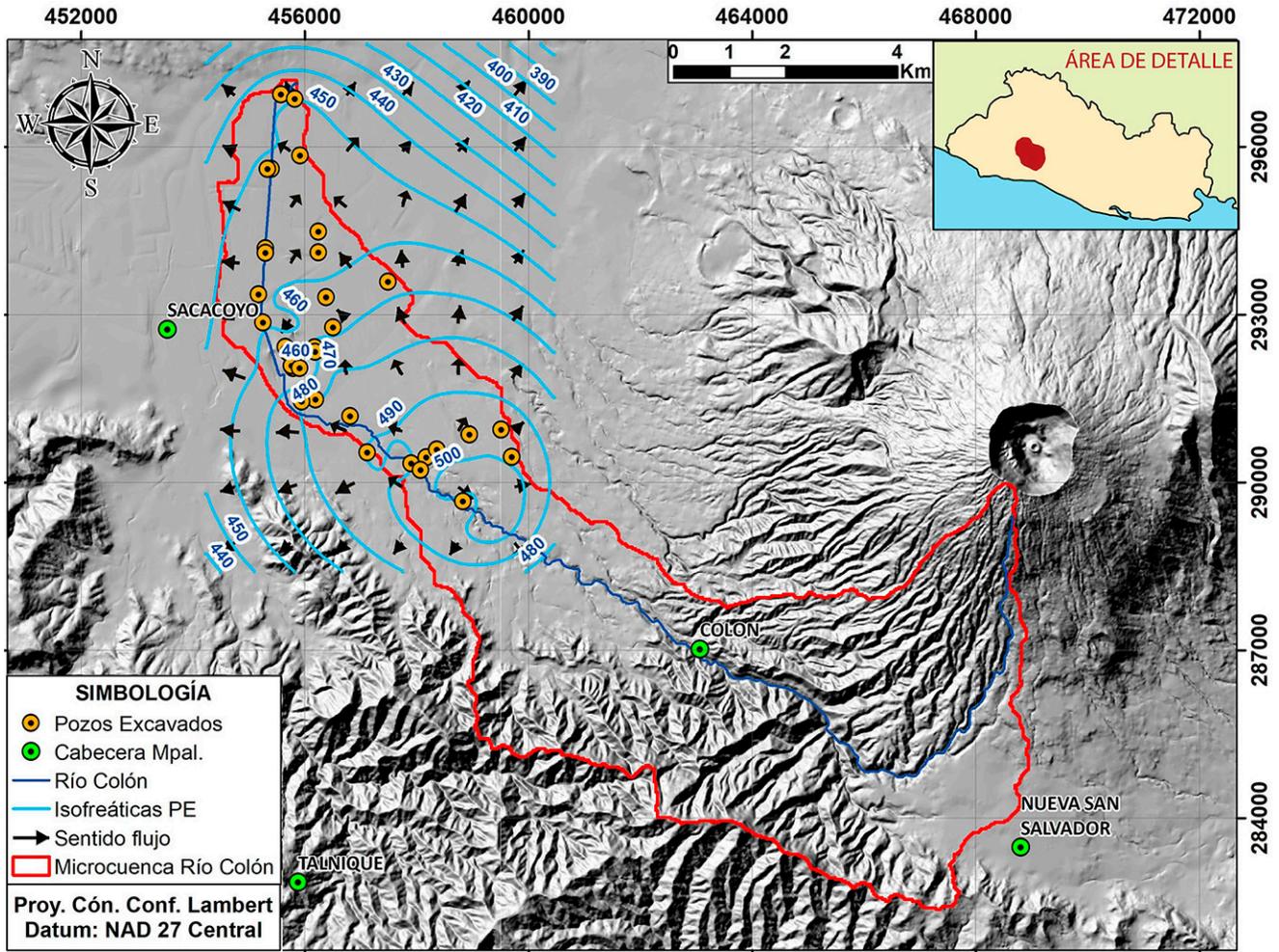


Fig. 6: Isofreáticas y líneas de flujo (Pozos Excavados), microcuenca río Colón.

Acuífero profundo, captado por los pozos profundos perforados dentro de la microcuenca. Conformado tanto por materiales poco consolidados (piroclastos) como por rocas fracturadas (lavas intermedias-básicas y brechas volcánicas). Usado para abastecimiento poblacional, industrial, comercial y agrícola a gran escala. Se trata de un acuífero de mediana-alta producción (máximos cercanos a 80 L/s), con valores T entre 1×10^2 - 1×10^4 m²/d, de al menos 200 m de espesor y que se extiende principalmente en la parte media y media-alta de la microcuenca. A partir de la evaluación de la información disponible (mayor que en el caso del acuífero superficial), se infiere que es de tipo confinado. En Guevara (2011) se hace referencia, también, al buen rendimiento del acuífero en ciertos sectores ubicados dentro de la microcuenca del río Colón (especialmente en el municipio de Colón), catalogándolos dentro de los más altos en todo el sistema acuífero de la subcuenca del río Sucio.

A partir de la información base colectada se diseñó un modelo conceptual del acuífero profundo ubicado bajo la microcuenca del río Colón, haciendo énfasis en las unidades litológicas que conforman esta formación acuífera. En la figura 7, se muestran las líneas de trazado de los perfiles representativos del modelo generado a lo largo y ancho de la microcuenca.

En la figura 8, se muestra la sección litológica longitudinal de la microcuenca del río Colón. Este perfil se extiende en dirección Noroeste-Sureste-Noreste, desde la parte alta hasta la parte baja de la microcuenca. Se muestra con flechas la dirección de flujo, de mayor a menor elevación topográfica y se observa como el nivel piezométrico (línea discontinua marrón) del

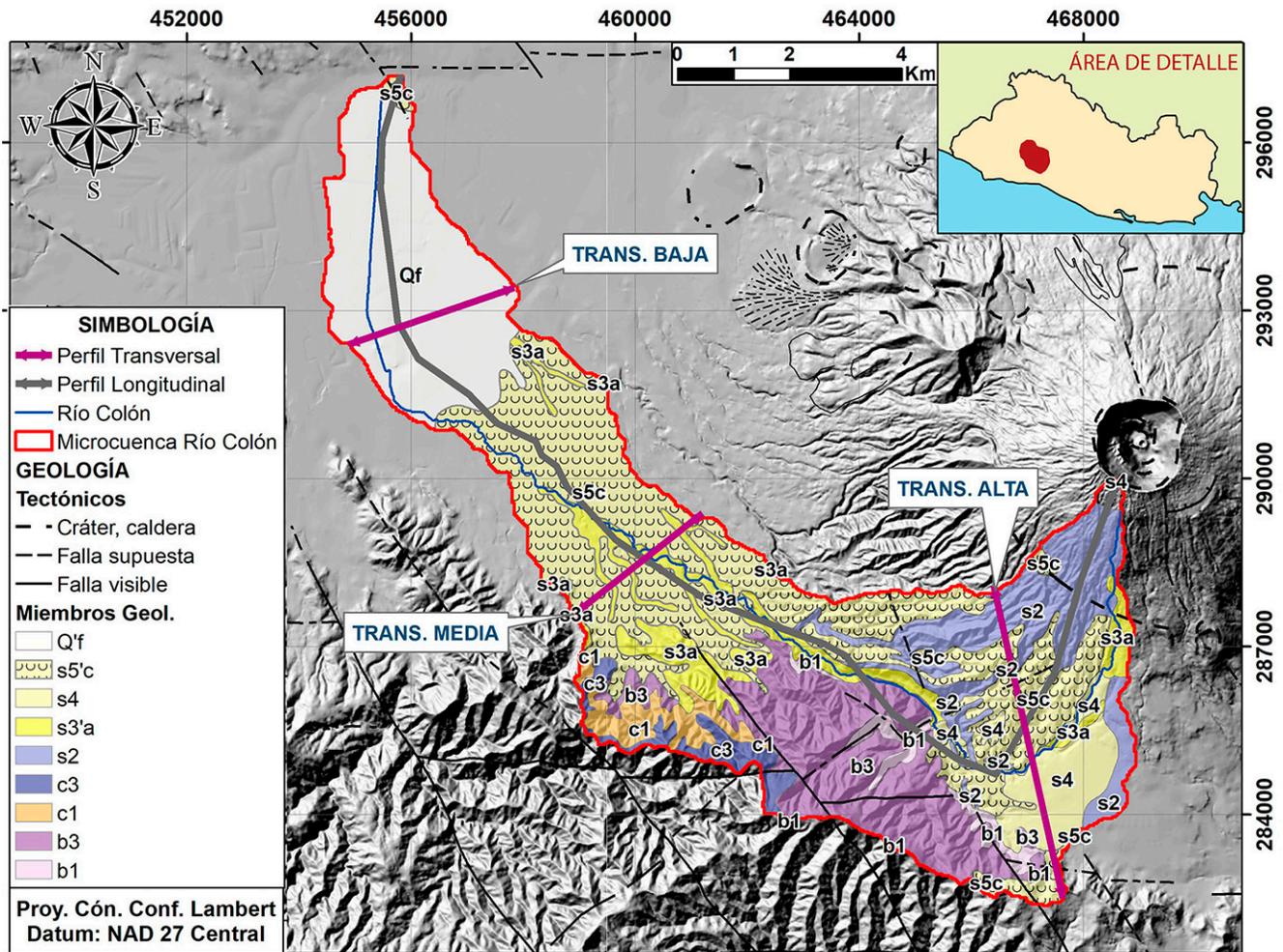


Fig. 7: Ubicación de la traza de perfiles geológicos generados sobre la microcuenca río Colón.

acuífero profundo varía proporcionalmente en función de la elevación topográfica, encontrándose por encima de la superficie topográfica en la parte baja de la microcuenca, lo cual es verificable in-situ por la existencia de pozos surgentes en este sector de la microcuenca. Para apreciar mejor los detalles del modelo conceptual, se han generado también 3 secciones transversales en 3 sectores (cuenca alta, media y baja), las cuales se muestran en las figuras 9, 10 y 11.

Los resultados del modelo generado permiten identificar la existencia de al menos 6 unidades litológicas que conforman el sistema acuífero:

Arcillas: Productos de la meteorización de materiales volcánicos preexistentes.

Brechas volcánicas: Bloques de lavas intermedias-básicas en una matriz de materiales piroclásticos o de arcillas producidas por la meteorización de los anteriores (lateritas). Remanentes de antiguos estratovolcanes andesíticos.

Depósitos sedimentarios: Depósitos eluviales, aluviales, fluviales y lacustres, originados por la meteorización de materiales volcánicos preexistentes.

Lavas intermedias-básicas: Rocas andesíticas-basálticas, en algunos casos fracturadas, originadas a partir de coladas de lava producidas en los complejos volcánicos aledaños.

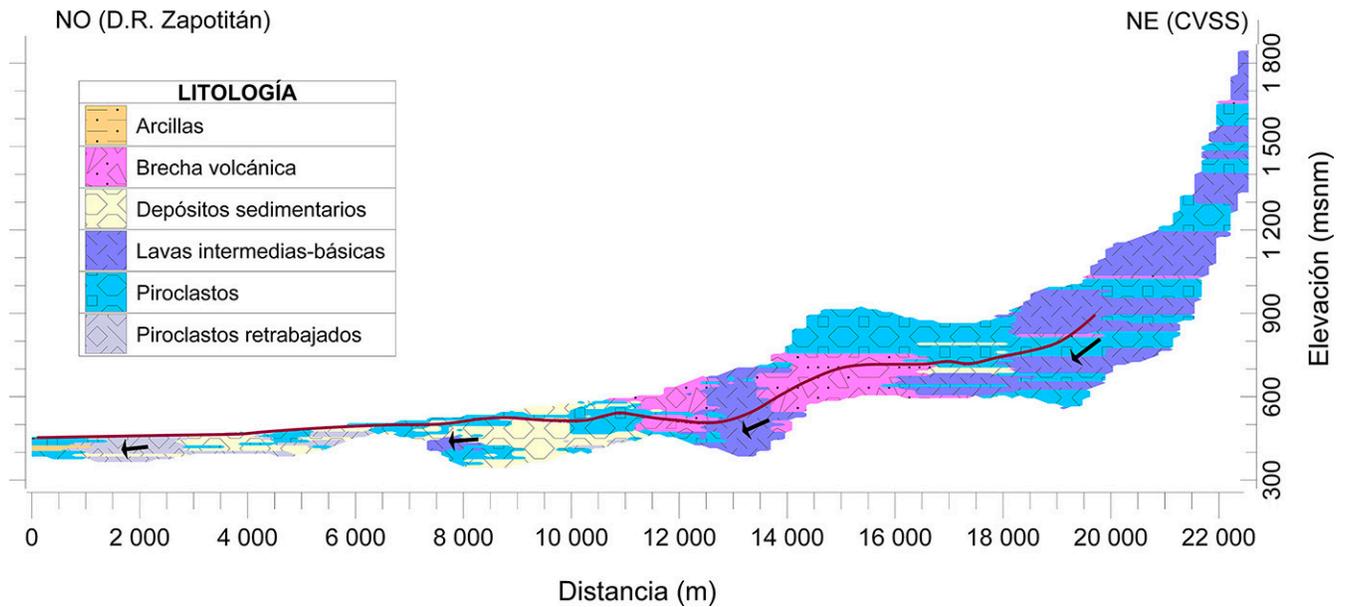


Fig. 8: Perfil longitudinal, microcuenca del río Colón. Línea marrón continua = NE. Flechas = sentido de flujo. (EV = 5,51).

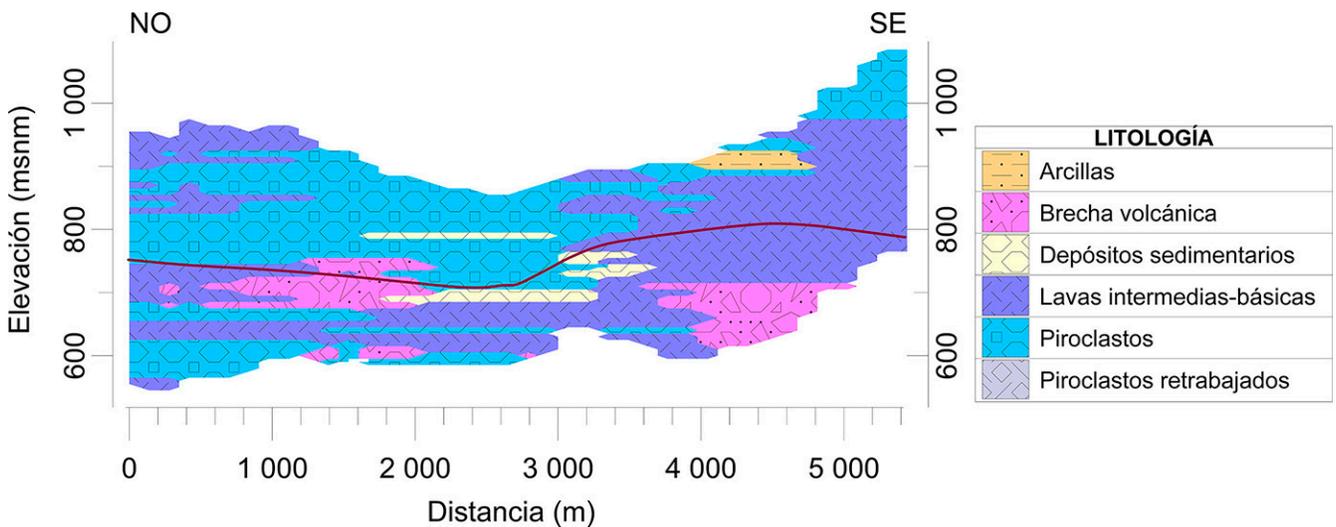


Fig. 9: Sección transversal microcuenca alta río Colón. Línea marrón continua = NE. (EV = 4,41).

Piroclastos: Tobas de ceniza, lapilli, aglomerados y otros productos eruptivos, asociados con las lavas intermedias-básicas descritas anteriormente.

Piroclastos re TRABAJADOS: Materiales de tipo piroclástico en proceso de meteorización y transformación a depósitos sedimentarios.

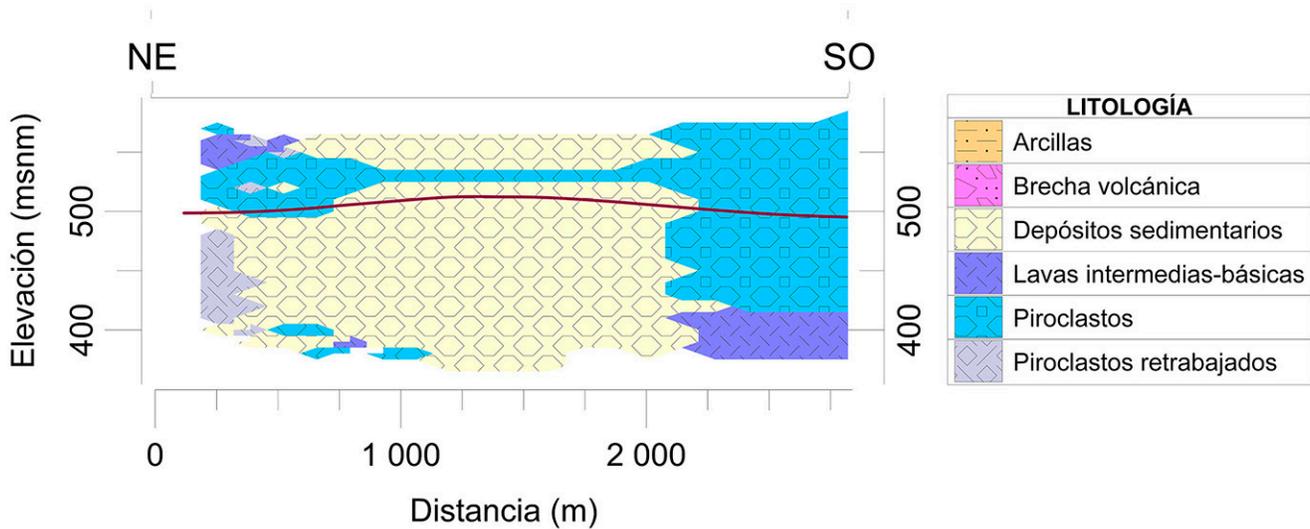


Fig. 10: Sección transversal microcuenca media río Colón. Línea marrón continua = NE. (EV = 4,83).

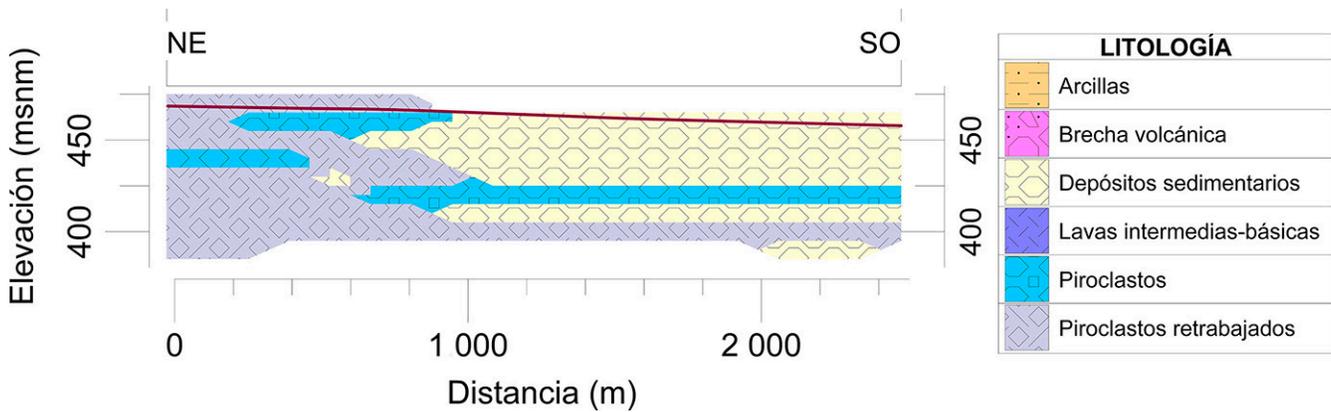


Fig. 11: Sección transversal microcuenca baja río Colón. Línea marrón continua = NE. (EV = 6,25).

Recarga acuífera potencial

Los resultados finales del balance hídrico muestran que dentro de la microcuenca del río Colón se tiene un valor de recarga hídrica potencial promedio de 376,12 mm/año, que corresponden aproximadamente a un 21 % de la precipitación promedio dentro de esta microcuenca, con un volumen total de 24,23 Millones de m³/año, equivalente a 768,24 L/s. En el Cuadro 3 se presentan los resultados numéricos del balance, aplicados a las 18 unidades de uso de suelo - geología delimitadas para el área de estudio. Se observa que las unidades “Caña de azúcar-Q’f” y “Agrícola con vegetación natural-s5’c” son las que tienen mayor capacidad de recarga; no obstante, considerando la extensión de las mismas, es la unidad “Café-s5’c” la que aporta mayor volumen de recarga dentro de esta microcuenca (5,24 Millones de m³/año) (Fig. 12).

Cuadro 3

Parámetros y resultados del balance hídrico aplicado a la microcuenca.

Uso suelo	Miembro geológico	fc (mm/día)	Kp prom	Kv	Kfc	Ci	Pi (mm/año)	ETR (mm/año)	RP (mm/año)
Café	s3'a	4424,02	0,06	0,19	1,0	1,0	1401,6	887,9	513,7
	b1	2013,89	0,06	0,19	1,0	1,0	1401,6	901,85	499,75
	c1	1254,54	0,06	0,19	0,99	1,0	1401,6	894,02	507,58
	s5'c	2517,33	0,06	0,19	1,0	1,0	1401,6	886,06	515,54
	b3	5200,0	0,06	0,19	1,0	1,0	1401,6	899,24	502,36
	c3	1370,54	0,06	0,19	0,99	1,0	1401,6	901,85	499,75
	s2	2861,28	0,06	0,19	1,0	1,0	1401,6	510,1	510,1
	s4	3443,89	0,07	0,19	1,0	1,0	1401,6	894,09	507,51
Caña azúcar	Q'f	3899,79	0,14	0,10	1,0	1,0	1539,36	899,01	640,35
	s5'c	133,06	0,11	0,10	0,56	0,77	1188,93	845,75	358,1
Granos básicos	s5'c	423,87	0,08	0,10	0,83	1,0	1539,36	504,9	502,44
Mosaico de cultivos y pastos	Q'f	68,69	0,15	0,10	0,4	0,65	994,0	189,42	189,42
Tejido urbano continuo	Q'f	82,8	0,12	0,05	0,44	0,62	948,9	873,26	85,14
	s5'c	104,41	0,11	0,05	0,5	0,66	1023,69	879,62	144,07
	s4	95,21	0,1	0,05	0,48	0,64	972,59	884,04	98,21
	s2	23,0	0,09	0,05	0,11	0,26	390,44	289,83	0,0
	s3'a	22,86	0,08	0,05	0,11	0,24	372,51	279,85	0,0
Agrícola, con vegetación natural	s5'c	2959,13	0,1	0,18	1,0	1,0	1539,36	888,63	639,36

fc: Capacidad de infiltración; Kp=Factor por pendiente; Kv=Factor por vegetación; Kfc=Factor por prueba de infiltración; Ci: Coeficiente de infiltración. Pi = Precipitación que infiltra; ETR = Evapotranspiración Real; Rp: Recarga Potencial.

Características hidroquímicas de la microcuenca

La ubicación de los 8 sitios seleccionados para el muestreo hidroquímico dentro de la microcuenca del río Colón, en época seca y lluviosa, se muestra en la figura 13.

En la figura 14, se comparan los resultados de los parámetros fisicoquímicos muestreados en ambas épocas del año. En el caso del pH, se observa una reducción en todos los sitios en época lluviosa, del orden de 1×10^{-1} , excepto en el sitio RCR-01, donde se observa un incremento, del orden de 1×10^{-1} . La CE y los TDS disminuyeron en todos los sitios época lluviosa, en un rango entre $1-1 \times 10^2$, excepto en el sitio RCR-02, donde se aprecia un incremento, del orden de 1×10^2 . En el caso de la Salinidad se aprecia una reducción en época lluviosa en todos los sitios, en un rango entre $1 \times 10^{-2}-1 \times 10^{-3}$, excepto en el sitio RCR-02, donde se observa un incremento del orden de 1×10^{-2} y en los sitios RCPP-02 y RCPP-06, donde este parámetro se mantuvo sin variaciones. La variación en los parámetros antes mencionados, probablemente se deben al cambio en la concentración de especies químicas por disolución, debido al flujo subterráneo de masas de agua desde la parte alta hacia la parte media y baja de la microcuenca, donde se encuentran la mayoría de fuentes de agua aprovechadas. Al mismo tiempo, en el análisis anterior, se aprecia que en los sitios RCR-01 y RCR-02, correspondientes a puntos de muestreo en el cauce principal

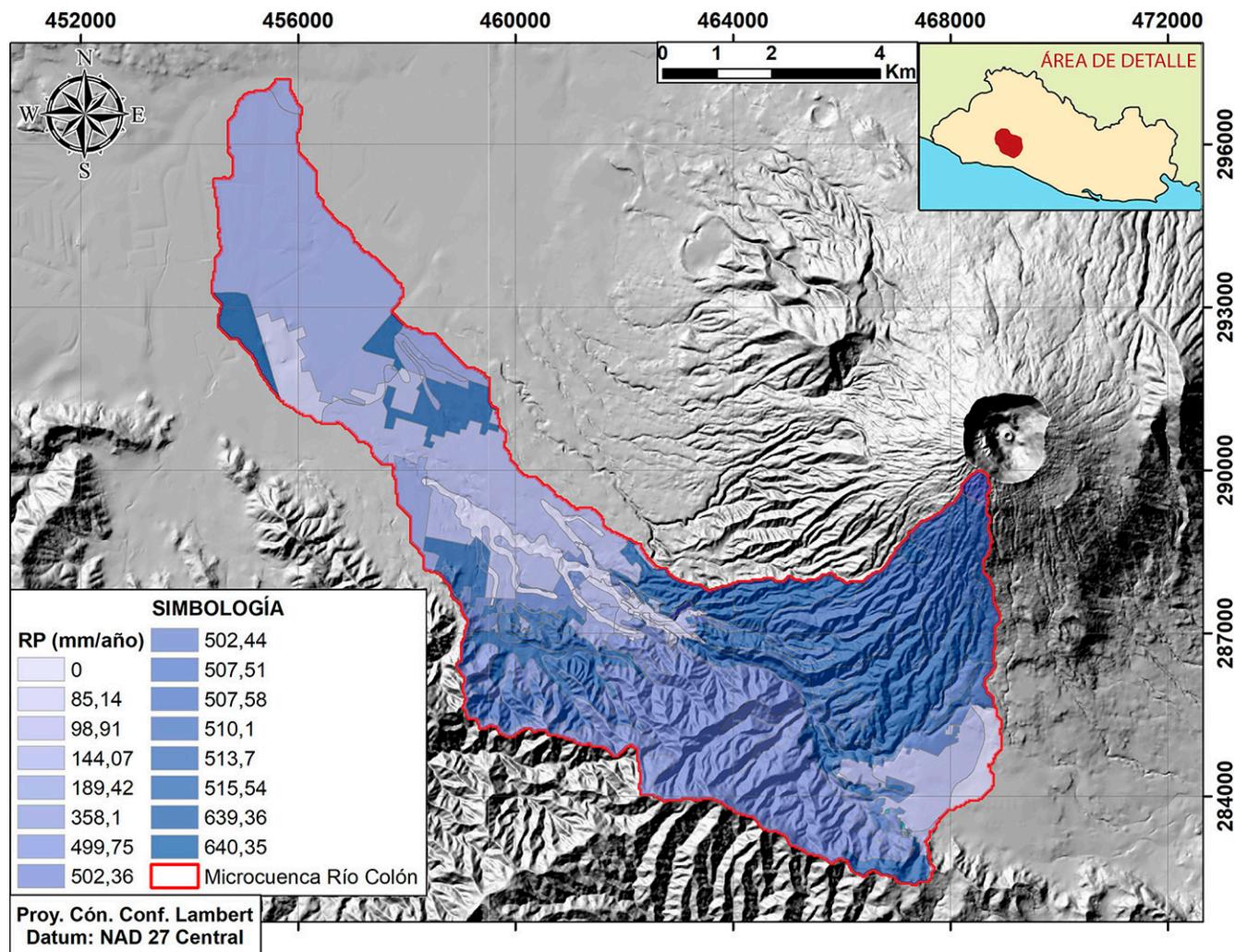


Fig. 12: Recarga Potencial (Schosinsky), microcuenca del río Colón.

del río Colón, el comportamiento estacional de estos parámetros difiere con respecto a los demás sitios muestreados. Al respecto, se debe mencionar que, desde hace al menos 20 años, se tiene constancia de la contaminación del cauce principal del río Colón, como resultado de las descargas de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales, producto de las diferentes actividades antrópicas que se realizan dentro de la microcuenca (Armero, 2003; MARN (SNET), 2002), lo cual dificulta conocer las características fisicoquímicas naturales de este cuerpo de agua, así como establecer una posible relación entre el sistema acuíferos-río a partir de estos resultados, limitados en tiempo y espacio.

Los resultados químicos de la campaña de muestreo realizada en época seca se presentan en el cuadro 4. Los diagramas Stiff de la campaña de muestreo realizada en época seca se presentan en la figura 15. Se observa que las concentraciones iónicas de las aguas en el área de estudio difieren en función de su ubicación geográfica, con una tendencia general de mineralización del acuífero, conforme se desciende desde la parte alta hacia la parte baja de la microcuenca.

En el diagrama de Piper mostrado en la figura 16, se observa que la mayoría de las muestras (RCPP-01, RCPP-02, RCPP-03, RCR-01, RCR-02), se clasifican como bicarbonatadas cálcicas o magnésicas (5 pozos perforados y los 2 sitios del cauce del río Colón), indicativo de que se trata de aguas de poca evolución química, de recarga reciente (muy probablemente local).

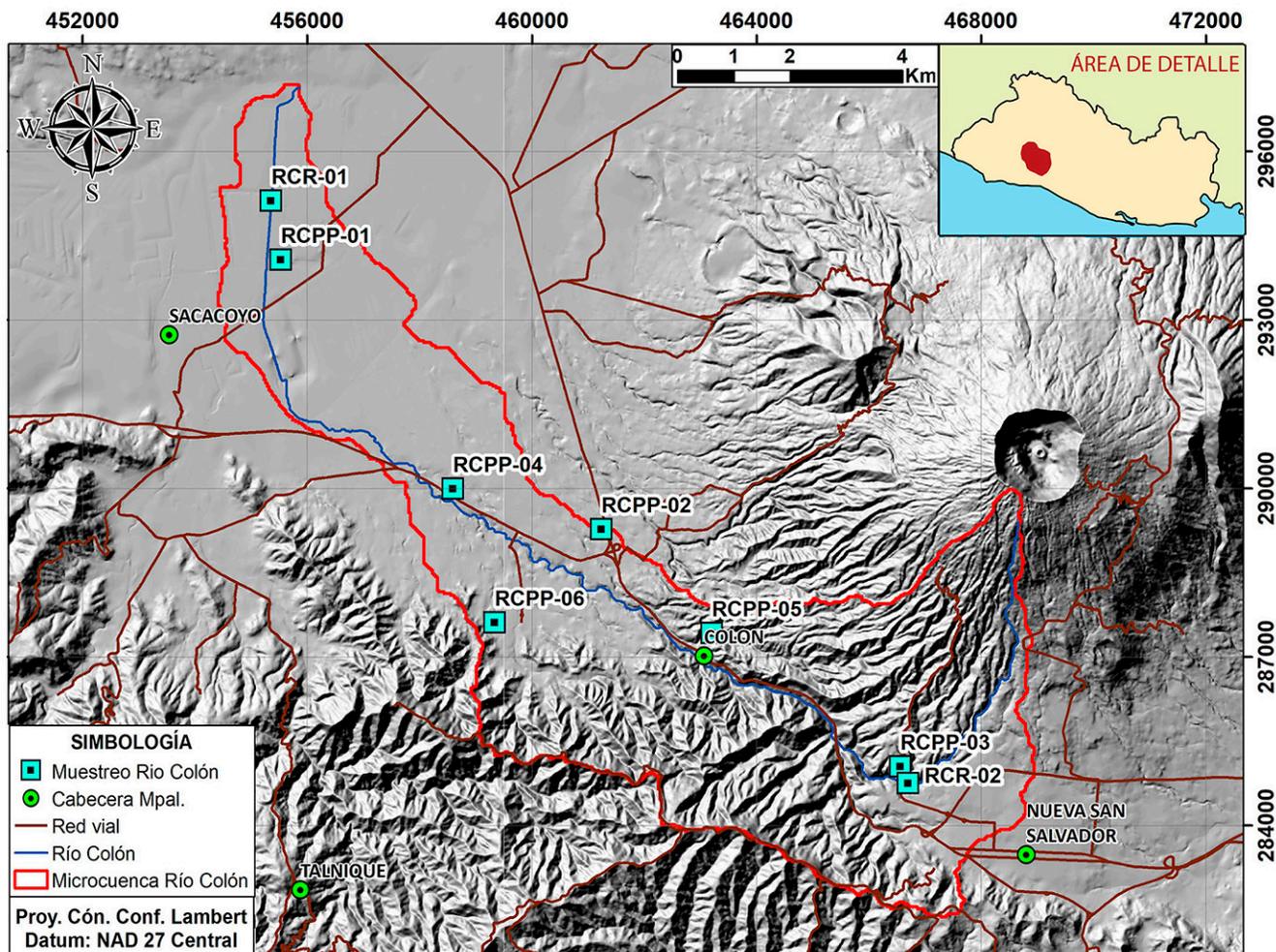


Fig. 13: Sitios de muestreo fisicoquímico, microcuenca del río Colón.

Mientras que, únicamente 3 muestras (3 pozos perforados: RCPP-04, RCPP-05, RCPP-06) corresponden al tipo Sulfatadas cloruradas cálcicas o magnésicas, en este caso, indicativo de aguas con mayor evolución química que las del primer grupo y en consecuencia con mayor tiempo de permanencia en el sistema acuífero.

Los resultados de la campaña de muestreo realizada en época lluviosa se muestran en el cuadro 5. Al igual que con los resultados obtenidos en época seca, en los diagramas Stiff de la campaña en época lluviosa (Fig. 17), las concentraciones iónicas de las aguas en el área de estudio difieren según su ubicación geográfica, manteniéndose la tendencia general de mineralización del acuífero, desde la parte alta hacia la parte baja de la microcuenca.

En las figuras 15 y 17 se puede observar que, aunque hay variaciones en los resultados obtenidos en época seca y lluviosa, en ambos casos son los sitios ubicados en la parte baja y media de la microcuenca (RCR-01, RCPP-01, RCPP-04 y RCPP-02) los que presentan una mayor mineralización de sus aguas. Se debe mencionar que, en el entorno de dichos sitios se llevan a cabo importantes actividades de tipo agrícola e industrial, existiendo la probabilidad de que los residuos de los productos utilizados en estas actividades puedan estar influyendo en la composición química de las aguas en esos sectores de la microcuenca evaluada. En el caso de los resultados obtenidos para el cauce del río Colón (RCR-01 y RCR-02), también se debe mencionar que, casi en toda su longitud, el cauce del río recibe descargas de aguas residuales de diverso tipo (complejos residenciales, comerciales e industriales), haciendo difícil la caracterización hidroquímica del mismo únicamente a partir de estos resultados.

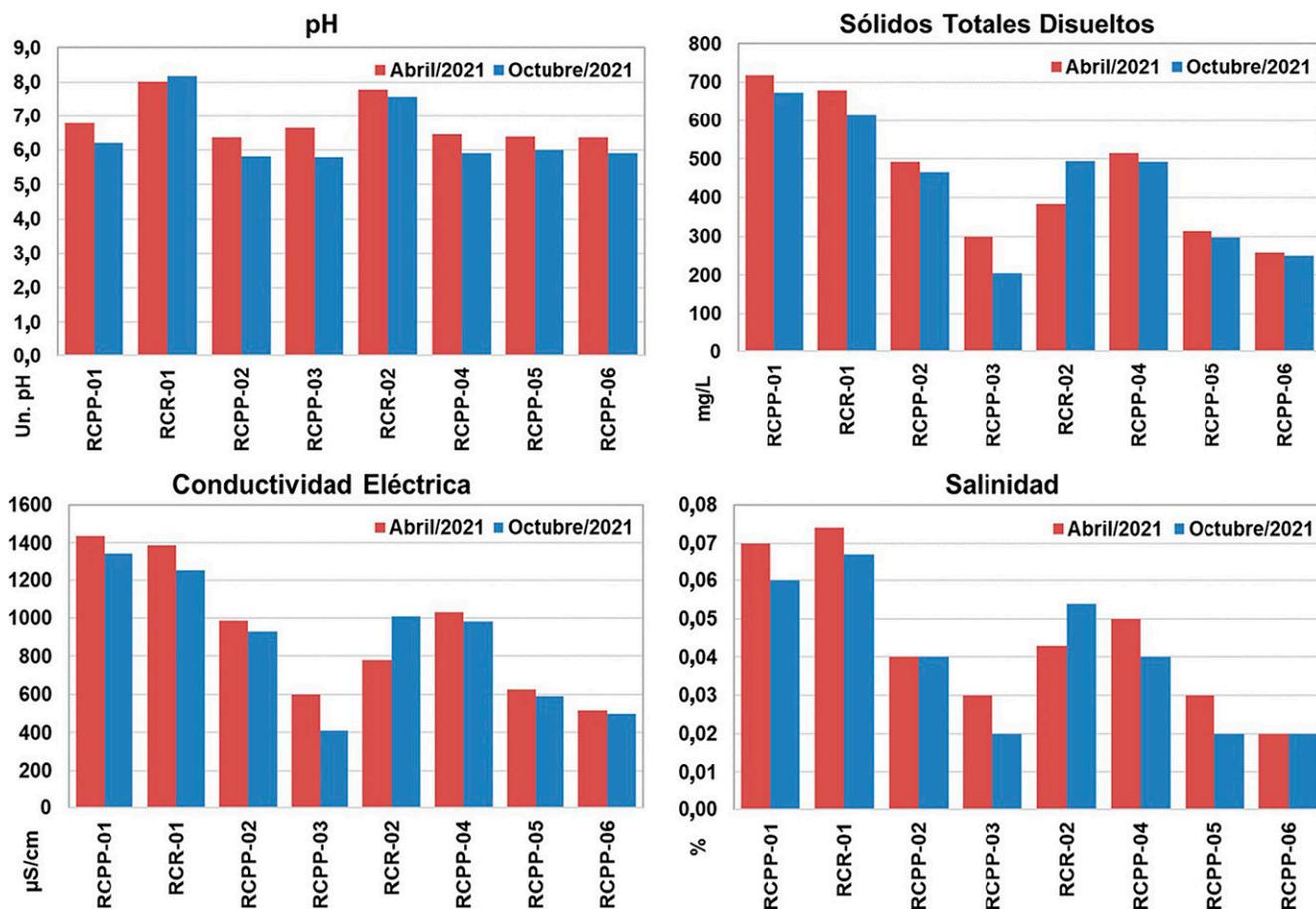


Fig. 14: Resultados del muestreo de parámetros FQ, microcuenca río Colón.

Cuadro 4

Resultados de muestreo químico dentro de la microcuenca del río Colón, época seca.

	RCPP-01	RCPP-02	RCPP-03	RCPP-04	RCPP-05	RCPP-06	RCR-01	RCR-02
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	378,38	181,07	148,57	160,17	106,78	92,85	287,85	194,99
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	15	26	35	201	119	76	32	88
Cl ⁻ (mg/L)	34,85	44,81	47,05	14,94	5,81	3,57	136,9	29,87
NO ₃ ⁻ (mg/L)	<1,33	23,43	12,87	45,63	13,53	34,32	8,76	16,16
Na ⁺ (mg/L)	81,51	75,61	67,89	77,03	37,29	25,69	155,4	73,98
K ⁺ (mg/L)	11,75	13,51	13,94	14,03	11,09	8,51	23,37	19,25
Ca ²⁺ (mg/L)	122,3	106,7	48,39	121,0	81,63	76,69	115,5	72,74
Mg ²⁺ (mg/L)	125,3	56,04	24,79	59,43	38,36	29,0	44,47	35,41

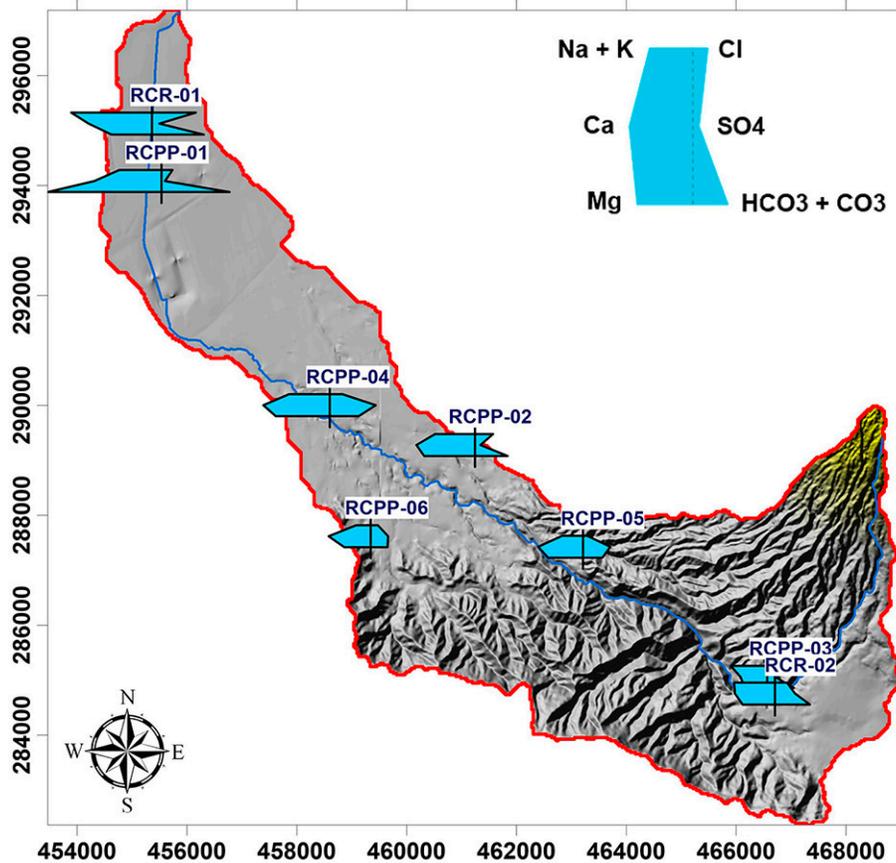


Fig. 15: Ubicación de sitios de muestreo y resultados, época seca, microcuenca del río Colón.

En el diagrama de Piper mostrado en la figura 18, se observa que la mayoría de las muestras (RCPP-01, RCPP-02, RCPP-04, RCPP-05, RCPP-06, RCR-01), se clasifican como Sulfatadas o Cloruradas Cálcicas o Magnésicas (5 pozos perforados y el sitio en la parte baja del cauce del río Colón), indicativo de que se trata de aguas con una notable evolución química, asociadas con un mayor tiempo de permanencia en el sistema acuífero. Mientras que sólo 2 muestras (RCPP-03, RCR-02) corresponden al tipo Bicarbonatadas Cálcicas o Magnésicas (1 pozo perforado y el sitio en la parte alta del cauce del río Colón), indicativo de aguas de poca evolución química, de recarga reciente (muy probablemente local).

En las figuras 16 y 18 se observa que en los sitios RCPP-01, RCPP-02 y RCR-01 ha ocurrido un cambio en la composición química mayoritaria de las aguas, entre época seca y lluviosa, pasando de bicarbonatadas cálcicas o magnésicas (BCM) a sulfatadas o cloruradas cálcicas o magnésicas (SCCM); mientras que en los sitios RCPP-03, RCPP-04, RCPP-05, RCPP-06 y RCR-02 no se registraron cambios. Una posible explicación a este fenómeno puede deberse al movimiento del flujo subterráneo en el acuífero profundo, impulsado por el agua de recarga pluvial que ingresa desde la parte alta de la microcuenca y que empuja a las masas de agua más antiguas y mineralizadas hacia la parte media y baja de la misma, provocando que los pozos profundos ubicados, en este sector de la microcuenca, estén interceptando estas masas de agua más evolucionadas químicamente.

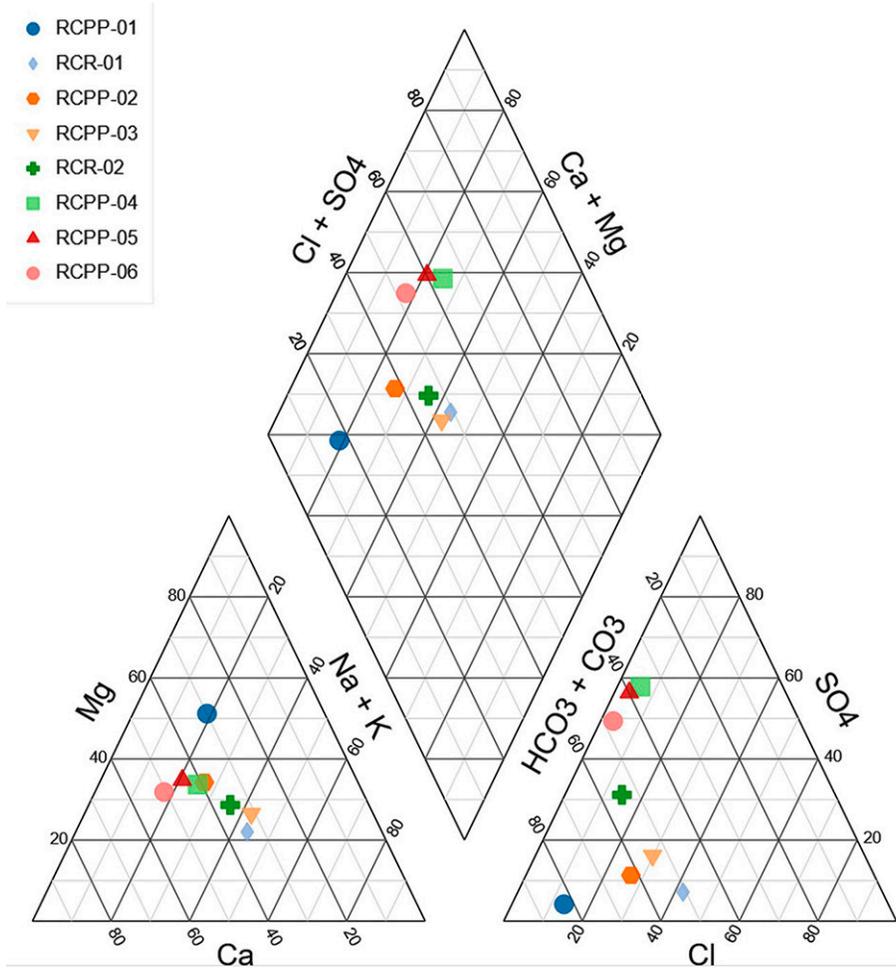


Fig. 16: Diagrama de Piper de los resultados obtenidos de los sitios muestreados, época seca.

Cuadro 6

Resultados de muestreo FQ dentro de la microcuenca del río Colón, época lluviosa.

	RCPP-01	RCPP-02	RCPP-03	RCPP-04	RCPP-05	RCPP-06	RCR-01	RCR-02
HCO3- (mg/L)	381,79	207,84	158,14	203,32	140,06	126,51	282,39	311,75
SO42- (mg/L)	292	238	31	217	137	85	117	137
Cl- (mg/L)	39,43	55,70	6,90	53,24	19,22	14,79	120,77	52,5
NO3- (mg/L)	2,11	40,40	25,14	19,1	16,93	38,31	23,36	21,74
Na+ (mg/L)	76,65	68,52	23,75	65,07	31,63	12,72	119,8	14,2
K+ (mg/L)	10,81	11,91	7,015	11,7	9,127	3,769	14,96	3,224
Ca2+ (mg/L)	141,3	126,7	62,93	119,5	88,15	31,35	120,0	10,57
Mg2+ (mg/L)	133,1	55,87	25,16	53,66	34,9	7,414	42,68	2,99

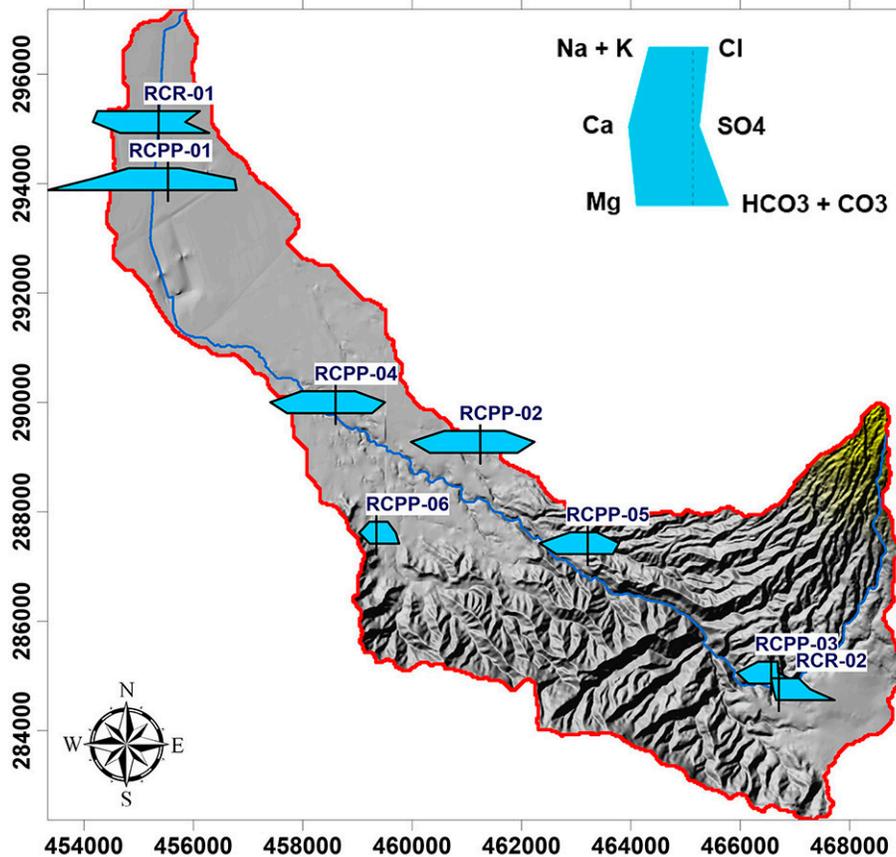


Fig. 17: Ubicación de sitios de muestreo y resultados, época lluviosa, microcuenca del río Colón.

Conclusiones

La microcuenca del río Colón se ubica en la zona central del territorio salvadoreño, con una superficie de 67,55 km² y se extiende desde la parte alta del CVSS y la Cordillera del Bálsamo hasta alcanzar las llanuras del DRZ.

El subsuelo de la microcuenca está conformado principalmente por depósitos (tobas de cenizas y lapilli) y rocas volcánicas (lavas intermedias-básicas) de edad reciente (Pleistoceno-Holoceno). Los rasgos topográficos y geomorfológicos de la microcuenca también indican la existencia de sistemas de fallas geológicas distribuidos principalmente en la parte alta de la misma. Los depósitos y rocas volcánicas recientes, en algunos casos en proceso de meteorización (fracturamiento), son los que constituyen las unidades con mayor potencial acuífero dentro de la microcuenca (Acuíferos fisurados de gran producción y Acuíferos porosos de producción media); también se han identificado unidades de rocas y brechas volcánicas antiguas (Plioceno), a las que por sus características se les atribuye un bajo potencial hidrogeológico, funcionando más bien como el basamento de las formaciones acuíferas (Rocas No Acuíferas). En la parte media de la microcuenca (sector Lourdes, Colón) es donde se encuentran las mejores condiciones para la explotación del sistema acuífero (altas transmisividades y caudales de explotación).

Los resultados históricos de las perforaciones y pruebas de bombeo, efectuadas en pozos perforados y excavados, permiten proponer la existencia de dos acuíferos diferentes dentro de la microcuenca del río Colón. Uno de ellos, superficial y captado por los pozos excavados, con un espesor de al menos 36 m, de mediana-baja producción y baja Transmisividad, cuyas características hidrogeológicas lo hacen parecer de tipo libre. El otro acuífero, profundo y explotado por los pozos perforados, con un espesor de al menos 200 m, de mediana-alta producción y Transmisividad, cuyas características hidrogeológicas

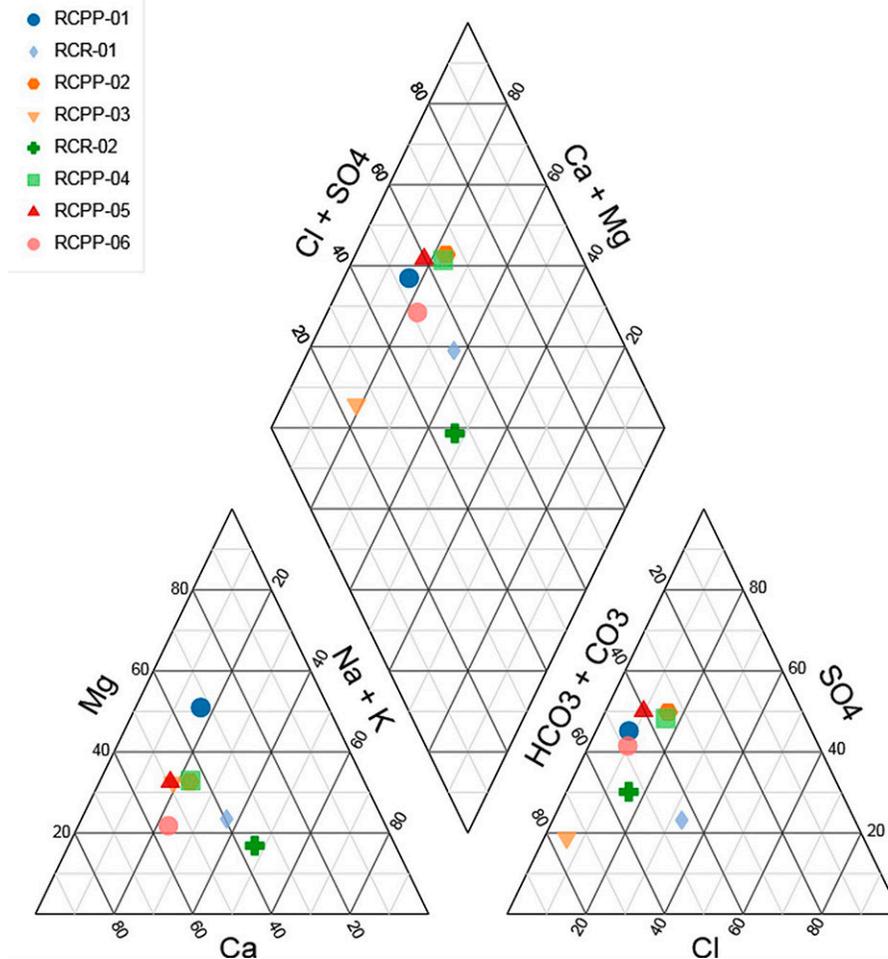


Fig. 18: Diagrama de Piper de los resultados obtenidos de los sitios muestreados, época lluviosa.

indican que es de tipo confinado. El flujo subterráneo en el acuífero superficial ocurre radialmente, desde la parte media de la microcuenca hasta la parte baja; el acuífero profundo muestra una tendencia radial similar, aunque iniciando a mayores cotas topográficas, desde la parte alta de la microcuenca, hasta alcanzar los sectores menos escarpados hacia la parte más baja de la misma. El modelo hidrogeológico conceptual del acuífero profundo muestra que está conformado por rocas y depósitos de origen volcánico, junto con depósitos sedimentarios originados por la meteorización de los materiales volcánicos antes mencionados; también se observa que, en general, el nivel piezométrico varía de forma directamente proporcional con la superficie topográfica.

La estimación de la recarga potencial dentro de la microcuenca del río Colón, arroja que la misma equivale a 24,23 Mm³/año, correspondientes aproximadamente a un 21 % de la precipitación promedio dentro de esta microcuenca. Las zonas de mayor recarga acuífera se localizan principalmente en los sectores del CVSS, Lourdes Colón y en menor medida en ciertas zonas del DRZ; en estos sectores los valores del Coeficiente de infiltración son altos, tanto por los materiales que afloran en las capas superficiales del suelo (depósitos volcánicos o sedimentos poco consolidados), como por el uso que se le da a los mismos (sistemas agroforestales y bosques asociados a plantaciones de café).

Los resultados del muestreo físicoquímico realizado en algunas fuentes de agua, distribuidas a lo largo de la microcuenca del río Colón, indican que las concentraciones iónicas de las aguas difieren considerablemente según su ubicación geográfica,

apreciándose una tendencia general de mayor mineralización del acuífero, conforme se desciende desde la parte alta hacia la parte baja de la microcuenca. En algunos casos, especialmente en el cauce principal del río Colón, se infiere que estas composiciones también se ven influenciadas por factores como las descargas de aguas residuales agrícolas, domésticas e industriales realizadas en la parte media y baja de la microcuenca, estos factores antrópicos dificultan el poder definir la relación existente entre el sistema acuífero y el río (aguas subterráneas y superficiales). Los parámetros fisicoquímicos como el pH, CE, TDS y Salinidad, salvo algunas excepciones, experimentan leves reducciones al pasar de la época seca a la época lluviosa, probablemente por cambios en la concentración de especies químicas por disolución, debido al flujo subterráneo de masas de agua desde la parte alta hacia la parte media y baja de la microcuenca. En cuanto a los iones mayoritarios, las concentraciones de aniones y cationes experimentan diferentes cambios entre épocas del año para cada sitio muestreado. Las aguas del sistema acuífero y del cauce principal del río, dentro de la microcuenca del río Colón, son predominantemente Bicarbonatadas Cálcidas o Magnésicas; registrándose en algunos casos una migración hacia una composición Sulfatada o Clorurada Cálcida o Magnésica, al pasar de época seca a época lluviosa. Este cambio puede estar relacionado con el movimiento del flujo subterráneo en el acuífero profundo, impulsado por el agua de recarga pluvial en la parte alta de la microcuenca y que moviliza a estas masas de agua hacia la parte media y baja de la misma.

Agradecimientos

Se agradece sinceramente por el apoyo en cuanto a recursos humanos, materiales y financieros a la Agencia Italiana de Cooperación para el Desarrollo (AICS), el Instituto de Geociencias y Georrecursos-Consejo Nacional de Investigación (IGG-CNR), a través del Programa Agua Futura, junto con la colaboración de la Escuela de Posgrados de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura (FIA) de la Universidad de El Salvador (UES), la Unidad de Hidrología Subterránea del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y la Gerencia de Recurso Hídrico, Investigación y Desarrollo de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA). Se agradece también a los maestros José Alejandro Machuca Láinez y Jerry Adolfo Murillo Solano, junto con otros colaboradores, por su contribución en la revisión y edición del presente artículo.

Referencias bibliográficas

- Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA). (2023). *Opinión técnica hidrogeológica para el fortalecimiento del sistema de agua potable de la ciudad de Santa Tecla, La Libertad*. ANDA. Informe interno.
- Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA). (s.f.). Archivo registro de pozos perforados a nivel nacional. ANDA. Repositorio digital interno.
- Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), y Agencia Suiza Para el Desarrollo y Cooperación (COSUDE). (2008). *Mapa Hidrogeológico de El Salvador (escala 1:100 000)*. ANDA, COSUDE. <http://pngirh.marn.gob.sv/geoportal/mapas/Anexos%20PGIRH/Inventario%20de%20Aguas%20Superficiales%20y%20Subterranas/PNGIRH-IMG-TTE-PRO05-008-MapaHidrogeologico-E04.pdf>
- Armero, D. A. (2003). *Evaluación del efecto agrícola sobre la calidad del agua del río Sucio*. (Tesis de licenciatura inédita). Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, San Salvador. <http://ri.ues.edu.sv/8610/1/19200547.pdf>
- Baxter, S. (1984). *Léxico estratigráfico de El Salvador*. CEL.
- Dirección General de Estadísticas y Censos (DIGESTYC). (2008). *VI Censo de población y V de vivienda 2007*. DIGESTYC - Ministerio de Economía.
- Ferrés, M. D. (2014). *Estratigrafía, geología y evaluación de peligros volcánicos del complejo volcánico de San Salvador (El Salvador)*. (Tesis doctoral inédita). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, México D.F., México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000711745

- Gil, L. B. (2007). *Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero del municipio de Nejapa, San Salvador, El Salvador*. (Tesis de maestría inédita). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Guevara, J. M. (2011). *Modelación numérica de flujo del acuífero El Playón, comprendido entre el Cantón Sitio del Niño y el campo de pozos de San Juan Opico administrado por ANDA*. (Tesis de maestría inédita). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/3957/>
- Junker, M. (2006). *Método RAS para determinar la recarga de agua subterránea*. MARN-FORGAES. Informe Técnico.
- Lexa, J., Šebesta, J., Hernández, W., y Chávez Hernández, J. (2019). *Mapa geológico del AMSS*. Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS). Informe Técnico.
- Lexa, J., Šebesta, J., Hernández, W., y Chávez Hernández, J. A. (2019). *Elaboración de mapa geológico y su caracterización*. (escala 1:100 000). Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), y Universidad de El Salvador (UES). (2010). *Mapa de uso de suelos de El Salvador*. (Escala 1:100 000). MAG y UES.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Servicio Nacional de Estudios Territoriales (MARN-SNET). (2002). *Propuesta de descontaminación del canal principal de los ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa*. Servicio Hidrológico Nacional. Informe técnico.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2006). *Balance hídrico integrado y dinámico en El Salvador, componente evaluación de recursos hídricos*. MARN. Informe técnico.
- Martínez, R. E. (2018). *Caracterización Hidrogeológica del acuífero poroso en la zona del distrito de riego de Zapotitán*. (Tesis de licenciatura inédita). Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, San Salvador, El Salvador. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/19518>
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34(34-35). <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223>
- Torrecilla, C., y Ramírez, I. (s.f.). *Diagnosis e inventario de la susceptibilidad a las inestabilidades gravitatorias en las áreas afectadas por los terremotos del 2001 en el volcán de Usulután*. Geólogos del Mundo. Informe Interno. <http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00001/doc00001.htm>
- U.S. Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS). (2016). Chapter 11 Sprinkler irrigation. Part 623 National Engineering Handbook. USDA. <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=39754.wba>
- Weber, H S, Wiesemann, G., Lorenz, W., Schmidt-Thomé, M., Hammerschmidt, W., Instituto Geográfico Nacional de El Salvador, Centro de Investigaciones Geotécnicas., y Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (1978). *Mapa geológico de la República de El Salvador / América Central = Geologische Karte der Republik El Salvador / Mittelamerika*. (escala 1:100 000). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geo Center.