

**Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación
Programa Universitario de Investigación
En Recursos Naturales y Ambiente**

INFORME FINAL

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS VOLCANICOS DE
LA REPÚBLICA DE GUATEMALA.**

**Equipo de investigación
Dr. Isaac Rodolfo Herrera Ibáñez
Coordinador**

**Ing. Daniel Manzo Barrientos
Investigador**

**Br. Erick Josué Hernández
Auxiliar de investigación I**

Guatemala, 25 de noviembre de 2016

**Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales
Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

M.Sc. Gerardo Leonel Arroyo Catalán
Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Ing. Agr. Augusto Saúl Guerra Gutierrez
Coordinador del Programa de Recursos Naturales y Ambiente

Dr. Isaac Herrera Ibáñez
Coordinador del Proyecto

Ing. Daniel Manzo Barrientos
Investigador

Br. Erick Josué Hernández
Auxiliar de Investigación I

Partida Presupuestaria

4.8.63.2.69

Año de ejecución: 2016

ÍNDICE	Pág.
Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción	3
a) Planteamiento del problema	4
b) Preguntas de la investigación	7
c) Objetivos	7
2. Marco teórico y estado del arte	8
2.1 El recurso hídrico en Guatemala	8
2.2 Los recursos hídricos y el desarrollo sostenible	8
2.3 Aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos	9
2.4 Estrategias de manejo de recursos hídricos	9
2.5 Acuíferos	10
2.6 Estado del arte	13
3. Materiales y métodos	14
3.1 Ubicación geográfica de la investigación	14
3.2 Tipo de investigación	16
3.3 Técnicas e instrumentos	16
3.4 Operacionalización de las variables o unidades de análisis	19
4. Resultados y discusión	20
4.1 Acuíferos volcánicos de Guatemala	20
4.1.1 Acuífero del valle sur de ciudad Guatemala	22
4.1.2 Acuífero noreste de ciudad Guatemala	30
4.1.3 Acuífero Chimaltenango	36

4.1.4 Acuífero de Antigua Guatemala	43
4.1.5 Acuífero de San Marcos	52
4.1.6 Acuífero de Quetzaltenango	58
4.1.7 Acuífero Totonicapán	65
4.1.8 Acuífero Santa Cruz del Quiché	67
4.1.9 Acuífero Sololá	72
4.1.10 Acuífero Cuilapa	81
4.1.11 Acuífero Jalapa	87
4.1.12 Acuífero Jutiapa	93
4.1.13 Acuífero Ipala	99
4.2 Matriz de resultados	106
4.3 Impacto esperado	106
5. Conclusiones	108
6. Agradecimientos	110
7. Referencias	110
8. Apéndices	113
9. Actividades de gestión, vinculación y divulgación	113
10. Orden de pago	114

ÍNDICE DE FIGURAS	Pág.
Figura 1. Región volcánica de Guatemala.	15
Figura 2. Geología de Guatemala con las principales ciudades de la región volcánica.	21
Figura 3. Tanque circular y casa de máquinas del sector Ojo de Agua.	24
Figura 4. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero del valle sur de ciudad Guatemala	27
Figura 5. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero del valle sur de ciudad Guatemala.	28
Figura 6. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero del valle sur de ciudad Guatemala.	28
Figura 7. Red de flujo de agua subterránea del acuífero del valle sur de ciudad Guatemala.	29
Figura 8. Rocas volcánicas fracturadas de tobas.	31
Figura 9. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero noreste de ciudad Guatemala.	33
Figura 10. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero noreste de ciudad Guatemala.	34
Figura 11. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero noreste de ciudad Guatemala.	34
Figura 12. Red de flujo de agua subterránea del acuífero noreste de ciudad Guatemala.	35
Figura 13. Piroclastos de pómez claro sobreyaciendo a las lavas oscuras.	38
Figura 14. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Chimaltenango.	40
Figura 15. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero Chimaltenango.	41
Figura 16. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero Chimaltenango.	41
Figura 17. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Chimaltenango.	42
Figura 18. Vista del Volcán de Agua desde el valle de Ciudad Vieja.	47

Figura 19. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Antigua Guatemala.	49
Figura 20. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero de Antigua Guatemala.	50
Figura 21. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero de Antigua Guatemala.	50
Figura 22. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Antigua Guatemala.	51
Figura 23. Valle de San Marcos.	52
Figura 24. Salida de agua subterránea en andesitas fracturadas.	54
Figura 25. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero San Marcos.	55
Figura 26. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero de San Marcos.	56
Figura 27. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero de San Marcos.	56
Figura 28. Red de flujo de agua subterránea del acuífero San Marcos.	57
Figura 29. Valle de Quetzaltenango y volcán Siete Orejas.	59
Figura 30. Basaltos columnares subyaciendo piroclastos de pómez.	59
Figura 31. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Quetzaltenango Totonicapán.	62
Figura 32. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero Quetzaltenango	63
Figura 33. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero Quetzaltenango	63
Figura 34. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Quetzaltenango Totonicapán.	64
Figura 35. Perfil hidrogeológico C-C' del acuífero de Totonicapán.	66
Figura 36. Afloramiento de granito en San Pedro Jocopilas.	68
Figura 37. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero de Santa Cruz del Quiché.	69
Figura 38. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero de Santa Cruz del Quiché.	70
Figura 39. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero de Santa Cruz del Quiché.	70
Figura 40. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Santa Cruz del Quiché.	71

Figura 41. Piroclastos y lavas cuaternarias sobreyaciendo sedimentos en Sololá.	76
Figura 42. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Sololá.	78
Figura 43. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero de Sololá.	79
Figura 44. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero de Sololá.	79
Figura 45. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Sololá.	80
Figura 46. Andesitas fracturadas aflorando en el río Los Esclavos en Cuilapa.	83
Figura 47. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Cuilapa.	84
Figura 48. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero de Cuilapa.	85
Figura 49. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero de Cuilapa.	85
Figura 50. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Cuilapa.	86
Figura 51. Brocal del pozo El Arenal en Jalapa.	88
Figura 52. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Jalapa.	90
Figura 53. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero de Jalapa.	91
Figura 54. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero de Jalapa.	91
Figura 55. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Jalapa.	92
Figura 56. Pozo mecánico municipal Los Filtros en la planta de la aldea Amayo Ingenio.	94
Figura 57. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Jutiapa.	96
Figura 58. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero de Jutiapa.	97
Figura 59. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero de Jutiapa.	97
Figura 60. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Jutiapa.	98
Figura 61. Andesitas basálticas con meteorización esferoidal.	101
Figura 62. Valle y Volcán de Ipala.	101
Figura 63. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Ipala.	102

Figura 64. Perfil hidrogeológico A-A' del acuífero de Ipala.	103
Figura 65. Perfil hidrogeológico B-B' del acuífero de Ipala.	103
Figura 66. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Ipala.	104

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Operacionalización de variables o unidades de análisis.	19
Tabla 2. Volúmenes de extracción, disponibilidad y potencial de agua subterránea.	105
Tabla 3. Coherencia de la propuesta de investigación.	106
Tabla 4. Población de habitantes por acuífero y etnicidad.	107

RESUMEN

El conocimiento de la hidrogeología en la región volcánica de la República de Guatemala, es de alta trascendencia a nivel nacional, debido a que en esta área se concentra el mayor número de los centros poblados, constituyendo una herramienta fundamental para definir el uso adecuado del agua y su reglamentación.

La investigación se orientó a la elaboración de un documento con mapas temáticos de hidrogeología de los principales acuíferos volcánicos de Guatemala, a escala 1:100,000. Estos se agruparon en tres zonas, donde la zona central comprende los acuíferos de ciudad Guatemala sur y noreste, Chimaltenango y Antigua. En la zona occidental se estudiaron los acuíferos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Santa Cruz del Quiché y Sololá. La zona oriental comprende los acuíferos de Cuilapa, Jalapa, Jutiapa e Ipala.

Dentro de los aportes técnico-científicos importantes que se derivan del estudio, es lo referente al conocimiento cualitativo y cuantitativo de las aguas subterráneas para el manejo y la explotación de acuíferos, al tener la caracterización de los diferentes acuíferos, tanto de sus parámetros hidrogeológicos, como de las extracciones y disponibilidades de agua para su protección y conservación. Estos indicadores analizados integralmente, darán sustento a los programas y proyectos de desarrollo sostenible de recursos hídricos subterráneos que se requieran impulsar por parte del Gobierno de Guatemala y otras instituciones.

La investigación fue experimental y de tipo exploratoria, ya que fue un estudio de campo, donde se identificaron los medios hidrogeológicos naturales y las interrelaciones entre variables de permeabilidad de las rocas y el flujo del agua subterránea. También fue de tipo descriptiva y explicativa, porque se realizó un análisis, interpretación y discusión de las diferencias entre las características hidráulicas de transmisividad y coeficiente de almacenamiento de los acuíferos, con datos primarios y secundarios, con la elaboración de una base cartográfica georeferenciada.

Palabras clave: Agua subterránea, mapas, recursos hídricos, permeabilidad, transmisividad.

ABSTRACT

The hidrogeology knowledge of Guatemala's republic volcanic region, has a high transcendence at national level, due in this area is concentrated the mayor number of population centers, constituting a fundamental tool to define the adequate use of water and regulation. The research was oriented for the elaboration of a document with hidrogeology thematic maps of the principals Guatemala's volcanic aquifers, at 1: 100,000 scale. These were grouped in three zones, the central zone contains the aquifers of South Guatemala City, Northeast Guatemala City, Chimaltenango and Antigua Guatemala. In the west zona were studied the aquifers of San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Santa Cruz del Quiché and Sololá. The east zone includes the aquifers of Cuilapa, Jutiapa y Jalapa.

Inside of the important scientific-technical contribution as result of the study, it is regarding to the qualitative and quantitative knowledge of underground water aquifers for its exploitation and management. As for its hidrogeology parameters, as for its extraction and availability for the protection and conservation. These indicator, were analyzed integrity, that will give support to the underground hydric resources for sustainable programs and projects, that require promotion from Guatemala's government and other institutions.

The research was experimental and exploratory, with field study, where was identified the natural hidrogeologic means and the interrelation between rock's permeability and the underground water flow. Also, was descriptive and explained type, cause was done and analysis, interpretation and discussion of the different hydraulic characteristics of transmissivity and storing coefficient of every aquifer, with primary and secondary data, accompanied with the elaboration of cartographic base.

Key words: Underground water, maps, hydric resources, permeability, transmissivity.

1. Introducción

El agua es el recurso natural que más se utiliza en todo el mundo y el más importante para la vida humana (Herrera, 2011). Escuder et al. (2009) señalan que a nivel mundial existe una escasez generalizada de agua dulce, estimando que el 97.25 % de agua en el mundo es salada y el 2.74 % es agua dulce, esta última contenida en acuíferos como agua subterránea con un 0.68 % (9.5 millones de Km³), agua en ríos con menos de 0.01 % y agua en lagos con sólo el 0.01 %.

El agua potable que existe es apenas el 0.5 % de toda el agua en la tierra y solo se renueva a través de lluvia, a una rapidez de 40 a 50 km³ por año. El consumo global de agua se duplica cada 20 años, más del doble de lo que la población humana crece. Se espera que la demanda total de agua aumente 38% en los próximos 25 años y la de agua potable en 80% (Padilla, 2012), siendo la distribución del agua desigual, con 65 % del agua fresca localizada en sólo 10 países.

Existe consenso en que se debe dar prioridad al conocimiento y cuantificación de las disponibilidades de las aguas subterráneas, incentivar los usos más eficientes y los métodos ahorradores de agua en la agricultura, y atender la contaminación de las corrientes y cuerpos receptores, porque afecta y compromete gravemente la sustentabilidad del recurso hídrico.

A medida que se desarrolla la población mundial, aumentan las demandas de agua a un ritmo muy acelerado para el abastecimiento humano y animal, riego y usos industriales; haciéndose necesario y esencial la evaluación de los recursos hídricos subterráneos para recomendar una mejor explotación de los mismos, preservar el medio ambiente, y con ello poder garantizar el recurso agua para las futuras generaciones (Herrera, 2011).

Losilla, Rodríguez, Schosinsky, Stimson y Bethune (2001), señalan que en América Central aproximadamente el 80 % de los 33 millones de personas dependen de fuentes subterráneas para su abastecimiento de agua potable. Siendo el agua subterránea la principal fuente de agua para la mayoría de las áreas urbanas en la región, por ejemplo Ciudad de Guatemala, San Salvador, San Pedro Sula, Managua y San José, así como, para ciudades pequeñas y para casi todas las áreas rurales. Además, muchas áreas agrícolas dependen del recurso hídrico subterráneo para su irrigación, ya que carecen de precipitación pluvial en época de verano.

Guatemala tiene una población de 15.8 millones de habitantes, de los cuales 63 % viven en áreas urbanas (Comisión Económica para América Latina y El Caribe [CEPAL], 2013) y el agua es un insumo que ayuda a garantizar su supervivencia, por el uso en múltiples actividades productivas.

El agua es un recurso escaso en muchos países del mundo y en Guatemala este recurso ha venido sufriendo un gran deterioro y una reducción considerable, debido a varios factores: la variabilidad natural de las lluvias por el cambio climático, la degradación del medio (deforestación, erosión, pastoreo excesivo), y la contaminación del agua, provocada por la incorporación de aguas servidas provenientes de los centros poblados y las industrias (Herrera & Brown, 2011).

En Guatemala el escurrimiento a través de los ríos representa 101,000 millones de metros cúbicos por año. Sin embargo, es aceptado que la principal fuente de abastecimiento público para Guatemala, son las aguas subterráneas, con un potencial de aproximadamente 33,699 millones de metros cúbicos (Herrera, 2011).

En la próxima década, en el país se espera un aumento en la demanda de agua subterránea, debido a sobre-extracción y contaminación del agua superficial, haciéndose necesario hacer más eficiente el uso del recurso hídrico, identificando los acuíferos a nivel nacional con el fin de aprovechar y proteger las aguas subterráneas (Padilla, 2012).

a) Planteamiento del problema

Guatemala presenta una gran diversidad, tanto en su geología como en su clima, con diferente fisiografía, contrastando las altas montañas en contra posición con valles y planicies. Esto ha originado diferentes regiones hídricas superficiales como cuencas hidrográficas las cuales están bien identificadas, sin embargo, las regiones subterráneas y las cuencas hidrogeológicas, no están definidas y las investigaciones son escasas.

En el país de Guatemala las investigaciones realizadas en hidrogeología son aisladas y las más completas han sido orientadas al estudio de la ciudad de Guatemala (INSIVUMEH, 1978), en diez pequeñas municipalidades del altiplano del país (Agencia de Cooperación Internacional del Japón [JICA], 1995), Ciudad de Quetzaltenango (INSIVUMEH, 1998), Chimaltenango (Herrera, 1998), Antigua Guatemala (Orozco, 2004) y parte de Jalapa (Herrera, 2011).

La evaluación de recursos de agua en Guatemala llevada a cabo por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (2000), hace una descripción general de los acuíferos, atendiendo a las provincias geológicas, en sedimentarios (cársticos, arenas y gravas, y costeros o aluviales) y en volcánicos.

La investigación de acuíferos volcánicos de América Central de Losilla et al. (2001), describe las áreas urbanas principales, como Ciudad de Guatemala, San Salvador, Managua y San José. La situación del recurso hídrico en Guatemala elaborado por Carrera, Gálvez y López (2005), hace referencia de la disponibilidad del recurso hídrico superficial por cuencas hidrográficas,

las demandas por uso de agua, los impactos a la salud y ambiente, pero no se analiza la hidrogeología.

La publicación de los acuíferos transfronterizos de Centroamérica (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2007), identifica 15 sistemas de acuíferos de Guatemala con México, Belice, Honduras y El Salvador a nivel de cuenca hidrográfica transfronteriza. En este documento se dan aspectos generales de topografía, población, clima, y algunos niveles y materiales constituyentes de acuíferos. Sin embargo, se evidenció la importancia y la necesidad de realizar un inventario e investigaciones más concretas de los acuíferos, para conocer y difundir la información hidrogeológica de Guatemala.

Los estudios manifiestan las siguiente **problemática**:

- Confusión entre el concepto de cuenca superficial (hidrográfica) y cuenca subterránea (hidrogeológica), que se toman como concordantes y en algunos casos no lo son.
- Dificultad para encontrar información sobre la hidrogeología de Guatemala, porque no se ha generado, ya que las empresas perforadoras de pozos no hacen estudios hidrogeológicos.
- Incremento en el uso de las aguas subterráneas por el deterioro de los cuerpos de agua superficial (ríos y riachuelos), las malas prácticas del uso de la tierra, y la expansión urbana.
- Falta de investigación básica en el área rural que dificulta el uso sostenible de los recursos hídricos, en especial la insuficiencia de estudios en hidrogeología, que sirvan para apoyar proyectos de agua en una forma más eficiente, tanto a nivel regional como local.
- Ocurrencia de sequías severas por el cambio climático, que han provocado una disminución en la recarga de acuíferos.
- Carencia de recursos humanos con conocimiento sobre hidrogeología.

El problema científico que resolvió el presente trabajo fue, contar con un estudio hidrogeológico donde están caracterizados los principales acuíferos volcánicos del país de Guatemala, por medio de mapas hidrogeológicos a escala 1:100,000 y a través de sus parámetros hidrogeológicos.

Justificación

La escasez del agua amenaza aspectos de la seguridad humana como la producción de alimentos, la salud y la estabilidad social y política. Esta situación impulsa la necesidad de elaborar estudios para el conocimiento y manejo del agua, ya que el uso del agua para consumo humano, es prioritario ante cualquier situación y esto debe prevalecer en toda su dimensión.

El estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos permitió el conocimiento de la situación actual y las condiciones de estos, evaluando los recursos hídricos subterráneos y las reservas. Esta información es un criterio técnico importante para establecer estrategias para el aprovechamiento sostenible del agua subterránea.

Actualmente en Guatemala, no existen mapas hidrogeológicos que identifiquen y localicen los acuíferos importantes del país, así como, sus características hidrogeológicas para el aprovechamiento de las aguas subterráneas, por lo que fue necesario realizar una investigación científica sobre la hidrogeología de la región volcánica a nivel nacional.

El 20% del territorio del país corresponde a acuíferos volcánicos, presentándose estos en las cabeceras departamentales y en algunas municipales de los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Quiché, Sololá, Chimaltenango, Sacatepéquez, Ciudad Guatemala, Cuilapa, Jalapa, Jutiapa e Ipala.

En tal sentido, existió la necesidad de conocer los límites y caracterizar los acuíferos volcánicos que sirven para satisfacer la demanda de agua potable, industria y riego de las poblaciones que sobre ellos se asientan, contribuyendo al desarrollo sostenible del país.

Por otro lado, en Guatemala a pesar de los avances significativos en sistemas de información geográfica y en el estudio de cuencas hidrográficas, su impacto positivo en la práctica es aún muy bajo en materia de hidrogeología, entre varias razones porque muchos de los programas y proyectos no son definidos con una información actualizada y completa de los recursos hídricos subterráneos, ya que muchos de sus parámetros son difíciles de determinar.

La producción de los mapas hidrogeológicos en corto tiempo fue factible, porque se aprovechó la cantidad de información existente, tanto bibliográfica como cartográfica, y la experiencia técnica de los investigadores para los levantamientos de campo.

Por lo anterior, el estudio hidrogeológico de acuíferos volcánicos, constituye la etapa inicial en la generación de la información acerca de los sistemas acuíferos del país.

Delimitación en tiempo y en espacio

La investigación se ejecuto en el año 2016. En este período de tiempo se realizó la recopilación y ordenamiento de la información hidrogeológica, la georeferenciación de pozos de agua con la toma de niveles de aguas subterráneas, la obtención de información de campo geológica e hidrogeológica, pruebas de bombeo, análisis e interpretación de datos, elaboración de mapas y perfiles hidrogeológicos, publicación de resultados parciales en congresos y revistas.

El área de estudio comprendió la franja de la región volcánica de Guatemala, que se extiende desde el oeste al este del país, en las partes altas y medias de los departamentos de San

Marcos y Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, el sur de Quiché, Chimaltenango, Sacatepéquez, centro y sur del departamento de Guatemala, Santa Rosa, Jalapa, Jutiapa y sur de Chiquimula en el oriente del país.

En base a la división hidrográfica de Guatemala, el proyecto del estudio hidrogeológico de acuíferos volcánicos, comprendió principalmente las partes altas y medias de las principales cuencas hidrográficas de la vertiente del Océano Pacífico.

Un rasgo hidrogeológico importante de esta región volcánica, es que se presentan valles intramontanos constituidos por arenas y gravas volcánicas que almacenan y ceden agua, para muchas poblaciones.

b) Preguntas de investigación

- ¿Es factible que el estudio hidrogeológico de acuíferos volcánicos de respuesta a la necesidad de caracterizar y evaluar el agua subterránea de la región, para contar con información hidrogeológica útil para el país?
- ¿El mapeo a escala 1:100,000 podrá hacer posible delimitar adecuadamente las unidades hidrogeológicas, las redes de flujo subterráneo y los perfiles de los acuíferos de la región volcánica del país?
- ¿Es probable la difusión y disponibilidad de información hidrogeológica a través de presentaciones y publicaciones en congresos, seminarios y documentos técnicos?

c) Objetivos

Objetivo general

Realizar el estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos más importantes de la República de Guatemala, para el manejo de los recursos hídricos subterráneos de la región volcánica del país.

Objetivos específicos

- Caracterizar los principales acuíferos volcánicos, mediante el análisis de sus parámetros hidrogeológicos.
- Elaborar los mapas de unidades hidrogeológicas, curvas equipotenciales y perfiles hidrogeológicos de los principales acuíferos volcánicos de Guatemala a escala 1:100,000.
- Difundir y poner a disposición de las instituciones del gobierno encargadas del uso y aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos, la información hidrogeológica de los acuíferos volcánicos.

2. Marco teórico y estado del arte

El manejo del agua implica conservación y gestión de los recursos hídricos, en el que se interrelacionan variables biofísicas, socioeconómicas y culturales donde se desenvuelve una población, siendo este manejo del agua variable, de acuerdo a sus usos. A escala mundial el porcentaje de agua extraída para usos municipales e industriales es pequeño, si se compara con el volumen de agua para la agricultura, que utiliza el 70 % de las extracciones (Padilla, 2012).

2.1 El recurso hídrico en Guatemala

El sistema hidrográfico de Guatemala se divide en tres vertientes: (i) Vertiente del Océano Pacífico (22 % del territorio) con 18 cuencas y un escurrimiento de 25.5 km³/año, (ii) Vertiente del Mar Caribe (31 % del territorio), con 10 cuencas y 31.9 km³/año de escurrimiento, y (iii) la Vertiente del Golfo de México (47 % del territorio) con 10 cuencas y 43.3 km³/año de escurrimiento, estimándose el escurrimiento superficial de 100.7 km³/año (Herrera, 2011).

El país se divide en cuatro regiones hidrogeológicas: llanuras aluviales del Pacífico, altiplano volcánico, tierras altas cristalinas y las sedimentarias, con una recarga anual renovable de agua subterránea de 33.7 km³ (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación y PLAMAR [MAGA-PLAMAR], 1991).

Carrera, Gálvez y López (2005) señalan que en Guatemala el consumo anual de agua, tiene tres usos principales: riego 60 %, industria 29.6 % y agua potable 10.4 %.

Los servicios de agua potable se abastecen de aguas superficiales en un 45 % para las áreas urbanas y 90 % para el área rural, los porcentajes restantes son aguas subterráneas. De las 333 municipalidades existentes en el país, 66 % utilizan sistemas por gravedad, 19 % con bombeo y 15 % usan sistemas mixtos (Herrera, 2011). Aunque actualmente son 340 municipalidades, los porcentajes son bastante parecidos. Adicionalmente, la situación de crecimiento y distribución de la población, principalmente en las cuencas altas, presiona y amenaza la sostenibilidad de los recursos naturales. Tal situación se agudiza con el nivel de pobreza prevaleciente en la población del 75 %, encontrándose el 45 % en extrema pobreza (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2014).

2.2 Los recursos hídricos y el desarrollo sostenible

El agua en el mundo es uno de los principales recursos naturales y aunque es un recurso renovable, su uso debe ser limitado, eficiente y racional.

Dada la importancia del agua en la vida de todos los seres vivos y debido al aumento de las necesidades de ella por el continuo desarrollo de la humanidad, el hombre está en la

obligación de proteger este recurso y evitar toda influencia nociva sobre fuentes de agua, con el manejo y aprovechamiento sostenible.

El desarrollo de los recursos hídricos generalmente se ha enfocado a la demanda y a la producción de agua. Sin embargo, actualmente es importante considerar la producción sustentable de un sistema hidrológico que incluya los componentes del ciclo del agua, los factores de la recarga hídrica, las tecnologías de perforación de pozos y las reservas disponibles para evitar su agotamiento (Vrba y Vernhagen, 2011).

Desarrollo sostenible implica la ordenación y conservación de la base de recursos naturales y la orientación del cambio tecnológico e institucional de tal manera que se asegure la continua satisfacción de las necesidades humanas para las generaciones presentes y futuras. Generalmente se señala que existe sostenibilidad, cuando se mantienen en forma cualitativa y cuantitativa las reservas de los recursos naturales renovables como el agua (Herrera, Orozco & Mujica, 2011).

2.3 Aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos

La comunidad internacional que trabaja en los recursos hídricos ha adoptado universalmente los Principios de Dublín en el año 1992, como guía de la utilización del agua para el desarrollo sostenible, los cuales enuncian que:

- El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, además de ser esencial para sustentar la vida, el desarrollo y el medio ambiente.
- El desarrollo y el manejo del agua deben tener como base un criterio de participación involucrando a los usuarios y los planificadores.
- Incumbe a la mujer un papel central en el abastecimiento, el manejo y la protección del agua.
- El agua, en todos sus usos competitivos, tiene un valor económico y debe ser reconocida como bien económico.

Estos principios fueron actualizados en Estocolmo en el año 1996 y aprobados por el Grupo Mundial del Agua, GWP (2000). En América Latina y el Caribe, estos principios quedan también de manifiesto en la Declaración de San José en el año 1996, donde se expresa que los organismos encargados de los recursos hídricos, deben coordinar e integrar la labor de formulación de políticas, estrategias, leyes y normas nacionales (Herrera, 2011).

2.4 Estrategias de manejo de recursos hídricos

Uno de los grandes componentes de las estrategias nacionales es el manejo de los recursos hídricos a nivel de la cuenca hidrográfica. Para ello es necesario identificar y evaluar cuidadosamente los recursos hídricos disponibles desde el punto de vista social y político. Se

debe buscar la eficiencia económica, sin sacrificar la equidad y las consideraciones ambientales (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2007).

El BID ha presentado la estrategia para el manejo integrado de los recursos hídricos para América Latina y el Caribe, cuyos objetivos consisten en apoyar la conservación de los recursos de agua por medio de un proceso de cambios en relación con los problemas de los recursos hídricos. Esta estrategia favorece, el cambio del desarrollo al manejo y de un enfoque sectorial a uno integrado.

La estrategia del BID en el manejo de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe, se basa en cinco principios rectores:

- Promover políticas y estrategias nacionales para el manejo de los recursos hídricos.
- Atención a las medidas tanto a corto como a largo plazo.
- Ajustarse a los objetivos del Banco y de los países.
- Incentivos para la participación de los países.
- Cooperación y coordinación con organizaciones internacionales.

En Guatemala se plantean cuatro estrategias:

- Apoyar la coordinación y la correcta administración de los recursos hídricos.
- Apoyar la sostenibilidad y la conservación de los recursos hídricos.
- Establecer un sistema nacional de información hídrica y apoyar la investigación, el desarrollo y la adaptación de nueva tecnología.
- Apoyar el establecimiento de una cultura hídrica en el país.

Herrera (2011) opina que en Guatemala existe la necesidad de establecer un marco general de estrategias de gestión integral del agua a nivel de comunidades para garantizar la oferta de los recursos hídricos subterráneos y su máximo beneficio económico, implementar tecnologías más eficientes para definir los acuíferos, evitar la sobre-extracción de mismos, disminuir el riesgo de contaminación y asegurar su recarga hídrica.

2.5 Acuíferos

El agua subterránea se encuentra almacenada en los acuíferos o reservorios de agua del subsuelo. Se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir sus necesidades (Custodio & Llamas, 2001).

Otras definiciones de acuífero son:

- Formación geológica subterránea capaz de contener y transmitir agua en grandes cantidades y de forma continua.

- Capa o estrato poroso que contiene agua; de roca permeable, arena o grava capaz de proporcionar cantidades apreciables de agua, aunque rocas fracturadas también forman acuíferos.

- Formaciones de rocas que dejan mover el agua a través de ellas bajo condiciones normales y son capaces de suministrarla por gravedad o por bombeo.

La definición original viene dada del latín: *aqua* = agua y *fero* = llevar, por lo que analizando las definiciones anteriores, se aprecia que el agua encerrada en una formación geológica cualquiera, puede estar ocupando ya sea los poros o vacíos intergranulares que presenta la misma, o bien en las fracturas o grietas, pero debe darse la condición de la transmisión del agua para poder captarla o explotarla. En este sentido algunos autores emplean las denominaciones de acuíferos en medios porosos (flujo en medios porosos) y acuíferos en medios fracturados o consolidados (flujo fisural).

En general: se dice que existen dos tipos de acuíferos: libre o freático y confinado.

Los acuíferos libres son depósitos que se presentan cuando el manto freático carece de un estrato impermeable que lo limite por la parte superior, de modo que el nivel del agua puede subir o bajar libremente (centímetros o metros al año).

La superficie superior de un acuífero libre se llama nivel freático, que es el plano donde la presión del agua subterránea es igual a la presión atmosférica. Este acuífero también recibe el nombre de acuífero abierto o no artesiano.

Durante períodos de fuerte lluvia se pueden formar acuíferos no confinados temporales si el movimiento descendente de agua infiltrada es restringido por una capa poco profunda de permeabilidad baja. El agua se acumula en la capa restrictora y forma un acuífero colgado, que puede tener gran extensión o pueden ser de tamaño restringido, formando lentes.

Un acuífero confinado es un estrato o formación geológica con agua atrapada entre dos estratos o formaciones mucho menos permeables como arcilla o basamento de roca, es decir, es un acuífero limitado superior e inferiormente por formaciones impermeables, que tienen agua a mayor presión que la atmosférica, originando un nivel piezométrico en la parte superior.

Escuder et al. (2009), señalan que un acuífero puede ser confinado en un área y libre en otra, dentro de la misma cuenca hidrogeológica.

Los acuíferos confinados no tienen un nivel freático libre, ya que la presión en este acuífero se caracteriza por la superficie piezométrica, que es la superficie obtenida al conectar niveles de agua en equilibrio en tubos o piezómetros, que penetran el acuífero confinado. Si la superficie piezométrica se encuentra por encima de la capa confinante superior, el acuífero

confinado producirá pozos con agua que fluye libremente (surgente). Estos pozos se llaman artesianos.

Los acuíferos como sistemas físicos, poseen un funcionamiento regulado por la recarga, flujo del agua, la descarga, extracciones, etc.

Los principales parámetros de los acuíferos son: la porosidad, la conductividad hidráulica (permeabilidad), la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento.

La porosidad y la permeabilidad definen la existencia de agua en un medio geológico. La porosidad es la porción de una roca o suelo, no ocupado por el material mineral sólido, puede ser ocupado por agua y/o aire. La conductividad hidráulica o permeabilidad, es la constante de proporcionalidad de la ley de Darcy y esta definida como el volumen de agua que puede moverse a través de un medio poroso en una unidad de tiempo bajo un gradiente hidráulico a lo largo de una unidad de área (Orozco, Herrera & Mujica, 2011).

La transmisividad, es la capacidad de un medio para transmitir agua, es decir la razón por la cual fluye agua (velocidad de flujo), a través de una franja vertical del acuífero de ancho unitario y de altura igual al espesor saturado del mismo, cuando el gradiente hidráulico es igual a la unidad.

El coeficiente de almacenamiento define el tipo de acuífero como libre o confinado. Este parámetro se define como el volumen de agua liberada o cedida por una columna del acuífero de altura igual al espesor del mismo y de sección unitaria, al disminuir la presión en una unidad. En los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento equivale al rendimiento específico del material desecado durante el bombeo, por lo tanto coincide con la porosidad eficaz. En los acuíferos confinados, el coeficiente de almacenamiento es el resultado de dos efectos elásticos, la compresión del acuífero y la expansión del agua contenida en éste, cuando la carga o presión es reducida por el bombeo.

La configuración de las elevaciones del nivel estático de una fecha determinada, junto con las líneas ortogonales a éstas, definen la red de flujo de la formación acuífera. Es decir, el conjunto ortogonal de líneas de corriente y líneas equipotenciales forma una red plana de flujo o simplemente red de flujo.

La línea de flujo es la trayectoria que representa una molécula de agua en un medio poroso. La línea equipotencial es la línea de igual potencial de energía, por lo que en acuíferos freáticos, las equipotenciales serán los niveles freáticos de igual valor, mientras que en acuíferos confinados las equipotenciales serán los niveles piezométricos de la misma altura.

2.6 Estado del arte

En la actualidad la hidrogeología tiene un papel muy importante en el planeamiento del uso de los recursos hídricos, y ha llegado a convertirse en parte fundamental de los proyectos directamente relacionados con el suministro de agua potable, industrial y para riego. Por otro lado, la integración de la hidrogeología con la geografía matemática en especial a través de los sistemas de información geográfica ha conducido al uso imprescindible del computador en el procesamiento de información existente, el análisis y la simulación de acuíferos (Herrera, 2011). Las investigaciones en los últimos años se han centrado sobre los factores que condicionan la precipitación pluvial para estimar de forma precisa la recarga hídrica y el desarrollo de modelos que permitan cartografiar de mejor manera los acuíferos, su posible contaminación y la estimación de los parámetros hidrogeológicos, con el fin de aprovechar el agua subterránea (Herrera, 2015).

En Guatemala y en la región volcánica, se cuenta con pocos estudios hidrogeológicos, ya que los que existen han sido realizados de forma puntual por algunas empresas e instituciones, para la perforación de algún pozo de agua.

El Instituto Geográfico Nacional a la fecha, no ha elaborado ni un mapa hidrogeológico, aunque ha generado muchos mapas temáticos del país, siendo los más importantes de mencionar:

- Mapa hipsométrico a escala 1:500,000 (dividido en cuatro hojas), presenta curvas de nivel equidistantes cada 1,000 metros.
- Mapa climatológico a escala 1:1,000,000 (según el sistema Thornthwaite).
- Mapa geológico a escala 1:500,000 (dividido en 4 hojas).
- Mapa geológico a escala 1:250,000 (solo las hojas Quetzaltenango, Guatemala y Chiquimula).
- Mapa geológico a escala 1:50,000 (solo existen 12 hojas de la región volcánica).
- Mapa de formas de la tierra a escala 1:1,000,000.

El Ministerio de Agricultura y Alimentación (MAGA) por medio del Plan de Acción Forestal (PAFG) y el Instituto Nacional de Bosques (1998), ha elaborado los mapas siguientes:

- Mapa de recarga hídrica a escala 1:1,000,000 que cubre todo el país y presenta las principales zonas de muy alta, alta, media y baja recarga.
- Mapa fisiográfico - geomorfológico a escala 1:250,000.
- Mapa de cuencas hidrográficas de Guatemala a escala 1:250,000.
- Mapa de cobertura forestal a escala 1:1,200,000.

Los principales mapas hidrológicos del país han sido publicados por el INSIVUMEH en Atlas Hidrológicos, a escala 1:1,000,000.

El documento No. 2 de Hidrogeología -disponibilidad de agua subterránea- de Guatemala, elaborado por el Plan Maestro de Riego y Drenaje (MAGA-PLAMAR, 1991), presenta un mapa de unidades hidrogeológicas de acuerdo a la litología y edad de las rocas del país, a escala 1:2,000,000. Sin embargo, su información hidrogeológica con alto contenido genético, es de poca utilidad práctica en materia de hidrogeología por su escala muy general que no localiza los acuíferos y menciona ciertas características de forma regional y no local.

De acuerdo a lo anterior, el mapeo sobre los acuíferos volcánicos de Guatemala es el primer trabajo a nivel nacional y a una escala adecuada de 1:100,000. Además, cuenta con una base de datos inicial de las características hidráulicas (transmisividad, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento) de los acuíferos, extensión y profundidad de niveles de agua subterránea, que son insumos para para la modelación hidrogeológica de los diferentes acuíferos estudiados.

La investigación hizo posible identificar como principales hallazgos del proyecto:

- Se caracterizaron 12 principales acuíferos volcánicos de Guatemala, que corresponden a las cabeceras departamentales de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Santa Cruz del Quiché, Sololá, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa, Jalapa, Jutiapa e Ipala en Chiquimula.
- Se determinaron las características hidráulicas de los acuíferos, como la transmisividad, la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento, que permitió definir los tipos de acuíferos y su potencial hídrico subterráneo.
- Se elaboraron mapas hidrogeológicos de los acuíferos volcánicos, que servirá de guía técnica para las municipalidades correspondientes en la perforación de pozos mecánicos, ya que se identifica la profundidad del nivel de agua subterránea y las capas de roca presentes.
- Los perfiles hidrogeológicos y espesores de las unidades acuíferas, definen las cuencas hidrogeológicas existentes.
- La publicación de resultados permitió el intercambio de información científica con otros investigadores a través de congresos, seminarios y revistas nacionales e internacionales.

3. Materiales y Métodos

3.1 Ubicación geográfica de la investigación

El área de la investigación comprendió los principales acuíferos de la franja de la región volcánica de Guatemala como se presenta en la Figura 1. Esta franja comprende un área de 21,698 Km², que representa el 20 % del territorio de Guatemala de 108,889 Km². La ubicación geográfica es de 13.89 a 15.3606 grados de latitud norte y 89.128 a 92.2106 grados de longitud oeste.

Los acuíferos estudiados corresponden a las cabeceras departamentales de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Santa Cruz del Quiché y Sololá en la zona occidental del país. Chimaltenango, Antigua Guatemala en Sacatepéquez y Guatemala en la zona central. Cuilapa en Santa Rosa, Jalapa, Jutiapa e Ipala en Chiquimula en el oriente del país.



Figura 1. Región volcánica de Guatemala.

3.2 Tipo de investigación

La investigación fue no experimental y de tipo exploratoria, ya que el estudio de campo, donde se identificaron los medios hidrogeológicos naturales y las interrelaciones entre variables de la permeabilidad de las rocas y el flujo del agua subterránea.

La investigación también fue de tipo descriptiva y explicativa, porque se hizo un análisis, interpretación y discusión de las diferencias entre las características hidráulicas como transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento de los acuíferos volcánicos, con datos primarios y datos secundarios.

3.3 Técnicas e instrumentos

Las técnicas comprendieron la recopilación de información hidrogeológica de la región volcánica de Guatemala y la observación e identificación de las diferentes formaciones geológicas de cada localidad que forman acuíferos.

La metodología comprendió el levantamiento geológico, con la fotogeología donde se definieron los contactos geológicos entre las unidades superficiales y lineamientos de fallas (Herrera, 2012). El mapeo geológico se realizó a escala 1:100,000 apoyado con los mapas geológicos a 1:50,000 y 1:250,000 del IGN, con el levantamiento de columnas litológicas en pozos perforados para su correlación estratigráfica y la elaboración de perfiles hidrogeológicos.

La caracterización hidrogeológica se realizó por el método de correlación entre la geología superficial y subterránea, que fue factible de utilizar en las áreas con información de afloramientos de campo y un buen control de litología de pozos.

Se definió el modelo conceptual de las aguas subterráneas de cada acuífero, utilizando principalmente modelos visuales (mapas, secciones y redes de flujo) y matemáticos (soluciones gráficas y numéricas). El método consistirá en la determinación de las unidades hidrogeológicas de cada acuífero, la definición de los límites del acuífero y la red de flujo del agua subterránea.

Con la realización de pruebas de bombeo en pozos, se determinaron los parámetros hidrogeológicos por los métodos de Jacob y de Theis, que son los recordables de utilizar según Kruseman y De Ridder (1994), Custodio y Llamas (2001) y Escuder *et al* (2009).

La prueba de bombeo o ensayo de bombeo de pozos en el campo, consistió en la extracción de un caudal de agua constante de un pozo y la medición de los tiempos versus los niveles dinámicos o descensos del nivel de agua subterránea, durante un tiempo definido que puede ser de 12, 24, 48 o 72 horas.

La transmisividad en m^2/d , se determinó con la curva patrón de Theis, de acuerdo a la ecuación:

$$T = \frac{Q.W(u)}{4\pi.s}$$

Donde Q es el caudal constante de bombeo ($m^3/día$); $W(u)$ la función “ u ” del pozo, determinada por la curva patrón de Theis, que corresponde al integral exponencial:

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots$$

Hay que tener presente que el abatimiento “ s ” es la diferencia entre el nivel dinámico (ND) y el nivel estático (NE) de un pozo, $s = ND - NE$.

La transmisividad por el método de Jacob se calculó de acuerdo a la ecuación:

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi.\Delta s}$$

Donde Δs es la pendiente de la recta. Representa la diferencia de abatimiento (m) entre dos valores del tiempo, cuya relación sea de 10 en la escala “ x ” (un ciclo logarítmico). Este parámetro se calcula como $\Delta s = s_2 - s_1$.

El coeficiente de almacenamiento por el método de Theis, se determinó a través de la ecuación:

$$S = \frac{4u.T.t}{r^2}$$

Donde S es el coeficiente de almacenamiento; u variable que se determinó por la curva patrón de Theis; T la transmisividad ($m^2/día$); t el tiempo transcurrido desde que se inicia el bombeo (días) y r la distancia desde el pozo de observación al pozo de bombeo (m).

Con la aplicación del método de Jacob, el coeficiente de almacenamiento se obtuvo a partir de:

$$S = \frac{2.25.T.t_0}{r^2}$$

Donde t_0 es el valor que se obtiene en el gráfico semilogarítmico al intersectar la recta abatimiento-tiempo en el eje de abatimiento igual a cero en días.

La conductividad hidráulica (K), según Herrera y Orozco (2010) se determinó con la relación:

$$K = T/b.$$

Donde b , es el espesor del acuífero

La generación de los mapas hidrogeológicos finales, se realizó mediante el traslape de los mapas temáticos de hipsometría, de geología y de las características hidráulicas de los

acuíferos a escala 1:100,000, elaborados con sistemas de información geográfica (SIG), utilizando los programas ARC MAP 10.3® y AUTOCAD 2009®.

La transmisividad en m^2/d se clasifico como: alta mayor de 1,000; media de 100 a 1,000; baja de 10 a 100 y muy baja de 1 a 10.

La permeabilidad en m/d se agrupo como: alta mayor de 10^3 ; media de $1 - 10^3$; baja de $10^{-2} - 1$; muy baja de $10^{-4} - 10^{-2}$; e impermeable menor de 10^{-4} .

El tipo de acuífero fue definido por el valor del coeficiente de almacenamiento, que en acuíferos libres varía de 0.01 a 0.4 (1 a 40 % de porosidad eficaz), mientras que en acuíferos confinados, el intervalo más frecuente es de 10^{-5} a 10^{-3} y en los acuíferos semiconfinados se presentan valores de 10^{-2} (Escuder et al, 2009).

Las producciones de los caudales en L/s se clasifican en: enormes si son mayores de 100; muy grandes de 50 a 100; grandes de 25 a 50; moderadas de 10 a 25; pequeñas de 4 a 10; muy pequeñas de 1 a 4; y escasas menores de 1 (Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, 2000).

Los instrumentos a utilizados fueron: mapas geológicos, fotografías aéreas para la fotogeología con estereoscopio de espejos, brújula, aparatos de sistemas de posicionamiento global (GPS), pozos de agua, sonda eléctrica, cronómetro y computadora.

3.4 Operacionalización de las variables o unidades de análisis

Tabla 1

Operacionalización de variables o unidades de análisis

Objetivo	Variable	Definición teórica de la variable	Definición operativa	Técnica	Instrumento	Escala de medición
Caracterizar los acuíferos volcánicos de Guatemala	1. Transmisividad (T)	Capacidad de un medio para transmitir agua a través de una franja vertical del acuífero de ancho unitario y de altura igual al espesor saturado	1.1 Alta, valores mayores a 1,000 1.2 Media, valores de 100 – 1,000 1.3 Baja, valores de 10 – 100 1.4 Muy baja, valores de 1 – 10 1.5 Nula, no hay T	Recopilación de información y pruebas de bombeo de pozos con toma de niveles	- Pozos de agua - Sonda eléctrica - Cronómetro - GPS	m ² /d
	2. Conductividad hidráulica o permeabilidad (K)	Volumen de agua que se mueve a través de un medio poroso en una unidad de tiempo bajo un gradiente hidráulico a lo largo de una unidad de área	2.1 Alta > 10 ³ 2.2 Media 1 – 1,000 2.3 Baja 10 ⁻² - 1 2.4 Muy baja 10 ⁻⁴ – 10 ⁻¹ 2.5 Impermeable < 10 ⁻⁴	Indirectamente por la relación $K = T/b$ Donde b es el espesor acuífero	Computadora (calculadora)	m/d
	3. Coeficiente de almacenamiento (S)	Volumen de agua liberado por una columna del acuífero de altura igual al espesor del mismo y de sección unitaria, al disminuir la presión una unidad	3.1 Libre con valores 0.01– 0.35 3.2 Confinado con valores 10 ⁻⁶ – 10 ⁻³	Recopilación de información y pruebas de bombeo de pozos y toma de niveles	- Pozos de agua - Sonda eléctrica - Cronómetro - GPS	Adimensional
Elaborar los mapas hidrogeológicos	1. Unidades hidrogeológicas	Formación geológica con poros o vacíos intergranulares o bien con fracturas o grietas, que contiene agua y puede transmitirla para poder captarla o explotarla	1.1 Poroso, flujo a través de gravas y arenas 1.2 Fisurado, flujo a través de rocas consolidadas con fracturas	- Observación e identificación litológica de campo - Construcción de perfiles hidrogeológicos - Uso de SIG	- Mapa geológico - Fotografía aérea - GPS - Brújula - Litología de perforación - Computadora	1:100,000
	2. Curvas equipotenciales	Valores de prof. del agua subterránea bajo el nivel del terreno y referidos al nivel del mar	2.1 Isofreáticas (acuífero libre) 2.2 Isopiezas (acuífero confinado)	- Observación y medición del nivel de pozos en el campo - Uso de SIG	- Sonda eléctrica - Computadora	Metros
Difundir la información hidrogeológica de acuíferos volcánicos	Resultados de la investigación en documentos y mapas	Presentación y publicación en medios locales e internacionales	- Congresos - Seminarios - Revistas	- Discusión y análisis de los resultados de la investigación - Entrevistas con expertos	- Material didáctico - Mapas - Audio-visuales	- Número de personas asistentes a los eventos - Número de instituciones y personas que consultan resultados

4. Resultados y Discusión

4.1 *Acuíferos volcánicos de Guatemala*

En Guatemala se presentan dos terrenos geológicos distintos: al norte las rocas metamórficas y sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico, y al sur principalmente rocas ígneas recientes del Terciario y Cuaternario. Esta geología esta en correspondencia a dos placas tectónicas: la de Norteamérica al norte y la del Caribe al sur, las cuales están separadas por los sistemas de fallas de Motagua, Chixoy-Polochic y Jocotán, correspondiendo esta región al cinturón plegado metamórfico que separa el Bloque Maya al norte o placa Norteamericana y el Bloque Chortis o placa Caribe al sur (Herrera, 2011).

Las rocas más antiguas son metamórficas que incluyen: esquistos, filitas y gneises, las cuales forman el basamento, abarcando edades desde el Paleozoico hasta Mesozoico, aflorando principalmente en el valle del río Motagua. Al norte de Guatemala se observan rocas del Mesozoico y Cenozoico, de tipo sedimentarias detríticas como areniscas y limolitas depositadas sobre una plataforma marina somera del Cretácico, así como depósitos calcáreos en amplios espesores. Al sur del país se localizan los centros eruptivos volcánicos Terciarios y Cuaternarios.

La región volcánica presenta principalmente rocas basálticas, andesíticas, riolíticas y dacíticas en la base que comúnmente se denominan lavas, sobreyacidas por materiales como arenas, bombas, escorias, cenizas y lahares, con espesores de más de 500 m.

Los acuíferos están constituidos por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias, principalmente lavas y tobas, las cuales se encuentran sobre un basamento levantado y formado por rocas ígneas intrusivas, rocas calcáreas y rocas metamórficas. En el basamento se han originado depresiones tectónicas rellenas por depósitos piroclásticos de pómez cuaternarios, que forman planicies y valles, que se extienden del noroeste al sureste del país, en una franja de 350 Km (Koch y McLean, 1975).

Los acuíferos volcánicos se subdividen en unidades hidrogeológicas de piroclastos de pómez y lavas recientes del período Cuaternario, y lavas antiguas y sedimentos del Terciario.

En la Figura 2 se presenta la geología de Guatemala y la región volcánica con las ciudades que se asientan sobre los principales acuíferos volcánicos del país, que se pueden agrupar en tres zonas:

Acuíferos de la zona central: Ciudad Guatemala, Chimaltenango y Antigua Guatemala.

Acuíferos de la zona occidental: San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Santa Cruz del Quiché y Sololá.

Acuíferos de la zona oriental: Cuilapa, Jalapa, Jutiapa e Ipala.

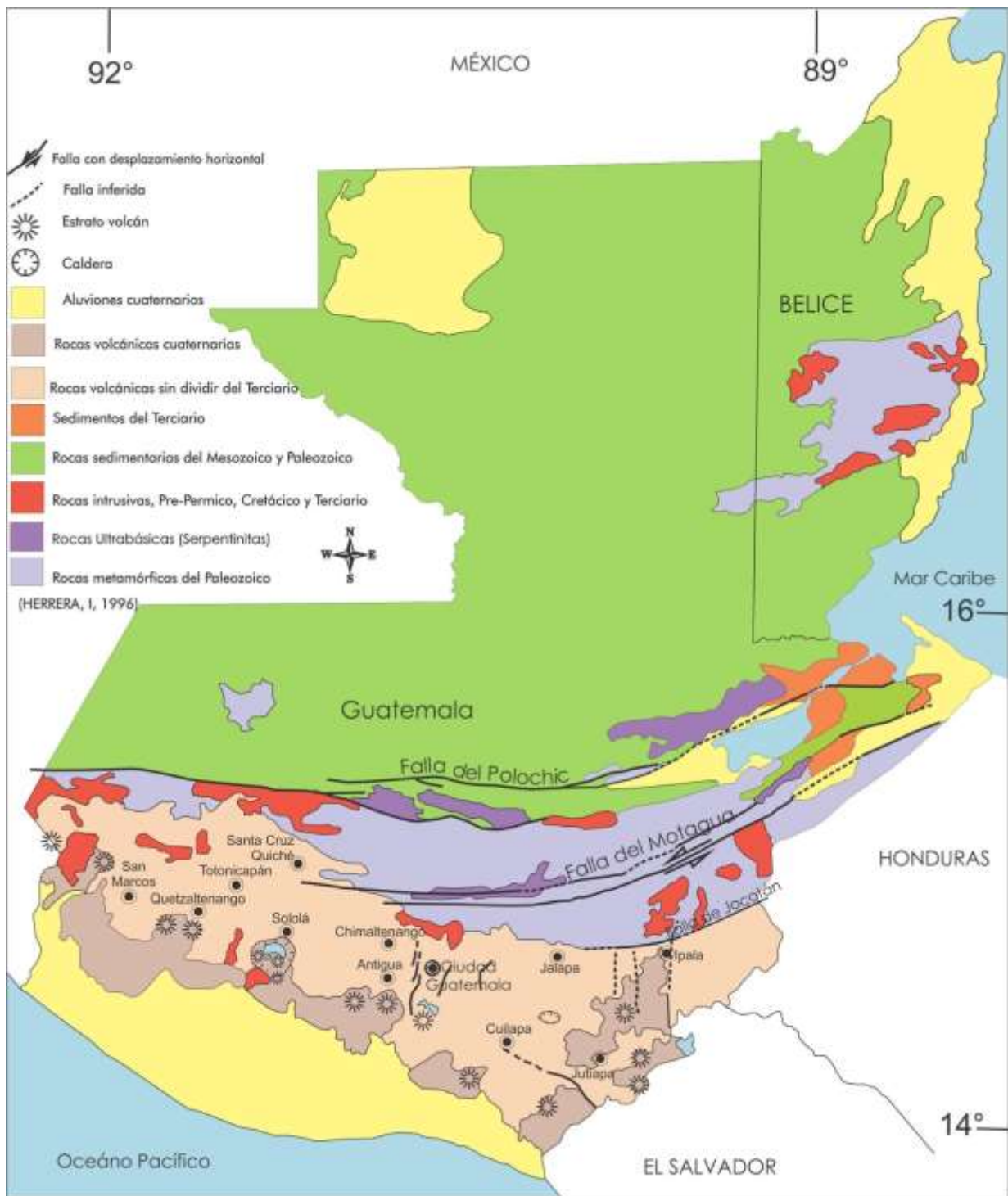


Figura 2. Geología de Guatemala con las principales ciudades de la región volcánica.

Acuíferos volcánicos de la zona central de Guatemala

Acuíferos de ciudad Guatemala

La ciudad de Guatemala actualmente se abastece de agua por medio de fuentes subterráneas y aguas superficiales. Las aguas subterráneas representan más de la mitad del abastecimiento de agua potable actual, entregado por la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA), las cuales han sido explotadas por más de cuarenta años.

La ciudad se asienta en el llamado “Valle de Guatemala”, que geológicamente es un graben o fosa tectónica, delimitado al este y oeste por el horst de Santa Catarina Pinula y el horst de Mixco respectivamente.

Las cuencas hidrogeológicas corresponden en gran medida a las hidrográficas, por condiciones de simetría hidráulica y paralelismo geomorfológico, por lo que, se separan por cuenca norte o del río Las Vacas (180 km²), cuenca noreste de los ríos Los Ocotes - Teocinte (198.72 km²), y por cuenca sur o del río Villalobos (346.36 km²), con un total de 725.08 km².

El límite entre las cuencas lo constituye el parte aguas continental (Pacífico/Atlántico), de orientación noroeste a sureste que presenta un relieve tectónico alto con elevaciones entre 1,500 a 1,600 msnm en la parte central. Mientras que en las partes al noreste y noroeste las elevaciones son mayores de 2,000 msnm.

Las cuencas noreste y sur del valle de ciudad Guatemala, comprenden principalmente rocas volcánicas que forman un acuífero importante para las poblaciones del área. Sin embargo, el acuífero norte está constituido principalmente por rocas carbonatadas y rocas intrusivas, presentando características diferentes.

4.1.1 Acuífero del valle sur de ciudad Guatemala

El límite norte de este acuífero lo forma la divisoria continental desde la Calzada Roosevelt al oeste, El Trébol al centro, a lo largo de la Avenida Los Próceres hasta Puerta Parada al este, con elevaciones de 1,530 msnm en su parte central. El límite oeste del acuífero se presenta en el Cerro Las Limas con 2,200 msnm, Cerro El Astillero con 2,374 y Montaña Carmona con 2,430 msnm. El límite este se presenta en Puerta Parada, Don Justo y Canchón en Santa Catarina Pinula y la Cumbre de San Nicolás con elevaciones alrededor de 1,900 msnm. Los puntos más bajos son de 1,200 msnm y los definen las orillas del Lago de Amatitlán al sur.

La pendiente se orienta en general de norte a sur y varía de 8 a 14 % en las partes altas y de 1 a 4 % en las partes bajas.

Este acuífero se conoce como el valle sur de ciudad Guatemala y es donde se localizan las zonas 7, 11, 12, 13, 14 y 21 del municipio de Guatemala, así como, Mixco, Ciudad San Cristóbal, Villa Nueva, San Miguel Petapa, Villa Canales y Santa Catarina Pinula.

La cuenca hidrográfica corresponde al río Villalobos que tiene como afluentes principales a los ríos: Pinula, Las Minas, Tulujá, El Bosque, Molino, San Lucas, El Arenal, Parrameño y Platanitos. El río Villalobos fluye hacia en el Lago de Amatitlán, que drena al río Michatoya y este al río María Linda que desemboca en la Vertiente del Océano Pacífico.

El área de la cuenca es de 346.364 Km² y sus coordenadas geográficas son de 14.455 a 14.6764 grados de latitud norte y 90.4516 a 90.6863 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM, son de 11598,505 m a 11622,855 m de latitud norte y 505,217 m a 479,938 m de longitud este. Esta área se encuentra conformada por dos acuíferos, uno superior y el otro inferior.

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

El acuífero superior en piroclastos de pómez, tiene diferentes tamaños granulométricos, predominando las gravas y las arenas, con espesores que varían desde pocos metros hasta más de 250 m, con espesores saturados de 10 a 70 m, con un promedio de 38 m (INSIVUMEH, 1978). En la parte sur del área, se localiza el acuífero superior en los depósitos aluviales de los ríos Villalobos y Pinula, los cuales ocupan una superficie de 57.5 Km², con espesores entre 39 a 110 m. Los sedimentos depositados en el delta del río Villalobos al norte del Lago de Amatitlán, ocupan un área de 16.7 Km² y tienen un espesor de 145 m (INSIVUMEH, 1978).

Los valores de transmisividad son medios para los piroclastos de pómez, que varían de 50 a 750 m²/día y para los sedimentos aluviales del río Villalobos es media a alta con valores de 150 a 2,000 m²/día (Herrera y Orozco, 2010).

El acuífero inferior se presenta en rocas volcánicas fracturadas de dacitas, andesitas y tobas, con un espesor saturado mayor de 300 m. En las partes altas de la cuenca desde San Lucas a Barcenás, El Trébol a Ciudad Real y Santa Catarina Pinula a Boca del Monte, la transmisividad varía de 500 a 800 m²/día. Mientras que en las partes bajas en Villa Nueva, alrededores de Ojo de Agua, Petapa y Villa Canales, la transmisividad presenta rangos de 500 a 5,000 m²/día (INSIVUMEH, 1978). En el sector de Ojo de Agua, los valores de transmisividad oscilan entre 1,600 a 9,500 m²/día en los pozos de Ojo de Agua y entre 22 a 1,300 m²/día en el sector El Diamante (Herrera y Orozco, 2010).

Las transmisividades en las partes altas de la cuenca, definen un acuífero de mediana a buena

producción de agua. Mientras que en las partes bajas el acuífero es altamente productor.

La explotación del agua subterránea oscila entre 6 a 230 L/s por pozo, de acuerdo al uso del pozo, siendo principalmente para agua potable. Los pozos de EMPAGUA en los sectores de Ojo de Agua y El Diamante extraen de 134 a 230 L/s cada pozo (Herrera y Orozco, 2010).

El campo de pozos Ojo de Agua debe su nombre al manantial que producía un caudal de 516 a 244 L/s, por lo que, al inicio de su explotación en el año 1976, los niveles estáticos estaban muy cercanos a la superficie del terreno. En el caso del pozo Ojo de Agua 2, el nivel se encontraba a una cota superior a la boca del pozo o sea como surgente.

El campo de pozos Ojo de Agua anteriormente tenía 9 pozos, actualmente tiene 13 pozos. Mientras que el campo de pozos El Diamante inicialmente tenía 9 pozos, pero se han abandonado 4 pozos. El agua de los pozos de estos dos sectores se almacena en un tanque circular y luego el agua pasa por la casa de máquinas como se muestra en la Figura 3, que bombea hacia El Trébol donde es distribuida por gravedad.

En la cuenca se asume que existen actualmente más de 500 pozos, de acuerdo al El Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar y The Nature Conservancy (IARNA-URL y TNC) en 2012.



Figura 3. Tanque circular y casa de máquinas del sector Ojo de Agua.

Conductividad hidráulica

Los piroclastos de pómez tienen permeabilidad primaria, la cual es en general media de 1.3 a 20 m/d, debido a la presencia de abundante material fino y a su compactación misma.

Los sedimentos aluviales están compuestos de cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas, con permeabilidades medias entre 3.8 a 14 m/d, clasificándose el acuífero como regular a bueno. Las lavas dacíticas y andesíticas conjuntamente con algunas capas de tobas vítricas soldadas, forman el acuífero inferior con permeabilidades medias de 1.7 a 32 m/d. Esta permeabilidad es secundaria y alcanza valores altos en las áreas que poseen fracturación intensa y profunda.

Coefficiente de almacenamiento

En el acuífero superior el agua subterránea se encuentra en su mayor parte bajo condiciones libres y presenta valores de coeficiente de almacenamiento de 0.09 a 0.35 para los depósitos piroclásticos y de 0.20 para los depósitos aluviales (INSIVUMEH, 1978).

El acuífero inferior tiene condiciones de confinamiento, por algunas capas de cenizas volcánicas y sedimentos finos, así como, capas de rocas volcánicas consolidadas los cuales funcionan como acuicludos y acuitardos. El coeficiente de almacenamiento en lavas fracturadas es de 8×10^{-3} (Herrera y Orozco, 2010).

Considerando que este acuífero tiene un espesor medio de 200 m y una extensión de 346.364 Km², el volumen del acuífero es de 69 Km³. Si en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 25 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $17,250 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento en lavas es de 8×10^{-3} , resultando que al hacer descender en 1 m el nivel del agua del acuífero, se dispondría de aproximadamente 138 millones de m³ de agua.

Comparando esta disponibilidad de 138 millones de m³ de agua con la extracción del agua subterránea en la cuenca del río Villalobos de 191.2 millones de m³ por año (IARNA-URL y TNC, 2012), resulta que en este acuífero existe una sobre-extracción de 53.2 millones de m³ por año, sin considerar la recarga hídrica. Esto se ha comprobado por el descenso de los niveles estáticos del acuífero de aproximadamente 1 m/año en los sectores de Ojo de Agua y El Diamante desde el año 1976.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas del área se presentan en la Figura 4, donde se incluyen a las rocas volcánicas fracturadas, los piroclastos de pómez y los aluviones del río Villalobos.

Las rocas volcánicas están constituidas por dacitas, andesitas y tobas soldadas del Terciario con espesores mayores de 500 m, siendo los materiales que forman la zona saturada y un medio fisurado o formación de rocas con fracturas. Mientras que la zona no saturada está constituida principalmente por piroclastos del Cuaternario, como se muestra en los perfiles hidrogeológicos de las Figuras 5 y 6. En la parte sur del área del río Villalobos, los sedimentos fluvio lacustres y los aluviones del río, están saturados y constituyen un acuífero superior freático.

Red de flujo de aguas subterráneas

El valle de Guatemala es un graben o fosa tectónica, por lo que el flujo subterráneo presenta un control estructural de las partes altas a las partes bajas de la caldera del Lago de Amatitlán que se localiza al sur del área.

Al norte de la cuenca, los niveles estáticos son de más de 100 m bajo la superficie de los terrenos con altitudes mayores de los 1,500 msnm, es decir, los niveles son de 1,440 msnm. En las partes bajas en San Miguel Petapa con altitud de 1,250 msnm, la isopieza es de 1,225 msnm, como se observa en la Figura 7.

Los principales flujos de aguas subterráneas provienen del oeste y tienen su recarga en los alrededores de Mixco, los cerros Alux, El Astillero y Montaña Carmona, con valores de niveles estáticos de 1,600 a 1,700 msnm. El otro flujo de aguas subterráneas (menor que el primero), se recarga en las partes montañosas de Santa Catarina Pinula y Cumbre de San Nicolás, donde se presentan niveles estáticos de 1,600 a 1,800 msnm. Ambos flujos se unen en el sector de Ojo de Agua y San Miguel Petapa, representando una zona de descarga de flujo subterráneo.

Herrera y Orozco (2010), compararon la variación de los niveles estáticos del agua subterránea en cuatro pozos de Ojo de Agua entre 1976 y 1996, y cuatro pozos en El Diamante entre los años 1968, 1970 y 1976 hasta el año 1996, concluyendo que en 20 años existió un descenso de nivel de 9 m en el sector Ojo de Agua, es decir, 0.45 m/año. Mientras que en el sector de El Diamante los niveles descendieron un promedio de 25.5 m en 27 años, equivalente a 0.94 m/año. Sólo el pozo El Diamante 7, que se encuentra más próximo al río Villalobos, tuvo un descenso del nivel estático de 9.1 m en 20 años.

De acuerdo a los datos de niveles estáticos de los pozos de Ojo de Agua medidos en el año 2009, la variación promedio del nivel estático es de 24 m, es decir, 0.73 m/año. Actualmente, se considera que los niveles descienden un promedio de 1 m/año.

Los pozos en la cuenca presentan profundidades de perforación de 121 hasta 600 m. La mayoría de pozos son mecánicos, con diámetros de encamisado de 8, 10, 12 y 20 pulgadas.

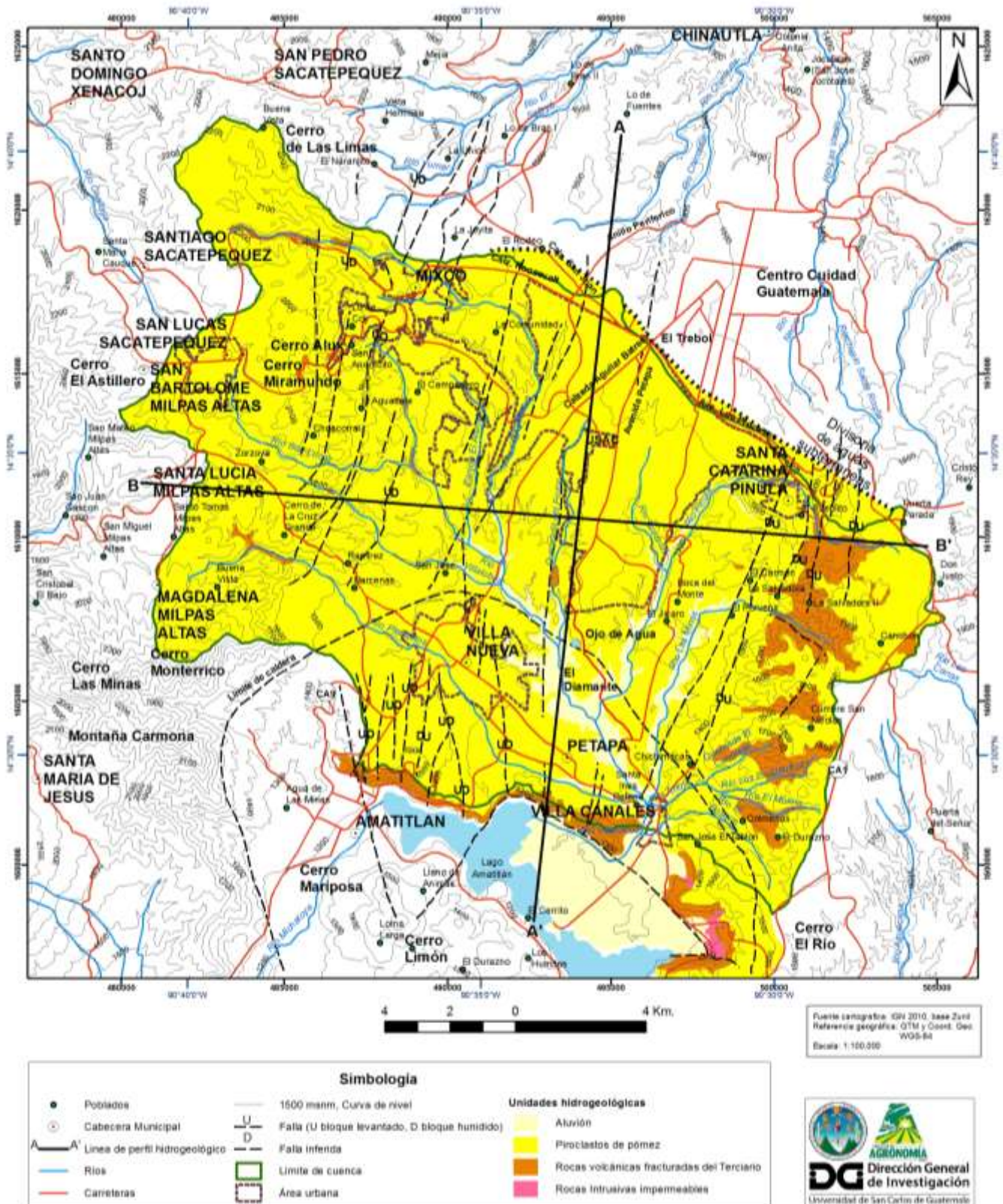


Figura 4. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero del Valle Sur de Ciudad de Guatemala

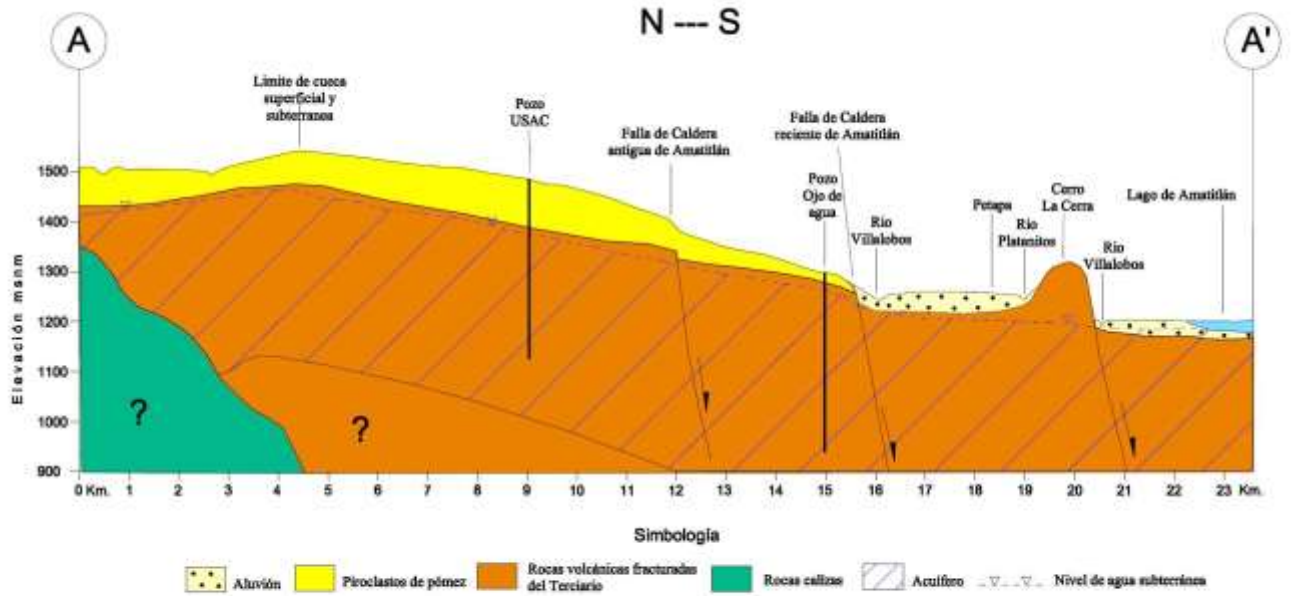


Figura 5. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero del valle sur de ciudad Guatemala.

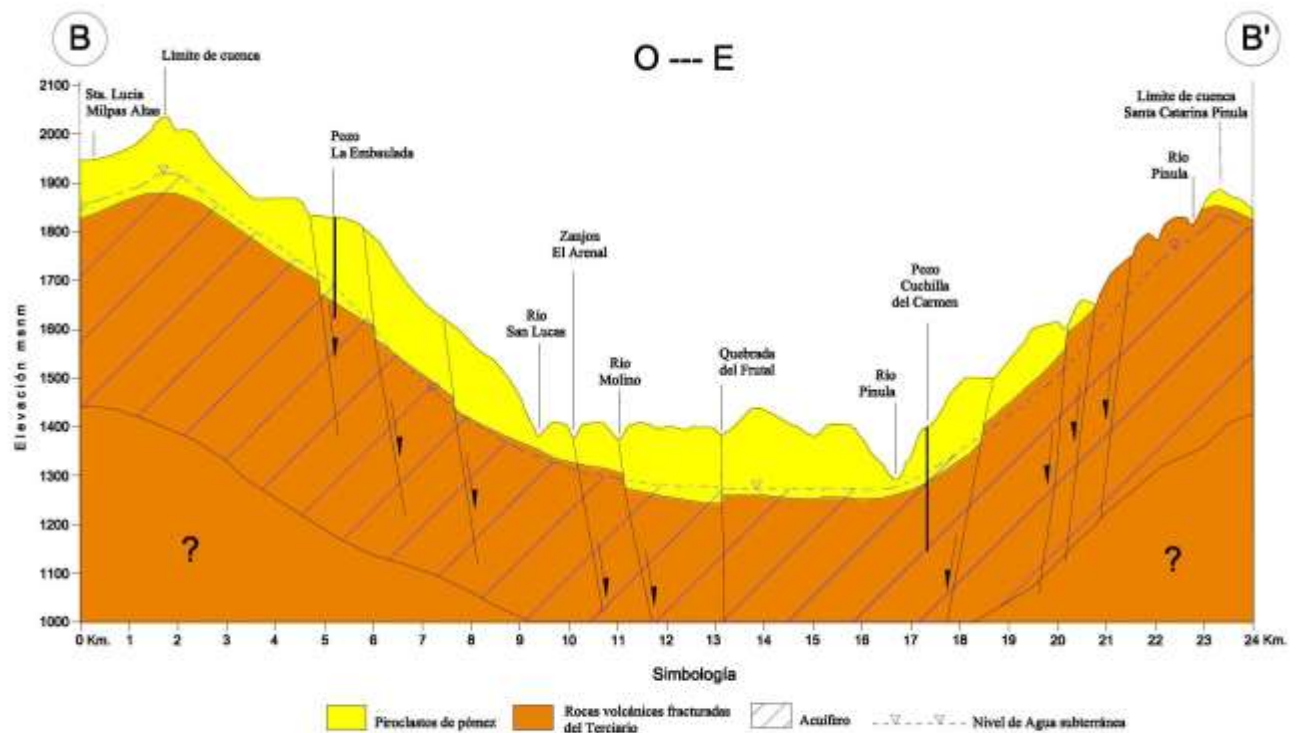


Figura 6. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero del valle sur de ciudad Guatemala.

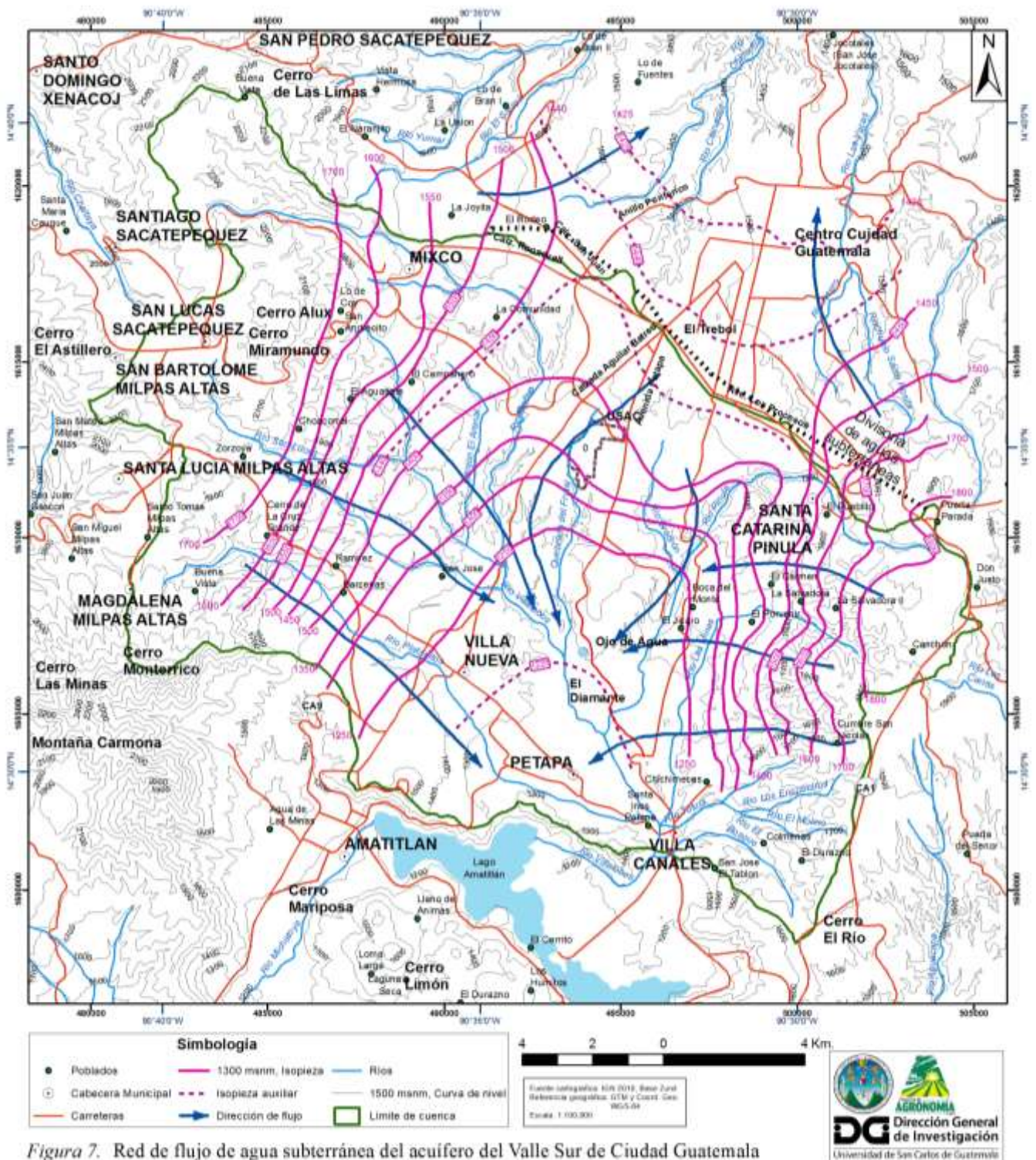


Figura 7. Red de flujo de agua subterránea del acuífero del Valle Sur de Ciudad Guatemala

figura 7

4.1.2 Acuífero noreste de ciudad Guatemala

Este acuífero está delimitado en la parte norte por la falla del río Las Cañas, con el levantamiento de las calizas cretácicas en la zona 18. Al este la Sierra de Palencia de composición granítica constituye una barrera negativa. Mientras que al sureste las montañas La Ventana y Las Nubes, así como, los cerros El Clavillo y El Cañón definen su límite. En la parte oeste el sistema de fallas gravitacionales del horst de Santa Catarina Pinula con una orientación de norte a sur, separan al acuífero del acuífero sur de ciudad Guatemala.

Este acuífero corresponde con la cuenca hidrográfica de los ríos Los Ocotes - Teocinte y se localiza en las zonas 15, 16, 17, 18 y 24 del municipio de Guatemala y parte de Santa Catarina Pinula, San José Pinula y Palencia.

Los ríos Los Ocotes y Teocinte son afluentes del río Las Cañas, que toma el nombre de río Plátanos en San José del Golfo antes de unirse al río Motagua que drena hacia la Vertiente del Caribe. Las coordenadas geográficas de la cuenca son de 14.5184 a 14.6996 grados de latitud norte y de 90.3337 a 90.4752 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 11605,387 m a 11625,427 m norte y 502,671 a 517,910 m este.

El área de la cuenca es de 198.72 km², con un valor de pendiente media de la cuenca de 12 % y una elevación media de 1,638 msnm (Herrera, 2012).

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

El acuífero se encuentra en rocas volcánicas fracturadas de tobas soldadas como se observan en la Figura 8, con un espesor saturado mayor de 200 m.

En la parte media de la cuenca, en el poblado de Los Ocotes, se tienen transmisividades altas de 1,190 a 1,222 m²/día (Herrera, 2012). Mientras que en las partes altas de la cuenca la transmisividad es baja, como en Santa Catarina Pinula donde se presentan valores de 70 m²/día (Manzo, 2008).

Las transmisividades en las partes altas de la cuenca, definen un acuífero de baja producción de agua. Mientras que en las partes medias y bajas el acuífero es moderadamente productor.

La explotación del agua subterránea oscila entre 5 a 40 L/s por pozo, considerándose las producciones como pequeñas a grandes.

Los bombeos en los pozos de EMPAGUA son continuos y trabajan 24 horas por día (Herrera, 2012).

En la cuenca se identificaron 60 pozos, sin embargo, se asume un total de 100 pozos.



Figura 8. Rocas volcánicas fracturadas de tobas.

Conductividad hidráulica

Las capas de tobas soldadas, presentan diferentes grados de fracturación y tienen valores de permeabilidades bajos a medios de 0.5 a 10 m/d, clasificándose el acuífero como regular a bueno. Esta permeabilidad es secundaria y la porosidad media se calcula alrededor de 10 %, ya que la fracturación a pesar de ser intensa, es poco abierta.

Coefficiente de almacenamiento

El acuífero se encuentra sobreyacido por depósitos piroclásticos y capas de ceniza volcánica, lo que le da características de semiconfinamiento, con un coeficiente de almacenamiento es de 2.7×10^{-2} (Herrera, 2016).

Considerando que este acuífero tiene un espesor medio de 200 m y una extensión de 198.72 Km², el volumen del acuífero es de 39.74 Km³. Si en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 10 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $3,974 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento de 2.7×10^{-2} , supone que el acuífero disponga de aproximadamente 107.3 millones de m³ de agua.

El IARNA-URL y TNC en 2012 calcularon que la extracción del agua subterránea en la cuenca de los ríos Teocinte y Los Ocotes es de 30 millones de m³ por año, resultando que en este acuífero existe un alto potencial de explotación de 77.3 millones de m³ por año o 2.44 m³/s, sin considerar la recarga hídrica.

Esto se ha comprobado en dos pozos del sector de El Jagüey en Canalitos entre los años 2010 a 2016, donde los niveles estáticos del acuífero se han mantenido similares, con fluctuaciones de pocos centímetros.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

La hidrogeología de la cuenca se presenta en el mapa de unidades hidrogeológicas en la Figura 9 y los perfiles hidrogeológicos A – A´ y B – B´ en las Figuras 10 y 11, donde se observan las rocas volcánicas fracturadas del Terciario, constituidas por tobas soldadas vítricas y lavas andesíticas basálticas con espesores mayores de 500 m, formando una zona saturada mayor de 200 m. Mientras que la zona no saturada está constituida principalmente por piroclastos del Cuaternario, con espesores de 80 a 120 metros en las partes norte y sur del área.

En las partes al este y oeste de la cuenca, en Piedra Parada y El Rincón respectivamente, se presentan cuerpos intrusivos que constituyen acuifugos o barreras negativas.

El fallamiento en el área es muy importante, ya que las rocas están altamente fracturadas y es por donde circula el agua subterránea, llegando a formar un medio fisurado.

Red de flujo de aguas subterráneas

La principal dirección de flujo de agua subterránea es de sur a norte, con cierta tendencia hacia el noreste como se observa en la Figura 12, es decir, de las partes altas hacia las partes bajas de la cuenca descargando en el río Las Cañas.

El acuífero se encuentra definido por la estructura geológica de fallas que se orientan con rumbo NE-SO y N-S del sistema de fallas de Santa Catarina Pinula, San José Pinula y río Teocinte que forman un graben a lo largo del río Teocinte.

Otro flujo de agua subterránea se presenta al este de la cuenca en el sistema montañoso de la Montaña Las Nubes y la Sierra de Palencia con dirección de sureste a noroeste.

La profundidad de las aguas subterráneas oscila entre 8 a 25 m en la parte baja de la cuenca, con valores de isopiezas de 1,250 a 1,300 msnm. En las partes medias y altas de la cuenca, los niveles estáticos son hasta de 250 m bajo la superficie del terreno, como en Hacienda Real de la zona 17, donde los valores de las isopiezas varían de 1,700 a 1,800 msnm.

Los pozos en el área presentan profundidades de perforación de 91 hasta 427 m, teniendo los pozos de EMPAGUA profundidades alrededor de los 400 m.

La mayoría de pozos son perforados, con diámetros de encamisado de 8, 10 y 20 pulgadas con tubería metálica.

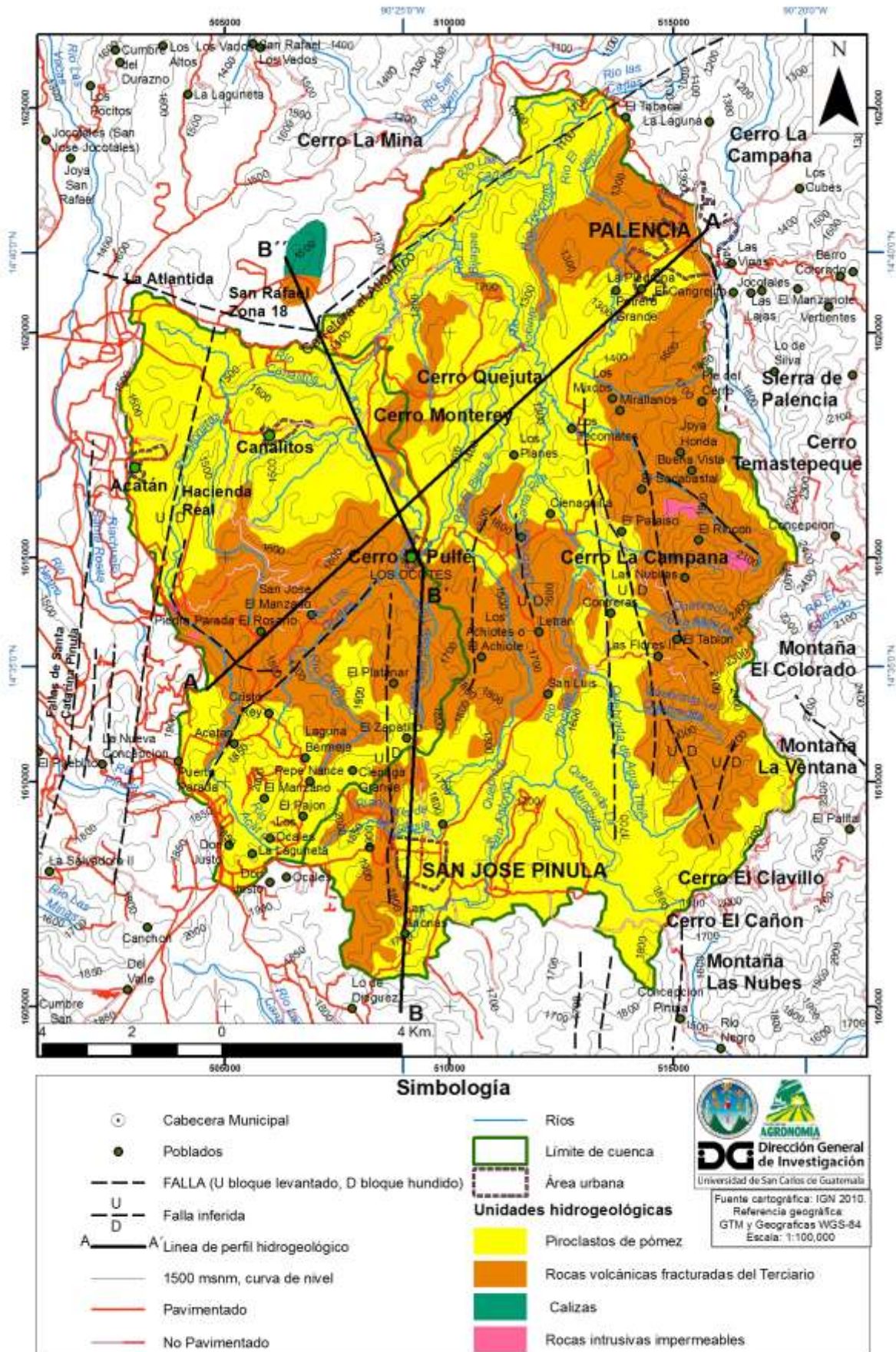


Figura 9. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero noreste de Ciudad Guatemala

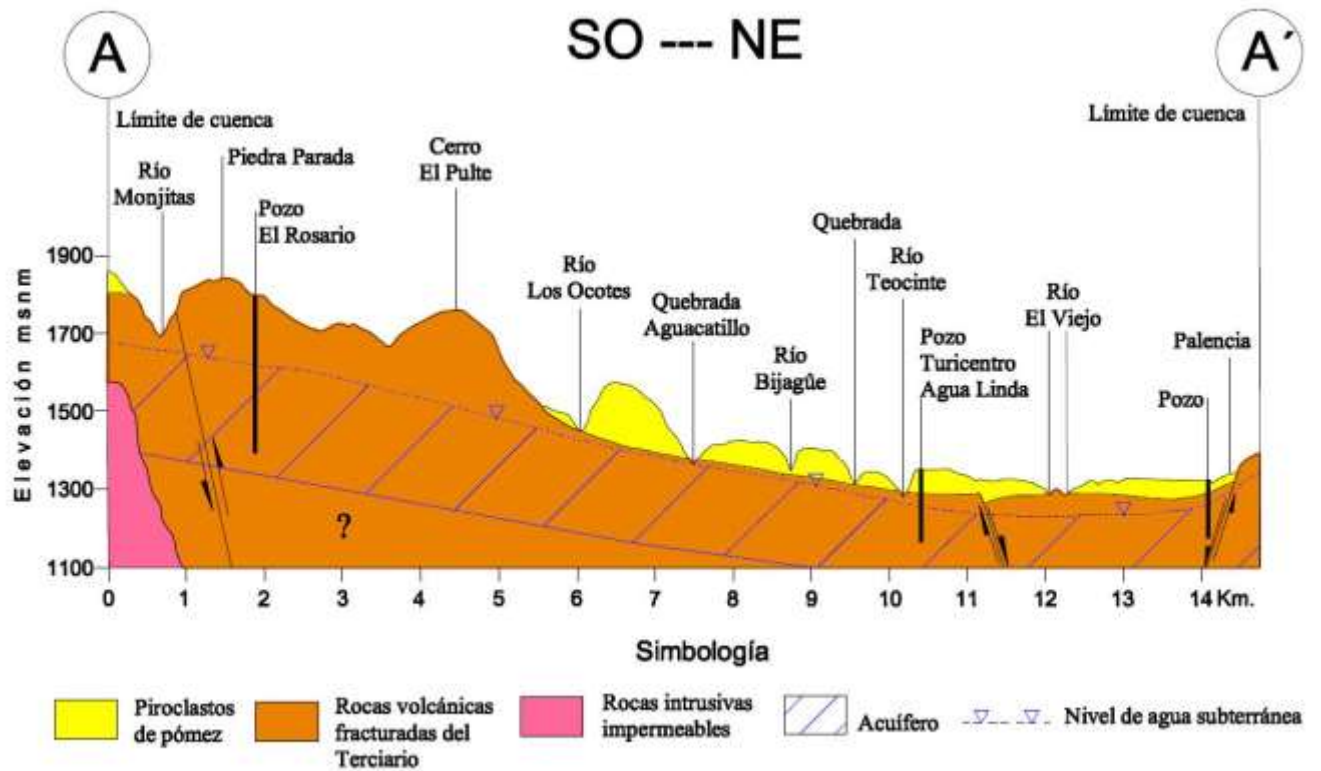


Figura 10. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero noreste de ciudad Guatemala.

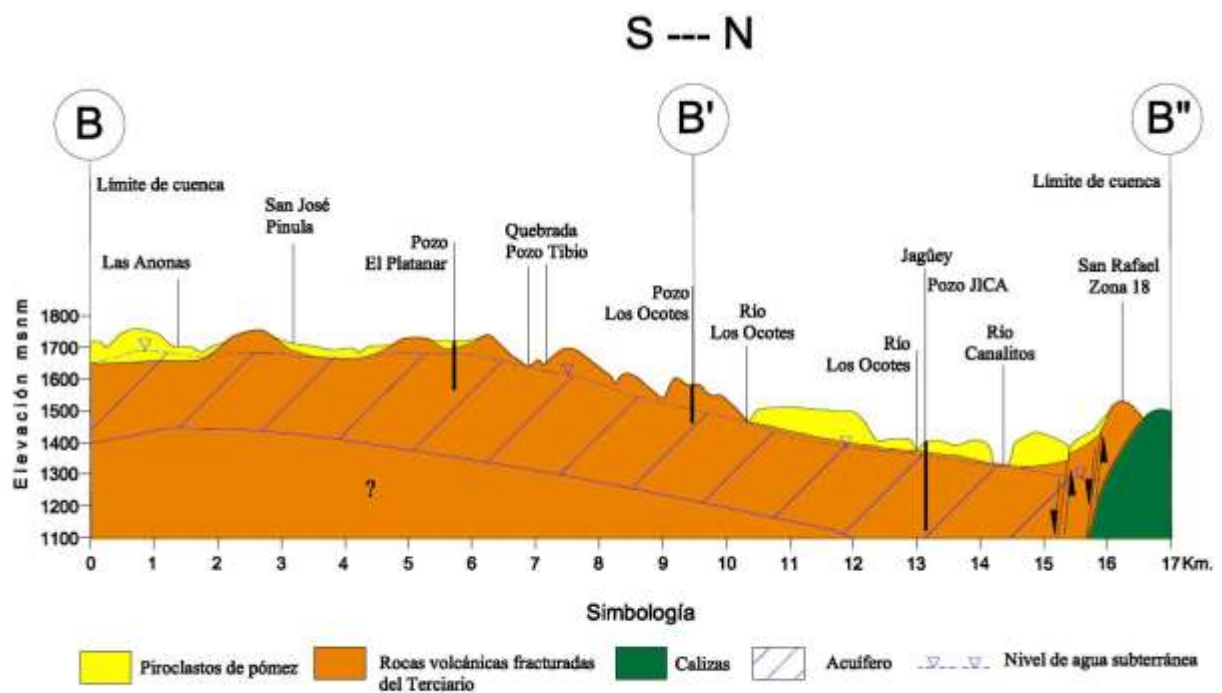


Figura 11. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero noreste de ciudad Guatemala.

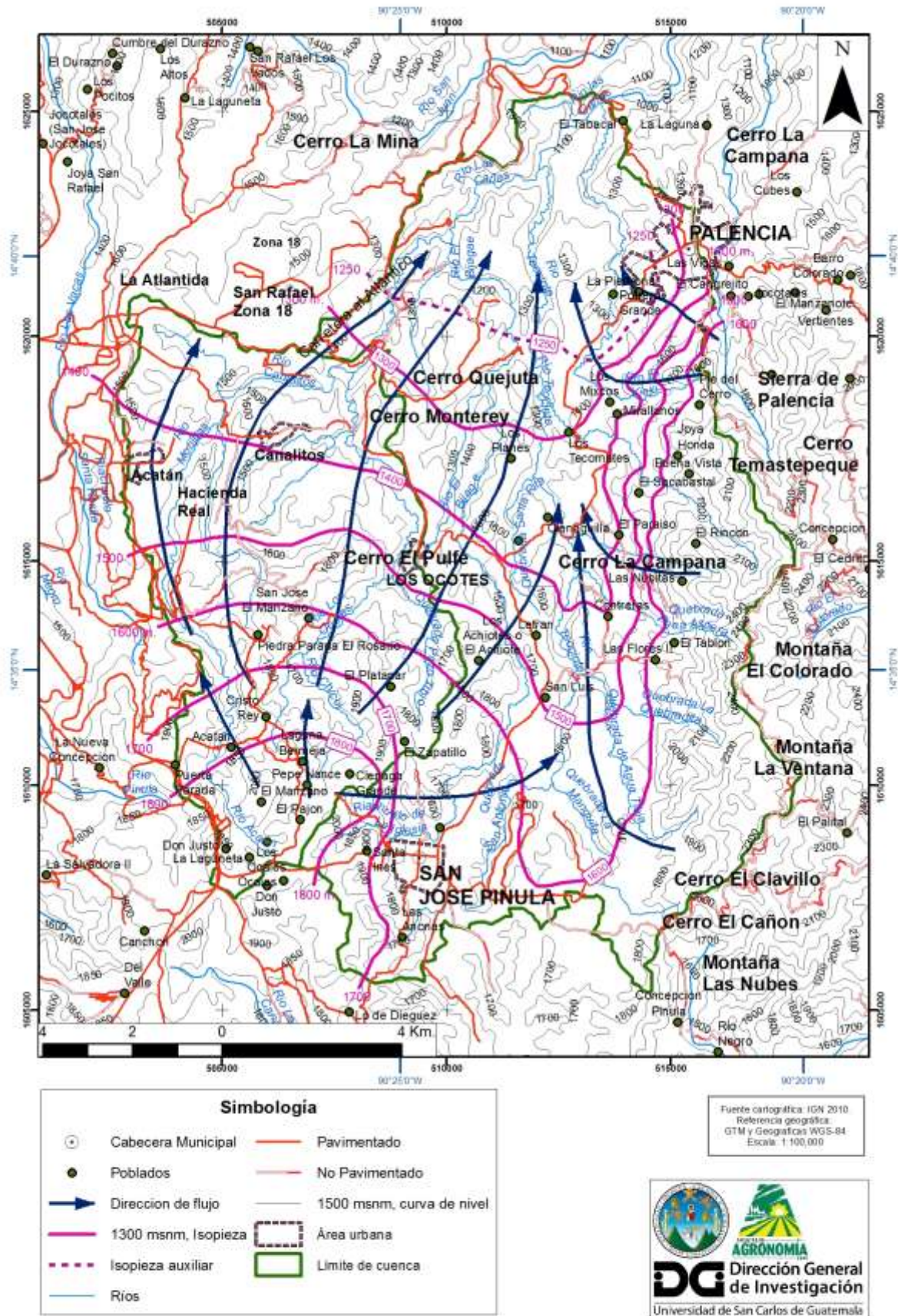


Figura 12. Red de agua subterránea del acuífero del noreste de Ciudad Guatemala.

4.1.3 Acuífero Chimaltenango

Este acuífero es explotado en el valle de Chimaltenango, El Tejar, San Andrés Itzapa, Parramos hasta Pastores, entre las cotas de 1,600 a más de 2,600 msnm.

Este acuífero coincide en gran medida con la cuenca alta del río Guacalate, con un área de 178.73 km² hasta Pastores. Sin embargo, la cuenca hidrogeológica se continúa hacia Antigua Guatemala.

Los límites naturales del área son: la Montaña El Soco (2,668 msnm) al oeste, Cerro Alto (2,627 msnm) al sur, Cerro El Portal (2,282 msnm) al sureste y Cerro El Rejón (2,525 msnm) al noreste.

La cuenca hidrográfica tiene como afluentes principales, a los ríos Itzapa, Negro, Chirijuya y Paso de San Luis, ubicados en el sur en la parte montañosa. Mientras que en la parte norte de la cuenca, se encuentra la planicie de Chimaltenango, El Tejar y Parramos. El cauce del río Guacalate tiene una orientación noroeste a sureste, siendo un río efluente desde el parque Los Aposentos, que constituye una zona de manantiales o salidas de aguas subterráneas (Herrera, 1998).

Dadas las características hidrográficas de la cuenca, el río ha erosionado la planicie y formado un valle, con pendiente suave de 3 %, que va de noroeste a sureste. Las partes planas presentan pendientes entre 0 a 4 %, mientras que los taludes del río, las pendientes son mayores del 50 %.

Las coordenadas geográficas de la cuenca son de 14.560 a 14.6765 grados de latitud norte y de 90.7082 a 90.9028 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 11610,025 m a 11622,885 m norte y 456,619 a 477,565 m este.

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

El acuífero se encuentra contenido principalmente en rocas volcánicas fracturadas con espesor saturado de más de 250 m, aunque en el valle de Chimaltenango y El Tejar se presentan piroclastos saturados entre 5 a 60 m.

La transmisividad es media para los piroclastos de pómez, que tienen valores de 100 a 800 m²/día.

Los valores de transmisividad en el área varían desde 1,000 hasta 6,000 m²/día, en Pastores y El Tejar respectivamente, clasificándose como transmisividad alta.

En el área del poblado de San Andrés Itzapa, se tienen transmisividades altas de 5,150 m²/día (Herrera, 1998).

Las transmisividades en la cuenca, definen un acuífero de moderada producción de agua.

La explotación del agua subterránea en la cuenca por medio de pozos mecánicos oscila entre 5 a 27 L/s por pozo, clasificándose como producción pequeña a moderada. Siendo los usos principalmente para agua potable y riego.

Los bombeos de los pozos no son continuos, por lo que en la mayoría de casos, trabajan un promedio de 50 a 85 horas semanales, a excepción de los pozos municipales que bombean las 24 horas del día.

En la cuenca se identificaron 50 pozos de agua, sin embargo, se asume que existen más de 65 pozos.

Conductividad hidráulica

Las capas de rocas volcánicas presentan diferentes grados de fracturación y tienen valores de permeabilidades medios de 16 a 28 m/d, clasificándose el acuífero como regular a bueno. Esta permeabilidad es secundaria, sin embargo, en algunos estratos superiores de piroclastos saturados se presenta un medio poroso con permeabilidad primaria.

Coefficiente de almacenamiento

El acuífero se encuentra sobreyacido por depósitos piroclásticos y capas de ceniza volcánica, lo que le da características de semiconfinamiento, con un coeficiente de almacenamiento es de 1.4×10^{-2} a 1.8×10^{-2} (Herrera, 1998).

Considerando que este acuífero tiene un espesor medio de 200 m y una extensión de 178.73 Km², el volumen del acuífero es de 35.75 Km³. Si en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 18 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $6,435 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento de 1.6×10^{-2} , supone que el acuífero disponga de aproximadamente 102.96 millones de m³ de agua.

Comparando esta disponibilidad de agua del acuífero con la explotación actual de 31.83×10^6 m³/año, se tiene un balance positivo de 71.1×10^6 m³/año, equivalente a un caudal de 2.25 m³/s que puede ser aprovechado adicionalmente.

De acuerdo a estas cifras, el recurso hídrico subterráneo se encuentra en un estado de desarrollo, donde las entradas naturales son mayores a las extracciones. Esto implica que el manejo del recurso hídrico es deseable y posible. Entonces, se tiene una sub-explotación del acuífero, del cual puede obtenerse mayor provecho en un futuro próximo, efectuando la extracción del recurso subterráneo temporal de una forma planificada y geográficamente bien distribuida, sin explotar las reservas permanentes.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

La hidrogeología de la cuenca se presenta en el mapa de unidades hidrogeológicas de la Figura 14 y los perfiles hidrogeológicos A – A´ y B – B´ en las Figuras 15 y 16, donde se observan las rocas volcánicas fracturadas constituidas por lavas andesíticas del Terciario, con espesores mayores de 500 m, formando una zona saturada de más 250 m. Mientras que la zona no saturada está constituida principalmente por piroclastos del Cuaternario, con espesores de 40 a 120 m, aunque en algunas partes se presentan espesores saturados de 5 a 60 m.

En la Figura 13 se observa un contacto entre los piroclastos de pómez de color beige sobreyaciendo a las lavas pardo grisáceas.



Figura 13. Piroclastos de pómez claro sobreyaciendo a las lavas oscuras.

Los afloramientos de andesitas son escasos y se observan solamente en la parte sureste, en los alrededores de Pastores. Sin embargo, su distribución es muy grande, localizándose en la mayoría de pozos perforados a más de 150 m de profundidad, en la planicie de Chimaltenango, Parramos y El Tejar.

Al oeste de la cuenca del río Guacalate y sobre las lavas terciarias, existe una unidad formada por riolitas y obsidias (perlita), que abarcan la subcuenca del río Itzapa y se encuentran aflorando en el nacimiento Xipacay y en la cascada de Puerta Abajo al noreste de Zaragoza. La importancia que tiene esta unidad de lavas, desde el punto de vista hidrogeológico, es que a través de fracturas circula el acuífero principal y profundo de la región.

También es importante indicar que estas rocas volcánicas, constituyen el basamento sobre el cual se depositaron una serie de eventos eruptivos de riolitas, flujos de lava recientes y depósitos de caída.

En algunas partes se pueden encontrar capas de lavas de poco espesor intercaladas con los piroclastos, sobreyaciendo a la unidad de andesitas del Terciario. Su espesor saturado, es desconocido por ser posiblemente muy potente, asumiéndose mayor de 250 m.

La edad de la unidad del grupo volcánico terciario, abarca el Mioceno superior y el Plioceno (Herrera, 1998).

Red de flujo de aguas subterráneas

El valle del Guacalate es una fosa tectónica, por lo que el flujo subterráneo presenta un control estructural desde las partes altas de los horst a las partes bajas o graben. El valle de Chimaltenango y El Tejar constituyen un alto tectónico.

En la zona de estudio, se presentan niveles estáticos muy superficiales, menores de 1 m bajo la superficie del terreno, como en Pastores y muchos manantiales del área, hasta más de 80 m bajo la superficie del terreno en los poblados de El Tejar y Parramos. Para evitar esta variación tan grande por efecto de la altitud, se determinaron los niveles estáticos con respecto al nivel del mar, dando como resultado que los niveles se encuentran entre los 1,600 a los 1,650 msnm en las partes bajas de la cuenca en Pastores y entre 1,700 a 1,950 msnm en las partes altas de la cuenca hidrográfica.

Las isopiezas se observan en la Figura 17, con una dirección del flujo del agua subterránea de oeste a este, por lo que, el flujo está controlado por el río Guacalate, que a su vez presenta un control por fallas geológicas.

En San Andrés Itzapa, las fluctuaciones del nivel de agua en el acuífero entre la época seca y la época lluviosa fluctúan entre 0.15 a 0.60 m (Herrera, 1998), lo que indica que el acuífero es semiconfinado.

La explotación del agua subterránea en la cuenca se realiza por medio de pozos y manantiales. Los pozos tienen diámetros de 6, 8 y 10 pulgadas, con bombeos de 8 a 10 horas por día, por lo que trabajan 50 a 70 horas semanales.

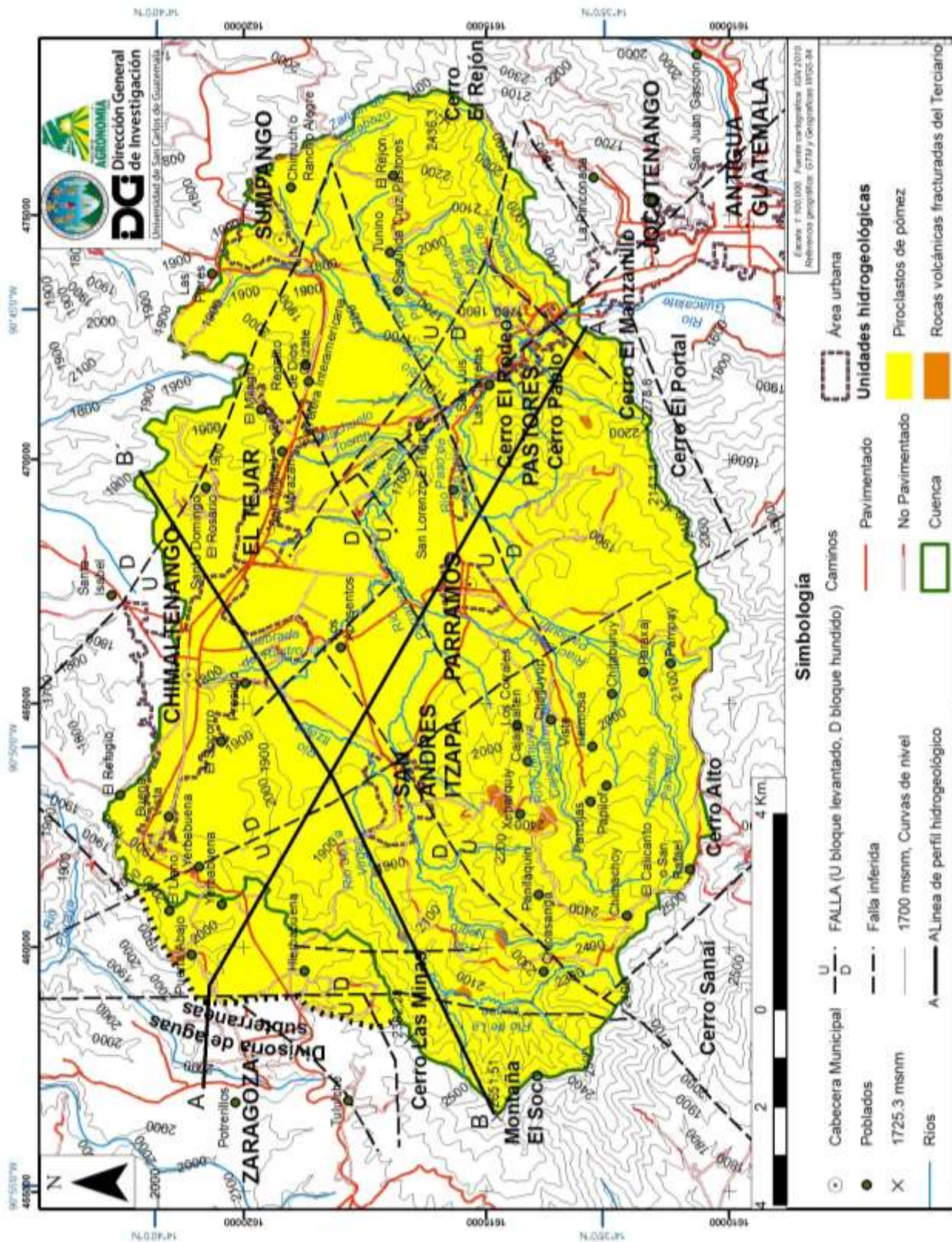


Figura 14. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Chimaltenango.

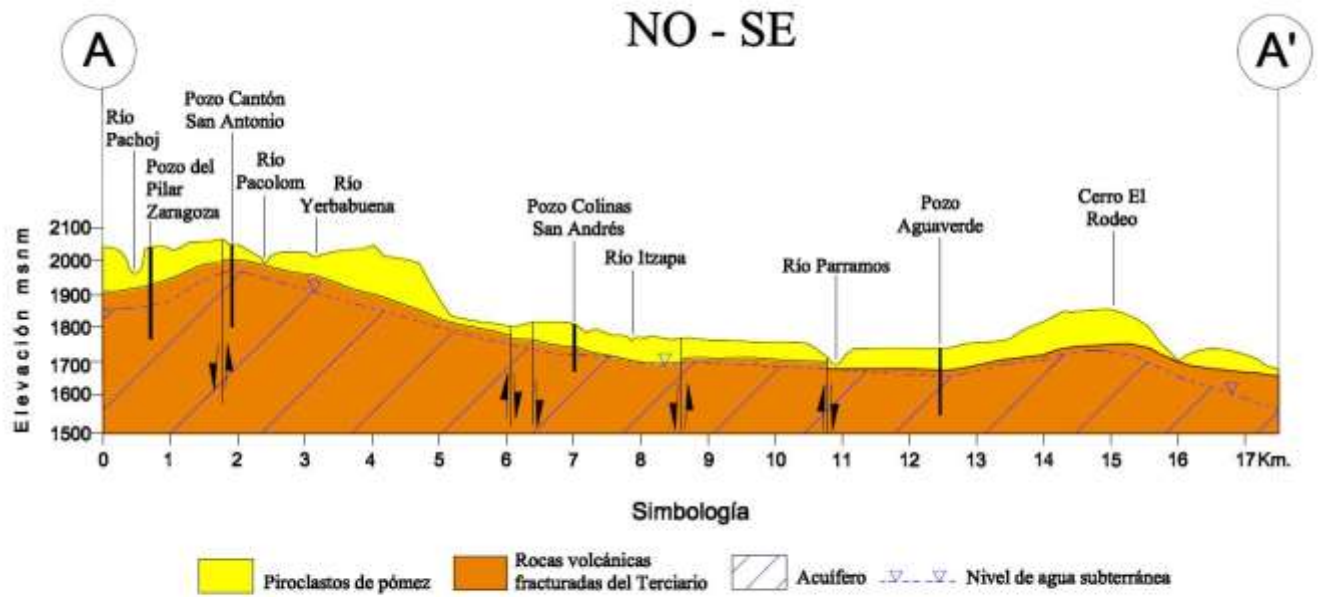


Figura 15. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero Chimaltenango.

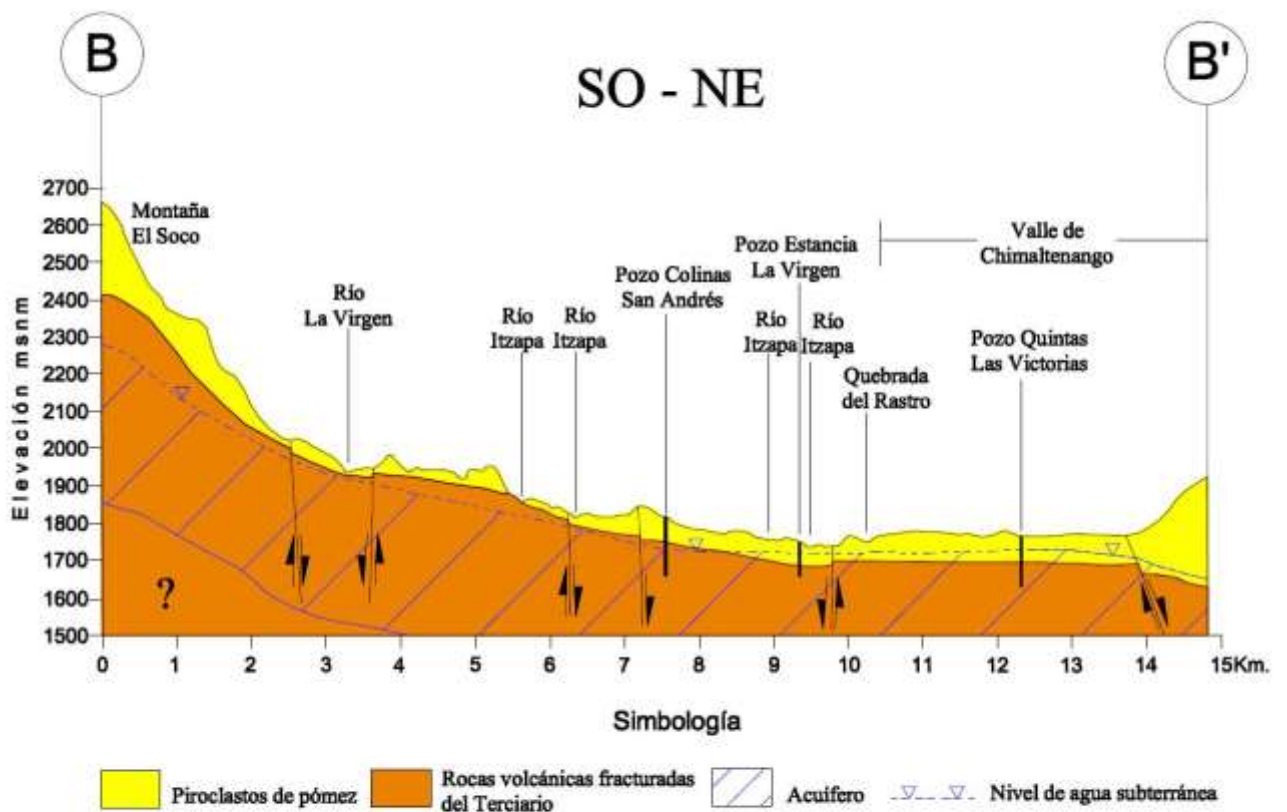


Figura 16. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero Chimaltenango.

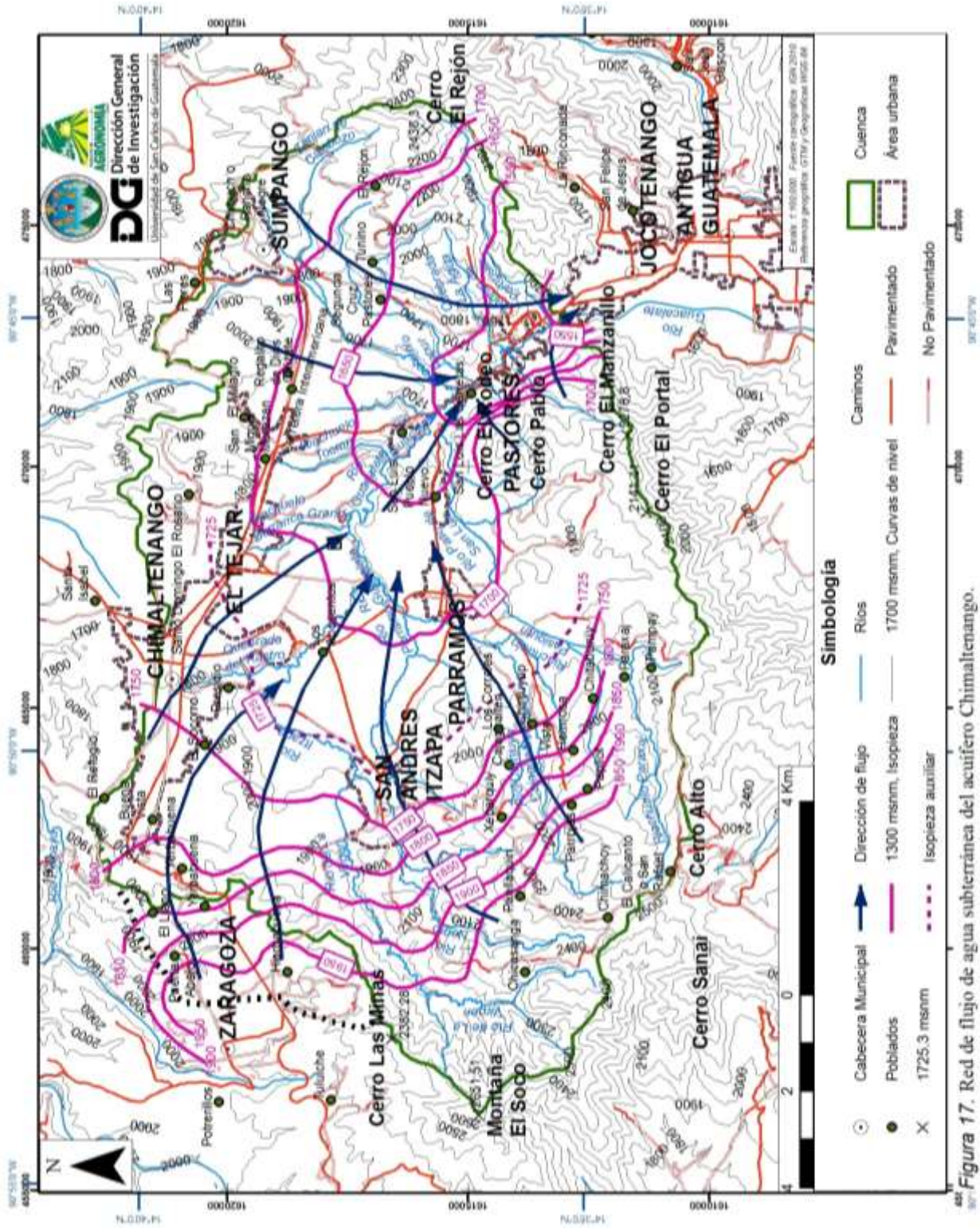


Figura 17. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Chimaltenango.

4.1.4 Acuífero de Antigua Guatemala

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Guacalate, desde Pastores al norte hasta Alotenango al sur, con un área total de 219.228 km². Es decir, esta área se separa de Chimaltenango, aunque corresponde al mismo acuífero de la cuenca alta del Guacalate que se continúa hacia el sur.

El área del valle de Panchoy o Antigua Guatemala, se localiza entre las cotas de 1,519 a 1,530 msnm, llegando a 1,388 m en Alotenango que constituye la parte más baja, siendo los lugares más altos los que corresponden a las cimas volcánicas de los volcanes de Agua con 3,760 msnm al sureste y Acatenango con 3,970 msnm al suroeste del área. Dadas las características hidrográficas de la cuenca alta del río Guacalate, el río ha erosionado las colinas laterales y formado un abanico aluvial desde Pastores hasta Ciudad Vieja, orientado de forma general de norte a sur. Las partes planas presentan pendientes entre 0 a 4 %, mientras que las laderas de las colinas y montañas presentan pendientes mayores del 50 %.

El cauce del río Guacalate en el área de estudio, tiene una orientación norte a sur, siendo un río efluente desde el parque Los Aposentos, que constituye una zona de manantiales o salidas de aguas subterráneas, por lo que el nivel estático de la planicie de Antigua Guatemala coincide con el nivel del río que corre en el lado oeste del poblado.

En el área los ríos Guacalate, Pensativo, del Pilar, Ramaxat y Blanco son los principales contribuyentes de la cuenca hidrográfica hasta Alotenango. La cuenca se caracteriza por ser una región montañosa con partes planas hacia el pie de las laderas, y el valle al centro, donde está asentada la población de Antigua Guatemala.

Las coordenadas geográficas del área de 219.228 Km², son de 14.4648 a 14.6139 grados de latitud norte y 90.6602 a 90.8769 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 1,599,485 m a 1,615,949 m N y 459,401 a 482,729 m E.

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

Velásquez en su informe del Alto Guacalate (1995), menciona que existen dos acuíferos: uno superior de aluviones y piroclastos, y otro inferior de lavas.

Los valores de transmisividad para los depósitos aluviales son del orden de los 300 a 1,000 m²/día, de 50 a 250 m²/día para los depósitos piroclásticos y mayores de 3,000 m²/día para las lavas.

Orozco (2004), define que los valores de transmisividad de 285 a 300 m²/día en el área de Jocotenango, en pozos perforados en materiales piroclásticos y aluvión, entre 150 a 175 m de

profundidad. Estos valores se obtuvieron en pruebas con caudales de bombeo entre 400 a 600 gal/min y abatimientos entre 0.85 a 1.75 m.

La transmisividad en el área de San Miguel Dueñas, en pozos perforados entre 160 a 190 m de profundidad, y donde se capta el agua circulante en lavas, varían de 1,600 a 5,000 m²/día. Según Orozco (2004), las transmisividades en el valle de Antigua Guatemala son medias, presentando valores de 157 m²/día en San Bartolo, 508 m²/día en Alotenango, 626 m²/día en San Miguel Dueñas y 691 m²/día en Ciudad Vieja. Sin embargo, en pozos profundos que captan el acuífero inferior en lavas, se presentan transmisividades mayores de 7,000 m²/día como el pozo del Beneficio Sertinsa en Ciudad Vieja y el pozo de la finca Medina en Antigua Guatemala con 9,000 m²/d.

En general, la extracción de agua subterránea en el acuífero superior oscila entre 3 a 20 L/s por pozo siendo producciones pequeñas y moderadas. Mientras que las producciones son moderadas a muy grandes en el acuífero inferior con caudales de 10 a 120 L/s.

Los usos son principalmente para agua potable y riego.

Conductividad hidráulica

La permeabilidad media en el abanico aluvial de Antigua Guatemala, indicada por Velásquez (1995) es de 33 m/día. Valores de 4 a 7.8 m/d, fueron obtenidas en los pozos perforados en los sedimentos de Jocotenango. Mientras que en las lavas de San Miguel Dueñas se presentan valores de 10 a 40 m/d.

Orozco (2004), estimó valores de permeabilidad de 12 a 13.7 m/d en pozos perforados en sedimentos y de 2 a 12 m/d en el área entre Ciudad Vieja y Alotenango en lavas. Mientras que en el área de San Miguel Dueñas se presentan valores de 28 a 85 m/d.

De acuerdo a lo anterior, se puede considerar que la conductividad hidráulica es media, con valores entre 6 a 85 m/d.

Estas diferencias de permeabilidad, estriban en que la porosidad en las partes bajas de Antigua Guatemala, es primaria por el movimiento del agua a través de los espacios porosos de los sedimentos de grava, arena y limo, mientras que en las rocas volcánicas es secundaria por el movimiento del agua a través de fracturas de las lavas, producto del fallamiento.

Coefficiente de almacenamiento

En los pozos de San Miguel Dueñas, donde se capta el agua del acuífero de las lavas cuaternarias, se calcularon valores de coeficiente de almacenamiento de 0.1 a 0.27, indicando que también es un acuífero libre o freático.

A través de la prueba de bombeo del pozo de la Finca Medina, el cual captó el acuífero en las riocitas terciarias que forman el acuífero inferior y en donde se aisló el acuífero superior de

sedimentos, se pudo establecer que existe un nivel del agua subterránea a 1.49 m de profundidad con respecto al nivel del terreno, mientras que los pozos excavados presentan un nivel freático de 4 m de profundidad. Lo anterior, indica que el acuífero inferior presenta condiciones de confinamiento. Esta situación fue comprobada por Orozco (2004), en las pruebas de bombeo de los pozos de San Bartolo, Sertinsa en Ciudad Vieja y plazuela en San Miguel Dueñas, donde se calcularon valores de coeficiente de almacenamiento de 3×10^{-3} , 1.4×10^{-2} y 1×10^{-3} respectivamente, indicando que el acuífero inferior es confinado, presentado valores entre 1×10^{-2} a 3×10^{-3} .

Considerando que el acuífero inferior tiene un espesor medio de 250 m y una extensión de 219.228 Km², el volumen del acuífero es de 54.8 Km³. Si en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 25 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $13,700 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento promedio en lavas es de 8.5×10^{-3} , resultando que al hacer descender en 1 m el nivel del agua del acuífero, se dispondría de aproximadamente 116.45 millones de m³ de agua.

Al comparar la disponibilidad del agua del acuífero de 116.45 millones de m³ con la explotación de 27.36 millones de m³, resulta que se tienen aprovechables 89.14 millones de m³, que equivale a un caudal de 2.83 m³/s.

De acuerdo a estas cifras, el recurso hídrico subterráneo se encuentra en un estado de sub-explotación, donde las entradas naturales son mayores a las extracciones. Entonces, se puede obtener un mayor provecho de agua subterránea en el área, efectuando la extracción del recurso subterráneo temporal de una forma planificada y geográficamente bien distribuida, sin explotar las reservas permanentes.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

Las características estructurales en el área, definen un ambiente geotectónico bastante favorable para el almacenamiento y circulación de las aguas subterráneas. Formándose un valle que es un lugar de convergencia y de gran almacenamiento del flujo subterráneo, en las partes planas de Antigua Guatemala, Ciudad Vieja y San Miguel Dueñas.

En el área existen tres unidades hidrogeológicas:

En la base las lavas riódacíticas del Terciario con una alta porosidad secundaria, que constituye un medio fisurado.

Una capa intermedia de rocas volcánicas Cuaternarias de andesitas basálticas fracturadas en menor grado, que presentan en su base lapilli.

Sedimentos constituidos por piroclastos y aluviones del Cuaternario con porosidad primaria, ubicados en la parte superior y que forman el acuífero somero.

En la Figura 19 se presentan las unidades hidrogeológicas, que consisten principalmente de rocas volcánicas terciarias y cuaternarias de interés hidrogeológico. Las rocas han sido separadas, hidrogeológicamente en dos: rocas volcánicas del Terciario, formado por rocas fracturadas que constituyen el basamento del área y las rocas volcánicas del Cuaternario, formado por flujos piroclásticos y de lavas, que cubrieron a los bloques basculados, y finalmente los aluviones del abanico de Panchoy, como se observa en las Figuras 20 y 21 de los perfiles hidrogeológicos A-A' y B-B'.

La unidad hidrogeológica profunda está formada principalmente de lavas de composición riodacítica. Los afloramientos son escasos y se observan principalmente en la salida de Antigua Guatemala y al oeste de San Miguel Dueñas. Sin embargo, su distribución es muy grande, localizándose en varios pozos perforados en Antigua Guatemala y Ciudad Vieja.

La importancia que tiene esta unidad de lavas, desde el punto de vista hidrogeológico, es que a través de fracturas circula el acuífero principal y profundo de la región. También es importante indicar que estas rocas volcánicas, constituyen el basamento sobre el cual se depositaron una serie de productos eruptivos (flujos de lava recientes y depósitos de caída).

Su espesor es desconocido, aunque posiblemente muy potente, asumiéndose mayor de 500 m. La edad de la unidad del grupo volcánico terciario, se asume que abarca el Mioceno Superior y el Plioceno (Orozco, 2004).

En casi todos los pozos del área y en su parte inferior, se presenta una capa de sedimentos volcánicos o lapilli, que es un material volcánico de color gris oscuro, compuesto de fragmentos líticos de andesita escoriaea, pómez, vidrio volcánico, cuarzo y feldspatos, de forma angular y subangular con tamaños entre 0.5 a 4 mm los fragmentos pequeños y hasta de 15 mm los más grandes. Este es un relleno piroclástico aéreo y sub-aéreo, con poca consolidación. Esta unidad es importante ya que se encuentra saturada y es una capa muy productiva de agua. Sin embargo, debido a su granulometría, en algunos lugares podría presentar problemas de incorporar sedimentos finos a los pozos conjuntamente con el agua.

El espesor de esta unidad es variable, de algunas decenas de metros, como en el pozo de la Finca Medina con 30 m hasta posiblemente más de 150 m en la depresión entre los volcanes de Agua y Acatenango.

Las lavas andesíticas basálticas, tienen alto grado de fracturación y a pesar de que presenta variaciones de espesor, tiene mucha importancia, ya que estas rocas están fracturadas y tiene lugar la infiltración, circulación y almacenamiento de agua, que se traduce en zonas con

buena permeabilidad que son explotadas en muchos pozos de la zona. El espesor de esta unidad varía de 30 a 100 m. La edad asignada a estas lavas es del Pleistoceno.

La unidad de piroclastos se localiza principalmente en el valle del río Guacalate y el abanico aluvial de Panchoy, en el que se originó la deposición y transporte fluvial de estos materiales. Los aluviones yacen a lo largo del valle y de la ribera del río Guacalate. Se componen de sedimentos secundarios de los materiales volcánicos como cantos rodados en una matriz arenosa, poco consistente, ocupando grandes extensiones en la parte final del río Guacalate, desde Jocotenango hasta Alotenango. Los espesores promedio encontrados son de 10 a 30 m.

Niveles de aguas subterráneas

En el área se presentan niveles de agua subterránea muy superficiales en las partes bajas, desde niveles artesianos en Ciudad Vieja hasta niveles entre 7 a 31 m bajo la superficie del terreno en Antigua Guatemala. Además, existen niveles relativamente profundos en las partes de San Antonio Aguas Calientes y San Miguel Dueñas, de alrededor de los 30 m, y hasta de más de 96 m en el poblado de San Juan del Obispo.

Las isopiezas se encuentran entre los 1,300 a 1,400 msnm en las partes bajas de la zona (Alotenango - Dueñas) y entre 1,600 a 1,700 msnm en las partes altas que corresponde a los volcanes de Acatenango y Agua, como se observa en la Figura 22, ya que constituyen las partes más altas del área (ver Figura 18).

En el abanico aluvial de Antigua Guatemala y Ciudad Vieja, se presenta una isopieza auxiliar de 1525 msnm.



Figura 18. Vista del Volcán de Agua desde el valle de Ciudad Vieja.

Al noreste del área el flujo de agua subterráneo es desde los cerros El Rejón y El Astillero hacia Jocotenango, con una dirección noreste a suroeste.

En la parte entre San Antonio Aguas Calientes y San Miguel Dueñas, la dirección de flujo es de noroeste a sureste, que corresponde al rumbo del sistema de fallas principal del área.

Mientras que la parte oriental de Antigua Guatemala, desde el Cerro El Cucurucho en la Montaña Carmona, la dirección de flujo es de este a oeste, por lo que el flujo está controlado por la estructura geotectónica de fallas de las partes montañosas.

Analizando en general el área de estudio, se puede observar que el flujo de agua subterránea está definido de las partes altas hacia el valle de Antigua Guatemala. Un mayor flujo de agua subterránea, se presenta en la parte noroeste, en los alrededores de Antigua Guatemala y San Miguel Dueñas, donde el agua subterránea confluye de las partes norte, este y oeste, formando un valle geotectónico por donde circulan las aguas del acuífero con orientación parecida al trayecto del río Guacalate.

Otra zona importante de acuerdo al flujo subterráneo, la constituye la parte norte de Alotenango, ya que al existir un valle o “garganta natural” entre los volcanes de Agua y Acatenango, el agua subterránea tiene su confluencia en esta parte, pudiéndose extraer grandes volúmenes de agua por medio de la perforación de pozos.

En términos generales, se puede decir que el movimiento de las aguas subterráneas a nivel regional, sigue el patrón de circulación de acuerdo a las características geomorfológicas de la cuenca hidrográfica, es decir, los niveles de las aguas subterráneas varían de acuerdo con las características topográficas de la cuenca superficial.

En Antigua Guatemala, la mayoría de pozos son perforados, con diámetros de 6 a 12 pulgadas y revestidos con tubería metálica, existiendo algunos pozos excavados que son hechos a mano con diámetros entre 0.8 a 1 m y sin revestimiento que captan el acuífero superior con niveles de 10 a 40 m bajo la superficie del terreno.

Los pozos profundos presentan profundidades de 90 hasta 330 m y los caudales oscilan entre 160 a 1,900 gal/min o 10 a 120 L/s por pozo, clasificándose como una producción moderada a muy grande.

Los usos son principalmente para agua potable, y en menor grado para riego y uso industrial.

Los bombeos de los pozos generalmente no son continuos, por lo que la explotación del agua subterránea, se hace por medio de pozos municipales que trabajan desde 8, 16 hasta 24 horas al día, con un promedio de 8 a 10 horas al día en pozos particulares.

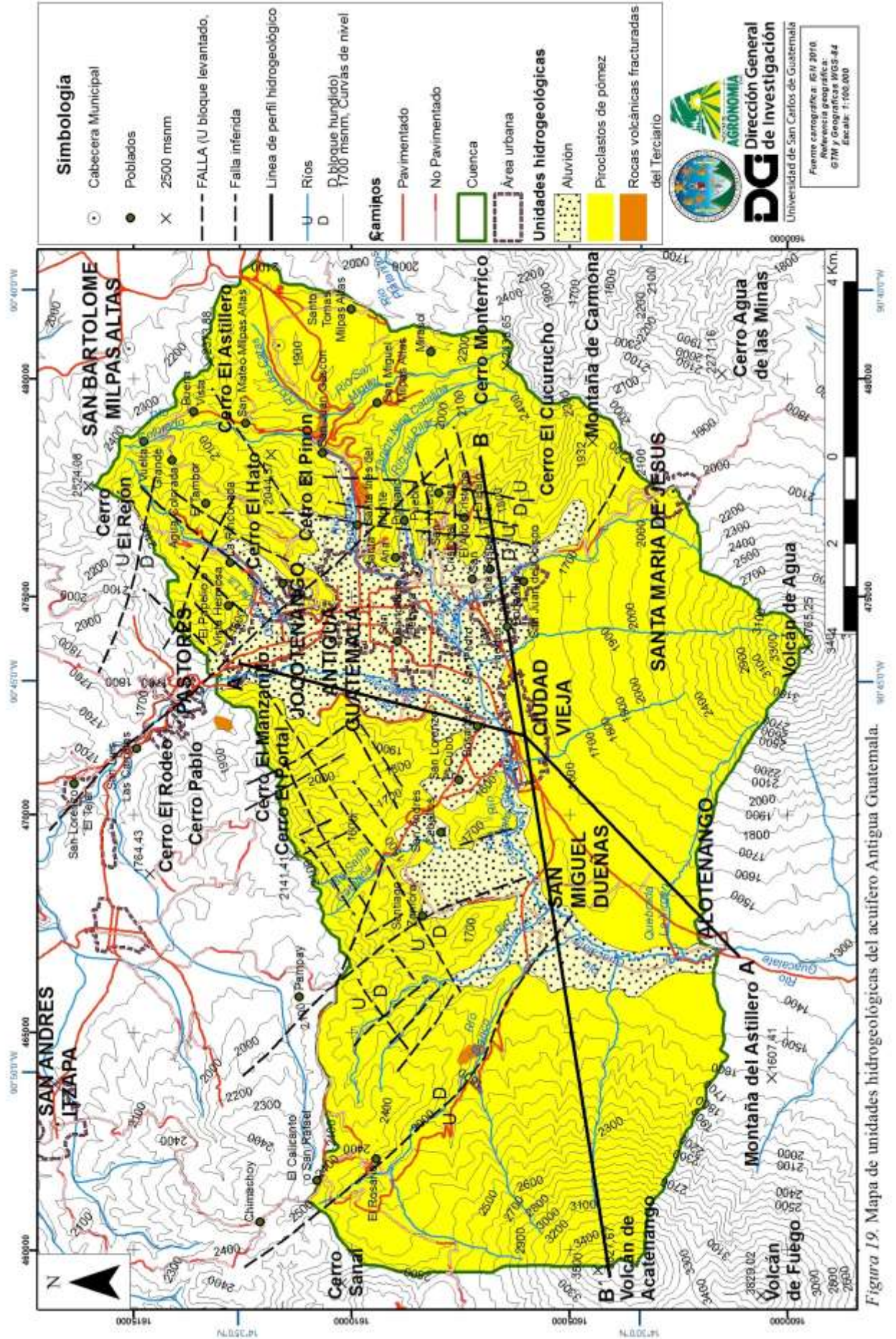


Figura 19. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Antigua Guatemala.

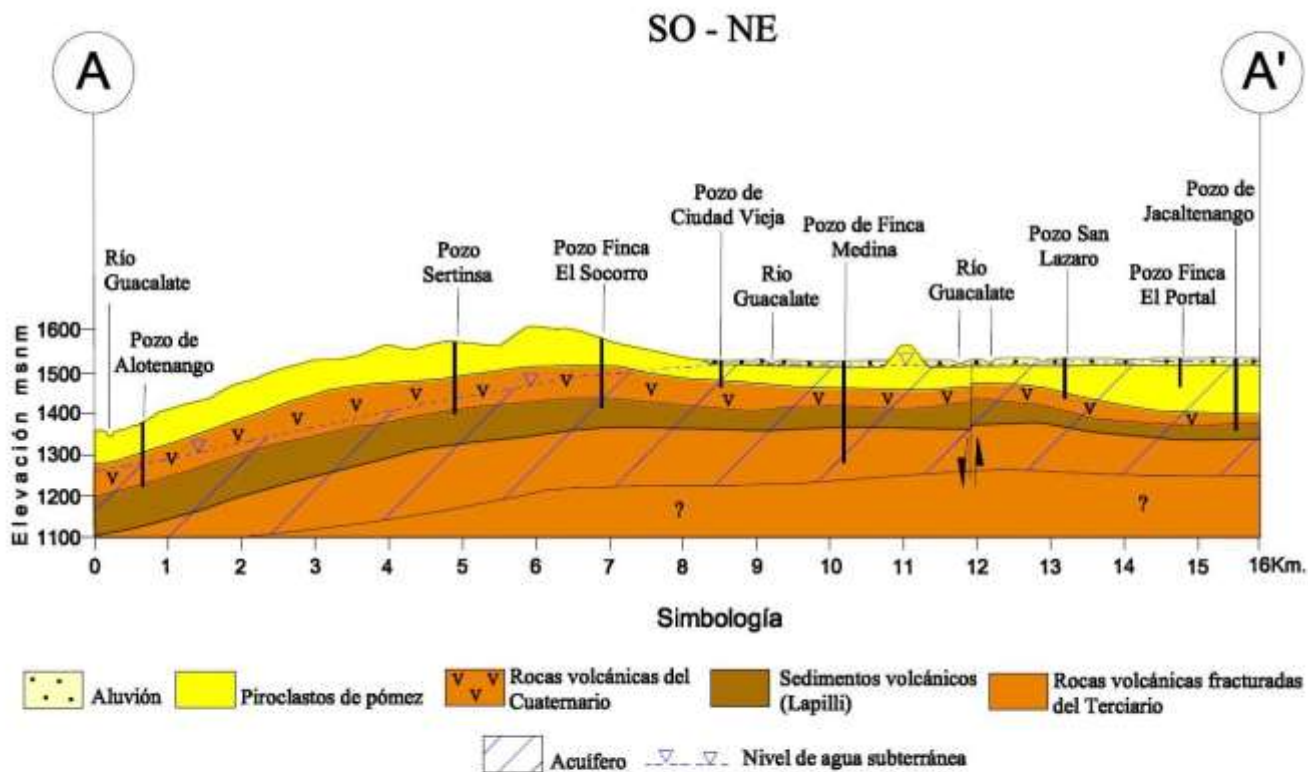


Figura 20. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero de Antigua Guatemala.

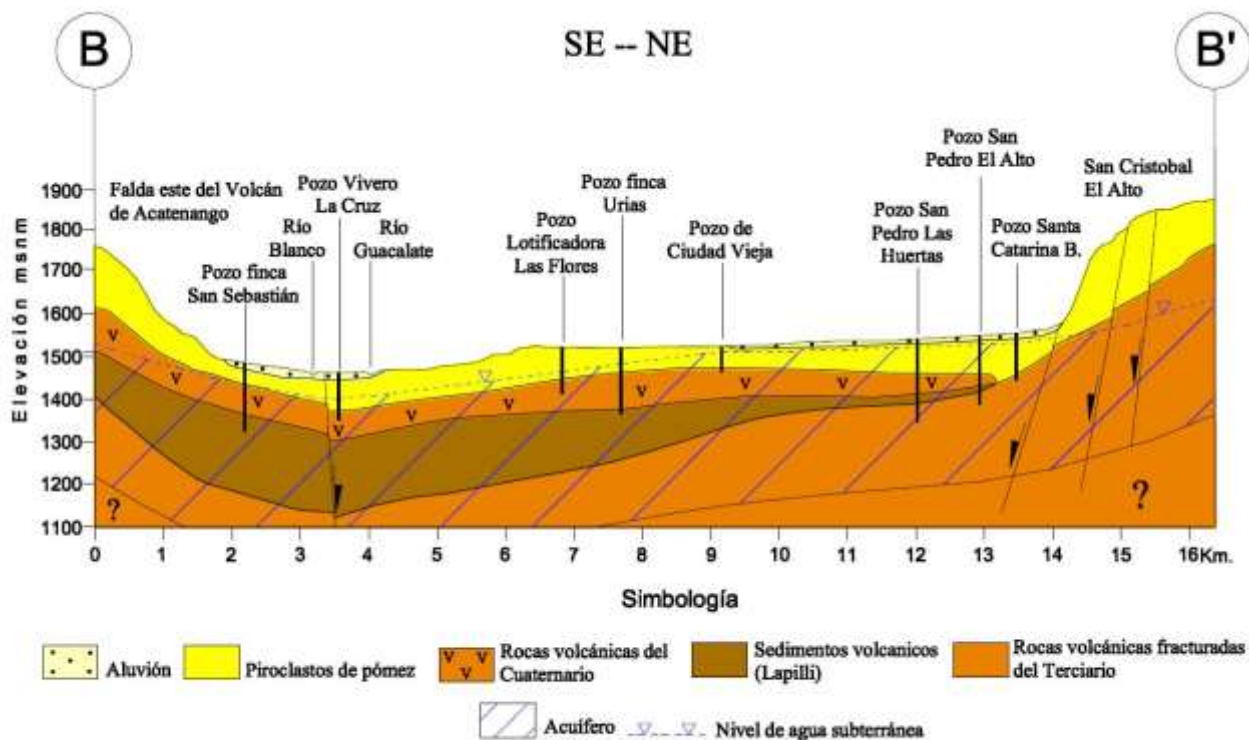
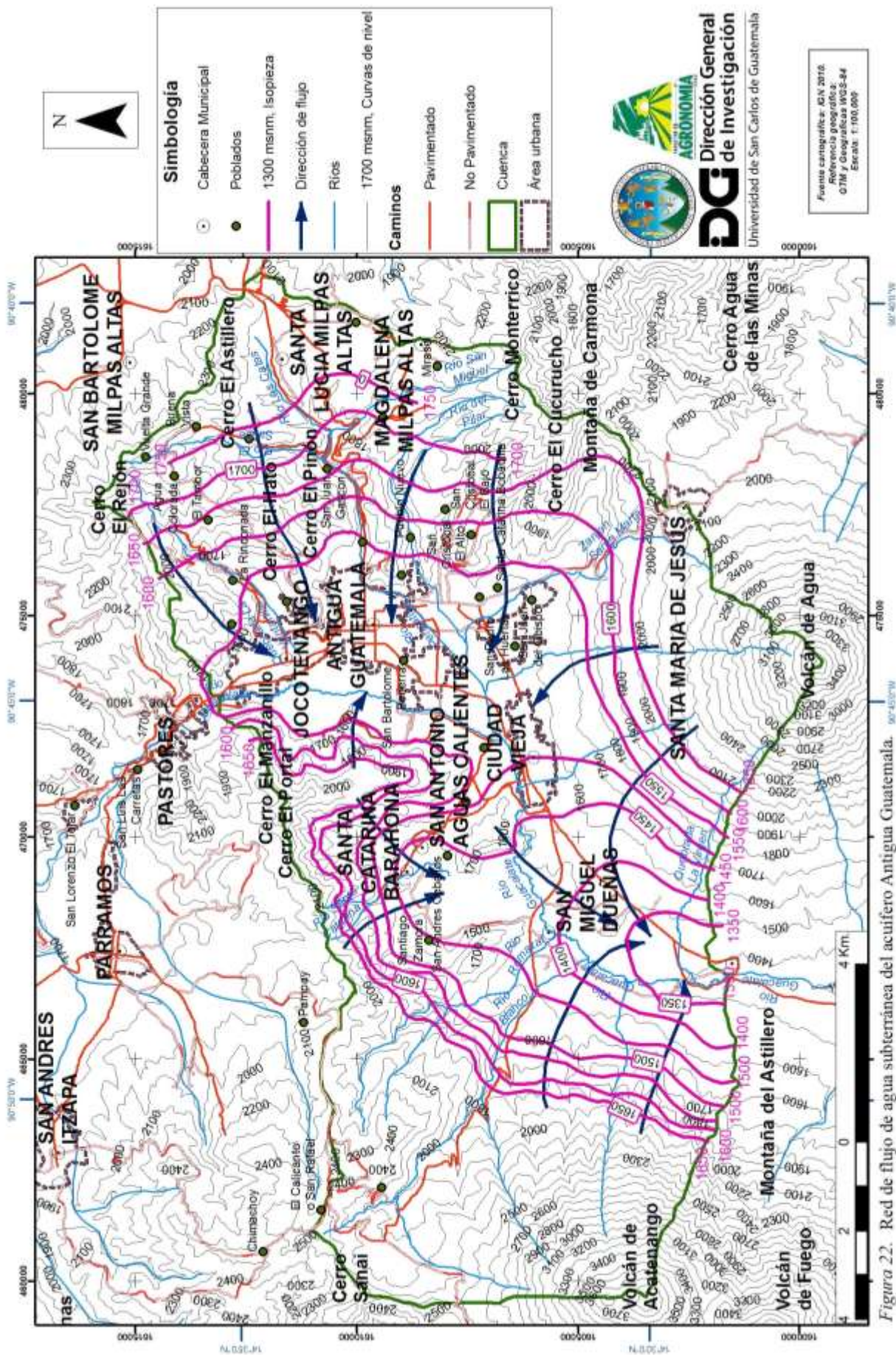


Figura 21. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero de Antigua Guatemala.



Acuíferos volcánicos de la zona occidental

4.1.5 Acuífero de San Marcos

Este acuífero es explotado en el valle de San Marcos y San Pedro Sacatepéquez, que se aprecia en la Figura 23, el cual se presenta entre las cotas de elevación de 1,800 a más de 3,500 msnm.

Este acuífero coincide con la cuenca alta del río Naranjo, con un área de 120.45 km² hasta Horquetas. Sin embargo, la cuenca hidrogeológica se continua hacia Coatepeque, siendo los límites naturales el Cerro Sarchil (3,500 msnm) al norte, Cerros Ixtájel (3,200 msnm) al sur, la Sierra Madre (2,800 msnm) al oeste y las montañas de San Antonio Sacatepéquez (2,700 msnm) al este.

La cuenca hidrográfica es la del río Naranjo a la cual drenan principalmente los ríos Palatza, Nahuala, Guativil, Tacann y Quebrada Agua Tibia. El cauce del río Naranjo tiene una orientación noroeste a sureste, siendo un río efluente desde Llano Grande al sur de San Pedro Sacatepéquez, que constituye una zona de manantiales o salidas de aguas subterráneas.

Dadas las características hidrográficas de la cuenca, el río ha erosionado la planicie y formado un valle, con pendiente suave de 5 %, que va de noroeste a sureste. Las partes planas presentan pendientes entre 1 a 4 %, mientras que los taludes del río, las pendientes son mayores del 70 %.

Las coordenadas geográficas de la cuenca son de 14.896 a 15.021 grados de latitud norte y de 91.713 a 91.846 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 1,647,586 m a 1,661,378 m norte y 355,239 a 369,512 m este.



Figura 23. Valle de San Marcos.

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

El acuífero se encuentra contenido principalmente en rocas volcánicas fracturadas, aunque en el valle de San Marcos y San Pedro Sacatepéquez se presentan piroclastos saturados.

Los valores de transmisividad en el área varían desde 15 hasta 650 m²/día, clasificándose como transmisividad baja a media.

Las transmisividades en la cuenca, definen un acuífero de pequeñas a grandes producciones, con extracciones de agua subterránea en la cuenca entre 6 a 31 L/s por pozo, siendo principalmente para uso de agua potable.

En la cuenca se identificaron 14 pozos.

Conductividad hidráulica

Las capas de rocas volcánicas presentan diferentes grados de fracturación y tienen valores de permeabilidad medios de 1 a 8 m/d, clasificándose el acuífero como regular. Esta permeabilidad es secundaria, sin embargo, en algunos estratos superiores de piroclastos saturados se presenta un medio poroso con permeabilidad primaria.

Coefficiente de almacenamiento

El acuífero de San Marcos se encuentra sobreyacido por depósitos piroclásticos y capas de ceniza volcánica del Cuaternario, así como, por niveles de lavas consistentes del Terciario, que le da confinamiento, con un coeficiente de almacenamiento de 3.6×10^{-2} a 9.7×10^{-4} .

Considerando que este acuífero tiene un espesor medio de 300 m y una extensión de 120 Km², el volumen del acuífero es de 36 Km³. Si en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 14 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $5,040 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento medio es de 1.85×10^{-2} , supone que el acuífero disponga de aproximadamente 93.2 millones de m³ de agua.

Al comparar la disponibilidad del agua del acuífero de 93.2 millones de m³ con la explotación de 13.45 millones de m³ resulta que se tienen disponibles 79.75 millones de m³, equivalente a un caudal de 2.53 m³/s.

En San Marcos se tiene una baja explotación del acuífero, ya que por tradición y costumbre se han captado manantiales y el acuífero superior por medio de pozos excavados.

La construcción de pozos mecánicos es relativamente reciente. Sin embargo, actualmente se está iniciando la extracción del recurso hídrico subterráneo por medio de pozos profundos tanto municipales como particulares.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

La hidrogeología de la cuenca se presenta en la Figura 25 y los perfiles hidrogeológicos A – A´ y B – B´ en las Figuras 26 y 27, donde se observan las rocas volcánicas fracturadas constituidas por lavas andesíticas y dacíticas del Terciario, con espesores mayores de 500 m, formando la zona saturada o acuífero principal y profundo. La zona no saturada está constituida por piroclastos de pómez e ignimbritas, con espesores mayores de 100 m. Estos materiales tienen espesores saturados de 8 a 30 m y forman un acuífero superficial que ha sido captado con pozos excavados.

Las dacitas sobreyacen a las andesitas y se encuentran aflorando en las laderas. El manantial Agua Tibia, es una salida de agua subterránea en fracturas de dacitas, mientras que en San Cristóbal Cucho se localizan manantiales en andesitas como se observa en la Figura 24.

La edad de la unidad volcánica terciaria, abarca el Mioceno superior y el Plioceno.



Figura 24. Salida de agua subterránea en andesitas fracturadas.

Red de flujo de aguas subterráneas

En el valle de San Marcos, se presentan niveles estáticos de 30 a 150 m bajo la superficie del terreno. Para evitar esta variación tan grande por efecto de la altitud, se determinaron los niveles estáticos con respecto al nivel del mar, dando como resultado que los niveles en las partes altas se encuentran entre los 2,500 a 2,800 msnm hasta los 2,000 msnm en las partes bajas de la cuenca en Cantel.

Las isopiezas se observan en la Figura 28, con una dirección del flujo del agua subterránea de noroeste a sureste, encontrándose este flujo controlado por el río Naranjo.

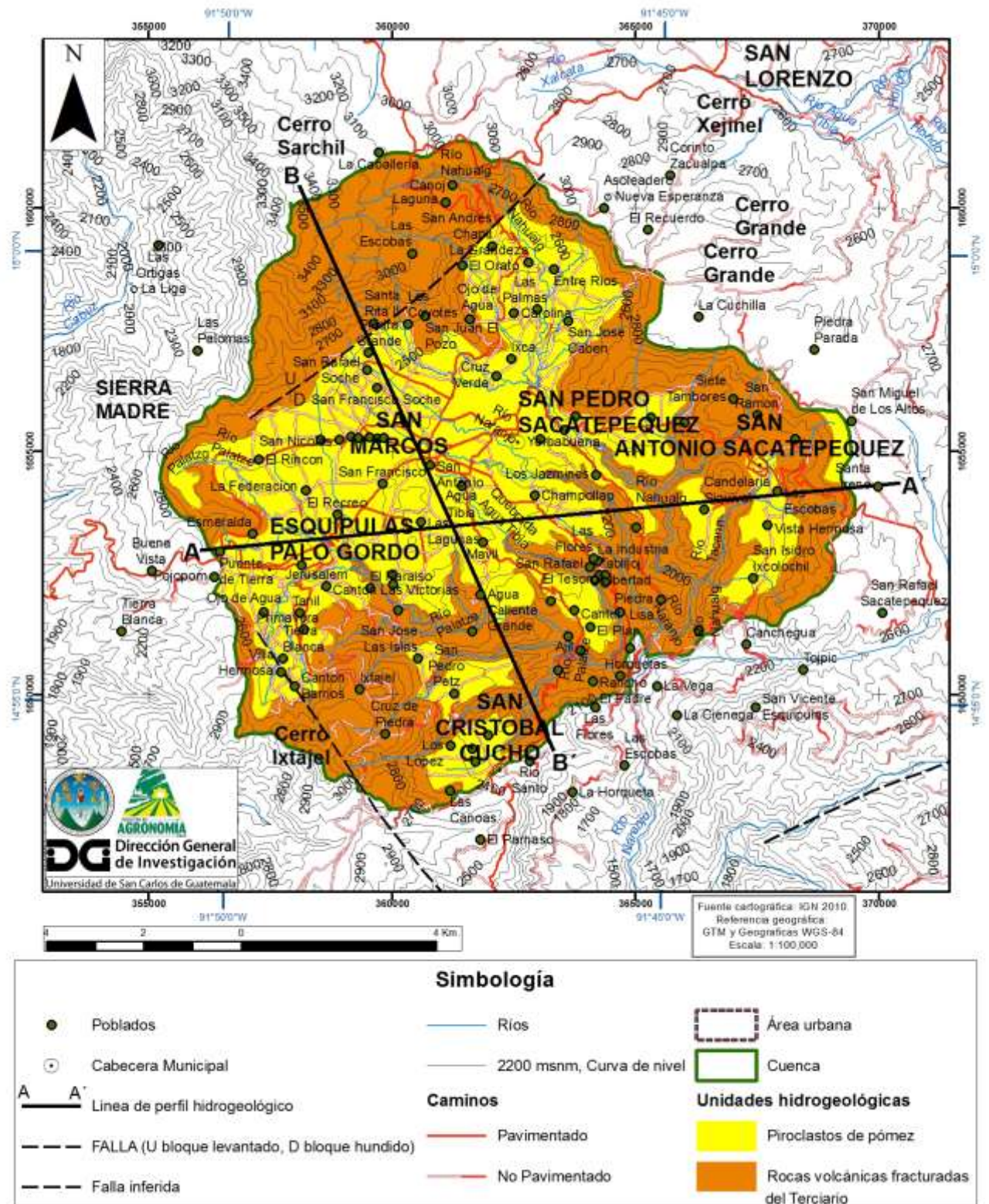


Figura 25. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero San Marcos

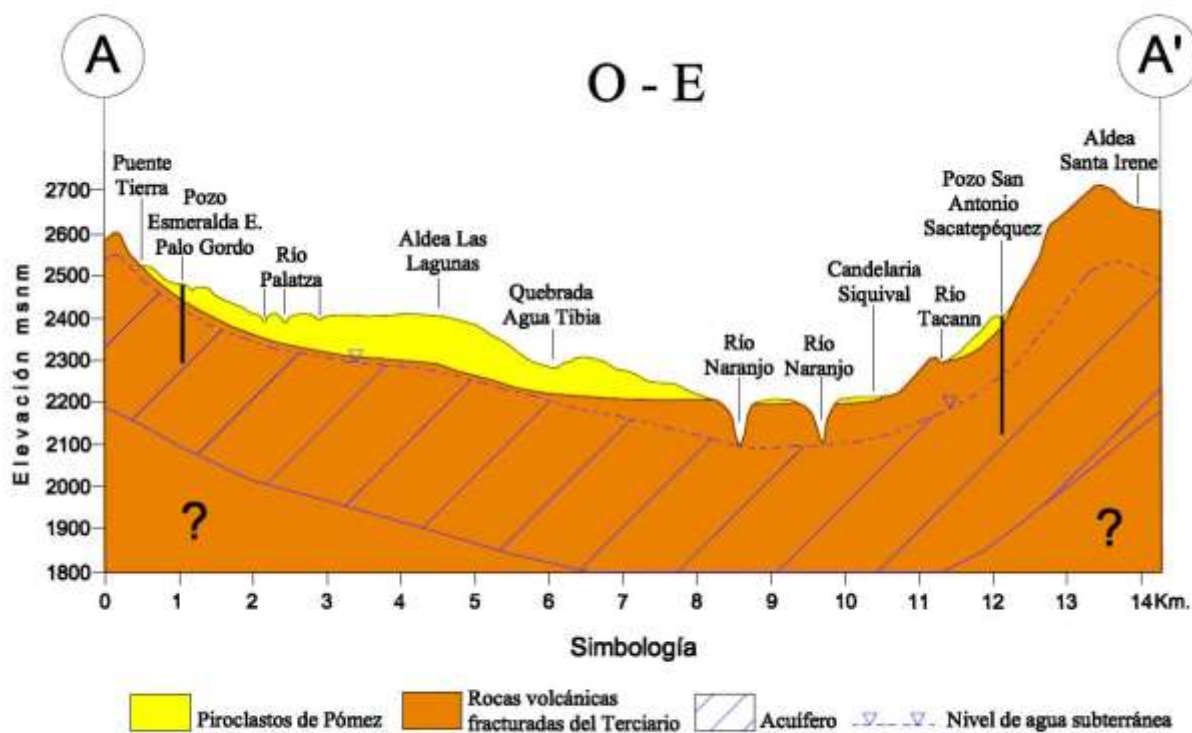


Figura 26. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero de San Marcos.

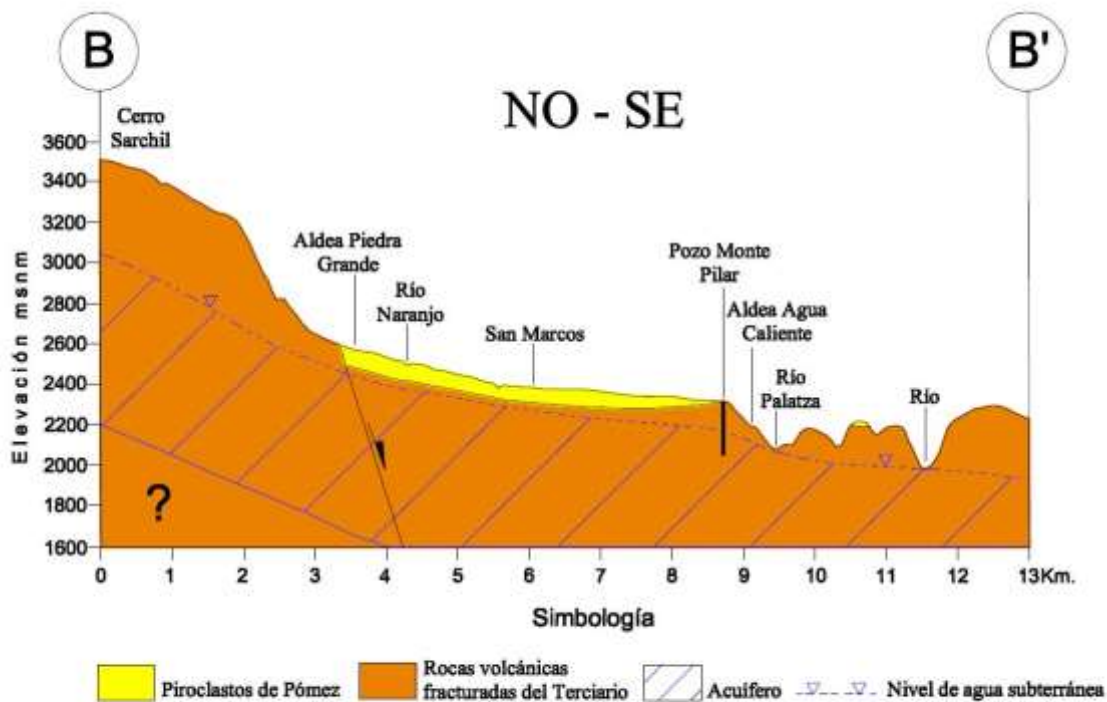


Figura 27. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero de San Marcos.

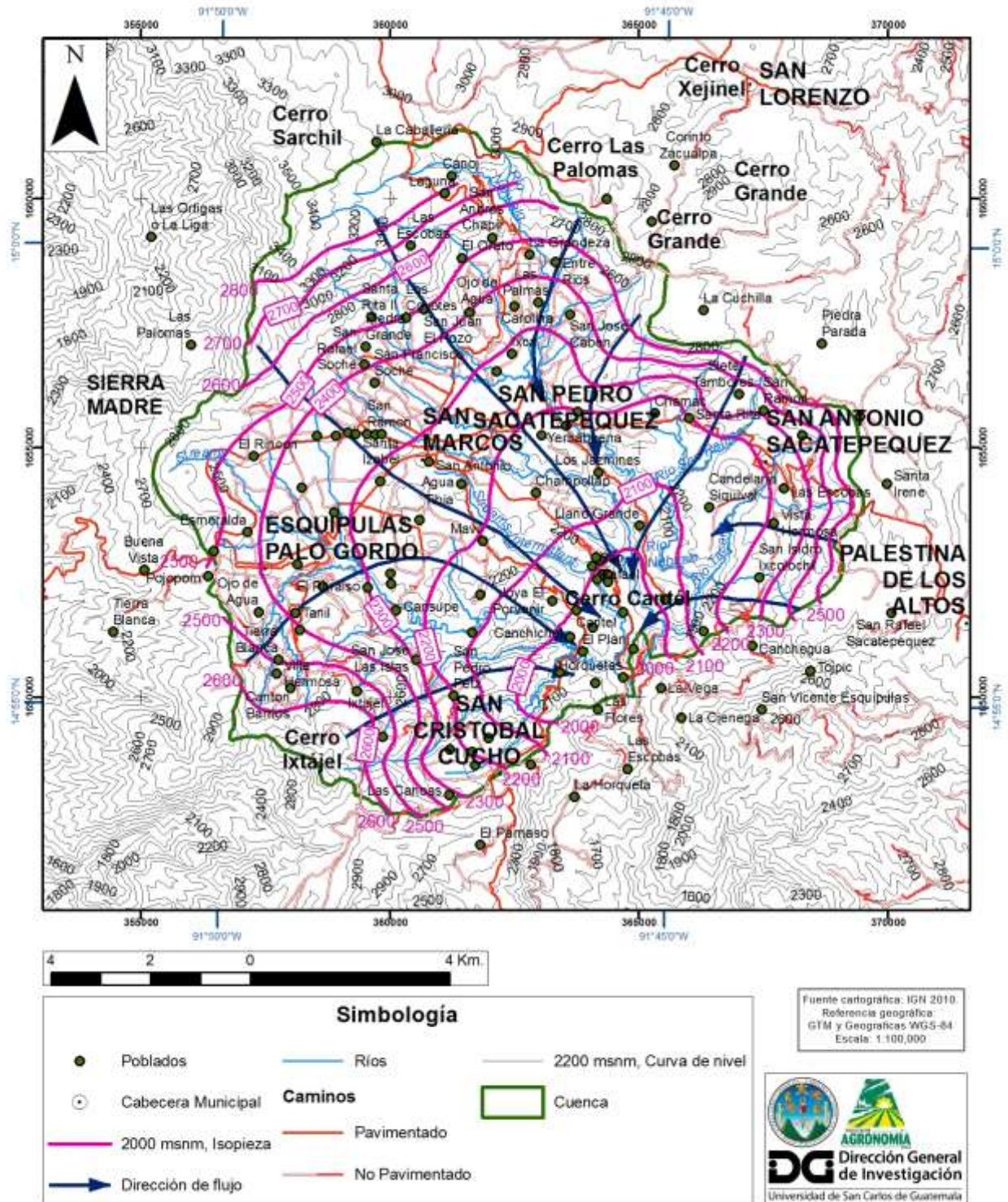


Figura 28. Red de flujo de agua subterránea del acuífero San Marcos.

4.1.6 Acuífero de Quetzaltenango

Sobre este acuífero se asienta la ciudad de Quetzaltenango, que es la cabecera departamental de Quetzaltenango. Comprende además las poblaciones de Cantel, Salcajá, Olintepeque, San Andrés Xecul, Ostuncalco, Concepción Chiquirichapa San Miguel Sigüila, Cajola, San Francisco La Unión, San Carlos Sija y Sibila.

El acuífero comprende la zona alta de la cuenca hidrográfica del río Samalá, cuyos afluentes principales son los ríos: Los Tuisés y Sigüila. Además, se incluye la subcuenca del Río Posutulté en Totonicapán al este de la cuenca. Es decir, el acuífero de Totonicapán constituye parte de la cuenca hidrogeológica, con un área total de 709.328 km² hasta Cantel.

El límite norte lo constituye un cuerpo intrusivo del Cretácico que forma una barrera negativa, destacando el Cerro Pache. Al este se presentan los cerros de Totonicapán que representan un levantamiento de rocas clásticas del Cretácico, mientras que al oeste se presenta el Cerro Tuicocalx que forma parte del complejo volcánico de Chicabal y Siete Orejas como se observa en la Figura 29. Al sur el acuífero es encajonado por las faldas del volcán Santa María y Sierra Chuatroj en Cantel y Zunil.

Las coordenadas geográficas son de 14.7593 a 15.0619 grados de latitud norte y 91.2965 a 91.6738 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 1,632,362 m a 1,665,666 m N y de 373,802 m a 414,256 m E.

El área se encuentra conformada por dos acuíferos importantes: acuífero superior y acuífero inferior. El superior está constituido por potentes depósitos cuaternarios de piroclastos pomáceos de 100 a 800 m de espesor, con intercalaciones de sedimentos fluviales y paleosuelos (INSIVUMEH, 1988). Los espesores saturados son de 6 a 91 m.

El acuífero inferior está formado principalmente por basaltos, andesitas, riolitas e ignimbritas o tobas soldadas. Los basaltos son columnares como se observa en la Figura 30, típicos de una estructura volcánica de caldera. Los espesores varían de 250 a 500 m, con espesores saturados de 150 a 300 m.

En la parte norte del acuífero, las lavas se encuentran sobreyacidas por vulcanitas estratificadas, tobas, lahares y diatomitas, que son materiales de baja permeabilidad, que le confieren confinamiento al acuífero.

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

La transmisividad es media de 100 a 300 m²/d para los piroclastos del acuífero superior (Tacam, 2011). Mientras que la transmisividad del acuífero inferior es media a alta, con valores entre 150 a 1,200 m²/d para las rocas fracturadas (INSIVUMEH, 1988).



Figura 29. Valle de Quetzaltenango y volcán Siete Orejas.



Figura 30. Basaltos columnares subyaciendo piroclastos de pómez.

Las producciones de los pozos que captan el acuífero superior varían de 10 a 280 L/s clasificándose como moderadas a muy grandes y de 8 a 65 L/s para los pozos que captan el acuífero inferior, siendo producciones pequeñas a muy grandes.

Conductividad hidráulica

Para el acuífero superior, la permeabilidad es baja, entre 0.93 a 2.8 m/d, clasificándose como un acuífero pobre a regular. Sin embargo, la permeabilidad del acuífero inferior es baja a media con valores de 1 a 10 m/d, constituyendo un acuífero regular a moderadamente bueno.

Coefficiente de almacenamiento

El acuífero superior de piroclastos es libre, presentando valores de coeficiente de almacenamiento de 0.01 – 0.03 (Tacam, 2011). Mientras que el acuífero inferior en lavas y tobas es confinado, con valores de 3×10^{-3} a 4.6×10^{-4} (INSIVUMEH, 1988).

De acuerdo a Tacam (2011), en la subcuenca del río Sigüilá donde se asienta la ciudad de Quetzaltenango con un área de 120 Km², la extracción de agua subterránea del acuífero superior es de 18.08 millones de m³ por año. Mientras que la oferta anual del recurso hídrico subterráneo es de 23.55 millones de m³, lo que significa que no existe sobre-extracción en el sistema del acuífero libre y considerando una tasa de crecimiento local de 2.1 %, es muy probable que se alcance el punto de equilibrio entre la oferta y demanda en el año 2030.

Herrera y Orozco (2016), calcularon que la extracción de agua subterránea en todo el valle de Quetzaltenango es de 45.6 millones de m³, sin considerar el área de Totonicapán.

En todo el valle de la cuenca del río Samalá, el acuífero superior tiene un espesor medio de 50 m y una extensión de 316 Km², el volumen del acuífero es de 15.8 Km³. La porosidad varía de 6 a 20 %, siendo la porosidad media de un 13 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $2,054 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento en piroclastos es de 0.02 resultando que al hacer descender en 1 m el nivel del agua del acuífero, se dispondría de aproximadamente 41.1 millones de m³ de agua.

El acuífero inferior tiene una extensión de 613 Km², sin el área del acuífugo, con un espesor medio de 225 m, entonces el volumen del acuífero es de 137.92 Km³. Si en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 22 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $30,342 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento en rocas fracturadas en promedio es de 1.73×10^{-3} , resultando que al hacer descender en 1 m el nivel del agua del acuífero, se dispondría de aproximadamente 52.5 millones de m³ de agua.

La disponibilidad de agua conjunta de los dos acuíferos es de 93.6 millones de m³, comparándola con la extracción de 45.6 millones de m³, se tiene un balance positivo de 48 millones de m³, equivalente a un caudal de 1.52 m³/s.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

El valle de Quetzaltenango es un relleno de una antigua caldera volcánica, donde el rasgo más prominente es el Volcán Santa María al sur. Esta caldera fue rellenada por antiguos sedimentos y posteriormente por depósitos piroclásticos recientes. En el área existió levantamiento de sedimentos cretácicos al noreste. Al noroeste en el Mesozoico existieron intrusiones de granito como El Cerro Pache, que constituyen barreras negativas. Mientras que al sur los volcanes Siete Orejas y el Volcán Santa María, en el Plioceno originaron coladas de lava de diferente composición.

En la Figura 31 se presenta el mapa de unidades hidrogeológicas y en las Figuras 32 y 33, los perfiles hidrogeológicos A – A' y B – B', donde se observa un basamento impermeable constituido por rocas intrusivas de granitos y rocas clásticas de areniscas, lutitas y conglomerados. Estas rocas son de edad del Mesozoico.

La unidad hidrogeológica con permeabilidad secundaria por fracturación, comprende lavas andesíticas, basálticas, riolitas y tobas soldadas del Terciario, con espesores mayores de 200 metros, formando la zona saturada o acuífero inferior en un medio fisurado.

Este acuífero está delimitado en el centro por la falla de Olintepeque y al sur por la de Zunil.

Los piroclastos superiores son materiales volcánicos que comprenden depósitos en forma de abanicos lodosos fluviales o detritus laharico fluvial, que presentan permeabilidad primaria o un medio poroso con abundantes materiales finos de limo y arcilla. Mientras que las rocas piroclásticas inferiores son pómez masivas y sueltas, proveniente de avalanchas de ceniza, que se separan en pómez tipo ignimbrita de San Carlos Sija, Totonicapán y Quetzaltenango (INSIVUMENH, 1988). Estos materiales presentan en algunos lugares porosidad primaria y secundaria por fracturas en otros, por lo que se hace difícil diferenciarlas.

Los espesores de esta unidad son de hasta 1,000 m.

Niveles de aguas subterráneas

La profundidad de las aguas subterráneas bajo la superficie del terreno, oscila entre 7 a 98 m para el acuífero superior (Tacam, 2011) y de 50 a 120 m para el acuífero inferior, de acuerdo al relieve del área.

En el mapa de red de flujo de la Figura 34, se observa que las isopiezas presentan valores desde 2,700 a 2,500 msnm en las partes altas y de 2,400 hasta 2,325 msnm en las partes bajas. La dirección de flujo es variable, ya que esta definida por los ríos secundarios de las subcuencas, aunque en general se observa que siguen el patrón general de norte a sur como la corriente superficial del río Samalá.

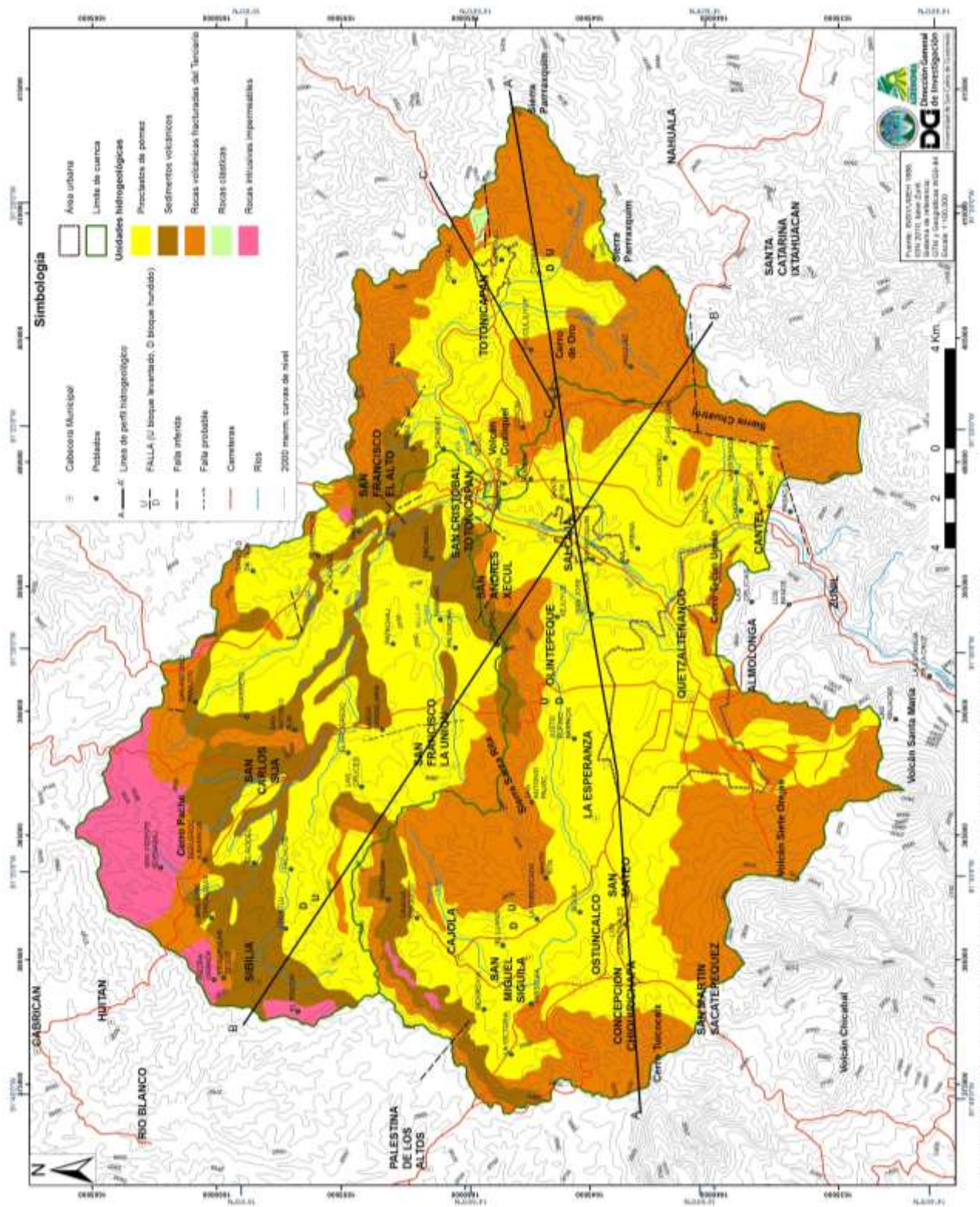


Figura 31. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Quetzaltenango - Totonicapán.

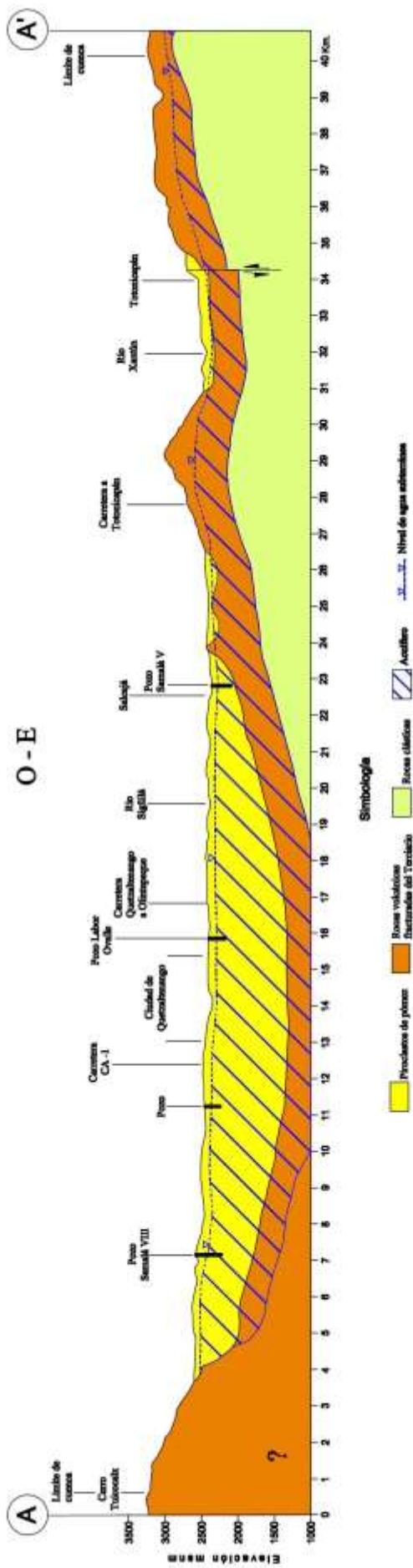


Figura 32. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero de Quetzaltenango.

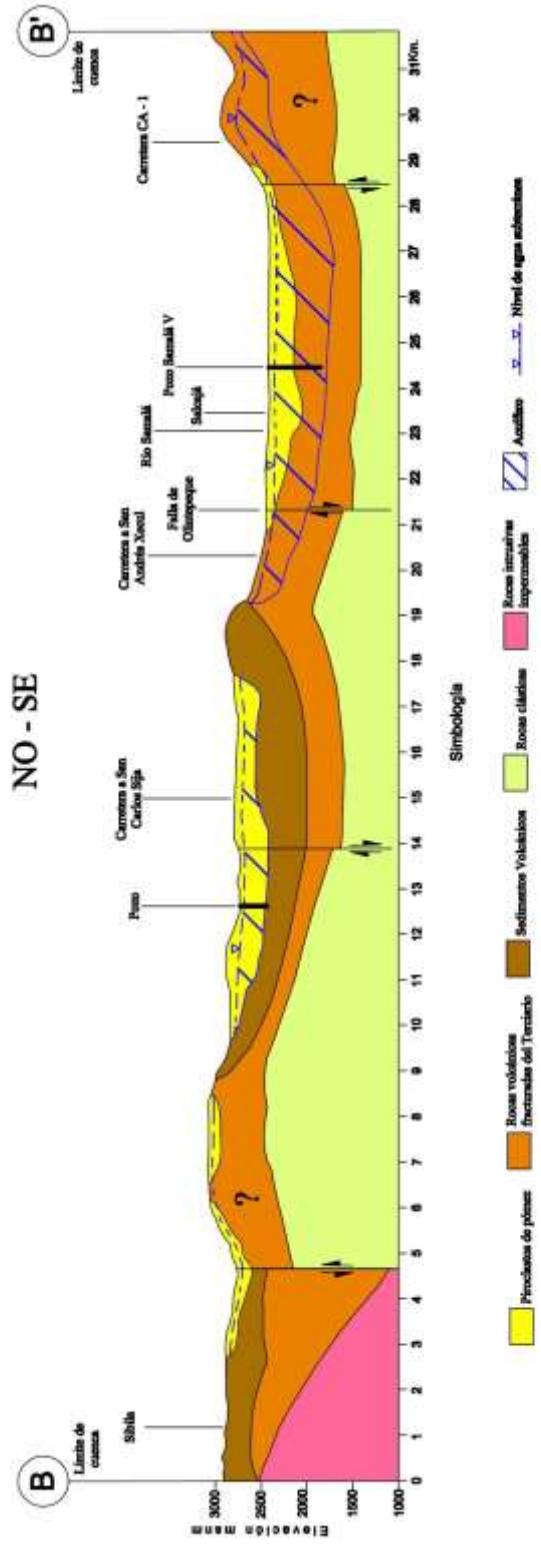


Figura 33. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero de Quetzaltenango.

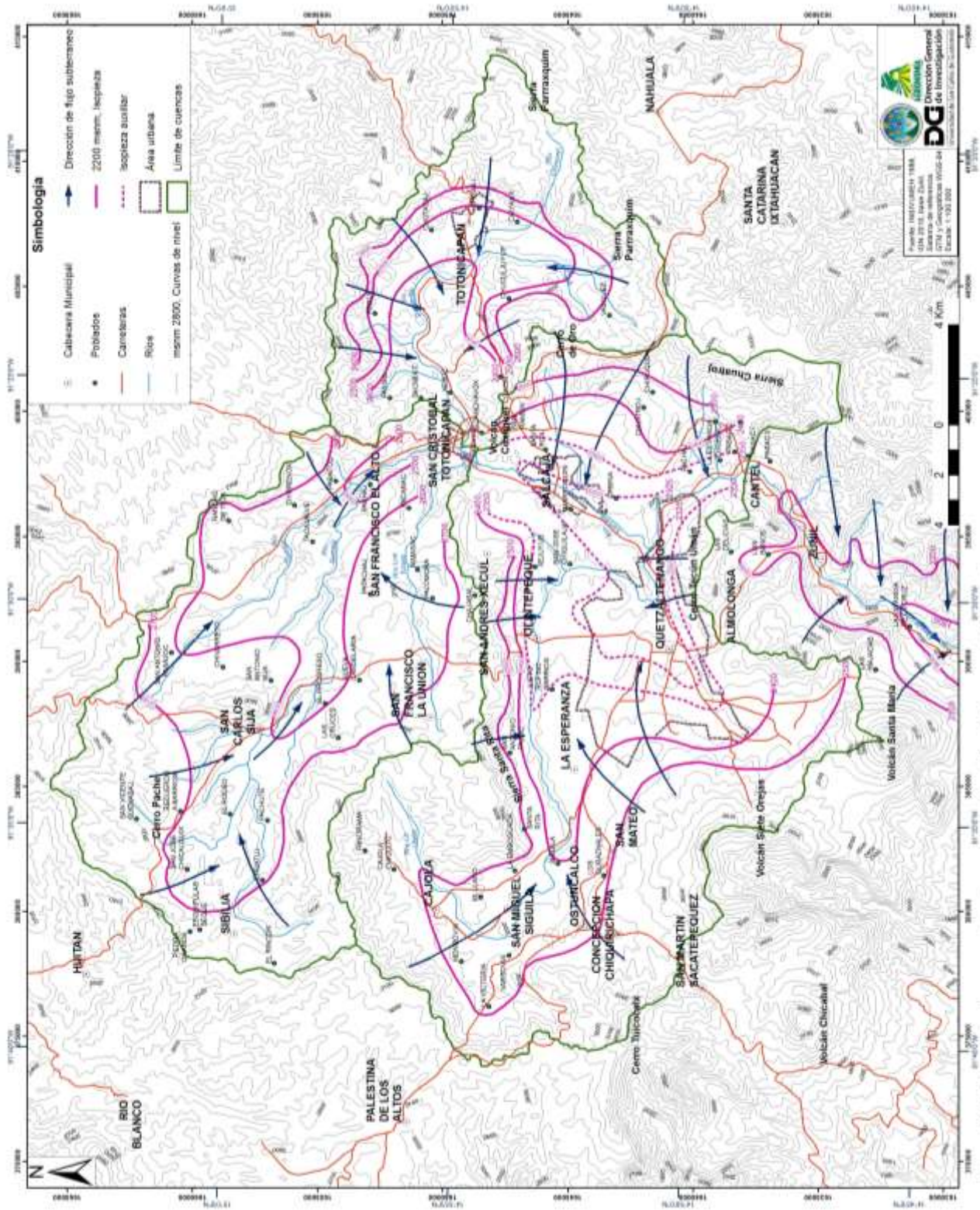


Figura 34. Red de flujo de aguas subterráneas del acuífero Quetzaltenango - Totonicapán.

4.1.7 Acuífero Totonicapán

Este acuífero representa la parte este de la cuenca del río Samalá, limitado al sur y al este por las Sierras Chuatoj y Parraxquim, al norte por los cerros de Paqui y San Francisco El Alto, y al lado oeste converge el río Posutulte con el río Samalá en San Cristóbal Totonicapán.

El área de la subcuenca es de 120.03 Km².

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

En este caso el acuífero es captado en rocas volcánicas fracturadas y algunas capas de piroclastos de pómez, sin embargo, es difícil separarlos.

Los espesores saturados son mayores de 200 m.

El acuífero presenta transmisividades de medias a altas, con valores entre 70 a 1,200 m²/d (INSIVUMEH, 1988). Las producciones de los pozos son pequeñas a grandes, con caudales de extracción de 5 a 40 L/s.

Conductividad hidráulica

La permeabilidad es baja, entre 0.5 a 10 m/d, clasificándose como un acuífero pobre a regular, ya que los pozos captan ambos acuíferos en la parte central de Totonicapán.

Coefficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento presenta valores entre 2×10^{-2} a 6×10^{-4} (INSIVUMEH, 1988). Es decir, el acuífero presenta confinamiento por capas de piroclastos compactos y cenizas volcánicas.

Considerando que el acuífero tiene un espesor medio de 200 m y una extensión de 120 Km², el volumen del acuífero es de 24 Km³. Si en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 22 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $5,280 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento es en promedio 1×10^{-2} , resultando que al hacer descender en 1 m el nivel del agua del acuífero, se dispondría de 52.8 millones de m³ de agua.

Herrera y Orozco (2016), calcularon que la extracción de agua subterránea en el área de Totonicapán, es de 32.4 millones de m³.

Comparando la reserva de agua subterránea de 52.8 millones de m³ con la extracción de 32.4 millones de m³, se tiene una disponibilidad de 20.4 millones de m³. Este volumen de agua subterránea es equivalente a un caudal de 0.33 m³/s.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

El mapa de unidades hidrogeológicas de la Figura 31 y el perfil hidrogeológico C – C' de la Figura 35, muestra piroclastos de pómez del Cuaternario sobreyaciendo a rocas volcánicas del

Terciario, que se depositaron sobre rocas clásticas de areniscas, lutitas y conglomerados de edad Mesozoica.

La unidad hidrogeológica con permeabilidad secundaria por fracturación, comprende lavas andesíticas, basálticas, riolíticas, así como, tobas del Terciario, con espesores mayores de 250 m, formando la zona saturada en un medio fisurado, aunque en la parte central de Totonicapán se tienen espesores saturados de piroclastos de pómez.

Este acuífero está delimitado en la parte central por fallas normales, que han originado la fracturación de las rocas volcánicas y el almacenamiento de agua subterránea en una cuenca localizada.

Niveles de aguas subterráneas

La profundidad de las aguas subterráneas bajo la superficie del terreno, oscila entre 6 a 60 m, sin embargo, en el mapa de red de flujo de la figura 26, se observa que las isopiezas presentan valores de 2,600 a 2,400 msnm.

La dirección de flujo subterráneo corresponde con el flujo superficial del río Posulutte hacia el río Samalá y esta definida por los cerros de la Sierra Parraxquim al oeste hacia las partes bajas.

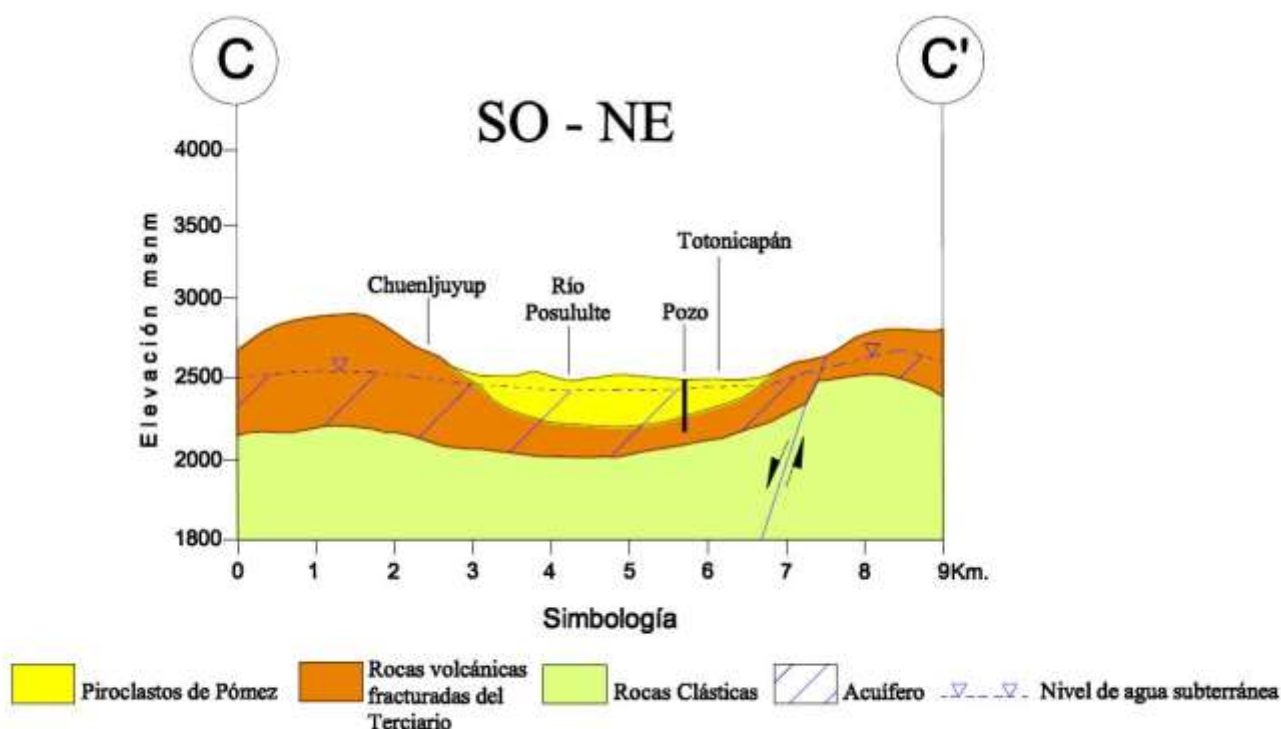


Figura 35. Perfil hidrogeológico C - C' del acuífero Totonicapán.

4.1.8 Acuífero Santa Cruz del Quiché

El área está delimitada en la parte norte por el Cerro Telecux en San Pedro Jocopilas, al sur el río Canchá, al este San Sebastián Lemoa y al oeste el Cerro Tocolol en San Antonio Ilotenango.

El poblado de Santa Cruz del Quiché se ubica en la divisoria de aguas de los ríos Canchá y Pachilitac. El río Chanchá es afluente del río Arco que drena al río Motagua y el río Pachilitac o Jocol, es afluente del río Caca que drena al río Negro o Chixoy.

El área de estudio es de 135.51 km², con coordenadas geográficas: 14.9212 a 15.086 grados de latitud norte y de 91.0823 a 91.2387 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 1,650,068 m a 1,668,250 m norte y 420,599 a 437,359 m este.

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

El acuífero se encuentra en piroclastos de pómez y rocas fracturadas de tobas soldadas, con espesores saturados de 100 a 240 m.

Las transmisividades son medias, entre 100 a 850 m²/día.

La extracción del agua subterránea oscila entre 10 a 35 L/s por pozo, clasificándose como producciones moderadas a grandes. Siendo los usos del agua principalmente para consumo humano.

En la cuenca se identificaron 10 pozos mecánicos y un gran número de pozos excavados. Además, existe la captación de manantiales de las partes montañosas.

Conductividad hidráulica

Las capas de tobas soldadas, presentan diferentes grados de fracturación y tienen valores de permeabilidad bajos a medios de 0.5 a 10 m/d, clasificándose el acuífero como regular. Esta permeabilidad es principalmente secundaria, constituyendo un medio fisurado. Sin embargo, en algunas partes se encuentran saturados los piroclastos de pómez y la porosidad es primaria.

Coefficiente de almacenamiento

El acuífero se encuentra sobreyacido por depósitos piroclásticos y capas de ceniza volcánica, lo que le da semiconfinamiento, con un coeficiente de almacenamiento es de 2×10^{-2} a 6×10^{-2} .

Considerando que este acuífero tiene un espesor de 170 m y una extensión de 135.51 Km², el volumen del acuífero es de 23 Km³. Si en este volumen la porosidad media es de un 10 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $2,300 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento de 4×10^{-2} , supone que el acuífero disponga de 92 millones de m³ de agua.

Comparando esta reserva de agua subterránea con la extracción de 12.9 millones de m³, se tiene una disponibilidad de 79.1 millones de m³, que equivalen a un caudal de 2.5 m³/s.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

El mapa hidrogeológico se presenta en la Figura 37 y los perfiles hidrogeológicos A – A' y B – B' en las Figuras 38 y 39, donde se observan las rocas volcánicas fracturadas constituidas por flujos de tobas del Terciario, formando la zona saturada o acuífero de 100 a 240 m. Mientras que la zona no saturada está constituida principalmente por piroclastos del Cuaternario, con espesores de 100 a 180 metros en la parte central del área.

En las partes norte y suroeste, en San Pedro Jocopilas y Santa María Chiquimula respectivamente, se presentan cuerpos intrusivos de granito (Figura 36) que forman acuífugos o barreras negativas, y constituyen el basamento del área. Además, al sur de Patzite afloran calizas del Cretácico que forman la cuenca hidrogeológica, sobre la que se depositaron rocas volcánicas.

El fallamiento en el área se presenta con el trazo final de la falla del Motagua, por lo que las rocas están fracturadas y es por donde circula el agua subterránea, formando un medio fisurado.



Figura 36. Afloramiento de granito en San Pedro Jocopilas

Red de flujo de aguas subterráneas

Existen dos direcciones de flujo de agua subterránea, una de noreste y otra del suroeste que confluyen hacia la parte central del área, y posteriormente descarga en los ríos Pachitac y El Arco. Este último se encuentra definido por la estructura geológica de la falla del Motagua.

La profundidad de las aguas subterráneas oscila entre 40 a 150 m, con valores de isopiezas de 2,300 a 1,900 msnm, como se muestra en la Figura 40. Los pozos mecánicos en el área presentan profundidades de perforación de 70 hasta 300 m, con diámetros de encamisado de 8 y 10 pulgadas.

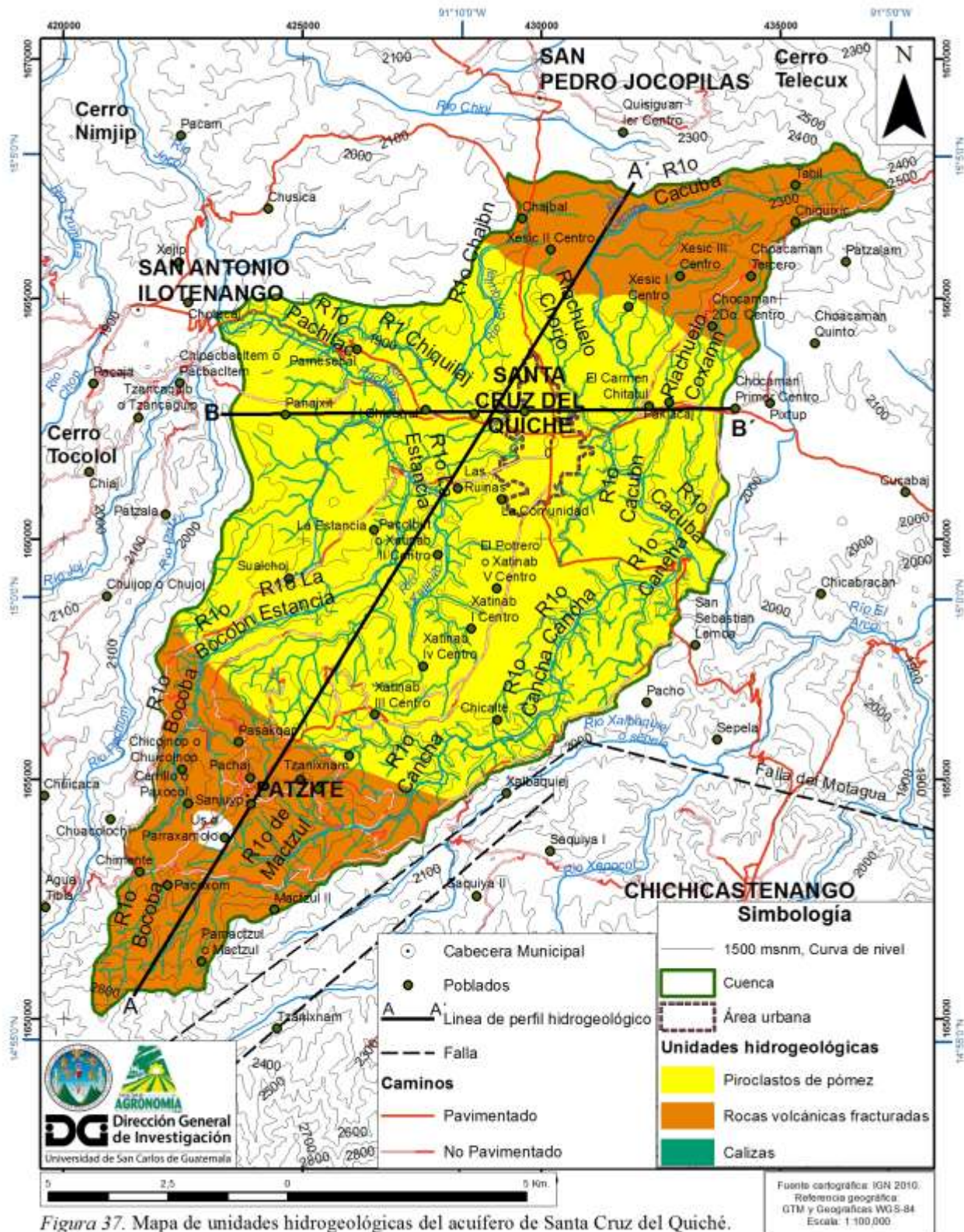


Figura 37. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero de Santa Cruz del Quiché.

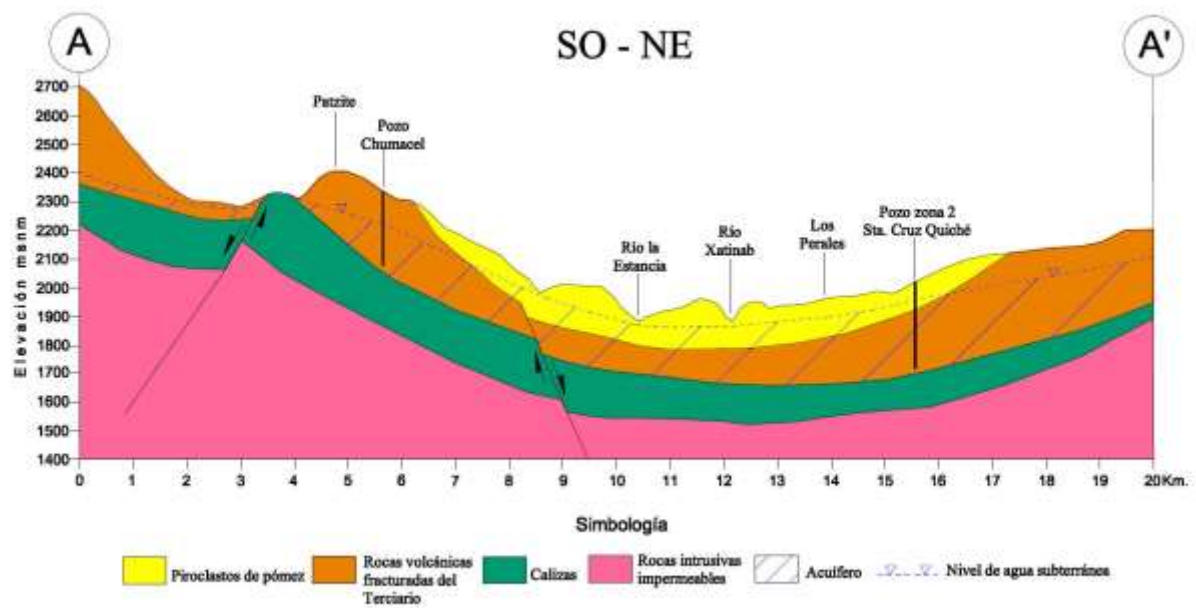


Figura 38. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero Santa Cruz del Quiché.

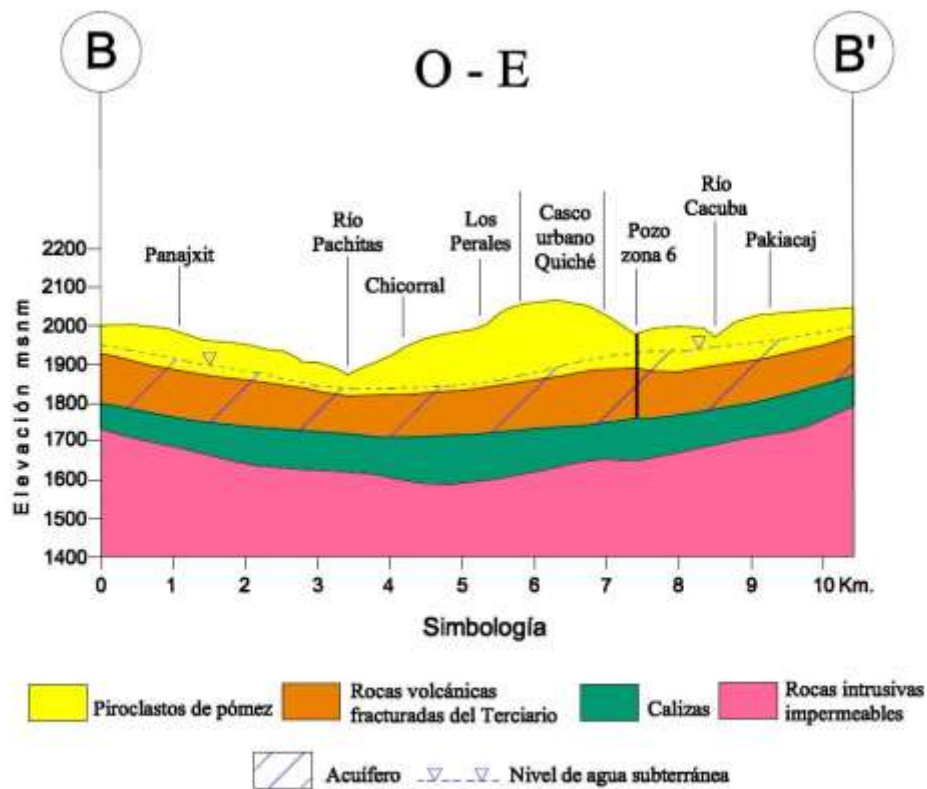


Figura 39. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero Santa Cruz del Quiché.

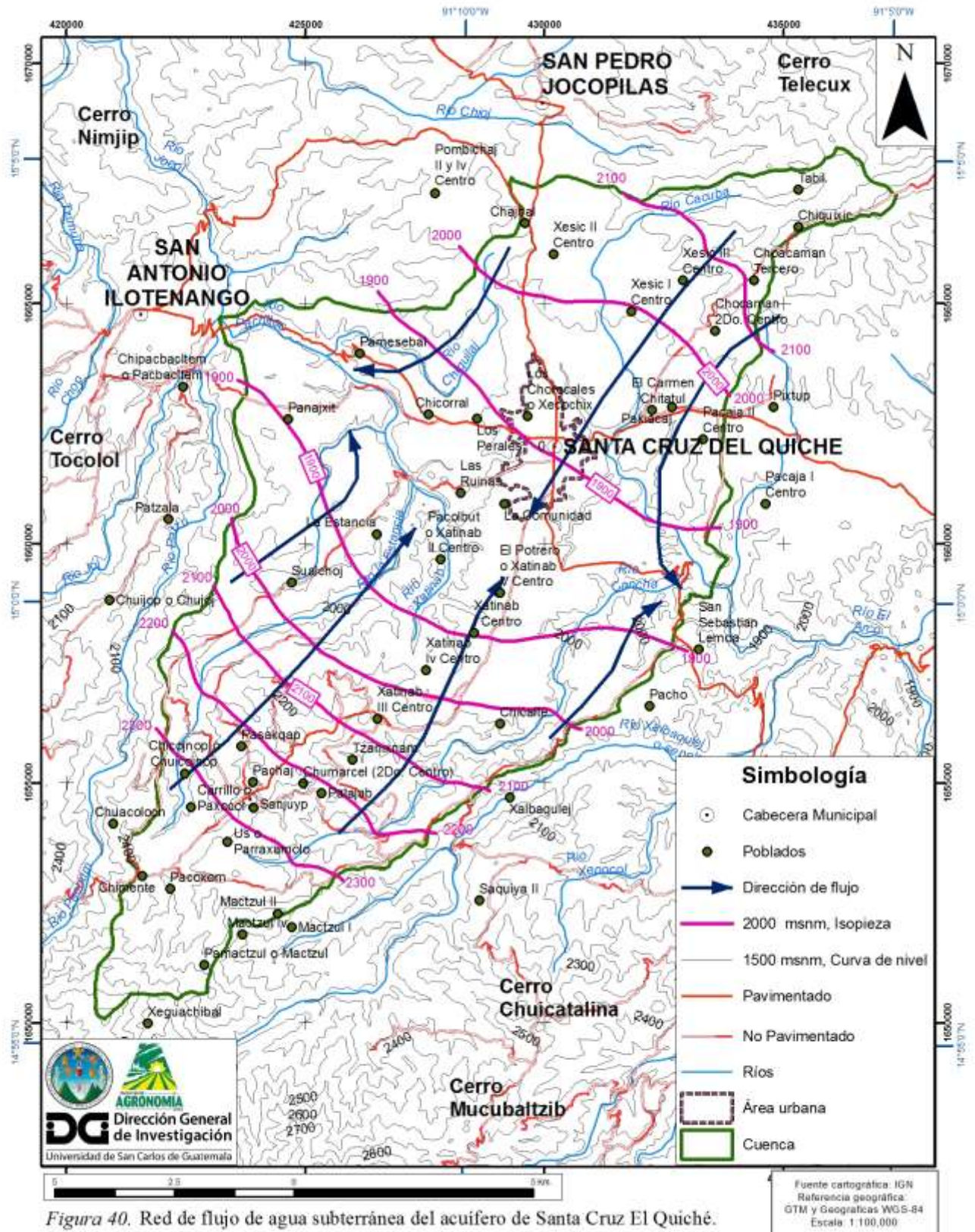


Figura 40. Red de flujo de agua subterránea del acuífero de Santa Cruz El Quiché.

Fuente cartográfica: IGN
Referencia geográfica:
GTM y Geograficas WGS-84
Escala: 1:100,000

4.1.9 Acuífero Sololá

En ésta zona se destaca la caldera volcánica de Atitlán, que es una depresión circular de 18 kilómetros de diámetro, 250 km² de área y 900 m de profundidad, con volcanes recientes al sur como San Pedro, Tolimán y Atitlán, los que originan relieves accidentados que marcan el borde sur del altiplano, alcanzando altitudes de más de 3,000 msnm.

Estos materiales volcánicos han formado montañas altas con elevaciones mayores de 3,000 msnm en la Cumbre María Tecún al norte. En la parte central, en los alrededores de Sololá, existen altiplanicies onduladas entre los 2,300 a los 2,500 msnm y hacia el sur se encuentran las laderas muy inclinadas o escarpes de fallas y los taludes que finalizan en el lago desde los 2,400 a los 1,600 msnm, donde se forman las abanicos coluvio-aluviales, sobresaliendo los de los ríos Quiscab y Panajachel a elevaciones entre los 1,564 a 1,640 msnm.

El principal cuerpo de agua en el área es el Lago de Atitlán, que es una depresión geológica original de 900 m de profundidad, de los cuales 300 están ocupados por sedimentos lacustres y material eruptivo de los volcanes del lago, el agua ocupa otros 300 m y los 300 m restantes constituyen la altura actualmente visible de la caldera. La superficie del espejo de agua a 1,564 msnm, es de aproximadamente 125 km², haciendo un volumen de 37,500 millones de m³.

El área total de captación del lago es de 528 km², pero debido a que este lago no tiene ríos de salida, todos los sedimentos y materiales arrastrados de las cuencas fluviales se acumulan en el fondo del lago y las variaciones de nivel no dependen primordialmente de los fenómenos climáticos, sino de una variación de las características de infiltración (Herrera, 2005). Por lo tanto, las variaciones del nivel de lago son por el proceso de “colmatación de filtraciones”, que consiste en que las fallas o ductos que drenan el agua se van bloqueando con el transcurso del tiempo, hasta que el flujo de salida del lago disminuye considerablemente. Cuando esto sucede el nivel del lago vuelve a incrementarse hasta que llega a un límite donde la presión hidrostática es de tal magnitud que “destapa”, las fracturas o fallas reiniciándose el proceso y bajando nuevamente el nivel del lago.

El lago baja su nivel producto del alto grado de fallamiento y fracturamiento de la zona, las cuales se abren por la sismicidad del área principalmente al sur y sureste del lago. Un ejemplo es el terremoto de febrero de 1976 que causó un descenso de nivel considerable en el lago, de -0.82 m de 1976 (1,561.38 m) a 1977 (1,560.56 m). Anterior al sismo de 1976 existía un descenso del nivel del lago de -0.32 m al año (1972 a 1976).

En la cuenca norte del Lago de Atitlán, la principal área de captación se presenta en la parte norte, que corresponde a la cuenca del río Quiscab con una extensión de 159.60 km² y el río Panajachel con un área de 71.20 Km².

El área total de la cuenca alrededor del lago es de 528.21 Km² y sus coordenadas geográficas son de 14.582 a 14.888 grados de latitud norte y 91.0918 a 91.3096 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM, son de 1,612,571 m a 1,646,349 m de latitud norte y 412,896 m a 436,245 m de longitud este.

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

El acuífero está constituido por rocas volcánicas y sedimentos volcánicos, caracterizándose las lavas por tener porosidad secundaria por fracturas y los sedimentos por presentar porosidad primaria. Los espesores saturados varían de 40 a 225 m.

Los valores de transmisividad varían de 30 a 400 m²/día, de acuerdo a las pruebas de bombeo realizadas en el centro de Sololá y Santa Lucía Utatlán por JICA (1995). Esta transmisividad se clasifica como baja a media.

La producción de los pozos es moderada, con caudales de extracción de 10 a 25 L/s.

Conductividad hidráulica

La permeabilidad varía entre 0.2 a 2.5 m/día, clasificándose como baja a media. Esta permeabilidad es secundaria y alcanza valores altos en las áreas que poseen fracturación intensa y profunda.

Coefficiente de almacenamiento

En el área el coeficiente de almacenamiento es de 1×10^{-2} a 5×10^{-2} , que define un acuífero semiconfinado (Herrera, 2005). Esto se correlaciona también por la litología y por los bajos descensos de niveles.

El acuífero inferior tiene condiciones de semiconfinamiento, por algunas capas de cenizas volcánicas y sedimentos finos, los cuales funcionan como acuitardos.

El acuífero tiene una extensión de 315 Km², sin considerar el área del lago y las rocas impermeables, con un espesor medio de 133 m, el volumen del acuífero es de 41.9 Km³. Si en este volumen la porosidad media es de un 10 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $4,190 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento medio es de 3×10^{-2} , resultando que al hacer descender en 1 m el nivel del agua del acuífero, se dispondría de aproximadamente 125.7 millones de m³ de agua.

En el área de Sololá se da principalmente la captación de aguas superficiales de los ríos Chuiscalera, Xibalbay, Novillero, Argueta y Barreneché para consumo humano (Padilla, 2012).

Además, en el departamento de Sololá por tradición se captan manantiales, haciendo un total de 3.918×10^6 m³/año (Herrera, 2005). Los más importantes son los de Sololá que capta 9 manantiales con 2.75×10^6 m³/año, San José Chacayá (5) con 0.46×10^6 m³/año, Santa Lucía Uatlán (1) con 0.063×10^6 m³/año, San Juan La Laguna (2) con 0.092×10^6 m³/año, San Marcos (3) con 0.01×10^6 m³/año, San Pablo (1) con 0.095×10^6 m³/año, San Pedro (5) con 0.16×10^6 m³/año, Santa Cruz (1) con 0.19×10^6 m³/año y Santa Clara (1) 0.098×10^6 m³/año.

Por otro lado, en las poblaciones de San Antonio Palopo, San Lucas Tolimán, Santiago Atitlán, San Pedro La Laguna y San Juan La Laguna, se extraen aguas del lago para consumo humano.

Por lo anterior, existe una baja extracción de aguas subterráneas del acuífero por medio de pozos mecánicos de aproximadamente 8.74×10^6 m³/año, que comparada con las reservas del acuífero de 125.7 millones de m³ de agua, se tiene una disponibilidad de 116.96 millones de m³ de agua, que equivale a un caudal de 3.7 m³/s.

De acuerdo a estas cifras, las reservas naturales son mayores a las extracciones. Esto implica que el manejo del recurso hídrico subterráneo es deseable y posible por medio de la construcción de pozos de agua mecánicos y profundos de más de 200 m en las partes altas y medias de la cuenca, y de alrededor de 100 m en las partes bajas a orilla del lago.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

El acuífero constituido por rocas volcánicas y sedimentos, caracterizándose las lavas por tener porosidad secundaria por fracturas y los sedimentos por presentar porosidad primaria.

Las unidades hidrogeológicas del área se observan en la Figura 42 y los perfiles hidrogeológicos de las Figuras 43 y 44, donde se incluyen a las rocas volcánicas fracturadas, sedimentos volcánicos y los piroclastos de pómez.

Las unidades litológicas de la zona, son el intrusivo granítico, las lavas compuestas principalmente por flujos riolíticos que constituyen el grupo volcánico del Terciario, y lavas basálticas y piroclastos que constituyen el grupo volcánico Cuaternario con aluviones.

Las rocas intrusivas de granito constituyen el basamento, aflorando al suroeste del área, en San Juan y San Pablo La Laguna, y en el río Nahualate y en la Sierra Parraxquim. Esta unidad constituye una barrera impermeable para el agua subterránea o acuífugo que es un cuerpo que no transmite, ni almacena agua subterránea.

Las rocas volcánicas del Terciario están constituidas por flujos riolíticos, tobas y sedimentos. La unidad de riolitas y tobas constituyen acuifugos, y se encuentran aflorando en la divisoria de aguas norte, desde los Encuentros, la Cumbre María Tecún, Cerro Tzampual y Montaña Chuanimajuyub, en la parte alta de la cuenca. El foco de emisión de estos flujos riolíticos, es un complejo volcánico antiguo conocido como Montaña o Cumbre María Tecún, que representa el punto más alto de la cuenca en la parte norte, que se conocen como “Tobas María Tecún” (Newhall, 1982). Esta unidad delimitada por sistemas de fallas de orientación noreste y noroeste del área. Por lo que estos flujos riolíticos se extienden hacia el norte de la cuenca y se adelgazan hacia la parte occidental fuera de la cuenca. Sin embargo, su extensión en el subsuelo es muy extensa, cubriendo toda la parte norte de la cuenca del lago de Atitlán. El espesor promedio es de 200 m, medido tanto en el afloramiento de la carretera del cruce a Sololá – Quiché (Los Encuentros) y el pozo de Santa Lucía Uatatlán dentro de la cuenca. Aunque en los centros de efusión puede llegar a tener alrededor de los 400 m como en la Cumbre María Tecún, donde se pueden identificar intrusiones de granito. La edad de la unidad del grupo volcánico Terciario, abarca el Mioceno Superior y el Plioceno (JICA, 1995).

La unidad de sedimentos y tobas, es un relleno de la caldera de Atitlán, llamados sedimentos de relleno fase 1 (caldera I) y fase 2 (caldera II). Sobre estos sedimentos existen tobas riolíticas denominadas: Panajachel, San Jorge y La Catarata (Newhall, 1982), que afloran principalmente en los escarpes del norte del lago.

Los sedimentos de relleno fase I, son principalmente brechas volcánicas de color gris verdoso, con fragmentos líticos de riolita, dacita y andesita. La matriz es tobácea, con abundante vidrio volcánico. Los espesores varían de 20 a 70 m.

Generalmente los sedimentos de relleno fase II, son areniscas tobáceas de tipo riolíticas, de color beige a gris, con piroclastos de fragmentos volcánicos, vidrio y cuarzo. A veces se presenta pseudoestratificada y en cortes verticales. Los espesores varían de 20 a 60 m.

Los sedimentos o relleno de caldera, generalmente se van engrosando en profundidad hacia el lago de Atitlán.

Las rocas volcánicas cuaternarias, incluyen lavas y piroclastos, que sobreyacen a los sedimentos como se aprecia en la Figura 41.



Figura 41. Piroclastos y lavas cuaternarias sobreyaciendo sedimentos en Sololá

Los flujos de lavas andesíticas y dacíticas son producto de erupciones de fisura y por conos compuestos y cineríticos extintos como los cerros de Chuichimuch y los volcanes cuaternarios de San Pedro, Tolimán y Atitlán al sur de la cuenca. Esta unidad de lavas tiene mucha importancia, ya que en estas rocas fracturadas, tiene lugar la infiltración, circulación y almacenamiento de agua, que se traduce en pequeños manantiales que abastecen ciertas comunidades del área.

Los espesores varían de 30 a 180 m y la edad es del Pleistoceno (JICA, 1995).

El espesor máximo de los flujos lávicos, encontrado por medio de perforaciones, es de 50 metros en la zona de Santa Lucia Uatlán y el mínimo es de 13 m en el pozo Xolbe de Sololá. Esto indica que el espesor aumenta hacia la región montañosa, al oeste de la cuenca y disminuye hacia el este y noreste.

Los piroclastos de pómez se encuentran cubriendo toda la cuenca y se extienden a toda la región del altiplano volcánico. Estos depósitos de caída alcanzan espesores hasta de más de 100 m, principalmente en los cañones del río Quiscab.

La edad asignada a estos materiales es del Pleistoceno-Holoceno (JICA, 1995).

Los aluviones yacen principalmente al final de los deltas de los ríos Quiscab y Panajachel, así como en las riberas de los ríos Pampatín, Jaibalito, y La Cañada, en Santa Cruz La Laguna. Así también en las quebradas de San Marcos y San Pablo La Laguna, Riachuelo Caníbal y Quebrada Seca en San Juan La Laguna.

Esta unidad se compone de sedimentos secundarios de los materiales volcánicos, ocupando extensiones de más de 1 Km² en la parte final de los ríos Quiscab y Panajachel, por lo que están saturados y son importantes de forma local.

Los espesores promedio encontrados son de 20 m, en las partes centrales de los ríos.

Red de flujo de aguas subterráneas

El Lago de Atitlán es una caldera volcánica, que ha tenido tres episodios, identificándose actualmente solo dos calderas. Estas calderas se han desplazado hacia el sur, por lo que la caldera más antigua se presenta al norte.

El flujo subterráneo presenta un control estructural desde las partes altas de las montañas a las partes bajas de la caldera del lago, como se observa en la Figura 45.

En la zona de estudio, se presentan profundidades del nivel estático bajo la superficie del terreno desde 18.5 m en Panajachel en parte más baja hasta 131.54 m al noroeste del poblado de Santa Lucia Uvatlán en la parte media. Es decir, los niveles se encuentran entre los 1,600 msnm en la parte baja de la cuenca y entre 2,200 a 2,300 msnm en la parte media de la misma.

La dirección del flujo del agua subterránea es hacia el lago de Atitlán. En el poblado de Sololá, se muestra una tendencia de norte a sur, con una recarga desde las partes medias de la cuenca. En el área de San Juan y San Pedro La Laguna, el flujo del agua subterránea muestra una tendencia de suroeste a noreste, mientras que en Santa Catarina y San Antonio Palopo la dirección del flujo es de este a oeste. En los volcanes de San Pedro y Tolimán, la dirección de flujo subterráneo es radial, es decir, de las partes altas del cono hacia las partes bajas.

La captación de agua subterránea más común en la zona, es la de manantiales. La mayoría de manantiales existentes son de tipo puntual producto de fallas y fracturas. Las producciones de los manantiales varían entre 0.5 a 25 L/s, siendo sus captaciones continuas, es decir de 24 horas.

Se tienen algunos pozos identificados al norte de Sololá (Xolbe), Santa Lucia Uvatlán, Panajachel y San Pedro, que presentan producciones de aproximadamente 10 L/s (158 gal/min), clasificándose como producciones pequeñas.

Los pozos son de 8 pulgadas de diámetro y con profundidades alrededor de los 170 m. Los bombeos no son continuos, por lo que la explotación del agua subterránea, en la mayoría de casos, trabajan un promedio 14 horas por día (100 horas semanales).

Es importante tener presente que por la falta de fuentes de agua como manantiales y pozos en algunos lugares, las demandas de agua potable se satisfacen con el bombeo de agua del Lago de Atitlán.

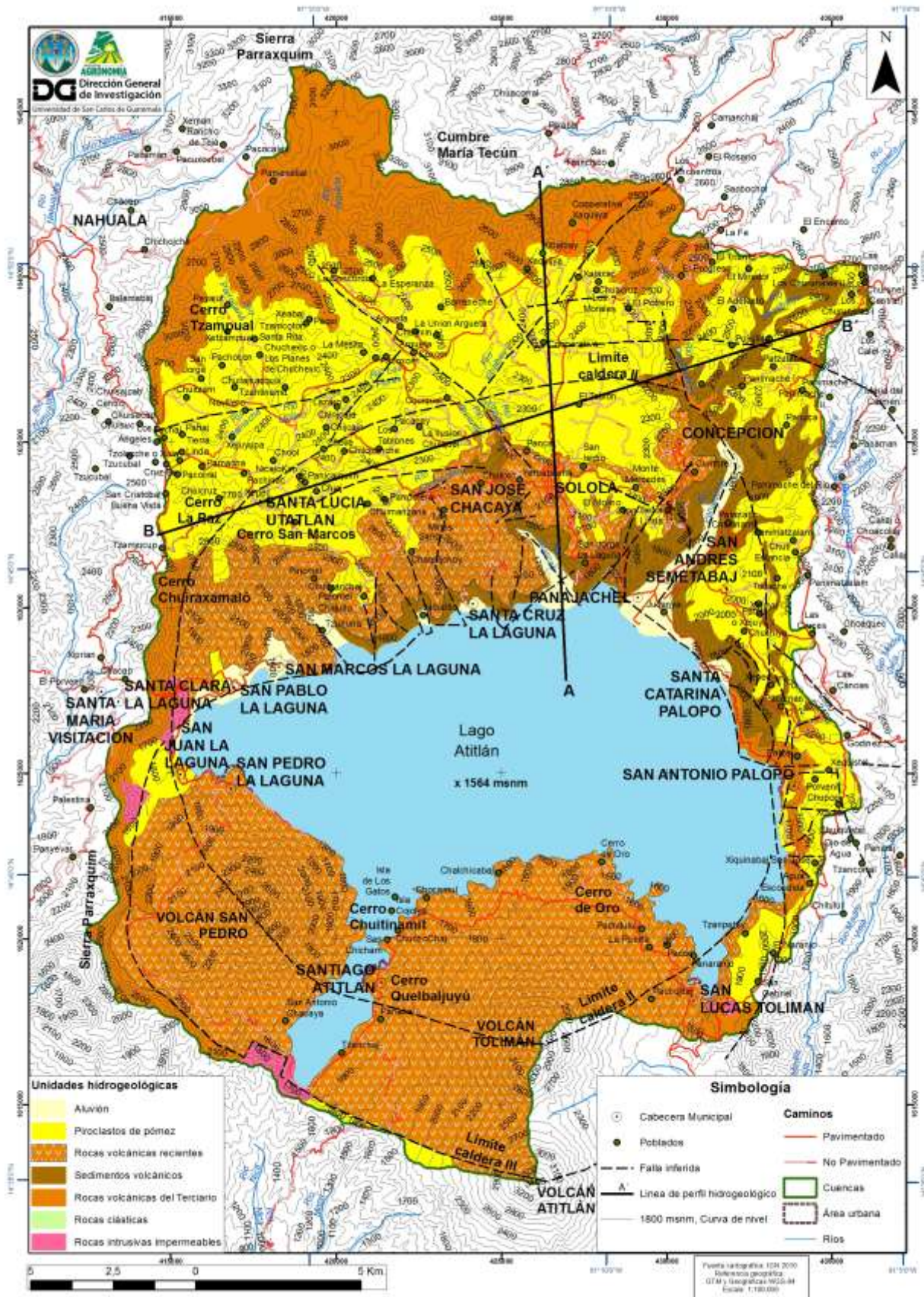


Figura 42. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Sololá.

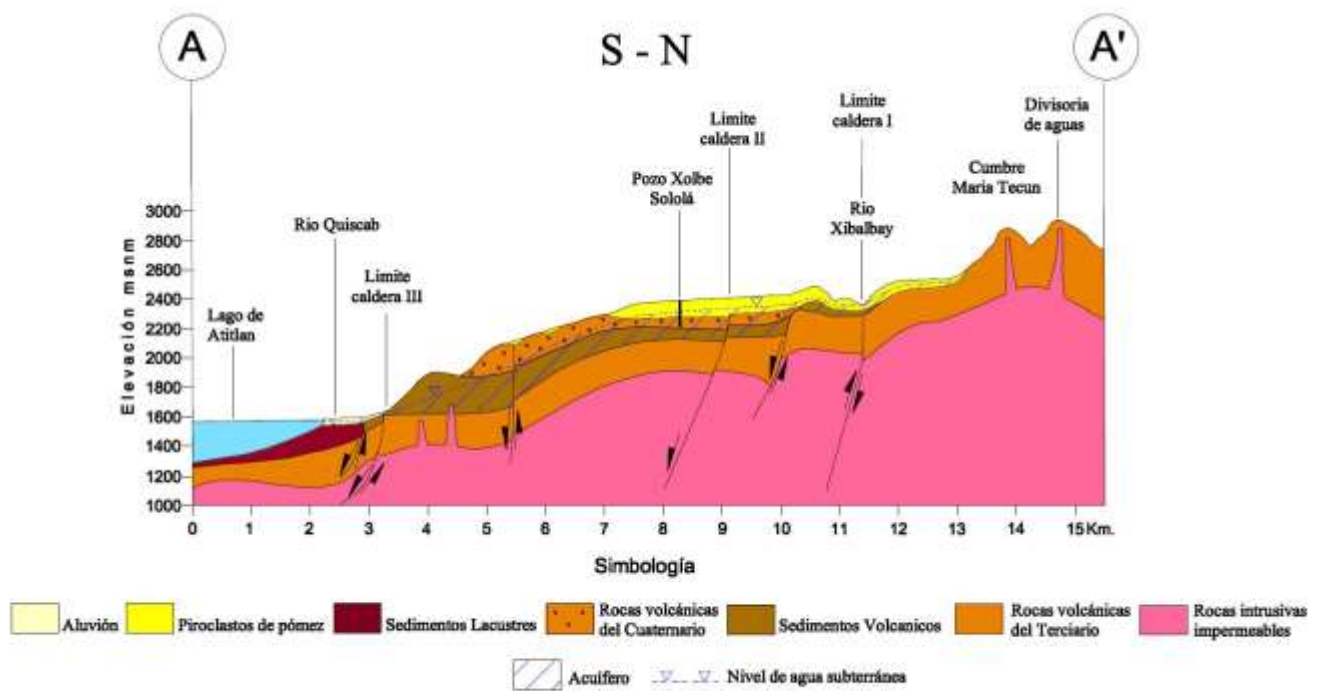


Figura 43. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero Sololá.

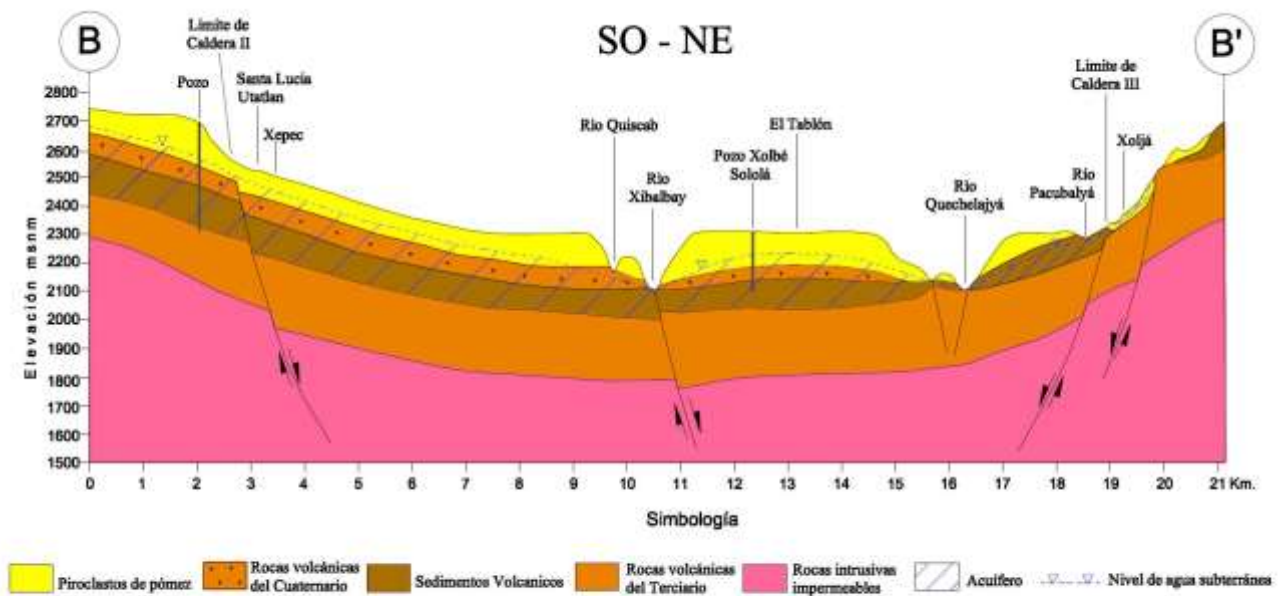


Figura 44. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero Sololá.

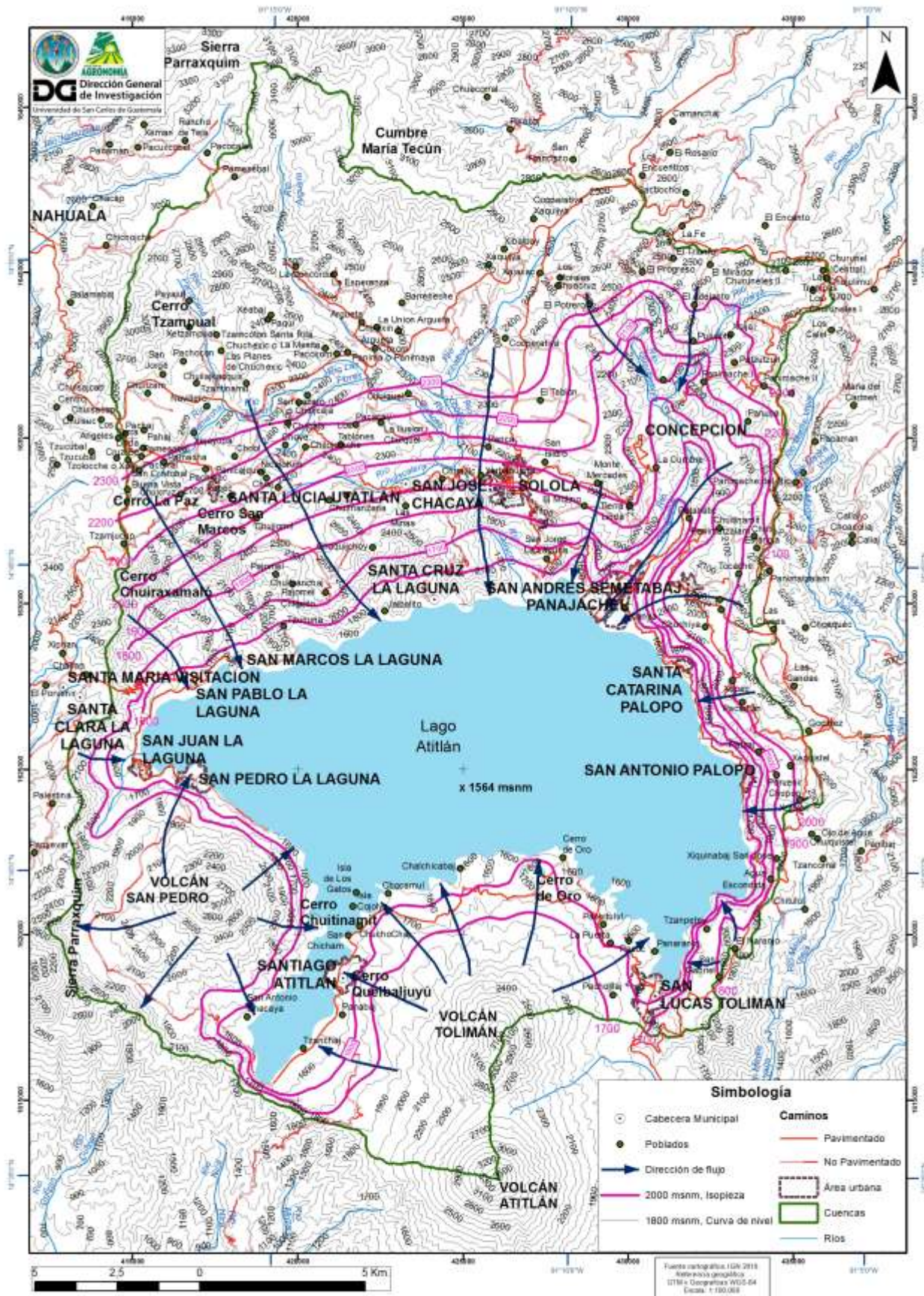


Figura 45. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Sololá.

Acuíferos de la zona oriental

4.1.10 Acuífero Cuilapa

El área de estudio comprendió 150.53 km² y comprende la parte media de la cuenca del río Los Esclavos, donde se asienta Cuilapa que es la cabecera departamental de Santa Rosa.

El área está delimitada en la parte norte por el Volcán Jumaytepeque con 1,815 msnm, en la parte este los cerros de Guacamayas a 1,500 msnm, en la parte sur la aldea y el río Los Esclavos a 730 msnm y en la parte oeste el poblado de Barberena a 1,250 msnm.

La subcuenca hidrográfica del río Cuilapa es afluente del río Los Esclavos que drena al Océano Pacífico.

Las coordenadas geográficas del área son de 14.2282 a 14.3582 grados de latitud norte y 90.2094 a 90.3573 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 11573,295 m a 11587,667 m N y 515,339 a 531,340 m E.

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

El acuífero se encuentra en rocas volcánicas fracturadas de andesitas, con espesores saturados mayores de 300 m. También existen algunas partes saturadas de basaltos y lahares.

En el casco urbano de Cuilapa se presentan transmisividades medias de 110 a 830 m²/día

La producción es moderada con extracciones de agua subterránea entre 11 a 26 L/s por pozo, con un promedio de 18 L/s, de acuerdo al uso del pozo, siendo principalmente para agua potable.

En el área existen 8 pozos mecánicos, de los cuales 6 son municipales y 2 particulares.

En el aluvión a orillas del río Los Esclavos se presentan pozos artesanales o excavados con profundidades de 3 a 10 m y niveles estáticos de 1 a 6 m, que captan un acuífero superficial.

Conductividad hidráulica

Las capas de tobas soldadas, presentan diferentes grados de fracturación y tienen valores de permeabilidad bajos a medios de 0.5 a 5 m/d, clasificándose el acuífero como regular. Esta permeabilidad es secundaria y la porosidad media se calcula alrededor de 10 %, ya que la fracturación a pesar de ser intensa, es poco abierta en andesitas.

Coefficiente de almacenamiento

El acuífero se encuentra sobreyacido por basaltos y lahares, lo que le da características de confinamiento, con un coeficiente de almacenamiento entre de 2×10^{-2} a 4×10^{-3} .

Considerando que este acuífero tiene un espesor medio de 200 m y una extensión de 150 Km², el volumen del acuífero es de 30 Km³. Si en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 10 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a

$3,000 \times 10^6 \text{ m}^3$. El coeficiente de almacenamiento de 1.2×10^{-2} , supone que el acuífero disponga de aproximadamente 36 millones de m^3 de agua.

Empleando un caudal de extracción por pozo de 25 L/s o $900 \text{ m}^3/\text{d}$, trabajando 10 horas diarias. Si se consideran los 8 pozos del área, se tiene un caudal de extracción de agua subterránea de 2.63 millones de m^3 por año, que comparado con la capacidad del acuífero de 36 millones de m^3 , existe un potencial de explotación de 33.37 millones de m^3 por año, es decir, un caudal de agua subterránea de $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

En esta área se presenta la falla de Jalpatagua con rumbo de sureste a noreste y muchas fallas volcánicas con orientación norte a sur. Esto ha dado lugar a la fracturación de las rocas del Terciario y del Cuaternario.

Las unidades hidrogeológicas encontradas en Cuilapa son: rocas intrusivas de granito del Terciario inferior, andesitas fracturadas del Grupo Padre Miguel del Terciario, lahares del Terciario, basaltos y pómez del Cuaternario.

Las rocas intrusivas se presentan al norte de Cuilapa y constituyen barreras impermeables para el agua subterránea o acuífugo que es un cuerpo que no transmite, ni almacena agua subterránea.

Las andesitas afloran al norte y sur de Cuilapa, aunque se encuentran ampliamente extendidas en el subsuelo, ya que forman el basamento del área y la unidad acuífera porque se encuentran fracturadas, como se observa en la Figura 46.

Los lahares son materiales poco permeables, ya que contienen mucha arcilla en la matriz y se encuentran cementados.

Los basaltos aunque son consistentes, están fracturados y en algunas partes se encuentran saturados de agua.

Los piroclastos se presentan principalmente al norte del área en los alrededores de Nueva Santa Rosa y pueden formar acuíferos superiores colgados.

La hidrogeología del área, se presenta en la Figura 47 y los perfiles hidrogeológicos A – A' y B – B' Figuras 48 y 49, donde se observa un basamento de rocas volcánicas de andesitas del Terciario, que en algunas partes tiene intrusiones de granito. Sobreyaciendo a estas rocas se muestran los basaltos y los lahares en las partes superiores.



Figura 46. Andesitas fracturadas aflorando en el río Los Esclavos en Cuilapa.

Niveles de aguas subterráneas

La profundidad de las aguas subterráneas oscila entre 25 a 154 m bajo la superficie del terreno.

En la Figura 50 se presenta el mapa de la red de flujo de aguas subterráneas, con valores de isopiezas de 1,000 a 1,200 msnm en las partes altas y de 700 y 800 msnm en las partes bajas.

La dirección de flujo de agua subterránea varía de noreste a suroeste y de noroeste a sureste, esto es porque esta condicionado por el Volcán Jumaytepeque al norte del área.

En este caso la dirección del flujo subterráneo, corresponde con el flujo superficial del río Los Esclavos, ya que es la cuenca que define el flujo regional, que de forma general es de norte a sur.

Los pozos en el área presentan profundidades de perforación de 170 hasta 300 m.

Los pozos han sido perforados, con diámetros de encamisado de 6, 8 y 10 pulgadas con tubería metálica.

Los bombeos en los pozos de la municipalidad son discontinuos, trabajando de 6, 8 y 10 horas por día.

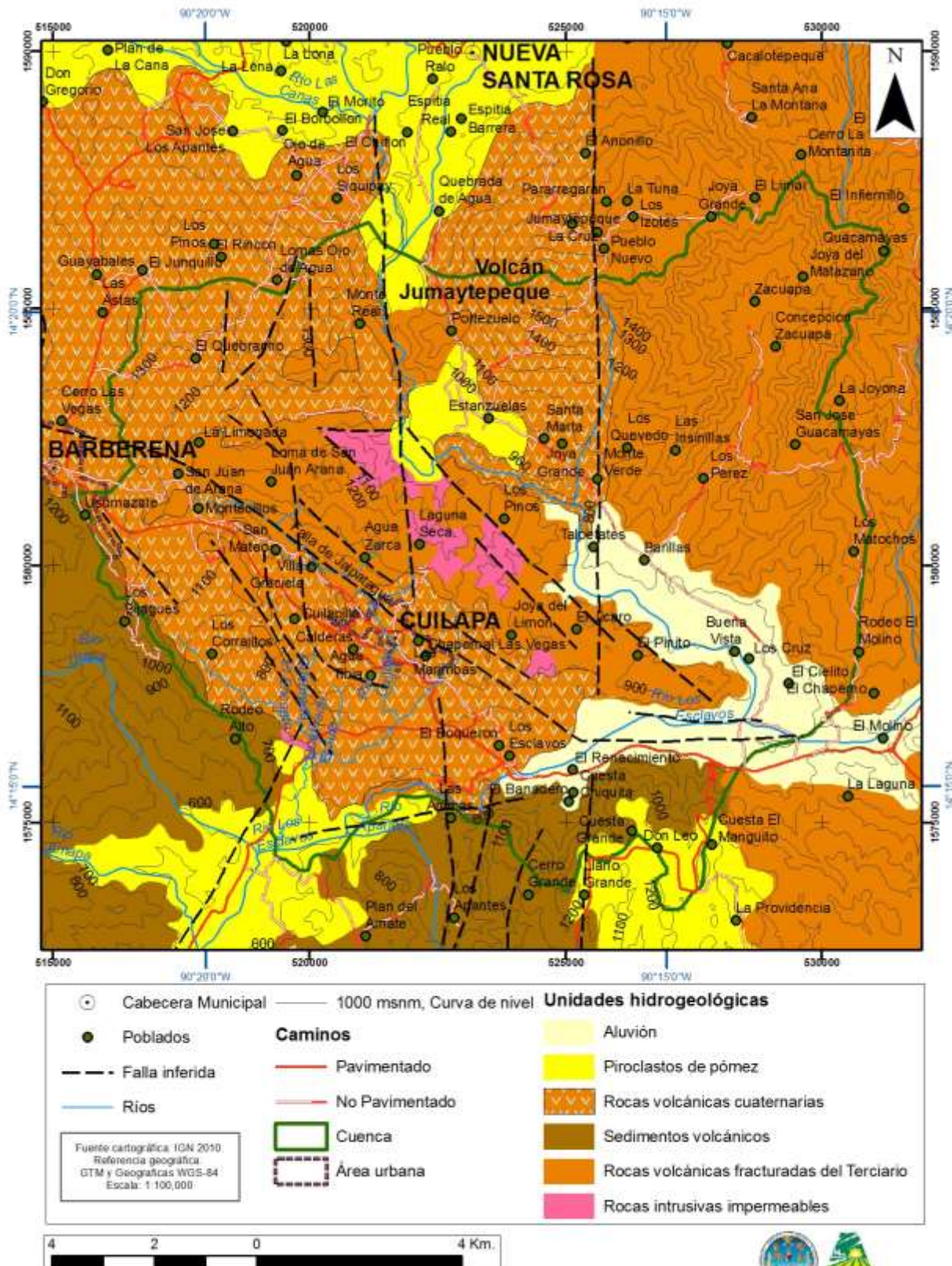


Figura 47. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Cuilapa.

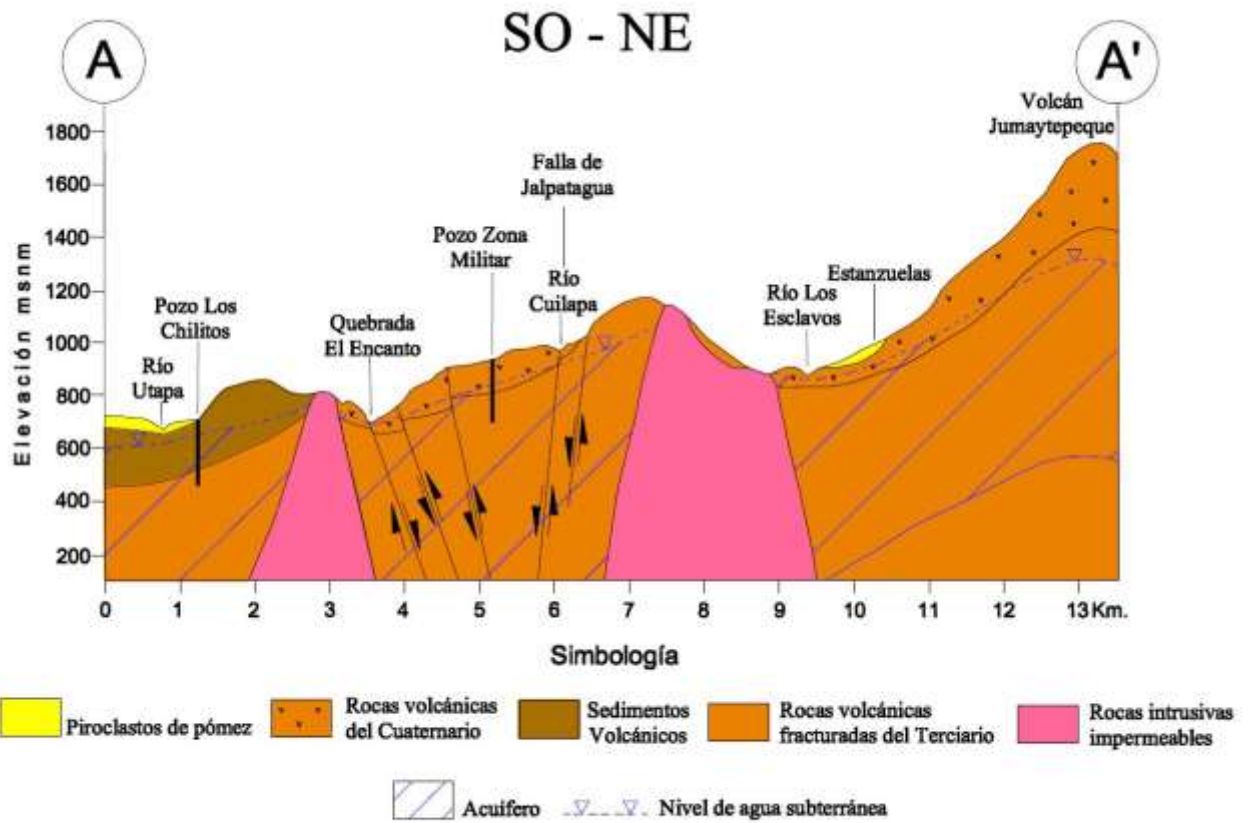


Figura 48. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero Cuilapa.

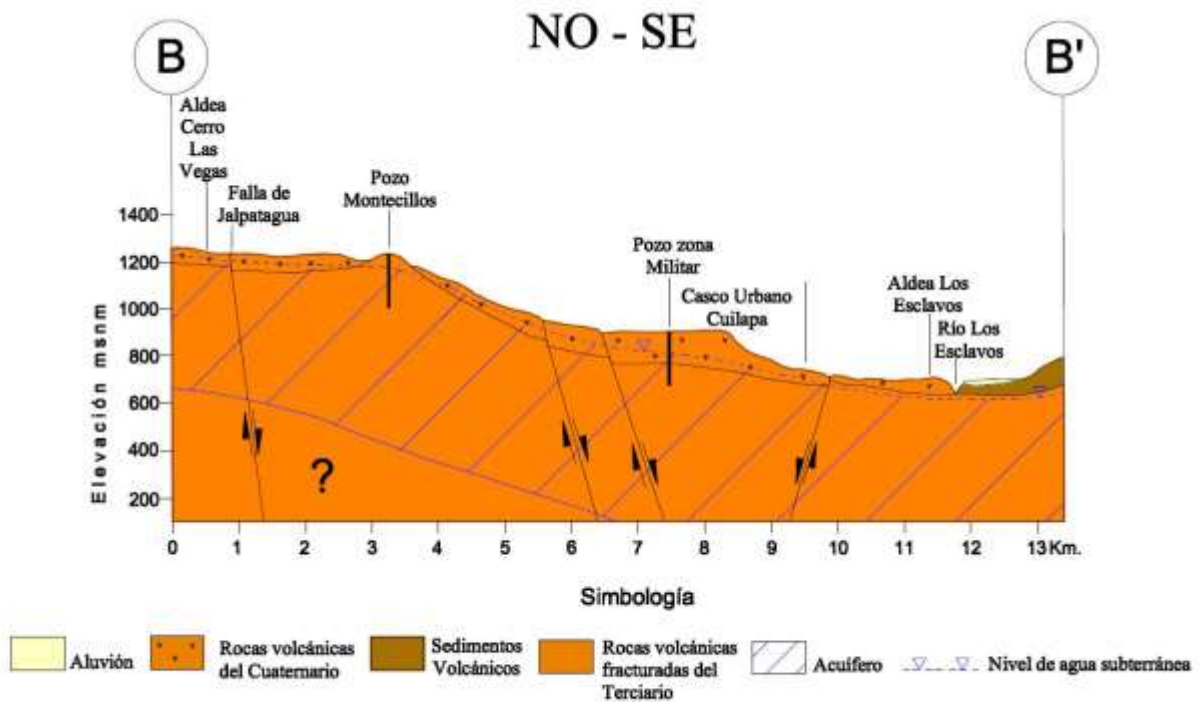


Figura 49. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero Cuilapa.

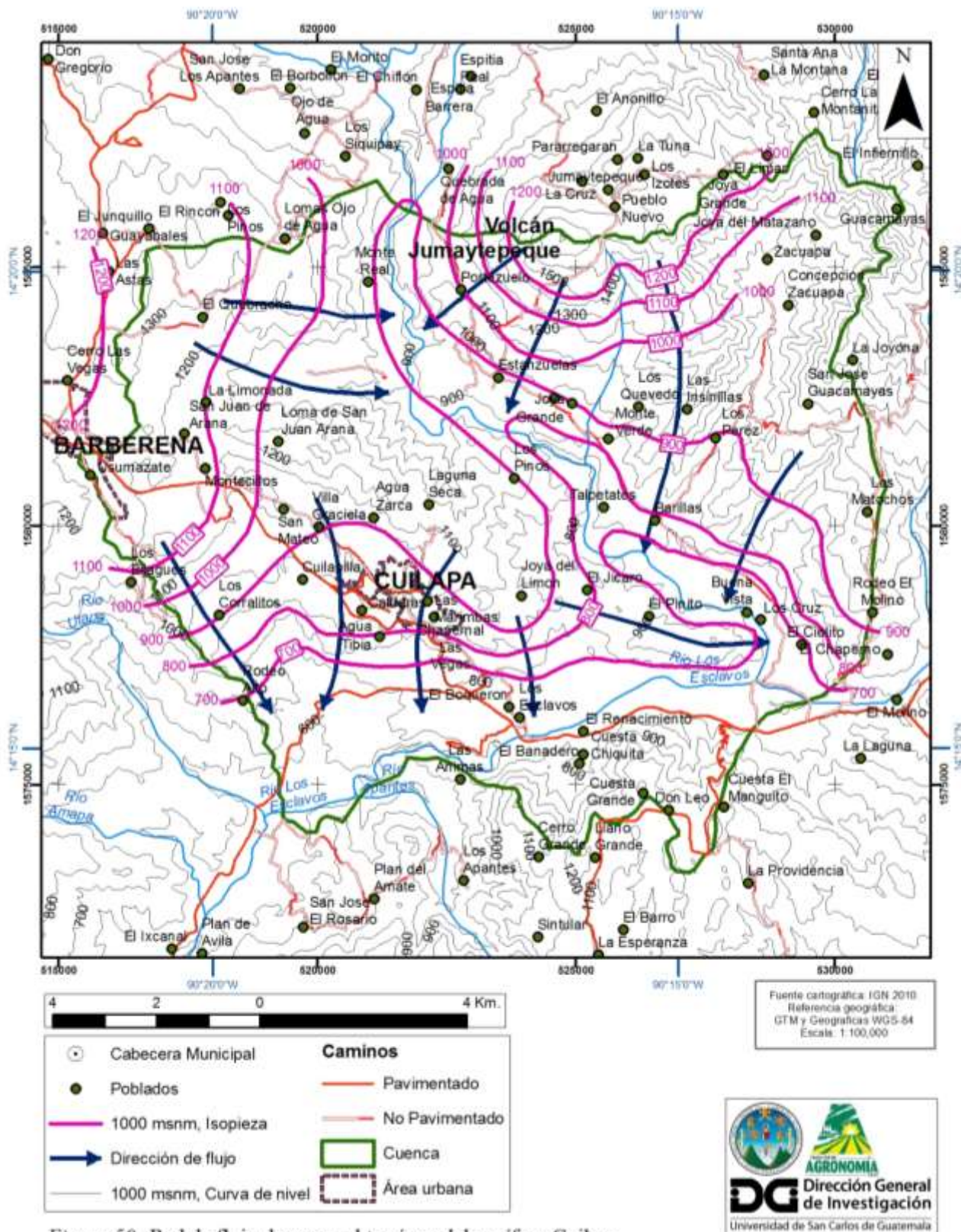


Figura 50. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Cuilapa.

4.1.11 Acuífero Jalapa

Este acuífero comprende el valle donde se asienta la cabecera departamental de Jalapa y la parte montañosa al suroeste. El acuífero está delimitado en la parte norte por el Volcán Jumay de 2,176 msnm, en la parte este lo delimita el Cerro de Alcoba a 1,855 msnm, en la parte sur el Cerro El Mudo a 2,819 msnm y en la parte oeste lo delimitan los cerros de Tatasirire, El Aguacate y Miramundo a más de 2,000 msnm.

Es importante considerar que en la parte noreste del área se localiza la falla de Jocotán, en sentido este a oeste, que define el valle del río Jalapa a través de 13 kilómetros de longitud. Además, esta falla causó un levantamiento del bloque norte, donde afloran calizas cretácicas y rocas metamórficas del Paleozoico superior.

La subcuenca hidrográfica del río Jalapa es afluente del río Motagua, y toma el nombre de río Tambor en San Diego, antes de unirse al río Motagua que drena hacia la Vertiente del Caribe. Las coordenadas geográficas del área son de 14.5393 a 14.6946 grados de latitud norte y 89.942 a 90.0944 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 1,607,766 m a 1,624,920 m N y 543,701 a 560,050 m E.

El área de la subcuenca hasta la aldea San José al noreste, es de 127.02 km².

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

El acuífero se localiza en rocas volcánicas fracturadas, con tobas vítricas en su parte superior, subyacidas por basaltos, riolacitas y andesitas.

El espesor saturado del acuífero es mayor de 250 m.

La transmisividad es baja a media, de 16 a 350 m²/día.

En general, la extracción de agua subterránea oscila entre 6 a 41 L/s por pozo, con un promedio de 24 L/s, de acuerdo al uso del pozo, siendo principalmente para agua potable. Por lo que las producciones son moderadas a grandes.

En el área urbana de Jalapa se tienen inventariados 12 pozos y en la periferia se tienen 8 pozos.

Conductividad hidráulica

La permeabilidad calculada es de 1 a 6 m/d, clasificándola como una conductividad hidráulica media.

Coefficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento es del orden de 6.8×10^{-3} , lo que indica que es un acuífero confinado (Herrera, Orozco y Mujica, 2011).

En el pozo municipal de la Aldea El Arenal que se observa en la Figura 51, se presenta un rebalse del pozo al dejar de bombearlo, ya que se encuentra en una falla geológica por lo que el agua es caliente. Además, la recuperación del nivel estático en los pozos es rápida, menor de 2 horas, confirmando que el acuífero es confinado.



Figura 51. Brocal del pozo El Arenal en Jalapa.

Este tipo de acuífero, también lo define la presencia de acuicludos de cenizas volcánicas (arcillas) y tobas, por la litología de los pozos.

Considerando que este acuífero tiene un espesor medio de 250 m y una extensión de 127 Km², el volumen del acuífero es de 32 Km³. Si en este volumen la porosidad media es de un 25 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $8,000 \times 10^6$ m³. El coeficiente de almacenamiento es de 6.8×10^{-3} , resultando que al hacer descender en 1 m el nivel del agua del acuífero, se dispondría de aproximadamente 54.4 millones de m³ de agua.

La extracción del agua subterránea en el casco urbano del poblado de Jalapa es de 7.65×10^6 m³/año y en la periferia es de 1.94×10^6 m³/año, que hace un total de extracción de 9.59×10^6 m³/año y el potencial del acuífero de 54.4×10^6 m³/año, se tiene una disponibilidad del agua subterránea de 44.81 millones de m³, que equivale a un caudal de 1.42 m³/s.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas encontradas en el área de Jalapa son dos: la unidad de riocitas, tobas soldadas vítricas y andesitas constituyen rocas fracturadas del Terciario superior.

Las unidades superficiales son de basaltos y piroclastos de pómez retrabajados del Cuaternario.

La unidad hidrogeológica volcánica inferior está formada principalmente de lavas del Grupo Padre Miguel. Su distribución es muy grande y es en estos materiales donde circula el acuífero volcánico de la cuenca.

En los piroclastos existen capas de cenizas volcánicas finas (limos y arcillas), que constituyen acuicludos y acuitardos. Así también, los basaltos en sus partes superiores son poco permeables que origina que se formen lagunetas, como Achiotes, Samporo, Seca, El Pito e Itzacoba, ya que el agua superficial no puede infiltrarse.

Es importante indicar que estos materiales volcánicos de piroclastos forman capas saturadas, que forman un acuífero superior localizado.

La hidrogeología de la cuenca, se presenta en la Figura 52 y los perfiles hidrogeológicos A – A´ y B – B´ Figuras 53 y 54, donde se observa un basamento constituido por rocas volcánicas del Terciario, con espesores mayores de 300 m, formando principalmente la zona saturada del acuífero. Mientras que la zona no saturada está constituida principalmente por piroclastos y las partes superiores de basaltos del Cuaternario, con espesores de 40 a 120 m.

Niveles de aguas subterráneas

La profundidad de las aguas subterráneas oscila entre 14 a 38 m en la parte baja de la subcuenca, 50 a 60 m en la parte media y en las partes altas se presentan niveles mayores de 100 m bajo la superficie del suelo.

De acuerdo al mapa de red de flujo subterráneo de la Figura 55, en la parte central de la cuenca, en el casco urbano de Jalapa, los niveles estáticos son de 1,325 msnm y de 1,450 a 1,700 msnm en las partes altas.

El flujo de agua subterránea en la parte norte de Jalapa es de norte a sur y está condicionado por el Volcán Jumay, en la parte este lo define el Cerro Alcoba de las partes altas al este hacia las partes bajas al oeste en el poblado de Jalapa. En la parte sur, la dirección del flujo subterráneo es de suroeste a noreste, en correspondencia con el flujo superficial del río Jalapa. Los pozos en el área presentan profundidades de perforación de 120 hasta 424 m, siendo la mayoría de 182 m.

Los pozos han sido perforados, con diámetros de encamisado de 6 y 8 pulgadas con tubería metálica. Los bombeos en los pozos de la municipalidad son discontinuos, trabajando de 6 a 8 horas por día.

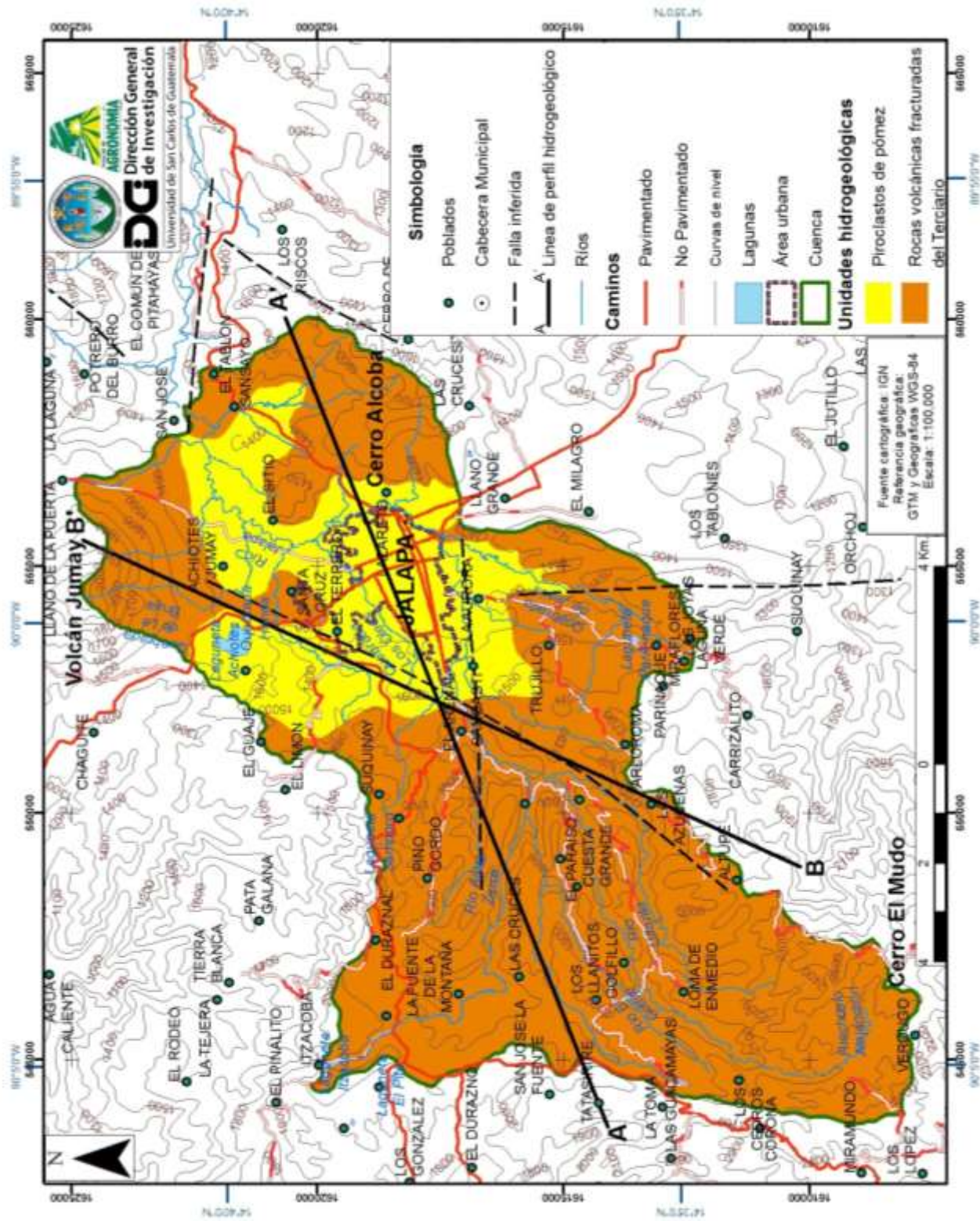


Figura 52. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Jalapa

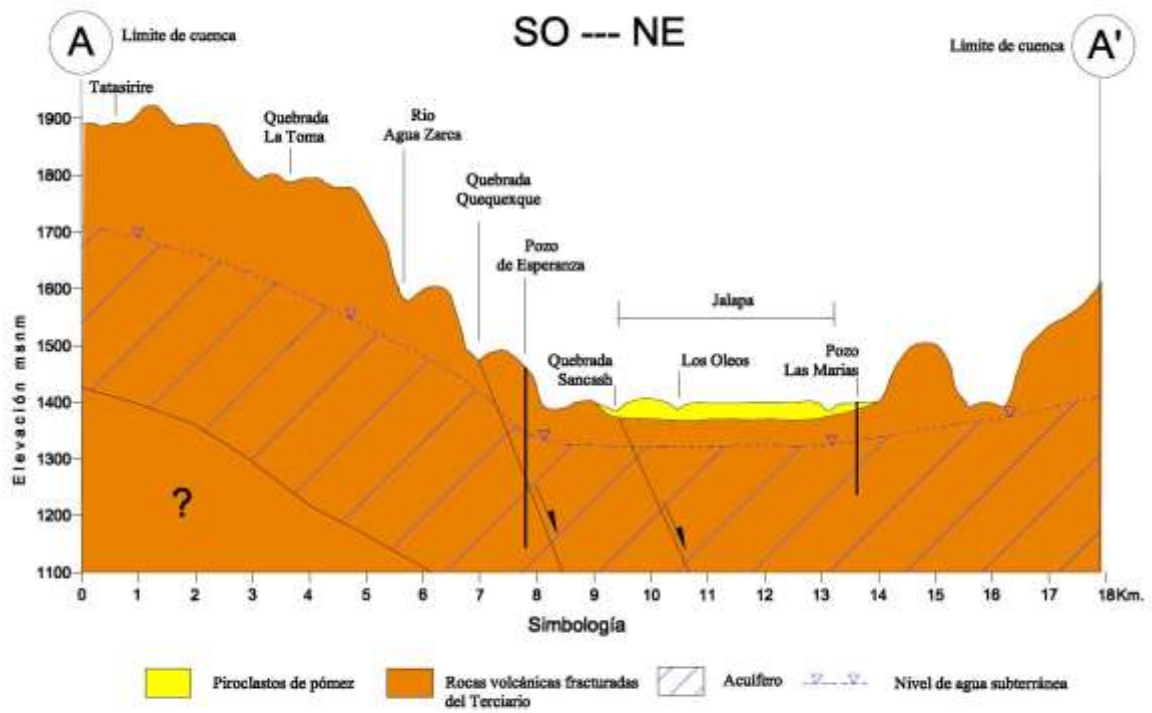


Figura 53. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero Jalapa.

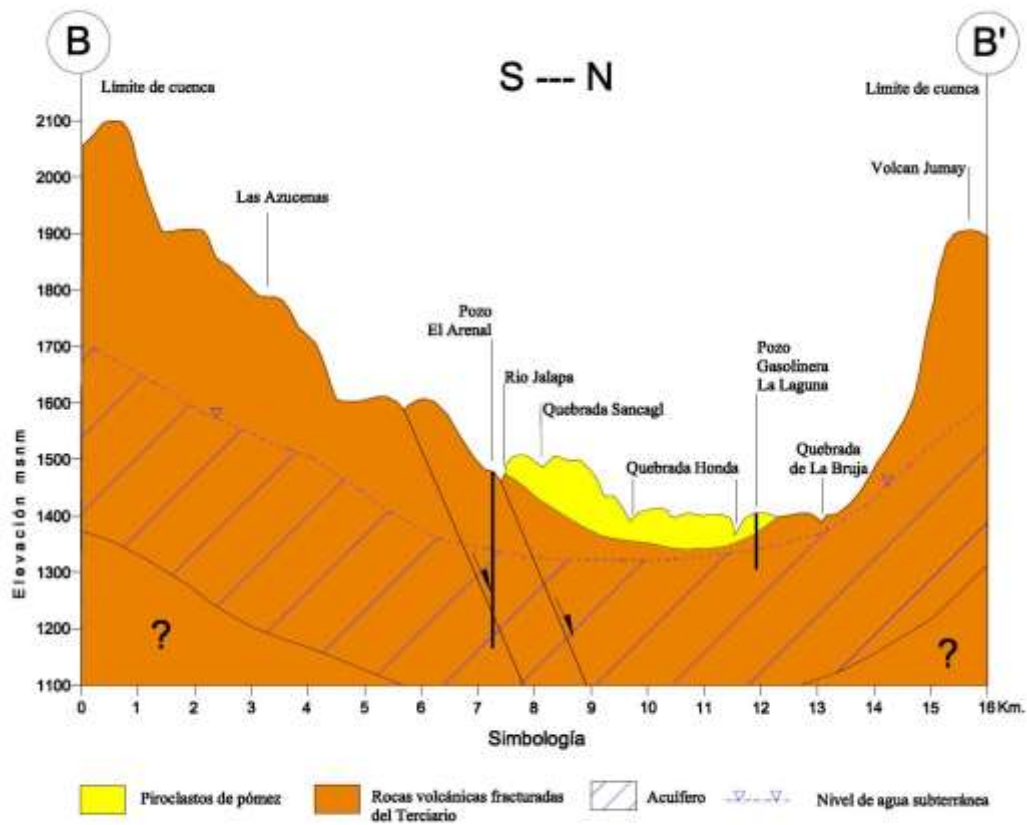


Figura 54. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero Jalapa.

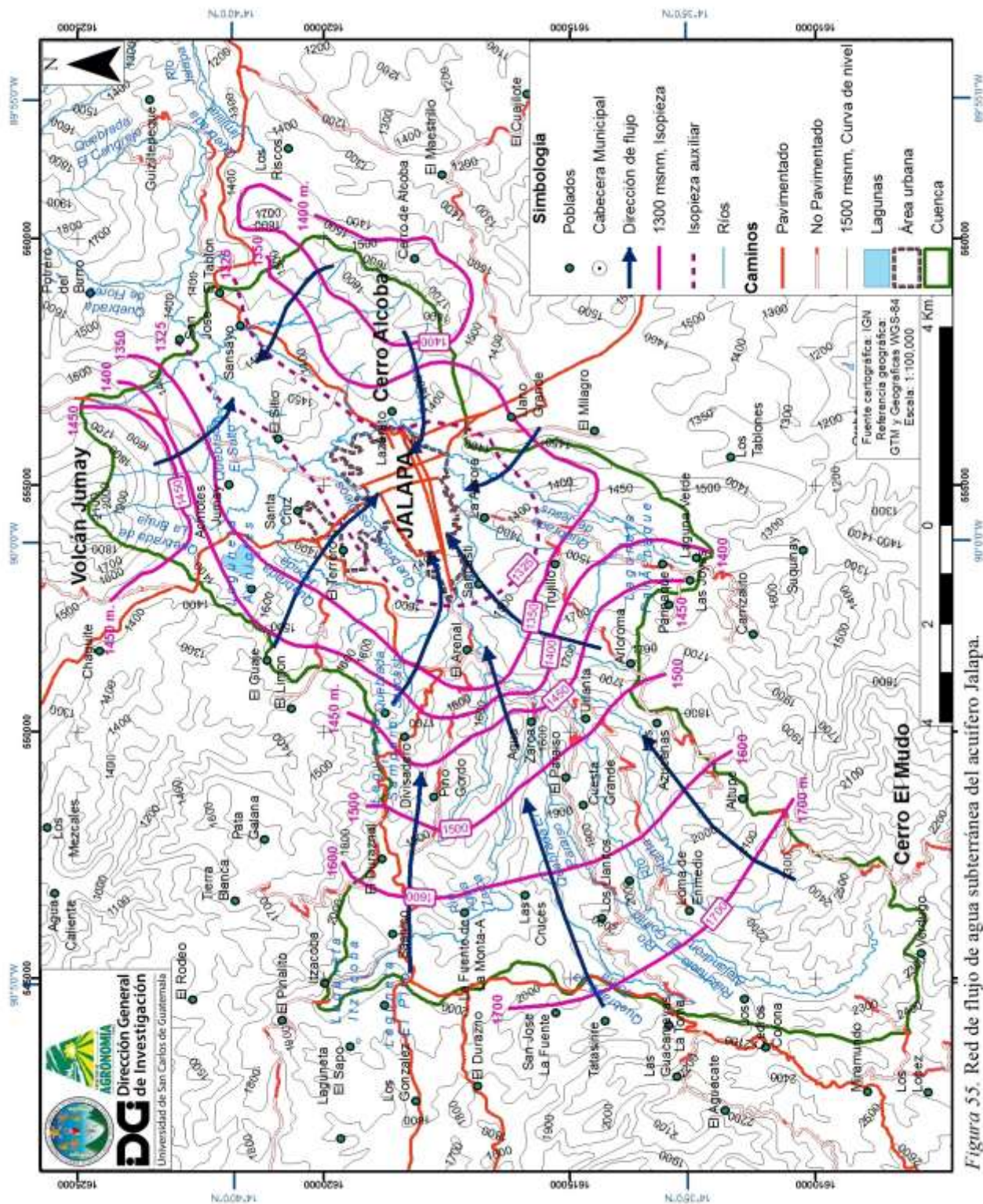


Figura 55. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Jalapa.

4.1.12 Acuífero Jutiapa

Este acuífero comprende el valle donde se asienta la cabecera departamental de Jutiapa y la parte montañosa al noroeste. El área de la cuenca hidrográfica está delimitada en la parte norte por el Cerro El Xecón con 2,100 msnm, en la parte este los cerros Comalapa a 1,400 msnm y Joya Grande a 1,020 msnm, en la parte sur el Cerro El Cilindro a 1,100 msnm y en la parte oeste el Cerro Gordo con 980 msnm.

La subcuenca hidrográfica del río Salado es afluente del río Tamasulapa que se une al río Ostúa y drena al Lago de Güija hacia la Vertiente del Océano Pacífico. Las coordenadas geográficas del área son de 14.232 a 14.3958 grados de latitud norte y 89.8123 a 89.9585 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 1,573,809 m a 1,591,890 m N y 574,150 a 558,431 m E.

El área de la subcuenca hasta la aldea Cerro Grande es de 83.83 km².

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

El acuífero se encuentra en rocas volcánicas fracturadas de tobas soldadas, con espesores saturados entre 40 a 160 m.

En la parte media de la cuenca, se tienen transmisividades bajas a medias de 50 a 450 m²/día

La producción del agua subterránea es pequeña a moderada, con caudales entre 4 a 20 L/s por pozo, con un promedio de 12 L/s, de acuerdo al uso del pozo, siendo principalmente para agua potable.

En la cuenca existen 42 pozos mecánicos, de los cuales 2 son municipales y 40 particulares.

En el casco urbano de Jutiapa se presentan pozos artesanales o excavados con profundidades de 8 a 12 m, que captan un acuífero superficial colgado en piroclastos de pómez.

Conductividad hidráulica

Las capas de tobas soldadas, presentan diferentes grados de fracturación y tienen valores de permeabilidad bajos a medios de 0.4 a 12 m/d, clasificándose el acuífero como regular. Esta permeabilidad es secundaria y la porosidad media se calcula alrededor de 10 %, ya que la fracturación a pesar de ser intensa, es poco abierta.

Coefficiente de almacenamiento

El acuífero se encuentra sobreyacido por depósitos piroclásticos de pómez, capas de ceniza volcánica y basaltos, lo que le da características de semiconfinamiento, con un coeficiente de almacenamiento es de 2×10^{-2} a 4×10^{-2} .

Considerando que este acuífero tiene un espesor medio de 100 m y una extensión de 84 Km², el volumen del acuífero es de 8.4 Km³. Si en este volumen la porosidad media por

fracturación es de un 10 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a $840 \times 10^6 \text{ m}^3$. El coeficiente de almacenamiento de 3×10^{-2} , supone que el acuífero disponga de aproximadamente 25.2 millones de m^3 de agua.

La municipalidad de Jutiapa cuenta con dos pozos mecánicos: Jalisco en la aldea Cerro Gordo y Los Filtros en la aldea Amayo Ingenio que se observa en la Figura 56. Además, capta un nacimiento llamado Agua Tibia en la aldea Amayito y en la planta de tratamiento Los Filtros en la aldea Amayo Ingenio capta agua superficial de los ríos Chaperno y Amayito.

Estas fuentes de agua se conducen a dos tanques de almacenamiento de 600 m^3 y $1,200 \text{ m}^3$, los cuales se vacían en 2 horas por la distribución de agua potable al casco urbano para cubrir 5,000 servicios de agua.

El caudal medio de extracción por pozo es de 300 gal/min o $545 \text{ m}^3/\text{d}$, trabajando 8 horas diarias. Si se consideran los 42 pozos del área, se tiene un caudal de extracción de agua subterránea de 8.35 millones de m^3 por año, que comparado con la capacidad del acuífero de 25.2 millones de m^3 , existe un potencial de explotación de 16.85 millones de m^3 por año, que equivale a un caudal de $0.53 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 56. Pozo mecánico municipal Los Filtros en la planta de la aldea Amayo Ingenio.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas encontradas en el área de Jutiapa son: la unidad de calizas que constituye el basamento de rocas carbonatadas Cretácicas subyacidas por rocas clásticas de la Formación Subinal y las tobas soldadas riolíticas fracturadas del Grupo Padre Miguel del Terciario superior. Las unidades superficiales son basaltos y pómez del Cuaternario.

En los piroclastos existen capas de cenizas volcánicas finas de limos y arcillas, así como, los basaltos constituyen acuicludos y acuitardos.

La unidad hidrogeológica volcánica inferior está formada principalmente de tobas del Grupo Padre Miguel. Su distribución es muy grande y es en estos materiales donde circula el acuífero volcánico de la cuenca. También es importante indicar que sobre estos materiales volcánicos existen estratos de piroclastos que constituyen capas saturadas, que forman un acuífero libre y somero localizado.

La hidrogeología de la cuenca, se presenta en la Figura 57 y los perfiles hidrogeológicos A – A' y B – B' Figuras 58 y 59, donde se observa un basamento constituido por calizas sobreyacidas por rocas clásticas y rocas volcánicas del Terciario. Mientras que la zona no saturada está constituida principalmente por piroclastos y las partes superiores de basaltos del Cuaternario.

Niveles de aguas subterráneas

La profundidad de las aguas subterráneas oscila entre 17 a 25 m en las partes bajas del área y más de 100 m en las partes altas.

En la Figura 60 se presenta el mapa de la red de flujo de aguas subterráneas, con valores de isopiezas de 1,300 a 1,500 msnm en las partes altas y de 900 msnm en las partes bajas.

La dirección de flujo de agua subterránea es de norte a sur y está condicionado por el Volcán Suchitán al noreste del área.

En este caso la dirección del flujo subterráneo no corresponde con el flujo superficial del río Salado, ya que es la cuenca del río Paz la que define el flujo regional.

Los pozos en el área presentan profundidades de perforación de 180 hasta 242 m

Los pozos han sido perforados, con diámetros de encamisado de 6 y 8 pulgadas con tubería metálica. Los bombeos en los pozos de la municipalidad son discontinuos, trabajando de 6 a 8 horas por día.

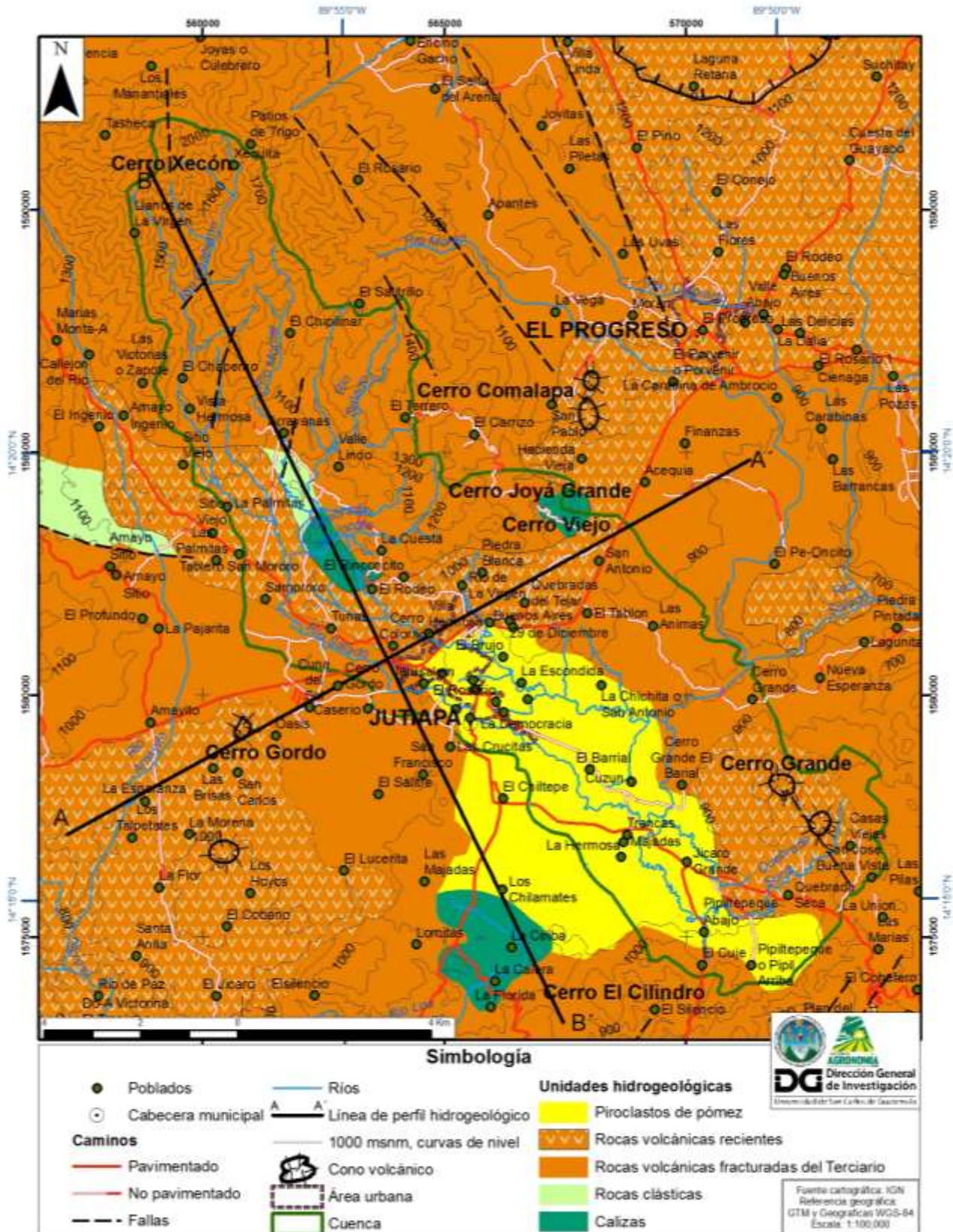


Figura 57. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Jutiapa.

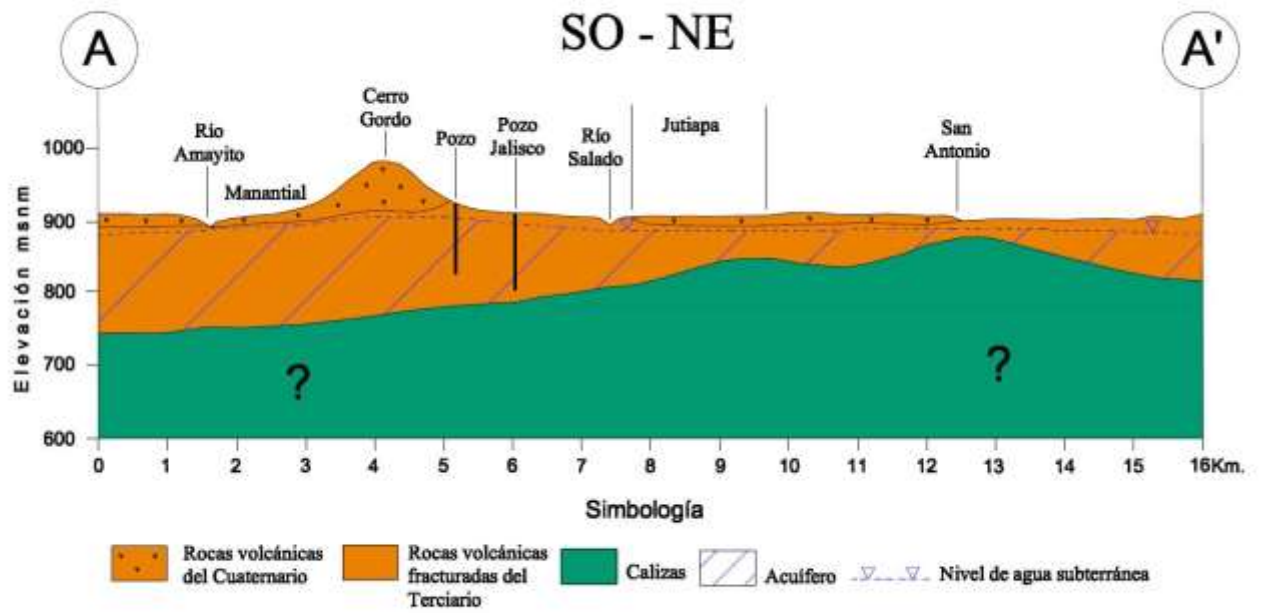


Figura 58. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero Jutiapa.

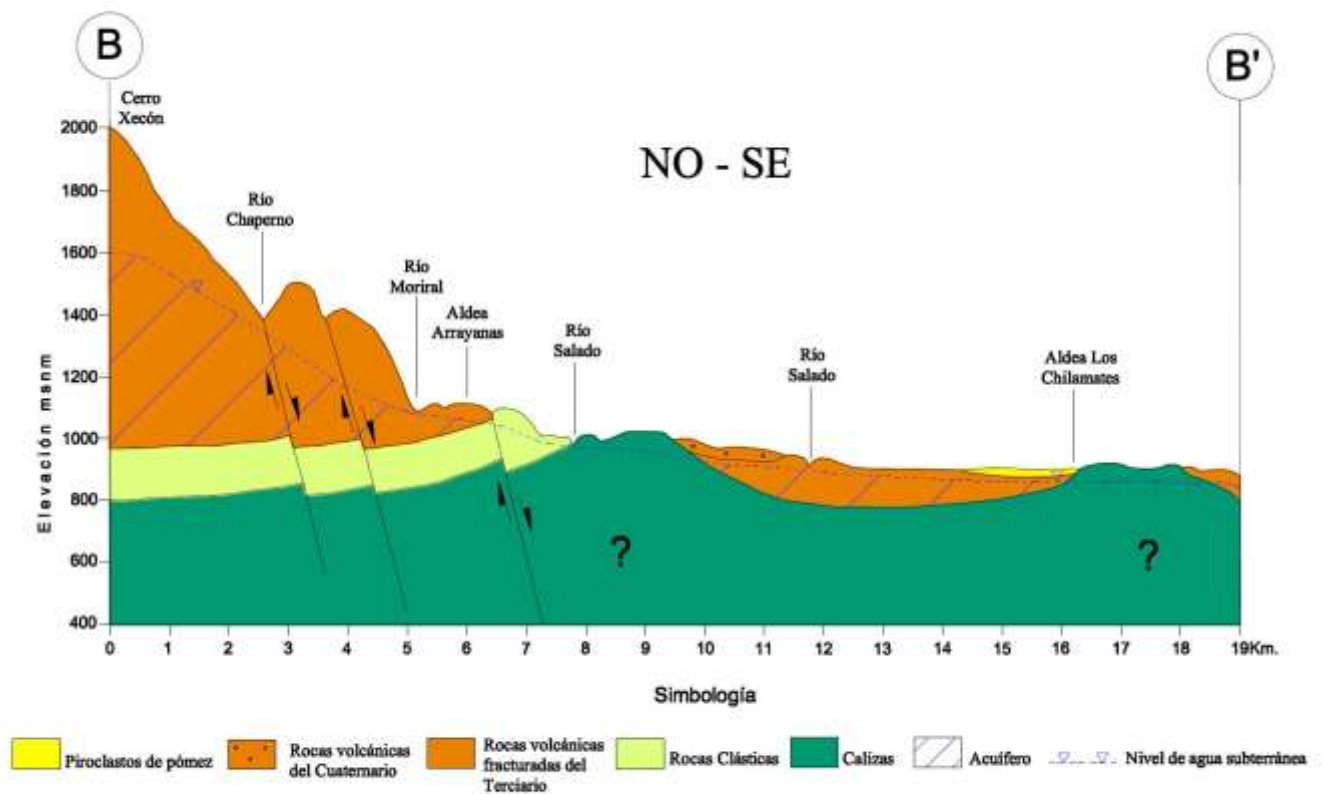


Figura 59. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero Jutiapa.

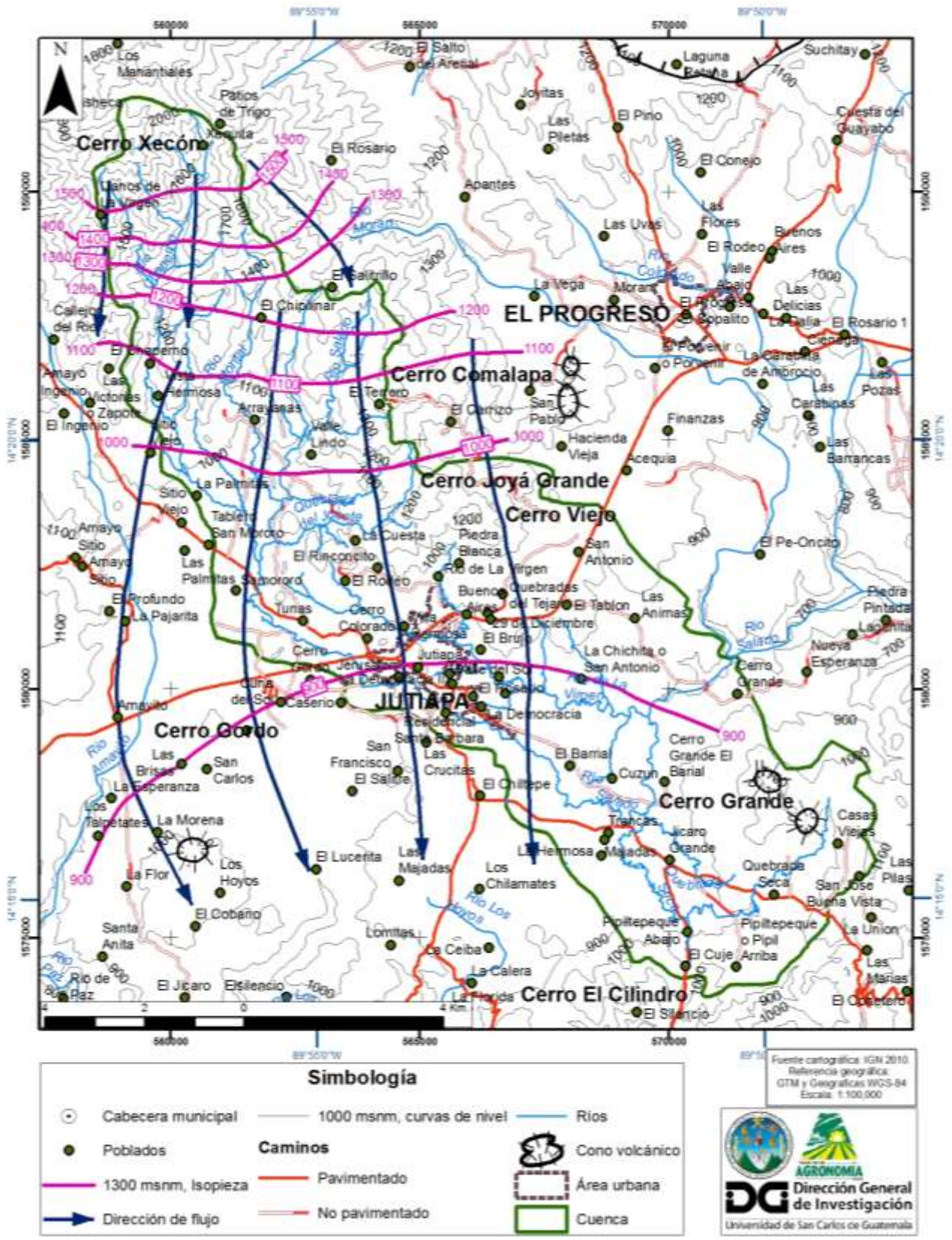


Figura 60. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Jutiapa.

4.1.13 Acuífero Ipala

Este acuífero se localiza al sur del departamento de Chiquimula.

Los límites del acuífero al norte, al oeste y al sur, corresponden en gran medida con los de la subcuenca hidrográfica. Sin embargo, en sus parte este, sobrepasan los límites de la subcuenca hidrológica superficial, siendo la cuenca hidrogeológica mucho más amplia, principalmente hacia San Luis Jilotepeque. Los límites están en concordancia a las estructuras geológicas mayores: Falla de Jocotán al norte, Graben de Ipala al oeste y Volcán de Ipala al sur, los cuales hacen un control volcano-tectónico, que ha dado lugar al basculamiento de bloques geológicos.

La subcuenca hidrográfica del río Songotongo es afluente del río San José que se une al río Motagua y drena a la Vertiente del Mar Caribe.

El área de la subcuenca hasta la aldea Songotongo es de 76.73 km².

Las coordenadas geográficas del área son de 14.5573 a 14.6527 grados de latitud norte y 89.5669 a 89.6707 grados de longitud oeste. Las coordenadas planas en GTM son de 11609,891 m a 11620,401 m N y 589,355 a 600,498 m E.

Parámetros hidrogeológicos

Transmisividad

El acuífero se encuentra en rocas volcánicas fracturadas del Terciario, con espesores saturados entre 200 a 250 m.

Las transmisividad son bajas a medias y los valores varían de 55 m²/d para los pozos de las partes altas a 650 m²/d para los pozos de las partes bajas.

Las producciones de los pozos son pequeñas y moderadas, con caudales de extracción de agua subterránea entre 4 a 24 L/s por pozo, con un promedio de 12 L/s, de acuerdo al uso del pozo, siendo principalmente para agua potable.

En el área de la cuenca, se identificaron 10 pozos mecánicos y en la periferia se tienen 5 pozos.

Conductividad hidráulica

Las capas de rocas presentan diferentes grados de fracturación y tienen valores de permeabilidad bajos a medios de 0.3 a 8 m/d, clasificándose el acuífero como regular. Esta permeabilidad es secundaria y la porosidad media se calcula alrededor de 12 %.

Coefficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento determinado es de 3×10^{-2} a 4×10^{-4} , que indica que es un acuífero confinado. Este confinamiento lo define Herrera (2011), por la poca variación del nivel estático durante el año de algunos pozos en el valle de San Luis Jilotepeque, que es

menor de 0.3 m y por la rápida recuperación del nivel después del bombeo, que es de menor de 110 minutos.

Considerando que este acuífero tiene un espesor medio de 225 m y una extensión de 77 Km², el volumen del acuífero es de 17.3 Km³. Si en este volumen la porosidad media por fracturación es de un 12 %, resulta que el agua almacenada en el acuífero sería igual a 2,076x10⁶ m³. El coeficiente de almacenamiento de 15x10⁻³, supone que el acuífero disponga de aproximadamente 31.14 millones de m³ de agua.

El caudal medio de extracción por pozo es de 12 L/s o 432 m³/d, trabajando 10 horas diarias. Si se consideran los 15 pozos del área, se tiene un caudal de extracción de agua subterránea de 2.4 millones de m³ por año, que comparado con la capacidad del acuífero de 31.14 millones de m³, existe un potencial de explotación de 28.74 millones de m³ por año, que equivale a un caudal de agua subterránea de 0.91 m³/s.

Mapas hidrogeológicos

Unidades hidrogeológicas

La unidad hidrogeológica está formada principalmente de lavas de composición andesítica basáltica y dacítica del Grupo Padre Miguel. Su distribución es muy grande y se localiza en todos los pozos perforados en el área. Además, estas rocas se encuentran fracturadas y es por donde circula el acuífero principal de la zona. En algunos afloramientos se presentan las rocas con meteorización esferoidal, como se observa en la Figura 61.

También es importante indicar que dentro de estos materiales volcánicos existen capas de ceniza volcánica fina (arcillas) que constituye una capa sello, que da confinamiento al acuífero en las partes bajas de la cuenca o graben.

En la Figura 63 se observan las unidades hidrogeológicas y en las Figuras 64 y 65 los perfiles hidrogeológicos A – A' y B – B', donde se muestra que existen capas de aluvión y de basaltos Cuaternarios que cubren a las rocas fracturadas Terciarias.

Niveles de aguas subterráneas

La profundidad de las aguas subterráneas oscila entre 27 a 56 m.

En la Figura 66 se presenta el mapa de la red de flujo de aguas subterráneas, con valores de isopiezas de 1,000 a 1,100 msnm en las partes altas y de 800 a 700 msnm en las partes bajas.

La dirección de flujo de agua subterránea es de sur a norte en el Volcán Ipala y de este a oeste en la parte montañosa de los cerros El Chagüite, Miramundo y Atantán, por lo que el flujo está controlado por la falla y el graben de Ipala, con una recarga desde las partes altas al este y al sur de la subcuenca. En la Figura 62 se presenta el valle o graben y el Volcán de Ipala.



Figura 61. Andesitas basálticas con meteorización esferoidal.



Figura 62. Valle y Volcán de Ipala.

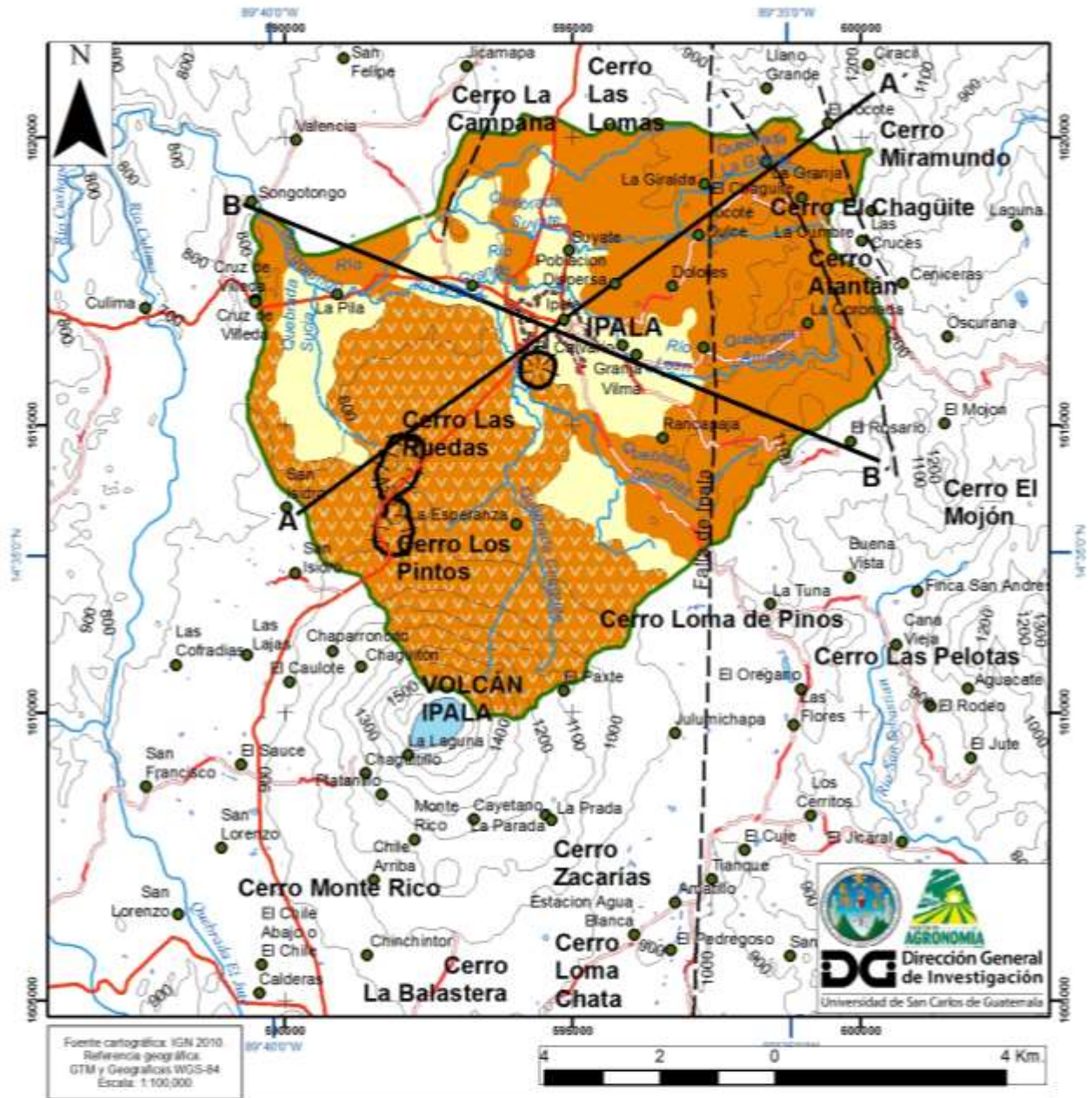


Figura 63. Mapa de unidades hidrogeológicas del acuífero Ipala.

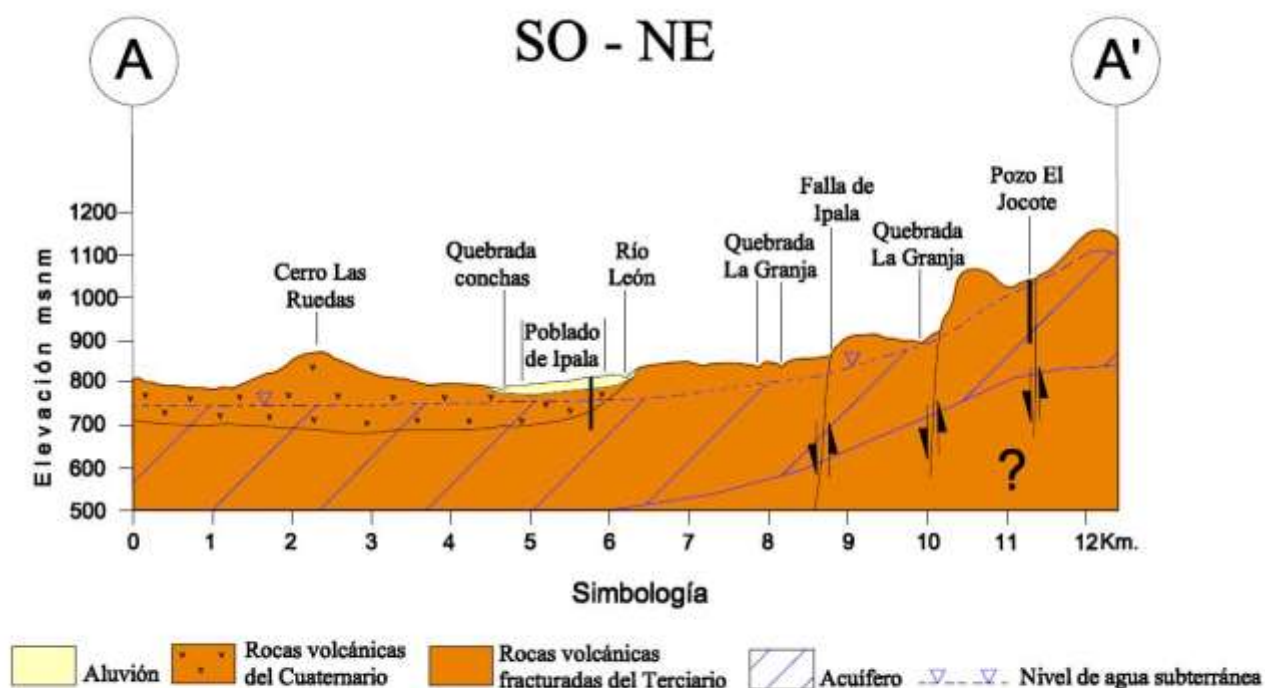


Figura 64. Perfil hidrogeológico A - A' del acuífero Ipala.

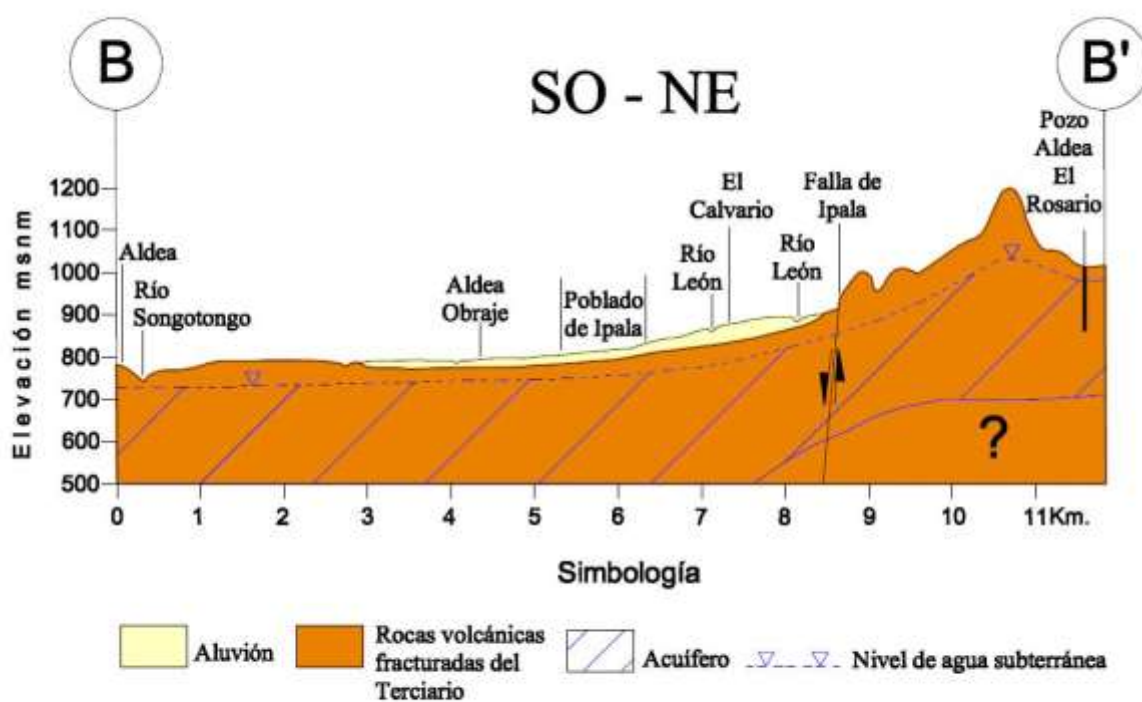
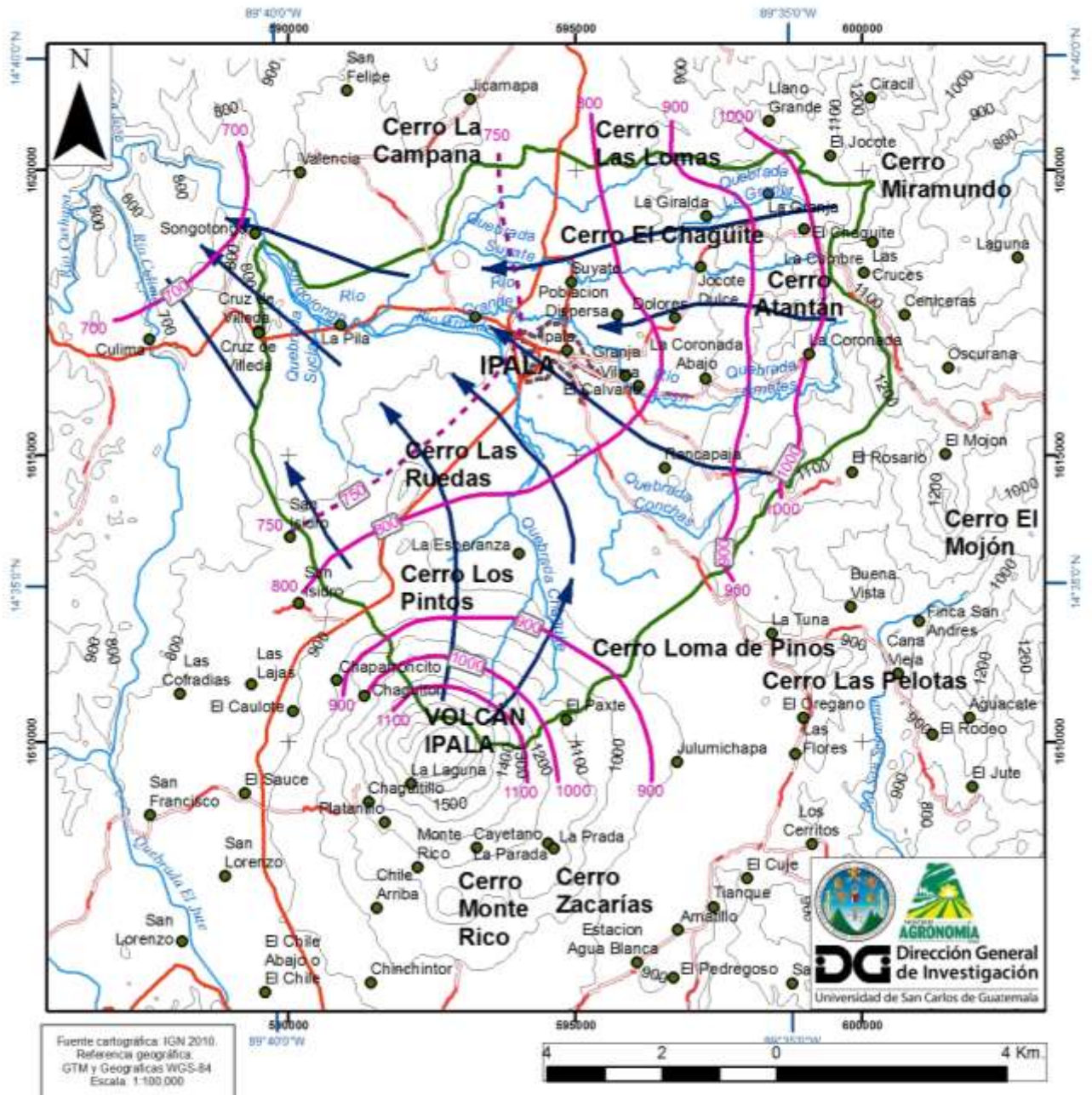


Figura 65. Perfil hidrogeológico B - B' del acuífero Ipala.



Fuente cartográfica: IGN 2010.
Referencia geográfica:
GTM y Geográficas WGS-84
Escala: 1:100.000



Simbología			
● Poblados	— 1300 msnm, Isopieiza	Caminos	— Ríos
○ Cabecera Municipal	- - - Isopieiza auxiliar	— Pavimentado	▭ Área urbana
➔ Dirección de flujo	— 800 msnm, curvas de nivel	— No Pavimentado	▭ Cuenca

Figura 66. Red de flujo de agua subterránea del acuífero Ipala.

Disponibilidad de agua subterránea

En la Tabla 2 se resumen los volúmenes de extracción, almacenamiento disponible y el potencial de extracción de agua subterránea. Representados en millones de metros cúbicos.

Para este caso la disponibilidad de agua subterránea está analizada desde dos puntos de vista:

- El agua subterránea que se encuentra en escurrimiento, que de todas maneras saldrá de la cuenca, como un excedente de la recarga.
- La cantidad de agua subterránea que se puede considerar como una reserva y que tiene volúmenes que no cambian a menos que haya variaciones importantes en los niveles del acuífero.

La disponibilidad de agua está en función del volumen y del coeficiente de almacenamiento, además, de la precipitación pluvial que presenta valores mayores de 1,000 mm/año, a excepción de Totonicapán, Xela y Chimaltenango.

Tabla 2
Volúmenes de extracción, disponibilidad y potencial de agua subterránea

Acuífero	Población de la cuenca	Área (km ²)	Precipitación media anual (mm)	Extracción agua subt. (Mm ³)	Disponibilidad agua subt. (Mm ³)	Potencial de extracción agua subt. (Mm ³)
Guatemala Sur	2,434,598	346.364	1,253.3	191.2	138.0	Sobre-extracción
Guatemala NE	1,154,578	198.72	1,362.1	30.0	107.3	77.3
Chimaltenango	249,864	178.73	987.08	31.83	102.96	71.1
Antigua Guatemala	169,582	219.228	1,144.9	27.36	116.5	89.14
San Marcos	169,885	120.45	1,366.3	13.45	93.2	79.75
Quetzaltenango	384,908	589.298	897.8	45.6	93.6	48.00
Totonicapán	273,159	120.03	938.7	32.4	52.8	20.4
Santa Cruz del Quiché	108,766	135.51	1,543.9	12.9	92.0	79.1
Sololá	313,968	528.21	1,360.9	8.74	125.7	116.96
Cuilapa	41,324	150.53	1,807.4	2.63	36.0	33.37
Jalapa	147,266	127.02	1,281.8	9.59	54.4	44.81
Jutiapa	139,342	83.83	1,195.8	8.35	25.2	16.85
Ipala	20,009	76.73	1,656.8	2.40	31.14	28.74

4.2 Matriz de Resultados

En la Tabla 3, se presenta la matriz de los resultados obtenidos en la investigación.

Tabla 3

Coherencia de la propuesta de investigación

Objetivo específico	Resultados esperados	Resultados obtenidos
Caracterizar los principales acuíferos volcánicos del país de Guatemala	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación del número y extensión de los principales acuíferos volcánicos de Guatemala - Determinar las características hidráulicas de los principales acuíferos (transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento) - Definir el modelo hidrogeológico conceptual de cada acuífero - Evaluar el potencial hídrico de los principales acuíferos 	<ul style="list-style-type: none"> -Se identificaron y caracterizaron 13 acuíferos: San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Santa Cruz del Quiché, Sololá, Chimaltenango, Antigua Guatemala, Ciudad Guatemala sur y noreste, Cuilapa, Jalapa, Jutiapa e Ipala. -Se definió el modelo hidrogeológico conceptual de cada acuífero. -Se evaluó el potencial hídrico de cada acuífero.
Elaborar los mapas Hidrogeológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Mapa de unidades hidrogeológicas de cada acuífero - Mapa de isofreáticas o isopiezas y dirección de flujo subterráneo - Perfiles hidrogeológicos y espesores de las unidades acuíferas 	<ul style="list-style-type: none"> -Elaboración de 13 mapas de unidades hidrogeológicas a escala 1:100,000 -Construcción de 13 mapas de rede de flujo de agua a escala 1:100,00 -Elaboración de 26 perfiles hidrogeológicos, 2 de cada acuífero
Difundir la información hidrogeológica de acuíferos volcánicos	<ul style="list-style-type: none"> - Base de datos hidrogeológicos -Localización de los principales acuíferos volcánicos de Guatemala - Publicación de resultados 	<ul style="list-style-type: none"> -26 mapas georeferenciados de 13 acuíferos volcánicos de Guatemala -Localización de 13 acuíferos, de los cuales 11 corresponden a cabeceras departamentales. -Presentación de resultados en 6 congresos: 3 nacionales y 3 internacionales: <ol style="list-style-type: none"> 1. VI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y ambiental en Guatemala. 2. Congreso Mesoamericano de Investigación UNACH 2016, México. 3. II Congreso Nacional de Cambio Climático Xela 2016. 4. III Encuentro Bienal Centroamericano de investigación. Guatemala. 5. XII Conferencia Científica Internacional UNICA. Universidad Máximo Gómez Báez de Ciego de Ávila, Cuba. 6. Congreso Internacional sobre Patrimonio Cultural y Natural Centroamericano: Agua, Cultura y Territorio. Costa Rica.

4.3 Impacto esperado

El conocimiento de la hidrogeología en región volcánica de la República de Guatemala, es de una alta trascendencia a nivel nacional, ya que en esta región se concentra el mayor número de los centros poblados del país, como se muestra en la Tabla 4. Considerando que la población de Guatemala es de 15,438,383 habitantes (INE, 2014), y el total de personas que

demandan agua de los acuíferos estudiados es de 5,607,249 habitantes, el estudio abarca un 36.32 % de la población total, es decir, más de la tercera parte del país.

Además se observa que en los acuíferos de Quetzaltenango, Totonicapán, Santa Cruz del Quiché, Sololá y Chimaltenango, el porcentaje de indígenas es mayor de 50. Mientras que en San Marcos, Antigua y Guatemala comprenden del 13 a 36 %. Y en la zona oriental en Cuilapa, Jalapa, Jutiapa e Ipala, el porcentaje de indígenas es menor de 8.

Por lo anterior, este estudio beneficia a más de la tercera parte de la población y puede tener un gran impacto si se toma como una herramienta fundamental para definir el uso adecuado del agua subterránea y su reglamentación en cada localidad.

Tabla 4

Población de habitantes por acuífero y etnicidad

No.	Acuífero	Área (Km ²)	Población total de habitantes	Etnicidad (%)	
				Indígenas	No indígenas
1	Sur de ciudad Guatemala	346.364	2,434,598	15.75	84.25
2	Noreste de ciudad Guatemala	198.72	1,154,578	13.7	86.3
3	Chimaltenango	178.73	249,864	66.17	35.83
4	Antigua Guatemala	219.228	169,582	36.4	63.6
5	San Marcos	120.45	169,885	27.0	73.0
6	Quetzaltenango	589.298	384,908	51.7	48.3
7	Totonicapán	120.03	273,159	97.0	3.0
8	Santa Cruz del Quiché	135.51	108,766	88.6	11.4
9	Sololá	528.21	313,968	96.5	3.6
10	Cuilapa	150.53	41,324	3.0	97.0
11	Jalapa	127.02	147,266	1.0	99.0
12	Jutiapa	83.83	139,342	3.2	96.9
13	Ipala	76.73	20,009	7.1	92.9
			5,607,249		

Los mapas hidrogeológicos de acuíferos volcánicos, es un elemento técnico valioso en la planificación del ordenamiento territorial de las cabeceras departamentales, y sirve para definir las mejores áreas de perforación de pozos por parte de las municipalidades. Además, sirven para identificar zonas de recarga hídrica para su protección y conservación.

La investigación de acuíferos volcánicos de Guatemala, se estructuró con base a un conjunto de procedimientos y técnicas que permitieron conformar un método sistemático en el proceso de obtención de conocimientos sobre la hidrogeología, que puede ser replicado en otras regiones como los acuíferos de rocas carbonatadas del norte y los acuíferos aluviales de la costa sur y del oriente del país.

La investigación que se planteó es a nivel nacional y tiene como unidad de estudio al sistema acuífero que permitió realizar un estudio integral del agua subterránea.

El estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos es uno de los mayores aportes para el país, ya que Guatemala se carece de información acerca de sus acuíferos, extracciones y reservas de agua subterránea. Además, esto beneficiará a instituciones y municipalidades al tener información real de las aguas subterráneas de sus localidades.

5. Conclusiones

Los principales acuíferos volcánicos de Guatemala, se pueden agrupar en tres zonas:

- Acuíferos de la zona central: Ciudad Guatemala, Chimaltenango y Antigua Guatemala.
- Acuíferos de la zona occidental: San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Santa Cruz del Quiché y Sololá.
- Acuíferos de la zona oriental: Cuilapa, Jalapa, Jutiapa e Ipala.

La disponibilidad de agua subterránea de los acuíferos volcánicos es mayor a la extracción de agua por bombeo y llena los requerimientos de agua de cada ciudad, a excepción del acuífero sur de ciudad Guatemala donde existe sobre-extracción.

Las rocas volcánicas incluyen materiales con un alto rango de propiedades hidrogeológicas.

Los materiales volcánicos constituyen acuíferos permeables, con permeabilidad primaria generalmente en piroclastos de pómez y permeabilidad secundaria por fracturas en lavas.

Las lavas de dacitas, andesitas y basaltos tienen transmisividades elevadas, mientras que las tobas generalmente tienen alta porosidad, pero muy bajas permeabilidades.

Los valles de las zonas occidental y central de la región volcánica, como San Marcos, Quetzaltenango, Chimaltenango, Antigua Guatemala y ciudad Guatemala, están rellenos con materiales piroclásticos de pómez, que forman acuíferos superiores libres. Mientras que los acuíferos inferiores están formados por lavas y constituyen acuíferos confinados.

Los acuíferos en medios porosos de piroclastos de pómez, tienen caudales de extracción por bombeo de pozos de 1 a 20 L/s, a excepción del valle de Quetzaltenango con 10 a 280 L/s. Los acuíferos en medios fisurados de lavas, presentan caudales de 5 a 65 L/s, llegando los acuíferos del sur de ciudad Guatemala y Antigua a producir caudales mayores de 100 L/s.

Los niveles estáticos de los acuíferos superiores en piroclastos de pómez se localizan a profundidades menores de 100 m, mientras que los niveles de los acuíferos en lavas presentan niveles de 8 a 250 m de profundidad.

Los mapas hidrogeológicos identificaron que los acuíferos volcánicos mayores del país, se presentan en Quetzaltenango, Sololá y sur de ciudad Guatemala, por constituir antiguas calderas volcánicas. Mientras que los acuíferos del oriente son acuíferos más localizados y pequeños.

Los mapas hidrogeológicos definen que los acuíferos volcánicos se pueden subdividir en unidades hidrogeológicas de piroclastos de pómez y lavas recientes del período Cuaternario. Las tobas y lavas antiguas corresponden al Terciario. Estas unidades se encuentran sobre un basamento formado por rocas ígneas intrusivas y rocas calcáreas.

De acuerdo a los mapas de red de flujo de agua subterránea, se identifica que la dirección del flujo, está definida por el río principal de la cuenca superficial.

La mayoría de las cuencas hidrográficas coinciden con las cuencas hidrogeológicas, ya que se ubican en la divisoria continental entre las vertientes del Océano Pacífico y el Mar Caribe. Sin embargo, las cuencas hidrogeológicas son mucho más amplias en las poblaciones de Cuilapa y Jutiapa, ya que se localizan en las partes medias de las cuencas de los ríos Los Esclavos y Ostúa respectivamente.

6. Agradecimientos

A la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala por el financiamiento del proyecto DIGI 4.8.63.2.69.

7. Referencias

- Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). (1995). Estudio sobre el desarrollo de las aguas subterráneas en el altiplano central de la República de Guatemala. Guatemala: Editor.
- Asociación Mundial para el Agua (GWP). (2000): Manejo integrado de los recursos hídricos. Comité de Consejo Técnico. TAC background papers No. 4. Estocolmo, Suecia. 76 p.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2007). Estrategia para el manejo integrado de los recursos hídricos. Washington, DC: Autor.
- Carrera, J. Gálvez, J. & López, T. (2005). Situación actual del recurso Hídrico en Guatemala. Documento técnico del perfil ambiental de Guatemala. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas. Guatemala: Universidad Rafael Landívar.
- Comisión económica para América Latina y El Caribe. (2013). Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe. Santiago: Autor.
- Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América. (2000). Evaluación de recursos de agua de Guatemala. Guatemala: Autor.
- Custodio, E., & Llamas, R. (2001). Hidrología subterránea. Tomo I (2ª ed.). Barcelona: Omega Ediciones.
- Escuder, R., Fraile, J., Jordana, S., Ribera, F., Sánchez-Vila, X., & Vázquez-Suñé, E. (2009). Hidrogeología, conceptos básicos de hidrología subterránea. Barcelona: Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2003). Descubrir el potencial del agua para la agricultura. Roma: Autor.
- Herrera, I. (1998). Reconocimiento hidrogeológico de la cuenca del río Itzapa, departamento de Chimaltenango, Guatemala. (Tesis de Maestría). Escuela Centroamericana de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
- Herrera, I. (2005). Estudio hidrogeológico de la parte norte de la caldera del lago de Atitlán, Guatemala. Ponencia presentada en el Congreso Internacional de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos. Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos (CARA). Nicaragua.
- Herrera, I. (2011). Estrategia para el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico subterráneo en la subcuenca de los ríos Pansigüis y Cushapa, Departamento de Jalapa, Guatemala. (Tesis de Doctorado). Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez. Cuba.
- Herrera, I. (2012). Estudio hidrogeológico de la sub-cuenca del río Los Ocotes, para determinar las áreas principales de recarga hídrica e identificación de las áreas vulnerables a deslizamientos e inundaciones para proponer alternativas de prevención de la parte noreste de la Ciudad de Guatemala. (Proyecto FODECYT 2009/035)

- Guatemala: Facultad de agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Herrera, I. (2015). Vulnerabilidad del acuífero noreste de ciudad Guatemala. *Revista Tikalia*, 33(02), 39-55.
- Herrera, I. (2016). La importancia del bosque en la recarga hídrica natural del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 3(1), 31-40.
- Herrera, I., & Brown, O. (2011). Propuesta de una metodología para la estimación de áreas de recarga hídrica en Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(4), 48-52.
- Herrera, I., & Orozco, E. (2009). Determinación de las áreas de recarga hídrica y propuesta de manejo del agua, en una zona semiárida de Guatemala. *Planificación y gestión de aguas subterráneas*. (1ª ed.). Editado por Luis Vives, Emilio Custodio y Leticia Rodríguez. Buenos Aires: Asociación Grupo Argentino, Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Santa Rosa. 234 p. (ISBN 978-987-1082-38-4).
- Herrera, I., & Orozco, E. (2010). Hidrogeología de Ojo de Agua, cuenca sur de la Ciudad de Guatemala. *Revista Geológica de América Central*, 42, 85-97.
- Herrera, I. & Orozco, E. (2016). Hidrogeología del acuífero volcánico del valle de Quetzaltenango, altiplano occidental de Guatemala. Ponencia presentada en la XII Conferencia Científica Internacional UNICA 2016. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez. Cuba.
- Herrera, I., Orozco, E., & Padilla, T. (2007). Guía para el manejo de cuencas hidrográficas. Guatemala.
- Herrera, I., Orozco, O., & Mujica, A. (2011). Estrategia para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en una zona semiárida de Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(3), 12-18.
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar & The Nature Conservancy. (2012). Elementos de análisis para caracterizar el estado y estimar el consumo de las aguas subterráneas en el área metropolitana de Guatemala. Guatemala: Autor.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (1970). Mapa geológico de la república de Guatemala. Compilado por Bonis, S. et al. Escala 1:500 000. Color. Guatemala.
- Instituto Nacional de Estadística. (2014). Caracterización Departamental. Guatemala: Autor.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (1978). Estudio de las aguas subterráneas en el valle de la ciudad de Guatemala. Guatemala: Autor.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (1988). Estudio de las aguas subterráneas en el valle de la ciudad de Quetzaltenango. Guatemala: Autor.
- Koch, A., & McLean, H. (1975). Pleistocene tephra and ash flow deposits in the volcanic highlands of Guatemala. *Geol. Soc. Am. Bull.* 86, 529-541.
- Kruseman, G., & De Ridder, N. (1994). Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Netherlands.
- Losilla, M., Rodríguez, H., Schosinsky, G., Stimson, J., & Bethune, D. (2001). Acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central. San José: Editorial Universidad de Costa Rica.
- Manzo, B. D. (2008). Reconocimiento hidrogeológico para la determinación de zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula,

- Guatemala. (Tesis de Licenciatura). Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 115 p.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación & PLAMAR. (1991). Plan Maestro de Riego y Drenaje. Hidrogeología, Disponibilidad de agua subterránea. Guatemala: Autores.
- Newhall, C. (1982). Mapa Geológico de Sololá. Hoja 1960 II, Escala 1:50,000. Instituto Geografico Nacional. Guatemala.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2007). Sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas: Inventario de los recursos hídricos y su utilización en México y Centro América. Montevideo, Uruguay.
- Orozco, E. (2004). Potencial del recurso hídrico subterráneo y modelo matemático preliminar del sistema acuífero del valle aluvial del río Guacalate desde Antigua Guatemala hasta Alotenango. (Tesis de Maestría). Facultad de Ciencias, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Orozco, E., Herrera, I., & Mujica, A. (2011). Modelo matemático del flujo del sistema acuífero del valle aluvial de Antigua Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20, 2011.
- Padilla, T. (2012). Estrategia para mejorar la calidad del Agua superficial en la subcuenca del río Quiscab, en el departamento de Sololá, Guatemala. (Tesis de Doctorado). Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez. Cuba.
- Tacam, J. (2011). Modelo Conceptual del Acuífero Libre del Valle de Quetzaltenango, Ciudad de Quetzaltenango, Guatemala. (Tesis de Maestría). Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Facultad de Ingenierías, Universidad del Valle. Colombia.
- Velásquez, E. (1995). Estudio hidrogeológico preliminar de la cuenca de El Alto Guacalate. (Informe técnico). Guatemala: Autor.

8. Apéndices

9. Actividades de gestión, vinculación y divulgación

Se ha realizado la gestión en la Dirección General de Docencia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para ayudas económicas y boletos aéreos para la divulgación de resultados del proyecto en los congresos de Cuba y Costa Rica.

Se ha gestionado con la Secretaria General de Planificación (SEGEPLAN), la publicación de los mapas temáticos y capas o shapes para su visualización en el geoportal de la institución, lo cual facilitara la divulgación de los resultados.

La difusión de los resultados parciales se ha realizado a través de congresos a nivel nacional e internacional, como:

1. VI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y ambiental en Guatemala.
2. Congreso Mesoamericano de Investigación UNACH 2016, Chiapas, México.
3. II Congreso Nacional de Cambio Climático Xela 2016.
4. III Encuentro Bienal Centroamericano de investigación. Guatemala.
5. XII Conferencia Científica Internacional UNICA. Universidad Máximo Gómez Báez de Ciego de Ávila, Cuba.
6. Congreso Internacional sobre Patrimonio Cultural y Natural Centroamericano: Agua, Cultura y Territorio. Costa Rica.

Los resultados se publicarán en medios locales como la Revista Tikalia de la Facultad de Agronomía y la Revista Ciencia, Tecnología y Salud de la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos.

Las publicaciones en revistas internacionales serán inicialmente en dos: la Revista Geológica de América Central de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, y la Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias de Cuba.