

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA

**“Análisis del riesgo hidrogeológico del distrito Central de Alajuela;
interacción entre la vulnerabilidad intrínseca y la carga
contaminante”.**

PRÁCTICA DIRIGIDA PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN GEOLOGÍA

LUIS ALONSO FALLAS MONTOYA
(Carné A72439)

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO

2017

Practica Dirigida sometida y aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Licenciatura en Geología y el Comité Evaluador de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado académico de Licenciado en Geología.

Comité Evaluador



Lic. Jeisson Chaves Gamboa
Instituto Costarricense de Acueductos y
Alcantarillados
Director

M.Sc. Julio Madrigal Mora
Comisión Nacional de Emergencias
Miembro del Comité Asesor



Ph.D. Marco Barahona Palomo
Escuela Centroamericana de Geología
Miembro del Comité Asesor



M.Sc. Mario Arias Salguero
Escuela Centroamericana de Geología
Lector



Ph.D. Germán Vidaurre Fallas
Vicedecano de la Facultad de Ciencias

Postulante



Geol. Luis Alonso Fallas Montoya

Agradecimientos

En el presente apartado quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas, que de una u otro forma me apoyaron y acompañaron durante el desarrollo de la presente investigación.

Al director de la Practica Dirigida, el Lic. Jeisson Chaves Gamboa, por su apoyo incondicional, por sus siempre consejos oportunos y por su dedicación a lo largo de todo el desarrollo de la presente investigación, una persona a la cual estimo y admiro en demasía.

Especial agradecimiento al Dr. Marco Barahona Palomo y al MSc. Julio Madrigal Mora, miembros del Comité Asesor, por sus comentarios, recomendaciones y correcciones, por su dedicación de tiempo, gracias por aceptar ser parte de este Proyecto.

Al M.Sc Mario Arias Salguero por la confianza en mí depositada, porque gracias a él pude ser parte del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas y trabajar en diversos proyectos en el campo de la hidrogeología, gratas experiencias que me ayudaron a crecer como persona, profesional y laboralmente.

De manera especial a mi familia, a mis padres quiénes me brindaron todas las herramientas para estudiar y convertirme en un profesional graduado de la Universidad de Costa Rica, porque siempre han estado a mi lado, en los malos y buenos momentos, siempre creyeron en mí. Ambos son mis motores.

A mis hermanos y hermana, por su apoyo, porque de una u otra forma han estado atentos a mis estudios e investigaciones.

Agradezco enormemente a mi novia Verónica, quien en todo momento me ha apoyado, brindado la motivación y fuerzas necesarias para trabajar en esta investigación, siempre exigente y comprometida.

A todos ellos y ellas, muchas gracias...

Índice general

Índice general	4
Índice de figuras	5
Índice de cuadros	7
Acrónimos	8
Resumen	9
1. Introducción	11
1.1 Ubicación geográfica	11
1.2 Objetivos	13
1.3 Metodología	13
1.4 Materiales y equipos	14
1.5 Justificación	14
1.6 Planteamiento de la problemática	15
1.7 Marco teórico	16
2. Generalidades del área de estudio	21
3. Determinación de la recarga potencial acuífera	29
3.1 Infiltración de lluvia que penetra el suelo (Pi)	30
3.1.1 Precipitación mensual (P)	30
3.1.2 Retención de lluvia mensual (Ret)	34
3.1.3 Coeficiente de infiltración (Ci)	36
3.1.3.1 Fracción que infiltra por textura del suelo (K _{fc})	36
3.1.3.2 Fracción que infiltra por efecto de la pendiente (K _p)	45
3.1.3.3 Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal (K _v)	48
3.1.4 Cálculo de la precipitación que infiltra (Pi)	51
3.2 Aplicación del balance de suelos	58
3.2.1 Parámetros de suelos	58
3.2.1.1 Capacidad de campo del suelo (CC)	61
3.2.1.2 Punto de marchitez del suelo (PM)	64
3.2.1.3 Densidad aparente del suelo (DA)	65
3.2.2 Evapotranspiración	67
3.2.2.1 Evapotranspiración potencial (ETP)	68
3.2.2.2 Evapotranspiración potencial real (ETPR)	71

3.2.2.3 Evapotranspiración real (ETR)	73
3.2.3 Cálculo de la humedad inicial (HSi) y humedad final (HSf) del suelo	74
3.3 Calculo de la recarga potencial al acuífero (Rp)	75
4. Determinación del grado de vulnerabilidad intrínseca	82
4.1 Unidades hidrogeológicas	82
4.1.1 Unidad de Brechas y Lavas Barba	93
4.1.2 Unidad de Lavas Fracturadas Colima	94
4.2 Parámetros método GOD	95
4.2.1 Grado de confinamiento del acuífero (Parámetro G)	97
4.2.2 Litología sobreyacente (Parámetro O).....	99
4.2.3 Profundidad del nivel de agua (Parámetro D).....	101
4.3 Determinación de la vulnerabilidad intrínseca.....	106
5. Inventariado de cargas contaminantes	108
5.1 Método POSH	110
5.1.1 Clasificación y categorización de las fuentes puntuales según el método POSH	110
5.1.2 Clasificación y categorización de las fuentes difusas según el método POSH	117
6. Riesgo a la contaminación acuífera.....	122
7. Conclusiones	127
8. Recomendaciones.....	129
9. Referencias	131
10. Anexos	136

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación del área de estudio (distrito Central de Alajuela).....	12
Figura 2: Diagrama para determinar la vulnerabilidad intrínseca mediante la metodología GOD.....	18
Figura 3: Clasificación y categorización de las fuentes puntuales de contaminación	19
Figura 4: Clasificación y categorización de las fuentes potenciales de contaminación tipo difusa.....	20
Figura 5: Esquema conceptual para la evaluación del riesgo acuífero	20
Figura 6: Modelo de Elevación Digital (DEM)	22
Figura 7: Mapa geológico local, distrito Central de Alajuela.	24
Figura 8: Mapa geomorfológico, distrito Central de Alajuela.	27
Figura 9: Distribución de la red fluvial hacia las cercanías del área de estudio.....	28

Figura 10: Distribución de la precipitación media anual, a partir de los datos de estaciones meteorológicas...	34
Figura 11: Ubicación de las pruebas de infiltración realizadas en campo.....	38
Figura 12: Valores de infiltración básica, obtenidos a partir de las pruebas del doble anillo.....	41
Figura 13: Diagrama triangular utilizado para clasificar la textura de los suelos.....	42
Figura 14: Texturas presentes en los suelos que conforman el área de estudio.....	44
Figura 15: Mapa de pendientes existentes dentro del área de estudio.....	47
Figura 16: Mapa de uso de suelo para el distrito Central de Alajuela.....	50
Figura 17: Mapa de zonas para determinación del balance de suelos.....	52
Figura 18: Mapa de distribución de la precipitación anual que infiltra.....	56
Figura 19: Mapa de ubicación referente a los sitios de muestreo de suelos.....	60
Figura 20: Mapa de capacidad de campo del suelo, según los resultados de laboratorio.....	63
Figura 21: Mapa de punto de marchitez del suelo, según los resultados de laboratorio.....	65
Figura 22: Mapa de densidad aparente del suelo, según los resultados de laboratorio.....	67
Figura 23: Mapa de la distribución de la recarga potencial acuífera anual para el distrito Central de Alajuela.	78
Figura 24: Mapa de porcentajes de recarga potencial anual.....	81
Figura 25: Mapa de pozos con litología registrados en la Base de Datos del SENARA.....	84
Figura 26: Líneas de perfiles hidrogeológicos elaborados para el distrito Central de Alajuela.....	86
Figura 27: Perfil Hidrogeológico 1.....	87
Figura 28: Perfil Hidrogeológico 2.....	88
Figura 29: Perfil Hidrogeológico 3.....	89
Figura 30: Perfil Hidrogeológico 4.....	90
Figura 31: Grado de confinamiento acuífero (Parámetro G).....	98
Figura 32: Litología sobreyacente al acuífero (Parámetro O).....	99
Figura 33: Isolíneas de elevación del techo Unidad Brechas y Lavas Barba.....	102
Figura 34: Líneas de flujo Unidad Brechas y Lavas Barba.....	103
Figura 35: Profundidad del nivel de agua (Parámetro D).....	105
Figura 36: Índice de Vulnerabilidad Acuífera para el distrito Central de Alajuela.....	108
Figura 37: Mapa de las potenciales fuentes de contaminación tipo puntual.....	116
Figura 38: Mapa de las potenciales fuentes de contaminación de tipo difusa.....	119
Figura 39: Mapa del potencial de contaminación para el distrito Central de Alajuela.....	121
Figura 40: Mapa de riesgo a la contaminación acuífera para el distrito Central de Alajuela.....	126

Índice de cuadros

Cuadro 1. Precipitación promedio mensual, datos suministrados por las estaciones meteorológicas.	31
Cuadro 2. Datos relacionados a las pruebas de infiltración realizadas en campo.	39
Cuadro 3. Texturas de suelos obtenidas mediante el ensayo de laboratorio y el diagrama triangular.	43
Cuadro 4. Clasificación del tipo de pendiente para la obtención del coeficiente Kp.	45
Cuadro 5. Clasificación del tipo de uso de suelo para la obtención del coeficiente Kv.	48
Cuadro 6. Valores de precipitación mensual para cada una de las ocho zonas generadas.	53
Cuadro 7. Valores de Kp, Kv y Kfc para cada una de las ocho zonas generadas.	53
Cuadro 8. Valores de retención de lluvia mensual para cada una de las ocho zonas generadas.	54
Cuadro 9. Valores de precipitación mensual que infiltra para cada una de las ocho zonas generadas.	55
Cuadro 10. Valores de precipitación anual que infiltra para cada una de las ocho zonas generadas.	55
Cuadro 11. Datos de la ubicación de los sitios de muestreo de suelos.	59
Cuadro 12. Valores de los parámetros de suelo.	61
Cuadro 13. Valores de capacidad de campo obtenidos mediante el ensayo de laboratorio.	62
Cuadro 14. Valores de punto de marchitez obtenidos mediante el ensayo de laboratorio.	64
Cuadro 15. Valores de densidad aparente obtenidos mediante el ensayo de laboratorio.	66
Cuadro 16. Valores de porcentaje de horas de luz solar mensual, para la latitud 10° del hemisferio norte.	69
Cuadro 17. Valores de temperatura media mensual que registran las estaciones meteorológicas.	69
Cuadro 18. Valores de evapotranspiración potencial mensual.	71
Cuadro 19. Valores de evapotranspiración potencial real mensual para cada una de las zonas.	72
Cuadro 20. Valores de evapotranspiración real mensual y valores de humedad disponible.	74
Cuadro 21. Valores de humedad inicial y final mensual para las zonas.	75
Cuadro 22. Variables para la determinación de la recarga potencial.	76
Cuadro 23. Valores de precipitación que infiltra y recarga potencial en las zonas urbanas.	77
Cuadro 24. Características hidráulicas Unidad Brechas y Lavas Barba.	94
Cuadro 25. Características hidráulicas Unidad Lavas Fracturadas Colima.	95
Cuadro 26. Inventariado de las potenciales fuentes puntuales de contaminación identificadas.	112
Cuadro 27. Matriz para cuantificar el riesgo a la contaminación acuífera.	123

Acrónimos

AyA	Acueductos y Alcantarillados
BGS	British Geological Survey
CICG	Centro de Investigación en Ciencias Geológicas
DEM	Modelo de Elevación Digital
GOD	Ground water occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
INTA	Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria
IVA	índice Vulnerabilidad Acuífero
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de Naciones Unidas
POSH	Pollutant Origin Surcharge Hydraulically
SENARA	Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
UCR	Universidad de Costa Rica
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

Resumen

Como parte de los proyectos de investigación denominados “Estudio Hidrogeológico del Sector Norte del Cantón Central de Alajuela, Costa Rica” y “Estudio de las zonas de captura, 29 manantiales utilizados por el Acueducto Municipal de Alajuela”, desarrollados por el Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de la Universidad de Costa Rica (CICG-UCR), se realizó un análisis del riesgo hidrogeológico del distrito Central de Alajuela, a partir de la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante.

El objetivo principal de la investigación se centró en la elaboración de un mapa de riesgo hidrogeológico del distrito, con el fin de generar una herramienta de planificación para el ordenamiento territorial y el control del uso del suelo.

El sistema acuífero, fue definido a partir de la elaboración de cuatro perfiles hidrogeológicos, construidos mediante el análisis de la información litológica de sesenta y cinco pozos ubicados dentro del área de estudio y registrados ante el SENARA; a partir del análisis efectuado, se estableció la presencia de dos niveles productores (Unidades Hidrogeológicas). El primer nivel productor superficial desarrollado en lavas brechosas del Miembro Bermúdez de la Formación Hidrogeológica Barba y un segundo nivel productor profundo desarrollado en lavas fracturadas de la Formación Hidrogeológica Colima Superior.

Debido al escaso registro de pozos profundos dentro del área de estudio (pozos con profundidades superiores a los 100 m), se limitó el poder realizar un análisis detallado en relación a la continuidad y características hidráulicas de la Unidad Lavas Fracturadas Colima, por tanto la investigación se concentró y enfocó en determinar el grado de vulnerabilidad intrínseca para el acuífero más superficial conformado por materiales de la Unidad Brechas y Lavas Barba.

Mediante los perfiles hidrogeológicos elaborados se determinó que la Unidad de Brechas y Lavas Barba no presenta continuidad hacia el sector norte del área de estudio, por lo tanto, este sector fue analizado utilizando la información que brindan los pozos existentes, los cuales atraviesan materiales de la Formación Tiribí y posteriormente de la Unidad Lavas Fracturadas Colima.

Para determinar el grado de vulnerabilidad intrínseca se utilizó el método GOD, a partir del producto de los valores obtenidos para cada uno de los parámetros, se estableció que la mayor parte del área de estudio presente una vulnerabilidad a la contaminación Baja ocupando un área cercana a los 8,72 km²; por su parte hacia la cercanía de los cauces de los ríos, la vulnerabilidad es catalogada como Moderada ocupando un área de 0,28 km².

Una vez definido el grado de vulnerabilidad, se procedió a identificar y realizar un inventariado de las potenciales fuentes de contaminación de tipo puntual y difusa impuestas por la actividad antrópica dentro del área de estudio; posteriormente mediante la aplicación del método POSH las fuentes potenciales de contaminación fueron clasificadas y categorizadas, obteniendo tres niveles cualitativos de potencial de generación de una carga contaminante al subsuelo: Reducido, Moderado y Elevado

Para conocer la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante, se elaboró una matriz de riesgo, la cual generó tres categorías cualitativas de riesgo a la contaminación acuifera: zonas de riesgo reducido, zonas de riesgo moderado y zonas catalogadas como de riesgo elevado; con los resultados obtenidos se procedió a elaborar el mapa de riesgo a la contaminación acuifera para el distrito Central de Alajuela.

La mayor parte del área de estudio presenta un riesgo de contaminación acuifera entre reducido y moderado; el riesgo reducido ocupan un área de 4,32 Km², mientras que el riesgo moderado involucra un área de 4,40 Km². El riesgo elevado comprende un área de 0,28 Km² y básicamente se ubica en las márgenes de los ríos Ciruelas y Alajuela, sectores donde la vulnerabilidad es definida como moderada y la carga contaminante muestra un potencial elevado.

Sumado a lo anterior, mediante la metodología del Balance Hídrico de Suelos establecida por Schosinsky, se logró determinar la distribución y porcentaje de recarga potencial acuifera que se presenta dentro del área de estudio. Los resultados obtenidos señalan que los mayores valores de recarga potencial se presentan hacia el sector norte del distrito, correspondiente a zonas dedicadas a la siembra de cultivos, en este sector se calcula que el 39,87% de la lluvia que precipita, logra recargar al acuífero. Por su parte, la menor recarga potencial ocurre en las zonas ocupadas por la actividad urbana, esto debido a la impermeabilización y compactación que experimentan los suelos, el porcentaje de lluvia que logra infiltrar y posteriormente recargar al acuífero, es reducido con un porcentaje de recarga del 0,74%.

1. Introducción

1.1 Ubicación geográfica

La práctica dirigida se realizó en el distrito Central de Alajuela, distrito que comprende una extensión territorial de 8,90 km² y se ubica dentro de la cuenca hidrográfica del Río Grande de Tárcoles. Esta investigación se encuentra en el marco de los proyectos desarrollados por el Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de la Universidad de Costa Rica (CICG-UCR) denominados “Estudio Hidrogeológico del Sector Norte del Cantón Central de Alajuela, Costa Rica” en convenio con el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) y “Estudio de las zonas de captura, 29 manantiales utilizados por el Acueducto Municipal de Alajuela” en convenio con la Municipalidad de Alajuela.

Geográficamente el distrito Central de Alajuela se ubica en las coordenadas de proyección conforme cónica Lambert Costa Rica Norte 220000 – 227000 Norte y 510000 – 5170000 Este y entre las coordenadas de proyección Transversal Mercator para Costa Rica CRTM05 474000 – 481000 Norte y 1105000 – 1112000 Este, hoja topográfica Barva (3346-II), escala 1:50000, editada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) (ver figura 1).

El área de estudio limita hacia el sector oeste con el distrito de San José, al este con el distrito de Desamparados, al sector norte se localizan los distritos de San Isidro y Carrizal, en tanto que al sur se ubican los distritos de San Antonio y Río Segundo; cabe indicar que los ríos Alajuela y Ciruelas delimitan de manera natural el área de estudio por el sector oeste y este, respectivamente.

Se elaboró un Modelo de Elevación Digital (DEM) y a partir de éste es posible establecer que el área de estudio presenta una elevación mínima de 890 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) y una elevación máxima de 1233 m.s.n.m.

El clima del área de estudio es típico de la región conocida como Valle Central Occidental, caracterizado por la presencia de dos épocas climáticas bien definidas: una época seca que se extiende de diciembre a marzo y una época lluviosa desde mayo a octubre; se considera que los meses de abril y noviembre son la transición de una época a otra. Debido a las condiciones climáticas que imperan en la zona, la vegetación es catalogada como de tipo bosque húmedo subtropical (Solano & Villalobos, 1996).

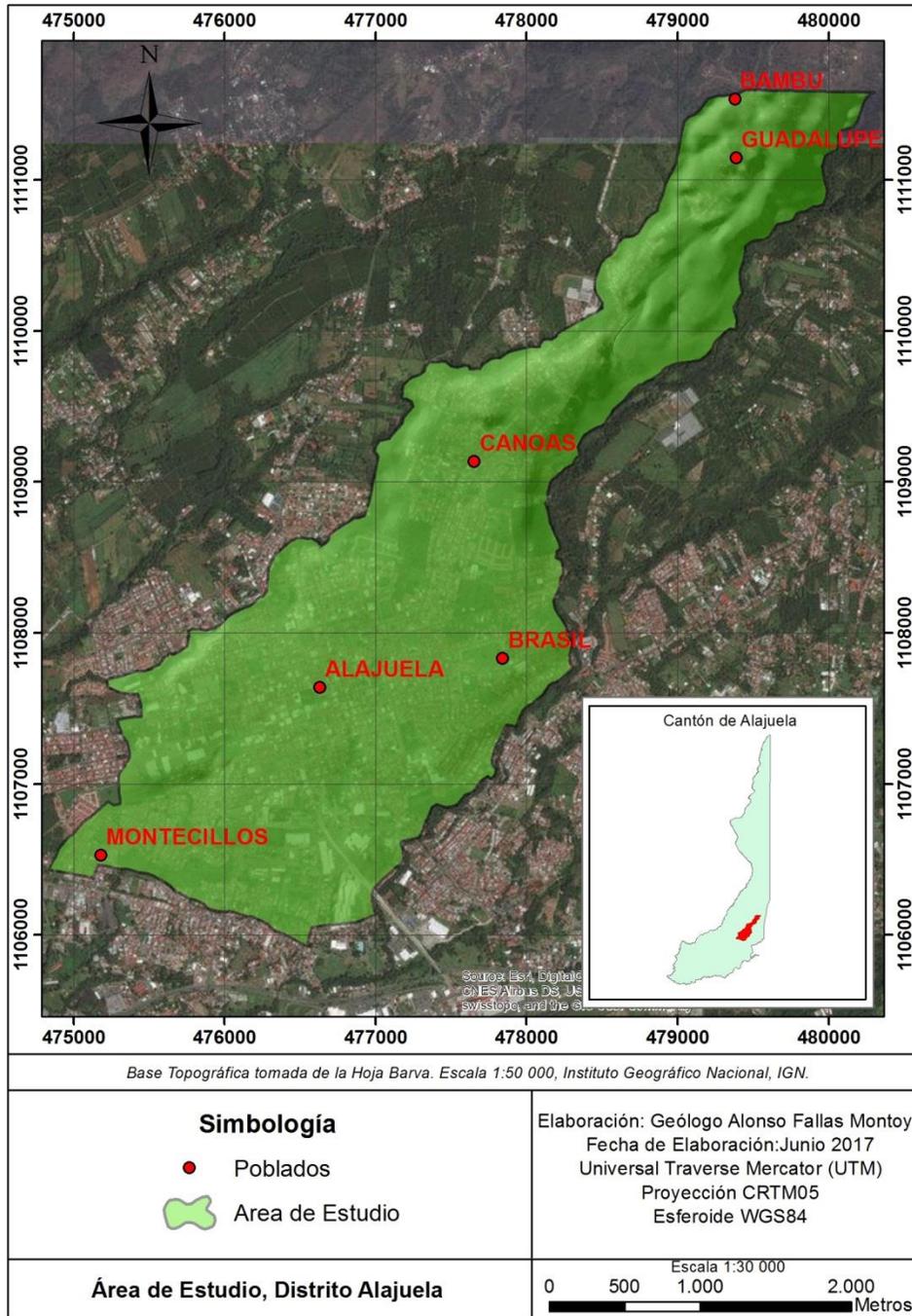


Figura 1: Ubicación del área de estudio (distrito Central de Alajuela). Elaboración propia.

1.2 Objetivos

➤ Objetivo General

Realizar un mapa de riesgo hidrogeológico del distrito Central de Alajuela con el fin de generar una herramienta de planificación para el ordenamiento territorial mediante el análisis de la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante existente en el distrito.

➤ Objetivos Específicos

1. Determinar la recarga potencial de los acuíferos, a partir del balance hídrico de suelos, para que sea un insumo en el ordenamiento ambiental del territorio.
2. Determinar el grado de vulnerabilidad intrínseca del acuífero, mediante la aplicación de la metodología GOD, con el fin de conocer el grado de fragilidad natural del medio.
3. Caracterizar la carga contaminante existente en el distrito Central de Alajuela, a partir del inventario de las fuentes potenciales de contaminación puntual y difusa, por medio del reconocimiento de campo y la utilización de imágenes satelitales.

1.3 Metodología

Para la consecución de los objetivos planteados, se describe de manera breve la metodología empleada:

- Revisión detallada de bibliografía disponible en bases de datos, artículos científicos e investigaciones a fines a la geología, hidrogeología y otros temas de interés relacionados con el estudio.
- Realización de giras de campo con el fin de determinar la geología básica y validar la información recopilada previamente.
- Ejecución durante las visitas de campo de pruebas de infiltración mediante el método del doble anillo.
- Recolección de muestras de suelo con el fin de ser enviadas al laboratorio y de ésta manera realizar los ensayos pertinentes para determinar los parámetros de interés.
- Uso de imágenes satelitales para la elaboración del mapa de uso de suelo.
- Aplicación de la metodología propuesta por Schosinsky (2006) para determinar por medio balance hídrico de suelos, la recarga potencial del acuífero.
- Análisis de la información de pozos existentes en el área de estudio, a partir de los registros presentes en bases de datos institucionales (SENARA, AyA), para determinar la ubicación de los niveles y establecer correlaciones litológicas.

- Utilización del Sistema de Información Geográfico ArcGIS, versión 10.3.1. para la elaboración de diferentes tipos de mapas (mapa uso de suelo, mapa de pendientes, modelo de elevación digital, mapa de vulnerabilidad, mapa de riesgo).
- Aplicación de la metodología GOD definida por Foster para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero.
- Caracterización y ubicación de las cargas contaminantes existentes dentro del distrito, para la elaboración del mapa de cargas contaminantes.
- Confección del mapa de riesgo a la contaminación acuífera, mediante la elaboración de una matriz en función de las variables de vulnerabilidad y carga contaminante previamente definidas.

1.4 Materiales y equipos

Durante las visitas se utilizó equipo de campo básico entre ellos: GPS, libreta de campo, piqueta, brújula, cámara fotográfica y hoja topográfica del área de estudio. Por su parte, para la realización de las pruebas de infiltración se utilizó dos anillos metálicos, mazo, regla, cronómetro, además del uso de pala, mazo de hule y bolsas plásticas para la recolección de las muestras de suelo.

Se utilizó información registrada en la base de datos de algunas instituciones públicas entre ellas: El Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA), Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) e Instituto Meteorológico Nacional (IMN), principalmente información relacionada a los reportes de perforación de pozos y registros históricos de datos climáticos para el área de estudio.

Para el almacenamiento de la información y cálculos se utilizaron hojas de cálculo de Excel; además para la edición y elaboración de los diferentes mapas se utilizó el sistema de información geográfico ArcGIS.

1.5 Justificación

En los últimos años la problemática del agua ha adquirido tal relevancia que es tema de conversación diario, ocupando gran espacio en los medios de comunicación del país. La problemática ha provocado un acercamiento institucional con el fin de unir esfuerzos e integrar desde diferentes campos posibles soluciones.

No solo se trata de una problemática de índole nacional, sino un tema de trascendencia internacional, convirtiéndose en un eje prioritario de acción en las agendas políticas de los gobiernos.

Costa Rica enfrenta serios problemas en cuanto a la cantidad y calidad del recurso, precisamente el Gobierno de la República, bajo el Decreto Ejecutivo N°38642-MP-MAG en setiembre del 2014, declaró estado de

emergencia en la provincia de Guanacaste debido a la intensa sequía, la cual ha afectado de manera drástica a miles de habitantes y provocado pérdidas económicas millonarias.

Por mucho tiempo se pensó que nuestro país estaba exento a este tipo de problemas, se llegó a creer que el agua era un recurso inagotable, no obstante hoy se enfrentan problemas serios de escasez y genera incertidumbre la situación de los próximos años.

La situación que enfrenta actualmente la provincia de Guanacaste, debería de ser el punto de partida para que los gobiernos locales y las Instituciones Gubernamentales, orienten los esfuerzos en la prevención y mitigación de los procesos de desarrollo con el fin de minimizar las actividades que potencializan la afectación a los recursos hídricos.

Es necesario realizar una intervención inmediata, implementar una gestión del recurso hídrico e invertir en estudios exhaustivos que permitan determinar el estado actual de las fuentes de agua en el país y de esta manera definir las estrategias a seguir.

Los estudios hidrogeológicos generan información y datos que funcionan como herramienta de apoyo en la planificación y ordenamiento del territorio, facilitan la toma de decisiones y permiten realizar estimaciones y proyecciones. Por esta razón, éste proyecto pretende determinar las características acuíferas existentes en el distrito Central de Alajuela, con el propósito de analizar la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante, a fin de generar un mapa de riesgo hidrogeológico que contribuya con la planificación del territorio y el control del uso del suelo.

1.6 Planteamiento de la problemática

El sector oeste del Valle Central de Costa Rica, ha experimentado un amplio desarrollo industrial y habitacional en los últimos años, la presencia del principal aeropuerto del país y la facilidad de acceso a la costa Pacífica lo han convertido en área de alto interés; particularmente el distrito Central de Alajuela se ha caracterizado por presentar un crecimiento urbano espontáneo y desordenado, trayendo como consecuencia directa, el incremento de la densidad de población.

Actualmente este distrito es el más populoso de la provincia de Alajuela, según el último censo realizado por el INEC en el año 2011, la población es de 42,975 habitantes.

El Plan de Desarrollo Cantonal “Alajuela Cantón Inclusivo y Solidario 2013-2023” revela que el desarrollo urbano del cantón de Alajuela ha cambiado significativamente el uso del suelo, gran parte del área dedicada a

la actividad agropecuaria paso a ser de uso urbano, incrementando los sectores comerciales, de servicios y en particular, durante los últimos 20 años, el sector industrial.

A partir de este crecimiento acelerado del Cantón, surge una mayor demanda del recurso hídrico y de los demás servicios en general, aunado a ello el desarrollo urbano conduce a una acelerada alteración del medio natural y por ende, la afectación del recurso hídrico.

La provincia de Alajuela se abastece del aprovechamiento del agua subterránea por medio de pozos y del agua que se manifiesta de manera superficial mediante nacientes, principalmente las fuentes se asocian a los acuíferos Colima y Barva, ambos sistemas acuíferos originados a partir de la formación del Valle Central, con edades Plioceno y Pleistoceno respectivamente (Denyer & Arias, 1991).

Considerando lo anterior, se pretende realizar un mapa de riesgo hidrogeológico del distrito Central de Alajuela, partiendo del análisis previo de la vulnerabilidad intrínseca de la zona, entendiendo ésta como la sensibilidad a ser adversamente afectada por una carga contaminante impuesta (Foster & Hirata, 1991), y del inventariado de cargas contaminantes identificadas dentro del área de estudio.

1.7 Marco teórico

Las siguientes definiciones sirvieron como base para el desarrollo de la presente investigación, además, se expone de manera breve cada uno de los métodos empleados para la consecución de los objetivos planteados.

Los **acuíferos** son aquellos estratos o formaciones geológicas que permiten la circulación y almacenamiento del agua por sus poros y/o grietas, de manera que puede ser aprovechada como recurso (Fetter, 1988). Por su parte, los **acuitardos** son las formaciones geológicas que contienen apreciables cantidades de agua pero que las transmiten lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones, sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos (Custodio & Llamas, 1976).

Según Denyer & Arias (1991), los materiales geológicos que se encuentran en el Valle Central fueron originados por una serie de fracturas que permitieron la erupción de lavas y flujos piroclásticos. Estos materiales geológicos presentan condiciones de porosidad primaria y fracturamiento destacables, permitiendo el desarrollo de importantes acuíferos que se encuentran interrelacionados en diferentes grados. Losilla (1977) menciona que en el Valle Central se han detectado tres principales acuíferos: El Barva, Colima Superior y Colima Inferior.

Para determinar la recarga potencial acuífera dentro del área de estudio, **la metodología del Balance Hídrico de Suelos**, se basa en el principio de la conservación de la materia, o sea el agua que entra a un suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él (Schosinsky, 2006).

El potencial de las aguas subterráneas de un acuífero, representa la máxima cantidad de agua a sustraer del acuífero para que no sea sobreexplotado, dicho potencial se determina mediante la recarga del acuífero con base a tres conceptos (Schosinsky, 2006):

- La fracción de lluvia interceptada por el follaje
- Infiltración de agua de lluvia hacia el suelo
- Balance de suelos

La metodología incluye una serie de ecuaciones conformadas por variables que influyen en la recarga potencial de los acuíferos, tales como: la precipitación, la retención de lluvia, la capacidad de infiltración de los suelos, cobertura vegetal, uso de suelo, pendientes del terreno, profundidad de raíces y la evapotranspiración.

Para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos existentes dentro del área de estudio, se opta por analizar las características intrínsecas del medio, lo que se conoce como vulnerabilidad intrínseca.

Auge (2004), define a la **vulnerabilidad intrínseca** como una propiedad cualitativa que indica el grado de protección natural de un acuífero respecto a la contaminación, derivada de las características propias del acuífero y su entorno, sin considerar la acción de los contaminantes.

Para efectos de determinar la vulnerabilidad intrínseca, en la presente investigación se utiliza el **método GOD**, metodología desarrollada originalmente por Foster basado en la determinación del Índice de Vulnerabilidad Acuífera (I.V.A) a partir de la asignación de índices entre 0 y 1 a tres variables del acrónimo en Inglés GOD, ver figura 2.

- G: ground water occurrence – Confinamiento hidráulico del acuífero.
- O: overall aquifer class – Tipo de litología que cubre al acuífero.
- D: depth – Profundidad en que se ubica el nivel de saturación de agua.

La estimación de este índice de vulnerabilidad, involucra una serie de etapas concretas:

- Identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y asignarle un índice a este parámetro en una escala de 0,0 a 1,0.

- Especificar las características del sustrato suprayacente a la zona saturada del acuífero en términos de: a) grado de consolidación (teniendo en cuenta la probable presencia de permeabilidad secundaria por fracturas) y b) tipo de litología (considerando indirectamente la porosidad, permeabilidad y contenido de humedad de la zona no saturada) y asignar un índice a este parámetro en una escala de 0,4 a 1,0.
- Estimar la distancia o profundidad al nivel del agua (en acuíferos no confinados) o profundidad al techo del primer acuífero confinado, con la consiguiente asignación de un índice en una escala de 0,6 a 1,0.

El índice final integrado de vulnerabilidad de acuíferos GOD, es el producto de los índices obtenidos para cada uno de estos parámetros.

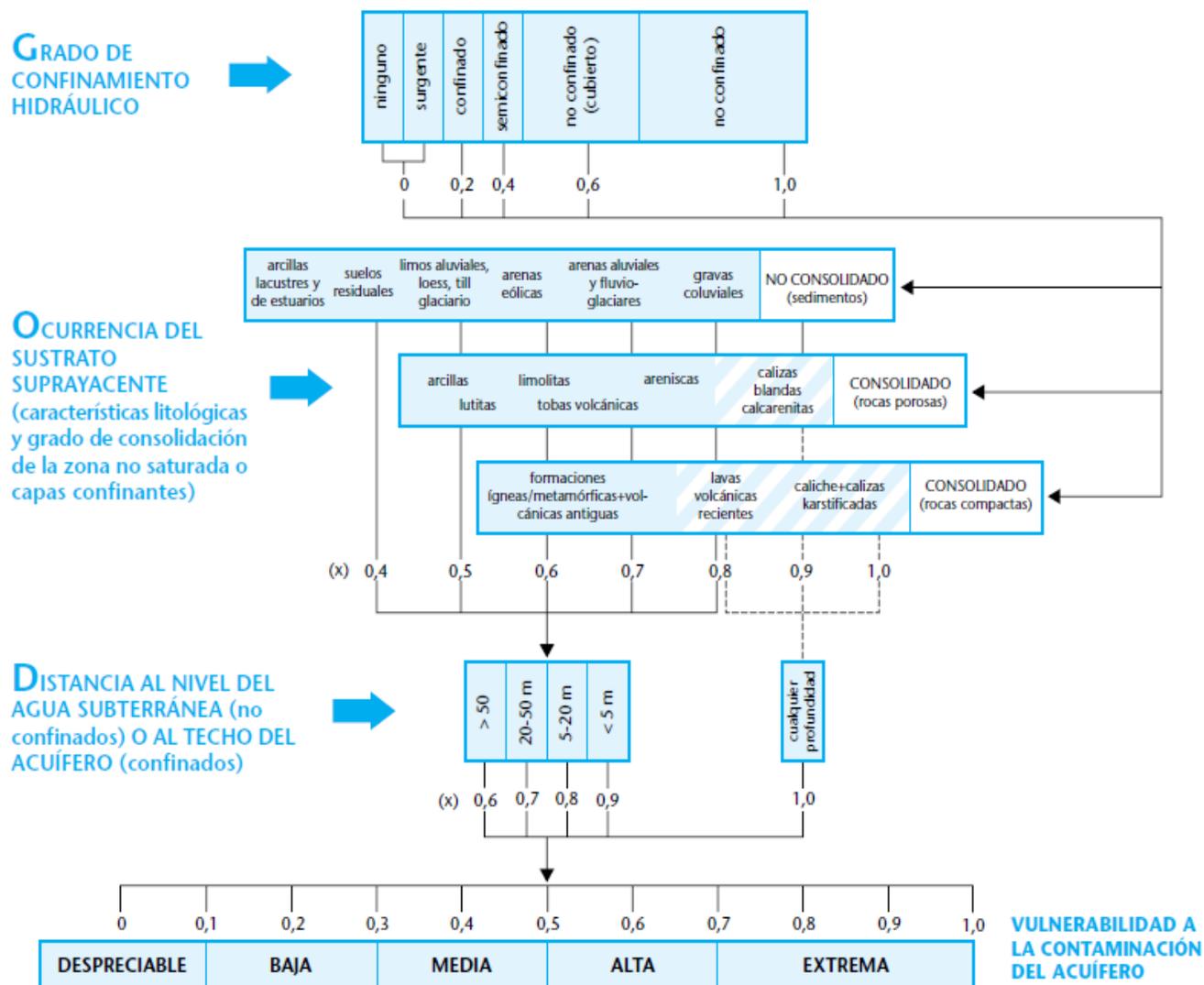


Figura 2: Diagrama para determinar la vulnerabilidad intrínseca mediante la metodología GOD. Tomado de Foster, et al. 2002.

El **método POSH** permite evaluar y caracterizar la carga contaminante (amenaza), a partir de dos características fácilmente estimables: el origen del contaminante (Pollutant Origin) y su sobrecarga hidráulica (Surcharge Hydraulically). Según la clasificación de las fuentes de contaminación, el método POSH genera tres niveles cualitativos de potencial de generación de una carga contaminante al subsuelo: Reducido, Moderado y Elevado (Foster et al., 2002).

Las actividades industriales son clasificadas según el tipo de producto químico utilizado y residuos que se manipulan; ante ello, se establecen tres tipos de industrias, siendo la industria tipo 1 la de menor impacto, la industria tipo 2 de impacto moderado y la industria tipo 3 de impacto elevado, asociado a la peligrosidad de los productos químicos utilizados (Foster et al., 2002). La figura 3 muestra la forma en que se clasifican las potenciales fuentes puntuales de contaminación.

POTENCIAL POR GENERACIÓN DE CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO	FUENTE DE CONTAMINACIÓN				
	disposición de residuos sólidos	sitios industriales*	lagunas de efluentes	urbanas varias	exploración minera y petrolera
Elevado	residuos de industrias tipo 3, residuos de origen desconocido	industrias tipo 3, cualquier actividad que maneje >100 kg/d de sustancias químicas	todas las industrias tipo 3, cualquier efluente (excepto aguas residuales residenciales) si el área >5 ha		operación de campos de petróleo, minas metalíferas
Moderado	precipitación >500 mm/a con residuos residenciales/ industriales tipo 1/ agroindustriales, todos los otros casos	industrias tipo 2	agua residual residencial si el área >5 ha, otros casos que no figuran arriba o abajo	gasolineras, rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas	algunas minas/ canteras de materiales inertes
Reducido	precipitación <500 mm/a con residuos residenciales/ industriales tipo 1/ agroindustriales	industrias tipo 1	efluente residencial, urbano mezclado, agroindustrial y minero no metalífero si el área <1 ha	cementerios	
<p>* los terrenos contaminados por industrias abandonadas deberían tener la misma categoría que las propias industrias</p> <p>Industrias tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos</p> <p>Industrias tipo 2: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones</p> <p>Industrias tipo 3: talleres mecánicos, refinerías de gas y petróleo, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal</p>					

Figura 3: Clasificación y categorización de las fuentes puntuales de contaminación, de acuerdo al método POSH. Tomado de Foster, et al. 2002.

Para el caso de las fuentes potenciales de contaminación tipo difusa, el método POSH considera la carga contaminante que genera la actividad agrícola y los sistemas de saneamiento *in situ*. La figura 4 muestra la forma en que estas fuentes son clasificadas y categorizadas.

POTENCIAL DE CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO	FUENTE DE CONTAMINACIÓN	
	saneamiento <i>in situ</i>	prácticas agrícolas
Elevado	cobertura del servicio de cloacas menor que 25% y densidad-poblacional superior a 100 personas/ha	cultivos comerciales intensivos y la mayoría de los monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia de riego, pastoreo -intensivo sobre praderas altamente fertilizadas
Moderado	intermedio entre elevado y reducido	
Reducido	cobertura del servicio de cloacas mayor que 75% y densidad poblacional inferior a 50 personas/ha	rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en áreas áridas

Figura 4: Clasificación y categorización de las fuentes potenciales de contaminación tipo difusa, de acuerdo al método POSH. Tomado de Foster, et al. 2002.

Foster (1987) define al **riesgo** como el peligro de deterioro en la calidad de un acuífero, por la existencia real o potencial de sustancias contaminantes en su entorno. La metodología implementada para la determinación del riesgo es desarrollada por Foster & Hirata (1991), para ello se evalúa la interacción entre la vulnerabilidad y la carga contaminante, tal y como lo muestra el esquema conceptual de la figura 5.

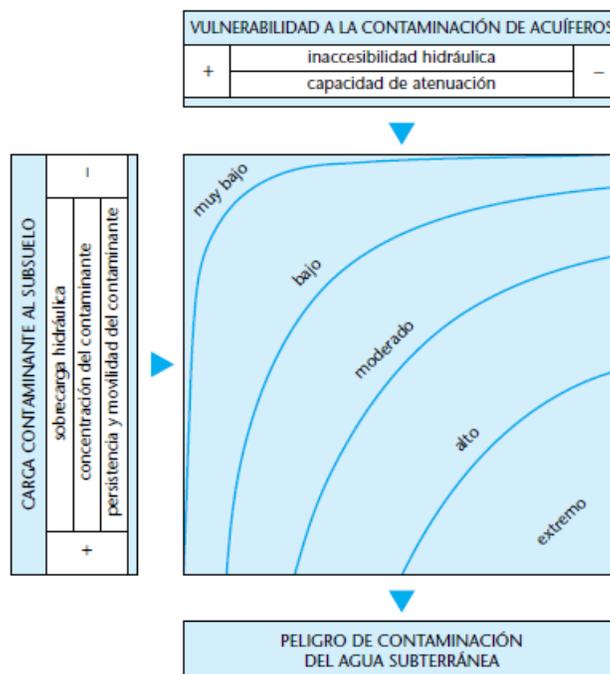


Figura 5: Esquema conceptual para la evaluación del riesgo acuífero. Tomado de Foster, et al. 2002.

Mediante la matriz de riesgo establecida en la presente investigación se analiza la interacción entre la vulnerabilidad y la carga contaminante, logrando definir el riesgo de contaminación acuífera dentro del área de estudio.

2. Generalidades del área de estudio

El presente capítulo incluye una serie de aspectos generales y regionales del área de estudio, aspectos relevantes que inciden de manera directa en las condiciones acuíferas existentes en el subsuelo de la localidad; por tanto y considerando los objetivos propuestos en la presente investigación, se expone temas en relación a las características geológicas de los materiales existentes, aspectos geomorfológicos, hidrogeológicos, estructurales y distribución de la red fluvial. La información se obtuvo a partir de aportes bibliográficos de estudios previos en la zona (antecedentes), además de observaciones y anotaciones generadas a partir de las visitas de campo efectuadas.

En primera instancia, a partir de las curvas de nivel establecidas para la hoja cartográfica Barva, se elaboró por medio del programa ArcGIS un Modelo de Elevación Digital (DEM), con el objetivo de representar de manera visual las formas de relieve que imperan por el área de estudio. Una vez elaborado el DEM, es posible mencionar que las elevaciones dentro del área oscilan entre una elevación mínima de 890 m.s.n.m hacia el sector sur y una elevación máxima de 1233 m.s.n.m hacia el sector noreste.

A partir de la figura 6, se aprecia como la topografía del terreno desciende de forma escalonada en dirección noreste-suroeste, tal situación es asociada a la presencia de diferentes frentes de coladas de lava provenientes del Volcán Barva.

Hacia el sector norte del área de estudio predomina una topografía irregular con pendientes mayores, tal situación asociada al control estructural que ejerce la Falla de Alajuela sobre el relieve; por su parte, hacia el sector central y sur del distrito predominan condiciones de pendiente suave, asociado al modelado y procesos de erosión que generan los agentes externos.

Las zonas de pendiente plana se caracterizan por favorecer el asentamiento poblacional, por ende el gran desarrollo urbano que se concentra en la parte intermedia y baja del distrito Central de Alajuela, particularmente entre las elevaciones de 890 y 1000 m.s.n.m.

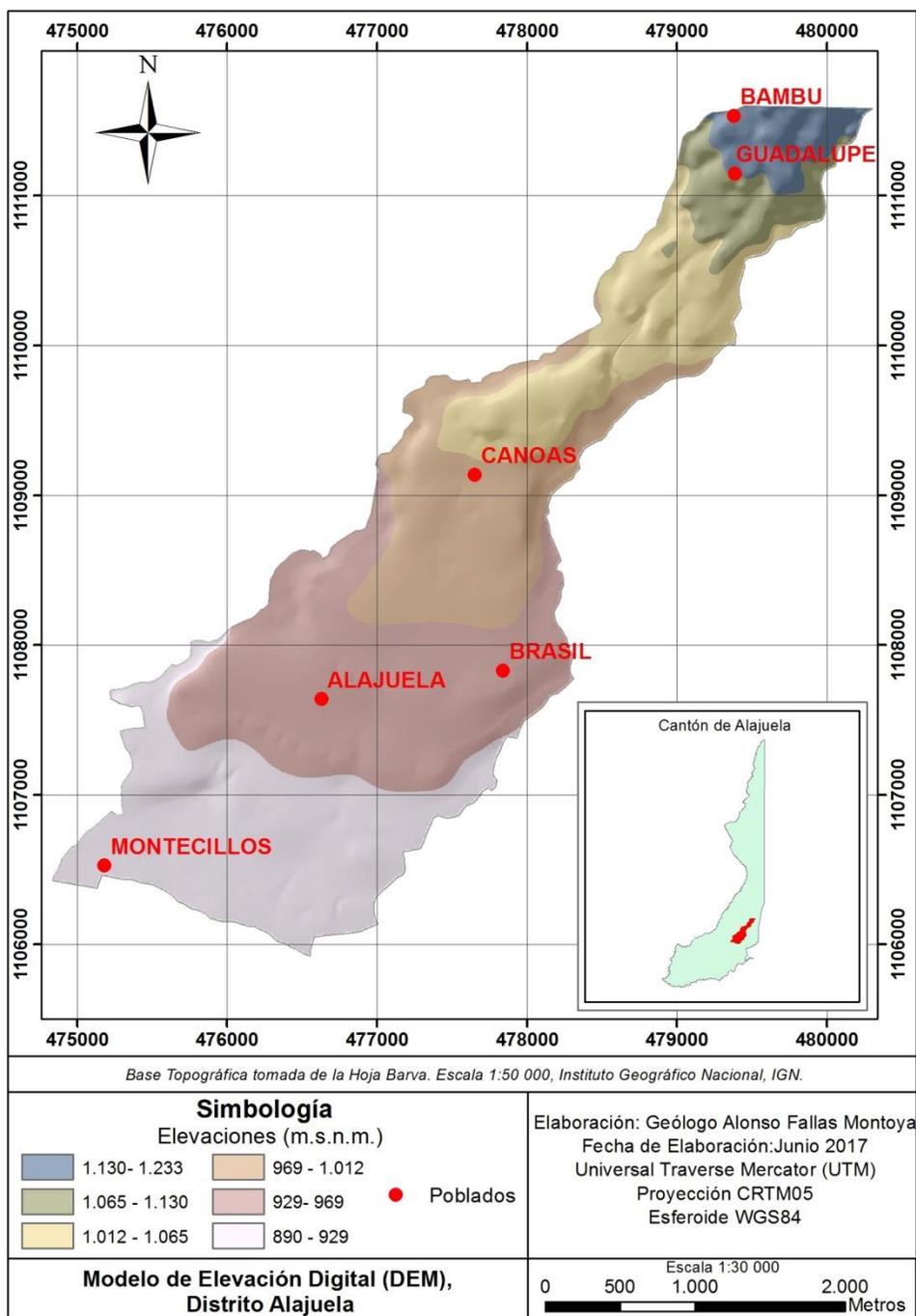


Figura 6: Modelo de Elevación Digital (DEM) para el área de estudio. Elaboración propia.

En relación a la geología regional, Denyer & Arias (1991) señalan que los materiales geológicos que se encuentran en el Valle Central son producto de una fase tensional ocurrida en el Plioceno, la cual originó por medio de fracturas norte-sur y/o noreste-suroeste la inyección de las coladas de Lavas Intracañón y los depósitos de Avalancha Ardiente.

Posteriormente y con la formación de los edificios volcánicos de la Cordillera Volcánica Central, se depositaron lahares y cenizas que rellenaron la depresión originada entre la cordillera y el volcanismo del Mioceno (Denyer & Arias, 1991).

Según Ehandi (1981), la Formación Lavas Intracañón corresponde con coladas de lava andesíticas en espesores de 10 a 30 m, intercaladas con tobas y escasas brechas; se estima para esta Unidad un espesor total cercano a los 100 m.

Kussmaul (1988, en Denyer & Arias, 1991), menciona que la formación Avalancha Ardiente se constituye por depósitos de pómez de caída, seguido por flujos de ceniza, lapilli y bloques; en tanto las ignimbritas se caracterizan por presentar tonalidades grises con fiammes de obsidiana y pómez.

Por su parte, las Lavas Post-Avalancha Ardiente están constituidas por coladas de lavas andesíticas y andesito-basálticas con espesores que van desde 10 hasta 80 m con intercalaciones de aproximadamente 10 m de ceniza y ocasionalmente lapilli (Denyer & Arias, 1991).

La geología local del área de estudio se estableció por medio del análisis de los afloramientos visitados, los cuales se ubican principalmente sobre las márgenes de los cauces de los ríos Ciruelas y Alajuela; aunado a las visitas de campo, se empleó como apoyo los registros litológicos existentes en los reportes de perforación de pozos consultados.

De manera superficial, dentro del área de estudio predominan materiales arcillosos, los cuales son producto de la meteorización de materiales de origen volcánico, principalmente depósitos de cenizas y tobas; estos materiales cubren en el sector central y sur del área de estudio al Miembro Hidrogeológico Porrosatí y Carbonal, en tanto que hacia el sector norte sobreyacen tobas e ignimbritas de la Formación Tiribí.

En los cauces de los ríos se aprecia en promedio un espesor de entre 3 a 8 m de materiales arcillosos de coloración café, estos materiales se presentan moderadamente consolidados sobreyaciendo principalmente tobas y lavas brechosas, no obstante, hacia el sector norte del distrito, se observa un incremento considerable en el espesor de los materiales meteorizados, alcanzando en ciertos sectores los 20 m de espesor. En la siguiente figura (7) se muestra el mapa de geología local propuesto.

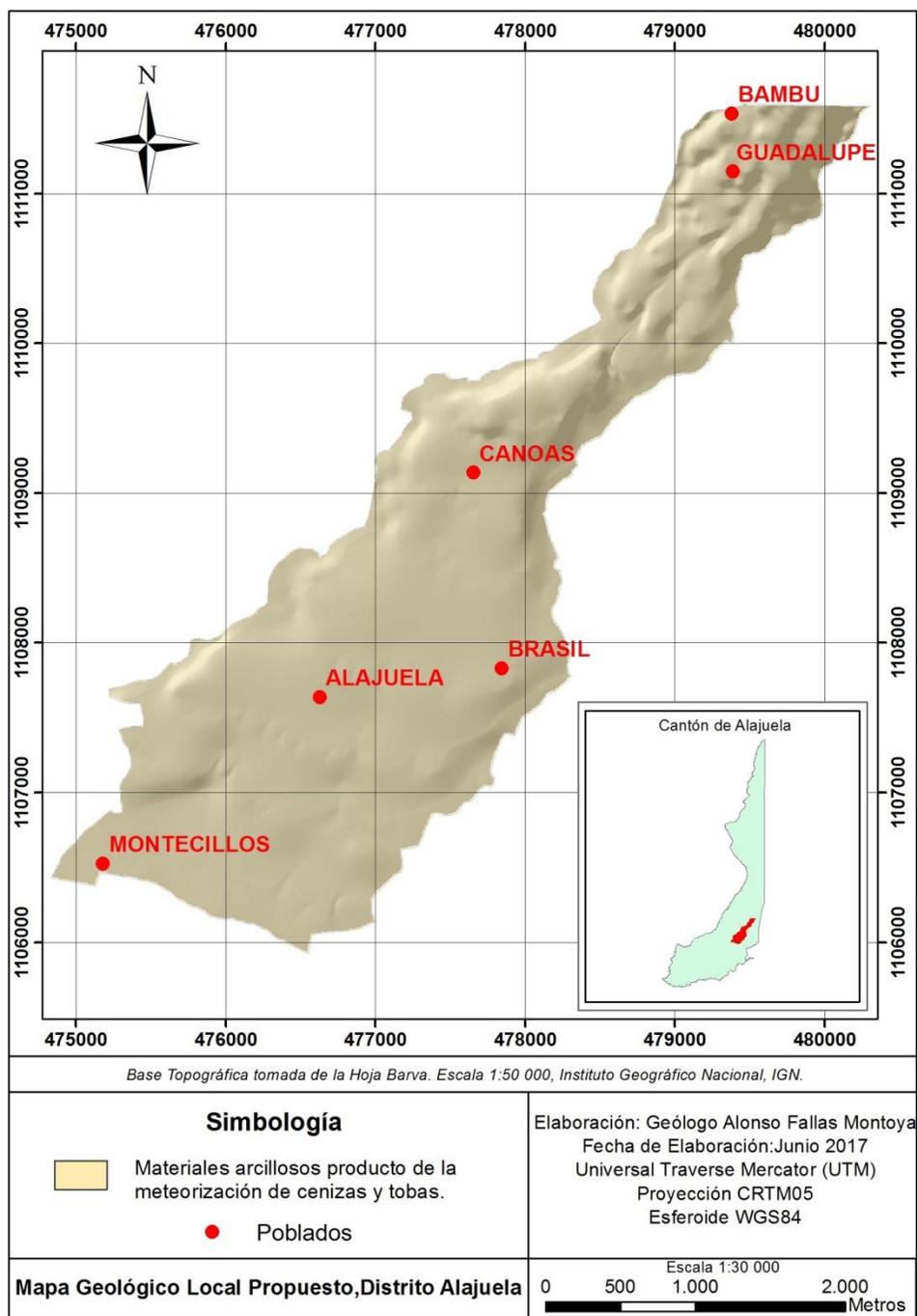


Figura 7: Mapa geológico local, distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

Desde el punto de vista hidrogeológico y siguiendo con la nomenclatura propuesta por Ramírez y Alfaro (2002), los materiales geológicos de la Formación Lavas Intracañón corresponde con la Formación Hidrogeológica Colima (Superior e Inferior), la Formación Avalancha Ardiente correspondería a la Formación Tiribí, mientras que las Lavas Post-Avalancha Ardiente corresponden con la Formación Hidrogeológica Barva.

Echandi (1981), divide la Formación Colima en tres miembros: el Miembro Inferior Belén, el Miembro Intermedio Ignimbritas de Puente de Mulas y el Miembro Superior Linda Vista. Tanto el Miembro Belén como el Miembro Linda Vista, se encuentran conformados por varias coladas de lavas andesíticas separadas entre sí por mantos de tobas y cenizas meteorizadas, estas lavas tienden a ser muy densas y presentan permeabilidades destacables debido a la presencia de fracturas, las cuales permiten la conformación de acuíferos.

El Miembro Puente de Mulas se encuentra constituido por tobas e ignimbritas que actúan como acuitardos, estos materiales presentan una moderada percolación vertical y no constituye una zona productora debido a que no recibe recarga de los acuíferos superiores (Echandi, 1981).

De acuerdo con los perfiles litológicos de pozos perforados en el Valle Central, el espesor promedio de la Formación Colima es de aproximadamente 100 m (50 m para el Miembro Inferior, 20 m para Puente de Mulas y 30 m para el Miembro Superior) (Ruiz et al.2010).

En cuanto a la producción de estos acuíferos, Ramírez (2007) señala que el Miembro Inferior ofrece producciones por pozo de hasta 60 L/s de agua químicamente potable y originan grupos de manantiales de hasta 300 L/s en el cañón del Río Virilla; por su parte el Miembro Superior de gran extensión, ofrece producciones de hasta 100 L/s. Schosinsky & Vargas (2001) señalan que la principal Unidad Hidrogeológica del Valle Central es la Formación Colima.

La Formación Tiribí ha sido dividida por Echandi (1981) en varios miembros, el Miembro Inferior Nuestro Amo, Miembro La Caja y el Miembro Superior Electriona. El Miembro Nuestro Amo se encuentra constituido por depósitos de lodos ardientes; el Miembro La Caja que abarca los depósitos de tobas poco soldadas, mientras que el Miembro Electriona representa los emplazamientos de ignimbritas bien soldadas (Echandi, 1981). Desde el punto de vista hidrogeológico la formación Tiribí se considera como un acuitardo y separa la Formación Colima de la Formación Barva (Ramírez & Alfaro, 2002).

La Formación Barva es dividida por Echandi (1981), en cuatro miembros hidrogeológicos bien diferenciables, Miembro Bermúdez, Miembro Porrosatí y Carbonal, Miembro Los Ángeles y Bambinos, y Miembro Cráter. En esta Formación, el medio de propagación varía según las condiciones litológicas locales, por lo que se podría clasificar regionalmente como un sistema mixto (fracturado o poroso dependiendo del sitio).

El Miembro Bermúdez está conformado por lavas andesíticas fracturadas, conocidas como acuífero Barva Inferior, la permeabilidad se da en fisuras y en partes brechosas; los pozos que captan este acuífero pueden producir hasta 20 L/s.

El Miembro Porrosatí y Carbonal se encuentra constituido por arenas volcánicas gruesas y tobas arcillosas meteorizadas; forman acuitardos de gran extensión donde subyacen al acuífero Barba Superior y en algunos sectores afloran directamente cubriendo al acuífero Barba Inferior.

Con respecto al Miembro Los Ángeles y Los Bambinos comprende coladas de lava que conforman acuíferos discontinuos, colgados y de poca extensión, conocidos como Barba Superior. Por su parte, el Miembro Cráter está constituido por piroclastos recientes que cubren al acuífero Barba Superior, con espesores cercanos a los 10 m.

En cuanto a aspectos geomorfológicos, la zona de estudio está dominada por la presencia de relieves de origen volcánico, los cuales son afectados por esfuerzos tectónicos, por lo que básicamente se identifican dos Unidades Geomorfológicas.

A modo general, se establece que el área de estudio se ubica dentro de una meseta volcánica, conformada por materiales provenientes del Volcán Barva; el origen de esta unidad se encuentra relacionado con el relleno de lahares y cenizas depositados sobre materiales tobáceos, ignimbritas y lavas brechosas. Hacia las partes bajas del área de estudio, la pendiente de las laderas presenta una topografía suavizada y la densidad del patrón de drenaje tiende a disminuir.

Al sector norte, se presenta la base de un escarpe de falla, dicho escarpe representa uno de los flancos de un pliegue de tipo anticlinal originado por la Falla de Alajuela, falla de propagación inversa que tiene un rumbo variable entre este-oeste y oeste-noroeste y que se extiende por unos 20 km desde la ciudad de Grecia al oeste, hasta la ciudad de Santa Bárbara al este (Montero et al. 2010).

Según Obando (2004) este pliegue consiste en una forma de origen secundario, producto de la falla inversa de Alajuela, falla profunda que no rompe en superficie, pero produce un plegamiento anticlinal de las capas superiores, lo que consecuentemente genera el escarpe. El flanco sur del anticlinal presenta una pendiente muy fuerte, buzante hacia el sur, mientras que el flanco norte, tiene una pendiente más suave, ligeramente inclinada hacia el norte.

Obando (2004) menciona que el escarpe alcanza una altura topográfica cercana a los 140 m y se encuentra disectado por ríos y quebradas con orientaciones noreste-suroeste, entre ellos los ríos Alajuela y Ciruelas; ambos ríos hacia la cercanía del escarpe, presentan cañones fluviales profundos, donde se evidencian depósitos coluviales y depósitos asociados con antiguos deslizamientos.

El mapa de la figura 8, muestra las Unidades Geomorfológicas propuestas para el área de estudio.

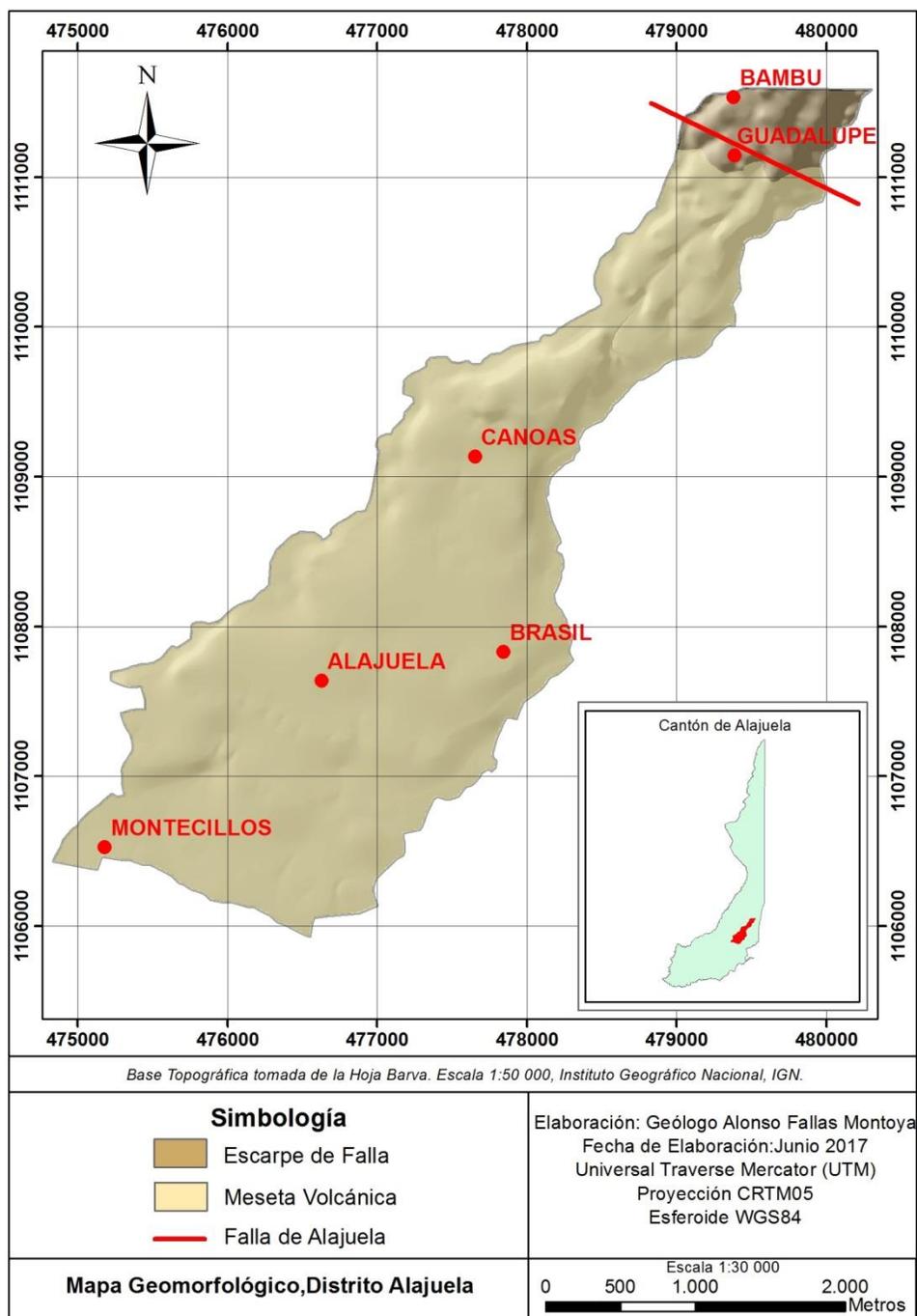


Figura 8: Mapa geomorfológico, distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

La red fluvial del área de estudio se encuentra dentro de la cuenca del río Grande de Tárcoles, perteneciente a la Vertiente del Pacífico; dicha cuenca representa el 4,2% de la superficie nacional, con un área de 2165,99 Km², abarcando parcialmente cinco de las siete provincias y 36 municipios de los 82 existentes (Rojas, 2011). La confluencia del río Virilla y el río Grande, forman el río Grande de Tárcoles (Rojas, 2011).

Cabe indicar que entre los ríos cercanos al área de estudio, los ríos Alajuela, Itiquís, Tacacorí y Tambor se unen al río Grande, por su parte, el río Ciruelas se une al río Virilla. La figura 9 muestra la ubicación de los ríos y quebradas existentes en las inmediaciones del área de estudio, además es posible apreciar el patrón de drenaje de tipo paralelo que impera.

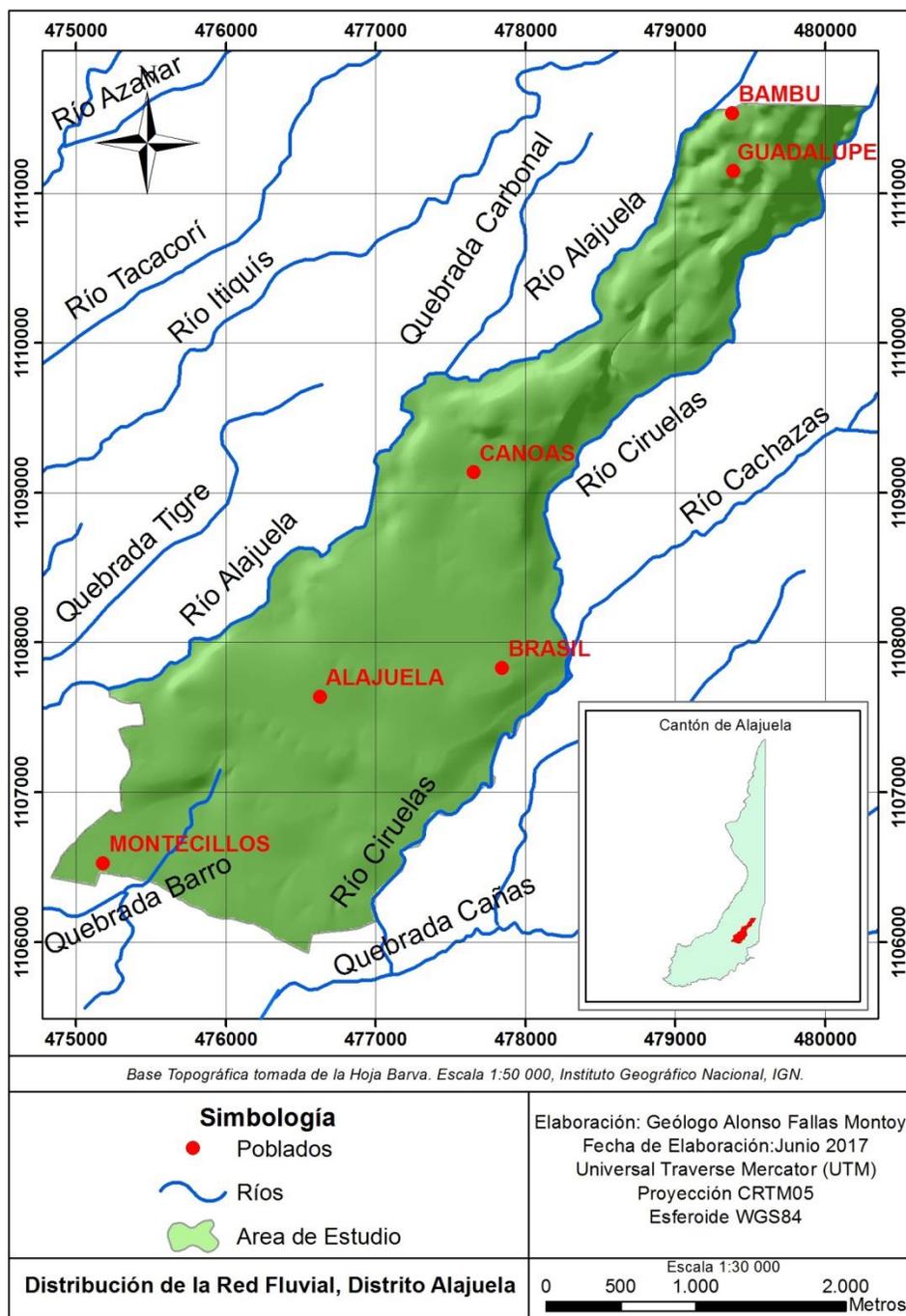


Figura 9: Distribución de la red fluvial hacia las cercanías del área de estudio. Elaboración propia.

En general, el patrón de drenaje de la red fluvial es catalogado como de tipo paralelo y presenta una orientación preferencial noreste-suroeste; este patrón suele estar controlado por la pendiente del terreno, por lo tanto cuanto mayor es la pendiente en una dirección, mayor y más paralelos se observan los canales, por el contrario, cuando la pendiente tiende a disminuir, el paralelismo de los canales tiende a perderse.

Para el caso de los ríos Ciruelas, Alajuela, Itiquís y Tacacorí el patrón de drenaje es bastante marcado, tal situación asociada a la influencia de los flujos volcánicos (frentes de coladas de lava) en el drenaje; por su parte hacia el sector sur del área de estudio, el patrón de drenaje se torna menos denso y se evidencia un ligero cambio en el rumbo del patrón, presentando una dirección este-oeste, este aspecto particular se evidencia en las quebradas Barro y Cañas. En general, el cauce de los ríos dentro del área de estudio son poco profundos, siendo menores a los 10 m, a excepción del sector norte donde se presenta un incremento.

A partir de las visitas de campo efectuadas se evidenció de manera general el deterioro y la contaminación que enfrentan los cursos de aguas superficiales, inclusive en ciertos sectores los ríos y quebradas fueron intervenidos por la actividad antrópica modificando el cauce natural de los mismos, a partir de la canalización por medio del uso de concreto (ver anexos 3, 4 y 5).

3. Determinación de la recarga potencial acuífera

A modo general, un balance hídrico constituye una herramienta para resolver problemas hídricos de índole teórico y práctico, a partir de la evaluación cuantitativa del recurso hídrico tanto a nivel temporal como espacial (UNESCO, 2007). Según Cinergia (2009), un balance hídrico se establece para un lugar y un periodo dado, comparando los aportes y las pérdidas de agua en ese lugar y para ese periodo.

La metodología del balance hídrico de suelos establecida por Schosinsky (2006), permite estimar el agua que recarga al acuífero localizado debajo del suelo analizado, tal metodología se basa en el principio de la conservación de la materia, donde se sostiene que el agua que entra a un suelo es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él.

Para aplicar la metodología del balance hídrico de suelos, es indispensable conocer previamente la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, una vez determinada la infiltración, se procede a aplicar el balance de suelos con el fin de estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero.

La metodología presenta una serie de ecuaciones conformadas por variables que influyen en la recarga potencial de los acuíferos, tales como: la precipitación, la retención de lluvia, la capacidad de infiltración de los

suelos, la cobertura vegetal, uso de suelo, pendientes del terreno, profundidad de raíces y la evapotranspiración.

Las variables anteriormente señaladas, son obtenidas de diversas maneras, entre ellos: registro histórico que brindan las estaciones meteorológicas cercanas, pruebas de campo, resultados de los ensayos de laboratorio, otros se originan mediante el uso de sistemas de información geográfico y gran parte producto de las observaciones de campo y del criterio profesional.

Para facilitar la aplicación del balance hídrico, se construye mediante el uso del programa ArcGIS una serie de zonas dentro del área de estudio con atributos característicos y únicos asociadas con las variables que comprende la metodología, posteriormente de manera individualizada a cada una de las zonas, se les aplica un balance de suelos.

3.1 Infiltración de lluvia que penetra el suelo (P_i)

Para calcular la precipitación que infiltra en el suelo (P_i), se emplea la ecuación general establecida por Schosinsky (2006), la ecuación establece que el valor de precipitación que infiltra es igual al producto del coeficiente de infiltración previamente calculado por la diferencia entre la precipitación y la retención que genera el follaje. La ecuación se muestra a continuación:

$$P_i = (C_i) (P - Ret) \quad \text{Ecuación 1}$$

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo

C_i = Coeficiente de infiltración

P = Precipitación mensual

Ret = Retención de lluvia mensual

Las variables que conforman la ecuación son descritas en los posteriores apartados, de manera detallada se explica el procedimiento aplicado para la obtención de cada uno de los valores.

3.1.1 Precipitación mensual (P)

Según Aparicio (1992) la precipitación es la fuente primaria del agua superficial y su medición es el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua. Una vez que el agua de lluvia logra infiltrar en el suelo, esta se convierte en la fuente principal que origina las aguas subterráneas (Astorga & Arias, 2003).

Para determinar la fracción de lluvia que penetra el suelo, es importante de previo conocer la precipitación que ocurre dentro del área de estudio; por lo tanto, con el fin de obtener información climática de la zona, se consultó al Departamento de Información del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) por las estaciones meteorológicas que se localizan en las cercanías del distrito Central de Alajuela. A partir de la consulta, se estableció la existencia de dos estaciones meteorológicas pertenecientes al IMN las cuales registran datos históricos relacionados a las precipitaciones mensuales.

La estación meteorológica nombrada Alajuela Centro se ubica dentro del área de estudio, específicamente en las coordenadas CRTM05 475852 E / 1107687 N a una elevación de 950 m.s.n.m, cabe señalar que la estación meteorológica registra datos históricos de precipitación desde el periodo de 1998 al año 2015.

Por su parte la estación meteorológica nombrada Tegucigalpa-Itiquís se localiza fuera del área de estudio en dirección noroeste y su ubicación está dada por las coordenadas CRTM05 477377 E / 1111281 N a una elevación de 1080 m.s.n.m, la estación meteorológica registra datos históricos de precipitación desde el periodo de 1976 al año 2015.

Es importante señalar que dichas estaciones registran información únicamente de la variable de precipitación, por lo tanto para la obtención de la otra variable climática de interés (temperatura) es necesario recurrir a otras estaciones meteorológicas ubicadas en las cercanías del área de estudio.

Cuadro 1. Precipitación promedio mensual, a partir de los datos suministrados por las estaciones meteorológicas.

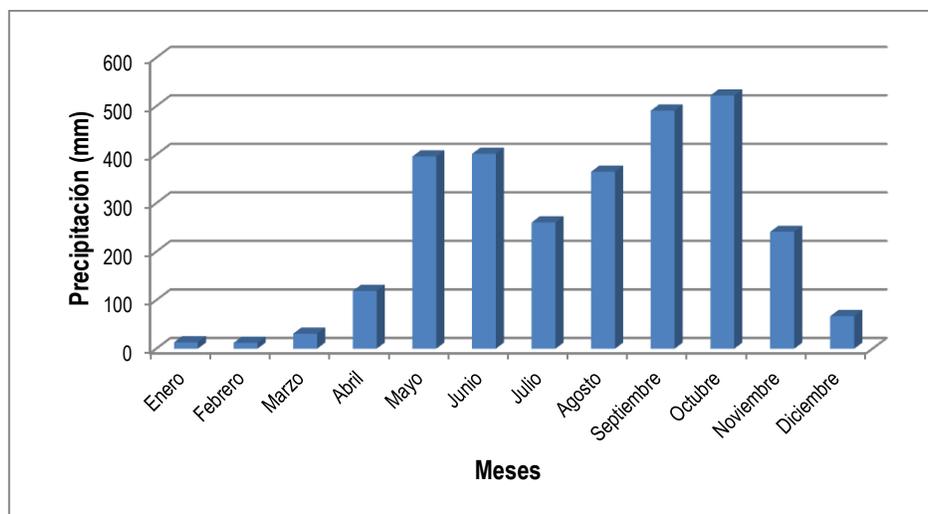
Estación	Precipitación Promedio Mensual (mm/mes)												Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Alajuela Centro (1998-2015)	7,5	8,7	13,3	85,9	280,9	253,9	180,7	215,1	378,1	362,4	168,5	39,8	1994,8
Tegucigalpa-Itiquís (1976 - 2015)	13,4	12,1	31,1	119,2	396,3	401,8	260,4	365,1	490,8	522,2	241,0	67,2	2920,7

Fuente: elaboración propia

Considerando los datos del cuadro 1, es posible establecer que la época lluviosa está definida entre los meses de mayo a noviembre, registrándose los mayores valores de precipitación durante los meses de setiembre y octubre, por su parte la época seca es definida entre los meses de diciembre a abril, siendo los meses de enero y febrero los que registran los menores valores de precipitación. Durante los meses de julio y

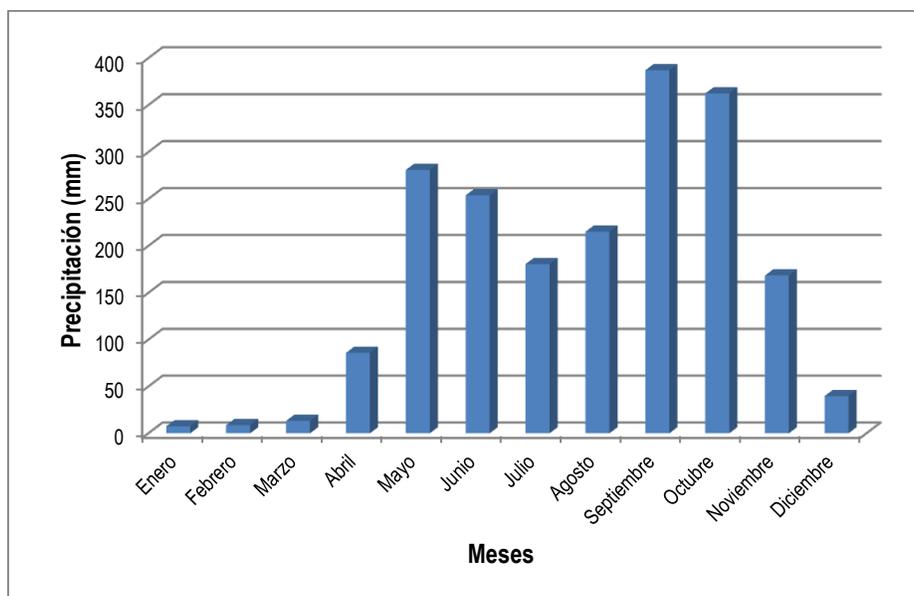
agosto se observa una disminución relativa de la precipitación, asociado posiblemente al “veranillo” que ocurre a mediados de año (ver gráficos 1 y 2).

Gráfico 1. Precipitación mensual promedio Estación Tegucigalpa-Itiquís (1976-2015)



Fuente: elaboración propia

Gráfico 2. Precipitación mensual promedio Estación Alajuela Centro (1998-2015)



Fuente: elaboración propia

Otro detalle a considerar es que para todos los meses del año, la estación Tegucigalpa-Itiquís registra mayores valores de precipitación en comparación a los valores que registra la estación meteorológica Alajuela

Centro, tal situación obedece a la localización geográfica de las estaciones y la influencia del relieve sobre las condiciones climáticas.

Con el propósito de determinar la distribución de la precipitación dentro del área de estudio, se utiliza el método de Polígonos de Thiessen, método que permite establecer el área de influencia de cada estación meteorológica, posteriormente a cada polígono trazado (área de influencia) se le asigna su correspondiente valor de precipitación.

El método de Polígonos de Thiessen consiste en la construcción de polígonos a partir del trazo de líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos equiláteros, en cuyos vértices se encuentran las estaciones meteorológicas, el área encerrada por los Polígonos de Thiessen será el área de influencia de la estación correspondiente, mientras que los lados de los polígonos son los límites de las áreas de influencia (Aparicio, 1992).

Para determinar el área de influencia de cada estación meteorológica, los Polígonos de Thiessen fueron construidos por medio del programa ArcGIS utilizando la herramienta nombrada "analysis tools" y su aplicación "create Thiessens polygons"; el límite de influencia generado inicialmente por el programa es mediante una línea recta, por lo que posteriormente es ajustado siguiendo criterios geomorfológicos, en particular el contorno que genera el cambio de la pendiente sobre este sector (ver figura 10)

El mapa de distribución de la precipitación para el distrito Central de Alajuela permite establecer que en las zonas altas localizadas entre los 980 y 1233 m.s.n.m., la precipitación registra un valor de 2920,7 mm, en tanto en las zonas con elevaciones entre los 890 y 980 m.s.n.m se registran 1994,8 mm de lluvia.

Barry & Chorley (2003), señalan la influencia que tiene la orografía sobre la precipitación y particularmente la distribución geográfica de las lluvias, ambos autores establecen que las zonas montañosas obligan al aire ascender, por expansión el aire se enfría al punto de reducir su capacidad de contener el vapor de agua por lo que comienza la condensación, generando la formación de nubes que producen precipitaciones.

Considerando la influencia de la orografía sobre la precipitación, es posible comprender el motivo por el cual en la zona ubicada al norte del distrito existe una mayor precipitación anual con respecto a la registrada en las partes bajas del sector sur; considerando los valores que registran las estaciones meteorológicas se concluye que en el sector norte del área de estudio precipita un 46% más de lluvia en comparación al sector sur. Debido a la distribución de las precipitaciones y a las variaciones registradas en cuanto a cantidad de lluvia que precipita, esto conlleva a la existencia de zonas con una mayor posibilidad de infiltración que otras.

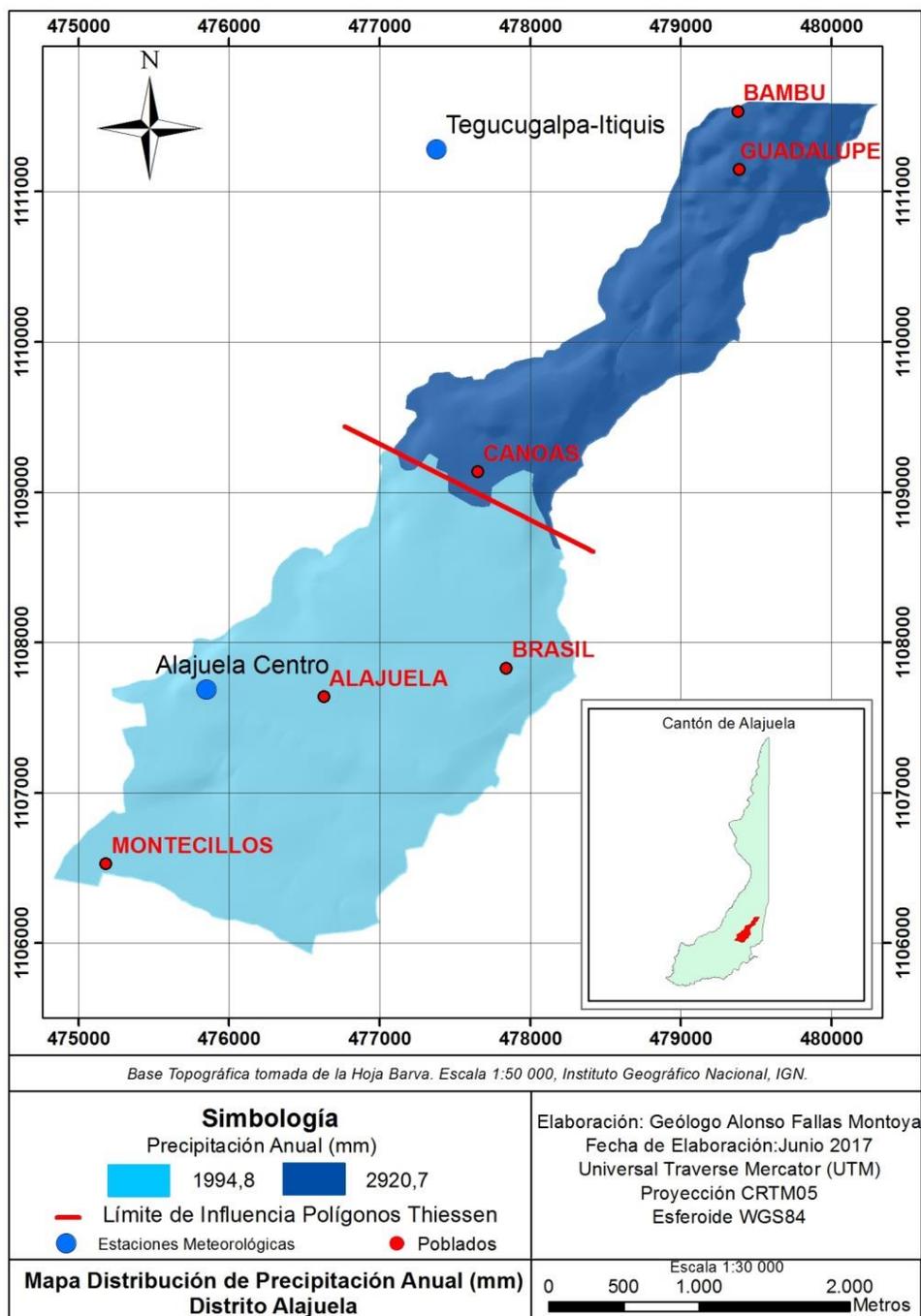


Figura 10: Distribución de la precipitación media anual, a partir de los datos que registran las estaciones meteorológicas. Elaboración propia.

3.1.2 Retención de lluvia mensual (Ret)

Parte de la lluvia que precipita no llega a la superficie del suelo, debido a que es interceptada por el follaje de las plantas, el agua posteriormente se evapora desde la superficie vegetal y retorna a la atmósfera, por ende no tiene la posibilidad de infiltrar (FAO, 2013).

Butler (1957) determina que el follaje intercepta generalmente el 12% de la lluvia anual, por lo tanto el 88% restante tiene la posibilidad de llegar a la superficie del suelo; para efectos de ésta investigación, el coeficiente de follaje (*Cfo*) con valor de 0,12 es empleado en la vegetación de tipo menor, vegetación caracterizada por presentar un follaje poco denso distribuido en las zonas con cobertura de zacate y cultivos.

Para el caso de los bosques, Linsley et al. (1958) establecen que el follaje genera una retención del 20% de la lluvia, para este caso, el coeficiente de follaje (*Cfo*) presenta un valor de 0,20. La categoría de bosque es asignada para la estrecha franja de árboles que se localizan a la margen izquierda del río Alajuela.

Es importante mencionar que la metodología propuesta por Schosinsky (2006), entre sus limitantes no considera el efecto del uso de suelo de tipo urbano sobre la infiltración y la recarga potencial. Considerando que la mayor parte del área de estudio se encuentra ocupada por un amplio desarrollo urbano, es indispensable incluir el efecto de impermeabilización de los suelos dentro del balance hídrico.

Fontaneda et al. (2012) señalan que la impermeabilización de los suelos debido al continuo crecimiento urbano probablemente sea la principal causa del aumento de los problemas asociados a la gestión del agua de lluvia en las ciudades. El intenso desarrollo urbano y la creciente modificación en los usos de suelo, contribuyen a interrumpir el ciclo natural del agua, aumentando la escorrentía superficial debido a las lluvias, incluso para precipitaciones de corta duración y baja intensidad (Eroksuz & Rahman, 2010).

La mayor parte de la lluvia que precipita al caer sobre concreto y asfalto no filtra, sino que ésta escurre superficialmente, Reynolds (1996) señala que la región más amenazada por este proceso es el Valle Central, donde existe un rápido crecimiento urbano que invade en la actualidad muchas de las áreas de recarga de los acuíferos. Fontaneda *et al.* (2012) establecen que el efecto de impermeabilización asociado al crecimiento urbano modifica el ciclo hidrológico del terreno al punto de anular prácticamente la infiltración natural y la recarga de los acuíferos con el agua de lluvia.

Por lo anterior y para efectos de esta investigación, es necesario establecer un coeficiente de retención asociado al uso de suelo de tipo urbano, para ello se procede a consultar bibliografía referente al cálculo de la infiltración de agua de lluvia en zonas urbanizadas.

Atlantis (2008) señala que en ciudades densas el 99% de la lluvia que precipita escurre debido a la impermeabilización que experimentan los suelos y solamente el 1% tiene posibilidad de infiltración, por su parte Espinoza (2011) indica que en las zonas fuertemente urbanizadas el porcentaje de infiltración es cercano al 15%, del cual un 10% del agua precipitada filtra de manera superficial, mientras que el 5% restante logra una infiltración profunda, teniendo posibilidad de recargar a los acuíferos.

En pavimentos típicos el coeficiente promedio de escorrentía presenta un valor de 0,85 lo que significa que el 85% de la lluvia que precipita es retenida por efecto de la impermeabilización de los suelos (Trujillo & Quiroz, 2013).

Ante lo anterior, se utilizará un coeficiente de retención para el uso urbano con un valor de 0,85 por lo tanto se define que el porcentaje de agua que logra infiltrar es del 15% según el valor de precipitación registrado para la zona específica de estudio, en este caso aquellas zonas ocupadas por el desarrollo urbano.

Para calcular la retención de la lluvia Schosinsky (2006) propone que si la precipitación es menor o igual a 5 mm/mes, la retención es igual a la precipitación, si el producto de la precipitación por el coeficiente de retención es mayor o igual de 5 mm/mes, entonces la retención es igual al producto de dichas variables, por su parte si la precipitación es mayor a 5 mm y el producto de la precipitación por el coeficiente de retención es menor de 5 mm/mes, la retención tendrá un valor de 5.

3.1.3 Coeficiente de infiltración (C_i)

La ONU (1972), establece que la fracción de lluvia que infiltra en el suelo va a depender de la textura del suelo, la pendiente del terreno y la cobertura vegetal, la suma de dichas variables permite obtener el coeficiente de infiltración (C_i), variable indispensable para obtener el valor de la precipitación que infiltra (P_i). A continuación se presenta la ecuación para el cálculo del coeficiente de infiltración (C_i).

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc} \quad \text{Ecuación 2}$$

C_i = Coeficiente de Infiltración

K_p = Fracción que infiltra por efecto de la pendiente

K_v = Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal

K_{fc} = Fracción que infiltra por textura del suelo

Es importante indicar que la metodología establece que si la suma de $K_p + K_v + K_{fc}$ es mayor a 1 el coeficiente de infiltración tendrá un valor de 1; por su parte si la suma de $K_p + K_v + K_{fc}$ es menor o igual a 1, el coeficiente de infiltración tendrá un valor igual a la suma de dichas variables. Las variables que permiten realizar el cálculo del coeficiente de infiltración son descritas detalladamente a continuación:

3.1.3.1 Fracción que infiltra por textura del suelo (K_{fc})

Schosinsky (2006) menciona que uno de los factores que más influye en la infiltración de la lluvia en el suelo es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (K_{fc}). El coeficiente K_{fc} , se obtiene a partir de la

determinación de la infiltración básica del suelo (f_c), valor que se genera en campo al efectuar la prueba de doble anillo en la superficie del terreno. Schosinsky & Losilla (2000) establecen la siguiente ecuación para el cálculo del K_{fc} :

$$K_{fc} = 0,267 \ln(f_c) - 0,000154f_c - 0,723 \quad \text{Ecuación 3}$$

K_{fc} = Fracción que infiltra por textura del suelo

f_c = Infiltración básica del suelo

Este autor señala que para aplicar la fórmula anterior, es necesario que el valor de f_c se encuentre entre 16 a 1568 mm/día; si f_c es menor a 16 mm/día el resultado de k_{fc} es igual a $0,0148f_c / 16$, en el caso de que el valor de f_c es mayor de 1568 mm/día, k_{fc} tiene un valor de 1 (Schosinsky, 2006)

El método del doble anillo o método Müntz consiste en saturar una porción del suelo que es limitada por dos anillos concéntricos que son introducidos en el terreno, para a posteriormente medir la variación del agua en el cilindro interno; el anillo externo tiene la función de evitar la infiltración horizontal del agua por debajo del cilindro interno, de tal forma que las medidas correspondan con seguridad al flujo vertical (Segeer & Villodas, 2006).

La prueba de doble anillo, permite simular con mayor precisión y menor alteración, el comportamiento de la precipitación al entrar en contacto con la vegetación y la superficie del suelo, por lo tanto durante la ejecución de las pruebas, se trató de evitar la eliminación de la cobertura vegetal, con el fin de no alterar las condiciones naturales del medio.

Las pruebas de infiltración realizadas fueron distribuidas de tal manera que se garantizara una completa cobertura del área de estudio, del mismo modo fueron realizadas en sitios previamente seleccionados, donde los terrenos no mostraran evidencias de alteraciones o modificaciones, las cuales afecten las propiedades y características naturales de los suelos a analizar.

Debido a la actividad humana que se desarrolla en el distrito, la mayor parte de los suelos se encuentran impermeabilizados, removidos o retrabajados, por tales situaciones la ubicación de los sitios para el desarrollo de las pruebas fue una tarea complicada.

La figura 11 muestra la distribución de las ocho pruebas de infiltración realizadas en el área de estudio; cada prueba de infiltración tiene asignado un consecutivo, según la sucesión cronológica en que fueron realizadas.

A partir del mapa de ubicación de las pruebas, se puede apreciar que las pruebas de infiltración realizadas durante las visitas de campo se localizan en zonas periféricas con respecto al intenso desarrollo urbano que se concentra en el sector intermedio y sur del distrito Central de Alajuela.

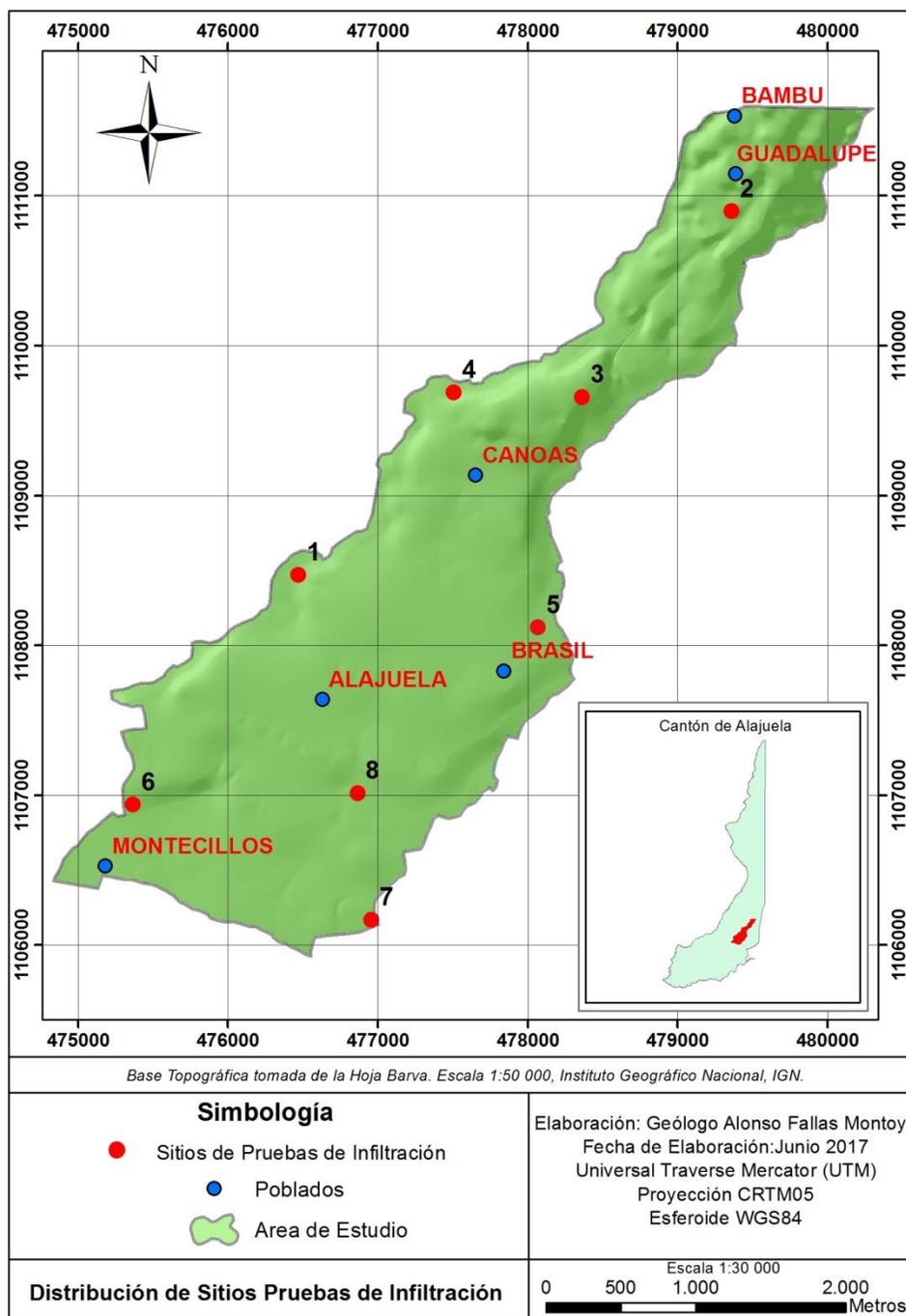


Figura 11: Ubicación de las pruebas de infiltración realizadas en el área de estudio. Elaboración propia.

Las pruebas de infiltración fueron realizadas entre los meses de julio y agosto del año 2015, época de invierno donde los suelos suelen encontrarse húmedos, lo que permite alcanzar en menor tiempo una condición de saturación del suelo, tal condición contribuye a la obtención de datos más fiables. Posterior a las pruebas, se construyeron gráficos de los datos de infiltración (cm/hora) en función del tiempo de prueba, para así, obtener el valor de infiltración básica de suelo (f_c). El anexo 1 ilustra la forma ejecución de las pruebas de infiltración mediante el método del doble anillo.

El cuadro 2 muestra los resultados obtenidos para cada una de las pruebas de infiltración efectuadas, el valor de f_c obtenido posteriormente es convertido en unidades de milímetros/día, tal y como lo establece la metodología empleada.

Cuadro 2. Datos relacionados a las pruebas de infiltración realizadas en campo y los valores obtenidos de infiltración para cada prueba.

Prueba	Fecha	Elevación (m.s.n.m)	Localidad	Coordenadas		Infiltración (cm/hora)	Infiltración (mm/día)
				CRTM05 (X)	CRTM05 (Y)		
1	17/07/2015	953	San Martin	476473	1108470	7	1680
2	17/07/2015	1095	Guadalupe	479363	1110895	27	6480
3	31/07/2015	1047	Canoas	478365	1109656	60	14400
4	31/07/2015	1015	Canoas -Ceiba	477510	1109688	58	13920
5	15/08/2015	974	Brasil	478070	1108118	36	8640
6	15/08/2015	911	Montecillos	475369	1106937	3,5	840
7	23/08/2015	903	Frente Hospital	476959	1106169	17,5	4200
8	23/08/2015	935	Tomas Guardia	476867	1107013	25	6000

Fuente: elaboración propia

Zinck (2012), menciona que la geomorfología influye directamente en la formación y características de los suelos existentes en una zona particular, tal relación es conocida como geopedología, la cual es enfocada en el levantamiento de suelos, para establecer unidades de mapeo y analizar la distribución de los suelos en el paisaje. Según este autor, la geomorfología provee los contornos de las unidades de mapeo (el contenido), mientras que la pedología suministra los componentes taxonómicos de las unidades de mapeo (el contenido).

Con base en lo señalado anteriormente y para efectos de una mejor representatividad de la información que es recopilada en campo, se delimitaron zonas con características geomorfológicas similares, principalmente basándose en la pendiente.

Analizando los aspectos geomorfológicos, se establecen un total de tres zonas: una zona caracterizada por presentar pendientes bajas, ubicada hacia el sector sur del área de estudio; una zona intermedia ubicada en la parte central del distrito con pendientes moderadas y una zona de alta pendiente asociada al sector montañoso, ubicado hacia el sector norte del distrito.

A partir de las tres zonas previamente establecidas, se procede a agrupar los datos que se obtuvieron durante las pruebas de infiltración para posteriormente ser promediados y generar de esta manera un mapa zonal en relación con la tasa de infiltración básica (f_c).

Para el sector de pendiente baja se utilizan los valores obtenidos mediante las pruebas de infiltración 6, 7 y 8, en la zona intermedia se emplean los valores obtenidos en las pruebas 1, 3 y 5, por su parte, en la zona establecida de pendiente alta se emplean los valores de las pruebas 2 y 4 (ver cuadro 2).

Cabe indicar que de acuerdo con la metodología anteriormente expuesta se elaboran los mapas de textura de suelo, capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente.

La figura 12 muestra la distribución de las tasas de infiltración básica (milímetros/día) para cada una de las zonas establecidas mediante criterios geopedológicos.

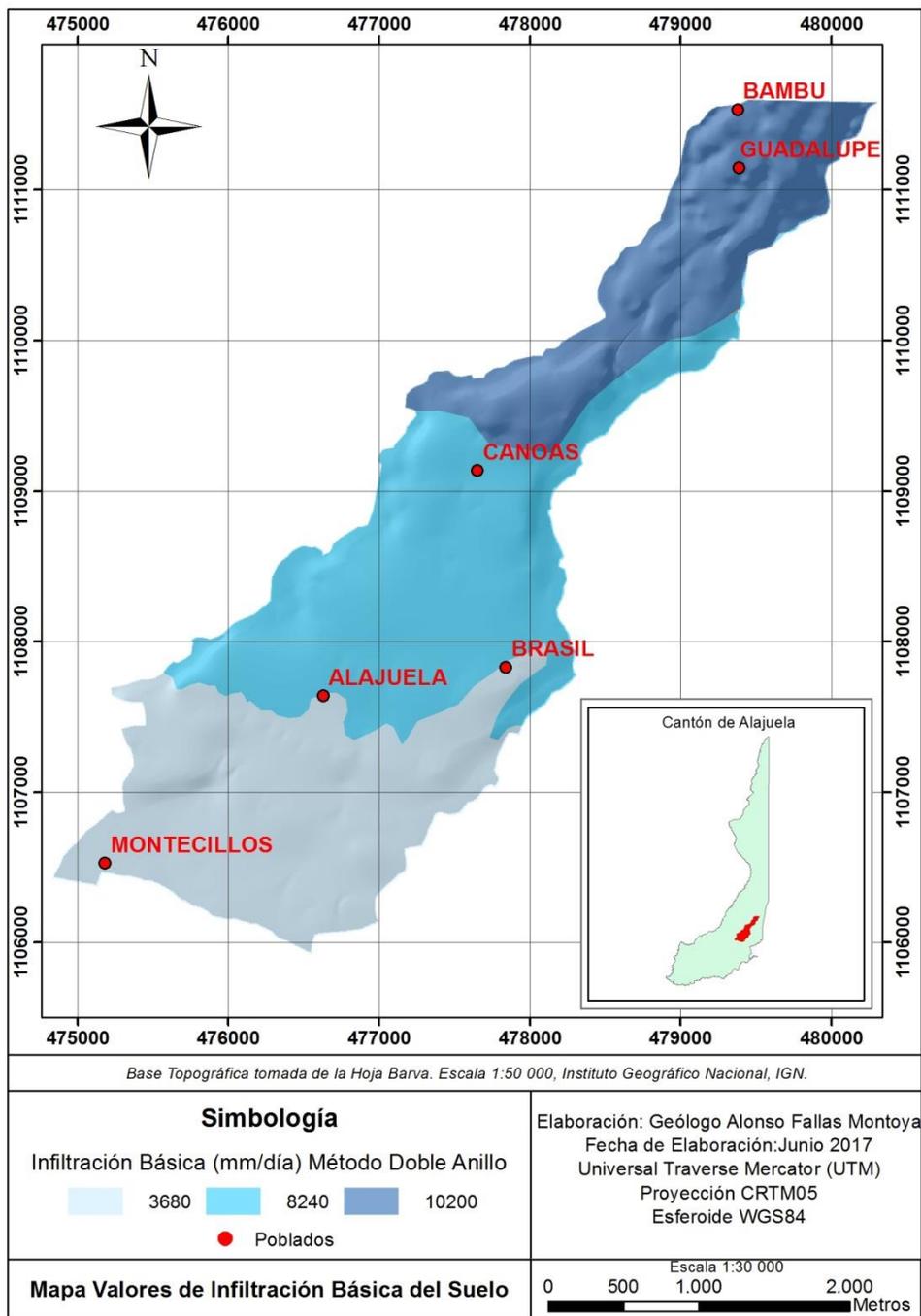


Figura 12: Valores de infiltración básica, obtenidos a partir de las pruebas del doble anillo. Elaboración propia.

La precipitación que infiltra depende de la textura del suelo, por esta razón en cada sitio donde se efectúan pruebas de infiltración se recolectaron muestras de suelo, para posteriormente determinar mediante un análisis granulométrico la relación existente entre arenas, limos y arcillas. En total se recolectaron ocho muestras de suelo, las cuales posteriormente son remitidas al Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agraria (INTA), con el fin de realizar los ensayos de laboratorio pertinentes.

La textura es una de las propiedades más importantes del suelo e incide en muchas otras propiedades, Cisneros (2003) la define como la proporción en porcentajes de cada fracción granulométrica existente en una masa de suelo, es decir, representa la cantidad de arenas, limos y arcillas que componen el suelo.

Una vez realizado el ensayo granulométrico, la textura del suelo es clasificada bajo los criterios que establece el diagrama triangular de clases texturales desarrollado por Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés). La figura 13 muestra el diagrama triangular utilizado para clasificar la textura de los suelos.

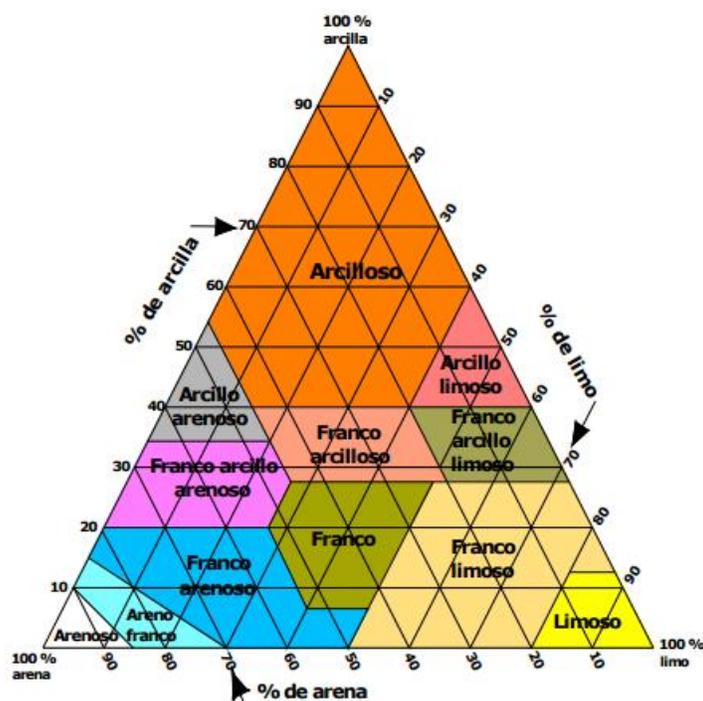


Figura 13: Diagrama triangular utilizado para clasificar la textura de los suelos. Tomado de USDA (1999).

Los suelos pueden ser clasificados en tres grandes grupos a partir de las familias de texturas presentes: suelos con predominio de texturas finas se denomina pesados, los suelos de texturas intermedias se denomina medios y los suelos donde predomina la textura gruesa se denominan livianos (Ciancaglini, et al. 2015).

Considerando los resultados de los ensayos de laboratorio y la clasificación textural propuesta por el USDA, el cuadro 3 resume la información referente al tipo de textura para cada una de las muestras de suelo debidamente recolectadas.

Cuadro 3. Texturas obtenidas mediante el ensayo de laboratorio y el diagrama triangular de clases texturales propuesto por el (USDA).

Muestreo	Código Muestra INTA	Relación Arena-Limo-Arcillas (%)	Textura	Símbolo	Tipo de Suelo
1	DA-01-17-07	38-40-22	Franco	(F)	Medio
2	DA-02-17-07	40-40-20	Franco	(F)	Medio
3	DA-03-31-07	48-34-28	Franco Arcilloso Arenoso	(FAa)	Medio
4	DA-04-31-07	50-20-30	Franco Arcilloso Arenoso	(FAa)	Medio
5	DA-05-15-08	30-36-34	Franco Arcilloso	(FA)	Pesado
6	DA-06-15-08	32-32-36	Franco Arcilloso	(FA)	Pesado
7	DA-07-23-08	28-26-46	Arcilloso	(A)	Pesado
8	DA-08-23-08	52-30-18	Franco / Franco Arenoso	(F/Fa)	Medio

Fuente: elaboración propia

La mayor parte del suelo del área de estudio presenta una textura Franco Arcillosa Arenosa (FAa) y principalmente se desarrollan en el sector norte e intermedio del distrito, mientras que al sector sur, los suelos presentan una textura Franco Arcillosa (FA) caracterizados por presentar un predominio de arcillas.

A partir de los resultados obtenidos se establece que los suelos del distrito son de tipo medio y pesado, caracterizados por el predominio de texturas medias y finas (limos y arcillas), tal situación no quiere decir que la textura gruesa (arenas) se encuentre ausente en el suelo, simplemente significa que los porcentajes de limo-arcilla tienden a ser superiores.

Ciancaglini, et al. (2015) indican que los suelos de textura fina (pesados) se caracterizan por presentar alta capacidad de retención de humedad y suelen presentar baja infiltración, por su parte, los suelos de textura media presentan una infiltración moderada con capacidades de retención de humedad media.

A partir del mapa de infiltración básica del suelo (figura 12) y el mapa de texturas de suelo (figura 14), es posible asociar que las mayores tasas de infiltración (10200 mm/día) registradas hacia el sector norte del distrito están ligadas a la existencia de suelos que presentan una mayor fracción arenosa, lo cual favorece una mayor infiltración. De la misma manera, es importante considerar que hacia este sector se ubica la Falla de Alajuela, por lo tanto cabe la posibilidad, que los materiales existentes en el subsuelo (materiales de la Formación Tiribí) presenten un grado de porosidad secundaria que contribuya, a una mayor tasa de infiltración.

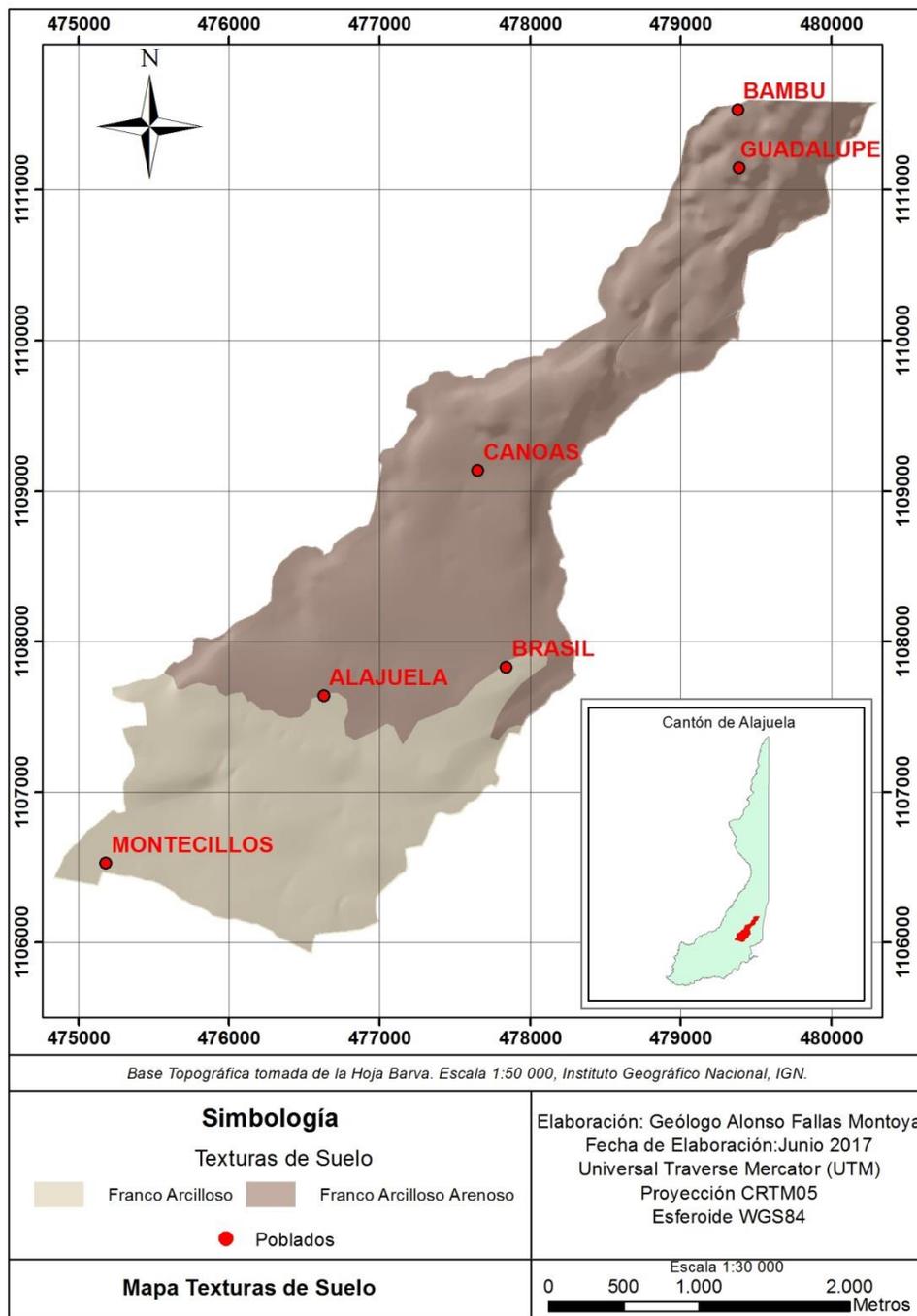


Figura 14: Texturas presentes en los suelos que conforman el área de estudio. Elaboración propia.

En la zona intermedia se registra una infiltración promedio de 8240 mm/día, asociado a que corresponde con una zona de transición entre suelos de textura arenosa y arcillosa, los suelos hacia este sector presentan un mayor porcentaje de limos, lo que genera una infiltración media, menor en comparación a los valores obtenidos hacia el sector norte del área de estudio.

En la parte baja localizada al sur del distrito, se presenta la menor tasa de infiltración con un valor de 3680 mm/día, tal condición está directamente relacionada a la presencia de un suelo con predominio de arcillas. Astorga & Arias (2003) mencionan que cuando el suelo contiene mucha arcilla o éste se encuentra compactado, la infiltración es poco eficiente, limitando la posibilidad de recarga al acuífero.

Es importante señalar que hacia el sector sur del distrito, predomina un amplio desarrollo urbano, situación que ha contribuido a una modificación y alteración del suelo, aumentando el grado de compactación; Peralta & Carrasco (1990) señalan los efectos de la compactación en las propiedades físicas de los suelos, indicando que el principal problema es la reducción de la conductividad hidráulica del suelo, de manera particular la reducción en la infiltración del agua de lluvia que precipita, debido a una reducción del espacio poroso total.

BGS & SENARA (1988) establecen que los sectores donde predominan importantes depósitos de tobas y secciones con espesores de suelo considerable, contribuyen a una menor infiltración en el Valle Central, por su parte en aquellos sectores donde las lavas brechosas se encuentran meteorizadas y localizadas a poca profundidad, se presentan capacidades de infiltración más altas.

A partir de lo anterior y considerando los perfiles hidrogeológicos elaborados para el área de estudio (figuras 27, 28, 29 y 30), es posible evidenciar que en el sector norte existe un menor espesor de materiales arcillosos por su parte hacia el sector sur los espesores de arcillas y tobas tienden a ser mayores, ante esto, es posible afirmar que en los sectores donde existe un mayor espesor de suelos, se genera una menor tasa de infiltración.

3.1.3.2 Fracción que infiltra por efecto de la pendiente (K_p)

La pendiente es calculada en unidades porcentuales según la clasificación presentada por Schosinsky & Losilla (2000); según el tipo de pendiente existente, se asigna un factor de pendiente, llamado K_p .

Cuadro 4. Clasificación del tipo de pendiente para la obtención del coeficiente K_p .

Tipo de Pendiente	Porcentaje de Pendiente	Valor K_p
Muy plana	0,02 - 0,06 %	0,3
Plana	0,3 - 0,4 %	0,2
Algo Plana	1 - 2 %	0,15
Promedio	2 - 7 %	0,1
Fuerte	Mayor de 7%	0,06

Fuente: elaboración propia

Para determinar el tipo de pendiente existente dentro del área de estudio, en primera instancia se construyó por medio del Programa ArcGIS un Modelo de Elevación Digital (DEM) utilizando las curvas de nivel establecidas para la hoja cartográfica Barva (ver figura 6); una vez generado el DEM, se utilizó la herramienta “raster surface” y su aplicación “slope”.

Visualizando la distribución de las pendientes dentro del área de estudio, se procede a delimitar mediante polígonos las zonas de pendiente fuerte y pendiente plana, posteriormente a cada polígono se le asignó un valor de K_p .

Dentro del área de estudio se presentan dos tipos de pendiente claramente definidos, en el sector norte se considera la presencia de pendientes de tipo fuertes con porcentaje mayor al 7%, mientras que hacia el sector sur predomina la categoría de pendiente de tipo plana con porcentajes entre los 0,3 a 0,4%.

A partir de los valores que establece el cuadro 4 los valores del coeficiente K_p obtenidos corresponden a 0,2 en el sector de pendiente plana y un valor de 0,06 en el sector de pendiente fuerte. En el mapa de la figura 15 se muestran los resultados obtenidos.

Las condiciones de pendiente están relacionadas directamente a las condiciones geomorfológicas y estructurales que imperan en la zona, hacia el sector norte la topografía del relieve se encuentra ligada al control estructural que genera la falla inversa de Alajuela, por su parte en el sector central y sur del distrito prevalece condiciones de pendiente suaves, asociado al modelado de los agentes externos sobre el relieve y a la depositación de materiales coluviales y aluvionales.

Según Breña & Jacobo (2006) en las zonas de pendiente fuerte, el escurrimiento superficial del agua de lluvia es rápido lo que genera una disminución en la capacidad de infiltración, por su parte en las zonas de pendiente plana el escurrimiento al ser lento favorece una mayor infiltración; dicha tesis es relaciona con la de Matus (2007) quien señala que en la zonas de alta pendiente, al aumentar la velocidad de escorrentía, se produce degradación en los suelos y esto altera las condiciones de recarga para estas zonas.

Analizando el mapa de infiltración básica de la figura 12 y el mapa de pendientes de la figura 15 es posible apreciar que el sector de pendiente plana presenta los menores valores de infiltración, situación contraria a lo que establece la teoría, a partir de ello, se deduce que el uso del suelo y las propiedades texturales de los mismos, tienen mayor influencia en los valores de infiltración obtenidos en el campo.

Las zonas de pendiente plana se caracterizan por favorecer el asentamiento poblacional, por ende el gran desarrollo urbano que se presenta en la parte intermedia y baja del distrito Central de Alajuela, el mapa de la figura 16 evidencia y corrobora el amplio desarrollo urbano que se presenta hacia el sector.

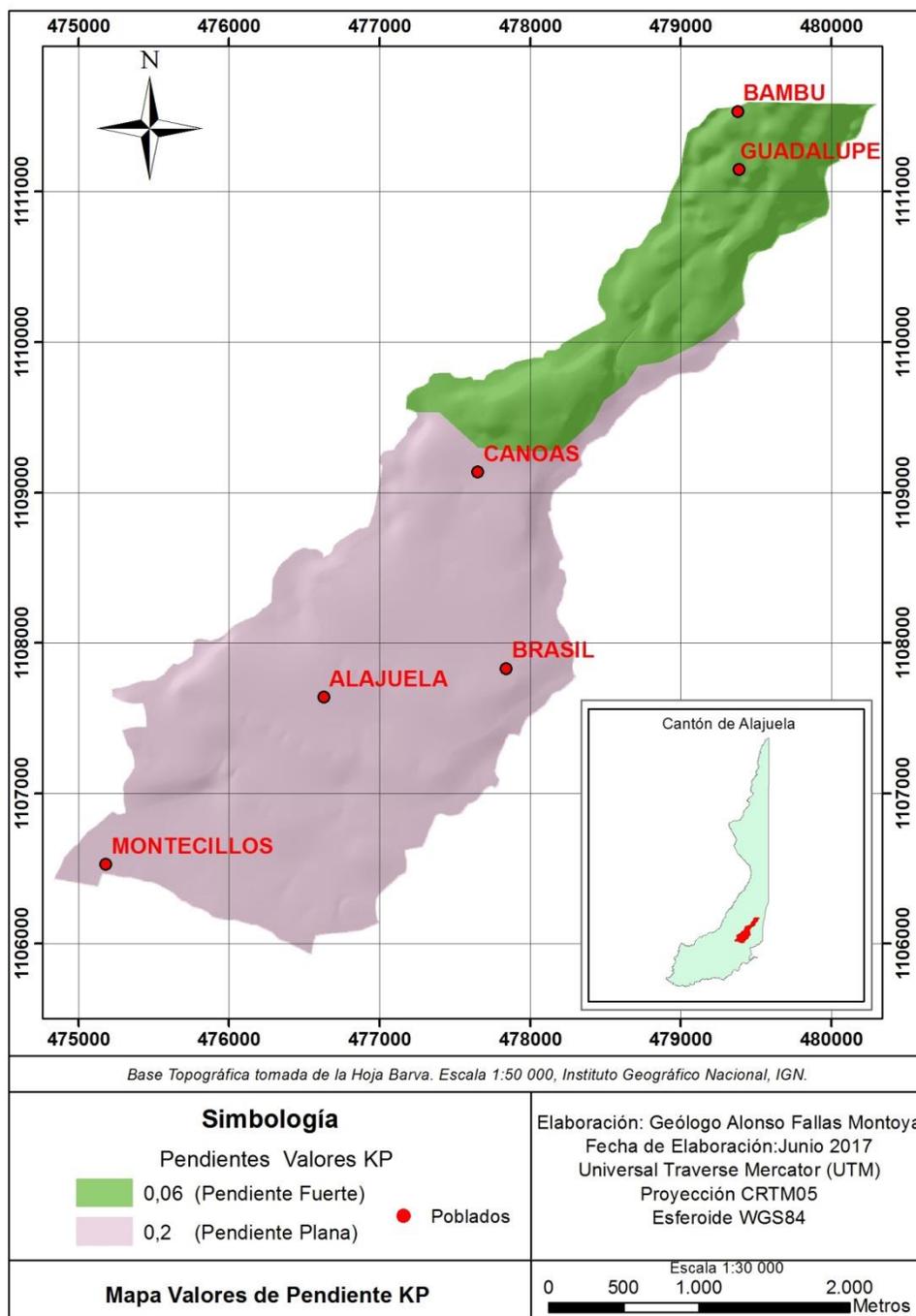


Figura 15: Mapa de pendientes existentes dentro del área de estudio. Elaboración propia.

3.1.3.3 Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal (K_v)

Para la obtención del factor de uso de suelo (K_v) se utiliza la clasificación propuesta por Schosinsky & Losilla (2000). En la presente investigación se asignó un valor de K_v de 0 (cero) a la categoría de uso urbano, misma que no es considerada por los autores en su clasificación, no obstante, es importante tomar en cuenta, debido a que el uso urbano cubre gran parte del área de estudio y afecta negativamente la infiltración producto de la impermeabilización que enfrentan los suelos

El mapa de uso del suelo fue elaborado a partir de la imagen satelital que permite visualizar el Programa Google Earth, imagen de alta resolución que contribuye a distinguir con facilidad los diferentes usos de suelo que se distribuyen por el distrito. Utilizando la imagen satelital como base, se construye mediante el programa ArcGIS una serie de polígonos asociados con los usos de suelo identificados, posteriormente a cada polígono se le asigna un valor para el coeficiente K_v según la clasificación utilizada.

Cabe indicar que los usos de suelo observados mediante la imagen satelital, son corroborados en el campo a partir de las visitas efectuadas.

Cuadro 5. Clasificación del tipo de uso de suelo para la obtención del coeficiente K_v .

Cobertura Vegetal	Valor K_v
Cobertura con zacate menos del 50%	0,09
Terrenos Cultivados	0,1
Cobertura con Pastizal	0,18
Bosques	0,2
Cobertura con zacate más del 75%	0,21
Urbano	0

Fuente: elaboración propia

Raynolds & Merino (2002) señalan que los usos de suelo en el Valle Central están relacionados directamente con la elevación, establecen que sobre la zona alta (1600 a 3000 m.s.n.m) predominan los pastos, la zona media (1000 a 1600 m.s.n.m) está cubierta en su mayor parte por cultivos de café, mientras que en la zona baja (800 a 1000 m.s.n.m) predomina la urbanización.

Vargas (1997) menciona que la infiltración, la escorrentía y la eventual recarga a los acuíferos están influenciados en gran medida por el uso del suelo, por ende la necesidad de realizar un análisis detallado y una delimitación adecuada para cada uso de suelo identificado dentro del área de estudio.

Efectuado el análisis, dentro del área de estudio se distinguen un total de cuatro categorías de uso de suelo: la categoría asociada a zonas de bosque, zonas dedicadas a cultivos permanentes, zonas con cobertura de zacate mayor al 75% y zonas de uso urbano.

Es importante señalar que a cada uso de suelo identificado en el área de estudio, se le asigna un valor de profundidad de raíces, para ello, se utilizan los valores sugeridos por Schosinsky (2006) y los valores obtenidos mediante las mediciones de campo; posteriormente los valores son promediados, con el fin de asignar un valor aproximado para cada cobertura vegetal. El valor de profundidad de raíces es de suma importancia al momento de elaborar los mapas de capacidad de campo y punto de marchitez, cabe destacar que en la zona urbana al no existir vegetación, la profundidad de raíces ostenta un valor 0 mm.

La zona de uso urbano predomina dentro del área de estudio y se concentra principalmente hacia el sector central y sur del distrito, comprende un área total de 6,14 Km², lo que representa un porcentaje cercano al 70% con respecto al área total del distrito. La categoría incluye viviendas, edificios, parqueos, aceras, urbanizaciones, centros comerciales y en su mayoría carreteras. Ferguson (2005) indica que el 70% de las zonas urbanizadas están constituidas por carreteras.

Fontaneda *et al.* (2012) mencionan que la impermeabilización de los suelos por el desarrollo urbano no solo repercute en el aumento de la escorrentía, sino que también empeora la calidad del agua y se generan cambios hidrológicos que afectan a los cauces y medios receptores.

La zona de bosque identificada, corresponde en su mayoría con una estrecha franja ubicada sobre la margen izquierda del río Alajuela y comprende un área total de 1,22 Km². El bosque de tipo secundario se encuentra conformado por árboles con alturas promedios entre los 8 a 12 m. Según la clasificación utilizada, la zona de bosque tiene asignado un coeficiente K_v de 0,2 y debido al follaje en la vegetación favorece una mayor retención de las precipitaciones. Cabe indicar que para efectos de la profundidad de raíces, se considera que los árboles que conforman el bosque tienen una longitud de raíces promedio de 2 m (2000 mm).

El uso de suelo destinado a cultivos predomina hacia el sector noreste del distrito, cubre un área total de 1,37 Km² y principalmente corresponde con plantaciones de café, las cuales no superan los dos metros de altura. Los cultivos tienen asignados un coeficiente K_v de 0,1 y debido a las características en cuanto al follaje permiten que un mayor porcentaje de lluvia alcance la superficie del terreno. Para el caso de las plantas de café, según las observaciones de campo, se considera una profundidad de raíces promedio de 1 m (1000 mm).

En el límite sur del distrito se divisan áreas ocupadas por cobertura de zacate en una proporción mayor al 75%, en total ésta categoría comprende un área de 0,27 Km² y según la clasificación utilizada presenta un coeficiente de Kv de 0,21. La vegetación tipo zacate ha sido considerada con una profundidad de raíces de 0,20 m (200 mm). Debido a la ubicación geográfica de estas zonas en el distrito, eventualmente podrían ser invadidas por la actividad urbana, expandiendo aún más el área que es ocupada por concreto y asfalto

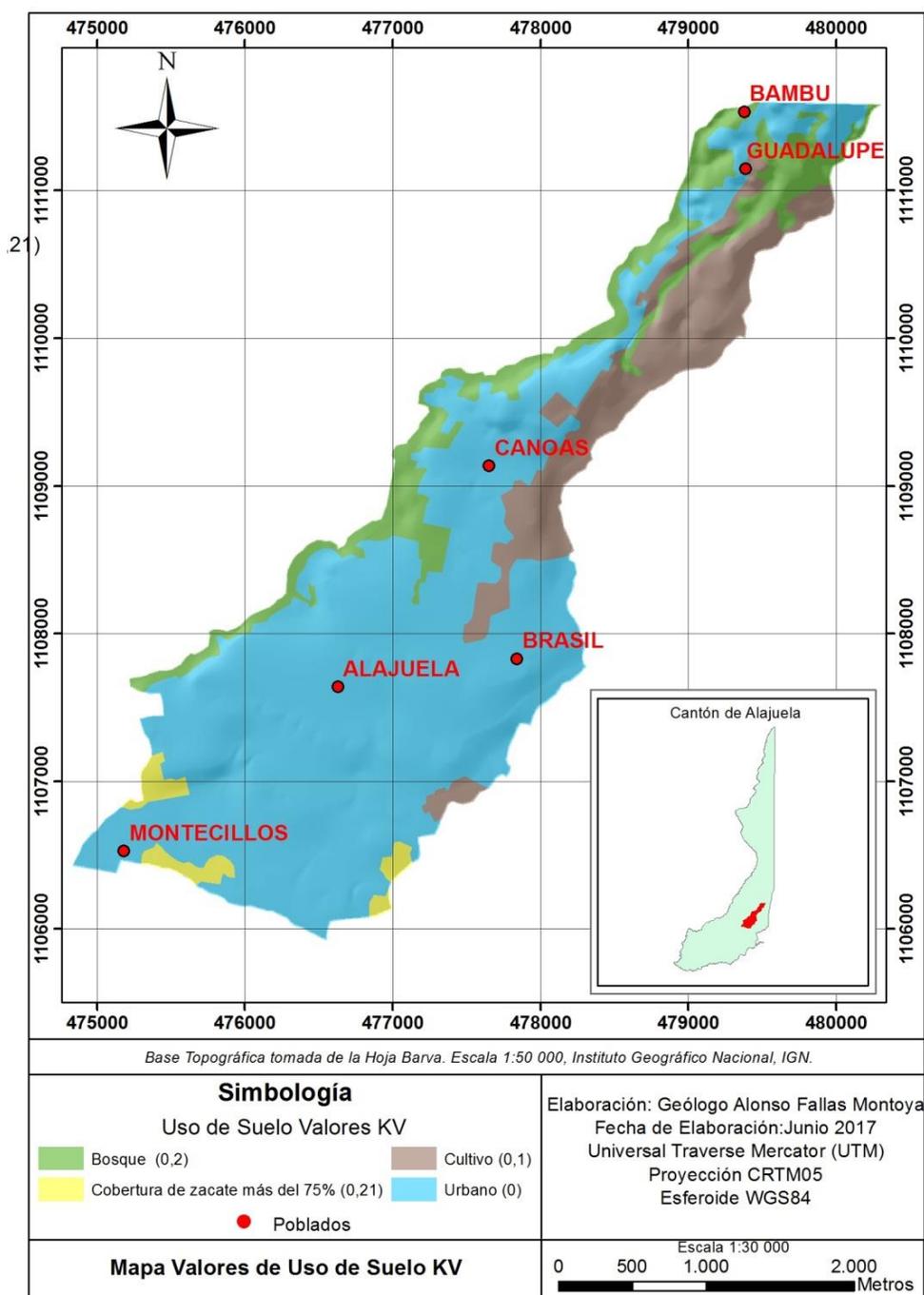


Figura 16: Mapa de uso de suelo, para el distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

En el mapa anterior, es posible evidenciar que existe una total desproporción en relación a las áreas que ocupa cada uno de los usos de suelo dentro del distrito Central de Alajuela.

3.1.4 Cálculo de la precipitación que infiltra (Pi)

Una de las principales limitantes para realizar un balance hídrico es la escasa información con que se dispone para el área objeto de estudio; es claro que la calidad de la información influye de manera directa en el cálculo de las variables de las ecuaciones del balance, por lo que el resultado final del balance será tan bueno, como tan buena sea la calidad de la información utilizada (UNESCO, 2006).

Con el objetivo de mejorar la calidad de la información, dentro del área de estudio se agrupan zonas que presentan comportamientos similares de acuerdo no solo con una variable, sino con un conjunto de variables ligadas entre sí, tal herramienta de estimación y representatividad de la información es conocida como regionalización (Gutiérrez y Ramírez, 2005).

Considerando lo señalado en los párrafos anteriores, una vez que se cuenta con el mapa de precipitaciones, el mapa de infiltración básica, el mapa de texturas de suelo, el mapa de pendientes y el mapa de uso de suelo, se procede mediante el uso del programa ArcGIS a realizar una sumatoria de mapas, mediante la herramienta “álgebra de mapas”, esto con el objetivo de generar un único mapa, el cual estará conformado por zonas con propiedades específicas en las cuales existe atributos característicos y únicos.

Al realizar la sumatoria de los mapas anteriormente mencionados, se pretende facilitar la aplicación del balance de suelos en zonas específicas localizadas dentro del área de estudio, el resultado de la sobreposición efectuada por medio del programa ArcGIS genera un total de ocho zonas, zonas que serán analizadas de manera individualizada presentando gran relevancia en los apartados siguientes.

La figura 17 muestra el mapa de zonas generado y utilizado para la aplicación del balance hídrico de suelos. Para calcular la precipitación que infiltra en cada una de las zonas previamente generadas, se procede a aplicar la ecuación número 1, las variables que conforman la ecuación son analizadas a continuación.

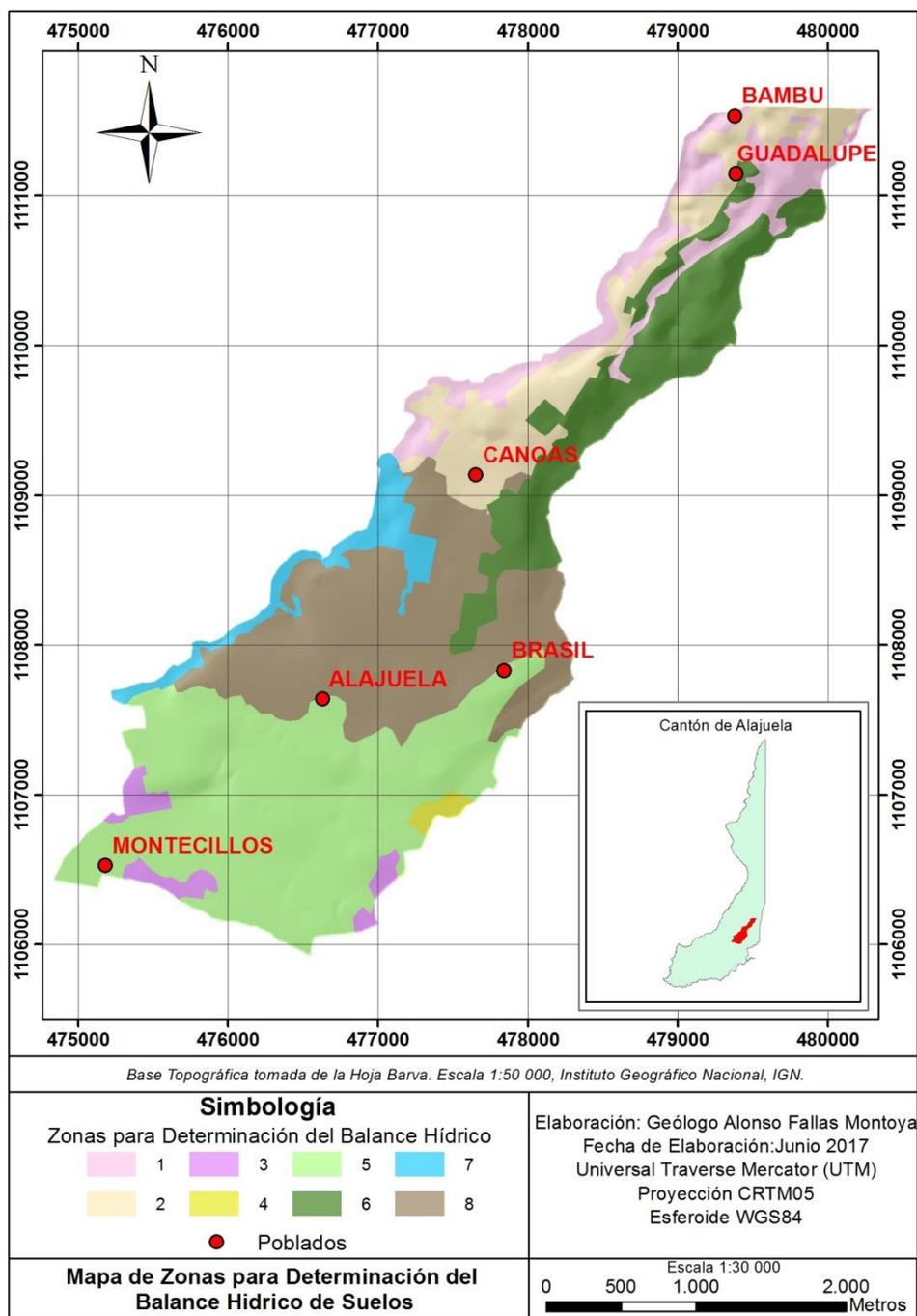


Figura 17: Mapa de zonas para determinación del balance de suelos. Elaboración propia.

Considerando el mapa de distribución de la precipitación (figura 10) y el mapa de zonas (figura 17), se establece que las zonas 1, 2 y 6 por su ubicación dentro del área de estudio están influenciadas por los datos de precipitación que registra la estación Tegucigalpa-Itiquís, por su parte, las zonas 3, 4, 5, 7 y 8 tienen asignado el valor de precipitación que registra la estación Alajuela Centro; el cuadro 6 muestra los valores de precipitación mensual (P) asignado para cada zona objeto de análisis.

Cuadro 6. Valores de precipitación mensual para cada una de las ocho zonas generadas.

Valores de Precipitación Mensual (mm/mes)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Zona 1	13,40	12,10	31,10	119,20	396,30	401,80	260,40	365,10	490,90	522,20	241,00	67,20
Zona 2	13,40	12,10	31,10	119,20	396,30	401,80	260,40	365,10	490,90	522,20	241,00	67,20
Zona 3	7,50	8,70	13,30	85,90	280,90	253,90	180,70	215,10	378,10	362,40	168,50	39,80
Zona 4	7,50	8,70	13,30	85,90	280,90	253,90	180,70	215,10	378,10	362,40	168,50	39,80
Zona 5	7,50	8,70	13,30	85,90	280,90	253,90	180,70	215,10	378,10	362,40	168,50	39,80
Zona 6	13,40	12,10	31,10	119,20	396,30	401,80	260,40	365,10	490,90	522,20	241,00	67,20
Zona 7	7,50	8,70	13,30	85,90	280,90	253,90	180,70	215,10	378,10	362,40	168,50	39,80
Zona 8	13,40	12,10	31,10	119,20	396,30	401,80	260,40	365,10	490,90	522,20	241,00	67,20

Fuente: elaboración propia

Una vez determinado el valor de precipitación para cada zona, es necesario conocer los valores de coeficiente de infiltración para las ocho zonas a analizar; es importante considerar que al presentarse un valor de infiltración básico del suelo (f_c) mayor a los 1568 mm/día, la metodología establece que el valor de k_{fc} (la fracción que infiltra por la textura de suelo) tiene un valor automático de 1.

El cuadro 7 muestra los valores obtenidos para la determinación de los coeficientes de infiltración para cada zona generada, cabe indicar que la suma de las variables k_p , k_v y k_{fc} para cada una de las zonas registra valores mayores a 1, por lo tanto y siguiendo la metodología, el coeficiente de infiltración (C_i) registra para todas las zonas un valor de 1.

Cuadro 7. Valores de K_p , K_v y K_{fc} para cada una de las ocho zonas generadas.

Zona	K_p	K_v	K_{fc}	$K_p+K_v+K_{fc}$	C_i
1	0,06	0,2	1	1,26	1
2	0,06	0	1	1,06	1
3	0,2	0,21	1	1,41	1
4	0,2	0,1	1	1,3	1
5	0,2	0	1	1,2	1
6	0,2	0,1	1	1,3	1
7	0,2	0,2	1	1,4	1
8	0,2	0	1	1,2	1

Fuente: elaboración propia

Determinados los valores de precipitación y coeficiente de infiltración para las ocho zonas generadas, únicamente queda por calcular la variable asociada a la retención de lluvia. Considerando que las zonas 2, 5 y

8 presentan sus suelos impermeabilizados debido a la actividad urbana que se desarrolla, en la presente investigación se introduce un coeficiente de retención (Cfo) con un valor de 0,85 para las zonas donde se presenta un uso de suelo de tipo urbano, el valor de 0,85 representa el porcentaje de lluvia que es retenida y no infiltra producto de la presencia de suelos cubiertos por concreto y asfalto.

Una vez multiplicado el valor de precipitación mensual por el coeficiente de retención establecido según el tipo de uso de suelo, es posible obtener el valor de la retención mensual para cada una de las zonas.

Es importante señalar que para las zonas que no presentan uso de suelo de tipo urbano (zonas 1, 3, 4, 6 y 7) se emplea los coeficientes de retención que establece la metodología propuesta por Schosinsky según el tipo de follaje que presenta la vegetación, ya sea un coeficiente con valor de 0,12 en vegetación poco desarrollada o en su defecto, un valor de 0,20 en zonas de bosque caracterizadas por un follaje denso.

El cuadro 8 muestra los valores de retención mensual obtenidos para cada zona, una vez que se procede a multiplicar el coeficiente de retención por el valor de precipitación.

Cuadro 8. Valores de retención de lluvia mensual para cada una de las ocho zonas generadas.

Mes	Valores de retención de lluvia mensual (mm/mes)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Zona 1	5,00	5,00	6,22	23,84	79,26	80,36	52,08	73,02	98,18	104,44	48,20	13,44
Zona 2	11,39	10,29	26,44	101,32	336,86	341,53	221,34	310,34	417,27	443,87	204,85	57,12
Zona 3	5,00	5,00	5,00	10,31	33,71	30,47	21,68	25,81	45,37	43,49	20,22	5,00
Zona 4	5,00	5,00	5,00	10,31	33,71	30,47	21,68	25,81	45,37	43,49	20,22	5,00
Zona 5	6,38	7,40	11,31	73,02	238,77	215,82	153,60	182,84	321,39	308,04	143,23	33,83
Zona 6	5,00	5,00	5,00	14,30	47,56	48,22	31,25	43,81	58,91	62,66	28,92	8,06
Zona 7	5,00	5,00	5,00	17,18	56,18	50,78	36,14	43,02	75,62	72,48	33,70	7,96
Zona 8	6,38	7,40	11,31	73,02	238,77	215,82	153,60	182,84	321,39	308,04	143,23	33,83

Fuente: elaboración propia

Determinado el valor de la retención para cada una de las ocho zonas, se cuenta con todas las variables de la ecuación general para calcular la precipitación que infiltra (Pi); la diferencia entre la precipitación y la retención es multiplicada por el coeficiente de infiltración previamente calculado y el resultado obtenido representa la precipitación que logra infiltrar en el suelo por mes.

El cuadro 9 muestra el valor de precipitación que infiltra (Pi) mensualmente para cada una de las ocho zonas del balance de suelos.

Cuadro 9. Valores de precipitación mensual que infiltra para cada una de las ocho zonas generadas.

Mes	Valores de precipitación mensual que infiltra (mm/mes)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Zona 1	8,40	7,10	24,88	95,36	317,04	321,44	208,32	292,08	392,72	417,76	192,80	53,76
Zona 2	2,01	1,82	4,67	17,88	59,45	60,27	39,06	54,77	73,64	78,33	36,15	10,08
Zona 3	2,50	3,70	8,30	75,59	247,19	223,43	159,02	189,29	332,73	318,91	148,28	34,80
Zona 4	2,50	3,70	8,30	75,59	247,19	223,43	159,02	189,29	332,73	318,91	148,28	34,80
Zona 5	1,13	1,31	2,00	12,89	42,14	38,09	27,11	32,27	56,72	54,36	25,28	5,97
Zona 6	8,40	7,10	26,10	104,90	348,74	353,58	229,15	321,29	431,99	459,54	212,08	59,14
Zona 7	2,50	3,70	8,30	68,72	224,72	203,12	144,56	172,08	302,48	289,92	134,80	31,84
Zona 8	1,13	1,31	2,00	12,89	42,14	38,09	27,11	32,27	56,72	54,36	25,28	5,97

Fuente: elaboración propia

Obtenidos los valores de precipitación que infiltran mensualmente para cada una de las zonas generadas, se procede a calcular los valores de infiltración anuales para cada una de las zonas, esto con el objetivo de poder construir un mapa que permita mostrar con facilidad, la distribución de la precipitación que infiltra dentro del área de estudio (ver cuadro 10).

Cuadro 10. Valores de precipitación anual que infiltra para cada una de las ocho zonas generadas.

Zona	Precipitación Anual (P)(mm/año)	Coefficiente de Retención (Cfo)	Retención del Follaje (mm/año) (P x Cfo)	Coefficiente de Infiltración (Ci) (Kp + Kv + Kfc)	Precipitación Anual que Infiltra (Pi) (P-Ret) x Ci
1	2920,7	0,2	589,04	1	2331,66
2	2920,7	0,85	2482,6	1	438,1
3	1994,8	0,12	251,06	1	1743,74
4	1994,8	0,12	251,06	1	1743,74
5	1994,8	0,85	1695,58	1	299,22
6	2920,7	0,12	358,69	1	2562,01
7	1994,8	0,2	408,06	1	1586,74
8	1994,8	0,85	1695,58	1	299,22

Fuente: elaboración propia

El mapa de la figura 18 muestra la distribución y los valores de precipitación que infiltra dentro del área de estudio, según las ocho zonas previamente analizadas.

Relacionando el mapa de precipitación que infiltra (figura 18) con el mapa de zonas (figura 17), es posible analizar la incidencia que tienen las características particulares de cada zona generada con respecto a la precipitación que logra infiltrar.

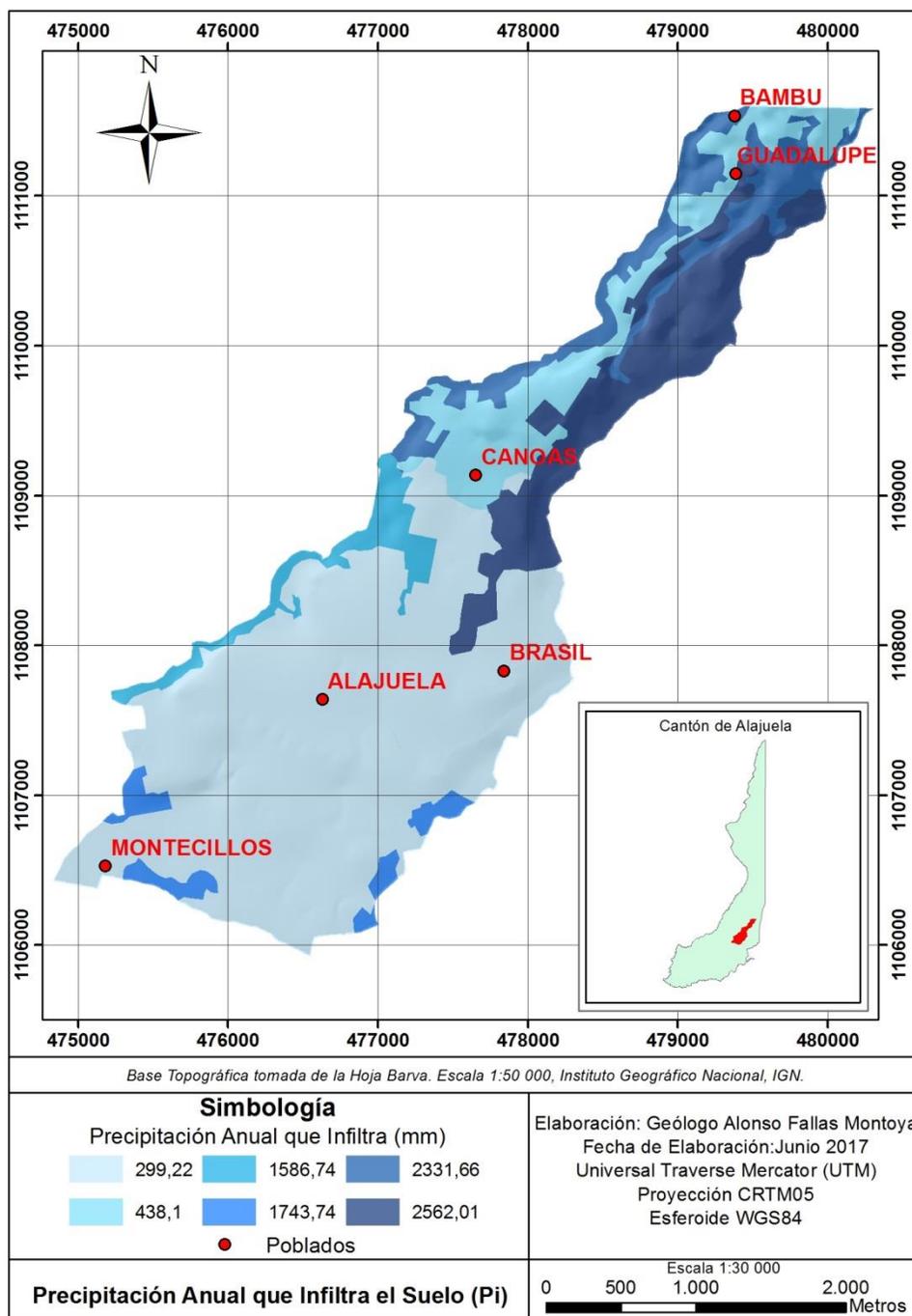


Figura 18: Mapa de distribución de la precipitación anual que infiltra. Elaboración propia.

Los menores valores de precipitación que infiltran están asociados a zonas donde los suelos se encuentran impermeabilizados debido a la actividad urbana, por tal razón para las zonas 2, 5 y 8 la mayor parte de la precipitación escurre superficialmente y un porcentaje escaso es el que logra infiltrar. Para la zona número 2 se registra un valor de 438,1 mm, mientras que para las zonas 5 y 8, el valor de precipitación que infiltra, alcanza los 299,22 mm.

Espinoza (2011) menciona que el mayor impacto que presenta el desarrollo urbanístico es el aumento de las zonas impermeables y la deforestación, generando una disminución en la infiltración, la evaporación y transpiración del agua de lluvia, aspectos que afectan directamente el ciclo hidrológico.

En el vigésimo informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible (2013) se señala que en el distrito Central de Alajuela ocurre la mayor cantidad de eventos asociados a inundaciones dentro del cantón de Alajuela, la impermeabilización de los suelos a partir del amplio desarrollo urbano ha contribuido al aumento del número de inundaciones en el distrito.

En las zonas de bosque (zonas 1 y 7) la lluvia que infiltra alcanza porcentajes del 79,83% y 79,54% respectivamente con respecto a los valores de precipitación registrados. El follaje denso genera que una fracción de lluvia sea retenida y al no entrar en contacto con la superficie del suelo, ésta no tenga la posibilidad de infiltrar. En la zona boscosa ubicada al sector norte se registra una infiltración de 2331,66 mm de lluvia, por su parte, la estrecha franja de bosque ubicada en el sector sur presenta un valor de infiltración de 1586,74 mm.

La zona 6 muestra el mayor valor de infiltración de lluvia y corresponde a suelos ocupados por la presencia de cultivos, esto obedece a que no existe una cobertura densa en el follaje que genere una retención de lluvia importante, cerca del 87,72% de la lluvia que precipita logra infiltrar, lo que equivale a 2562,01 mm de lluvia.

Al igual que la zona 6, las zonas 3 y 4 (cubiertas por zacate y cultivos) presentan valores de infiltración elevados asociados a que el follaje no tiene gran capacidad de retención, para éstas zonas el porcentaje de lluvia que infiltra es del 87,41% (1743,74 mm).

A partir de los resultados obtenidos es evidente que el follaje por el tipo de vegetación y la retención producto de la impermeabilización de suelos por la actividad urbana, influyen de manera directa en la infiltración por lluvia en el suelo.

Considerando que aproximadamente el 70% del área de estudio se encuentra ocupada por uso de suelo de tipo urbano, la infiltración de lluvia para el distrito Central de Alajuela es reducida, por lo tanto una infiltración reducida evidentemente afecta el porcentaje de recarga potencial a los acuíferos.

3.2 Aplicación del balance de suelos

Una vez determinada la lluvia que lograr infiltrar en el suelo, se procede a aplicar el balance de suelos de manera individualizada en cada una de las zonas previamente generadas. Es importante mencionar que para el caso de las zonas 2, 5 y 8 no se aplica el balance de suelos, ya que la metodología entre sus limitantes no contempla zonas ocupados por usos de suelo de tipo urbano. El balance de suelos es aplicado únicamente a las restantes cinco zonas, conformadas por los números 1, 3, 4, 6 y 7.

Para aplicar la metodología del balance de suelos, se introduce una serie de nuevas variables, entre ellas: la capacidad de campo, el punto de marchitez, la densidad aparente, profundidad de raíces extractoras, la evapotranspiración real y la humedad del suelo al inicio del análisis.

Una vez que se cuenta con los valores para cada una de las variables, los datos para cada zona se introducen en la hoja de Excel establecida por Schosinsky (2006), la cual calcula la recarga potencial al acuífero (Rp).

A continuación se describe cada una de las variables que contemplan el balance de suelos, de manera particular el procedimiento realizado para la determinación de los valores correspondientes.

3.2.1 Parámetros de suelos

En general los suelos existentes en el Valle Central presentan rangos amplios de variación en todas sus propiedades físicas, por causa de los diversos estados de meteorización en que se encuentran, por lo tanto, para proyectos específicos se hace necesaria la ejecución de ensayos de campo y laboratorio para su determinación (Mora, 1998).

Con el fin de determinar las características físicas de los suelos y establecer los parámetros necesarios para elaborar el balance de suelos, durante las visitas de campo se recolectaron muestras de suelo, las cuales posteriormente son remitidas al Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agraria (INTA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), esto con el fin de realizar los ensayos de laboratorio pertinentes.

En total se recolectaron ocho muestras de suelo procedentes de las inmediaciones de los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración descritas anteriormente. Las muestras de suelo tanto intactas como alteradas fueron recolectadas y debidamente rotuladas siguiendo los procedimientos previamente establecidos para la toma de muestras. En el anexo 2 se observa la forma en que las muestras de suelo son recolectadas y debidamente rotuladas.

El mapa de la figura 19 muestra la ubicación de los ocho sitios de muestreo de suelo con su respectivo código de ingreso al Laboratorio; el código asignado a cada una de las muestras hace referencia al distrito Central de Alajuela (DA), un consecutivo y seguidamente al día y mes en que fueron recolectadas.

Cabe indicar que una vez obtenidos los resultados de los ensayos de laboratorio, se procede a realizar los mapas de textura de suelo, capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente; los mapas fueron elaborados considerando los criterios geopedológicos anteriormente descritos en el apartado 3.1.3.1.

El cuadro 11 resume la información con respecto a la ubicación de los sitios donde se realizaron los muestreos de suelo, además se incluye los códigos asignados previo al ingreso de las muestras al INTA.

Cuadro 11. Datos de la ubicación de los sitios de muestreo de suelos y códigos asignados a las muestras remitidas al INTA.

Prueba	Fecha	Elevación (m.s.n.m)	Localidad	Coordenadas	
				CRTM05 (X)	CRTM05 (Y)
1	17/07/2015	953	San Martin	476473	1108470
2	17/07/2015	1095	Guadalupe	479363	1110895
3	31/07/2015	1047	Canoas	478365	1109656
4	31/07/2015	1015	Canoas -Ceiba	477510	1109688
5	15/08/2015	974	Brasil	478070	1108118
6	15/08/2015	911	Montecillos	475369	1106937
7	23/08/2015	903	Frente Hospital	476959	1106169
8	23/08/2015	935	Tomas Guardia	476867	1107013

Fuente: elaboración propia

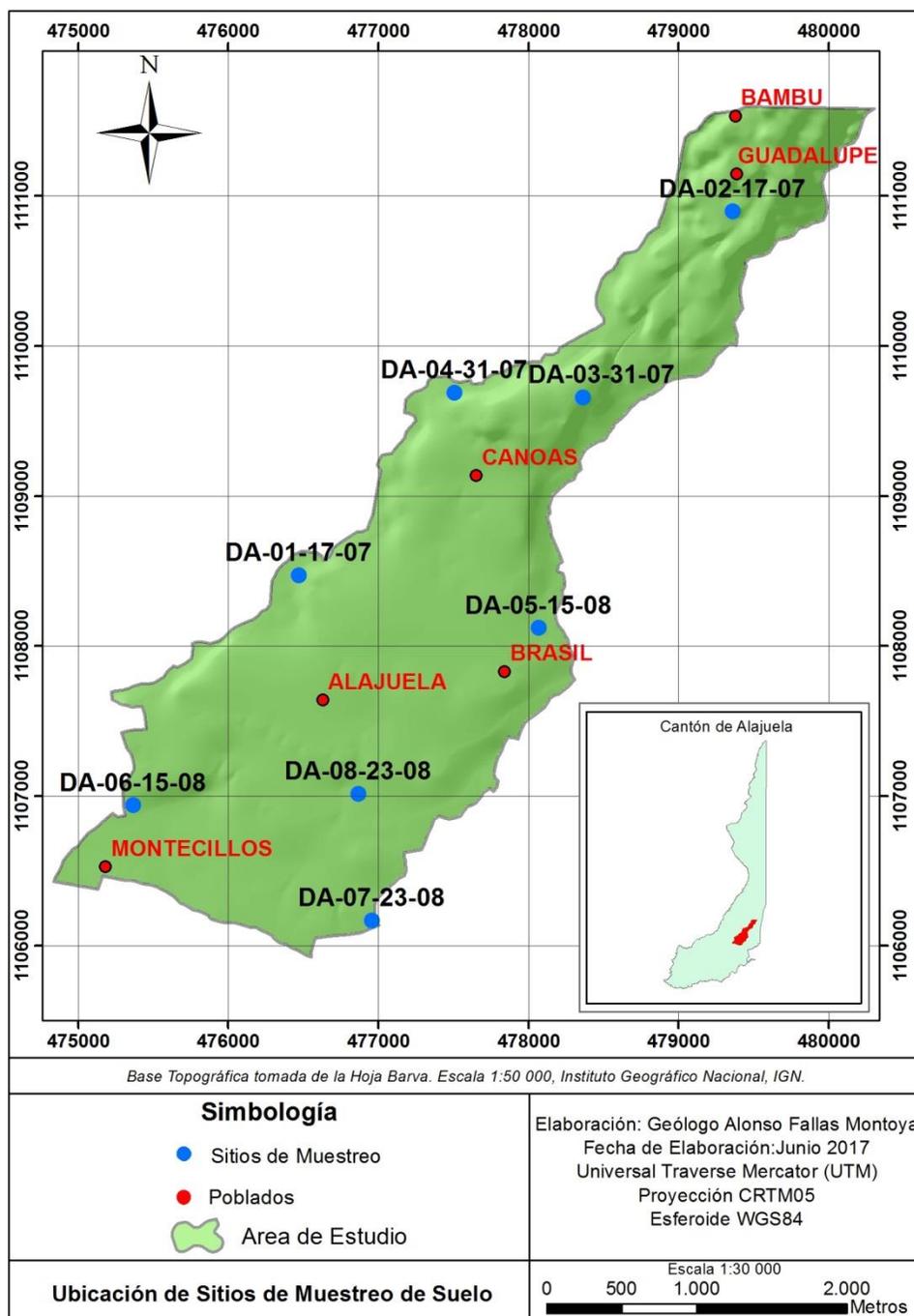


Figura 19: Mapa de ubicación referente a los sitios de muestreo de suelos. Elaboración propia.

A partir del contexto geológico en el que se ubica el área de estudio y de las visitas de campo efectuadas, se establece que la génesis de los suelos es producto de la meteorización de los materiales volcánicos, principalmente tobas y cenizas. Los espesores de suelo observados en campo son variables, algunos de ellos presentan espesores de orden métrico, por su parte otros suelos poco desarrollados presentan un espesor centimétrico.

Los ensayos de laboratorio se realizaron con el fin de determinar los cuatro parámetros que requiere la metodología de Schosinsky (2006): la capacidad de campo, el punto de marchitez, la densidad aparente y la textura de suelo (este último parámetro utilizado para la determinación del Coeficiente de infiltración). Una vez que se cuenta con los resultados del laboratorio, los datos son procesados e incorporados en las respectivas ecuaciones; el cuadro 12 resume los valores obtenidos para cada una de las muestras de suelo analizadas.

Cuadro 12. Valores de los parámetros de suelo, obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio efectuados por el INTA.

Muestreo	Código Muestra INTA	Punto de Marchitez (%)	Capacidad de Campo (%)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Textura
1	DA-01-17-07	20,18	31,73	1,09	(F) Franco
2	DA-02-17-07	21,64	33,28	1,12	(F) Franco
3	DA-03-31-07	21,39	37,91	1,15	(FAa)Franco Arcilloso Arenoso
4	DA-04-31-07	20,08	36,97	1,14	(FAa)Franco Arcilloso Arenoso
5	DA-05-15-08	20,43	38,77	1,09	(FA)Franco Arcilloso
6	DA-06-15-08	21,04	39,01	1,11	(FA)Franco Arcilloso
7	DA-07-23-08	22,87	42,74	1,14	(A)Arcilloso
8	DA-08-23-08	16,39	23,61	1,19	(F/Fa)Franco / Franco Arenoso

Fuente: elaboración propia

Los datos obtenidos son agrupados manteniendo las tres zonas definidas previamente a partir del criterio profesional, considerando la influencia de la geomorfología en la pedología es de esperar que las muestras de suelo presenten similitudes y homogeneidad en sus parámetros.

Para las zonas establecidas en el sector de pendiente baja se utilizan los valores de los muestreos en los sitios 6, 7 y 8, en la zona intermedia se emplean los valores obtenidos en los muestreos 1, 3 y 5 y en la zona establecida de pendiente alta se emplean los valores de los muestreos 2 y 4.

3.2.1.1 Capacidad de campo del suelo (CC)

Al estar un suelo saturado el agua tiende a moverse por gravedad hacia el subsuelo, hasta llegar a un punto en que el drenaje es tan pequeño que el contenido de agua del suelo se estabiliza; cuando se alcanza este punto se dice que el suelo está a la capacidad de campo (Breña & Jacobo, 2006).

Los resultados del ensayo de laboratorio brindan los valores de capacidad de campo en unidades porcentuales por peso de suelo seco, el cuadro 13 muestra los valores de capacidad de campo para cada una de las muestras de suelo remitidas al laboratorio.

Cuadro 13. Valores de Capacidad de Campo obtenidos mediante el ensayo de laboratorio efectuado por el INTA.

Muestreo	Código Muestra INTA	Capacidad de Campo (%)
1	DA-01-17-07	31,73
2	DA-02-17-07	33,28
3	DA-03-31-07	37,91
4	DA-04-31-07	36,97
5	DA-05-15-08	38,77
6	DA-06-15-08	39,01
7	DA-07-23-08	42,74
8	DA-08-23-08	23,61

Fuente: elaboración propia

El mapa de la figura 20 muestra la distribución de la capacidad de campo dentro de los suelos que conforman el área de estudio, el mayor valor de capacidad de campo se localiza en la zona central mostrando un valor de 36,14%.

Según Cisneros (2003) la capacidad de campo es mayor en suelos donde predominan texturas finas, mientras que en suelos de textura gruesa la retención de agua en el suelo disminuye; pese a que se esperaría que el sector sur del área de estudio se presente el mayor valor de capacidad de campo, debido a que en este sector predominan suelos de textura Franco Arcillosa, esto no ocurre, situación que es asociada a la influencia que pueda tener la estructura del suelo y la compactación a causa de la actividad humana.

Cisneros (2003) menciona que la estructura del suelo influye de manera directa en la infiltración que experimenta el agua de lluvia en los suelos, cabe indicar que la estructura no es contemplada en la metodología del balance hídrico de suelos.

Por su parte Salamanca & Sadeghian (2005), indican que al aumentar la compactación del suelo, la densidad aparente incrementa lo que genera una afectación en cuanto las condiciones de humedad disponible en el suelo.

En el sector norte y sur del distrito la capacidad de campo tiende a ser similar, el valor obtenido mediante los ensayos de laboratorio muestra una leve diferencia del 35,12% en el sector sur y un 35,13% en el sector norte.

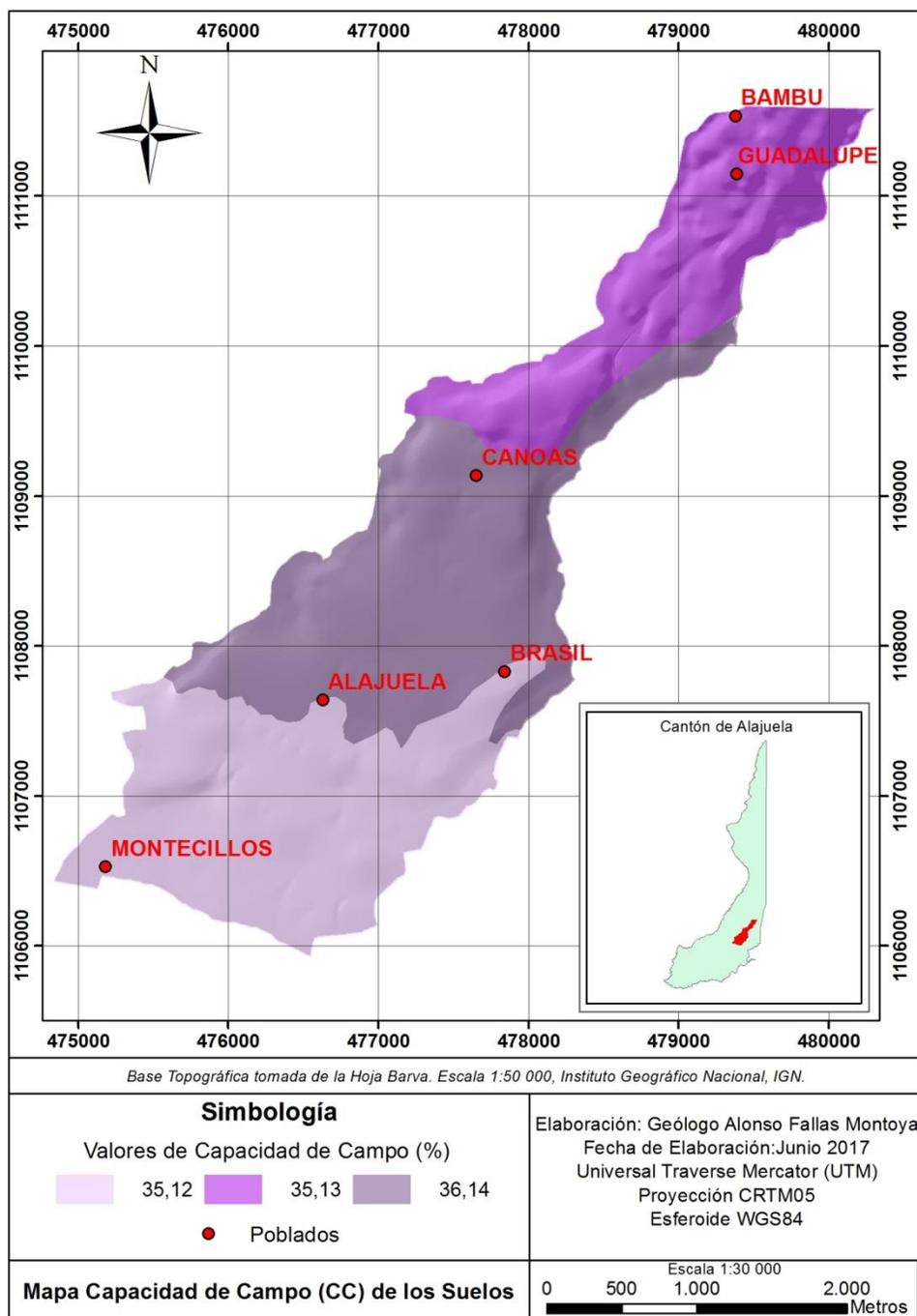


Figura 20: Mapa de capacidad de campo del suelo, según los resultados de laboratorio. Elaboración propia.

A partir del mapa anterior y el mapa de zonas de la figura 17, se desprende que las zonas 1 y 2 presentan un valor de capacidad de campo del 35,13%, las zonas 3, 4 y 5 presentan un valor de 35,12% y por su parte las zonas 6, 7 y 8 presentan un valor de capacidad de campo del 36,14%.

3.2.1.2 Punto de marchitez del suelo (PM)

Según Breña & Jacobo (2006) el punto de marchitez es el extremo opuesto a la capacidad de campo, una vez que el agua retenida en el suelo disminuye, se llega a un punto en que la planta es incapaz de extraer el agua de la zona radicular. El cuadro 14 muestra los valores de punto de marchitez para cada una de las muestras de suelo recolectadas y remitidas al laboratorio.

Cuadro 14. Valores de punto de marchitez obtenidos mediante el ensayo de laboratorio efectuado por el INTA.

Muestreo	Código Muestra INTA	Punto de Marchitez (%)
1	DA-01-17-07	20,18
2	DA-02-17-07	21,64
3	DA-03-31-07	21,39
4	DA-04-31-07	20,08
5	DA-05-15-08	20,43
6	DA-06-15-08	21,04
7	DA-07-23-08	22,87
8	DA-08-23-08	16,39

Fuente: elaboración propia

Cisneros (2003) señala que el punto de marchitez está relacionado directamente con la textura del suelo, de este modo, suelos con textura gruesa (arenas) presentan puntos de marchitez con menor valor, por su parte en suelos con predominio de texturas finas (arcillas) el punto de marchitez muestra valores mayores.

El mapa de la figura 21 muestra la distribución del punto de marchitez dentro de los suelos que conforman el área de estudio.

Pese a que en la teoría los suelos Franco Arcillosos presentan valores altos en relación al punto de marchitez, en el caso particular del distrito Central de Alajuela, no se cumple a cabalidad, debido a la compactación que experimenta el suelo, lo que genera variaciones en las condiciones de humedad disponible.

A partir del mapa de la figura 21 y el mapa de zonas de la figura 17, se desprende que las zonas 1 y 2 presentan un valor de punto de marchitez del 20,8%, las zonas 3, 4 y 5 presentan un valor de 20,1% y por su parte las zonas 6, 7 y 8 presentan un valor de punto de marchitez del 20,6%.

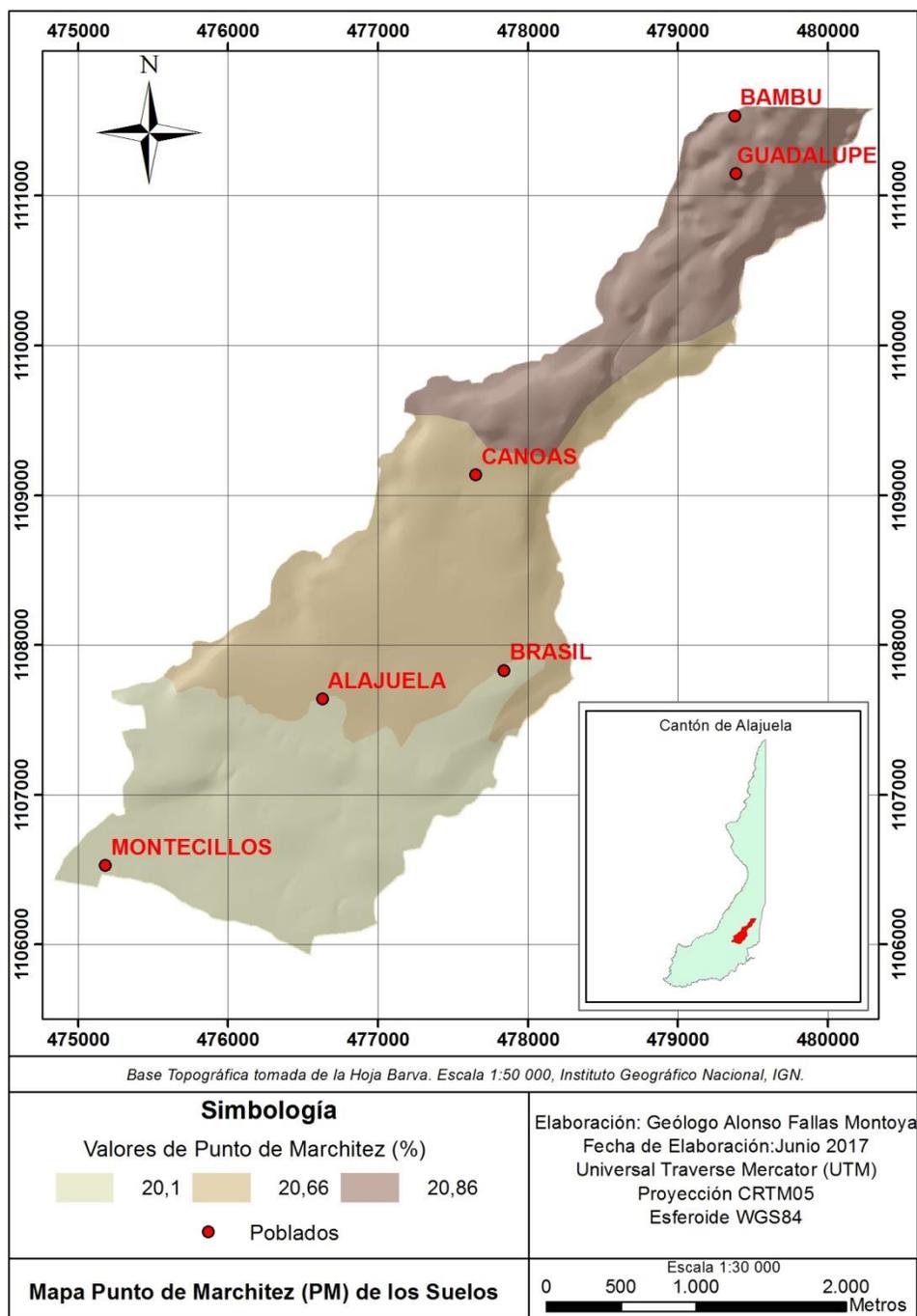


Figura 21: Mapa de punto de marchitez del suelo, según los resultados de laboratorio. Elaboración propia.

3.2.1.3 Densidad aparente del suelo (DA)

Según Cisneros (2003), la densidad aparente se define como el cociente que resulta de dividir el peso de suelo seco entre el volumen total, incluyendo los poros, propiedad que varía principalmente en función de la textura y el contenido de materia orgánica que se presenta en el suelo.

El cuadro 15 muestra los valores de densidad de aparente obtenidos. Los valores se presentan en unidades de gramos por centímetro cúbico (g/cm^3).

Cuadro 15. Valores de Densidad Aparente obtenidos mediante el ensayo de laboratorio efectuado por el INTA.

Muestreo	Código Muestra INTA	Densidad Aparente (g/cm^3)
1	DA-01-17-07	1,09
2	DA-02-17-07	1,12
3	DA-03-31-07	1,15
4	DA-04-31-07	1,14
5	DA-05-15-08	1,09
6	DA-06-15-08	1,11
7	DA-07-23-08	1,14
8	DA-08-23-08	1,19

Fuente: elaboración propia

Cisneros (2003) menciona que la densidad aparente incrementa en suelos donde predomina una textura gruesa, por su parte en los suelos de textura fina (arcillas), los valores de densidad aparente son menores, mostrando rangos de entre 1,1 a $1,3 \text{ g/cm}^3$.

A través de la visualización del mapa de la figura 22, se desprende que en el sector sur donde prevalecen suelos con textura Franco Arcillosa se presenta el mayor valor de densidad aparente, tal situación posiblemente asociado al efecto de compactación que experimentan los suelos producto de la actividad humana.

Wolf & Snyder (2005), señalan que además del contenido de materia orgánica y la textura del suelo, la densidad aparente varía según el grado de compactación, ya que cuando un suelo se compacta las partículas se unen a tal magnitud que la ruta de difusión se torna dificultosa, provocando que la solución del suelo se mueva alrededor de las partículas, reduciendo su tasa de absorción y difusión.

En general los valores de densidad aparente obtenidos para las muestras de suelo, muestran leves variaciones entre sí, el contenido de fracciones finas existentes en los suelos contribuye para que obtengan tales resultados.

Considerando el mapa de la figura 22 y el mapa de zonas de la figura 17, se afirma que las zonas 1 y 2 presentan un valor de densidad aparente de $1,13 \text{ g/cm}^3$, las zonas 3, 4 y 5 presentan un valor de $1,15 \text{ g/cm}^3$ y por su parte las zonas 6, 7 y 8 presentan un valor de densidad aparente de $1,11 \text{ g/cm}^3$.

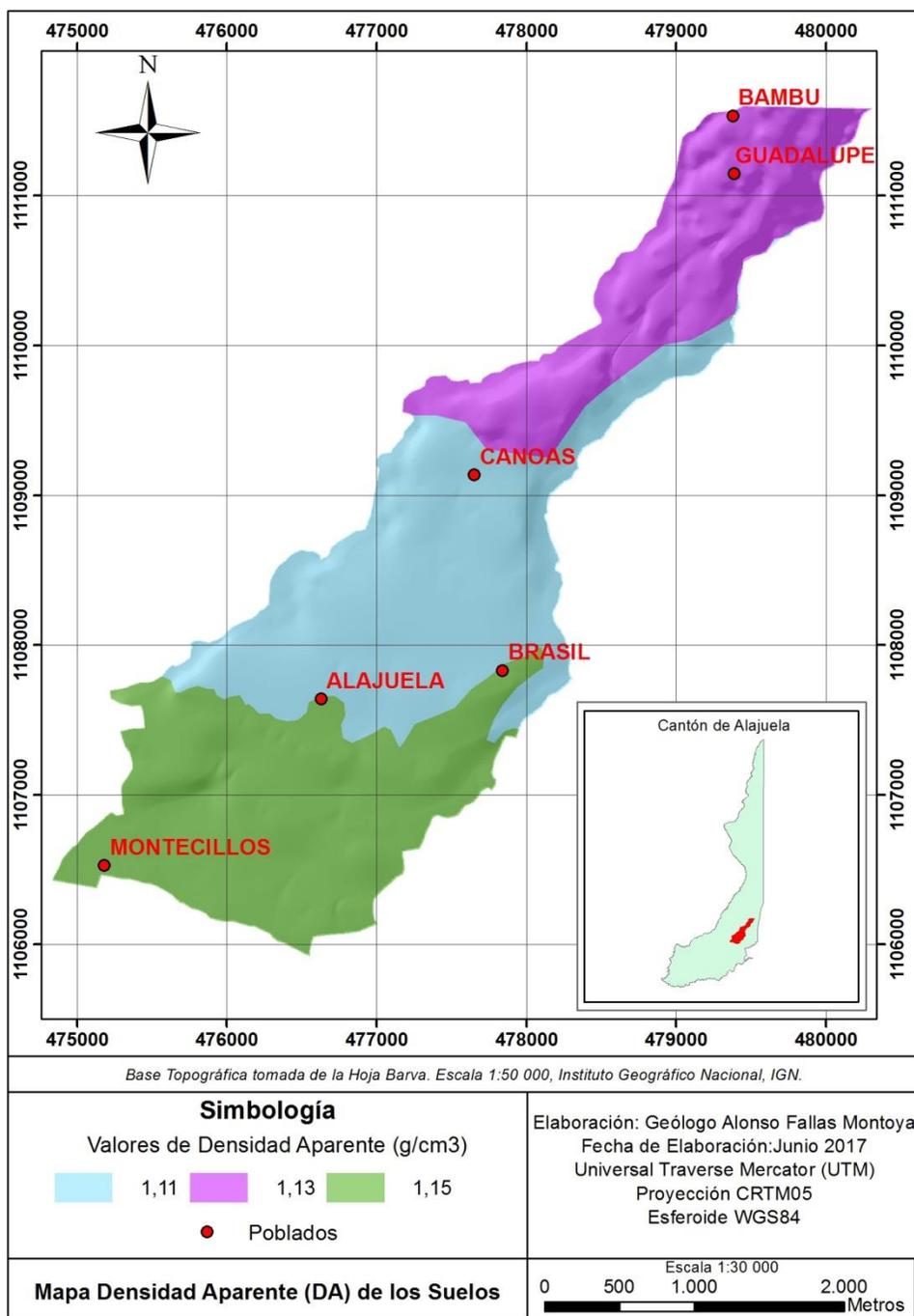


Figura 22: Mapa de densidad aparente del suelo, según los resultados de laboratorio. Elaboración propia.

3.2.2 Evapotranspiración

La FAO (2013) define a la evapotranspiración como el volumen total de agua en estado líquido que pasa del suelo a la atmosfera, en una superficie cubierta por cultivos su valor está representado por la suma de dos componentes: el agua que evapora directamente del suelo y el agua absorbida y transpirada por las plantas.

Según Heras (1972), la mayor capacidad de evapotranspiración ocurre cuando un suelo se encuentra a capacidad de campo, ya que el suelo dispone de la máxima humedad posible, sin embargo, cuando la humedad del suelo es menor que la capacidad de campo, la planta cierra sus estomas con el propósito de transpirar menos y así ahorrar agua, finalmente cuando la humedad del suelo llega al punto de marchitez, la planta no transpira y muere.

Cada planta tiene una transpiración diferente, por lo que si se considera la variedad en la vegetación y el grado de desarrollo existente en las plantas, es imposible determinar la evapotranspiración existente dentro del área de estudio, por este motivo es conveniente asumir una evapotranspiración, estimada como promedio de la cuenca.

La FAO (2013) señala que la evapotranspiración depende de una serie de factores, entre ellos, factores de tipo climático (radiación solar, temperatura, humedad, velocidad del viento), factores asociados a los cultivos (tipo de cultivo, fase de desarrollo, altura, características radicales) y de factores de manejo y entorno (fertilidad de suelo, prácticas de cultivo, enfermedades, plagas).

Para determinar el valor de evapotranspiración de la vegetación existente dentro de área de estudio, se aplica una serie de ecuaciones, inicialmente se calcula la evapotranspiración potencial, posteriormente se determina la evapotranspiración potencial real y finalmente se establece el valor de la evapotranspiración real.

3.2.2.1 Evapotranspiración potencial (ETP)

La ecuación utilizada para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), es la propuesta por Blaney & Criddle (ONU, 1972):

$$ETP = (8.10 + 0.46T) P_s \quad \text{Ecuación 4}$$

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes)

T = Temperatura media mensual (°C)

P_s = Porcentaje de horas de luz solar mensual (%)

La ecuación anterior introduce la variable del porcentaje de horas de luz solar mensual (*P_s*), dichos valores se obtienen del cuadro 16, donde se presentan los valores establecidos para la latitud 10° del hemisferio norte, latitud en la que se encuentra Costa Rica (Calvo, 1999).

Cuadro 16. Porcentaje de horas de luz solar mensual, para la latitud 10° del hemisferio norte.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Porcentaje (%)	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,6	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,1

Fuente: Calvo (1999)

Para el valor de temperatura media mensual, se utiliza los datos de temperatura que registran las estaciones meteorológicas Santa Bárbara y Juan Santamaría, ambas estaciones localizadas en las cercanías del distrito Central de Alajuela y pertenecientes al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), cabe indicar que es necesario incluir los datos de éstas dos estaciones en la investigación, debido a que las estaciones Alajuela Centro y Tegucigalpa-Itiquís (estaciones meteorológicas utilizadas anteriormente) solamente registran datos de precipitación y no de temperatura.

La estación Santa Bárbara se localiza al sector noreste del área de estudio, en las coordenadas CRTM05 481852 E / 1109435 N a una elevación de 1060 m.s.n.m., en tanto la estación Juan Santamaría se localiza al sector sur en las coordenadas CRTM05 476033 E / 1104554 N a una elevación de 913 m.s.n.m.

Con el fin de determinar la distribución de las temperaturas dentro del área de estudio, se opta por mantener el límite de influencia generado previamente al aplicar la metodología de Polígonos de Thiessen. Considerando la ubicación de las estaciones, la estación Santa Bárbara tiene influencia en el sector norte, mientras que la estación Juan Santamaría tiene influencia en el sector sur.

Considerando el mapa de zonas de la figura 17, en el cual se determinan las áreas para aplicar el balance de suelos, es posible indicar que para las zonas 1 y 6 el valor de evapotranspiración potencial será calculado a partir de los datos de temperatura que registra la estación meteorológica Santa Bárbara, por su parte las zonas 3, 4 y 7 son analizadas bajo los datos de temperatura que registra la estación Juan Santamaría. El cuadro 17 muestra los valores de temperatura media mensual que registra las estaciones meteorológicas Santa Bárbara y Juan Santamaría.

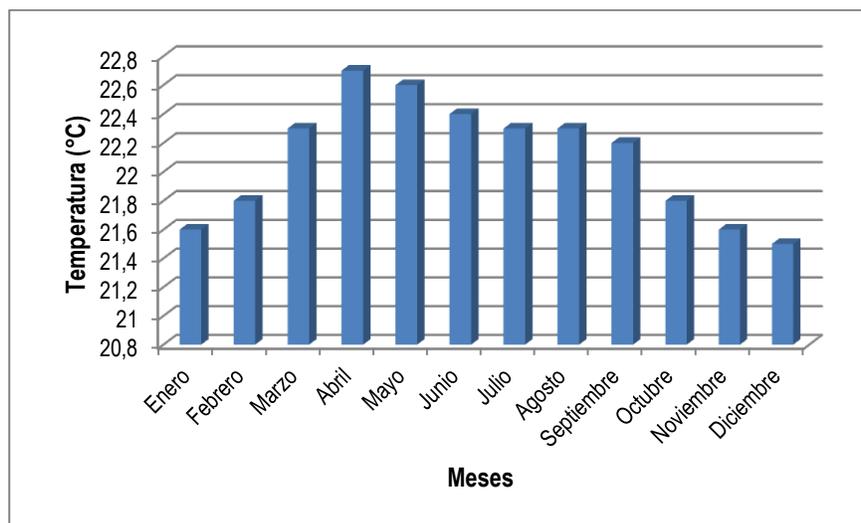
Cuadro 17. Valores de temperatura media mensual que registran las estaciones meteorológicas.

Estación Meteorológica	Temperatura media mensual (°C)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Estación Santa Bárbara	21,6	21,8	22,3	22,7	22,6	22,4	22,3	22,3	22,2	21,8	21,6	21,5
Estación Juan Santamaría	23,4	23,8	24,3	24,7	23,9	23,6	23,7	23,5	23,0	22,8	22,8	23,1

Fuente: elaboración propia

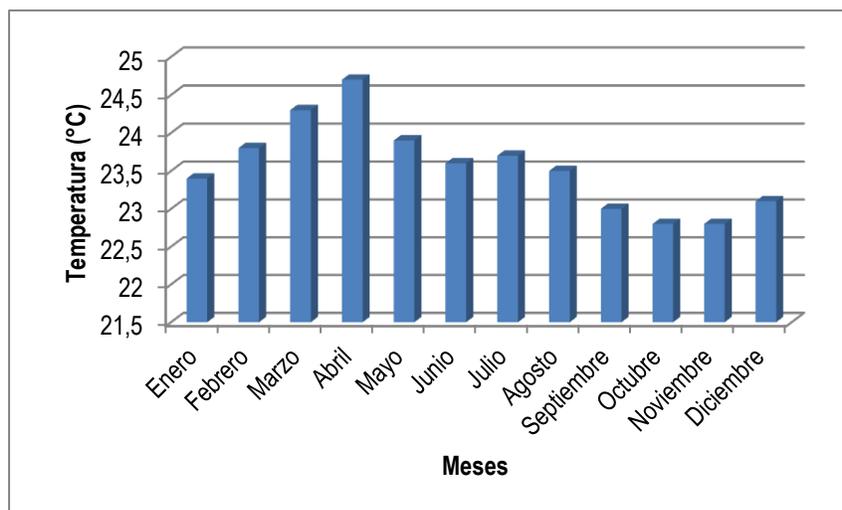
A partir de la información del cuadro anterior se determina que para el área de estudio, las mayores temperaturas ocurren en los meses de marzo y abril, por su parte los meses de noviembre y diciembre presentan los menores valores de temperatura. Promediando los valores de temperatura mensual establecidos en el cuadro 17, la temperatura en el área de estudio ronda los 22,8 °C (ver gráficos 3 y 4).

Gráfico 3. Promedio Mensual de Temperatura Media Estación Santa Bárbara (1998-2012)



Fuente: elaboración propia

Gráfico 4. Promedio Mensual de Temperatura Media Estación Juan Santamaría (1999-2014)



Fuente: elaboración propia

Una vez que se cuenta con los datos de temperatura mensual, es posible aplicar la ecuación 4 para obtener el valor de evapotranspiración potencial para el área de estudio. El cuadro 18 muestra los valores de evapotranspiración mensual, utilizando las temperaturas que registran las estaciones meteorológicas

Cuadro 18. Valores de evapotranspiración potencial mensual, según los datos de temperatura que brinda cada estación meteorológica.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Evapotranspiración Potencial (mm/mes) Estación Santa Bárbara	146,63	135,42	155,13	155,2	162,95	158,27	162,65	159,9	151,07	151,19	142,66	145,72
Evapotranspiración Potencial (mm/mes) Estación Juan Santamaría	153,46	142,29	162,9	162,9	168,22	163,02	168,36	164,71	154,11	155,02	147,03	151,68

Fuente: elaboración propia

Los mayores valores de evapotranspiración potencial ocurren entre los meses de mayo a agosto, asociado a que en estos meses el porcentaje de horas luz solar presenta un incremento, en tanto que los valores de temperatura hacia dichos meses muestran leves variaciones entre sí.

3.2.2.2 Evapotranspiración potencial real (ETPR)

Para determinar el valor de evapotranspiración potencial real (ETPR) es necesario incluir los coeficientes de humedad (C1 & C2). El coeficiente C1 representa la humedad inicial del mes previo a ocurrir la evapotranspiración, por su parte el coeficiente C2 representa la humedad al final del mes después de que se presenta el proceso de evapotranspiración.

El coeficiente C1 corresponde al coeficiente de humedad máximo del suelo, ya que considera la humedad al inicio del mes, más la infiltración de lluvia sin ocurrir la evapotranspiración; por su parte el coeficiente C2 corresponde al coeficiente de humedad mínimo, puesto que considera la resta del valor de evapotranspiración mensual calculado al coeficiente C1. El coeficiente C1 se obtiene de aplicando la siguiente ecuación:

$$C1 = (HS_i - PM + P_i) / (CC - PM) \quad \text{Ecuación 5}$$

C1=Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración

HS_i=Humedad al inicio del mes (mm)

PM=Punto de marchitez (mm)

P_i=Precipitación que infiltra (mm/mes)

CC= Capacidad de Campo (mm)

Para el caso del Coeficiente C2 se aplica la ecuación 6, ecuación que incluye dentro de sus variables la evapotranspiración:

$$C2 = (HSi - PM + Pi - ETR1) / (CC - PM) \quad \text{Ecuación 6}$$

ETR1= (C1) (ETP)

C2=Coeficiente de humedad mínimo, considerando la evapotranspiración

HSi=Humedad al inicio del mes (mm)

PM=Punto de marchitez (mm)

Pi=Precipitación que infiltra (mm/mes)

CC= Capacidad de Campo (mm)

ETR1= Evapotranspiración potencial real (mm/mes), considerando la humedad del C1.

La metodología propuesta por Schosinsky (2006) establece que el coeficiente de humedad del mes generado al promediar los coeficientes C1 y C2, representa el valor de evapotranspiración potencial real (ETPR) en un mes dado. La ecuación 7 muestra la forma en que es calculada la ETPR.

$$ETPR = ((C1+C2)/2) * ETP \quad \text{Ecuación 7}$$

ETPR=Evapotranspiración potencial real (mm/mes)

C1=Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración

C2= Coeficiente de humedad mínimo, considera la evapotranspiración

ETP=Evapotranspiración potencial (mm/mes)

A partir de la ecuación anterior y empleando los valores de C1 y C2 que proporciona la hoja de Excel elaborada por Schosinsky (2006) para cada zona objeto de estudio, el cuadro 19 muestra los valores de la evapotranspiración potencial real (ETPR).

Cuadro 19. Valores de evapotranspiración potencial real mensual para cada una de las zonas a las que se le aplica el balance de suelos.

Mes	Ene	Febr	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Zona 1	C1	0,81	0,55	0,44	0,58	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	C2	0,44	0,32	0,23	0,30	0,84	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,72	
	ETP	146,63	135,42	155,13	155,20	162,95	158,27	162,65	159,90	151,07	151,19	142,66	145,72
	ETPR	91,41	58,43	52,14	67,90	150,04	158,27	162,65	159,90	151,07	151,19	142,66	125,03
Zona 3	C1	0,07	0,11	0,24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	C2	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,73	1,00	1,00	1,00	0,00	
	ETP	153,36	142,29	162,90	162,90	168,22	163,02	168,36	164,71	154,11	155,02	147,03	151,68
	ETPR	5,55	7,62	19,57	81,45	168,22	163,02	145,59	164,71	154,11	155,02	147,03	75,84

Zona 4	C1	0,63	0,34	0,22	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	C2	0,07	0,06	0,01	0,03	0,73	1,00	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	0,32
	ETP	153,36	142,29	162,90	162,90	168,22	163,02	168,36	164,71	154,11	155,02	147,03	151,68
	ETPR	54,14	28,69	19,35	47,38	145,79	163,02	163,81	164,71	154,11	155,02	147,03	100,36
Zona 6	C1	0,76	0,43	0,38	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	C2	0,11	0,09	0,04	0,08	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50
	ETP	146,63	135,42	155,13	155,20	162,95	158,27	162,65	159,90	151,07	151,19	142,66	145,72
	ETPR	63,97	35,30	32,08	68,12	162,95	158,27	162,65	159,90	151,07	151,19	142,66	109,15
Zona 7	C1	0,71	0,48	0,35	0,42	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	C2	0,40	0,28	0,18	0,22	0,47	0,70	0,70	0,79	1,00	1,00	0,96	0,62
	ETP	153,36	142,29	162,90	162,90	168,22	163,02	168,36	164,71	154,11	155,02	147,03	151,68
	ETPR	85,22	54,01	43,02	52,29	117,03	138,32	143,07	147,77	154,11	155,02	144,42	123,22

Fuente: elaboración propia

3.2.2.3 Evapotranspiración real (ETR)

Una vez conocida la ETPR, Schosinsky (2006) incluye la variable asociada a la humedad disponible (HD), descrita como la humedad que pueden tomar las raíces de la planta. El valor de humedad disponible está dado por la siguiente ecuación:

$$HD = HSi + Pi - PM \quad \text{Ecuación 8}$$

HD= Humedad disponible (mm/mes)

HSi=Humedad al inicio del mes (mm)

PM=Punto de marchitez (mm)

Pi=Precipitación que infiltra (mm/mes)

Incluida la variable de humedad disponible es posible calcular la evapotranspiración real (ETR), para ello la metodología propone que si la ETPR es menor o igual a la HD, la ETR es igual a la ETPR, en caso contrario si la ETPR es mayor a la HD, la ETR es igual a la HD.

El cuadro 20 muestra los valores de humedad disponible que proporciona la hoja de Excel elaborada por Schosinsky (2006) para cada una de las zonas de análisis, además se incluye el valor de evapotranspiración real debidamente calculado.

Cuadro 20. Valores de evapotranspiración real mensual y valores de humedad disponible para las zonas a las que se les aplica el balance de suelos.

Mes		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Zona 1	HD	260,99	176,67	143,12	186,35	435,48	606,88	532,18	615,94	716,58	741,62	516,66	377,62
	ETR	91,41	58,43	52,14	67,90	150,04	158,27	162,65	159,90	151,07	151,19	142,66	125,03
Zona 3	HD	2,50	3,70	8,30	75,59	247,19	257,98	193,56	223,83	367,27	353,46	182,83	69,35
	ETR	2,50	3,70	8,30	75,59	168,22	163,02	145,59	164,71	154,11	155,02	147,03	69,35
Zona 4	HD	109,67	59,22	38,83	95,07	294,88	372,53	331,75	357,23	505,46	491,64	321,01	207,53
	ETR	54,14	28,69	19,35	47,38	145,79	163,02	163,81	164,71	154,11	155,02	147,03	100,36
Zona 6	HD	130,88	74,01	64,82	137,63	418,25	526,08	401,65	493,78	604,49	632,03	384,57	231,63
	ETR	63,97	35,30	32,08	68,12	162,95	158,27	162,65	159,90	151,07	151,19	142,66	109,15
Zona 7	HD	246,48	164,97	119,26	144,96	317,39	403,48	409,72	438,72	593,44	634,91	479,79	367,20
	ETR	85,22	54,01	43,02	52,29	117,03	138,32	143,07	147,77	154,11	155,02	144,42	123,22

Fuente: elaboración propia

3.2.3 Cálculo de la humedad inicial (HSi) y humedad final (HSf) del suelo

La humedad inicial (HSi) y la humedad final (HSf) establecida para un mes específico, están asociadas directamente a los valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM) anteriormente descritos. Schosinsky (2006) menciona que generalmente al final de la época de mayor precipitación, el suelo se encuentra a capacidad de campo, por lo anterior y considerando que los meses de agosto, setiembre y octubre presentan los mayores valores de precipitación mensual registrados para el área de estudio, en la presente investigación se le ha asignado al mes de noviembre una humedad inicial igual a la capacidad de campo.

Una vez establecida la humedad inicial para el mes de noviembre, es posible continuar calculando las humedades finales e iniciales de los suelos, en los meses siguientes.

Para obtener el valor de humedad final (HSf) se emplea la siguiente ecuación:

$$(HD+PM-ETR) \quad \text{Ecuación 9}$$

HD=Humedad disponible (mm/mes)

PM= Punto de marchitez (mm)

ETR= Evapotranspiración real (mm/mes)

La metodología establece que si el resultado de la ecuación anterior es menor a la capacidad de campo, el valor de humedad final (HSf) es igual al resultado de dicha ecuación; por su parte si el resultado de la ecuación es mayor o igual a la capacidad de campo, la humedad final (HSf) es igual al valor de capacidad de campo (CC).

El cuadro 21 muestra los valores de humedad inicial y humedad final mensual para las zonas de aplicación del balance de suelos.

Cuadro 21. Valores de humedad inicial y final mensual para las zonas a las que se les aplica el balance de suelos.

Mes		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Zona 1	Hsi	722,67	639,65	588,32	561,07	588,52	755,52	793,94	793,94	793,94	793,94	793,94	793,94
	HSf	639,65	588,32	561,07	588,52	755,52	793,94	793,94	793,94	793,94	793,94	793,94	722,67
Zona 3	Hsi	46,23	46,23	46,23	46,23	46,23	80,78	80,78	80,78	80,78	80,78	80,78	80,78
	HSf	46,23	46,23	46,23	46,23	80,78	80,78	80,78	80,78	80,78	80,78	80,78	46,23
Zona 4	Hsi	338,32	286,67	261,68	250,63	278,84	380,24	403,88	399,09	403,88	403,88	403,88	403,88
	HSf	286,67	261,68	250,63	278,84	380,24	403,88	399,09	403,88	403,88	403,88	403,88	338,32
Zona 6	Hsi	351,14	295,57	267,38	261,40	298,17	401,15	401,15	401,15	401,15	401,15	401,15	401,15
	HSf	295,57	267,38	261,40	298,17	401,15	401,15	401,15	401,15	401,15	401,15	401,15	351,14
Zona 7	Hsi	701,30	618,59	568,28	533,56	549,99	657,68	722,48	723,96	748,28	802,31	802,31	792,68
	HSf	618,59	568,28	533,56	549,99	657,68	722,48	723,96	748,28	802,31	802,31	792,68	701,30

Fuente: elaboración propia

3.3 Calculo de la recarga potencial al acuífero (Rp)

Tal y como lo señala Schosinsky (2006), la recarga al acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas, el agua sobrante será la que recarga al acuífero.

La recarga potencial del acuífero (Rp) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Rp = Pi + HSi - HSf - ETR \quad \text{Ecuación 10}$$

Rp = Recarga potencial (mm / mes)

Pi = Precipitación que infiltra (mm / mes)

	HSf	295,5	267,3	261,4	298,1	401,1	401,1	401,1	401,1	401,1	401,1	401,1	351,1
	ETR	63,97	35,30	32,08	68,12	162,9	158,2	162,6	159,9	151,1	151,1	142,6	109,1
	Rp	0,00	0,00	0,00	0,00	82,81	195,3	66,50	161,4	280,9	308,3	69,42	0,00
Zona 7	Pi	2,50	3,70	8,30	68,72	224,7	203,1	144,5	172,0	302,4	289,9	134,8	31,84
	Hsi	701,3	618,6	568,3	533,5	549,9	657,6	722,4	723,9	748,2	802,3	802,3	792,6
	HSf	618,5	568,2	533,5	549,9	657,68	722,5	723,9	748,3	802,3	802,3	792,7	701,3
	ETR	85,22	54,01	43,02	52,29	117,0	138,3	143,1	147,7	154,1	155,0	144,4	123,2
	Rp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	94,34	134,9	0,00

Fuente: elaboración propia

Como se ha señalado anteriormente la recarga potencial para las zonas 2, 5 y 8 es calculada sin emplear la metodología del balance de suelos, una vez determinada la precipitación que infiltra en éstas zonas urbanas, se considera con base en lo establecido por Espinoza (2011) en su investigación sobre los *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano*, que únicamente el 5% de la precipitación que infiltra tiene la posibilidad de alcanzar una profundidad mayor como para recargar al acuífero.

El cuadro 23 muestra los datos de precipitación que infiltra, además se presenta el valor de recarga potencial mensual para las zonas ocupadas por uso de suelo de tipo urbano.

Cuadro 23. Valores de precipitación que infiltra y recarga potencial en las zonas ocupadas por el desarrollo urbano.

Mes		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Zona 2	Pi	2,01	1,82	4,67	17,88	59,45	60,27	39,06	54,77	73,64	78,33	36,15	10,08
	Rp	0,10	0,09	0,23	0,89	2,97	3,01	1,95	2,74	3,68	3,92	1,81	0,50
Zona 5	Pi	1,13	1,31	2,00	12,89	42,14	38,09	27,11	32,27	56,72	54,36	25,28	5,97
	Rp	0,06	0,07	0,10	0,64	2,11	1,90	1,36	1,61	2,84	2,72	1,26	0,30
Zona 8	Pi	1,13	1,31	2,00	12,89	42,14	38,09	27,11	32,27	56,72	54,36	25,28	5,97
	Rp	0,06	0,07	0,10	0,64	2,11	1,90	1,36	1,61	2,84	2,72	1,26	0,30

Fuente: elaboración propia

Determinado los valores de recarga potencial mensual para las ocho zonas que conforman el área de estudio, se procede a determinar la recarga potencial anual, esto con el objetivo de conjuntar la información obtenida y así poder ser procesada con mayor facilidad, para efectos de construir un mapa que permita representar la distribución de la recarga potencial en el distrito Central de Alajuela. El mapa de la figura 23 muestra la distribución de la recarga potencial para el área de estudio.

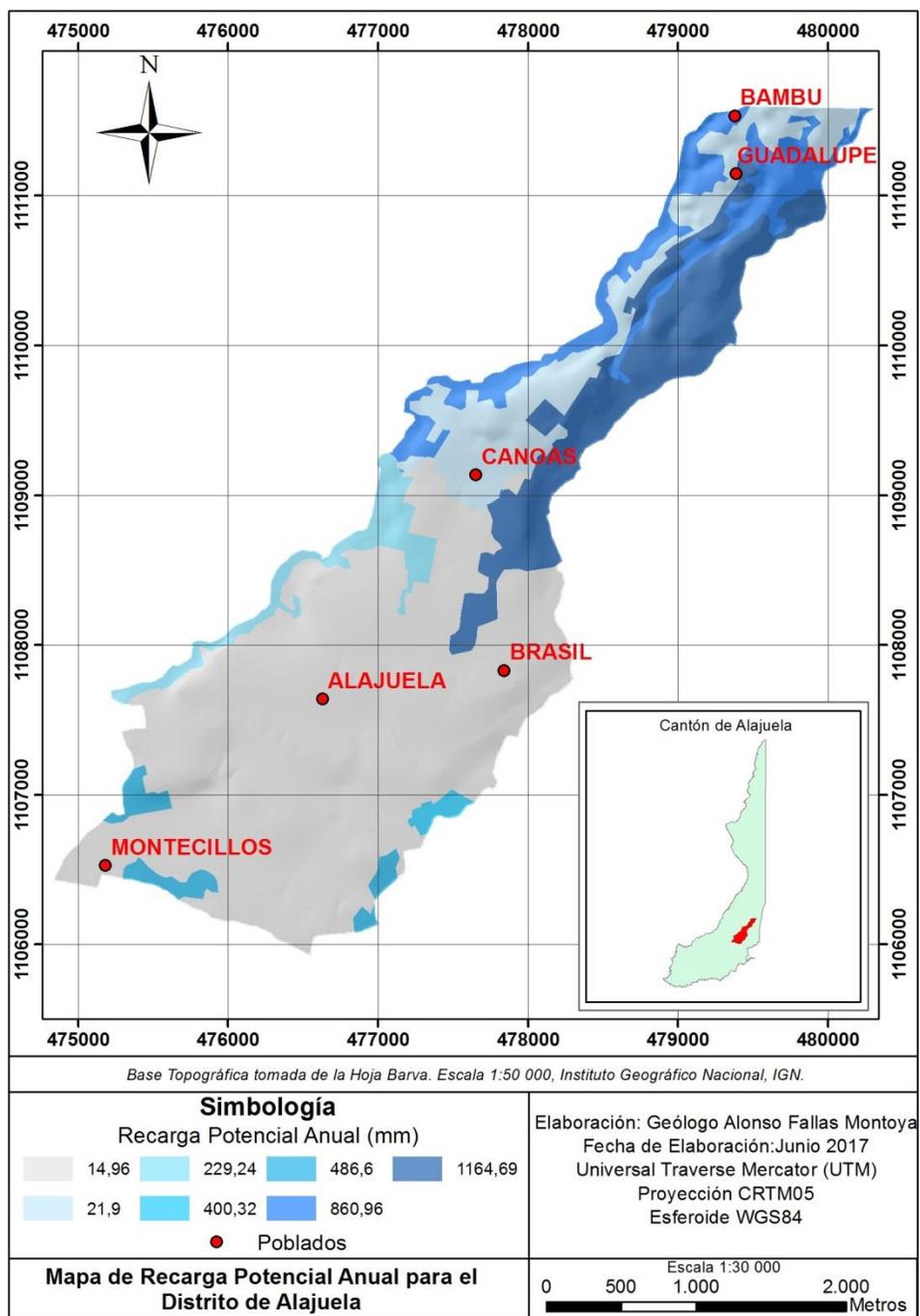


Figura 23: Mapa de la distribución de la recarga potencial acuífera anual para el distrito Central de Alajuela.
 Elaboración propia.

A partir del mapa anterior, se observa que la menor recarga potencial al acuífero ocurre en las zonas ocupadas por la actividad urbana, uso de suelo que ocupa la mayor parte del área de estudio y que principalmente se concentra en el sector central y sur del distrito Central de Alajuela.

Debido a la impermeabilización de los suelos, éstas zonas presentan valores de recarga potencial anual pobres de entre 14,96 y 21,9 mm, lo que representa un porcentaje de recarga del 0,74% con respecto a las precipitaciones que ocurren hacia esos sectores.

La estrecha franja de bosque ubicada hacia el sector sur del área, registra un valor de recarga potencial anual de 229,24 mm, tal valor representa un porcentaje del 11,49% con respecto al valor de precipitación que ocurre en este sector; por su parte la zona boscosa localizada en el sector norte, presenta una recarga de 860,96 mm, lo que equivale a un porcentaje del 29,47%.

La densidad en el follaje y el proceso de evapotranspiración que experimentan los árboles que conforman las zonas de bosque actúan para que la recarga no presente valores mayores, la presencia de raíces profundas incrementan la capacidad de una mayor extracción del agua disponible, disminuyendo la recarga.

Los sectores donde la cobertura de zacate es mayor al 75% presentan un valor de recarga potencial anual de 486,6 mm lo que representa el 24,39% con respecto a la precipitación registrada, un follaje poco denso y una profundidad en las raíces reducida, favorecen a que un mayor porcentaje del agua que infiltra logre recargar al acuífero.

La zona dedicada a cultivo existente en el sector norte del área de estudio presenta un valor de recarga potencial anual de 1164,69 mm equivalente al 39,87% de la precipitación registrada en este sector, en tanto, la zona de cultivo ubicada en el sector sur presenta un valor de recarga de 400,32 mm, lo que corresponde a un 20,06% de la precipitación.

Considerando los resultados de recarga potencial obtenidos, es posible señalar que la zona de cultivo localizada en el sector noroeste del distrito, corresponde con la zona de mayor recarga potencial, tal situación asociada a la presencia de cultivos con follaje poco denso y con raíces poco profundas, lo cual genera que las plantas no extraigan un porcentaje elevado de agua en su proceso de evapotranspiración. Aunado a lo anterior es importante señalar que en el sector norte del distrito, se presentaron los mayores valores de infiltración básica del suelo, situación que evidencia condiciones de infiltración favorables para la recarga.

Es importante considerar que en las zonas dedicadas a la siembra de cultivos, normalmente se hace uso de agentes químicos, entre ellos agroquímicos y pesticidas, por lo tanto, es de esperar que el agua que está recargando al acuífero en ese sector presente concentraciones elevadas de químicos perjudiciales para la calidad del agua.

En general, la mayor recarga potencial acuífera ocurre en el sector norte del área de estudio, sector caracterizado por presentar un menor desarrollo urbano en comparación con el sector central y sur del distrito. Aunado a lo anterior, cabe señalar que hacia el sector norte del área de estudio se presentan los mayores valores de precipitación, aumentando las posibilidades de una mayor infiltración y por consiguiente un aumento en la recarga potencial acuífera.

La impermeabilización de las ciudades produce una concentración del calor en los centros urbanos, este fenómeno se conoce como “isla de calor”, producto del aislamiento del terreno mediante pavimentos sellantes, haciendo prácticamente imposible la regulación natural de la temperatura y la humedad en las zonas urbanizadas (Fontaneda *et al.* 2012).

Si bien es cierto que las zonas de bosque no presentan los mayores valores de recarga potencial, es importante considerar el papel que desempeñan en la formación de microclimas que permiten la generación de precipitaciones dentro de la cuenca y la regulación de la temperatura.

El mapa de la figura 24 muestra los valores de recarga potencial en porcentajes con respecto al valor de precipitación registrado, esto con la finalidad de mostrar con mayor claridad la relación entre tales variables.

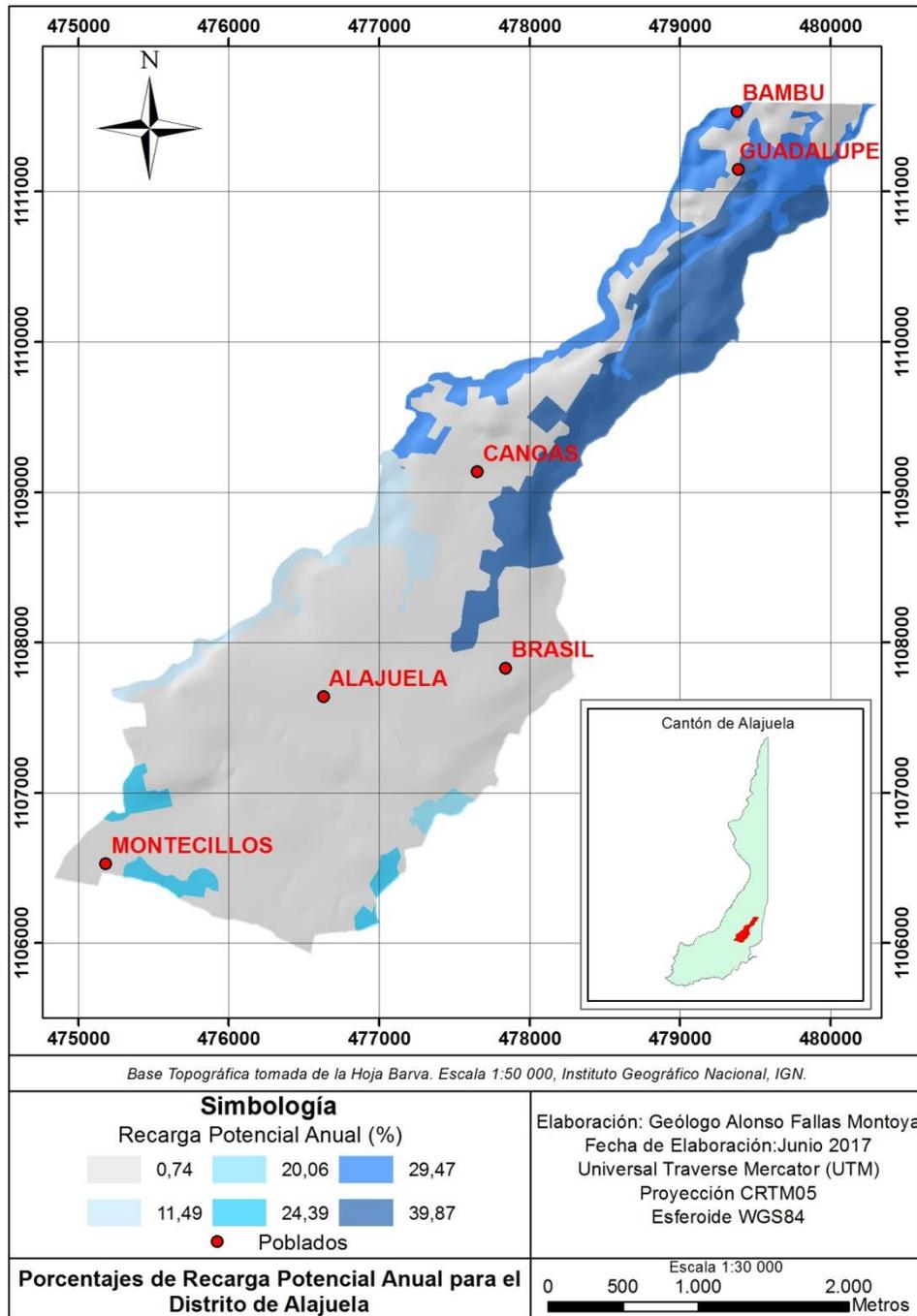


Figura 24: Mapa de porcentajes de recarga potencial anual, considerando la precipitación que se presenta en el distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

4. Determinación del grado de vulnerabilidad intrínseca

Para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos existentes dentro del área de estudio, se optó por analizar las características intrínsecas del medio. Considerando la existencia de varios métodos para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera, en la presente investigación se utilizó el método denominado GOD por sus iniciales en inglés (Foster et al., 2002).

Este método se basa en la determinación del Índice de Vulnerabilidad Acuífera (I.V.A), mediante la asignación de valores a los rangos de variación de tres parámetros previamente establecidos: el primer parámetro (G) hace referencia al grado de confinamiento hidráulico del acuífero, el parámetro (O) corresponde al tipo de litología que cubre al acuífero y el parámetro (D) se refiere a la profundidad en que se ubica el nivel de saturación de agua. Cabe indicar que para cada uno de los parámetros que conforman el método GOD se les asigna valores entre cero y uno, por lo tanto entre mayor es el valor, más desfavorable es la condición del medio.

Al multiplicar los valores establecidos para cada parámetro es posible determinar el Índice de Vulnerabilidad Acuífera, el resultado obtenido es posteriormente clasificado cualitativamente en cinco categorías de vulnerabilidad: despreciable, baja, media, alta y extrema (ver figura 2 referente al diagrama de vulnerabilidad).

4.1 Unidades hidrogeológicas

Para determinar el grado de vulnerabilidad mediante el método de GOD, es indispensable conocer los tipos de litologías y espesores de los materiales que se encuentran en el subsuelo, además de establecer la profundidad en la que se ubican los niveles de agua subterránea, por ende, se procedió a consultar los reportes de perforación de pozos registrados en la base de datos del SENARA, la cual registra para el distrito Central de Alajuela un total de ciento nueve pozos.

Debido a que normalmente las descripciones litológicas son escuetas o no son incluidas del todo en los reportes de perforación, para efectos de esta investigación, se procedió a trabajar con los pozos que cuentan con registro litológico, esto con el objetivo de contar con los insumos necesarios para determinar el grado de vulnerabilidad acuífera.

En total, se analizó una cantidad de sesenta y cinco pozos, los cuales se distribuyen por toda el área de estudio, principalmente la mayor parte se concentra en el sector sur, mientras que hacia el sector norte los registros existentes son reducidos, de manera particular se cuenta únicamente con registro de tres pozos

poco profundos, por lo tanto la información en este sector es escasa (ver figura 25). En el anexo 7 se presenta un cuadro con los datos relevantes de los pozos analizados y utilizados en la presente investigación.

Es importante señalar que el SENARA no registra a la fecha, presencia de nacientes o manantiales dentro del distrito Central de Alajuela, por lo tanto el estudio se limitó al análisis de los pozos existentes.

La mayoría de los pozos consultados poseen profundidades que varían entre los 50 a 80 metros bajo el nivel del suelo (m.b.n.s), mientras que solamente doce pozos superan los 100 metros de profundidad; debido al registro escaso en relación a pozos profundos dentro del área de estudio, se limitó poder realizar un análisis adecuado de los acuíferos situados a mayor profundidad.

Aunado a lo anterior, cabe indicar que los pozos profundos se concentran hacia el sector sur del área de estudio, por lo tanto no se tiene una distribución adecuada que permita correlacionar litologías que se encuentran a profundidad; en ciertos sectores dentro del área de estudio, no se cuenta con registros de pozos, por lo tanto se carece de información. De manera particular y a partir del modelo de elevación digital construido (figura 6), se evidencia que la mayor parte de los pozos registrados en el área de estudio (cerca del 85% con respecto a la cantidad de pozos existentes) se ubican entre las elevaciones de 890 a 970 m.s.n.m.

Con el fin de correlacionar las litologías existentes en el subsuelo y establecer un modelo conceptual hidrogeológico sólido y válido se procedió a incluir dentro de la presente investigación, una serie de perfiles hidrogeológicos; mediante los perfiles hidrogeológicos, se pretende determinar la distribución y espesores de las litologías existentes en el subsuelo, ubicación de los niveles del agua subterránea y en particular establecer de las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos identificados. Los perfiles hidrogeológicos elaborados se observan en las figuras 27, 28, 29 y 30.

El mapa de la figura 25 muestra la distribución espacial de los sesenta y cinco pozos consultados y analizados en esta investigación, cada uno de los pozos son asignados bajo el código establecido por el SENARA.

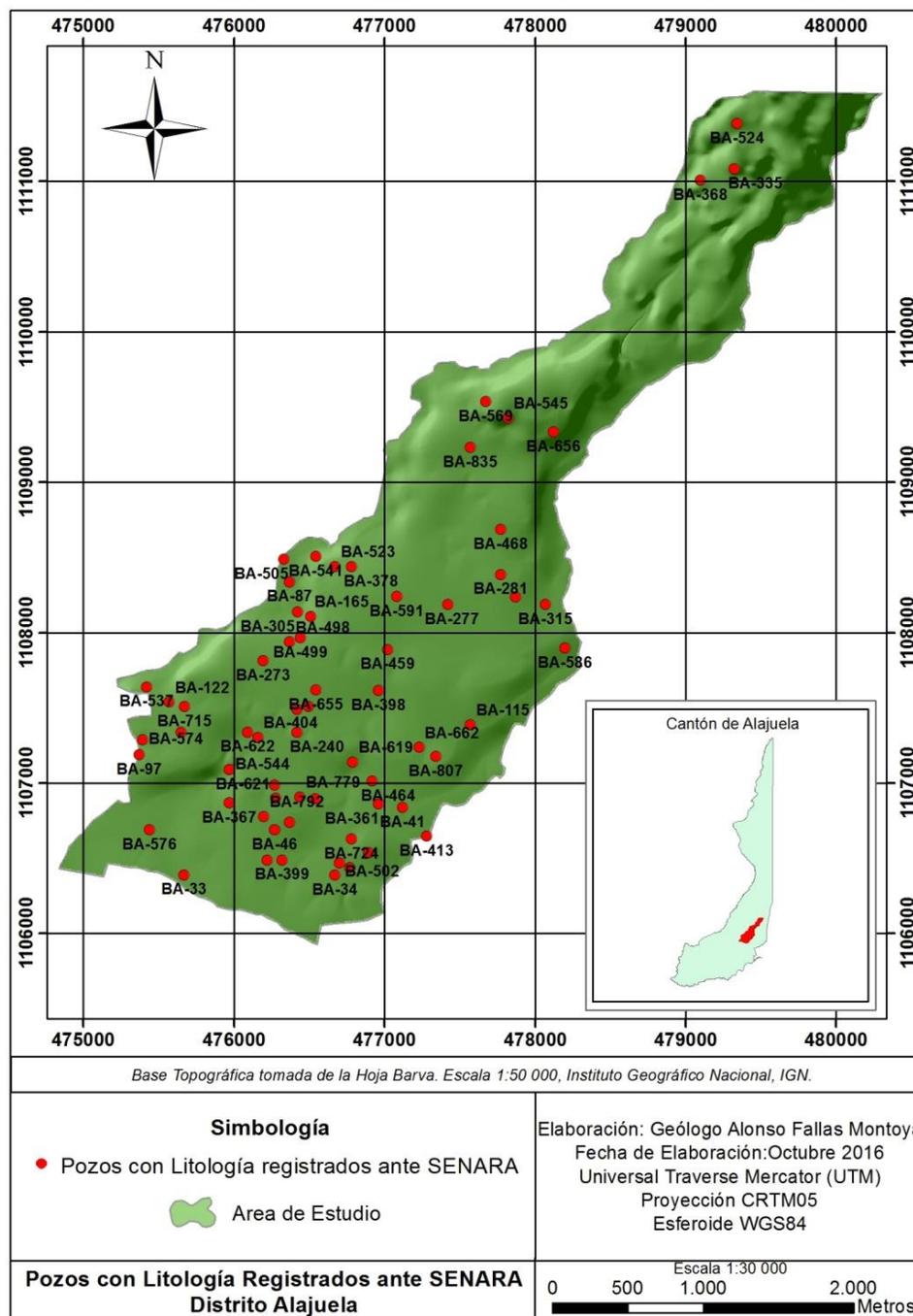


Figura 25: Mapa de pozos con litología registrados en la Base de Datos del SENARA para el distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

En total se elaboran cuatro perfiles hidrogeológicos con orientaciones preferenciales NE-SW, W-E y NW-SE, tales perfiles presentan longitudes entre los 1,5 a 6,1 km; el mapa de la figura 26 muestra las líneas de perfil trazadas.

Las líneas de perfil fueron establecidas con el objetivo de abarcar la mayor parte del área de estudio y de ésta manera lograr una correlación oportuna de las litologías existentes, del mismo modo, se consideró incluir en las líneas de perfil aquellos pozos que cuentan con mejores descripciones litológicas y brindan información de interés. Para la elaboración de cada uno de los perfiles, se utilizó el programa Adobe Ilustrador CS6.

En cuanto al perfil hidrogeológico número 1, este se construyó a partir de la información litológica que registra un total 11 pozos, los cuales son: BA-524, BA-368, BA-656, BA-835, BA-378, BA-165, BA-499, BA-273, BA-622, BA-544 y BA-576; el perfil hidrogeológico número 2 se conforma a partir del análisis de la litología de 7 pozos: BA-586, BA-115, BA-807, BA-41, BA-724, BA-502 y BA-34; por su parte, el perfil hidrogeológico número 3 resultó del análisis de 7 pozos: BA-541, BA-523, BA-378, BA-591, BA-277, BA-124 y BA-315; por último, la construcción del perfil hidrogeológico número 4, surge a partir del análisis de 10 pozos a saber: BA-537, BA122, BA-715, BA-622, BA-404, BA-240, BA-619, BA-464, BA-41 y BA-413.

Con base en la información que brindan los perfiles hidrogeológicos elaborados, se concluye que los materiales existentes son de naturaleza volcánica, típicos de los materiales identificados en el Valle Central; Denyer & Arias (1991) establecen para estas rocas una edad aproximada de 5 millones de años, además señalan que la secuencia volcánica caracterizada por lavas andesíticas interestratificados por extensas capas de piroclastos, principalmente tobas e ignimbritas, se originaron a partir de fracturas que permitieron la erupción de lavas y flujos piroclásticos.

Las litologías identificadas en el área de estudio son correlacionadas con las formaciones geológicas típicas que han sido propuestas para el Valle Central, es importante anotar que la nomenclatura geológica e hidrogeológica no son iguales, esto por cuanto fueron propuestas para diferentes objetivos (Ramírez & Alfaro., 2002).

Por lo anterior, Ramírez & Alfaro (2002) establecen que las Lavas Intracañón corresponde con la Formación Hidrogeológica Colima (Superior e Inferior), la Formación Avalancha Ardiente correspondería a la Formación Tiribí, mientras que los piroclastos y lavas de los estratovolcanes con la Formación Hidrogeológica Barba.

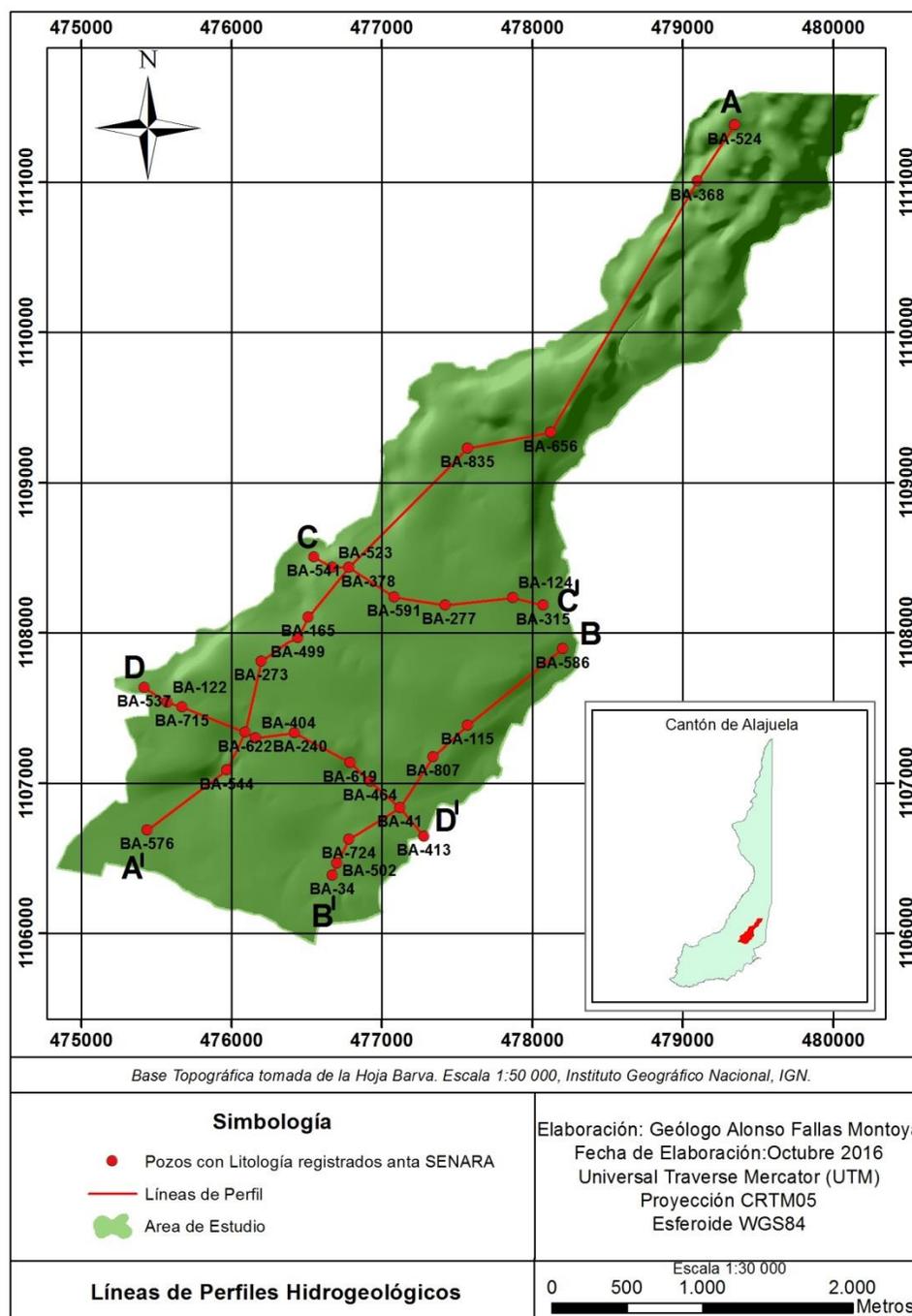


Figura 26: Líneas de perfiles hidrogeológicos elaborados para el distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

Mediante los perfiles elaborados, se evidenció que de manera superficial toda el área de estudio se encuentra cubierta por una capa de arcillas de coloración café, producto de la meteorización de materiales volcánicos, principalmente tobas y cenizas.

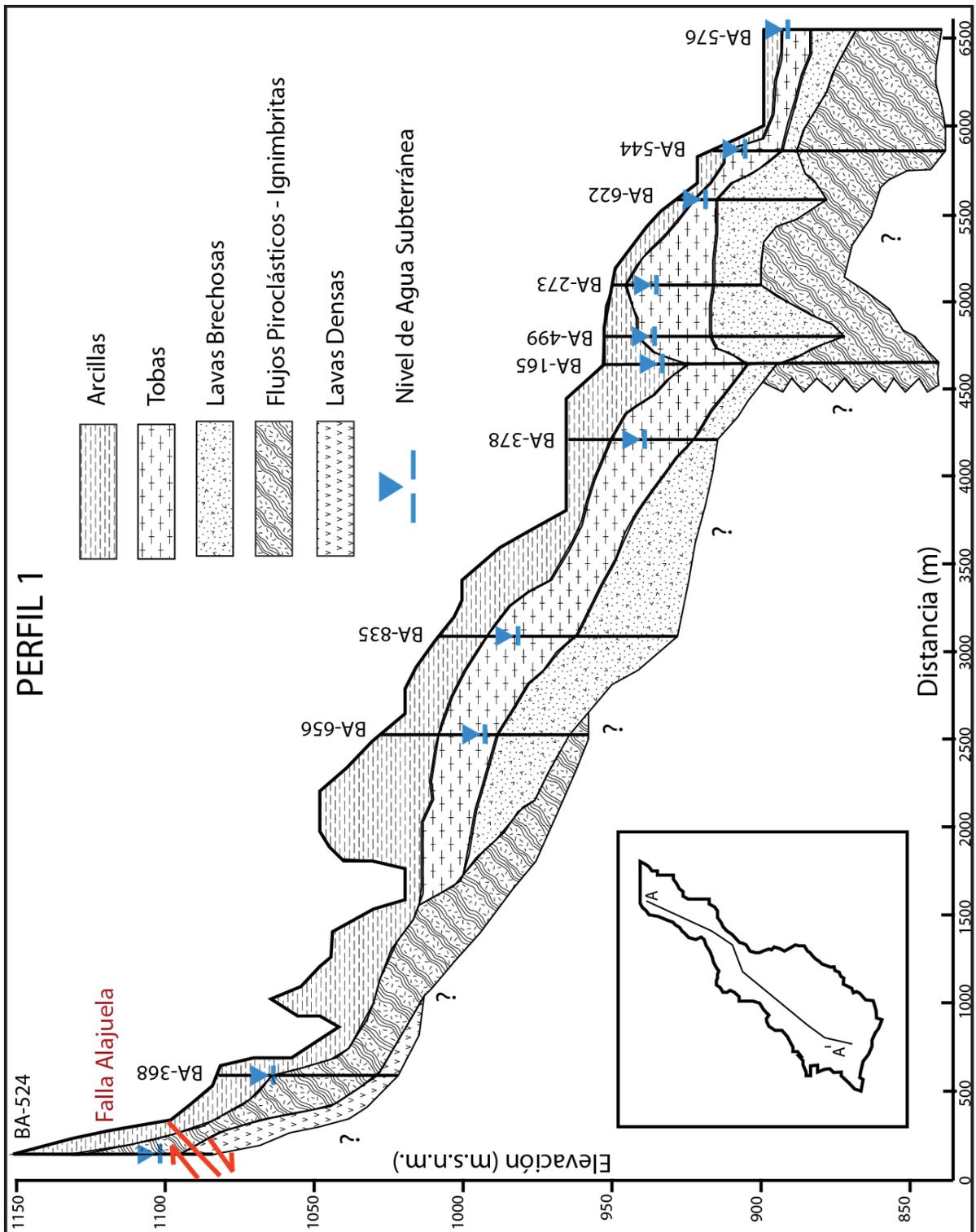


Figura 27: Perfil Hidrogeológico 1. Elaboración propia.

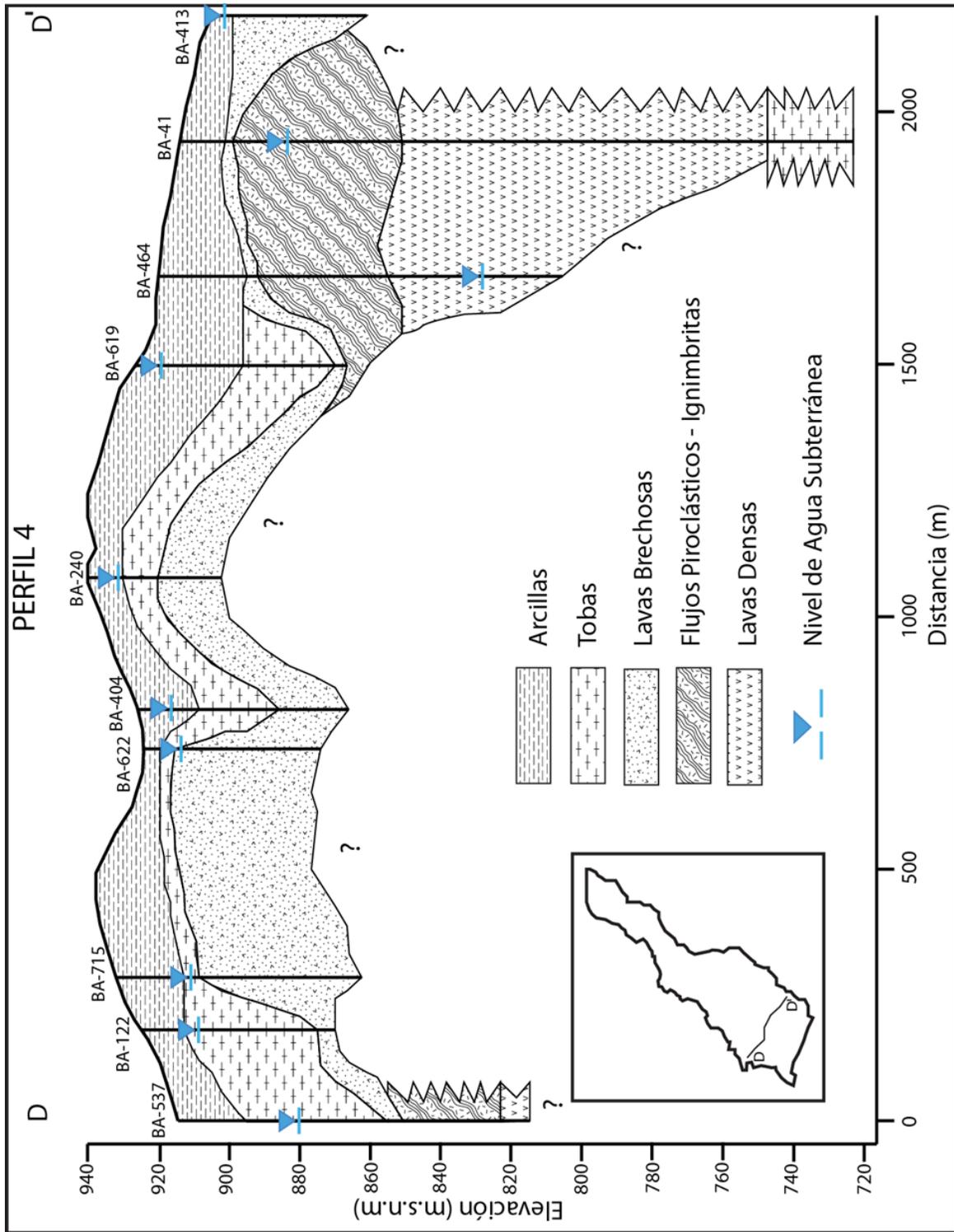


Figura 30: Perfil Hidrogeológico 4. Elaboración propia.

Estos materiales arcillosos presentan como promedio espesores entre 10 a 20 m, sin embargo, en ciertos sectores los reportes de perforación revelan aumentos en el espesor, alcanzando incluso los 30 m, no obstante, hacia las cercanías a los cauces de los ríos Ciruelas y Alajuela el espesor de arcillas tiende a disminuir. Los materiales se presentan moderadamente compactos y debido a su naturaleza con susceptibles a los procesos de erosión que modelan el relieve.

En la mayor parte del área de estudio los materiales arcillosos identificados, sobreyacen tobas asociadas en la presente investigación al Miembro Hidrogeológico Porrosatí y Carbonal, el cual se caracteriza por presentar arenas volcánicas gruesas y tobas arcillosas meteorizadas. Estos materiales en general conforman acuitardos de gran extensión que sobreyacen al acuífero Barba Inferior (Echandi, 1981).

A partir de los perfiles hidrogeológicos 1 y 2, es posible apreciar que hacia el sector sur del área de estudio, se presenta un adelgazamiento de los materiales del Miembro Porrosatí y Carbonal; en general los espesores tienden a ser variables debido a que estos materiales son producto de emisiones de caída volcánica que rellenan topografías preexistentes.

Subyaciendo a las tobas se presentan lavas diaclasadas y brechosas, asociadas al Miembro Hidrogeológico Bermúdez de la Formación Barba; este miembro se caracteriza por presentar lavas andesíticas fracturadas y brechosas, las cuales pueden producir hasta 20 L/s de agua químicamente de buena calidad (BGS & SENARA., 1988). Estas capas lávicas muestran variaciones abruptas de espesores relacionado con las depresiones topográficas; a partir de los perfiles se determina que conforme se desciende hacia el sector sur, las capas de lavas brechosas tienden a mostrar una disminución en su espesor.

Es importante señalar que los pozos situados hacia el sector central y sur del área de estudio registran la perforación de materiales asociados a esta Formación, no obstante, los pozos ubicados al sector norte no establecen dentro de los reportes, registros de dichos materiales (ver perfil hidrogeológico 1, figura 27) ; por lo anterior, y considerando el contexto estratigráfico regional, se determina que dicha Formación no presenta continuidad hacia el sector norte, sector en el cual predominan materiales de la Formación Tiribí y Formación Hidrogeológica Colima.

Hacia el sector norte del área de estudio, los materiales arcillosos cubren ignimbritas y tobas relacionadas a la Formación Tiribí; cabe indicar que debido al fuerte control estructural que impera por el sector, estos materiales suelen aflorar en el escarpe de falla; pese a que en campo no fue posible observar estos materiales, Soto (2005) menciona que la Falla de Alajuela provocó el plegamiento de las tobas e ignimbritas de la Formación Tiribí, materiales que afloran en superficie hacia el sector de Tacacorí, poblado que se ubica

en las cercanías del área de estudio. Según Soto (2005) la Falla de Alajuela aflora donde forma una cataclastita, conformada por una mesobrechasa brechas con clastos métricos de ignimbritas en medio de una matriz arcillosa y arenosa.

A partir del perfil litológico de los pozos profundos ubicados en el sector sur del área de estudio, es posible establecer la presencia de la Formación Avalancha Ardiente (Formación Tiribí), la misma constituida por extensos depósitos de tobas y flujos piroclásticos de moderada permeabilidad e ignimbritas de baja permeabilidad, la cual desde el punto de vista hidrogeológico, actúa como acuitardo y separa al acuífero Barba del acuífero Colima (Echandi, 1981).

Los pozos existentes hacia el sector norte y sector sur registran la perforación de materiales asociados a esta Formación, por tanto se infiere que la misma presenta continuidad por el subsuelo que conforma el área de estudio; según los reportes de perforación, las tobas e ignimbritas se presentan soldadas, predominan las coloraciones grisáceas y en general la permeabilidad suele ser baja.

Inferior a los materiales de la Formación Tiribí, se encuentran una serie de lavas de composición andesítica con texturas brechosas y masivas asociadas al Miembro Linda Vista de la Formación Hidrogeológica Colima Superior; la presencia de fisuras (porosidad secundaria) y sectores brechosos (porosidad primaria) permiten permeabilidades altas, con capacidades de producción de hasta 100 L/s (BGS & SENARA., 1988).

Los reportes de perforación describen la Formación Hidrogeológica Colima como una serie de intercalaciones de lavas densas compactas y lavas brechosas, las cuales presentan una matriz color gris, con presencia en ocasiones de fenocristales de plagioclasa. La permeabilidad reportada oscila entre las categorías moderada-alta, esto según el predominio de fracturas.

Es importante señalar que los pozos ubicados hacia el sector norte y sur, registran la perforación de materiales pertenecientes a la Formación Hidrogeológica Colima Superior, sin embargo, debido a la mala distribución de pozos (amplios sectores dentro del área sin información) y a la escasa cantidad de pozos profundos, no es posible realizar un análisis detallado a fin de definir la vulnerabilidad intrínseca de esta Unidad Hidrogeológica, situación que representa una limitante.

Conforme se desciende por el área de estudio, los pozos situados en las cercanías del límite del sector sur, registran la perforación en materiales tipo lahar, los mismos conformados por fragmentos volcánicos sub-angulares principalmente andesíticos inmersos en una matriz limo-arcillosa; según BGS & SENARA (1988), estos depósitos son incluidos dentro de la Formación Barba y presentan producciones entre 1 a 3 L/s, con aguas de diversas calidades.

Mediante el perfil estratigráfico definido para subsuelo de la localidad y la ubicación de los niveles del agua subterránea es posible definir que el sistema acuífero está constituido por dos niveles productores principales (Unidades Hidrogeológicas); el primero de ellos corresponde con un nivel productor superficial desarrollado en lavas y brechas del Miembro Bermúdez de la Formación Hidrogeológica Barba y un segundo nivel productor profundo desarrollado en lavas fracturadas de la Formación Hidrogeológica Colima Superior. El primer nivel productor es definido en esta investigación como “Unidad Brechas y Lavas Barba”, por su parte el segundo nivel productor es nombrado “Unidad Lavas Fracturadas Colima”.

Considerando la influencia que genera el control estructural (Falla-Pliegue de Alajueta) en las condiciones hidrogeológicas hacia el sector norte y con el objetivo de definir el Índice de Vulnerabilidad Acuífera hacia este sector en particular para posteriormente generar el mapa de riesgo, en la presente investigación se realizó un estudio y análisis de la Unidad Lavas Fracturadas Colima a partir de la información con que se cuenta hacia este sector en particular

A continuación se detalla las características establecidas para cada Unidad Hidrogeológica propuesta.

4.1.1 Unidad Brechas y Lavas Barba

El primer y más superficial de los niveles se ubica en promedio entre los 20 a 50 metros bajo el nivel de suelo (m.b.n.s) y se desarrolla en lavas en su mayor parte brechosas, las cuales presentan una porosidad primaria que favorece permeabilidades moderadas. Cabe señalar que a partir de la correlación litológica efectuada mediante el análisis de los pozos, se determina que la Unidad no presenta continuidad hacia el sector norte del área de estudio, por tanto hacia este sector, los materiales de la Formación Hidrogeológica Barba están ausentes.

Las lavas brechosas son asociados al miembro Bermúdez de la Formación Hidrogeológica Barba, según BGS & SENARA (1988) estas lavas brechosas forman capas altamente permeables que permiten el movimiento del agua tanto vertical como horizontal, contribuyendo a una transmisividad total del acuífero.

A partir de los perfiles hidrogeológicos se establece para la Unidad un espesor promedio entre 20 a 30 m, sin embargo, hacia el sector suroeste del área de estudio se presentan espesores cercanos a los 40 m; asimismo en ciertos sectores y de manera localizada se presentan adelgazamientos con espesores cercanos a los 10 m.

Este acuífero es de tipo semiconfinado, ya que las lavas brechosas se encuentran limitadas superiormente por tobas del Miembro Carbonal (material sobreyacente) las cuales actúan como un acuitardo, generando

cargas de presión que sobrepasa los 20 m. Este nivel es captado por la mayoría de los pozos analizados, de manera particular es captado por los pozos que presentan profundidades no mayores a los 50 m.

El cuadro 24 resume las características básicas para la Unidad de Brechas y Lavas Barba, según la información obtenida a partir de los perfiles hidrogeológicos elaborados para el área de estudio.

Cuadro 24. Características hidráulicas Unidad Brechas y Lavas Barba.

Características	Unidad de Brechas y Lavas Barba
Litología predominante	Lavas y brechas lávicas
Profundidad del agua (Techo acuífero) m.b.n.s	20 a 50
Espesor promedio (m)	20 a 30
Grado de confinamiento	Semiconfinado
Litología Sobreyacente	Tobas (Miembro Carbonal)
Unidad Litoestratigráfica	Miembro Bermúdez (Fm Barba Inferior).
Producción por pozo (L/s)	10 a 20
Edad	Pleistoceno

Fuente: elaboración propia

Debido a que la mayor parte de los pozos registran la perforación de lavas brechosas del Miembro Bermúdez, se cuenta con información necesaria e insumos básicos para realizar un análisis detallado a fin de establecer la vulnerabilidad del acuífero mediante el método GOD.

Este primer nivel productor tiene gran relevancia en la determinación de la vulnerabilidad acuífera del distrito Central de Alajuela, debido a que corresponde con el acuífero superficial, el cual es más propenso a una eventual contaminación.

4.1.2 Unidad Lavas Fracturadas Colima

El segundo y más profundo de los niveles se localiza en promedio entre los 80 a 100 m de profundidad, desarrollándose predominantemente en lavas andesíticas fracturas asociadas a la Formación Hidrogeológica Colima Superior, no obstante, el registro litológico de los pozos ubicados hacia el sector norte revelan que estos materiales se ubican a los 55 m de profundidad.

Debido al escaso registro de pozos profundos en el área de estudio y la pobre distribución de los mismos dentro del distrito, no se cuenta con los insumos necesarios para analizar la continuidad y características

hidráulicas de esta Unidad, por lo tanto no es posible determinar los parámetros que establece el método GOD.

La información que presenta el cuadro 25 es complementada a partir del recopilo bibliográfico de estudio previos realizados en el Valle Central, especialmente las investigaciones efectuadas por BGS & SENARA entre los años de 1984 a 1987.

Cuadro 25. Características hidráulicas Unidad Lavas Fracturadas Colima.

Características	Unidad de lavas fracturadas Colima
Litología predominante	Lavas andesíticas fracturadas
Profundidad del agua (Techo acuífero) m.b.n.s	80 a 100
Espesor promedio (m)	>100
Grado de confinamiento	Confinado
Litología Sobreyacente	Flujos Piroclásticos (Fm Tiribí).
Unidad Litoestratigráfica	Fm Colima Superior e Inferior
Producción por pozo (L/s)	50 a 100
Edad	Plioceno

Fuente: elaboración propia a partir de BGS & SENARA

Con el objetivo de definir el Índice de Vulnerabilidad Acuifera para el distrito Central de Alajuela y considerando que hacia el sector norte del área de estudio la Unidad de Brechas y Lavas Barba no se encuentra en el subsuelo, se procedió a realizar para este sector en específico, un análisis de la Unidad Lavas Fracturadas Colima. Cabe señalar que el análisis se efectúa utilizando la información disponible, para este caso particular, la información que brindan los reportes de perforación de los tres pozos existentes.

Tomando en consideración la presencia de la Falla Alajuela hacia este sector, es importante analizar la influencia que tiene este control estructural en las condiciones hidrogeológicas, ya que ello, podría eventualmente incidir en la vulnerabilidad acuifera.

4.2 Parámetros método GOD

Como se mencionó anteriormente, para el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, se utilizó el método de GOD definido por Foster (1987) y modificado en varias oportunidades por Foster & Hirata.

El método se basa en determinar el Índice de Vulnerabilidad Acuifera (IVA) mediante la asignación de valores al analizar tres parámetros controladores, asociados directamente con características propias del medio acuífero.

Es importante señalar que a partir de los registros de pozos de la Base de Datos del SENARA, se considera que la información es escasa para efectos de determinar la vulnerabilidad acuifera en la Unidad Lavas Fracturadas Colima, esto debido a las limitantes en relación a la cantidad y distribución de pozos profundos que brinden información oportuna con respecto a las características y continuidad de los materiales geológicos relacionados a esta Unidad. Ante la escasa información existente, no es posible correlacionar litologías profundas a fin de determinar el tipo de litología que sobreyace al acuífero (Parámetro O), además de que no se cuenta con información suficiente en relación a la profundidad del nivel de agua (Parámetro D).

Como se mencionó anteriormente la Unidad Lavas Fracturadas Colima será analizada únicamente hacia el sector norte del área de estudio, sector donde los reportes de perforación revelan la presencia de estos materiales a una profundidad cercana a los 55 m.

Pese a que la Unidad Lavas Fracturadas Colima no será objeto de un análisis profundo en esta investigación, es oportuno señalar que según Protti & Sojo (2015) este acuífero presenta un índice de vulnerabilidad de categoría baja, puesto que corresponde con un acuífero de tipo confinado que se encuentra cubierto por unidades de tipo acuitardo de la Formación Tiribí, además de que la profundidad del nivel de agua supera los 50 m de profundidad, excepto cuando las rocas afloran en superficie en algunos sitios del cañón del río Virilla.

A partir de las limitantes anteriormente señaladas, la presente investigación se concentra y enfoca en determinar el grado de vulnerabilidad intrínseca para la Unidad Brechas y Lavas Barba, más aún, si consideramos que corresponde con el acuífero más superficial.

Los mapas fueron elaborados mediante el uso del programa ArcGIS y una vez construidos los mapas referentes a cada parámetro, se procedió mediante la herramienta “map algebra” y su aplicación “raster calculator” a efectuar una multiplicación de mapas, esto con el fin de generar el mapa de vulnerabilidad acuifera para la Unidad Brechas y Lavas Barba.

4.2.1 Grado de confinamiento acuífero (G)

A partir de los perfiles elaborados mediante los pozos registrados para el área de estudio, se determinó el grado de confinamiento del acuífero (G). Según la metodología se asigna un valor que varía entre 0 y 1, dependiendo si se trata de un acuífero confinado, semiconfinado, no confinado cubierto y no confinado sin cobertura.

La Unidad de Brechas y Lavas Barba corresponde principalmente con un acuífero de tipo semiconfinado, ya que lo sobreyace una capa de tobas asociadas al Miembro Carbonal, el cual según Echandi (1981) actúa como un acuitardo debido a la bajas permeabilidades presentes; considerando los valores que establece la metodología se asignó un valor de 0,4.

En las cercanías de los ríos Alajuela y Ciruelas, se determina que el acuífero se encuentra cubierto por una capa de tobas fuertemente alteradas, las cuales presentan un menor espesor, que varía entre 5 a 8 m, ante lo anterior y considerando el escenario más crítico posible, se define que el acuífero hacia estos sectores presenta un comportamiento de tipo libre cubierto, por tanto se asignó un valor de 0,6.

La Unidad Lavas Fracturadas Colima se encuentra cubierta por tobas e ignimbritas de la Formación Tiribí, estos materiales catalogados como acuitardos suelen presentarse compactos y soldados, por tal razón podría considerarse que el acuífero desarrollado en las lavas fracturadas es del tipo confinado; sin embargo, la presencia de la Falla Alajuela y un fallamiento secundario asociado a esta, podría generar un fracturamiento destacable el cual modifique las condiciones de permeabilidad y transmisividad en los materiales de la Formación Tiribí, por lo anterior se establece que el acuífero se localiza entre tipo semiconfinado y libre cubierto, por lo que se asigna un valor de 0,5.

Cabe indicar que para establecer el grado de confinamiento del acuífero, se ha considerado como parte de los criterios, los resultados obtenidos en relación a la profundidad a la que se encuentra el nivel de agua (ver figura 35).

El mapa de la figura 31 muestra los valores obtenidos para el parámetro G.

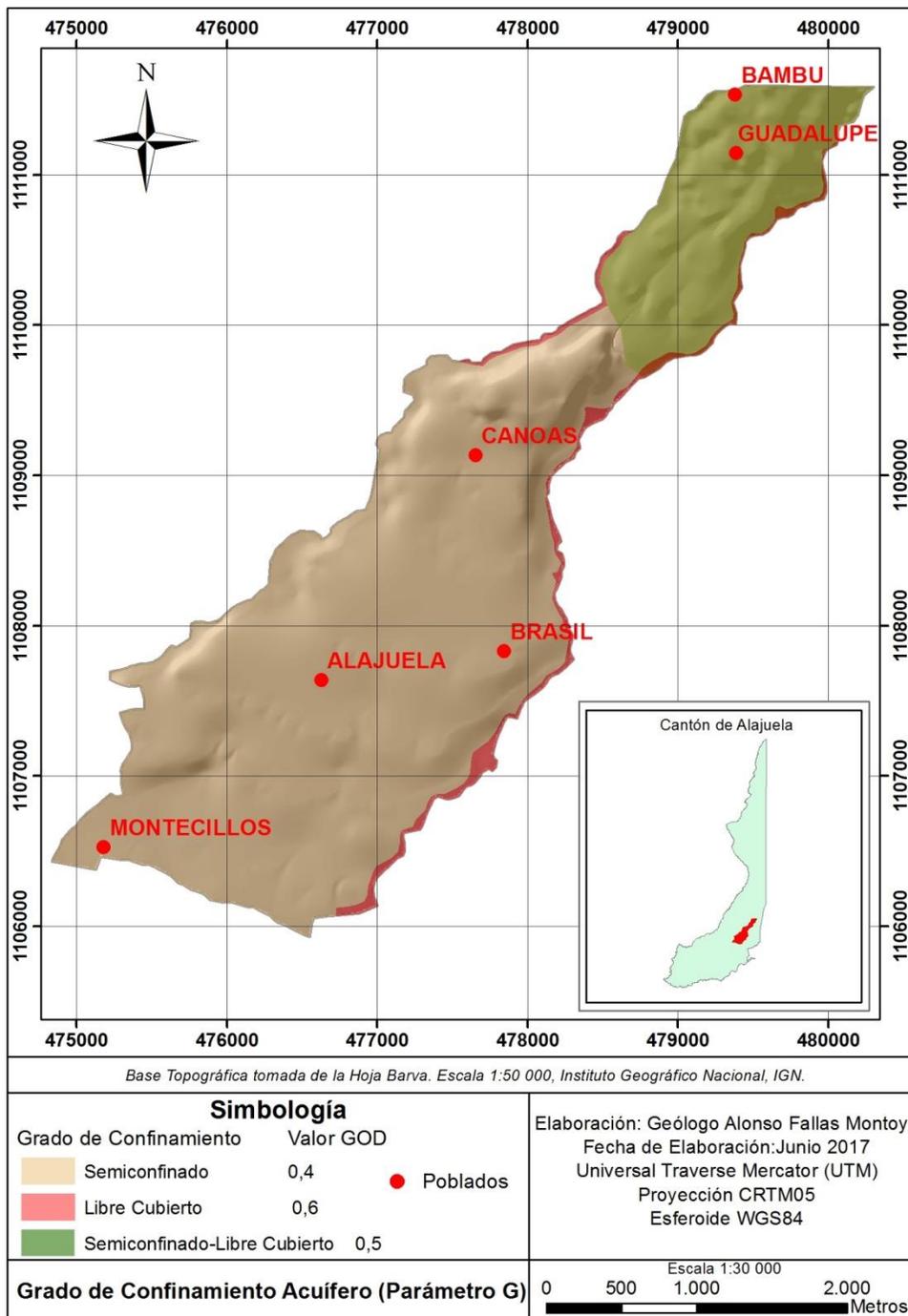


Figura 31: Grado de confinamiento acuífero (Parámetro G). Elaboración propia.

4.2.2 Litología sobreyacente (parámetro O)

La litología sobreyacente hace referencia al tipo de litología que cubre al acuífero en estudio, por lo tanto corresponde con los materiales a través de los cuales ocurre la infiltración, según el tipo de cobertura se asignan valores de entre 0,4 y 1 a este parámetro.

Para determinar la litología que sobreyace a la Unidad de Brechas y Lavas Barba, se recurre a la información suministrada por los pozos y la interpretación efectuada a partir de los perfiles hidrogeológicos elaborados.

En general, se determina que la Unidad de Brechas y Lavas Barba se encuentra cubierta en toda el área de estudio por tobas pertenecientes al Miembro Hidrogeológico Carbonal, por lo tanto considerando la clasificación propuesta se asignó un valor de 0,6.

Estas tobas presentan variaciones significativas en sus espesores, ya que según BGS & SENARA (1988) estos materiales producto de emisiones de caída volcánica rellenan topografías preexistentes, a partir de los perfiles elaborados, se estima que las tobas que sobreyacen al acuífero, presentan en promedio un espesor del orden de entre 15 a 25 m.

La Unidad de Lavas Fracturadas Colima se encuentra cubierta por tobas e ignimbritas de la Formación Tiribí, materiales que suelen presentarse compactos, sin embargo debido a la presencia de la falla Alajuela y un fallamiento secundario en el sector norte del área de estudio, estos materiales podrían eventualmente presentar una porosidad secundaria importante debido al fracturamiento, situación que incrementaría el grado de vulnerabilidad; por lo anterior y con el fin de considerar el escenario más crítico posible, se establece que la litología sobreyacente presenta un valor de 0,8.

Según los reportes de perforación de los pozos existentes, es posible establecer que las tobas e ignimbritas de la Formación Tiribí, presentan hacia el sector norte, un espesor que varía entre los 35 a 38 m.

El mapa de la figura 32 muestra los valores obtenidos para el parámetro O.

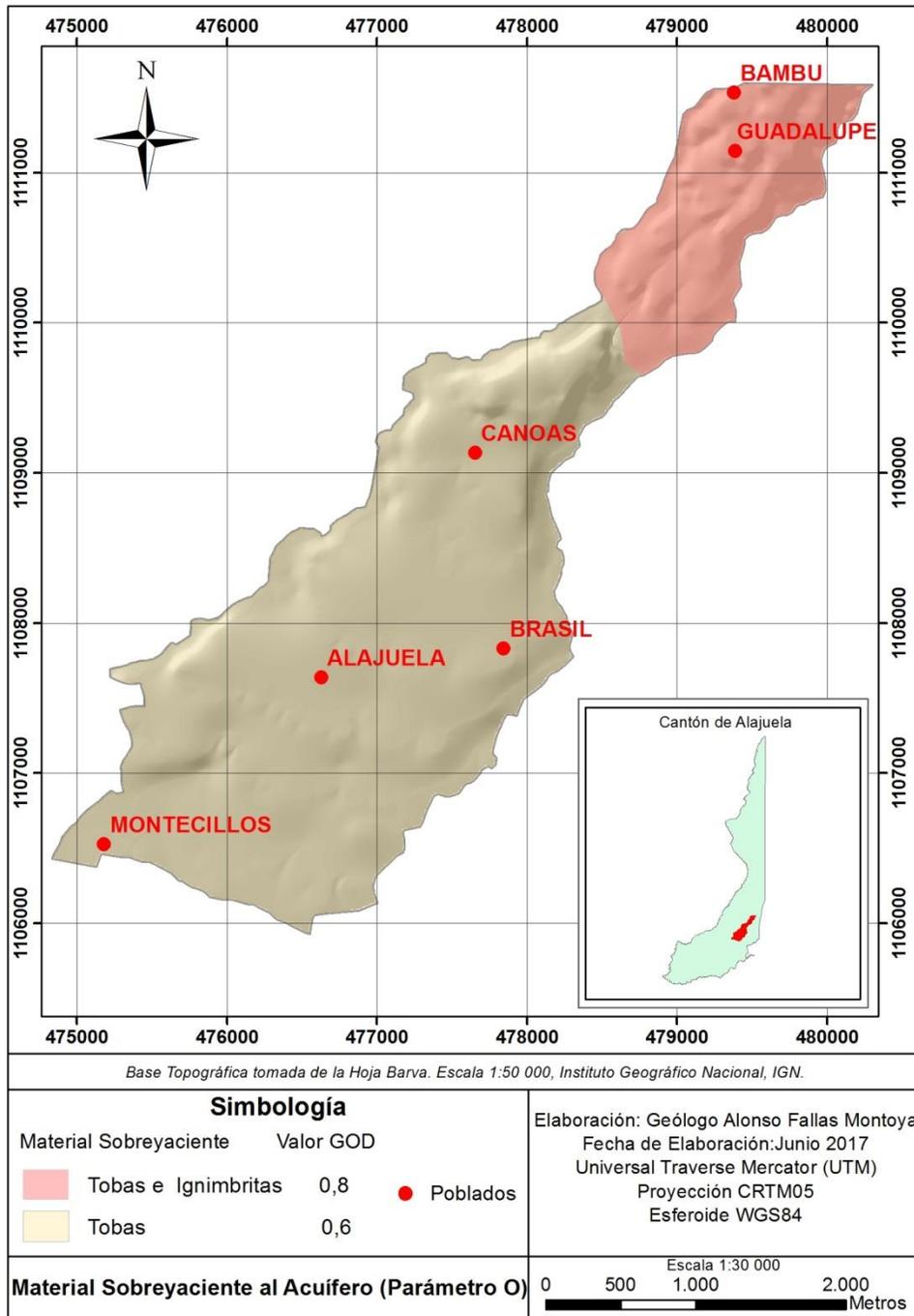


Figura 32: Litología sobreyacente al acuífero (Parámetro O). Elaboración propia.

4.2.3 Profundidad del nivel de agua (D)

La profundidad del nivel de agua, hace referencia a la profundidad del nivel de saturación, cabe indicar que para efectos de la determinación de este parámetro, se consideró al techo del acuífero como la profundidad de ubicación del nivel de agua y no el nivel piezométrico que registran los pozos.

Considerando que la Unidad de Brechas y Lavas Barba presenta una variación considerable en sus espesores, es de esperar que el nivel de saturación presente un grado de fluctuación destacable, por lo tanto, a partir de los perfiles litológicos de los pozos registrados del área de estudio, se procede a elaborar un mapa de isolíneas en relación a la elevación del techo del acuífero.

Para generar las isolíneas se empleó el programa Surfer versión 10, en particular, para la interpolación de los datos se utilizó el método nombrado “triangulación e interpolación lineal”, ya que este método generó los mejores resultados en función a la distribución de los datos que se tenían inicialmente. El algoritmo del método de interpolación crea triángulos dibujando las líneas entre los puntos de los datos.

En general las isolíneas de elevación del techo del acuífero generadas para la Unidad de Brechas y Lavas Barba, tienden a presentar una dirección preferencial noroeste-sureste

A partir de la escasa información existente para la Unidad de Lavas Fracturadas Colima, en donde solamente se cuenta con datos de tres pozos (BA-524, BA-368, BA-335), no es posible crear isolíneas de elevación del techo del acuífero, por tanto para el caso particular de esta Unidad, la profundidad del nivel de agua se determinó a partir de los registros litológicos que brindan los pozos. Analizando la información que brindan los pozos, se define que el techo del acuífero de la Unidad Lavas Fracturadas Colima se ubica a los 55 m de profundidad.

El mapa de la figura 33 muestra los resultados obtenidos en relación a las isolíneas de elevación del techo del acuífero para la Unidad de Brechas y Lavas Barba, además en el sector norte se muestra las profundidades calculadas.

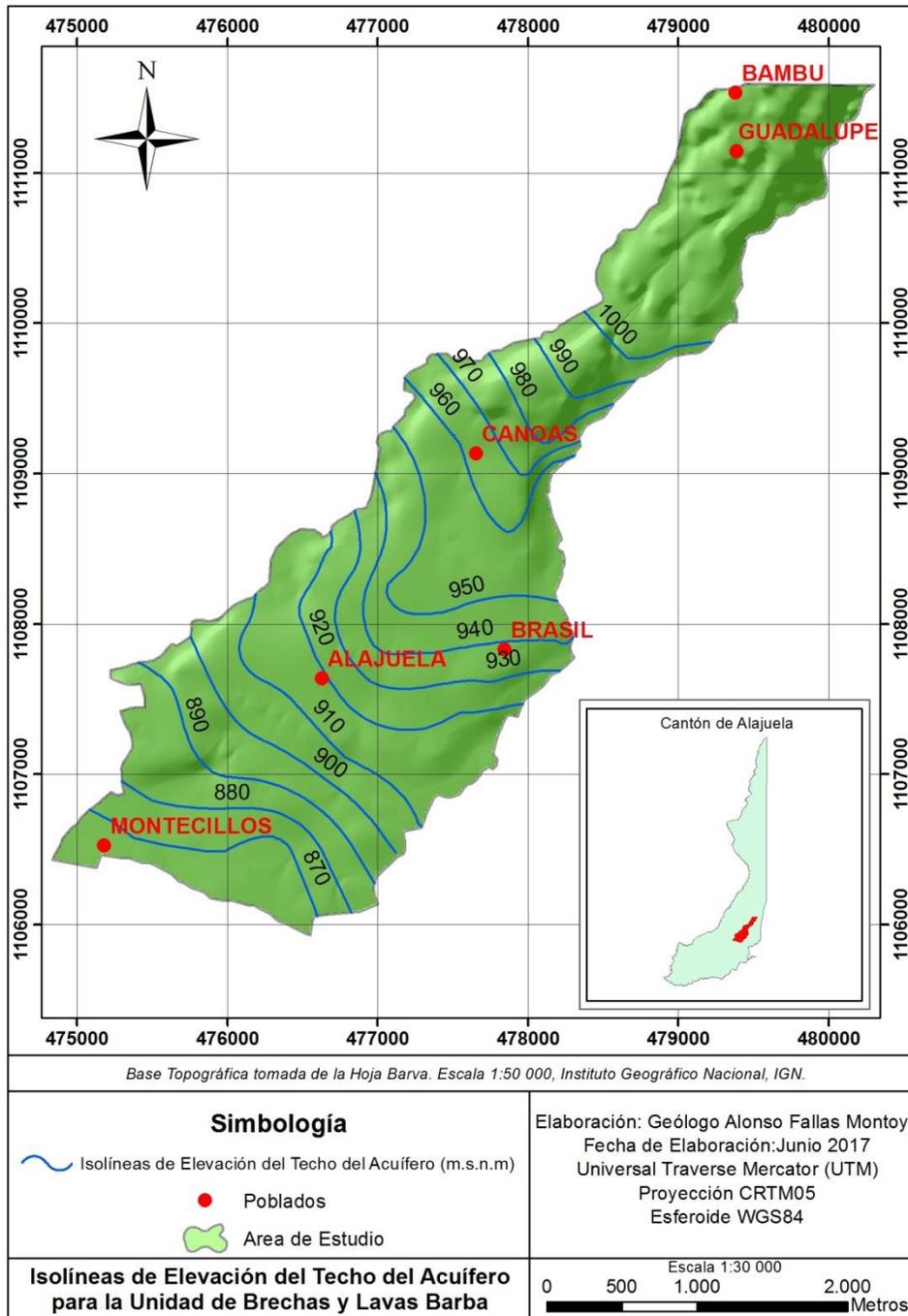


Figura 33: Isolíneas de elevación del techo, Unidad de Brechas y Lavas Barba. Elaboración propia.

Considerando las isólinas del mapa de la figura 33, es posible determinar la dirección del flujo de agua subterránea para el área de estudio, para ello se trazó líneas perpendiculares a las isólinas previamente generadas, ver figura 34.

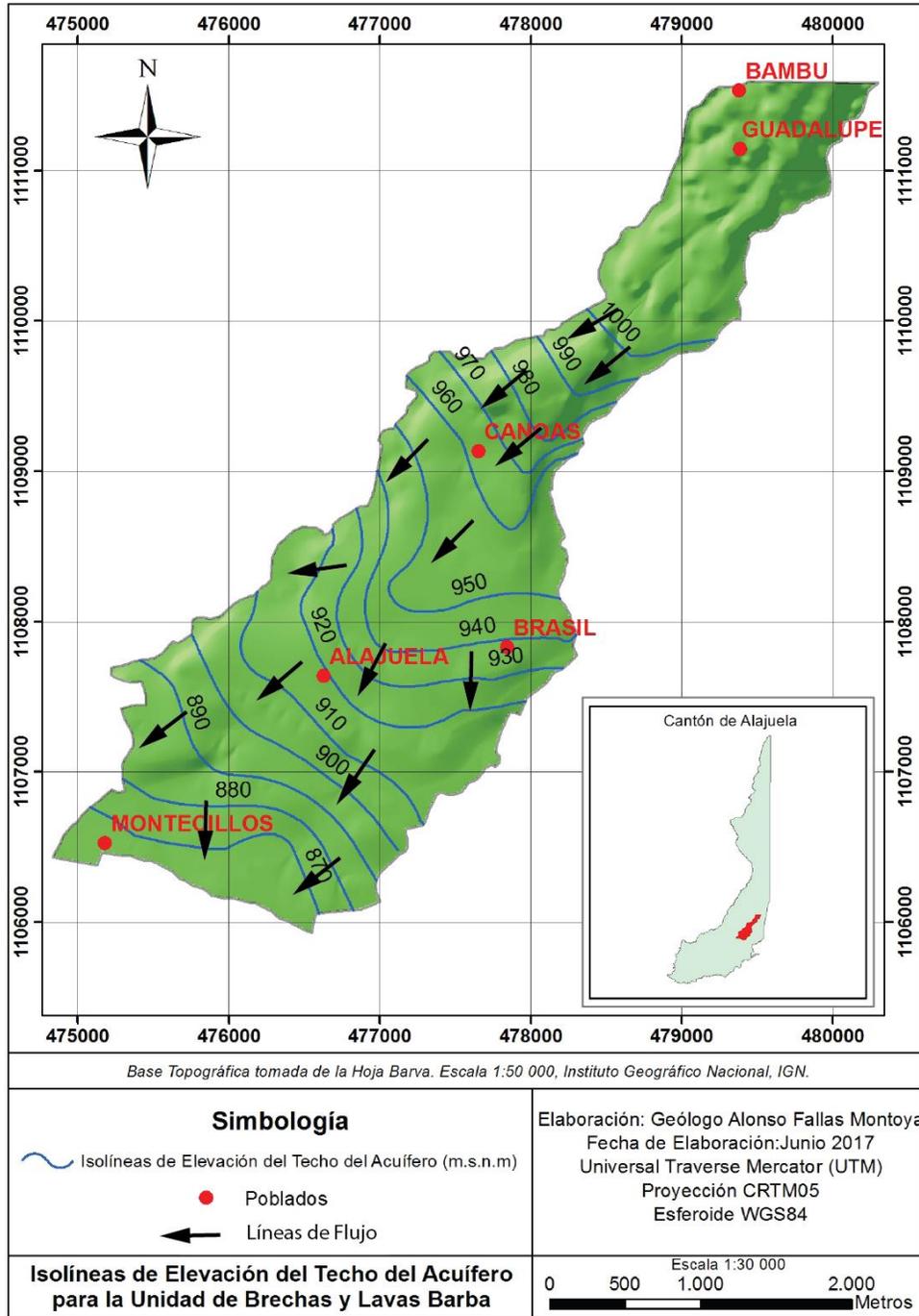


Figura 34: Líneas de Flujo para Unidad de Brechas y Lavas Barba. Elaboración propia.

A partir del mapa de la figura 34 se establece que el flujo de agua subterránea procede del sector noreste del área de estudio, tales resultados coinciden perfectamente con las direcciones de flujo establecidas por BGS & SENARA (1988) para el acuífero Barba.

Mediante el mapa de isolíneas de la figura 33, se efectuó por medio del programa ArcGIS un Modelo de Elevación Digital (DEM) referente a las elevaciones a las cuales se localiza el techo del acuífero. Cabe indicar que para el caso de la Unidad de Lavas Fracturadas Colima, se consideró que el techo del acuífero se ubica a 55 metros bajo el nivel de superficie.

Una vez que se determina la elevación a la cual se localiza el techo del acuífero, se procedió a utilizar la herramienta “map algebra” y su aplicación “raster calculator”, esto con el propósito de efectuar una resta entre las elevaciones del terreno registradas en el mapa de la figura 6 elaborado a partir de las curvas de nivel del área de estudio y las elevaciones registradas referentes al techo del acuífero, a partir de las isolíneas de elevación del techo.

Como resultado de la resta de los Modelos de Elevación Digital, es posible obtener un mapa que registra la profundidad en la que se ubica el agua subterránea, lo cual permite establecer el parámetro D que define el método GOD. La ecuación 11 muestra la forma en que es calculada la profundidad del agua:

$$\text{Profundidad del nivel de agua} = \text{Elevación del Terreno} - \text{Elevación del Techo del Acuífero} \quad \text{Ecuación 11}$$

Cabe indicar que los rangos de profundidad fueron agrupados considerando los intervalos que establece el método GOD, para posteriormente asignar un valor que varía entre 0,6 para profundidades mayores de 50 m y 0,9 para profundidades menores a 5 m.

Mediante el mapa de la figura 35 es posible evidenciar que en la mayor parte del área de estudio, el nivel de agua subterránea se localiza entre los 20 a 50 m.b.n.s. por lo que se asignó para estos sectores un valor de 0,7; hacia las inmediaciones a los cauces de los ríos Ciruelas y Alajuela, se establece que el nivel de agua se localiza entre los 0 a 5 m, esto debido a que el espesor de la capa de tobas sobreyacente presenta reducciones en sus espesores; considerando la cercanía del nivel de agua con respecto a la superficie del terreno, se potencializa el riesgo de contaminación, para este caso, el valor establecido en los sectores cercanos a los cauces es de 0,9.

Al alejarse de los cauces de los ríos, el nivel de agua subterránea tiende a localizarse a una mayor profundidad, el rango se establece entre los 5 a 20 m.b.n.s., por lo que se asigna un valor de 0,8.

En los sectores con elevaciones superiores a los 1065 m.s.n.m., el agua subterránea se localiza a profundidades mayores a los 50 m, por tanto, el valor establecido según el método GOD es de 0,6. Esta condición se presenta hacia el sector norte del área de estudio, sector donde las Unidades Hidrogeológicas establecidas, se encuentran cubiertas por espesores considerables de tobas e ignimbritas.

A partir del mapa de la figura siguiente, es posible señalar que la mayor susceptibilidad ante una eventual contaminación ocurre en los sectores cercanos a los cauces de los ríos, esto debido a que el espesor de tobas que recubre la Unidad Brechas y Lavas Barba muestra adelgazamientos, lo que provoca que el acuífero se encuentre a una menor profundidad.

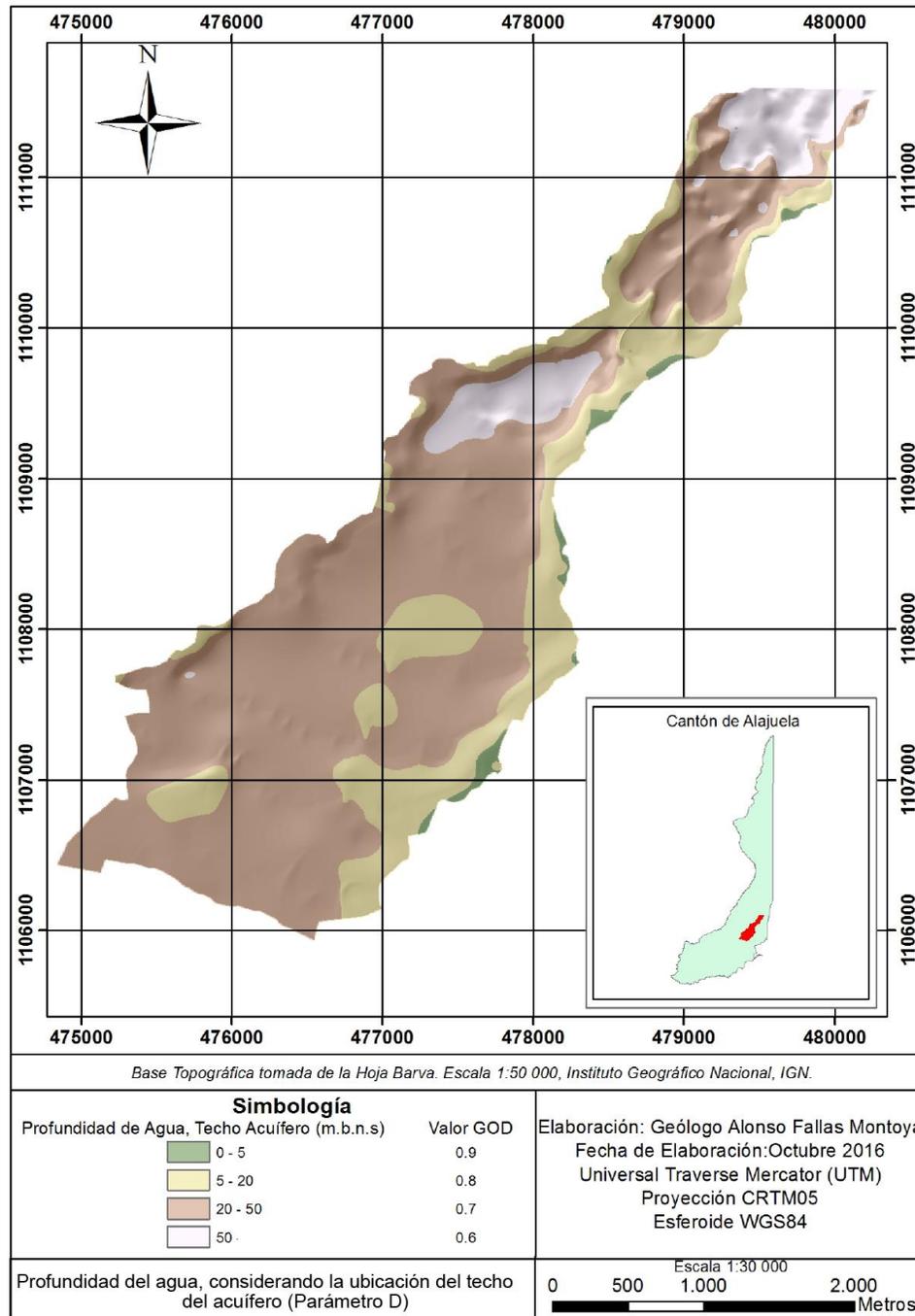


Figura 35: Profundidad del nivel de agua. Elaboración propia.

4.3 Determinación de la vulnerabilidad intrínseca

Una vez asignados los valores para cada uno de los parámetros del método GOD, se procede a multiplicar los valores obtenidos, esto con el propósito de obtener el Índice de Vulnerabilidad Acuífera (I.V.A) y de esta manera generar un mapa que evidencie el grado de vulnerabilidad existente para la Unidad de Lavas y Brechas Barba.

En las zonas donde la Unidad de Lavas y Brechas Barba, se encuentra cubierto por un espesor considerable de tobas compactas, el acuífero en cuestión es clasificado como tipo semiconfinado, por lo que el valor G corresponde a $G=0,4$; por su parte para el análisis del parámetro O, la metodología establece para las tobas volcánicas que se encuentran cubriendo al acuífero un valor $O=0,6$.

Por lo anterior, en las zonas donde el acuífero se encuentre cubierto por un espesor considerable de tobas, el índice de vulnerabilidad acuífera puede tener un valor máximo de $I.V.A = 0,4 \times 0,6 \times 0,9 = 0,216$ esto para zonas donde el nivel de saturación se localiza a menos de 5 m de profundidad ($D=0,9$); asimismo el valor mínimo posible de $I.V.A = 0,4 \times 0,6 \times 0,6 = 0,144$ es calculado para las zonas donde el nivel de saturación supera los 50 m de profundidad ($D=0,6$). Ante los valores de I.V.A señalados, la vulnerabilidad es clasificada como Baja.

Para el caso donde la Unidad Brechas y Lavas Barba se encuentre cubierta por un espesor reducido de tobas, el acuífero es clasificado como tipo libre cubierto, ante ello, el valor G corresponde a $G=0,6$; mientras que el valor asignado para el parámetro O se mantiene, en un valor de $O=0,6$.

De esta forma, en los sectores donde el acuífero se encuentre cubierto por un espesor reducido de tobas, el índice de vulnerabilidad acuífera puede alcanzar un valor máximo de $I.V.A = 0,6 \times 0,6 \times 0,9 = 0,324$ esto para zonas donde el nivel de saturación se localiza a menos de 5 m de profundidad ($D=0,9$); por su parte el mínimo valor de $I.V.A = 0,6 \times 0,6 \times 0,6 = 0,216$ se determina para el caso donde el nivel de saturación se localice a una profundidad mayor de 50 m ($D=0,6$).

Ante los valores de I.V.A presentados en el párrafo anterior, es posible indicar que la vulnerabilidad hacia estos sectores del área de estudio (cercanías de los cauces de los ríos) es clasificada como Moderada, esto por cuanto, el nivel de saturación se localiza a escasos metros de profundidad (menor a 5 m), asociado al menor espesor en las tobas que cubren al acuífero.

Para clasificar como alta la vulnerabilidad dentro del área de estudio es necesario que la Unidad Brechas y Lavas Barba aflore en superficie y que el nivel de saturación se localice entre los 5 a 20 m de profundidad, por

su parte, para clasificar como extrema la vulnerabilidad a la contaminación, es necesario que esta Unidad aflore en superficie y que el nivel de saturación se localice a menos de 5 m de profundidad; si bien es cierto que durante las vistas de campo no fue posible evidenciar el afloramiento de la Unidad Brechas y Lavas Barba en superficie, no se descarta que tal situación se dé en ciertos sectores específicos dentro del área de estudio, esto debido a la variación del espesor de los materiales suprayacentes.

Para el caso de la Unidad de Lavas Fracturadas Colima, al estar cubierta la Unidad por un espesor considerable de tobas e ignimbritas compactas y soldadas que actúan como acuitardos, pero a su vez, pueden estos materiales presentar alguna porosidad secundaria destacable producto del control estructural que impera en el sector, se asigna para el parámetro G un valor de $G=0,5$ (es decir un acuífero intermedio entre el tipo semiconfinado y el libre cubierto). Para el análisis del parámetro O, se establece un valor de $O=0,8$ esto al considerar que la litología sobreyacente corresponde con tobas e ignimbritas que eventualmente podrían estar fracturadas, incrementando el grado de permeabilidad.

Considerando que hacia el sector norte del área de estudio, el nivel de saturación dentro de la Unidad se encuentra en promedio a una profundidad entre 50 a 55 m, se asigna para el parámetro D un valor de $D=0,7$.

Una vez establecidos los valores para cada parámetro que establece la metodología GOD, el índice de vulnerabilidad acuífera para la Unidad de Lavas Fracturadas Colima presenta un valor de $I.V.A = 0,5 \times 0,8 \times 0,6 = 0,240$ ante el valor obtenido, se establece una vulnerabilidad Baja.

BGS & SENARA (1988) determinan que en las áreas del Valle Central donde las lavas y brechas altamente permeables afloran en superficie y especialmente donde ellas forman los lechos de los ríos, deben de ser consideradas como de vulnerabilidad muy alta a la contaminación; además se establece que en los sectores donde un espesor significativo de tobas cubre el acuífero, el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas disminuye, estando limitado los contaminantes más móviles y persistentes. A partir de lo señalado, es posible evidenciar que los resultados obtenidos en esta investigación concuerdan perfectamente con las anotaciones y observaciones efectuadas por BGS & SENARA para el Valle Central (ver figura 36).

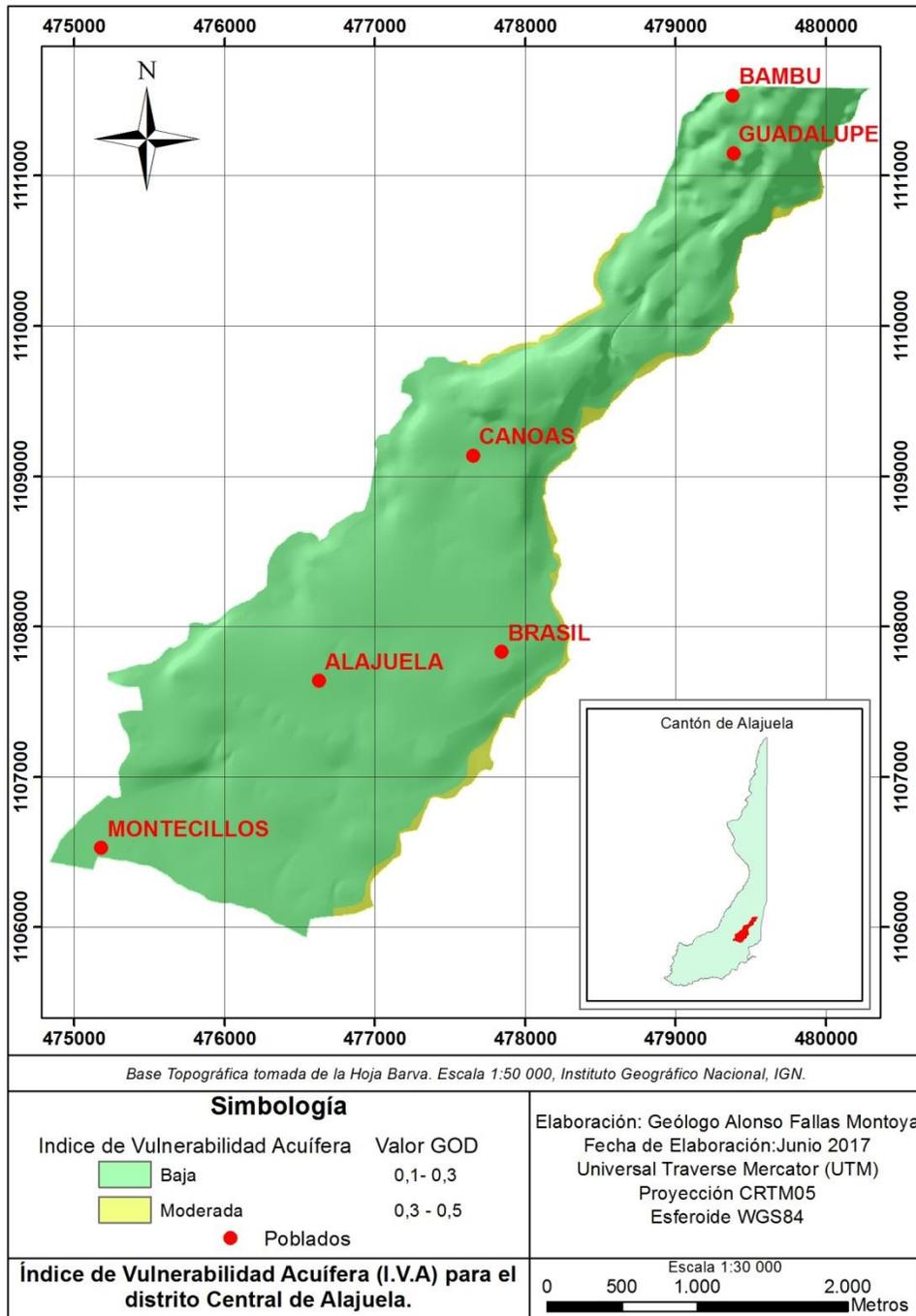


Figura 36: Índice de Vulnerabilidad Acuifera para el distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

5. Inventariado de cargas contaminantes

Para caracterizar la carga contaminante existente en el distrito Central de Alajuela se realizaron visitas de campo con el propósito de identificar y localizar las potenciales cargas de contaminación, aunado a ello y a

modo de respaldo, se empleó imágenes satelitales a fin de ubicar actividades comerciales e industriales que se desarrollan y se extienden por el distrito.

La carga contaminante está relacionada directamente con las actividades antrópicas que se desarrollan en la superficie del terreno. El distrito Central de Alajuela se encuentra ocupado por un amplio desarrollo urbano, comercial e industrial, actividades que se concentran principalmente en el sector central y sur del área de estudio, ocupando el 70% de la superficie del distrito.

Pese a que en el sector norte del distrito Central de Alajuela existe un menor desarrollo urbano y la densidad poblacional es menor, predomina la actividad agrícola caracterizada por la presencia de terrenos dedicados al cultivo de plantaciones de café, situación que conlleva al uso de agentes químicos, los cuales representan una amenaza para la calidad del agua subterránea.

Desde el punto de vista teórico, Foster & Hirata (1988) determinan que la carga contaminante generada por la actividad antrópica hacia el subsuelo, tiene cuatro características fundamentales:

- Clase de contaminante involucrado, definido por la persistencia en el ambiente subterráneo y el retardo relacionado con el flujo de agua subterránea.
- Intensidad de la contaminación, definida como la concentración probable del contaminante en relación a los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Modo en que el contaminante es descargado al suelo, definido por la carga hidráulica, la descarga del contaminante y la profundidad debajo de la superficie del terreno en que el contaminante es ingresado o generado.
- Duración de aplicación de la carga contaminante, definida por la probabilidad de descarga (intencional o accidental) y por el período durante el cual la carga será aplicada.

Para cada actividad potencialmente contaminante es ideal contar con información referente a cada una de las características anteriormente mencionadas, sin embargo obtener dicha información es complejo de alcanzar, más aun si se toma en cuenta la diversidad y la densidad en relación a la cantidad de posibles fuentes de contaminación

Debido a la imposibilidad de controlar todas las cargas contaminantes, es necesario emplear un método capaz de identificar aquellas fuentes que presentan la mayor probabilidad de generar una severa carga contaminante; por tal razón en la presente investigación, las cargas contaminantes son clasificadas de

acuerdo a su distribución espacial (fuentes difusas o puntuales) y posteriormente son evaluadas mediante el método POSH.

Las fuentes de contaminación difusa no generan plumas de contaminación definidas, por lo general impactan un área y por lo tanto un volumen mayor del acuífero; por su parte las fuentes de contaminación puntual, producen plumas claramente definidas y concentradas, las cuales facilitan su identificación (Foster et al., 2002).

5.1 Método POSH

El método POSH permite evaluar y caracterizar la carga contaminante, a partir de dos características fácilmente estimables: el origen del contaminante (Pollutant Origin) y su sobrecarga hidráulica (Surcharge Hydraulically) (Foster et al., 2002). Es importante señalar que en la presente investigación se utilizó el método POSH debido a que este método simplifica la clasificación de las cargas contaminantes y está asociado al método de vulnerabilidad GOD, empleado en el capítulo 4.

Según la clasificación de las fuentes de contaminación, el método POSH genera tres niveles cualitativos de potencial de generación de una carga contaminante al subsuelo: Reducido, Moderado y Elevado (Foster et al., 2002). Las figuras número 3 y 4 establecen la manera de clasificación y categorización de las potenciales fuentes de contaminación a partir del método POSH.

A continuación se presenta la clasificación y categorización de las fuentes de contaminación puntual y difusa, de acuerdo al método POSH.

5.1.1 Clasificación y categorización de las fuentes puntuales según el método POSH

A partir del denso desarrollo urbano, industrial y comercial existente en el distrito Central de Alajuela, las visitas de campo efectuadas se enfocaron en identificar y ubicar aquellas fuentes que presentan las mayores probabilidades de generar una severa carga contaminante, considerando para ello, las características propias de las actividades humanas que se desarrollan y la dimensión de las estructuras en las cuales estas actividades se desenvuelven.

Las actividades antrópicas dentro del distrito son diversas y presentan características particulares, ante ello, es de esperar que ciertas actividades tengan un mayor impacto negativo hacia el subsuelo que otras, de ahí la necesidad de realizar un inventariado estricto y eficiente de las potenciales fuentes puntuales de contaminación.

El método POSH clasifica las actividades industriales según el tipo de producto químico utilizado y residuos que se manipulan; ante ello, se establecen tres tipos de industrias, siendo la industria tipo 1 la de menor impacto, la industria tipo 2 de impacto moderado y la industria tipo 3 de impacto elevado (Foster et al., 2002).

Entre las industrias tipo 1, el método POSH incluye las fábricas de alimentos y bebidas, actividades asociadas a la carpintería y los cementerios, estas actividades son clasificadas como de potencial reducido; las industrias tipo 2, hace referencia a las fábricas de caucho, papel, fertilizantes, detergentes, las gasolineras y terminales de transporte; por su parte entre las fuentes de potencial de contaminación elevado, las industrias de tipo 3 incluye los talleres mecánicos, manufacturas de plásticos, productos farmacéuticos-químicos y procesamiento de metales.

Cabe indicar que el método POSH no es un sistema rígido de clasificación, al contrario este método puede ser adaptado a la zona de estudio, según el nivel de detalle requerido, el tamaño del área de estudio, la disponibilidad de información y el financiamiento económico (Espinoza, 2003).

Por lo anterior y con el objetivo de afinar la clasificación de las potenciales fuentes puntuales de contaminación, las actividades de tipo comercial que incluye supermercados y centros comerciales son incluidas y categorizadas, empleando el método POSH.

Al igual que las actividades industriales, las actividades comerciales identificadas son categorizadas según el potencial de contaminación, como parte de los criterios para la clasificación, se considera el área ocupada y el posible impacto de estas actividades sobre el subsuelo, a partir de las características de los servicios que ofrecen y la cantidad de personas que estas actividades concentran.

El cuadro 26 muestra las potenciales fuentes puntuales de contaminación identificadas dentro del área de estudio, cada una de las fuentes es clasificada bajo el método POSH estableciendo la categoría de potencial de contaminación y su correspondiente valor de índice de contaminación asignado.

Cuadro 26. Inventariado de las potenciales fuentes puntuales de contaminación identificadas en el distrito Central de Alajuela.

	Nombre	Actividad	Coordenadas CRTM05		Clasificación POSH	Potencial de Contaminación	Valor Asignado Índice de Contaminación
			Y	X			
1	Aserradero Vijosol	Aserradero	1107402	475514	Industria Tipo 1	Reducido	1
2	Cementerio General	Cementerio	1107626	475878	Industria Tipo 1	Reducido	1
3	La Única Jaleas	Fábrica de Alimentos	1108202	477329	Industria Tipo 1	Reducido	1
4	La Libertad	Fábrica de Alimentos	1107880	476903	Industria Tipo 1	Reducido	1
5	Pasta Roma	Fábrica de Alimentos	1106799	476540	Industria Tipo 1	Reducido	1
6	Mercado Central Alajuela	Mercado	1107527	476360	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
7	Mas x Menos	Supermercado	1106833	476902	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
8	Jumbo	Supermercado	1107036	476549	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
9	maxi pali monterillo	Supermercado	1107144	475593	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
10	El Rey	Supermercado	1107583	475745	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
11	Megasuper	Supermercado	1107518	476561	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
12	Pali	Supermercado	1107561	476223	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
13	Mas x Menos	Supermercado	1107586	476351	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
14	Super Tico	Supermercado	1107588	477088	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
15	Pali	Supermercado	1108153	477159	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
16	Canoas	Supermercado	1109704	477518	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
17	Almacén El Rey	Supermercado	1106633	476491	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
18	Pequeño Mundo	Supermercado	1107500	475523	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
19	AMPM	Supermercado	1107404	476385	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
20	Mi Hogar	Supermercado	1107610	476948	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
21	Plaza Ferias	Supermercado	1107190	475803	Act. Comercial Tipo 1	Reducido	1
22	Gasolinera Shell	Gasolinera	1106722	477164	Industria Tipo 2	Moderado	2
23	Gasolinera La Tropicana	Gasolinera	1107130	476987	Industria Tipo 2	Moderado	2
24	Gasolinera Delta	Gasolinera	1106983	476531	Industria Tipo 2	Moderado	2
25	Gasolinera Delta	Gasolinera	1107223	476951	Industria Tipo 2	Moderado	2
26	Gasolinera Ali	Gasolinera	1107383	475739	Industria Tipo 2	Moderado	2
27	Gasolinera Cristo Rey	Gasolinera	1107478	475718	Industria Tipo 2	Moderado	2
28	Gasolinera Santa Anita	Gasolinera	1107358	476031	Industria Tipo 2	Moderado	2
29	Gasolinera Nasa	Gasolinera	1110828	479085	Industria Tipo 2	Moderado	2
30	Quica	Lavacar	1106876	476263	Industria Tipo 2	Moderado	2
31	La Agonía	Lavacar	1107668	477037	Industria Tipo 2	Moderado	2
32	Hangar 506	Lavacar	1107942	476903	Industria Tipo 2	Moderado	2
33	Ecowash	Lavacar	1107581	476480	Industria Tipo 2	Moderado	2
34	La Corte	Lavacar	1107970	476428	Industria Tipo 2	Moderado	2
35	Price Smart	Supermercado	1107104	475508	Act Comercial Tipo 2	Moderado	2

36	Construplaza	Supermercado	1106925	476342	Act Comercial Tipo 2	Moderado	2
37	Terminal Tuasa	Terminal de Bus	1107457	475745	Industria Tipo 2	Moderado	2
38	Terminal de bus Poas	Terminal de Bus	1107352	476144	Industria Tipo 2	Moderado	2
39	Terminal de bus Vol.Poás	Terminal de Bus	1107380	476242	Industria Tipo 2	Moderado	2
40	Terminal Tuasa Heredia	Terminal de Bus	1107488	476278	Industria Tipo 2	Moderado	2
41	Terminal Grecia - Sarchí	Terminal de Bus	1107481	476114	Industria Tipo 2	Moderado	2
42	Terminal Guácima	Terminal de Bus	1107340	476260	Industria Tipo 2	Moderado	2
43	Terminal San Rafael	Terminal de Bus	1107315	476363	Industria Tipo 2	Moderado	2
44	Terminal Atenas	Terminal de Bus	1107389	476242	Industria Tipo 2	Moderado	2
45	Terminal Sabanilla	Terminal de Bus	1107420	476303	Industria Tipo 2	Moderado	2
46	Terminal Montecillos	Terminal de Bus	1107331	476165	Industria Tipo 2	Moderado	2
47	Terminal Carrillos	Terminal de Bus	1107524	476147	Industria Tipo 2	Moderado	2
48	Terminal Central Norte	Terminal de Bus	1106866	476637	Industria Tipo 2	Moderado	2
49	City mall	Centro Comercial	1106396	476817	Act Comercial Tipo 3	Elevado	3
50	Mall internacional	Centro Comercial	1106516	476683	Act Comercial Tipo 3	Elevado	3
51	Plaza Real Alajuela	Centro Comercial	1107195	477310	Act Comercial Tipo 3	Elevado	3
52	Corazón de Jesús	Centro Comercial	1107579	476275	Act Comercial Tipo 3	Elevado	3
53	Multicentro La Estación	Centro Comercial	1106845	476610	Act Comercial Tipo 3	Elevado	3
54	Marcial Rodríguez	Clínica	1108414	477646	Industria Tipo 3	Elevado	3
55	Hospital San Rafael	Hospital	1106661	476841	Industria Tipo 3	Elevado	3
56	Hospital San Miguel	Hospital	1107647	476227	Industria Tipo 3	Elevado	3
57	Antiguo Hospital Alajuela	Hospital	1108022	476509	Industria Tipo 3	Elevado	3
58	Motos Alajuela	Taller Mecánico	1107078	476689	Industria Tipo 3	Elevado	3
59	Auto Pits	Taller Mecánico	1107328	475913	Industria Tipo 3	Elevado	3
60	Rapifibras	Taller Mecánico	1107831	477012	Industria Tipo 3	Elevado	3
61	Taller Oviedo	Taller Mecánico	1107904	477250	Industria Tipo 3	Elevado	3
62	Servitotal	Taller Mecánico	1107036	475456	Industria Tipo 3	Elevado	3
63	Súper Servicio	Taller Mecánico	1107503	475669	Industria Tipo 3	Elevado	3
64	Lubricentro Rey	Taller Mecánico	1108851	477549	Industria Tipo 3	Elevado	3
65	Lubricentro Brasil	Taller Mecánico	1107916	478166	Industria Tipo 3	Elevado	3
66	Taller Tuasa	Taller Mecánico	1106688	477307	Industria Tipo 3	Elevado	3
67	Centro de Servicio La Radial	Taller Mecánico	1106879	476567	Industria Tipo 3	Elevado	3

Fuente: elaboración propia

A partir del inventariado de las potenciales fuentes puntuales de contaminación, es posible indicar que las actividades que se desarrollan dentro del área de estudio presentan un potencial de contaminación diverso, esto por cuanto a la variedad de tipos de productos químicos y residuos que se manipulan, además de las concentraciones y volúmenes empleados.

Entre las fuentes puntuales de contaminación con potencial reducido existentes dentro del área de estudio, se presentan fábricas dedicadas a la manufactura de productos alimenticios, entre ellas fábricas dedicadas a la elaboración de pastas, cajetas, entre otros.

Dentro de la categoría de potencial reducido se incluyó también las actividades comerciales de tipo 1, las cuales comprenden supermercados que presentan una infraestructura menor, ocupando un área relativamente reducida. Estos supermercados se localizan principalmente en el centro del distrito.

El método POSH incluye entre la categoría de potencial reducido los cementerios, ya que según Foster et al. (2002) este tipo de actividad genera en su mayoría cargas contaminantes microbiológicas en un área restringida, por lo anterior, el Cementerio General de Alajuela fue clasificado dentro de esta categoría, cabe indicar que el Cementerio General es el único cementerio que se localiza dentro del área de estudio. Según Espinoza (2003) la carga contaminante generada por los cementerios se ve reducida si los terrenos son impermeabilizados y se emplean ataúdes resistentes a la corrosión.

Para el caso de las actividades con potencial de contaminación moderado, el método POSH establece entre esta categoría las gasolineras (Foster et al., 2002). Dentro del distrito Central de Alajuela se identificaron un total de ocho gasolineras, ubicadas en puntos estratégicos dentro del centro urbano a fin de suplir la demanda de combustible y otros servicios. Según Fetter (1988), las gasolineras son responsables de un gran número de casos de contaminación del agua subterránea, principalmente debido a fugas en los tanques de almacenamiento por problemas de corrosión.

El método POSH establece que las terminales de transporte presentan un potencial de contaminación moderado, ya que suelen ocurrir derrames de combustibles y aceites de manera accidental, gran cantidad de terminales de buses convergen dentro del distrito Central de Alajuela, por ende la importancia de incluir esta actividad dentro de las potenciales fuentes puntuales de contaminación.

En el recorrido por el área de estudio se evidenció como las aguas cargadas de detergentes y jabones que son utilizadas en los lavacar para la limpieza de los vehículos, son descargadas al suelo y canalizadas por caños sin ningún tipo de tratamiento, por tanto y siguiendo la clasificación que establece el método POSH estas fuentes son de potencial moderado, con un índice de contaminación 2.

En cuanto a la actividad industrial categoría 3 con potencial de contaminación elevado, el método POSH incluye los talleres mecánicos, los cuales por las actividades y servicios que brindan emplean grandes volúmenes de solventes orgánicos sintéticos, lubricantes e hidrocarburos, los cuales en la mayoría de los casos no son manipulados de la forma correcta (Foster et al., 2002). A partir de las visitas de campo se evidenció el establecimiento de varios talleres mecánicos.

Dentro de la categoría de potencial elevado se incluyó los hospitales y clínicas que se localizan dentro del área de estudio, ya que el uso de productos farmacéuticos y químicos impactan de manera severa la calidad del agua subterránea. Dentro del área de estudio se localiza el Hospital San Rafael de Alajuela, debido al área que este hospital ocupa y la cantidad de pacientes y personas que lo visitan, es un foco potencial de contaminación importante, el cual eventualmente podría alterar la calidad del agua subterránea.

Es importante señalar que debido a la existencia de centros comerciales de grandes dimensiones dentro del área de estudio, esta actividad debe de ser analizada y categorizada. Considerando el área que ocupan, los servicios que brindan y la cantidad de personas que suelen visitar estos centros comerciales, en la presente investigación se opta por incluirlos dentro de la categoría de actividad comercial de tipo 3, clasificados como de potencial de contaminación elevado.

Recientemente en el distrito Central de Alajuela se construyó el Centro Comercial más grande de Centroamérica, el City Mall, cuenta con más de 170 000 m² de construcción en una sola etapa; debido a la variedad de comercios y servicios, se estima alrededor de 10 millones de visitas anuales (Rodríguez, 2014). Evidentemente este Centro Comercial tiene un gran impacto no solo en el aspecto económico, sino también en el aspecto ambiental, en particular la posibilidad de contaminación del subsuelo. Asimismo, durante las visitas de campo efectuadas, se evidencia el surgimiento de nuevas construcciones, principalmente de proyectos habitacionales de tipo urbanizaciones y condominios, en su mayoría se concentran en el sector central y sur del distrito, lo revela que el crecimiento urbano en el distrito continúa en ascenso.

Dentro de las cargas contaminantes con potencial elevado, el método POSH incluye los cursos de aguas superficiales, ya que a menudo presentan un peligro de contaminación que genera una significativa carga contaminante al subsuelo; considerando la descarga de aguas sin control alguno y el evidente grado de contaminación observado en los cauces de los ríos Alajuela, Ciruelas y Quebrada Barro, son considerados como fuentes con potencial elevado de contaminación.

El mapa de la figura 37 muestra la ubicación de las potenciales fuentes de contaminación de tipo puntual identificadas, dichas fuentes representan las cargas contaminantes establecidas en el cuadro 26, las fuentes

son diferenciadas a partir de colores, el color morado representa las fuentes de potencial reducido, el amarillo corresponde a las fuentes de potencial moderado y el color rojo representan las fuentes con potencial de contaminación elevado.

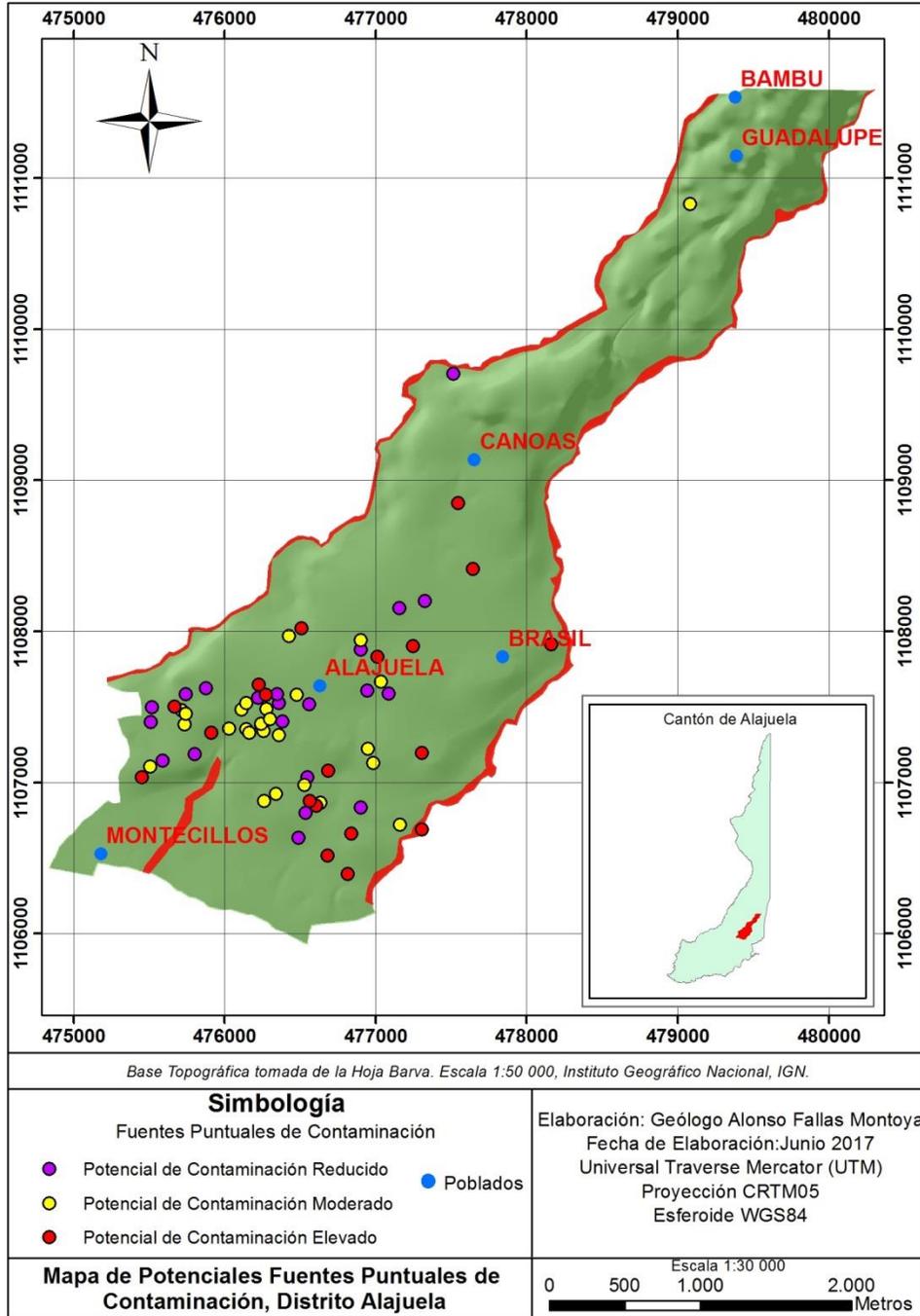


Figura 37: Mapa de las potenciales fuentes puntuales de contaminación identificadas en el distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

5.1.2 Clasificación y categorización de las fuentes difusas según el método POSH

Dentro del área de estudio es posible identificar dos fuentes potenciales de contaminación de tipo difusa; la primera de ellas está relacionada al uso agrícola, particularmente al cultivo de plantaciones de café hacia el sector norte del distrito, actividad que no solo influye en la recarga del agua de lluvia sino también en la calidad del agua subterránea; por su parte, la segunda fuente potencial de contaminación difusa identificada, corresponde a las áreas residenciales y urbanas que no cuenta con un servicio de cloacas eficiente, dependiente de sistemas *in situ* (letrinas, tanques sépticos y pozos negros).

A partir del mapa de uso de suelo generado (figura 16), se determinó que cerca del 70% del área de estudio, es de tipo urbano, caracterizado por la presencia de un desarrollo residencial, urbano y comercial denso y desordenado.

Según Foster et al. (2002), cuando las fuentes de contaminación de tipo puntual son pequeñas y múltiples, terminan por equivaler a una fuente esencialmente difusa, por tal situación, el uso de suelo de tipo urbano dentro del área de estudio es clasificado en su conjunto como una fuente potencial de contaminación tipo difusa.

Foster et al. (1998), señalan que la presencia de saneamiento *in situ* generan una gran sobrecarga hidráulica y elevadas tasas de recarga al acuífero en áreas urbanas, a pesar de la tendencia de impermeabilizar la superficie del terreno que reduce la infiltración del agua de lluvia. En distritos donde el servicio cloacal es limitado o ausente y la densidad de personas excede las 100 por hectárea, existe un elevado potencial de carga contaminante al subsuelo.

Para el caso del saneamiento *in situ*, los tipos de contaminantes principalmente están asociados a componentes del nitrógeno, contaminantes microbiológicos y en algunos casos comunidades de sustancias químicas orgánicas sintéticas (Foster et al., 2002).

El método POSH, establece que en las zonas con coberturas del servicio de cloacas menor al 25% donde la densidad de población es superior a las 100 personas por hectárea, el potencial de carga contaminante al subsuelo generado es elevado.

En el Vigésimo Segundo Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible (2016) señala que el uso de tanques sépticos incremento de un 73% en el año 2013 a un 76,9% en el año 2015, por lo que el servicio de alcantarillado sanitario tiene una cobertura nacional reducida del 23,1%.

Los tanques sépticos en la mayoría de los casos reciben las aguas negras o aguas provenientes de los servicios sanitarios, mientras que el resto de las aguas residuales se conducen al alcantarillado pluvial, el cual descarga en cuerpos de agua, ríos y quebradas.

El sistema de saneamiento del cantón Central de Alajuela es operado por la Municipalidad, dicho sistema de alcantarillado consta alrededor de 10000 conexiones que atienden aproximadamente a unas 33 000 personas de todo el cantón (Ruiz, 2012).

El Subsistema de Alajuela, corresponde a la red que recolecta las aguas residuales del casco central de la ciudad y las conduce a la planta de tratamiento de Villa Bonita, actualmente este subsistema sirve a una población estimada de 18000 personas (Ruiz, 2012); ante el panorama anterior y partiendo del hecho que este Subsistema no solamente recolecta el agua del distrito Central de Alajuela, es posible afirmar, que la cobertura del servicio de saneamiento es limitada e insuficiente, más aún si consideramos que la población para el distrito Central de Alajuela es de 42,975 habitantes.

Considerando las limitantes en relación al sistema de saneamiento y tratamiento de cloacas y que la densidad poblacional del distrito de Alajuela es de 5263 habitantes por km² (es decir 52,63 habitantes por hectárea) según los datos del censo del 2011 realizado por el INEC, el potencial de contaminación para el área de estudio a partir del método POSH debe ser clasificado como moderado.

Con respecto a las zonas dedicadas al uso agrícola, algunas prácticas de cultivo tienden a emplear nutrientes y pesticidas, los cuales causan una seria contaminación difusa en el agua subterránea; cabe indicar que determinar la tasa de lixiviación de los agroquímicos aplicados resulta complejo, pues esto depende de la interacción entre el tipo de cultivo, propiedades del suelo, régimen de lluvias y manejo de agroquímicos (Foster et al., 2002).

Con base en lo anterior, es importante incluir dentro de las fuentes difusas, los terrenos situados hacia el sector norte del área de estudio, dedicados a la siembra de plantaciones de café, cultivos que suelen ocupar áreas extensas y que se llegan a extender a otros distritos del cantón de Alajuela. A partir de la clasificación y categorización que establece el método POSH y de manera particular, a la existencia de monocultivos en suelos bien drenados, el potencial de contaminación es definido como elevado. Cabe señalar que según los resultados obtenidos en relación a la recarga acuífera, hacia estos sectores se presenta la mayor tasa de recarga, cercana al 39% con respecto al porcentaje de lluvia que precipita. El mapa de la figura 38 muestra la distribución de las fuentes potenciales de contaminación de tipo difusa, existentes e identificadas en el área de estudio.

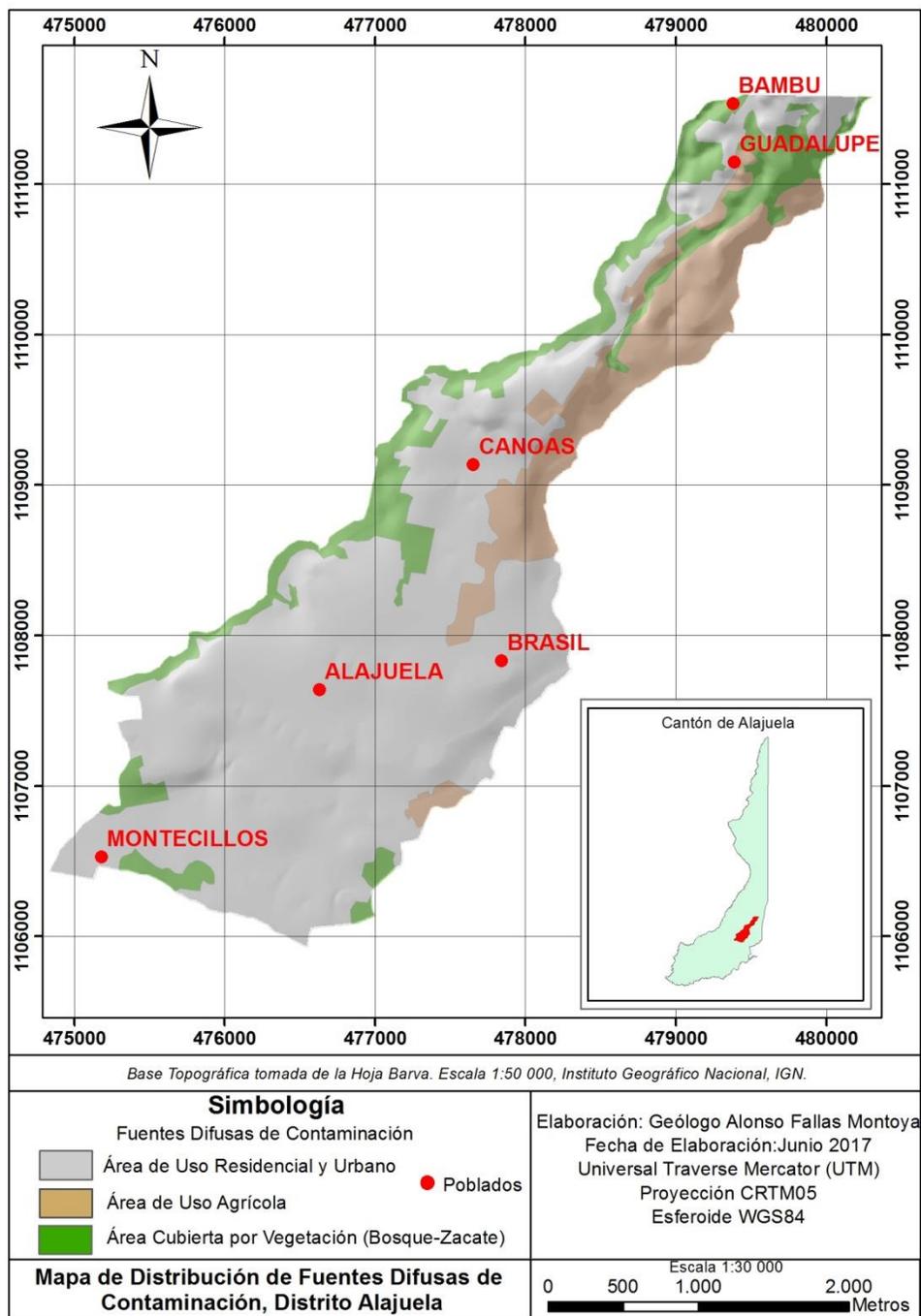


Figura 38: Mapa de las fuentes potenciales de contaminación de tipo difusa identificadas en el distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

Según Arias (2010), la baja cobertura de redes de alcantarillado sanitario y el uso de agroquímicos en las áreas de recarga, corresponde con los dos factores de riesgo principal que atentan con los acuíferos del Valle Central, especialmente el acuífero Barva y Colima.

Con el objetivo de establecer zonas dentro del área de estudio, que representan una mayor amenaza debido a la carga contaminante impuesta por la actividad antrópica que se desarrolla, se procede a generar un mapa que unifica los mapas de las figuras 37 y 38, por tanto este mapa contempla las fuentes potenciales de contaminación tipo puntual identificadas y localizadas dentro del área de contaminación tipo difusa establecida como de uso residencial y urbano.

Con base en lo anterior, es de esperar que en los sectores donde se concentran las fuentes potenciales de tipo puntual exista una mayor carga contaminante, la cual a la postre representa una mayor amenaza para la calidad del agua subterránea.

Considerando que las posibles fuentes de contaminación tipo puntual se concentran hacia el sector central del área de estudio, éste sector es diferenciado y categorizado como de potencial de contaminación tipo elevado. Cabe señalar además, que hacia la parte central del distrito la densidad de población es mayor, lo cual a su vez potencializa una mayor carga contaminante.

Esta zona definida y categorizada como de potencial de contaminación elevado, presenta el mismo potencial de contaminación que se le ha asignado al uso agrícola que se desarrolla hacia el sector norte del área de estudio.

En las zonas localizadas en la periferia del centro del distrito el uso de suelo urbano es caracterizado por el predominio de viviendas y proyectos urbanísticos, pese a que no se localizan fuentes puntuales de contaminación como las identificadas en el cuadro 26, estas zonas son consideradas de potencial de contaminación moderado, esto por cuanto no se cuenta con un sistema de saneamiento adecuado.

El mapa de la figura 39 muestra la distribución del potencial de contaminación, a partir de la interacción entre las potenciales fuentes de contaminación tipo puntual y las potenciales fuentes de contaminación tipo difusa.

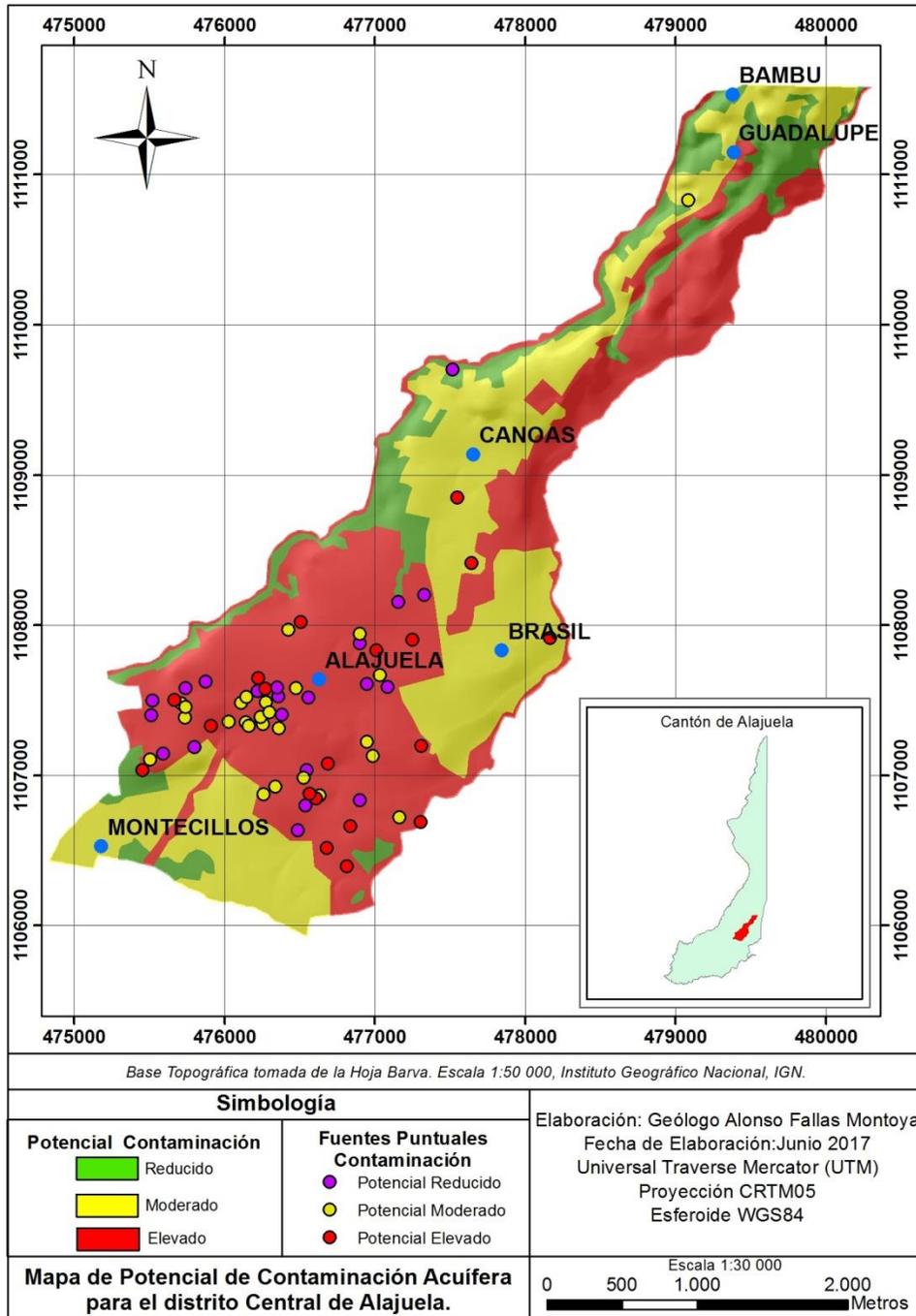


Figura 39: Mapa del potencial de contaminación para el distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

6. Riesgo a la contaminación acuífera

Arias (2012) define al riesgo de contaminación acuífera como la probabilidad de que un acuífero se contamine a niveles inaceptables, considerando para ello, la vulnerabilidad como la parte física del medio y la amenaza generada por la carga contaminante impuesta por las actividades humanas.

Con base en la definición anterior, en la presente investigación se considera al riesgo de contaminación como la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, producto de las características naturales de los estratos que lo separan de la superficie del suelo y de las características de la carga contaminante que se aplica en el medio subterráneo como resultado de la actividad humana.

La metodología implementada para la determinación del riesgo es desarrollada por Foster & Hirata (1991), para ello se evaluó inicialmente de forma independiente la vulnerabilidad y la carga contaminante de la zona de estudio, ambas variables obtenidas al aplicar el método GOD y método POSH respectivamente.

Foster et al., (2002) señalan que la contaminación de los acuíferos ocurre cuando la carga de contaminantes sobre el subsuelo, generados por descargas o lixiviados de actividades urbanas, industriales y agrícolas no es controlada adecuadamente y en ciertos componentes excede la capacidad natural de atenuación del subsuelo y estratos de la zona no saturada.

La vulnerabilidad del acuífero dependerá de factores hidrogeológicos, la inaccesibilidad hidráulica está asociada al tipo de acuífero y profundidad en que se ubica el techo del mismo, por su parte la capacidad de atenuación está relacionada a las características litológicas de los estratos ubicados en la zona no saturada, Foster et al., (2002).

Con certeza, determinar la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante impuesta presupone un grado de complejidad significativo; Foster e Hirata (1988) señalan que el grado de atenuación de los contaminantes puede variar drásticamente según el tipo y el proceso de contaminación en una situación particular.

Para poder determinar el riesgo a la contaminación acuífera, en el capítulo 4 de la presente investigación se analizó y determinó el grado de vulnerabilidad intrínseca para el acuífero que conforma la Unidad de Brechas y Lavas Barva (acuífero más cercano a la superficie) y el grado de vulnerabilidad hacia el sector norte del distrito para la Unidad Lavas Fracturadas Colima, por su parte en el capítulo 5 se estableció un inventariado de las fuentes potenciales de contaminación identificadas en el distrito Central de Alajuela.

Con los resultados obtenidos en los capítulos 4 y 5 se cuenta con los insumos necesarios para determinar el riesgo de contaminación acuífera para el distrito Central de Alajuela; para ello, se procedió a elaborar una matriz de riesgo, asignándole valores numéricos a cada una de las categorías cualitativas previamente obtenidas.

Considerando los resultados de los Índices de Vulnerabilidad Acuífera (I.V.A) obtenidos y establecidos en el mapa de la figura 36, se asignó un valor de 1 a las zonas de vulnerabilidad Baja, por su parte, los sectores identificados como de vulnerabilidad Media se asignó un valor 2.

Con respecto a la carga contaminante identificada dentro del área de estudio y representada en el mapa de la figura 39, se procedió a establecer valores según el potencial de contaminación para cada carga contaminante, por ello, para la carga contaminante con potencial Reducido se estableció un valor de 1, para la carga con potencial Moderado se asignó un valor de 2 y para la carga contaminante catalogada con potencial Elevado el valor establecido es de 3.

Al aplicar la matriz propuesta y multiplicar cada uno de los valores previamente establecidos en relación a la vulnerabilidad y carga contaminante, los resultados obtenidos son agrupados y posteriormente categorizados para de esta manera establecer en términos cualitativos el riesgo de contaminación acuífera.

En total se obtiene tres categorías cualitativas de riesgo a la contaminación acuífera: zonas de riesgo reducido, zonas de riesgo moderado y zonas catalogadas como de riesgo elevado. El cuadro 27 muestra la matriz aplicada para establecer el riesgo de contaminación acuífera para el distrito Central de Alajuela.

Cuadro 27. Matriz establecida para cuantificar el riesgo de contaminación acuífera, distrito Central de Alajuela.

Carga Contaminante			Zonas de Vulnerabilidad		
			Baja	Moderada	
			1	2	
Potencial de Contaminación	Reducido	1	1	2	
	Moderado	2	2	4	
	Elevado	3	3	6	
Riesgo de Contaminación Acuífera			Reducido	Moderado	Elevado
			1-2	3-4	5-6

Fuente: elaboración con base en Arias (2011).

Con base en los resultados obtenidos, una vez aplicada la matriz de riesgo propuesta, es necesario analizar una serie de escenarios que se desarrollan dentro del área de estudio, como consecuencia de la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca del medio y la carga contaminante impuesta.

En las zonas establecidas como de vulnerabilidad baja donde existen cargas contaminantes de potencial reducido y moderado, el riesgo a la contaminación acuífera es reducido, esto por cuanto la carga contaminante impuesta presenta menor persistencia y movilidad, lo cual dificulta que el contaminante alcance la profundidad a la que se localiza el acuífero hacia estos sectores, sin embargo, en los sectores de vulnerabilidad baja donde existen cargas contaminantes de potencial elevado, el panorama varía y el riesgo a la contaminación incrementa y es clasificado como moderado.

Considerando lo anterior, es posible señalar que en los sectores definidos como de vulnerabilidad intrínseca baja, el riesgo de contaminación no alcanzará la categoría de elevado, el mayor riesgo posible en estos sectores es del tipo moderado.

Los sectores dentro del área de estudio definidos como de vulnerabilidad moderada donde la carga contaminante es reducida, el riesgo a la contaminación es reducido, por su parte, en las zonas establecidas como de vulnerabilidad moderada donde impera una carga contaminante moderada, el riesgo de contaminación será moderado, esto debido a que la carga contaminante tiene posibilidad de exceder la atenuación del estrato suprayacente.

El riesgo de contaminación elevado se obtiene en aquellas zonas establecidas como vulnerabilidad moderada donde la carga contaminante es elevada; esta condición ocurre básicamente en las márgenes de los ríos Ciruelas y Alajuela, debido a la descarga de agentes contaminantes sin ningún tipo de tratamiento hacia los cursos de agua superficial; los agentes contaminantes tienen altas posibilidades de exceder la atenuación del estrato suprayacente de tobas con espesor inferior a los 5 m que aflora hacia las márgenes de los ríos, por ende el riesgo elevado que se presenta.

El mapa de la figura 40 muestra el mapa de riesgo a la contaminación acuífera, el mismo generado mediante la superposición del mapa de vulnerabilidad intrínseca y el mapa de potencial de contaminación previamente elaborado. Para la superposición de los mapas se utilizó el programa ArcGIS, de manera particular la herramienta "conversion tools" y su aplicación "poligon to raster", posteriormente a cada polígono se le asignó la categorización de riesgo de contaminación obtenido a partir de la matriz expuesta anteriormente.

A partir del mapa de la figura 40 es posible apreciar que la mayor parte del área de estudio presenta un riesgo reducido y moderado a la contaminación acuífera. Básicamente el riesgo reducido se presenta hacia el sector noroeste del área de estudio y hacia la periferia del sector central del distrito, ocupando un área de 4,32 Km².

El riesgo moderado ocupa un área de 4,40 Km² y se localiza en el sector central y noreste del área de estudio, en estos sectores la carga contaminante impuesta es catalogada como de potencial elevado asociado a la actividad agrícola y al uso urbano que concentra las cargas contaminantes de tipo puntual previamente identificadas en el cuadro 26, pese a ello, el factor de inaccesibilidad hidráulica del medio contribuye a que el riesgo de contaminación no sea mayor.

Pese a que en estos sectores del área de estudio el riesgo no es catalogado como elevado, es importante considerar que a largo plazo todos los acuíferos llegan a ser sensibles a contaminantes persistentes y no degradables (Espinoza, 2003).

El riesgo de contaminación elevado se localiza sobre las márgenes de los ríos Ciruelas y Alajué, la descarga de aguas sin tratamiento alguno a los ríos y un posible comportamiento influente del río genera una condición de riesgo inminente, los sectores catalogados de riesgo elevado ocupan un área de 0,28 Km².

Es importante mencionar que de conformidad con el artículo 33 de la Ley Forestal N° 7575 se declara área de protección una franja de quince metros en zona rural y de diez metros en zona urbana medida horizontal a ambos lados, en las riberas de los ríos, quebradas o arroyos si el terreno es plano y de 50 metros horizontales, si el terreno es quebrado; a partir de las visitas de campo efectuadas es posible evidenciar que las áreas de protección en las riberas de los ríos no son respetadas y suelen estar ocupadas por construcciones y asentamientos humanos.

El crecimiento urbano desordenado y sin control genera la invasión de estas áreas, mismas que de respetarse contribuirían en cierta medida a atenuar la carga contaminante impuesta hacia estos sectores de fragilidad.

Considerando que la carga contaminante (la amenaza) impuesta en el área de estudio puede y debe controlarse, en concordancia con Arias (2012), las políticas de protección de las aguas subterráneas deben enfocarse en este parámetro, de manera particular restringir o regular el uso del suelo sobre la zona no saturada, pues esta zona representa la primera línea de defensa natural del acuífero contra la contaminación.

Espinoza (2003) establece que los estudios del riesgo de contaminación acuífera constituyen el primer paso en la protección de las aguas subterráneas, identificando las actividades con mayor probabilidad de impactar el acuífero, es posible tomar medidas para evitar un desastre.

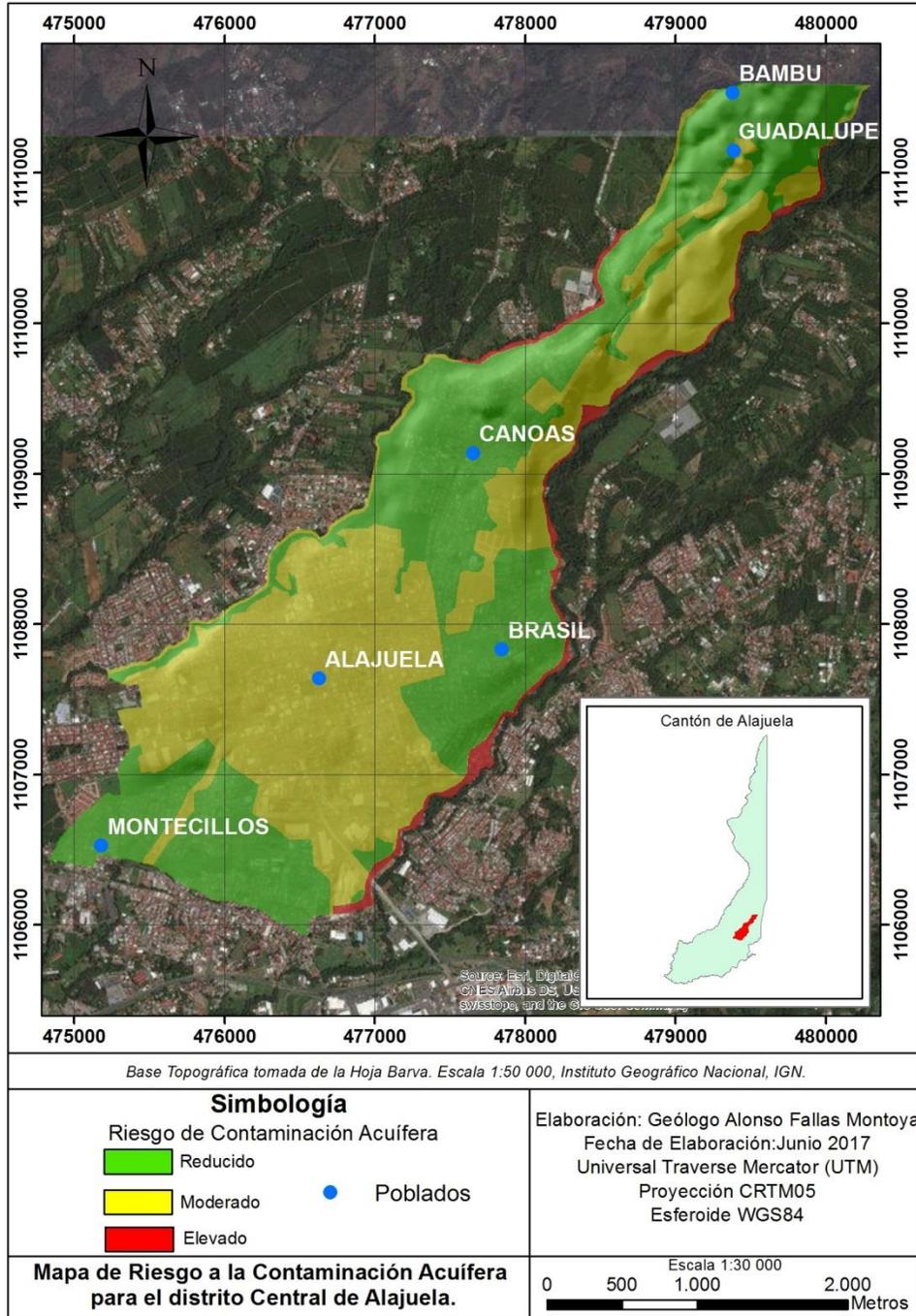


Figura 40: Mapa de riesgo a la contaminación acuífera para el distrito Central de Alajuela. Elaboración propia.

7. Conclusiones

A partir de los datos de las estaciones meteorológicas consultadas y ubicadas en las cercanías del área de estudio, se determinó que la distribución de las precipitaciones está influenciada por el efecto que causa la orografía sobre las condiciones climáticas, por tanto, en las partes bajas (elevaciones entre los 890 a 980 m.s.n.m) se registra una precipitación anual de 1994,8 mm, por su parte en los sectores con elevaciones entre 980 a 1233 m.s.n.m la precipitación registra un valor de 2920,7 mm; ante esto, se establece que hacia el sector norte del área de estudio precipita un 46% más de lluvia en comparación al sector sur.

Mediante los ensayos de laboratorio efectuados a las muestras de suelo recolectadas, se determinó que los suelos del distrito son de textura media y fina, predominando la presencia de fracciones limosas y arcillosas. En general los suelos existentes son producto de la meteorización de materiales volcánicos, particularmente tobas y cenizas.

Debido a que la metodología del Balance de Suelos elaborada por Schosinsky no considera el efecto que tiene el uso de suelo de tipo urbano sobre la infiltración y recarga potencial, en la presente investigación se estableció un coeficiente de retención del 0,85 asociado al efecto de impermeabilización que genera el asfalto y el concreto; a partir del coeficiente empleado, se establece que el 15% del agua de lluvia que precipita hacia estos sectores tiene la posibilidad de infiltrar en el suelo.

Las zonas dedicadas a la siembra de cultivos ubicadas hacia el sector norte del distrito presentan los mayores valores de recarga potencial, ya que el 39,87% de la lluvia que precipita en el sector logra recargar al acuífero. El resultado obtenido está asociado a la presencia de cultivos con follaje poco denso y con raíces poco profundas, lo cual genera que las plantas no extraigan un porcentaje elevado de agua en su proceso de evapotranspiración; aunado a lo anterior, es importante señalar que hacia el sector norte del distrito, se presentaron los mayores valores de infiltración básica del suelo, situación que evidencia condiciones de infiltración favorables para la recarga.

La menor recarga potencial ocurre en las zonas ocupadas por la actividad urbana, esto debido a la impermeabilización y compactación que experimentan los suelos; por tanto el porcentaje de lluvia que logra infiltrar y posteriormente recargar al acuífero es reducido, con un porcentaje de recarga del 0,74% con respecto a las precipitaciones registradas hacia esos sectores.

Si bien es cierto que las zonas de bosque no presentan los mayores valores de recarga potencial dentro del área de estudio, es importante considerar el papel que desempeñan en la formación de microclimas que permiten la generación de precipitaciones dentro de la cuenca y la regulación de la temperatura. Las zonas de

bosque existentes dentro del área de estudio se presentan como estrechas franjas de bosque secundario localizadas hacia ciertos sectores de las márgenes de los ríos.

A partir de los perfiles hidrogeológicos elaborados, se determinó que dentro del área de estudio el sistema acuífero está constituido por dos niveles productores (Unidades Hidrogeológicas); el primero de ellos corresponde con un nivel productor superficial desarrollado en lavas brechosas del Miembro Bermúdez de la Formación Hidrogeológica Barba y un segundo nivel productor profundo desarrollado en lavas fracturadas de la Formación Hidrogeológica Colima Superior.

La Unidad Hidrogeológica Brechas y Lavas Barba, corresponde con un acuífero semiconfinado, ubicado en promedio entre los 20 a 50 m.b.n.s. El acuífero se desarrolla principalmente en lavas brechosas limitadas superiormente por tobas del Miembro Carbonal y Porrosatí (material sobreyacente) las cuales actúan como un acuitardo. Cabe indicar que hacia el sector norte del área de estudio, los perfiles litológicos de los pozos existentes, no registran la presencia de materiales asociados a esta Unidad Hidrogeológica, por tanto se establece que dicha Unidad no presenta continuidad hacia el sector.

La Unidad Hidrogeológica Lavas Fracturadas Colima tiene el nivel productor en promedio entre los 80 a 100 m.b.n.s y se desarrolla predominantemente en lavas andesíticas fracturas. Debido al escaso registro de pozos profundos dentro del área de estudio, no se cuenta con los insumos necesarios para analizar la continuidad y características hidráulicas de esta Unidad, por tanto, la presente investigación se concentró y enfocó en determinar el grado de vulnerabilidad intrínseca para el acuífero más superficial, la Unidad Brechas y Lavas Barba.

Debido a que no hay continuidad y presencia de los materiales de la Unidad Brechas y Lavas Barba hacia el sector norte del área de estudio, se realizó un análisis de la Unidad Hidrogeológica Lavas Fracturadas Colima, empleando para ello la información que registran los pozos existentes en el sector norte. El análisis consideró los efectos del control estructural (Falla-Pliegue de Alajucla) en las condiciones y características hidrogeológicas de los materiales existentes en el subsuelo, principalmente considerando una eventual porosidad secundaria por la presencia de fracturas.

Mediante el método GOD se estableció que la mayor parte del área de estudio (8,72 km²) presenta una vulnerabilidad a la contaminación Baja, sin embargo hacia la cercanía de los cauces de los ríos la vulnerabilidad es Moderada, lo que representa un área de 0,28 km², esto por cuanto, el nivel de saturación se localiza a escasos metros de profundidad (menor a 5 m), asociado a un menor espesor en las tobas que cubren al acuífero.

Para clasificar como Alta la vulnerabilidad dentro del área de estudio es necesario que la Unidad de Brechas y Lavas Barba aflore en superficie y que el nivel de saturación se localice entre los 5 a 20 m de profundidad; si el nivel de saturación se ubica menor a los 5 m, la vulnerabilidad a la contaminación acuífera será clasificada como Extrema. Si bien es cierto que durante las vistas de campo no fue posible evidenciar el afloramiento de la Unidad de Brechas y Lavas Barba en superficie, no se descarta que tal situación se presente en ciertos sectores específicos dentro del área de estudio, esto debido a la variación del espesor de los materiales suprayacentes.

A partir del inventariado de las fuentes potenciales de contaminación tipo puntual se determinó que las actividades que se desarrollan dentro del área de estudio presentan un potencial de contaminación diverso; las fuentes puntuales identificadas se concentran hacia el sector central y sur del distrito, sectores donde prevalece un desarrollo urbano amplio y desordenado.

El mapa de uso de suelo generado evidencia que el 70% del área del distrito se encuentra ocupada por el uso urbano, por tanto es posible señalar que la mayor parte de los suelos se encuentran impermeabilizados, lo que repercute en el aumento de las tasas de escorrentía y a su vez se convierte en fuentes potenciales de contaminación tipo difusa debido a la existencia generalizada de tanques sépticos.

Al aplicar la matriz de riesgo, se determinó que la mayor parte del área de estudio presenta un riesgo de contaminación acuífera entre reducido y moderado; el riesgo reducido ocupan un área de 4,32 Km², mientras que el riesgo moderado involucra un área de 4,40 Km². El riesgo elevado comprende un área de 0,28 Km² y básicamente se ubica en las márgenes de los ríos Ciruelas y Alajuela, sectores donde la vulnerabilidad es definida como moderada y la carga contaminante muestra un potencial elevado. Es importante considerar que cargas contaminantes persistentes y no degradables impuestas por prolongados lapsos de tiempo, podrían eventualmente incrementar el grado de amenaza, incrementando a su vez el riesgo de contaminación.

Considerando que la carga contaminante impuesta en el área de estudio puede y debe controlarse, la presente investigación constituye una herramienta importante de planificación y ordenamiento territorial, que permite restringir o regular el uso del suelo dentro del distrito Central de Alajuela. Una vez determinada las zonas de mayor recarga potencial acuífera, las zonas de mayor vulnerabilidad intrínseca, la distribución de las potenciales cargas contaminantes y delimitadas las zonas de riesgo a la contaminación acuífera, se cuenta con información valiosa que permitirá orientar y facilitar la toma de decisiones en materia de la gestión del recurso hídrico.

8. Recomendaciones

Con el objetivo de obtener datos más precisos en relación a la cantidad de lluvia que precipita dentro del área de estudio, es necesario contar con el registro de más estaciones meteorológicas, como mínimo cuatro estaciones distribuidas adecuadas en los sectores norte, sur, este y oeste, con respecto al área de estudio.

A causa del acelerado desarrollo urbano que se presenta en el distrito, es importante construir de manera periódica mapas detallados de uso de suelo, esto permitirá determinar la forma en que los usos evolucionan, principalmente establecer una eventual expansión de las zonas urbanas o de las zonas de cultivo por el área de estudio; al contar con mapas actualizados se puede calcular y predecir cambios en las condiciones de recarga potencial.

Es importante preservar los sectores de bosque identificados dentro del área de estudio, principalmente se deben de resguardar las zonas de protección que estipula la Ley Forestal hacia las márgenes de los ríos y quebradas, sectores donde se presenta el mayor riesgo a la contaminación acuífera dentro del distrito Central de Alajuela.

Las pruebas de infiltración y el muestreo de suelos fueron distribuidos de tal manera que se garantizara una adecuada cobertura del área de estudio, sin embargo es importante mencionar que en la mayor parte del área los suelos se encuentran impermeabilizados, removidos o retrabajados, factores que eventualmente podrían influir en los resultados obtenidos; a partir de ello, es adecuado incrementar el número de muestreos en el área de estudio, para de esta manera contar con una mejor y mayor información, mediante datos más representativos de las condiciones existentes.

Debido a la escasa cantidad de pozos profundos y a la pobre distribución de los mismos, principalmente hacia el sector norte del área de estudio, es necesario generar nueva información a partir de la ejecución de perforaciones de carácter investigativo, esto con el fin de definir con certeza la continuidad de los materiales geológicos en el subsuelo y de esta manera afinar el modelo hidrogeológico propuesto. Las perforaciones permitirán generar información valiosa para poder realizar un análisis a detalle de la Unidad Lavas Fracturadas Colima, Unidad que no fue analizada a fondo, debido a las limitantes anteriormente mencionadas.

Debido al amplio desarrollo urbano que se expande por el distrito Central de Alajuela, es importante afinar y detallar el inventariado de las potenciales fuentes puntuales de contaminación propuesto en la presente investigación; al identificar y ubicar todas las potenciales fuentes puntuales, es posible delimitar aún más aquellos sectores que presentan una mayor carga contaminante impuesta (amenaza).

9. Referencias

- APARICIO, F., 1992: Fundamentos de Hidrología de superficie. – 291 págs. Ed. Limusa S.A, Distrito Federal, México.
- ARIAS, L., 2010: Situación de la potabilización y saneamiento en Costa Rica. Decimosexto Informe Estado de la Nación en desarrollo humano sostenible. (Programa Estado de la Nación) – 36 págs. San José, Costa Rica.
- ARIAS, M., 2011: Estudio Hidrogeológico Regional de la Cuenca del Río Frio. – 134 pág. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica. [Informe Interno].
- ARIAS, M., 2012: Vulnerabilidad y protección del agua subterránea: Valor de la “Matriz del uso del suelo” de SENARA. – Rev. Ambientico 228: 9-13. San José, Costa Rica.
- ASAMBLEA LEGISLATIVA., 1996: Ley Forestal N° 7575, San José, Costa Rica.
- ASTORGA, A. & ARIAS M., 2003: Mapa de Geoaptitud hidrogeológica de Costa Rica: Implicaciones respecto a la gestión ambiental del desarrollo. – Rev. Geol. América Central, 29: 95-101. San José, Costa Rica.
- ATLANTIS., 2008: Atlantis Products.- <http://www.atlantiscorp.com.au/product.html> [consulta 3 de abril del 2017].
- AUGE, M., 2004. Vulnerabilidad de acuíferos: Conceptos y métodos. – 84 págs. Ed. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- BARRY, R. & CHORLEY R., 2003: Atmosphere, weather and climate [8th ed.]. – 421 págs. London.
- BGS & SENARA., 1988: Continuación de la investigación hidrogeológica en la zona norte y este del Valle Central de Costa Rica. – 136 págs. [Informe Final SENARA. Informe Técnico No.165].
- BGS & SENARA, 1985: Mapa hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica, escala 1:50000.
- BREÑA, A. & JACOBO M., 2006: Principios y fundamentos de hidrología superficial. – 287 págs. Universidad Autónoma Metropolitana. México
- BUTLER, S., 1957: Engineering Hidrology. – 356 págs. Prentice Hall Inc, EE.UU.
- CALVO, J., 1999: Principios de hidrología forestal tropical. – 136 págs. Inst. Tecnol. Costa Rica, Esc. Ing. Forestal, Cartago, Costa Rica.
- CIANCAGLINI, N., LIOTTA, M., ESTEVEZ, A., CARRION, R., PAZ, M. & GRAFFINA, M., 2015: Manual de capacitación: Riesgo Superficial [1 ed.]. – 36 págs.
- CINERGA, 2009: Estudio Evaluaciones Ambientales Complementarias del Proyecto Agro-energético Central Hidroeléctrica.-Capítulo V, Balance Hídrico. – 73 págs. Centro de conservación de energía y del ambiente. Pucará, Perú. [Informe Interno].

- CISNEROS, R., 2003: Riego y drenaje. – 164 págs. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.
- CUSTODIO, E., & LLAMAS, M., 1976: Hidrogeología Subterránea. – 1194 págs. Ed. Omega, Barcelona, España.
- DENYER, P., & ARIAS, O., 1991: Estratigrafía de la región Central de Costa Rica. – Rev. Geol. América Central 12: 1-59. San José, Costa Rica.
- ECHANDI, E., 1981: Unidades volcánicas de la vertiente norte de la Cuenca del río Virilla. – 123 págs. Escuela Centroamericana de Geología. San José, Costa Rica. [Tesis. Lic.].
- EROKSUZ, E. & RAHMAN A., 2010: Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities.” Resources Conservation and Recycling, 54(12), 1449-1452.
- ESPINOZA, C., 2003: Dinámica de aguas subterráneas, vulnerabilidad y riesgo de contaminación; aplicación al acuífero de Santiago Norte. – 58 págs. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- ESPINOZA, M., 2011: Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano. – 90 págs. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. [Tesis. Lic.].
- FAO., 2013: Captación y almacenamiento del agua de lluvia. – 272 págs. Santiago, Chile.
- FERGUSON, B., 2005: Porous pavements. – 600 págs. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Ratón, Florida. USA.
- FETTER, C., 1988: Applied hydrogeology. Ed. Macmillan Publishing Company New York.
- FONTANEDA, L., RODRIGUEZ, J. & CASTRO, D., 2012: Diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). – 150 págs. Universidad de Cantabria. España.
- FOSTER, S., & HIRATA, R., 1988: Groundwater quality monitoring: an appraisal of practices and costs. – 79 págs. Technical Manual. Lima, Perú.
- FOSTER, S., & HIRATA, R., 1991: Determinación del riesgo de contaminación en aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes. – 81 págs. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.
- FOSTER, S., HIRATA, R., GOMEZ, D., D'ELIA, M. & PARIS, M., 2002: Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. – 115 págs. Ed. Banco Mundial.
- GUTIERREZ, A. & RAMIREZ A., 2005: Predicción hidrológica mediante el Método de la Avenida Índice para dos poblaciones. – Ingeniería hidráulica en México, vol. XX, núm. 2:37-47. México.
- HERAS, R., 1972: Manual de hidrología agrícola. – 330 págs. Escuela .Hidrología. Madrid, España.

- INEC., 2011: Costa Rica población total por zona y sexo, según provincia, cantón y distrito. <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx> [Consulta: 27 de junio del 2017]
- LINSLEY, R., KOHLER, M. & PAULUS, L., 1958: Hydrology for engineers.- 340 págs. McGraw Hill, NuevaYork.
- LOSILLA, M., 1977: Aguas subterráneas de la cuenca del Río Virilla y zonas propuestas para su explotación, Costa Rica. – 39 págs. Escuela Centroamericana de Geología. San José, Costa Rica. [Tesis Lic.].
- MATUS, O., 2007: Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua.- 228 págs. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE. Turrialba, Costa Rica. [Tesis M. Sc.].
- MONTERO, W., SOTO, G.J., ALVARADO, G.E. & ROJAS, W., 2010: División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), basado en estudios neotectónicos y de sismicidad histórica. – Rev. Geol. América Central, 43: 13-36. San José, Costa Rica.
- MORA, R., 1998: Propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de suelos de origen volcánico, en sitios seleccionados del valle Central, Costa Rica. – Rev. Geol. América Central, 19: 81-98. San José, Costa Rica.
- MUNICIPALIDAD DE ALAJUELA., 2012: Plan de desarrollo Cantonal “Alajuela Cantón Inclusivo y Solidario 2013-2023”. – 343 págs. [Informe Final].
- OBANDO, L., 2004: Mega-rasgos geomorfológicos del modelo de elevación digital asociado al Volcán Barva. – Rev. Geol. América Central, 31: 81-86. San José, Costa Rica.
- ONU., 1972: Manual de instrucciones, estudios hidrológicos. – ONU Publ. N 70, 540 págs, San José, Costa Rica.
- PERALTA, J. & CARRASCO J., 1990: La compactación de los suelos frutícolas y hortícolas. – IPA La Platina, 60: 16-18. Chile.
- PROGRAMA ESTADO DE LA NACIÓN., 2013: Capítulo 4 Armonía con la naturaleza. Vigésimo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. – 32 págs. San José, Costa Rica.
- PROGRAMA ESTADO DE LA NACIÓN., 2016: Capítulo 4 Armonía con la naturaleza. Vigésimo Segundo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. – 54 págs. San José, Costa Rica.
- PROTTY, R. & SOJO D., 2015: Mapa de vulnerabilidad a la contaminación acuífera, cantón de Belén, Heredia, Costa Rica – Rev. Geol. América Central, 53: 7-23. San José, Costa Rica.
- RAMIREZ, R., & ALFARO, A., 2002: Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica de una parte del Valle Central de Costa Rica. – Rev. Geol. América Central, 27: 53-60. San José, Costa Rica.
- RAMIREZ, R., 2007: Recarga potencial del Acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica. – 41 págs. SENARA. San José, Costa Rica.

- REYNOLDS, J., 1996: Las aguas subterráneas de Costa Rica: un recurso peligroso. – Utilización y manejo sostenible de los recursos hídricos 157-165. Heredia, Costa Rica.
- REYNOLDS, J. & MERINO J., 2002: Presente y futuro de las aguas subterráneas en el Valle Central. – Manejo Integrado de Aguas Subterráneas 19-32. Heredia, Costa Rica.
- RODRIGUEZ, R., 2014: Mall más grande de Centroamérica se abre campo. La República.net https://www.larepublica.net/noticia/mall_mas_grande_de_centroamerica_se_abre_campo [consulta 20 de mayo del 2017].
- ROJAS, N., 2011: Cuenca Río Grande de Taracoles. – 23 págs. Instituto Meteorológico Nacional, IMN, San José, Costa Rica.
- RUIZ, F., 2012: Gestión de las excretas y aguas residuales en Costa Rica, situación actual y perspectiva. – 64 págs. San José, Costa Rica.
- RUIZ, P. GAZEL, E. ALVARADO, G. & SOTO, G., 2010: Caracterización geoquímica y petrográfica de las unidades geológicas del macizo del volcán Poás, Costa Rica. – Rev. Geol. América Central, 43: 37-66. San José, Costa Rica.
- SALAMANCA, A. & SADEGHIAN, S., 2005: La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana. – Cenicafé, 56 (4): 381-397. Colombia.
- SCHOSINSKY, G., 2006: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. – Rev. Geol. América Central, 34-35: 13-30. San José, Costa Rica.
- SCHOSINSKY, G. & LOSILLA, M., 2000: Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. – Rev. Geol. América Central, 23: 43-55. San José, Costa Rica.
- SCHOSINSKI, G., & VARGAS, A., 2001: Hidrogeología de un sector de la margen izquierda del río Virilla, Provincia de San José, Costa Rica. – Rev. Geol. América Central 24: 93-102. San José, Costa Rica.
- SEGERER, C. & VILLODAS, R., 2006: Hidrología I. – 240 págs. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Buenos Aires, Argentina.
- SISTEMA COSTARRICENSE DE INFORMACIÓN JURÍDICA., 2014: Declara estado de emergencia la situación generada por la sequía que afecta cantones de provincia de Guanacaste, cantones de Aguirre, Garabito, Montes de Oro, Esparza y Cantón Central de provincia de Puntarenas, y cantones de Orotina, San Mateo, Atenas. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=78091&nValor3=98281&strTipM=TC [Consulta: 26 de junio del 2015]
- SOLANO, J. & VILLALOBOS, R., 1996: Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. – 32 págs. Instituto Meteorológico Nacional, IMN, San José, Costa Rica.

- SOTO, G., 2005: Geología del cantón de Poás y estudios adicionales. – 198 págs. FUNDEVI, Universidad de Costa Rica [Informe Interno].
- TRUJILLO, A. & QUIROZ, D., 2013: Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano. – 114 págs. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.
- UNESCO., 2006: Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas. – 98 págs. Documento Técnico del Programa Hidrológico Internacional para América Latina (PHI-LAC).Nº4. Montevideo, Uruguay.
- UNESCO., 2007: Balance hídrico superficial de Costa Rica. Periodo 1970-2002. – 55 págs. Documento Técnico del Programa Hidrológico Internacional para América Latina (PHI-LAC).Nº10. Montevideo, Uruguay.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA)., 1999: Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. USDA. - 88 págs. Instituto de calidad de Suelos. Argentina.
- VARGAS, A., 1997: Ventajas del proceso de reforestación sobre la atenuación de la erosión y propuesta de protección y desarrollo de un área de recarga en el Valle Central de Costa Rica. – Rev. Geol. América Central, 19-20: 155-165. San José, Costa Rica.
- WOLF, B. & SNYDER, G., 2003: Sustainable soils; the place of organic matter in sustainable soils and their productivity. – 352 págs. New York, USA.
- ZINCK, A., 2012: Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. – 131 págs. Enschede, The Netherlands.

10. Anexos

Anexo 1



Fotografía 1. Prueba de infiltración mediante el método del doble anillo, realizada en la localidad de Canoas, coordenadas CRTM05: 478365 E / 1109656 N.

Anexo 2



Fotografía 2. Muestras de suelo recolectadas en campo y debidamente rotuladas previo a su ingreso al INTA para la realización de los ensayos de laboratorio correspondientes.

Anexo 3

Fotografía 3. Estrecha franja de bosque secundario ubicado hacia las márgenes del río Alajuela. Obsérvese el estado de deterioro y contaminación del río.

Anexo 4

Fotografía 4. Hacia las márgenes de los ríos Ciruelas y Alajuela, es evidente que las área de protección establecidas por Ley no se respetan, predomina la construcción de viviendas.

Anexo 5

Fotografía 5. Hacia la entrada al distrito Central de Alajuela, encontramos dos fuentes potenciales de contaminación tipo puntual, El City Mall y el Hospital San Rafael de Alajuela.

Anexo 6

Fotografía 6. Hacia la margen izquierda del río Alajuela, afloran tobas asociadas al Miembro Hidrogeológico Porrosatí y Carbonal. Coordenadas CRTM05: 476481 E / 1108573 N.

Anexo 7.
Pozos analizados para la elaboración de los Perfiles Hidrogeológicos

Número de Pozo	Propietario	Uso	Latitud (CRTM05)	Longitud (CRTM05)	Profundidad (m)	Caudal Recomendado (L/s)
BA-115	FERNANDO CHAVARIA	Doméstico	1107384	477570	45	0,5
BA-122	WAGNERS DE COSTA RICA	Industrial	1107536	475571	54,4	2,2
BA-124	ASILO DE ANCIANOS	Doméstico	1108233	477871	60	0,5
BA-146	OSCAR LORIA GUERRERO	Doméstico	1106985	476270	43	0,5
BA-165	CCSS	Industrial	1108105	476511	115	6
BA-202	MOLINOS DE COSTA RICA	Industrial	1106735	476370	80	
BA-219	AZUL DE ALAJUELA S.A	Turístico	1107505	476496	60	2
BA-240	MAZU S.A	Industrial	1107335	476420	38	
BA-273	MUNICIPALIDAD DE ALAJUELA	Abast. Público	1107810	476196	50	9,5
BA-277	LA MUNDIAL S.A	Industrial	1108184	477421	50	
BA-281	HOGAR DE ANCIANOS	Doméstico	1108383	477771	50.0	0,5
BA-305	HOSPITAL DE ALAJUELA	Doméstico	1108135	476421	120	4
BA-314	ROMA PRINCE S.A	Industrial	1106685	476270	50	2
BA-315	DANILO JIMENEZ ALFARO	Doméstico	1108183	478071	65	1,9
BA-33	MOLINOS DE COSTA RICA	Industrial	1106386	475670	61	2,91
BA-335	EMBUTIDOS FULTON LTDA	Industrial	1111081	479324	60	0,6
BA-34	FABRICA DE BILLARES AGUILAR	Industrial	1106385	476669	94,55	
BA-361	BODEGA LA TROPICANA S.A	Doméstico	1106859	476960	45	1,25
BA-365	DOS ARBOLITOS S.A	Doméstico	1107336	475651	40	0,5
BA-367	URBANIZACIÓN BARCELONA S.A	Doméstico	1106865	475970	75	5,5

BA-368	ROMA PRICE S.A	Doméstico	1111007	479099	60	1
BA-377	ALBERTO LEANDRO ACUÑA	Doméstico	1107485	476421	40	1,26
BA-378	JORGE CASTRO UGALDE	Doméstico	1108434	476782	50	0,8
BA-384	CARANZA & ARGUEDAS S.A	Doméstico	1106435	476770		0,5
BA-385	KAJIMA CORPORATION	Doméstico	1106485	476220	68	1,32
BA-398	EPIFANIO CLAVERO MONZON	Doméstico	1107614	476961	36	0,5
BA-399	COLEGIO UNIVERSITARIO	Doméstico	1106485	476320	60	0,5
BA-404	RAYO AZUL ALAJUELENSE S.A	Doméstico	1107300	476160	60	0,5
BA-41	SENARA	SD	1106834	477120	191,54	0,5
BA-413	INMOBILIARIA RIO SEGUNDO	Doméstico	1106644	477280	44	0,5
BA-459	GERARDO AGÜERO G	Doméstico	1107884	477021	40	0,5
BA-46	ROMA PRICE S.A	Industrial	1106685	476270	43	4,8
BA-464	INMOBILIARIA MXM S.A	Doméstico	1107009	476920	115	1,26
BA-468	ABEL GUTIÉRREZ CHÁVEZ	Urbanístico	1108683	477772	158	10
BA-498	MARIO CERDAS SALAZAR	Industrial	1107935	476371	80	1
BA-499	GANADERA PALO PINTO S.A	Industrial	1107965	476441	80	2,3
BA-502	MEGA DOS S.A	Doméstico	1106465	476700	142	3,16
BA-505	PUNTO ROJO	Industrial	1108485	476332	30	2
BA-518	CHU CHUNG	Doméstico	1106893	476540	60	2
BA-523	ROFUSA S.A	Doméstico	1108434	476672	57	0,37
BA-524	WILLIAM MAGRI JURADO	Doméstico	1111381	479344	67	1,9
BA-537	CLAVER LTDA	Doméstico	1107636	475421	100	0,5
BA-541	CCSS	Abast. Público	1108505	476547	61	5

BA-544	INMOBILIARIA SURAT CR S.A	Urbanístico	1107085	475970	80	
BA-545	CAFETALERA SAN JERONIMO	Urbanístico	1109423	477823	100	6,8
BA-569	WILLIAM RODRIGUEZ MARIN	Urbanístico	1109533	477673	80	2,72
BA-574	MUTUAL ALAJUELA	Doméstico	1107286	475396	60	3,3
BA-576	COLEGIO GREGORIO RAMÍREZ	Doméstico	1106686	475440	60	0,5
BA-586	MARIA RUIZ VARGAS	Doméstico	1107893	478201	32	2
BA-591	LIGA DEPORT.ALAJUELENSE	Riego	1108237	477083	78	2
BA-619	WEN YI LAI	Industrial	1107134	476790	59	1
BA-621	FELIX RODON HERNANDEZ	Industrial	1106897	476280	36	2
BA-622	LA SIRENA BAR S.A	Industrial	1107335	476091	50	
BA-655	MUNICIPALIDAD DE ALAJUELA	Abast. Público	1107615	476546	120	5
BA-656	PATRICIA MENESES PEREZ	Riego	1109333	478122	69	1,5
BA-662	ASOC CULTURAL MARISTAS	Riego	1107234	477230	85	3
BA-713	HOSPITAL DE ALAJUELA	Industrial	1106534	476895	154	8,2
BA-715	COOR. ISLAS SAN CRISTOBAL	Industrial	1107506	475671	70	2
BA-724	HOSPITAL DE ALAJUELA N2	Industrial	1106624	476780	154	
BA-779	COLEGIO UNIVERSITARIO	Industrial	1106905	476440	70	3
BA-792	MOLINOS DE COSTA RICA S.A	Industrial	1106775	476200	154	5
BA-807	CHAVARRIA HERMANOS S.A	Riego	1107173	477340	82	2,14
BA-835	JUNTA COLG.VOC.JESUS.	Abast. Público	1109228	477571	80	3
BA-87	PUNTO ROJO	Industrial	1108334	476371	31,4	1,26
BA-97	CORNELIO ORLICH	Doméstico	1107185	475370	45,7	0,5

