

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA

**Aplicación de metodologías para la delimitación de zonas de
protección de nacientes: Casos Rosario y San Miguel, Naranjo de
Alajuela.**

Informe de Proyecto para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología.

Mariel Celeste González Artavia

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Noviembre 2014

Informe de proyecto sometido y aceptado por el tribunal del trabajo final de graduación como requisito para optar por el grado académico de licenciado en geología.



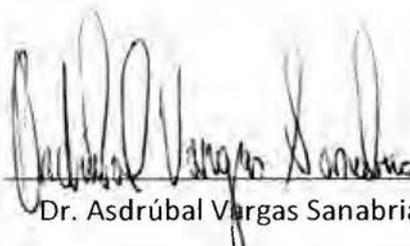
M.Sc. Héctor Enrique Zúñiga
Director del Comité Asesor



M.Sc. Mario Arias Salguero
Miembro del Comité Asesor



M.Sc. Luis Guillermo Salazar Mondragón
Miembro del Comité Asesor



Dr. Asdrúbal Vargas Sanabria
Miembro del Tribunal



Dr. Javier Trejos Zelaya
Decano de la Facultad de Ciencias
Presidente del Tribunal

Resumen

La finalidad Proyecto de Graduación es aplicar tres metodologías para la delimitación de zonas de protección de nacientes con el fin de evaluar la metodología más apta en función del modelo hidrogeológico, para los distritos Rosario y San Miguel, cantón Naranjo.

Este Proyecto de Graduación se complementa con el proyecto de investigación 830 – B2 – 403 del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG).

El desarrollo del proyecto requirió la ejecución de las siguientes etapas: a) el cartografiado de nacientes y pozos, a partir de las bases de datos del SENARA y SINAC; b) la recolección de datos de campo para la caracterización de las nacientes y los datos de entrada para el balance hídrico; c) la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual con la interpretación y análisis de la información de los pozos de la base de datos del SENARA; d) la identificación de la zonas de recarga, según la metodología de Schosinsky (2006); e) la aplicación de metodologías para la delimitación de las zonas de protección de nacientes, como el radio arbitrario, el radio calculado y el mapeo hidrogeológico; y e) el análisis e integración de los resultados.

El modelo conceptual hidrogeológico propuesto consta de dos unidades acuíferas. La unidad inferior consta de tobas fracturadas sobreyacidas por lavas y tobas café, siendo las tobas fracturadas y lavas los principales almacenes, estas litologías son correlacionables con el Grupo Aguacate. Mientras que la unidad superior está asociada a depósitos de ignimbritas y cenizas grises correlacionables con la Formación Tiribí.

La recarga potencial anual se determinó con la metodología de Schosinsky (2006), variando entre 230,21 y 801,23 mm, siendo mayor al Norte del área de estudio. La recarga que comienza en mayo, está limitada a los alrededores del cerro Espíritu Santo y un cerro sin nombre ubicado al Sur, hasta homogenizarse a lo largo del área de estudio durante los meses de setiembre y octubre. Los restantes cinco meses, no hay recarga del acuífero.

La metodología de radios arbitrarios empleada es la establecida en la Ley de Aguas y La Ley Forestal. La metodología de radio calculado utilizada es la de tiempo de tránsito y contempla varias limitaciones en la obtención de los parámetros. Mientras que la metodología del mapeo hidrogeológico contempla información de varios mapas temáticos, como mapa de equipotenciales de nacientes, mapa de la geología estructural y mapa hidrogeológico, entre otros. La comparación de las metodologías, mediante cuadros comparativos, concluye que el método que resultó con valoraciones más completas e integrales es el mapeo hidrogeológico.

Tabla de contenido

<u>1</u>	<u>INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>1</u>
1.1	JUSTIFICACIÓN	1
1.2	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	1
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.3.1	OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	3
1.4	METODOLOGÍA	3
1.4.1	CARTOGRAFIADO DE NACIENTES Y POZOS	4
1.4.2	ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	5
1.4.3	IDENTIFICACIÓN DE LA ZONAS DE RECARGA	5
1.4.4	APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE PROTECCIÓN DE NACIENTES.....	7
1.4.5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	7
<u>2</u>	<u>CONTEXTO GEOLÓGICO</u>	<u>8</u>
2.1	GEOLOGÍA	8
2.1.1	GRUPO AGUACATE	8
2.1.2	LACUSTRE COLORADO	12
2.1.3	FORMACIÓN ALTO PALOMO	12
2.1.4	LACUSTRE PALMARES	14
2.1.5	FORMACIÓN TIRIBÍ O FORMACIÓN DEPÓSITOS DE AVALANCHA ARDIENTE.....	15
2.1.6	DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS RECIENTES	17
2.1.7	DEPÓSITOS ALUVIONALES.....	17
2.2	GEOMORFOLOGÍA.....	19
2.2.1	UNIDAD DE DESLIZAMIENTOS (D1).....	23
2.2.2	UNIDAD DE CAÑÓN FLUVIAL (F1).....	23

2.2.3	UNIDAD DE CONOS VOLCÁNICOS (V1)	24
2.2.4	UNIDAD DE PIEDEMONTE VOLCÁNICO (V2).....	25
2.2.5	UNIDAD DE CALDERAS (V3)	25
2.3	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	26
2.3.1	FALLAS	26
2.3.2	LINEAMIENTOS	26
3	<u>CARACTERIZACIÓN DE POZOS Y NACIENTES</u>	<u>29</u>
3.1	INVENTARIO DE POZOS	29
3.2	INVENTARIO DE NACIENTES	29
3.2.1	NACIENTES ADMINISTRADAS POR LA ASADA EL ROSARIO	32
3.2.2	NACIENTES ADMINISTRADAS POR LA ASADA SAN MIGUEL ESTE	36
3.2.3	NACIENTES ADMINISTRADAS POR LA ASADA CONCEPCIÓN	43
3.2.4	NACIENTES ADMINISTRADAS POR LA ASADA SAN MIGUEL OESTE	45
4	<u>RÉGIMEN HIDROLÓGICO E HIDROGEOLOGÍCO.....</u>	<u>49</u>
4.1	RÉGIMEN HIDROLÓGICO.....	49
4.1.1	METEOROLOGÍA	49
4.1.2	HIDROGRAFÍA	52
4.2	RÉGIMEN HIDROGEOLOGÍCO	54
4.2.1	NIVEL PIEZOMÉTRICO	54
4.2.2	PERFILES HIDROGEOLOGÍCOS	56
4.2.3	MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGÍCO	64
5	<u>DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RECARGA ACUÍFERA</u>	<u>67</u>
5.1	FRACCIÓN DE LLUVIA INTERCEPTADA POR EL FOLLAJE	67
5.2	INFILTRACIÓN	75

5.2.1	COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN POR TEXTURA DEL SUELO (KFC)	75
5.2.2	COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN (Ci)	77
5.3	INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL	85
5.4	ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	87
5.5	EVAPOTRANSPIRACIÓN	87
5.6	RECARGA DEL ACUÍFERO	91
5.6.1	CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITEZ	91
5.6.2	COEFICIENTES DE HUMEDAD C1 Y C2	98
5.6.3	EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL Y HUMEDAD DISPONIBLE	99
5.6.4	RECARGA POTENCIAL DEL ACUÍFERO	103
6	<u>DELIMITACIÓN DE ZONAS DE PROTECCIÓN DE NACIENTES</u>	<u>105</u>
6.1	INTRODUCCIÓN A LAS ZONAS DE PROTECCIÓN DE NACIENTES	105
6.2	METODOLOGÍAS PARA DELIMITAR LAS ZONAS DE PROTECCIÓN DE NACIENTES	106
6.2.1	METODOLOGÍA DE RADIO FIJO ARBITRARIO	107
6.2.2	METODOLOGÍAS DE RADIO FIJO CALCULADO Y METODOLOGÍAS ANALÍTICAS	110
6.2.3	METODOLOGÍA DE MAPEO HIDROGEOLÓGICO	122
6.3	COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE PROTECCIÓN DE LAS NACIENTES.	126
7	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>132</u>
8	<u>REFERENCIAS</u>	<u>137</u>
	<u>ANEXO 1: GUÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE UN MANANTIAL</u>	<u>142</u>
	<u>ANEXO 2: GRÁFICAS DE INFILTRACIONES</u>	<u>144</u>
	<u>ANEXO 3: PROPIEDADES GEOTÉCNICAS E HIDROLÓGICAS DE MUESTRAS DE SUELO</u>	<u>150</u>

Índice de Figuras

Figura 1.1: Mapa de ubicación del área de estudio.....	2
Figura 2.1: Mapa geológico del área de estudio. Tomado de Huapaya & Rojas (2012).	10
Figura 2.2: Mapa de orientación de la topografía del área de estudio.	20
Figura 2.3: Mapa de pendientes del área de estudio.	21
Figura 2.4: Mapa geomorfológico del área de estudio.	22
Figura 2.5: Mapa estructural del área de estudio. Modificado de Huapaya & Rojas (2012).	27
Figura 3.1: Mapa de pozos en el área de estudio.....	30
Figura 3.2: Mapa de nacientes en el área de estudio.....	31
Figura 3.3: Fotografía de la captación en la naciente Santa Margarita 1.....	33
Figura 3.4: Fotografía de la captación en la naciente Santa Margarita 2.....	33
Figura 3.5: Fotografía de la captación en la naciente San Miguel.....	35
Figura 3.6: Fotografía de la captación en la naciente La Pista.....	37
Figura 3.7: Fotografía de la captación en la naciente Ramírez.....	38
Figura 3.8: Fotografía de la captación de la naciente Chacón.....	40
Figura 3.9: Fotografía de la captación de la naciente Arroyo.....	41
Figura 3.10: Fotografía de la captación en la naciente San Francisco.....	42
Figura 3.11: Fotografía de la captación en la naciente La Bomba.....	44
Figura 3.12: Fotografía de la captación en la naciente Captación 1.....	46
Figura 3.13: Fotografía de la captación en la naciente Captación 2.....	47
Figura 4.1: Mapa de polígonos de <i>Thiessen</i> elaborados a partir de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.	50
Figura 4.2: Gráfico de las precipitaciones mensuales en las estaciones meteorológicas Beneficio Pilas y La Argentina.....	51

Figura 4.3: Gráfico de la temperatura mensual en las estaciones Beneficio Pilas y La Argentina.	52
Figura 4.4: Mapa de las cuencas hidrográficas y los órdenes de la red drenajes del área de estudio.	53
Figura 4.5: Mapa de equipotenciales en el área de estudio, empleando el método de interpolación <i>Kriging</i>	55
Figura 4.6: Mapa del trayecto de los perfiles hidrogeológicos para el área de estudio.	57
Figura 4.7: Perfil hidrogeológico de la subcuenca Rosario A – B.....	60
Figura 4.8: Perfil hidrogeológico de la subcuenca Rosario C - D.	60
Figura 4.9: Perfil hidrogeológico de la subcuenca Rosario E – F	61
Figura 4.10: Perfil hidrogeológico de la subcuenca Rosario G - H.....	61
Figura 4.11: Perfil hidrogeológico de la subcuenca San Miguel A´ - B´.	65
Figura 4.12: Perfil hidrogeológico de la subcuenca San Miguel C´ - D´	65
Figura 5.1: Mapa de polígonos de <i>Thiessen</i> dentro del área de estudio de las estaciones meteorológicas influyentes.	69
Figura 5.2: Mapa de distribución de la precipitación anual en el área de estudio.....	70
Figura 5.3: Mapa de uso del suelo y clasificación del coeficiente K_v del área de estudio. ...	71
Figura 5.4: Mapa del coeficiente de retención del follaje (C_{fo}) del área de estudio.	73
Figura 5.5: Mapa de retención de lluvia en el follaje (Ret) anual en el área de estudio.....	74
Figura 5.6: Modelo de sombras, unidades morfológicas locales y puntos de muestreo de suelo y ensayos de infiltración en el área de estudio.....	80
Figura 5.7: Mapa del coeficiente de infiltración por textura del suelo (K_{fc}) del área de estudio.	81
Figura 5.8: Mapa de pendientes del área de estudio y clasificación del coeficiente K_p , clasificado según los intervalos definidos por Schosinsky & Losilla (2000).....	82
Figura 5.9: Mapa del coeficiente de infiltración (C_i) en el área de estudio.....	84
Figura 5.10: Mapa de precipitación que infiltra (P_i) anualmente en el área de estudio.....	86

Figura 5.11: Mapa de esorrentía superficial (<i>ESC</i>) anual en el área de estudio.	88
Figura 5.12: Mapa de evapotranspiración potencial mensual (<i>ETP</i>) para el área de estudio.	90
Figura 5.13: Mapa de capacidad de campo (<i>CC</i>) en porcentaje por peso de suelo seco, en el área de estudio.	92
Figura 5.14: Mapa de punto de marchitez (<i>PM</i>) en porcentaje por peso de suelo seco, en el área de estudio.	93
Figura 5.15: Mapa de densidad aparente [g/cm^3] en el área de estudio.	94
Figura 5.16: Mapa de profundidad de raíces [mm] en el área de estudio.	95
Figura 5.17: Mapa de capacidad de campo (<i>CC</i>) en milímetros en el área de estudio.	96
Figura 5.18: Mapa de punto de marchitez (<i>PM</i>) en milímetros en el área de estudio.	97
Figura 5.19: Mapa de la evapotranspiración real promedio (<i>ETR</i>) anual para el área de estudio.	101
Figura 5.20: Mapa de humedad disponible (<i>HD</i>) anualmente para el área de estudio. ...	102
Figura 5.21: Mapa de recarga potencial del acuífero (<i>Rp</i>) anual en el área de estudio. ...	104
Figura 6.1: Mapa de radios de protección arbitrarios para las nacientes Santa Margarita 1 y 2, Ramírez, Arroyo, Chacón, San Francisco y La Pista con la cobertura del suelo.	108
Figura 6.2: Mapa de radios de protección arbitrarios para las nacientes Captación 1, 2 y 3, La Bomba, San Miguel y La Pista con la cobertura del suelo.	109
Figura 6.3: Mapa de la distribución de los pozos que permiten obtener datos de conductividad hidráulica.	114
Figura 6.4: Mapa de las equipotenciales de las nacientes asociadas al Grupo Aguacate y la Formación Tiribí.	118
Figura 6.5: Mapa de perímetros de protección a partir del tiempo de tránsito para las nacientes Captación 1, 2 y 3, La Bomba y La Pista en el área de estudio.	119
Figura 6.6: Mapa de perímetros de protección a partir del tiempo de tránsito para las nacientes Ramírez, Arroyo y Chacón en el área de estudio.	120

Figura 6.7: Mapa de perímetros de protección a partir del tiempo de tránsito para las nacientes Santa Margarita 1 y Santa Margarita 2 en el área de estudio.	121
Figura 6.8: Mapa de perímetros de protección a partir del tiempo de tránsito para las nacientes San Francisco y San Miguel en el área de estudio.	122
Figura 6.9: Mapeo hidrogeológico para la determinación de zonas de protección para las nacientes captadas por ASADAS en el área de estudio.	125

Índice de Cuadros

Cuadro 4.1: Características generales del sistema acuífero del cantón de Naranjo.....	66
Cuadro 5.1: Valores de infiltración básica del suelo (f_c) y los coeficientes de infiltración por textura del suelo (K_{fc}) para los puntos de muestreo en el área de estudio.	76
Cuadro 5.2: Descripción de las unidades morfológicas delimitadas a partir del modelo de sombras en el área de estudio.....	77
Cuadro 5.3: Valores del coeficiente de infiltración por efecto de la pendiente (K_p). Tomado de: Schosinsky & Losilla (2000).....	79
Cuadro 5.4: Valores del coeficiente de infiltración por efecto de la cobertura vegetal (K_v). Tomado de: Schosinsky & Losilla (2000).....	79
Cuadro 5.5: Promedio de los porcentajes de horas del sol mensual, respecto al año, en la latitud 10° Norte.	89
Cuadro 6.1: Parámetros hidráulicos del acuífero asociado al Grupo Aguacate. Valores de nivel estático (NE), nivel dinámico (ND), caudal (Q), transmisibilidad (T), espesor (b) y conductividad hidráulica (k) y litología de la capa acuífera.....	115
Cuadro 6.2: Datos de entrada y salida de la aplicación de la metodología de tiempos de tránsito.....	116
Cuadro 6.3: Cuadro comparativo sobre la información general de las metodologías para delimitar zonas de protección de nacientes empleadas.	127
Cuadro 6.4: Cuadro comparativo sobre las ventajas y desventajas de las metodologías para delimitar zonas de protección de nacientes y algunas sugerencias para mejorar los métodos.	129
Cuadro 6.5: Cuadro comparativo entre las metodologías utilizadas para la delimitación de zonas de protección de nacientes según su relación con el modelo hidrogeológico y el rol de la geología y geomorfología.....	131

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo constante en mi vida y su acompañamiento en mis metas.

Para los miembros del comité asesor, los másteres Héctor Zúñiga, Mario Arias, Luis Guillermo Salazar y Luis Obando, quienes me ayudaron a desarrollar y mejorar constantemente este proyecto. Particularmente al M.Sc. Héctor por sus acompañamientos a las giras de campo.

Un especial agradecimiento al Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) y a su director M.Sc. Mario Arias, por permitirme participar en el Estudio Hidrogeológico del Cantón de Naranjo y financiar mi Proyecto de Graduación.

Además, a los colaboradores y asistentes del CICG y a Randall Araya del SINAC, quienes trabajaron a mi lado durante las giras de campo.

Finalmente, a los fontaneros y administradores de las ASADAS de El Rosario y San Miguel, muchas gracias por su interés y apoyo en la recolección de datos.

Dedicatoria

A mi mami Loly, quien construyó los cimientos de mi persona, forjó mis valores, exigió mi disciplina, financió mi educación, garantizó mis éxitos y me orientó a la felicidad.

A mi abuela Adolia, quien siempre demandó la excelencia de mí y a mi abuelo Cuyo, quien me enseñó que cuando las cosas se hacen, se deben hacer bien hechas.

A Vatola quien me cuida y consiente desde siempre, deseando solo ´triumfos para mí.

Para mi tío Enrique, quien me apoya siempre y me enseñó a cuestionar todo y a todos, para descubrir realidades.

A mis tías, Rita y Adriana por siempre apreciarme y a mis primos y primas por siempre esperar lo mejor de mí y darme su cariño incondicional.

A Priscilla, desde siempre la más fuerte y querida de mis amigos, mi confidente.

A Blas por ser un compañero, un amigo y un colega incondicional, siempre presente.

Y finalmente a Dakota quien me ha traído inmensas alegrías, me cuida y ha tolerado mis chichas en el caos.

1 Introducción

1.1 Justificación

Actualmente existen diversas metodologías para delimitar los perímetros de protección de las captaciones de agua, cada una de ellas se basa en uno o en varios fundamentos teóricos. Sin embargo, no existe una descripción detallada de dichas metodologías, que permita conocer las condiciones, supuestos y limitantes para su implementación. Se debe realizar una discusión al respecto, por lo que en este proyecto de graduación se pretende aportar una luz a dicha discusión y algunos criterios para la elección de la metodología adecuada en el área de estudio propuesta.

Además, en el cantón Naranjo se encuentra en desarrollo el estudio hidrogeológico del cantón de Naranjo por parte del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas. El Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) es la institución interesada en la elaboración del presente proyecto de graduación, ya que es complementario al proyecto de investigación 830 – B2 - 403, “Estudio Hidrogeológico del cantón de Naranjo, provincia de Alajuela, Costa Rica”, con vigencia del 01 de junio del 2012 al 29 de junio del 2014.

1.2 Ubicación del área de estudio

Corresponde con los distritos Rosario y San Miguel del cantón de Naranjo, en la provincia de Alajuela. Los distritos en estudio se ubican en la hoja cartográfica Naranjo, escala 1: 50 000. La Figura 1.1 es el mapa de ubicación del área.

El distrito Rosario tiene un área de 1.720,25 hectáreas, mientras que el distrito San Miguel abarca una extensión de 1.566,06 hectáreas.

Los límites administrativos son, al Norte el distrito Naranjo del cantón Naranjo, al Oeste el cantón de Palmares, al Sur el cantón de Atenas y al Este los cantones Valverde Vega y Grecia. En cuanto a límites geográficos, el área de estudio limita al Oeste y Sur con el cauce del Río Grande, al Este con el río Colorado y el río Pilas, y al Norte con el cerro Espirito Santo. El distrito Rosario y el distrito San Miguel limitan entre sí, de noreste a suroeste, con la

quebraba Barquero, el cerro Las Pastoras, el cerro Las Palmas, el cerro Hornos y el cerro Crisanto.

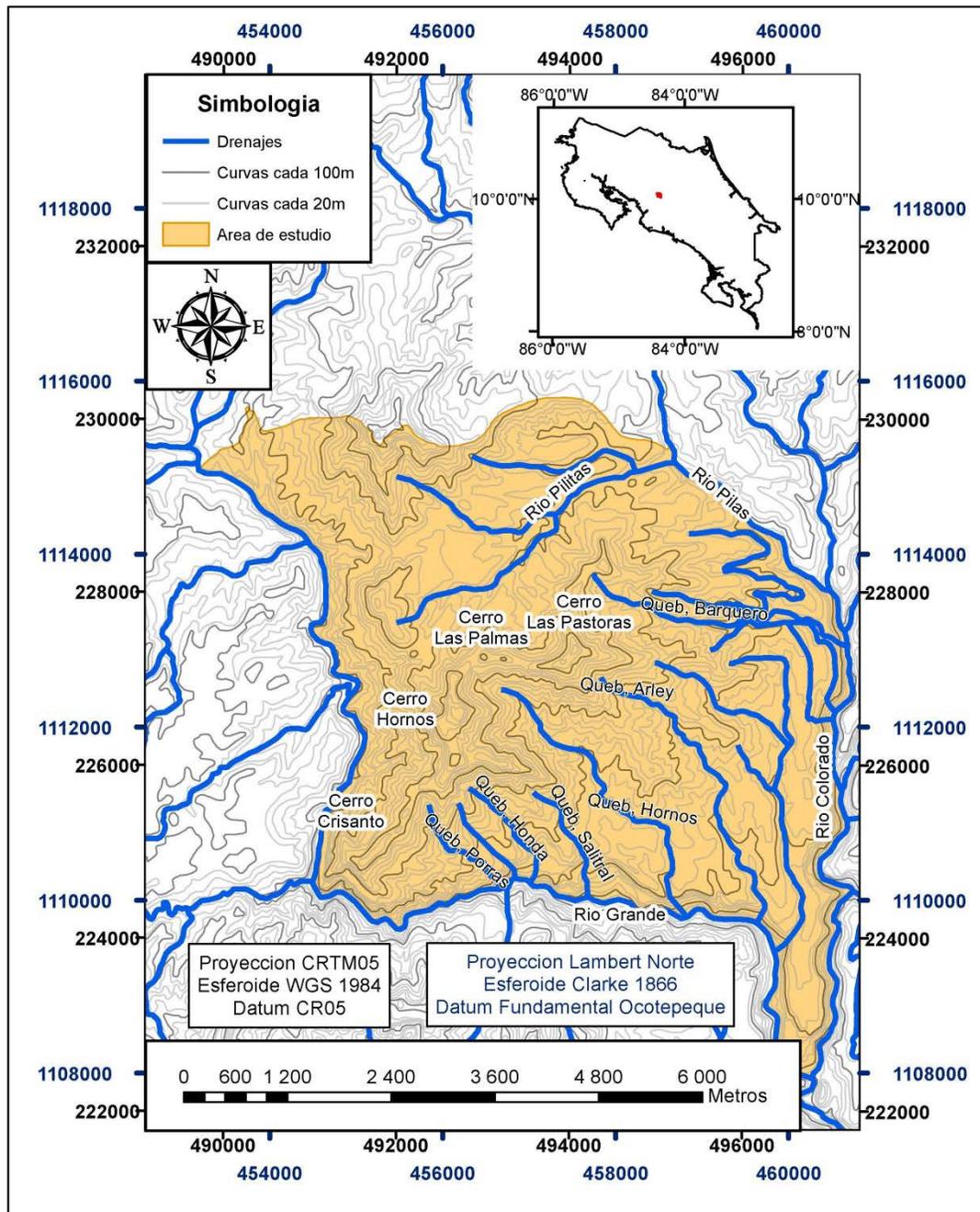


Figura 1.1: Mapa de ubicación del área de estudio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Aplicar metodologías para la delimitación de zonas de protección de nacientes, con el fin de concluir cual es la metodología más apropiada en función del modelo hidrogeológico en los distritos Rosario y San Miguel, cantón Naranjo.

1.3.2 Objetivo Específico

- Cartografiar los pozos y nacientes ubicados dentro del área de estudio, con el propósito de recolectar información sobre la geología, tipo de suelo, infiltración y caudales.
- Establecer el modelo hidrogeológico conceptual, con el objeto de comprender el comportamiento del flujo del agua subterránea en el área de estudio.
- Identificar las zonas de recarga de acuíferos ubicadas dentro del área de estudio, con el fin de establecer las zonas más vulnerables a la contaminación y valorar la importancia de su protección.
- Aplicar las metodologías de radio fijo, analítica, y mapeo hidrogeológico para delimitar las zonas de protección de las nacientes del área de estudio, con la finalidad de comparar los resultados de cada metodología e identificar ventajas y limitaciones.
- Comparar las zonas de protección resultantes a partir de los métodos aplicados con respecto al modelo hidrogeológico conceptual, con el propósito de identificar cual metodología es concordante con el modelo hidrogeológico conceptual.

1.4 Metodología

El desarrollo del proyecto conllevó la ejecución de las siguientes etapas:

1.4.1 Cartografiado de nacientes y pozos

La ubicación de los pozos y nacientes se obtuvo de las bases de datos del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas (SENARA) y el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), respectivamente.

Las nacientes de interés son aquellas ubicadas dentro del área de estudio y que se encuentran captadas por las Asociaciones Administradoras de Acueductos Rurales (ASADAS). Estas nacientes se visitaron previa coordinación con los administradores y fontaneros de las respectivas ASADAS. El contacto y los números de teléfono de las ASADAS, lo proporcionó la oficina del SINAC de Grecia. En el área de estudio sólo las ASADAS son los entes encargados de la distribución del agua potable, la Municipalidad de Naranjo distribuye el recurso solo en el distrito Naranjo.

La caracterización de las nacientes se hizo durante las visitas de campo utilizando el instrumento “Guía para la descripción de un manantial” del Centro de Investigación en Ciencias Geológicas (CICG). Como complemento, en estas giras se realizó una prueba de infiltración cerca de cada una de las nacientes y se recolectaron dos muestras de suelo en las cercanías. Una de las muestras de suelo se enviaba al Laboratorio de Geotecnia de la Escuela Centroamericana de Geología, de la Universidad de Costa Rica para realizar los análisis de peso unitario, gravedad específica, límites de Atterberg, granulometría, porosidad y clasificación de suelos. La otra muestra de suelo se envió al Instituto de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA) del Ministerio de Agricultura, para determinar las siguientes propiedades: capacidad de campo, punto de marchitez, densidad aparente, densidad real, textura, conductividad hidráulica y materia orgánica.

Además se hicieron las descripciones respectivas sobre la geología en el área de la naciente.

1.4.2 Elaboración del modelo hidrogeológico conceptual

Para confeccionar el modelo hidrogeológico conceptual se realizó una recopilación de la información meteorológica, geológica, geomorfológica, estructural e hidrogeológica del área.

La información de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio permitió establecer el comportamiento de los elementos del clima que condicionan la magnitud de la recarga de los acuíferos. Esta información se obtuvo del Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

La geología, geomorfología y los aspectos estructurales se obtuvieron de la información bibliográfica existente, de la creación de modelos de elevación digital y modelos de sombras e interpolación de datos en Sistemas de Información Geográfica (SIG); así como la fotointerpretación de fotografías aéreas y el cartografiado de campo.

La información hidrogeológica, corresponde con la interpretación de la de pozos del SENARA y los datos de nacientes del SINAC. A partir de toda la información, se elaboraron los perfiles hidrogeológicos y mapas de isofreáticas.

Al integrar y analizar toda la información recopilada y generada en las etapas del proyecto se estableció, el modelo hidrogeológico conceptual.

1.4.3 Identificación de la zonas de recarga

Las zonas de recarga se establecieron a partir de la metodología de balance hídrico propuesta por Schosinsky (2006), esto porque es una metodología adaptada a Costa Rica, y es ampliamente empleada por el gremio de geólogos. Esta metodología requiere los siguientes pasos.

- Calcular la lluvia interceptada por el follaje.
- Calcular la infiltración.
- Calcular la escorrentía.
- Calcular la evapotranspiración.
- Calcular la recarga del acuífero.

Para aplicar las ecuaciones establecidas por Schosinsky (2006), se utilizó la herramienta de álgebra de mapas de *ArcGIS*. Esta herramienta permite realizar operaciones matemáticas y establecer condiciones con mapas *raster*. Por esta razón cada variable requerida en dichas ecuaciones, se visualizó como mapas *raster*.

La intercepción de la lluvia por el follaje requirió la información de precipitación, obtenida de las estaciones meteorológicas de IMN, para generar un mapa de polígonos de *Thiessen*. El mapa de uso de suelo se realizó con base en los mapas del IGN & PRUGAM (2008) y las ortofotos a escala a 1:5.000 del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). Estas fotos están disponibles en la página web www.snitcr.org. Las ecuaciones y coeficientes que designa Schosinsky (2006) se detallan en el apartado 5.1.

El cálculo de la infiltración contempla ecuaciones para obtener un coeficiente de infiltración por textura del suelo y un coeficiente de infiltración del suelo. Para el primer coeficiente se requiere contar con datos de campo de pruebas de infiltración con la metodología de doble anillo según sugiere Schosinsky (2006). Mientras que para el segundo coeficiente, se necesita un mapa de uso del suelo, un mapa de pendientes y un mapa de distribución de los valores de infiltración del suelo. Este procedimiento se describe en los apartados 5.2 y 5.3.

Calcular la esorrentía precisa de los mapas mensuales de precipitación, retención del follaje y la precipitación que infiltra. Las ecuaciones para obtener esas variables se mencionan en el apartado 5.4.

Por otro lado, la evapotranspiración requiere la temperatura media mensual y el porcentaje de horas de sol mensual por la latitud. La ecuación para desarrollar este ítem se puntualiza en el apartado 5.5.

Mientras que la recarga del acuífero está en función de los valores de capacidad de campo y punto de marchitez del suelo, la profundidad de raíces, los coeficientes de humedad, la evapotranspiración potencial real, evapotranspiración real y la humedad disponible. Estos parámetros se desarrollan en el apartado 5.6.

1.4.4 Aplicación de metodologías para la delimitación de las zonas de protección de nacientes

Inicialmente, involucró una recopilación bibliográfica sobre la implementación y desarrollo de diversas metodologías para delimitar las zonas de protección de nacientes.

Posteriormente, se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para editar la información (datos de entrada) y generar un mapa por cada metodología. Los parámetros requeridos para implementar las metodologías, se obtuvieron con los ensayos de campo y con la aplicación de otros métodos indirectos, como enunciados o ecuaciones detalladas en el capítulo 6.

1.4.5 Análisis de los resultados

Los mapas obtenidos por cada una de las metodologías implementadas en la etapa anterior se sobrepusieron y analizaron con un Sistema de Información Geográfica y a través de cuadros comparativos.

Cada metodología se evaluó de acuerdo con las condiciones geológicas del sitio y con el modelo hidrogeológico, para establecer criterios de discriminación y seleccionar la metodología más apropiada para el área de estudio.

2 Contexto Geológico

A continuación se describe el marco geológico del área de estudio.

2.1 Geología

La geología regional del cantón de Naranjo se detalla en el mapa geológico de la hoja cartográfica Naranjo (escala 1:50.000), establecido por la Dirección de Geología y Minas (DGM) (Huapaya & Rojas, 2012). En la Figura 2.1 se contempla el mapa geológico del área de estudio y a continuación se detallan las unidades geológicas.

2.1.1 Grupo Aguacate

El Grupo Aguacate representa la mayor extensión. Denyer & Arias (1991) dividen el Grupo Aguacate en dos formaciones, la Formación La Cruz y la Formación Grifo Alto.

La Formación La Cruz está compuesta por coladas de basalto y leucobasaltos donde se pueden encontrar geodas cuarcíferas y texturas fluidales, andesitas e intercalaciones de tobas color rojo y violeta, con granulometrías de arena media a limo. El espesor máximo que puede alcanzar es 1.500 m y la edad es del Mioceno Superior terminal al Plioceno (Denyer & Arias, 1991), entre 19,9 – 10,9 millones de años (Alvarado & Gans, 2012). El origen de la formación es por vulcanismo de arco de islas (Alvarado & Gans, 2012).

Esta formación sobreyace en concordancia angular a la Formación Peña Negra, Formación Turrúcares y Formación Pacacua. Está sobreyacida con discordancia angular por la Formación Grifo Alto, los Depósitos Lacustres, la Formación Depósitos de Avalancha Ardiente y aluviones recientes (Denyer & Arias, 1991).

La Formación Grifo Alto está constituida por lavas andesíticas a veces con augita e hipersteno, de color gris y rojas, basaltos con augitas, dacitas, flujos piroclásticos gruesos con bloques lávicos y escoriáceos, e ignimbritas color gris que gradan hacia el techo a tobas blancas. Los bloques son de tamaños decimétricos, de formas angulares y redondeados, sostenidos en una matriz lodosa con evidencias de una depositación caliente.

Los espesores sobrepasan los 1.000 m y la edad es del Plioceno al Pleistoceno (Denyer & Arias, 1991), entre 7,3 – 3,3 millones de años (Alvarado & Gans, 2012). Su origen se debe al vulcanismo de arco de islas con un basculamiento posterior (Alvarado & Gans, 2012).

Regionalmente, la Formación Grifo Alto sobreyace discordantemente a la Formación La Cruz y la Formación Coris; es sobreyacida por las Lavas Intracañón y los Depósitos de Avalancha Ardiente (Formación Tiribí) (Denyer & Arias, 1991).

Es importante mencionar que Denyer & Arias (1991) propusieron una lista de posibles centros de emisión volcánica, de esta formación, el más cercano al área de estudio es el situado en Atenas.

En el área de estudio, Vargas (1978) indica que afloran lavas andesíticas y basálticas con intrusiones de diques de similar composición, brechas volcánicas y tobas pertenecientes al Grupo Aguacate. Otros autores han establecido unidades informales correlacionables con el Grupo Aguacate. Además, Chaves & Avilés (1993) indican que el origen de estas unidades es por actividad volcánico – explosiva.

La unidad basal es la unidad de flujos piroclásticos blocosos. Chaves & Avilés (1993) y Bonilla *et al.* (1993) la describen como brechas monolitológicas, mal seleccionadas, constituidas entre un 20 y 60% de bloques lávicos. La matriz es arenosa cristalina, de alta a moderada consolidación y soldada, evidenciando altas temperaturas durante su depositación. Chaves & Avilés (1993) estiman un espesor de 10 m, aunque al Sur del área, Bonilla *et al.* (1993) reportan espesores de 80 m.

Los bloques muestran coloraciones de gris oscuro a gris azulado, y tonos rojizos, el tamaño varía de métricos a centimétricos y la esfericidad varía de angulares a subangulares. Macroscópicamente corresponde con lavas andesíticas porfiríticas muy cristalinas con fenocristales de piroxenos y plagioclasas, algunas ocasiones vesiculares (Chaves & Avilés, 1993).

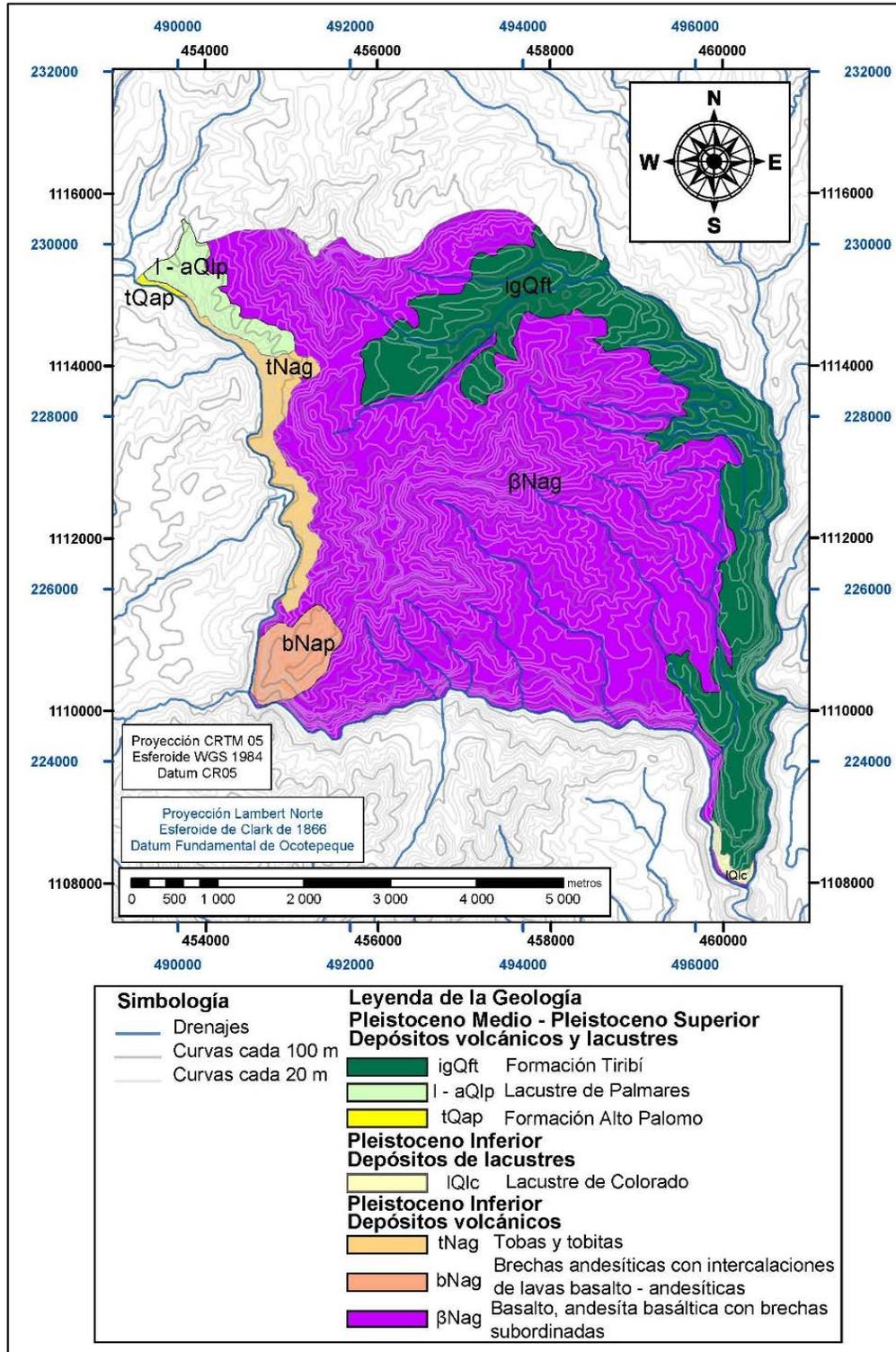


Figura 2.1: Mapa geológico del área de estudio. Tomado de Huapaya & Rojas (2012).

Esta unidad aflora en el río Colorado, Cocora y Molino y las quebradas Sabanilla y Honda (Chaves & Avilés, 1993 y Bonilla *et al.*, 1993).

La segunda unidad es denominada unidad efusiva. Chaves & Avilés (1993) y (Bonilla *et al.*, 1993) describen lavas masivas andesíticas, muy cristalinas con textura porfírica y fenocristales de plagioclasas y piroxenos, estos últimos se caracterizan por su gran tamaño. La roca muestra coloraciones de gris oscuro a pardo rojizo y tonos amarillentos que se deben a las alteraciones de óxidos de hierro. El espesor es menor a 10 m y aflora en el río Común y el río Molino, en la quebrada Sabanilla y en el cerro Las Pastoras.

Bonilla *et al.* (1993) identifican también, brechas volcánicas color negro y soldadas, sobreyaciendo concordantemente las lavas con piroxenos descritos anteriormente. Los fragmentos son angulosos, de tamaño promedio 2 cm de composición andesítica con texturas escoráceas. La matriz es cinerítica y bastante quemada. Se cree que estas brechas podrían provenir de la actividad del cerro Sitio y del cerro Espíritu Santo. Se correlacionan con la Formación Grifo Alto descrita por Denyer & Arias (1991).

En el cerro Espíritu Santo y en el cerro sin nombre ubicado al Sur del anterior, Fajardo (1994) delimitó la unidad de rocas volcánicas antiguas, que aflora en forma de núcleos relictos dentro de un suelo muy desarrollado o bien sobre este. Se describe como lavas traqui-basálticas, color oscuro (gris-gris pardo), con fenocristales de augitas, plagioclasas y olivinos, la ceolita se presenta como mineral de alteración.

Huapaya & Rojas (2012) en los cerros Hornos, Las Palmas, Las Pastoras y Espíritu Santo señalan basaltos, andesitas basáltica con brechas subordinadas correlacionables con la unidad efusiva descrita por Chaves & Avilés (1993), Bonilla *et al.* (1993), incluyendo las brechas volcánicas descritas por este último autor, y con las lavas Aguacate descritas por Žáček *et al.* (2012), de composición basáltica hasta andesita – basáltica, masivas, color gris oscuro a gris negro, textura porfídica y con fenocristales de plagioclasas.

Las tobas y tobitas delimitadas por Huapaya & Rojas (2012) son correlacionables también, con las descritas por Žáček *et al.* (2012), color café con matriz de hematita.

En el cerro Crisante, Huapaya & Rojas (2012) describen una unidad de brechas andesíticas con intercalaciones de lavas basalto – andesíticas. Esta unidad es correlacionable con la unidad de brechas volcánicas del Grupo Aguacate definidas por Žáček *et al.* (2012). Se refieren a brechas volcánicas o aglomerados que se alternan con capas de lavas andesíticas y tobas de lapilli. Los clastos varían de tamaño milimétrico hasta 70 cm, son angulares y subangulares, de andesitas y tobas, mientras que la matriz es basalto – andesítica.

2.1.2 Lacustre Colorado

Este lacustre aflora al sureste del área de estudio en el Tajo La Pista, en las cercanías donde el río Colorado converge con el Río Grande. La edad es Pleistoceno Inferior (Rojas, 2013).

Rojas (2013) define esta Formación como una secuencia lacustre de limos y arenas finas líticas. La base de la secuencia consiste en intercalaciones de limos café y arenas líticas color gris oscuro y café, con un espesor de 1,5 m. El techo de la secuencia es de 2,5 m de capas horizontales de limos y arenas líticas finas, con laminación paralela milimétrica y estratificación horizontal, de colores desde café claro a café (Rojas, 2013).

2.1.3 Formación Alto Palomo

La Formación Alto Palomo es descrita formalmente por Villegas (2004) con edad Pleistoceno Medio, aunque su litología previamente ya había sido comentada por otros autores. Villegas (2004) la divide en dos miembros, Miembro Palomo y Miembro Palmitos. El origen de esta Formación se debe a posibles colapsos caldéricos con depósitos de flujos ignimbríticos de edades entre 0,5 – 0,49 millones de años y 0,44 – 0,32 millones de años (Alvarado & Gans, 2012).

El Miembro Palomo está conformado por tobas de lapilli pumíticos, colores rojo, crema, amarillo y blancos, con mala selección y contacto por matriz; brechas basales pumíticas con poca ceniza fina; y niveles de cenizas finas a medias. Presenta forma acuñada y estratificación definida, además es caracterizada por presentar materia orgánica carbonizada. La fuente de origen de estos depósitos es una posible Caldera denominada La Picada (Villegas, 2004).

El Miembro Palmitos se refiere a tobas de lapilli pumítico, color crema, gris y blanco, y brechas basales pumíticas con ausencia de finos. La selección de las tobas es mala a muy mala y contacto por matriz. Además cuenta con niveles delgados de ceniza fina a media. La fuente de origen de estos depósitos corresponde con la caldera Chocosuela (Villegas, 2004). Rojas (2013) señala que esta Formación fue descrita dentro del área de estudio por Chaves & Áviles (1993) y Macías & Zamora (1993), quienes la denominaron unidad de piroclastos de caída y flujos piroclásticos, y erróneamente la correlacionaron como una unidad superior del Grupo Aguacate.

La unidad de piroclastos de caída y flujos piroclásticos definida por Chaves & Avilés (1993) corresponde con depósitos de tobas de caída y flujos piroclásticos, indiferenciados, consolidados y poco densos con un espesor mínimo de 250 m. Las granulometrías varían entre cenizas (2 mm) y lapilli (64 mm). La selección es regular en las tobas de caída y mala en los depósitos de flujo.

Macías & Zamora (1993) identifican tobas cristalinas bien compactadas e intercaladas con tobas pumíticas color crema en la parte basal, tobas líticas color café soportadas por grano en la parte central y un flujo pumítico de 15 m denominado Miembro Cañuela y depósitos Surges de 22 m de espesor en la parte superior. El espesor máximo de la unidad es 233 m y afloran en la quebrada Cañuela y Potrerillos.

En las quebradas Barquero y Eva, el río Cascajal y en la localidad Vaca Muerta, de San Juan, Bonilla *et al.* (1993) señalan piroclastos de caída que corresponden con tobas poco consolidadas con coloraciones cafés a amarillento, con granulometrías graduales, en paquetes métricos, donde se pueden presentar laminaciones paralelas y las granulometrías son de ceniza media a fina, y lapilli, contienen fragmentos pumíticos, líticos de forma angular a subangular, plagioclasas y piroxenos. Mientras que al Norte del río Cascajal, los flujos piroclásticos corresponde con un flujos masivo, color gris, muy compacto con fragmentos subangulares cm a dm, de composición tobácea pumítica y de lavas andesíticas con piroxenos, con una matriz cinerítica color gris oscuro y granulometría media.

Fajardo (1994) delimita otra unidad denominada unidad de tobas café con líticos en el cañón del Río Grande y correlacionable con la descrita anteriormente. Corresponde con una toba masiva, color de gris a café pardo, con textura piroclástica, los granos son de medio a grueso, y la selección es mala, puede presentar clastos lávicos y la matriz tobácea.

Rojas (2013) indica que en los alrededores del área de estudio predomina el Miembro Palmitos, caracterizado por tobas café claro, inconsolidadas, de mala selección, con líticos de lavas, biotita, pómez con hornblenda y biotita, en una matriz que constituye entre un 50 % a 20% del depósito.

2.1.4 Lacustre Palmares

Específicamente dentro del área de estudio, la base del lacustre es descrita por Vargas (1978) como una masa de 25 m de espesor, sin gradación, color gris y compuesta por piedra pómez y micas; y capas delgadas de diatomitas, formada por frústulas de diatomeas, de color gris a blanco y friable.

Macías & Zamora (1993) señalan intercalaciones de horizontes pumíticos color crema, arenas y lutitas terrígenas café oscuro y conglomerados pardos en la parte superior, interpretadas como depósitos de origen lacustre y por la presencia de hummocky y conglomerados podrían corresponder con la desembocadura de un paleorío.

Fajardo (1994) describe intercalaciones de estratos tabulares e irregulares de areniscas y lutitas con contenidos variables de pómez, y lutitas terrígeneas, buzando subhorizontalmente, con estructuras sedimentarias como estructuras de carga y laminación convoluta. Además señala que en la parte cuspidal del depósito aflora un horizonte de diatomita. Se estima un espesor de 25 a 30 m y una edad Pleistocena Tardía debido al hallazgo de un molar de mastodonte de la especie *Cuvieronius hyodon* por Laurito (Fajardo, 1994).

En cuanto a la sedimentología, Fajardo (1994) describió tres facies de un abanico deltaico lacustre: una facies distal, una facies proximal y una facies de sedimentación diatomítica.

Fajardo (1994) deduce un paleoambiente de área marginal en una cuenca lacustre, con un aporte de un riachuelo desde el noreste hacia el suroeste.

Rojas (2013) menciona que el lacustre de Palmares corresponde con alternancias de depósitos lacustres de agua profunda y somera constituidas por dos facies. La asociación consiste de litofacies de gravas, arenas, limo pumíticos y diamicto pumítico, enriquecidas en clastos pumíticos. Mientras que la asociación II, techo de la secuencia, consiste en gravas, arenas y limos, con predominancia de líticos de lava.

La edad radiométrica es de 0,58 – 0,44 millones de años hasta ligeramente menor a 0,322 millones de años. Mientras que la edad paleomastozoológica es entre 2,6 y 1,6 millones de años (Rojas, 2013), una descripción más detallada en cuanto a la paleontología se puede encontrar en Laurito *et al.* (2005). Alvarado & Gans (2012) mencionan edades entre 0,45 – 0,43 millones de años y 0,324 – 0,320 millones de años.

El origen de esta cuenca lacustre puede ser debido a tres fuentes: una caldera de colapso, una caldera de avalancha o cuencas por control tectónico (Rojas, 2013).

En cuanto a las relaciones estratigráficas, el lacustre de Palmares sobreyace el Grupo Aguacate, la Formación Alto Palomo y la Formación Tiribí, y lo subyacen la Formación Tiribí y los depósitos Cuaternarios.

2.1.5 Formación Tiribí o Formación Depósitos de Avalancha Ardiente

En la Formación Tiribí, Denyer & Arias (1991) sitúan en la parte basal depósitos de pómez de caída, seguidos por flujos de ceniza, lapilli y bloques, e ignimbritas grises con *fiammes* milimétricos y centimétricos de obsidiana y pómez; y en la parte superior depósitos de caída. Además los autores indican que el espesor de la secuencia no supera los 150 m.

Sobre las relaciones estratigráficas regionales, la Formación Tiribí yace discordantemente sobre las formaciones, Lavas Intracañón, Pacacua, Peña Negra, Grifo Alto y La Cruz; y es sobreyacida por aluviones, lahares, cenizas y la Formación Barva (Denyer & Arias, 1991).

La edad es Pleistoceno y su origen se debe a la actividad de varios centros de emisión tipo calderas ubicadas en una franja NW-SE desde San Gabriel, cerro Minas hasta Atenas (Denyer & Arias, 1991).

En el área de estudio Bonilla *et al.* (1993) describe una unidad de ignimbritas con dos flujos correlacionables con la Formación Avalancha Ardiente de edad Pleistoceno.

El flujo basal son las ignimbritas grises, que afloran en los cauces del río Pilas, Colorado, Molino, Trojas, Cascajal, Pilitas y quebrada Palmas. Es un flujo ignimbrítico compacto escoriáceo, de color gris oscuro con fiammes de vidrio negro de 2 cm de largo por 0,5 cm de ancho, con textura escoriácea y fiammes de pómez color amarillento de hasta 8 cm. La matriz es cinerítica de color gris, con granulometría fina a media, compuesta de vidrio, pómez, plagioclasas y líticos, piroxenos. El espesor de este flujo basal va desde los 25 a 30 m, sobreyace discordantemente la unidad de piroclastos de caída y flujos piroclásticos (correlacionable con el Lacustre Colorado); y se encuentra sobreyacido lateralmente por el flujo ignimbrítico claro y la unidad piroclástica reciente. Con base en el aumento de los espesores y el tamaño de los fiammes, se cree que el foco de emisión se encuentra hacia el Sur (Bonilla *et al.*, 1993).

El flujo superior, denominado ignimbrita clara (Bonilla *et al.*, 1993) corresponde con un flujo ignimbrítico, color gris claro, muy denso y soldado, constituido por fiammes de pómez flotando en una matriz cinerítica muy fina, con plagioclasas y líticos. El espesor es de 7 m y se encuentra sobreyacida por depósitos piroclásticos recientes.

Además, Chaves & Avilés (1993) reportan una ignimbrita de 30 m de espesor, al noreste del área, de color oscuro con abundantes fiammes de vidrio negro, duras y compactas, que al alterarse adquieren un tono gris verdoso y Macías & Zamora (1993) señalan tobas lapílicas pumíticas, en algunas zonas no soldadas y en otras muy soldadas.

Pérez (2000) y Pérez *et al.* (2006) diferencian dos unidades de depósitos piroclásticos correspondientes con la Formación Tiribí. La unidad inferior refiere a una ignimbrita soldada, con diaclasas columnares y textura eutaxítica con fiammes de obsidiana. Mientras

que la unidad superior es una ignimbrita no soldada, pobremente sorteada, constituida por lapilli o bombas negras, gris o blanco, con bandas pumíceas, fragmentos líticos andesíticos y clastos de gabros, en una matriz de cristales quebrados, fragmentos de vidrio y líticos. Además, en el Valle Central, la Formación Tiribí se subdivide en tres facies, no soldada, moderadamente soldada y densamente soldada, todas gradacionales entre sí (Pérez, 2000 & Pérez *et al*, 2006).

El foco de emisión de esta Formación es la caldera del Barva y la edad es de 0,322 millones de años (Pérez, 2000 & Pérez *et al.*, 2006).

2.1.6 Depósitos piroclásticos recientes

A lo largo del área de estudio, Bonilla *et al.* (1993) describen intercalaciones de paquetes masivos de ceniza, flujos de cenizas y lapilli deleznable, alterados con coloraciones pardas, hasta amarillentas o blancuzcas, constituidos por pómez, líticos, vidrio y plagioclasas. Las cenizas son finas y con laminaciones paralelas.

Chaves & Avilés (1993) identifican cenizas y lapilli poco consolidados de coloraciones gris claro a un pardo grisáceo, al meteorizarse se muestran de colores amarillentos, pardo verdosos a pardo rojizos con abundante desarrollo de limonita y hematita.

Macías & Zamora (1993) señalan una parte inferior compuesta por un flujo detritos volcániclos, como tobas, ignimbritas y andesitas, y una parte superior constituida por cenizas finas líticas color café oscuro y rojo.

Estos materiales provienen de la Cordillera Central, son de edad Holoceno y tiene espesores máximos de 45 m (Chaves & Avilés, 1993 y Bonilla *et al.*, 1993).

2.1.7 Depósitos aluvionales

En el área, Chaves & Avilés (1993) describen depósitos sedimentarios inconsolidados con bloques decimétricos de lavas e ignimbritas, en los ríos Pilas y Colorado, Cocoro con espesores de 3 m.

Bonilla *et al.* (1993) indica aluviones constituidos por bloques redondeados de lavas andesíticas con piroxenos, con tamaños máximos de 50 cm y Fajardo (1994) identifica conglomerados, areniscas y cenizas color rojo.

2.2 Geomorfología

La Figura 2.2 corresponde con el mapa de orientación de la topografía. Este mapa permite reconocer que las orientaciones predominantes de la topografía en el distrito Rosario son noreste, sureste y suroeste, y que están influenciadas por la orientación noroeste – sureste de la red de drenaje fluvial. En el distrito San Miguel predominan las orientaciones noreste, noroeste y suroeste; las últimas dos influenciadas por el cañón fluvial de Río Grande. La estadística indica que las principales orientaciones son noreste, sureste, suroeste y noroeste.

En el mapa de pendientes, mostrado en la Figura 2.3, se observa un contraste entre las pendientes menores a 8 % y las pendientes entre 30 y 60 %, estas últimas correspondientes con los cerros Espirito Santo, Las Pastoras, Las Palmas, Hornos y Crisante. Las pendientes mayores a 75 % se refieren al cañón Río Grande. Los cauces de los ríos y los cerros reflejan las mayores variaciones en la topografía. La estadística indica que la pendiente promedio es de 45%.

En cuanto a las unidades geomorfológicas, Madrigal & Rojas (1982) y Madrigal & Salazar (1994) indican que se tratan de formas de origen volcánico debido a la actividad volcánica de la Cordillera Central. El área de estudio se encuentra en la ladera suroeste del volcán Poás por lo que puede correlacionarse con las unidades Relleno Volcánico del Valle Central (Mioceno Medio) y Restos de topografía plana formada por ignimbritas (Pleistoceno) descritas por Madrigal & Salazar (1994).

En el área de estudio se identificaron un total de cinco unidades geomorfológicas, con base en mapas anteriores, fotografías aéreas y el trabajo de campo. Estas se muestran en la Figura 2.4 y se detallan a continuación.

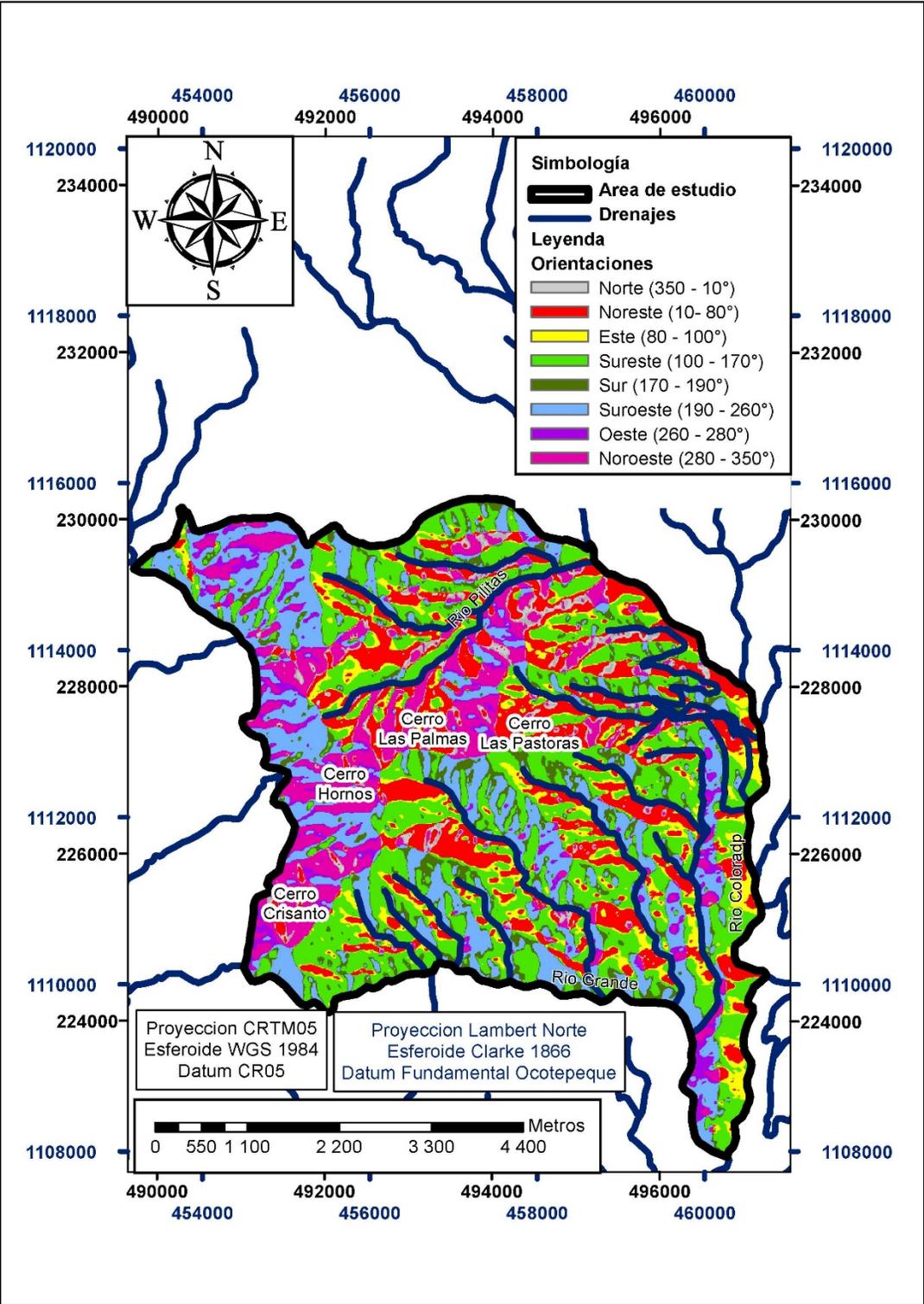


Figura 2.2: Mapa de orientación de la topografía del área de estudio.

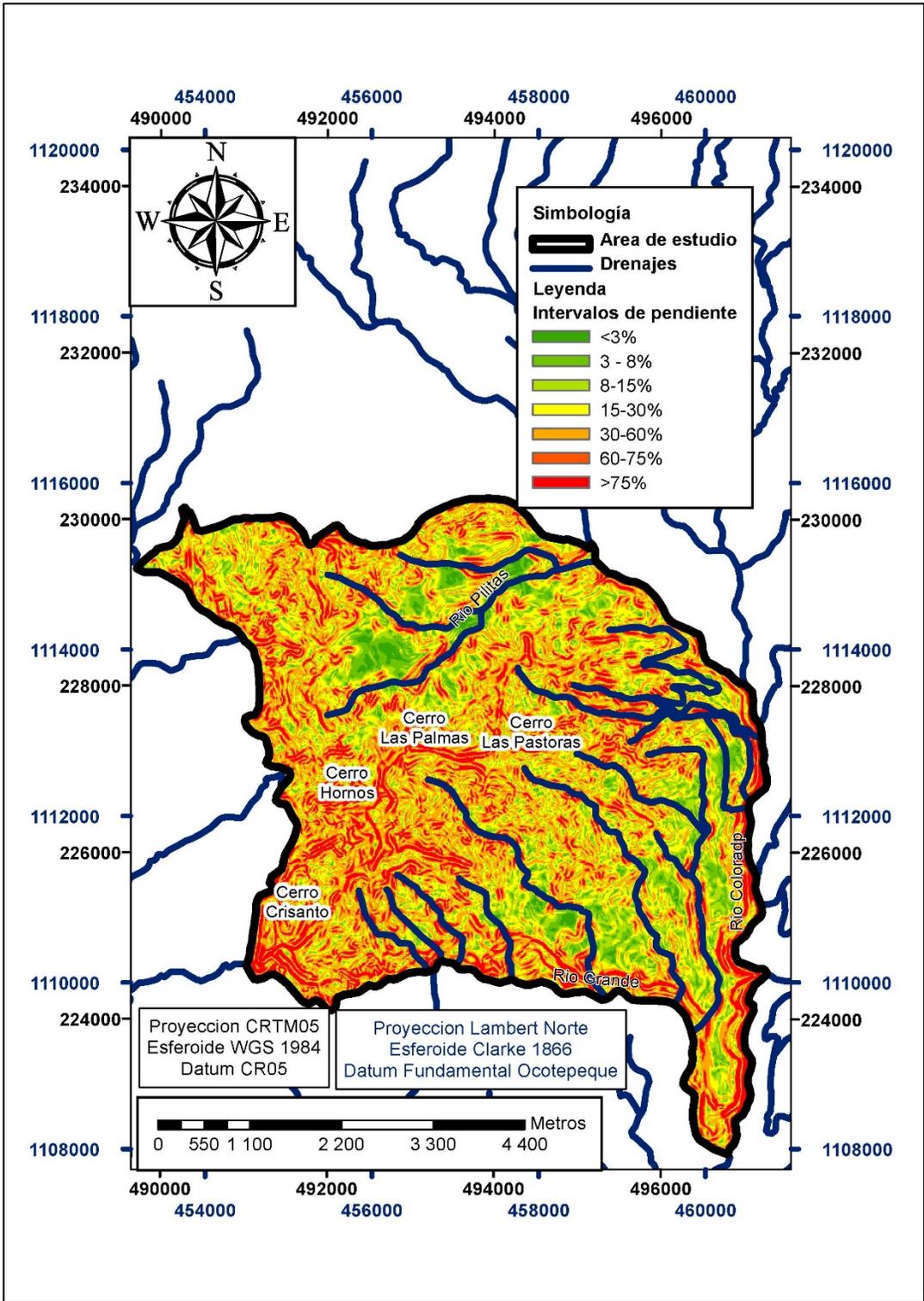


Figura 2.3: Mapa de pendientes del área de estudio.

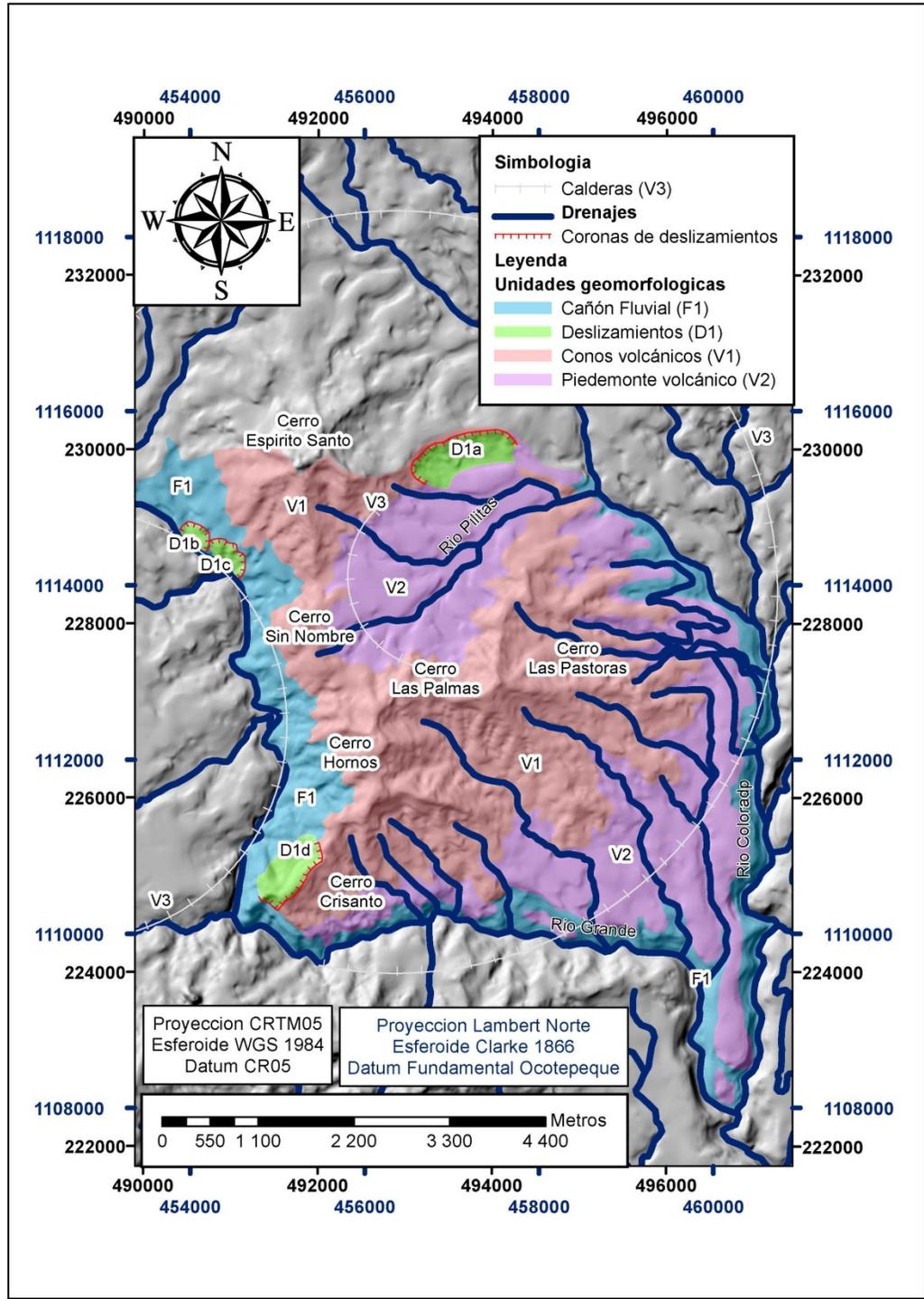


Figura 2.4: Mapa geomorfológico del área de estudio.

2.2.1 Unidad de deslizamientos (D1)

Corresponde con cuatro deslizamientos identificados en Bergoeing & Malavassi (1982a) y Huapaya & Rojas (2012).

Uno de estos deslizamientos se localiza al Este del cerro Espirito Santo (D1a) con un área de 0,429 km² y se desliza desde la cota de 1.080 m.s.n.s.m. Otros dos deslizamientos muy cercanos entre sí, se sitúan al noroeste del área, en la margen derecha del Río Grande sobre el cañón fluvial, se extienden un área de 0,06 (D1b) y 0,08 km² (D1c) y ambos se desprenden desde la cota de 1.000 m.s.n.m. El tercer deslizamiento de kilómetros cuadrados, se localiza al noroeste del cerro Crisanto y abarca un área de 0,32 km², desprendiéndose desde los 1.120 m.s.n.m.

La forma de estos deslizamientos es alargada hacia lo ancho. Las pendientes son altas (30 – 60 %). Las formas se encuentran poco disectadas.

El tipo de roca corresponde quizá con depósitos coluviales, posiblemente con bloques de roca correlacionables con el Grupo Aguacate y el Lacustre de Palmares por sus ubicaciones. La morfogénesis se debe a la acción de los procesos erosivos y la edad de las rocas es Reciente.

2.2.2 Unidad de cañón fluvial (F1)

Esta unidad limita el área de estudio al Oeste, Sur y Este y ha sido conformado por el Río Grande.

El cañón fluvial tiene profundidades variables entre los de 100 y 220 m. La forma es alargada y bastante irregular, presentándose los mayores encajamientos de la red fluvial al Este y Sur. Las pendientes varían entre fuerte (30 – 60%) y extremadamente fuerte (>75%).

Esta morfología tiene una orientación Norte – Sur al Este y Oeste del área de estudio; y una orientación Este – Oeste al Sur del área de estudio. Además presenta un patrón de drenaje rectangular.

El tipo de roca al Este es la Formación Tiribí, al Sur el Grupo Aguacate y al Oeste la Formación Alto Palomo, el Lacustre de Palmares y el Grupo de Aguacate. Bergoeing & Malavassi (1982a) indican que este cañón fluvial corresponde con las rocas volcánicas del Cuaternario. La morfogénesis se debe a la actividad fluvial unida al material triturado pre-existente y probablemente ayudado por la neotectónica asociada a una caldera, esto permitió al Río Grande y otros de la vecindad, ahondar rápidamente su cauce (Bergoeing & Malavassi, 1982a).

La formación del cañón posiblemente inició posterior al Pleistoceno y continúa erosionando.

2.2.3 Unidad de conos volcánicos (V1)

Los conos volcánicos corresponden con los cerros Crisanto, Hornos, Las Palmas, Las Pastoras, Espirito Santo y sus respectivas laderas.

El cerro Crisanto se eleva desde la cota de 910 a 1.120 m.s.n.m y se extiende 0,8023 km². El cerro Hornos inicia su base desde los 820 a 1.260 m.s.n.m. y contempla un área de 3,6534 km². El cerro Las Palmas es el más pequeño con un área de 0,4262 km², desde la cota de 1.060 a 1.180 m.s.n.m. El cerro Las Pastoras es el de mayor extensión con un área de 6, 2367 km², entre las cotas de 860 ay 1.240 m.s.n.m. El cerro Espirito Santo, dentro del área de estudio muestra un área de 2,4612 km², desde los 1.040 a 1.340 m.s.n.m., al Sur de este cerro hay un cerro sin nombre desde la cota de 1.020 a 1.160 m.s.n.m con un área de 0,6925 km².

Son la unidad de mayor extensión y abarca 13,65 km² aproximadamente. La forma de los cerros es alargada y rectangular, a excepción del cerro Espirito Santo que tiene una forma redondeada. Se encuentran fuertemente disectados, con pendientes principalmente fuertes (30 – 60%) y un patrón de drenaje subdendrítico.

Además, los cerros Espirito Santo, Hornos y Crisanto muestran un lineamiento Norte – Sur, y los cerros Las Palmas y Las Pastoras muestran un lineamiento Este – Oeste.

La litología corresponde con las rocas del Grupo Aguacate, de edad Plioceno (Huapaya & Rojas, 2012 y Bergoeing & Malavassi, 1982a).

La morfogénesis se debe al vulcanismo de arco de islas, posiblemente asociado también a una caldera.

Bergoeing & Malavassi (1982a) indican que el cerro Espíritu Santo sería un cono volcánico remanente de una actividad post – caldera típica de la depresión de Palmares. La deducción de que el cerro Espíritu Santo es un posible conducto volcánico también se detalla en Huapaya & Rojas (2012).

2.2.4 Unidad de piedemonte volcánico (V2)

Se ubican al sureste, en el distrito Rosario, en las márgenes de las quebradas Porras, Honda, Salitral, Hornos, Arley, Barquero y algunos afluentes del Río Grande; al Este del área de estudio, en la parte central del distrito San Miguel y en las márgenes del río Pilitas y Pilas. Presentan unas morfologías irregulares y onduladas, con pendientes bajas (3 – 8%) y un patrón de drenaje subdendrítico. Constituyen un área de 11,557 kilómetros cuadrados.

La litología corresponde con materiales erosionados, por la acción de los ríos, pertenecientes al Grupo Aguacate. La edad es posterior al Pleistoceno.

2.2.5 Unidad de calderas (V3)

En las cercanías del área de estudio, al Oeste, Denyer *et al.* (2009) y Rojas (2013) identifican la presencia de dos calderas: la caldera de San Ramón y la caldera Palmares. Más detalle de las descripciones de dichas calderas se puede encontrar en Rojas (2013), donde los depósitos lacustres indican edades de 0,58 – 0,44 millones de años hasta menor a 0,32 millones de años, cuyo origen está asociado a calderas o controles tectónicos.

En los alrededores del río Pilitas, con base en algunos depósitos fluvio – lacustres, Bergoeing & Malavassi (1982b) trazan una pequeña caldera.

En Bergoeing & Malavassi (1982a) se detalla la hipótesis de la ocurrencia de eventos de colapsamiento de calderas en la región, sobre cuyas fracturas se encañonó la red fluvial actual.

El contexto anterior, sumado a la presencia de depósitos fluvio lacustres, conos volcánicos asociados a una actividad post – caldérica (Bergoeing & Malavassi, 1982a) y los lineamientos de los ríos, pueden sugerir la existencia de una caldera ubicada sobre el trazo actual del Río Grande, que se extiende más hacia el Norte y se sale del área de estudio.

2.3 Geología estructural

En la Figura 2.5 se muestran los rasgos estructurales identificados en el cantón de Naranjo, provincia Alajuela.

2.3.1 Fallas

La principal falla, es la falla inferida del río Colorado y Río Grande, con orientación Norte – Sur. Esta falla produce un fuerte encajamiento del río Colorado y ha sido indicada por Denyer *et al.* (2009), Huapaya & Rojas (2012) y Porras *et al.* (2012).

Porras *et al.* (2012) señalan que la falla Río Grande produce un plegamiento asimétrico y de tipo chevron en la Formación Tiribí. La cinemática de deformación es de pliegues por propagación de falla. La profundidad de la falla es menor a 1.000 metros y la edad es la misma que la establecida para la Formación Tiribí (Porras *et al.*, 2012).

Otras fallas inferidas se delimitan al Oeste y Sur del Río Grande, con orientaciones noroeste – sureste y noreste – Sur, con desplazamientos dextrales, sinestrales y normales, posiblemente formando pares conjugados.

2.3.2 Lineamientos

En general los lineamientos se delimitan de acuerdo a los ríos, quebradas y cerros. Estos lineamientos presentan una predominancia en las orientaciones noroeste – sureste.

Al Oeste de la falla del río Colorado hay un alineamiento con orientación Norte – Sur, sobre el cual se encaja un afluente del Río Grande.

Los restantes lineamientos situados dentro del área de estudio, están asociados al cerro Espíritu Santo y los cerros Hornos, Las Palmas y Crisanto.

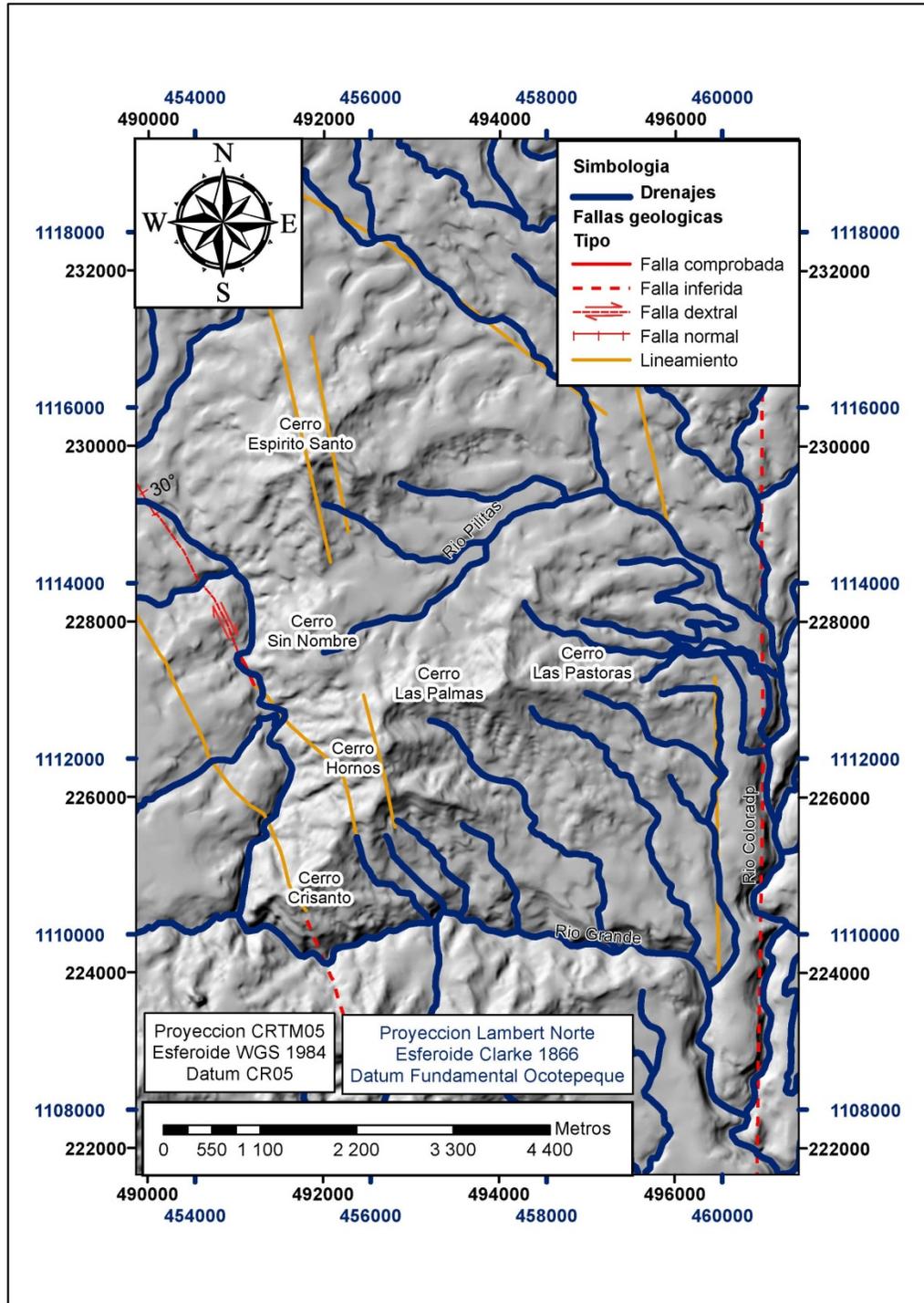


Figura 2.5: Mapa estructural del área de estudio. Modificado de Huapaya & Rojas (2012).

También se debe agregar, que las orientaciones de los afluentes del Río Grande presentan una orientación noroeste – sureste. Al Sur del área, además, el Río Grande se encaja fuertemente en una orientación Este – Oeste.

Las orientaciones de los drenajes en el área de estudio junto con la falla del río Colorado parecen delimitar una estructura de forma tabular. Esta estructura bordea la unidad de conos volcánicos y se alinea con la ubicación de calderas sugeridas por algunos autores. En esta región, Bergoeing & Malavassi (1982a) indican que, los ríos se encañonaron en su posición actual siguiendo las fracturas provocadas por el colapso de una caldera.

3 Caracterización de pozos y nacientes

El cartografiado de pozos y nacientes se realizó a partir de la base de datos del SENARA y el SINAC, respectivamente.

De las nacientes reportadas por el SINAC, 12 son captadas y administradas por las ASADAS del cantón Naranjo. Estas nacientes fueron seleccionadas para ser visitadas en el campo y obtener información sobre la geología, tipo de suelo, infiltración y caudales.

Las ASADAS del cantón de Naranjo se abastecen únicamente de nacientes.

3.1 Inventario de pozos

Dentro del área de estudio el SENARA reporta 52 pozos, de estos, 31 se ubican en el distrito Rosario y 21 en el distrito de San Miguel. La Figura 3.1 muestra la ubicación de los pozos en el área de estudio.

En cuanto a la información litológica, de los 21 pozos situados en el distrito de San Miguel, 11 de ellos contienen información litológica, los restante 10 no la tienen. Mientras que en el distrito Rosario, 17 presentan información y 14 no cuentan con ella.

Sobre el nivel estático, en el distrito San Miguel solo 8 pozos cuentan con esta información, y en el distrito de Rosario hay 22 pozos que reportan el nivel estático.

3.2 Inventario de nacientes

En el área de estudio, durante el 2012 el SINAC inventarió 77 nacientes, de las cuales 12 son captadas por ASADAS. Estas ASADAS son, El Rosario, San Miguel Este, San Miguel Oeste y Concepción. En la Figura 3.2 se muestra el mapa de las nacientes, y en color se detalla las nacientes por ASADAS.

Las nacientes visitadas se caracterizaron empleando el instrumento “Guía para la descripción de un manantial” del Centro de Investigación en Ciencias Geológicas (CICG) (ver Anexo 1: Guía para la descripción de un manantial). A continuación se muestran los resultados obtenidos.

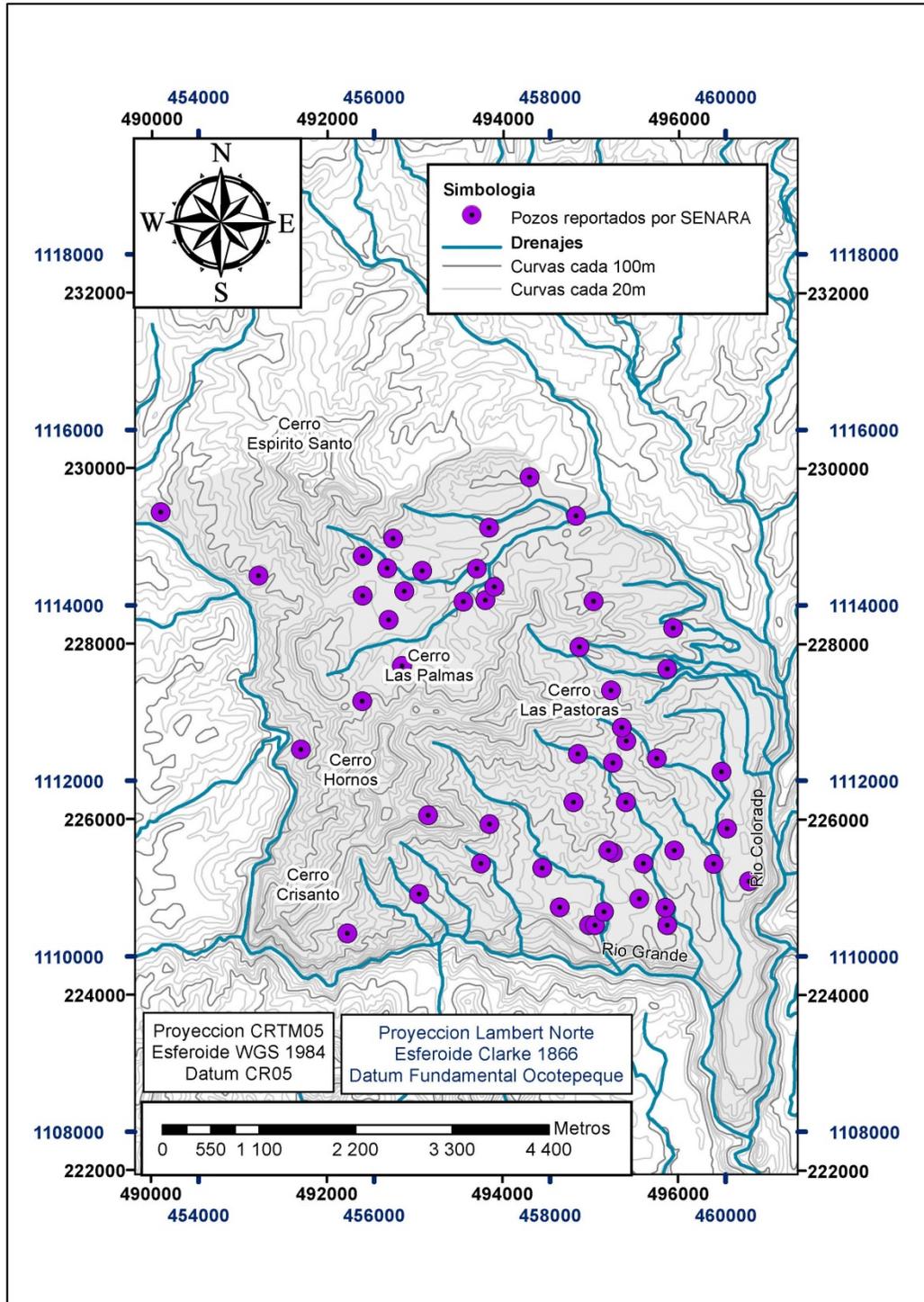


Figura 3.1: Mapa de pozos en el área de estudio.

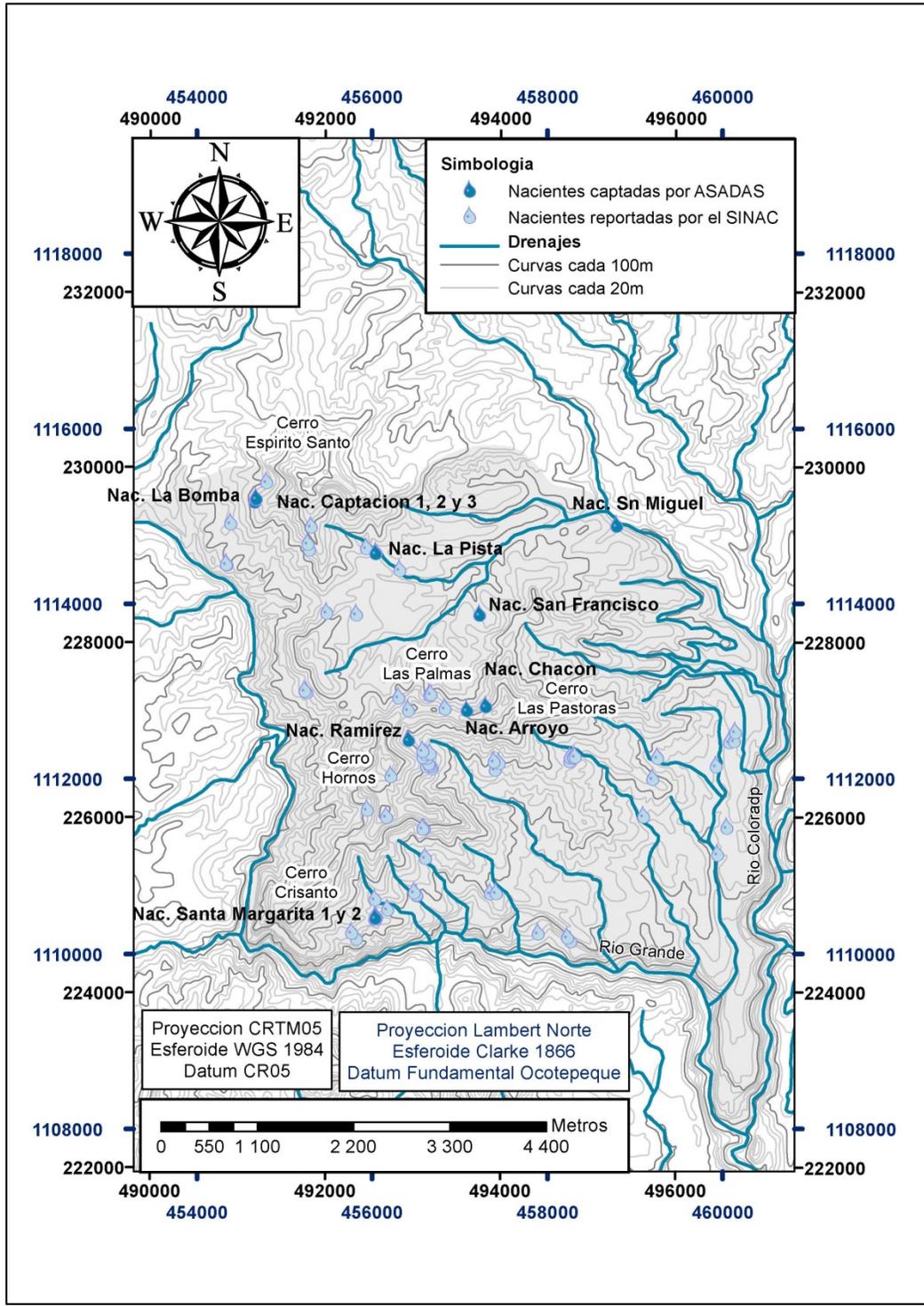


Figura 3.2: Mapa de nacientes en el área de estudio.

3.2.1 Nacientes administradas por la ASADA El Rosario

A continuación se describen las nacientes administradas por la ASADA El Rosario que se ubican al suroeste del área de estudio.

3.2.1.1 Nacientes Santa Margarita 1 y 2

La naciente Santa Margarita 1 se localiza en las coordenadas 456.048/1.110.447 (CRTM – 05) a 998 m de altitud y la naciente Santa Margarita 2 se localiza en las coordenadas 456.035/1.110.440 (CRTM – 05), a 999 m de altitud. Estas nacientes se ubican en la microcuenca quebrada Porras, subcuenca Río Grande, cuenca Río Grande de Tárcoles (al suroeste del área de estudio). La dirección es 500 m al Norte de la Iglesia católica de Santa Margarita, en el distrito Rosario.

El estado de las captaciones es muy bueno. Las nacientes y un tanque de almacenamiento se encuentran en una propiedad con las respectivas rotulaciones, bordeada por una malla electrosoldada con alambre de navaja y con candado en dos portones de acceso a la propiedad, los alrededores se encuentran limpios. Las captaciones son de concreto, están pintadas y enchapadas con cerámica, las tapas son metálicas se encuentran pintadas y con candado. Tanto las nacientes como el tanque presentan un canal para la desviación de aguas pluviales con caudal ecológico. En la Figura 3.3 y la Figura 3.4 se muestran las fotografías de las captaciones.

El uso actual del agua es consumo humano para abastecer el poblado de Santa Margarita. El día de la visita al campo ambas nacientes se aforaron cinco veces cada una con un molinete, resultando un promedio de 1,49 l / s para Santa Margarita 1 y 1,38 l / s para Santa Margarita 2.

En cuanto al uso del suelo, en los 100 m alrededor de las nacientes, al Norte se encuentra un bosque en proceso de recuperación, sin embargo al Oeste después de los 10 m, se pueden encontrar cultivos de café y plátano.



Figura 3.3: Fotografía de la captación en la naciente Santa Margarita 1.



Figura 3.4: Fotografía de la captación en la naciente Santa Margarita 2.

Geológicamente, en las captaciones se observó una lava basáltica, desde la cual afloran las nacientes. De acuerdo a la descripción y el mapa geológico la muestra es correlacionable con los basaltos del Grupo Aguacate.

Sobreyaciendo la lava hay un suelo café oscuro con clastos volcánicos decimétricos, del cual se estima un espesor de 3 m.

Se realizó una prueba de infiltración (NA – B1), con la metodología doble anillo en las coordenadas 456.026 / 1.110.516 (CRTM – 05), resultando un valor de 30,097 cm / h. La gráfica de infiltración se encuentra en la Figura No. 1 (Anexo 2). También se recolectó una muestra de suelo con código NA – B1, cuyas propiedades geotécnicas e hidrológicas se indican en el Cuadro No 1 y Cuadro No 2 (Anexo 3) respectivamente.

Para la naciente Santa Margarita 2 se realizó también una prueba de infiltración (NA – A1) con la metodología de doble anillo en las coordenadas 456.042/1.110.109 (CRTM – 05), el valor de la infiltración resultó ser 230,67 cm/h. Estos resultados difieren significativamente del anterior debido a que en este sitio se encontraban muchas grietas en el suelo por desecación, por lo que el dato está sesgado. La gráfica de infiltración corresponde con la figura 3.6.

Se recolectó una muestra de suelo con código NA – A1 al lado de esta prueba de infiltración, las propiedades geotécnicas e hidrológicas están en el Cuadro No 1 y Cuadro No 2 (Anexo 3). Los valores de estas propiedades si son consistentes entre las dos muestras de suelo.

3.2.1.2 Naciente San Miguel

La naciente San Miguel se ubica en las coordenadas 458.788 / 1.114.925 (CRTM – 05) a una altitud de 946 m. Esta naciente se encuentra en la microcuenca río Pilas, subcuenca Río Grande, cuenca Río Grande de Tárcoles. La dirección es del cruce de Tapa 1,5 km al Este, en el distrito San Miguel.

El estado de la captación es muy bueno, es de concreto recubierta con azulejo con una tapa pintada y con candado, rodeada con una malla de rejas para la protección y bajo techo. Cuenta con las rotulaciones respectivas y los alrededores están limpios (Figura 3.5).



Figura 3.5: Fotografía de la captación en la naciente San Miguel.

En cuanto al uso de suelo, en los alrededores hay un bosque ripario ya que la naciente se encuentra a menos de 10 m del río, donde la población realiza actividades recreativas, y luego de los 30 m el uso de suelo corresponde con cafetales. Por ello como amenaza potencial se puede indicar la contaminación por agroquímicos en los cultivos y los residuos sólidos dejados por las personas que visitan el río.

El uso actual del agua es para consumo humano. Abastece la comunidad del Rosario y el poblado de San Jerónimo.

La captación se aforó cinco veces, el mismo día, con la metodología volumétrica, resultando un caudal de 7,7 l / s.

En esta localidad en el lecho del río aflora una roca masiva que litológicamente se clasifica como una toba gris con fenocristales de plagioclasas y piroxenos, con clastos centimétricos volcánicos, algunos de los cuales podrían ser pómez muy alterados.

Sobreyaciendo la toba gris, se observa una toba café grisácea, fuertemente compactada y muy arenosa, con algunos líticos volcánicos, el espesor es de al menos 2 m. En esta toba aflora la naciente. En el techo de la secuencia, en contacto gradual, se encuentra un suelo café rojizo con clastos volcánicos centimétricos y milimétricos, sobre el cual se realizó un ensayo de infiltración (NA – B4). La descripción anterior se correlaciona geológicamente corresponde con la Formación Tiribí.

El resultado de la prueba de infiltración se muestra en la Figura No. 3 (Anexo 2), que revela una infiltración de 5,32 cm / h. Mientras que las propiedades geotécnicas e hidrológicas del suelo se contienen en el Cuadro No 1 y Cuadro No 2 (Anexo 3).

3.2.2 Nacientes administradas por la ASADA San Miguel Este

A continuación se describen las nacientes administradas por la ASADA San Miguel Este que se ubican al norte del área de estudio.

3.2.2.1 Naciente La Pista

La naciente La Pista se ubica en las coordenadas 492.363 / 229.199 (CRTM – 05), a una altitud de 1.088 m, en la microcuenca río Pilas, en la subcuenca Río Grande y cuenca Río Grande de Tárcoles. La dirección es 100 m al noroeste desde la pista (ruta 1), en el distrito San Miguel del Cantón Naranjo, provincia Alajuela, al Norte del área de estudio y al Este de San Miguel.

El estado de la captación es regular. La captación es de concreto con tapa de concreto y candado, no hay malla de protección ni rotulación. En la Figura 3.6 se observa una fotografía del sitio de captación.

Actualmente la ASADA la tiene abandonada, por lo que los vecinos la usan para regar café y otros cultivos.

Por la razón anterior, tampoco se cuenta con un registro de aforos. El día de la visita se aforó cinco veces utilizando el método volumétrico y se obtuvo un promedio de 0,05 l / s.



Figura 3.6: Fotografía de la captación en la naciente La Pista.

El uso del suelo al Norte y Este de la naciente son cultivos de café, mientras que al Sur y Oeste es charral y potreros. En cuanto a las amenazas potenciales, es posible que exista contaminación por agroquímicos.

En cuanto a la geología, no se encontraron afloramientos de roca en los alrededores, no obstante según el mapa geológico se trata de lavas del Grupo Aguacate.

El suelo se caracterizaba por ser café oscuro con materia orgánica. Se realizó un ensayo de infiltración (NA – A4) que determinó una tasa de infiltración de 94,32 cm / h (Figura No. 4,

Anexo 2), y se recolectó una muestra de suelo con código NA – A4, cuyas propiedades geotécnicas e hidrológicas se indican en el Cuadro No 1 y Cuadro No 2.

3.2.2.2 Naciente Ramírez

La naciente Ramírez se ubica en las coordenadas 456.417 / 1.112.470 (CRTM – 05). En la microcuenca quebrada Hornos, subcuenca Río Grande y cuenca Río Grande de Tárcoles. La dirección es 2 km al Sur de la entrada de San Miguel Oeste, en Calle Palomas, distrito San Miguel, cantón Naranjo, provincia Alajuela (se localizan al suroeste del área).

El estado de la captación es bueno. La captación es de concreto con tapa metálica con candado, está pintada, cuenta con desviación de aguas pluviales y caudal ecológico. En la Figura 3.7 se muestra una fotografía de la captación.



Figura 3.7: Fotografía de la captación en la naciente Ramírez.

El uso actual del agua es para consumo humano. Abastece los poblados de calle Los Palomos y calle Perdedera.

El promedio de los aforos realizados el día de la visita de campo, con el método volumétrico resultó en un caudal de 1,38 l / s.

Al Norte y al Este el uso de suelo es bosque secundario, mientras que al Sur y Oeste corresponde con cultivos de café. Como amenaza potencial está la contaminación con agroquímicos.

La naciente Ramírez se encuentra aflorando en una lava andesítica y según el mapa geológico se correlaciona con el Grupo Aguacate.

Sobreyaciendo la lava hay un suelo color café muy fino con bloques de lava, de un espesor máximo de 1,5 m. Sobre este suelo se realizó una prueba de infiltración (NA – A5) de doble anillo indicando una infiltración de 16,87 cm / h. En la Figura No. 5 del Anexo 2 está la gráfica correspondiente. Mientras que las propiedades geotécnicas e hidrológicas se indican en el Cuadro No 1 y Cuadro No 2.

3.2.2.3 Naciente Chacón

La naciente Chacón se ubica en las coordenadas 457.299 / 1.112.857 (CRTM – 05), a una altitud de 1.049 m, en la microcuenca río Pilas, subcuenca Río Grande, cuenca Río Grande de Tárcos. La dirección es 1 km al Sur de la Escuela San Miguel, distrito San Miguel, cantón Naranjo de la provincia Alajuela (localizado al Este del Cerro Las Palmas).

El estado de la captación es regular, una fotografía se muestra en la Figura 3.8. La captación es de concreto, con tapa de concreto y con candado. No hay rotulación, ni desviación de aguas pluviales o malla protectora.

El uso actual del agua es para consumo humano de dos casas en calle Las Rosas y para riego de los cultivos circundantes.

El promedio de cinco aforos realizados durante la gira de campo con el método volumétrico indica un caudal de 0,87 l / s.

En cuanto al uso del suelo, la captación está rodeada por cultivos de café y plátano y al noroeste hay unas cuantas casas, aguas abajo de la naciente. Como amenaza potencial se puede indicar el uso de agroquímicos en los cultivos.



Figura 3.8: Fotografía de la captación de la naciente Chacón.

En los alrededores no se observó ninguna roca aflorando. Sin embargo el día de la gira había unos huecos de medio metro de profundidad, en el que se observó una toba café lítica degradada a suelo, la cual se correlaciona con las tobas del Grupo Aguacate.

Un ensayo de infiltración (NA – B5) con la metodología de doble anillo midió una tasa de infiltración de 11,85 cm / h (Figura No. 6, Anexo 2). También se recolectó una muestra de suelo con código NA – B5, las propiedades geotécnicas e hidrológicas se contienen en el Cuadro No 1 y Cuadro No 2.

3.2.2.4 Naciente Arroyo

La naciente Arroyo se ubica en las coordenadas 457.085 / 1.112.809 (CRTM – 05), a una altitud de 1.083 m, en la microcuenca río Pilas, subcuenca Río Grande, cuenca Río Grande de Tárcoles. La dirección es 1 km al Sur de la Escuela San Miguel, en Calle Las Rosas, distrito

San Miguel, cantón Naranjo de la provincia Alajuela (localizada en la ladera Oeste del Cerro Las Pastoras).

El estado de la captación es muy bueno, una fotografía se muestra en la Figura 3.9. La captación es de concreto, con tapa de metal y con candado, se encuentra pintada y presenta una malla de protección con rejas y candado.



Figura 3.9: Fotografía de la captación de la naciente Arroyo.

El uso actual del agua es para consumo humano y abastece cuatro casas en calle Las Rosas. El promedio de los aforos realizados durante la gira de campo con el método volumétrico indica un caudal de 0,07 l / s.

En cuanto al uso del suelo, la captación está rodeada por cultivos de café. Como amenaza potencial está el uso de agroquímicos en los cultivos.

En cuanto a la geología no se observaron afloramientos de rocas, pero según el mapa geológico se trata del Grupo Aguacate.

El suelo se caracteriza por ser color café, arenoso y rico en materia orgánica. Se realizó una prueba de infiltración de doble anillo (NA – C5); el resultado se muestra en la Figura No. 7 del Anexo 2, indicando una infiltración de 88,52 cm / h. Una muestra de suelo con código NA – C5 se recolectó durante la gira, sus propiedades geotécnicas e hidrológicas se incluyen en el Cuadro No 3 y el Cuadro No 4.

3.2.2.5 Naciente San Francisco

La naciente San Francisco se ubica en las coordenadas 457.226 / 1.113.899 (CRTM – 05), a una altitud de 1.007 m, en la microcuenca río Pilas, subcuenca Río Grande y cuenca Río Grande de Tárcoles. La dirección es en la propiedad de Marcos Quesada Rodríguez sobre la calle principal de San Miguel, en el distrito San Miguel, cantón Naranjo de la provincia Alajuela (se localiza al Norte del Cerro Las Palmas).

El estado de la captación es regular, como se muestra en la Figura 3.10. La captación es de concreto, con una tapa metálica oxidada, los alrededores están cubiertos de hojarasca y ramas, además hay salidas de agua por doquier.



Figura 3.10: Fotografía de la captación en la naciente San Francisco.

Actualmente la naciente se encuentra en estado de abandono por parte de la ASADA, se comenta que años atrás se estuvo utilizando el recurso para consumo humano, pero luego de unos análisis de calidad de aguas que revelaron contaminación, se decidió abandonarla. Se cree que fue contaminación por aguas negras y residuales, ya que alrededor de la naciente se construyeron varias casas, sin embargo este registro se perdió con el tiempo.

Por el momento, el propietario del terreno donde se encuentra la naciente, tiene un cultivo de árboles de limón a las orillas de la naciente y tiene intenciones de regarlo con el agua proveniente de la naciente. Durante la visita al campo varios vecinos se mostraron interesados por conocer el estado de la calidad del agua, así como el fontanero de la ASADA de San Miguel, quien quedó interesado por el caudal de agua de la misma.

El mal estado de la captación dificulta la medición de un caudal apropiado, sin embargo aguas abajo hay una pequeña represa, donde se midieron varias salidas de aguas el mismo día, con el método volumétrico, reportando un caudal mínimo de 4,12 l / s.

El uso del suelo en las cercanías de las nacientes corresponde con cultivos de árboles de limón y con un uso residencial.

Aguas abajo de la naciente se observó una lava andesítica muy alterada a arcillas verdosas, lo que supone que la naciente aflora de esta roca. Estas lavas se correlacionan con el Grupo Aguacate.

En la naciente se realizó una prueba de infiltración de doble anillo, el resultado se muestra en la Figura No. 8 del Anexo 2, indicando una infiltración de 1,52 cm / h.

También se muestreo el suelo, con código NA – A6, el cual se caracteriza por ser café y muy fino. Las propiedades geotécnicas e hidrológicas se indican en el Cuadro No 3 y el Cuadro No 4.

3.2.3 Nacientes administradas por la ASADA Concepción

A continuación se describen la naciente administrada por la ASADA Concepción que se ubica dentro del área de estudio.

3.2.3.1 Naciente La Bomba

La naciente La Bomba se ubica las coordenadas 454.655 / 1.115.195 (CRTM – 05) a una altitud de 1.069 m, en la subcuenca Río Grande de la cuenca Río Grande de Tárcoles. La dirección es 250 m al Este de la iglesia de Concepción, en los límites entre los distritos San Miguel y Naranjo, del cantón Naranjo, provincia de Alajuela (al Oeste del Cerro Espíritu Santo, al noroeste del área).

El estado de la captación es bueno, hecha de concreto, tapa metálica con candado y presenta desviación de agua pluvial. La captación se encuentra debidamente rotulada. La Figura 3.11 corresponde con una fotografía de la captación.



Figura 3.11: Fotografía de la captación en la naciente La Bomba.

El uso actual del agua es para consumo humano. Esta naciente abastece los poblados, La Pista, Calle Badilla y Entrada Palmito.

La naciente La Bomba se aforó en cinco ocasiones el mismo día con molinete, resultando un promedio de 1,7431 l / s. Los colaboradores de la ASADA indicaron un caudal regular de la naciente cercano a los 2 l / s.

El uso del suelo a 100 m corresponde con bosque secundario en recuperación y cultivos de café, hacia el Este hay un vivero. Existe una potencial amenaza de contaminación por agroquímicos.

En cuanto a la geología, no se observaron afloramientos de roca. Pero según el mapa geológico se trata del Grupo Aguacate.

Se realizó una prueba de infiltración (NA – A2) con la metodología de doble anillo, que resultó en una infiltración de 75,38 cm / h. La Figura No. 9 del Anexo 2, corresponde con la gráfica de la tasa de infiltración.

Además, se recolectó una muestra del suelo color café claro rojizo, con código NA – A2. Las propiedades geotécnicas e hidrológicas se contienen en el Cuadro No 3 y Cuadro No 4.

3.2.4 Nacientes administradas por la ASADA San Miguel Oeste

A continuación se describen las nacientes administradas por la ASADA San Miguel Oeste, se localizan al Oeste del Cerro Espíritu Santo.

3.2.4.1 Nacientes Captación 1, Captación 2 y Captación 3

Las nacientes Captación 1, Captación 2 y Captación 3 se localizan en las coordenadas 454.675 / 1.115.227 (CRTM – 05) a una altitud de 1.083 m; 454.670 / 1.115.217 (CRTM – 05) a una altitud de 1.057 m y 454.667 / 1.115.231 (CRTM – 05) a una altitud de 1.054 m, respectivamente. La dirección es 50 m Oeste y 300 m de la entrada de calle Badilla, en el distrito San Miguel, cantón Naranjo de la provincia de Alajuela.

El estado de las captaciones es muy bueno. Las nacientes tienen captaciones de concreto, en algunos casos con cerámica, las tapas metálicas están pintadas y con candados, tienen canales de desviación de aguas pluviales con caudales ecológicos; además hay rotulación y una malla de protección electrosoldada con candado para cada una de las nacientes. En la Figura 3.12 y Figura 3.13 se muestran fotografías de las nacientes.

El uso actual del agua es consumo humano para abastecer el poblado de San Miguel Oeste. Los aforos con molinete de las nacientes el día de la visita indican caudales de 3,60 l / s, 19,33 l / s y 0,05 l / s para las nacientes Captación 1, Captación 2 y Captación 3, respectivamente.



Figura 3.12: Fotografía de la captación en la naciente Captación 1.



Figura 3.13: Fotografía de la captación en la naciente Captación 2.

Aproximadamente dentro del radio de 25 m alrededor de la nacientes, el uso del suelo consiste en bosque en reforestación, al Este hay un vivero con una plantación de plantas ornamentales, terreno que se desea adquirir por la ASADA para conservación de las nacientes, y el resto del área dentro del perímetro de 100 m corresponde con cultivos de café. En cuanto a las amenazas potenciales se puede mencionar el posible uso de agroquímicos en los cultivos de café y las plantas ornamentales.

En los alrededores de las nacientes no se observaron afloramientos de roca. Sin embargo dentro de la captación 1 y 3 se observó aflorar una lava andesítica basáltica y según el mapa geológico se trata del Grupo Aguacate.

Se realizaron tres pruebas de infiltración utilizando la metodología de doble anillo, NA – A3, NA – B2 y NA – B3, dando como resultado infiltraciones de 157,53 cm / h, 18,94 cm / h y 81,78 cm / h para cada caso, respectivamente (Figura No. 10, Figura No. 11 y Figura No. 12 del Anexo 2).

También se realizó un muestreo del suelo, el cual se caracterizaba por ser arenosos de color café con mucha hojarasca, recolectándose las muestras con códigos NA – A3, NA – B2 y NA – B3. Las propiedades geotécnicas e hidrológicas de dichas muestras se resumen en el Cuadro No 3 y el Cuadro No 4

4 Régimen Hidrológico e Hidrogeológico

4.1 Régimen Hidrológico

A continuación se describe el régimen hidrológico y los patrones de drenajes dominantes en el área de estudio, para comprender el comportamiento del flujo de agua superficial.

4.1.1 Meteorología

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) cuenta con seis estaciones cerca del área de estudio, denominadas La Luisa, Copecafé, Beneficio Pilas, Subestación San Ramón, Atenas y La Argentina (Figura 4.1).

La estación La Luisa se ubica al noreste del área, en Sarchí. Las estaciones Coopenaranjo y Hacienda Pilas se sitúan en Naranjo, al Norte del área de estudio, siendo Coopenaranjo la que se dispone más al Norte. La estación de la Subestación de San Ramón, se localiza al Oeste, mientras que La Argentina se encuentra en Grecia al sureste del área de estudio y la estación Atenas al suroeste.

De las seis estaciones solo dos, Beneficio Pilas al noroeste y La Argentina al sureste, tiene influencia en el área de estudio según polígonos de Thiessen (Figura 4.1).

4.1.1.1 Precipitación

Los valores de las precipitaciones mensuales en las cercanías del área de estudio se indican en la Figura 4.2.

La estación lluviosa inicia en mayo y termina en octubre, siendo el mes de mayor precipitación setiembre con un promedio de 409,55 mm, mientras que la estación seca se extiende desde noviembre hasta abril, siendo enero el de menor precipitación, con 5,50 mm.

A excepción de los meses enero, marzo y abril, la estación Beneficio Pilas reporta las precipitaciones más elevadas.

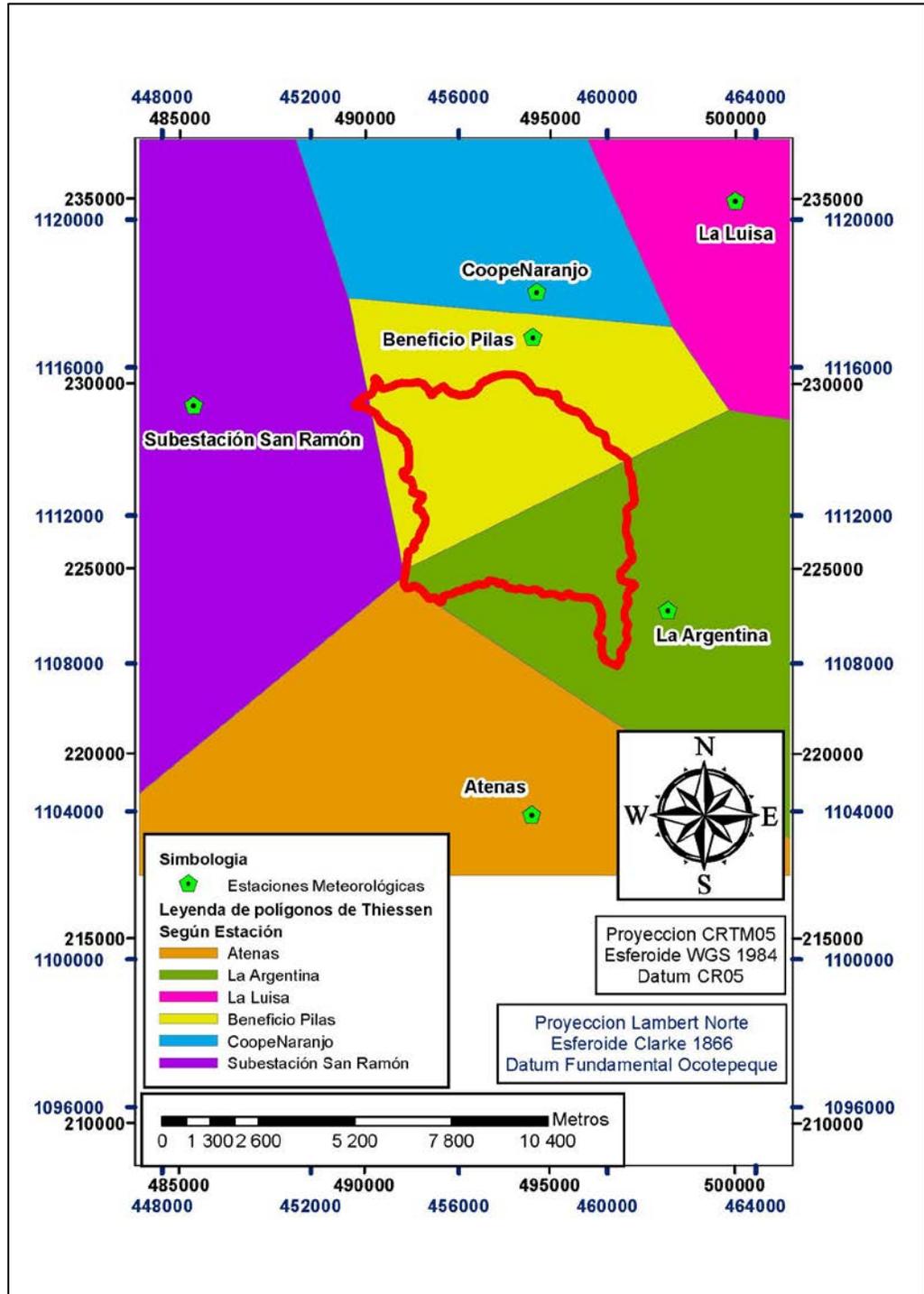


Figura 4.1: Mapa de polígonos de *Thiessen* elaborados a partir de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.

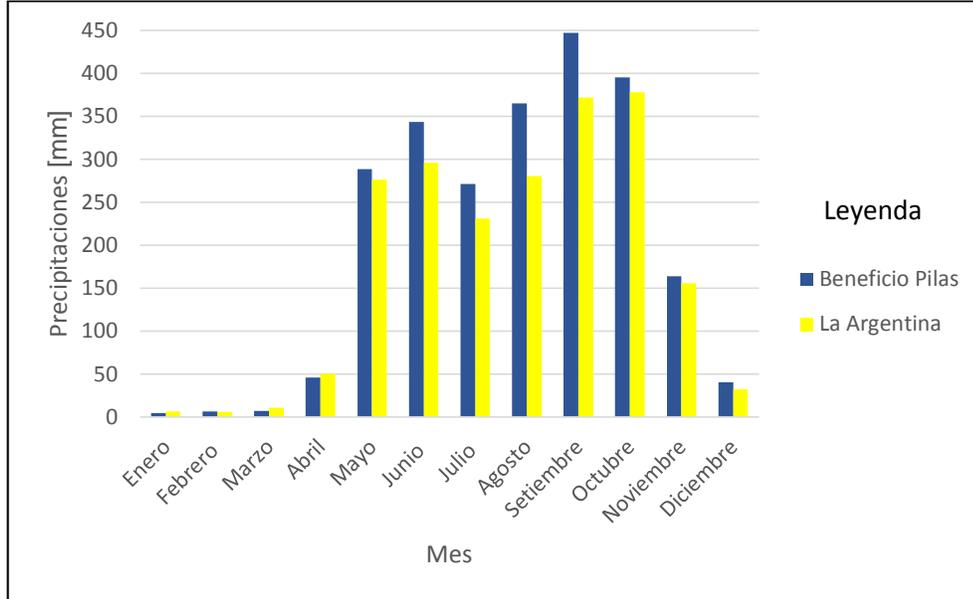


Figura 4.2: Gráfico de las precipitaciones mensuales en las estaciones meteorológicas Beneficio Pilas y La Argentina.

4.1.1.2 Temperatura

En la Figura 4.3 se observan las temperaturas mínimas, medias y máximas reportadas.

La estación La Argentina reporta las temperaturas más altas mensuales y la estación Coopenaranjo las temperaturas más bajas mensuales en la zona. En general el mes más caliente es abril y enero el más fresco.

En general, la temperatura varía entre 13 a 31,5 °C, siendo el promedio de las temperaturas medias mensuales 22,64 °C.

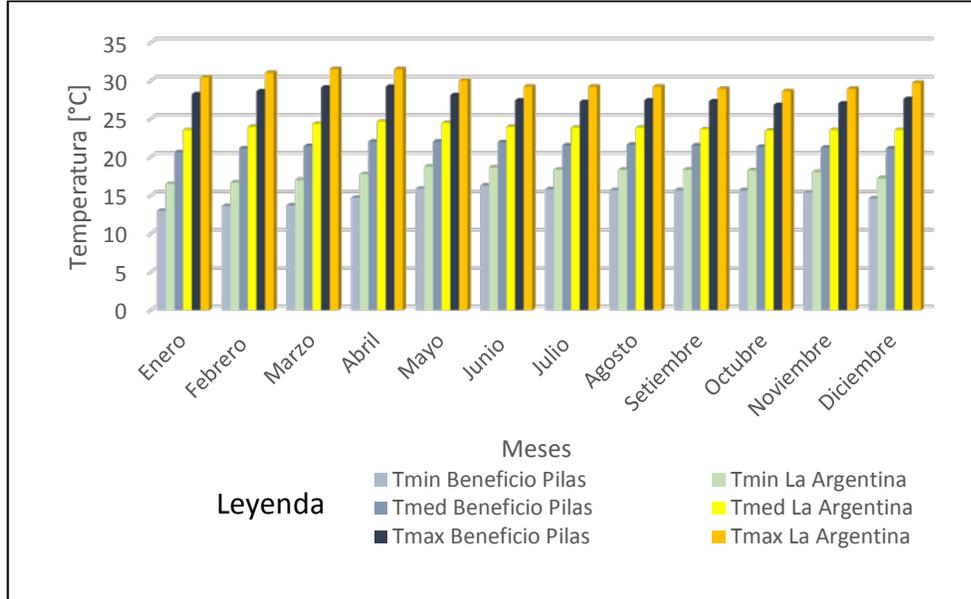


Figura 4.3: Gráfico de la temperatura mensual en las estaciones Beneficio Pilas y La Argentina.

4.1.2 Hidrografía

El área de estudio se sitúa en la parte alta de la cuenca Río Grande de Tárcoles, abarca dos subcuencas y una porción de la subcuenca del Río Grande como se presenta en la Figura 4.4. A continuación se detallan dichas subcuencas.

4.1.2.1 Subcuenca Rosario

Esta subcuenca está delimitada al Oeste por los cerros Crisanto y Hornos, al Norte por cerros Las Palmas y Las Pastoras, al Este el río Colorado y al Sur el Río Grande.

Predomina un patrón sub-dendrítico asimétrico y paralelo (Figura 4.4) con dos orientaciones, de noreste a suroeste y de Oeste a Este. La primera orientación es representada por las quebradas Porras, Honda, Salitral, Hornos y Arley, mientras que la segunda es representada por la quebrada Barquero.

Los principales colectores son el río Colorado y el Río Grande. En cuanto al orden de los drenajes, se identificaron drenajes de primer a quinto orden.

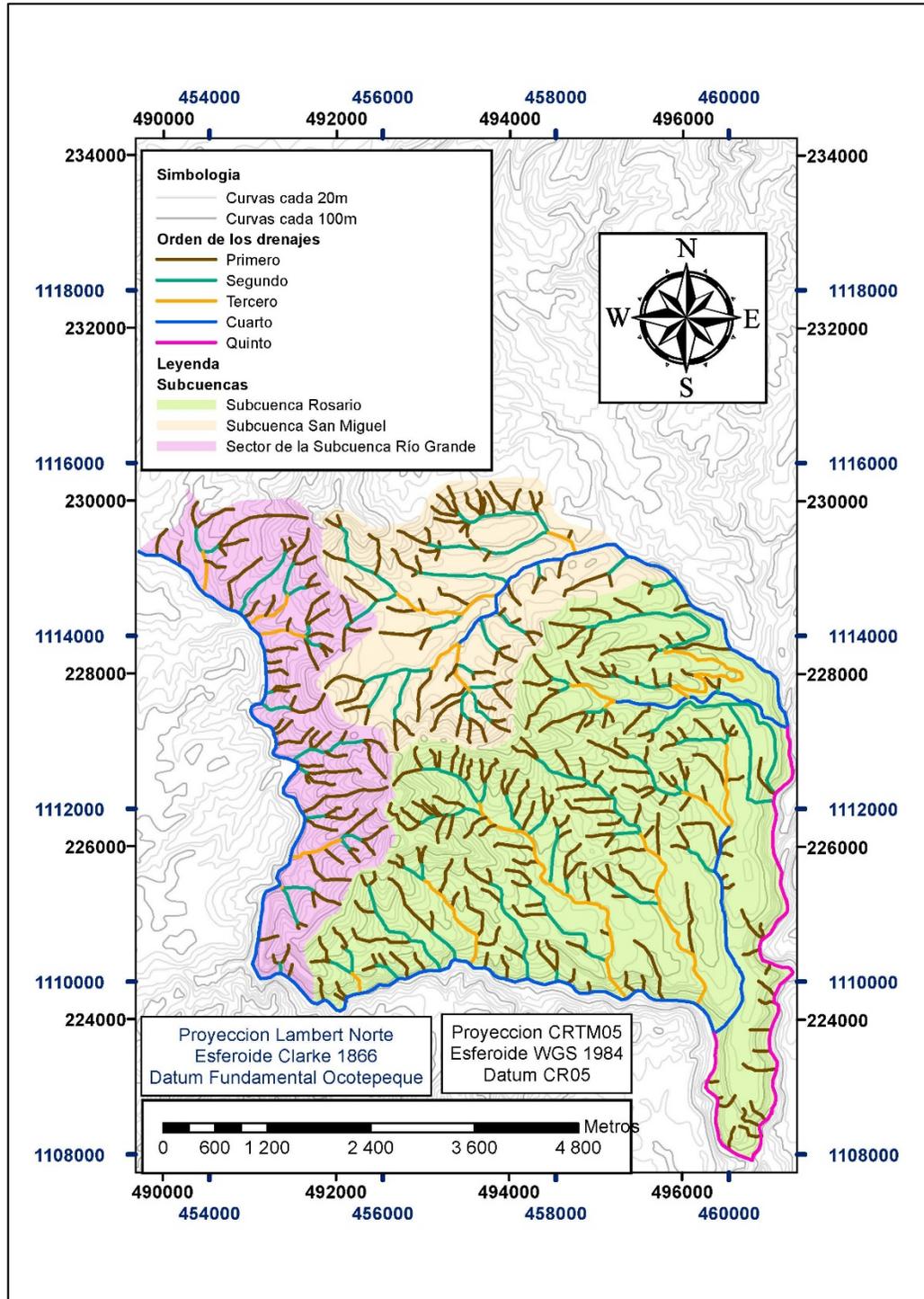


Figura 4.4: Mapa de las cuencas hidrográficas y los órdenes de la red drenajes del área de estudio.

4.1.2.2 Subcuenca San Miguel

La subcuenca San Miguel limita al Sur con los cerros Las Palmas y Las Pastoras, al Este el río Pilas, al Norte el cerro Espíritu Santo y al Oeste un cerro sin nombre. El patrón de drenajes es dendrítico y angular (al Sur de la cuenca se observa una asimetría al sureste, ver Figura 4.4) con una orientación predominante suroeste y noreste. El colector principal es el río Pilas. Además, esta subcuenca cuenta con drenajes de primer a tercer orden.

4.1.2.3 Sector Este de la Subcuenca Río Grande

Esta área de estudio está conformada por un segmento del cañón fluvial Este del Río Grande. El patrón de drenaje es dendrítico (Figura 4.4) con una orientación predominante Este a Oeste y el colector principal es el Río Grande. Los drenajes son de primer a cuarto orden.

4.2 Régimen Hidrogeológico

A continuación se describe el comportamiento de las aguas subterráneas en función de la geología.

4.2.1 Nivel piezométrico

El nivel piezométrico se estableció a partir de la interpolación de los valores de los niveles estáticos en los pozos del área de estudio. La Figura 4.5 corresponde con el mapa del nivel piezométrico utilizando el método de interpolación *Kriging*. Otros métodos aplicados como inverso de la distancia, mínima curvatura y promedio móvil mostraban líneas que se cortaban entre sí, o bien, promovían la aparición de “ojos de buey”. Mientras que triangulación con interpolación lineal y *Kriging* mostraban una muy buena precisión entre sí, y solo variando el estilo de las líneas equipotenciales, siendo rectas con triangulación y curvas con *Kriging*.

Entre estos dos métodos, el que se recomienda es el método de *Kriging*. Esto porque en triangulación con interpolación lineal los bordes muestran irregularidades en las líneas mientras que *Kriging* interpola resultados hacia los bordes del área.

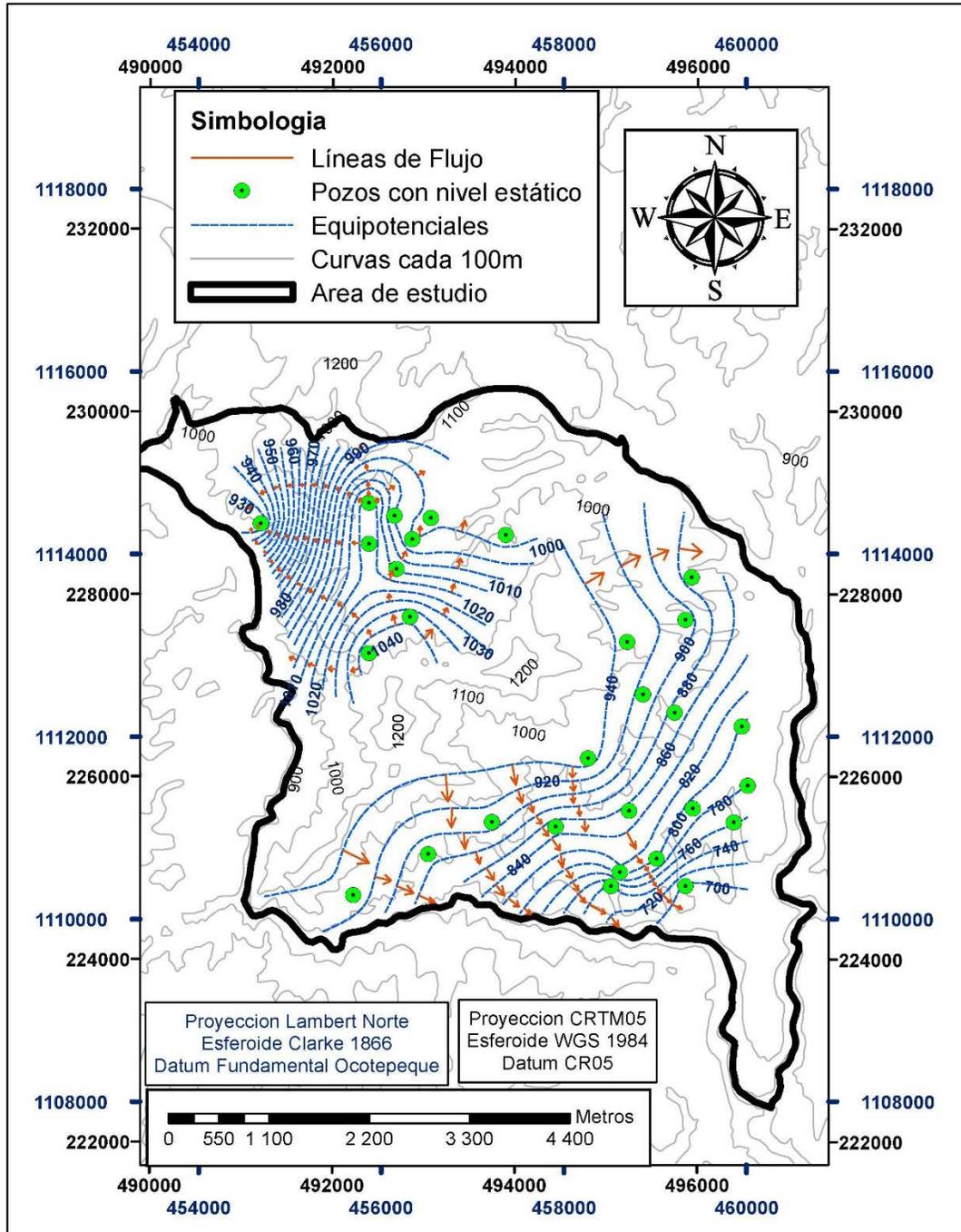


Figura 4.5: Mapa de equipotenciales en el área de estudio, empleando el método de interpolación *Kriging*.

Del mapa se puede deducir que los niveles piezométricos en el área de estudio varían entre los 1.040 hasta los 700 m.s.n.m. Los valores de mayor nivel de las aguas subterráneas se localiza en la subcuenca San Miguel al Norte del cerro Las Palmas. El patrón de distribución de las isofreáticas es centrífugo, hacia el Oeste parecen aporta al Río Grande, hacia el Este al río Colorado y al Sur las líneas se estrechan aumentando el gradiente y aportando caudal posiblemente al Río Grande.

Es importante mencionar que en la subcuenca San Miguel y en el sector Este de la cuenca Río Grande las isofreáticas son regulares y se estrechan en la subcuenca Rosario.

4.2.2 Perfiles hidrogeológicos

Los perfiles hidrogeológicos se elaboraron con la información de los pozos reportados en el SENARA.

Se elaboraron cuatro perfiles para la subcuenca Rosario y dos para la subcuenca San Miguel. Para la sección Este de la subcuenca Río Grande que constituye el área de estudio, no se trazaron perfiles, ya que solo el pozo NA – 848 presenta información litológica. El rumbo de los perfiles se muestra en la Figura 4.6.

4.2.2.1 Subcuenca Rosario

Seguidamente se detalla cada uno de los perfiles trazados.

4.2.2.1.1 Perfil A – B

Este perfil (ver Figura 4.7) representa el flujo de agua subterráneo, en las partes altas de la subcuenca Rosario. De acuerdo con el perfil, el acuífero está constituido principalmente por lavas del Grupo Aguacate, descritas como lavas grises de composición basáltica, sana y muy fracturada. El espesor promedio reportado es de 53 m.

Al suroeste del perfil antes de la quebrada Hornos, sobre las lavas, aflora una toba gris, cuyo espesor promedio es de 23 m y con una permeabilidad baja y una capa de depósitos fluviolacustres con permeabilidad moderada y de 26 m de espesor.

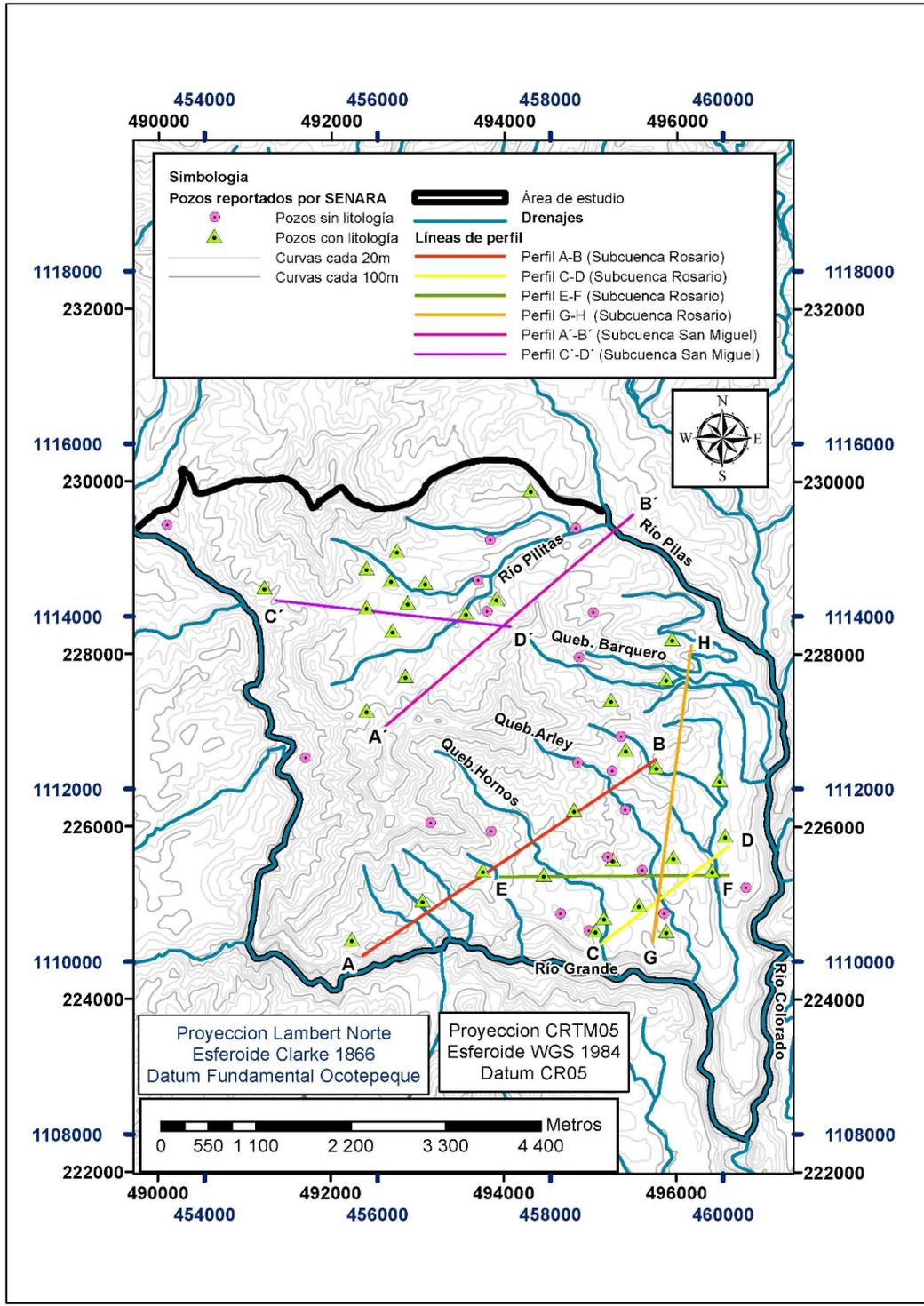


Figura 4.6: Mapa del trayecto de los perfiles hidrogeológicos para el área de estudio.

El depósito fluviolacustre se encuentra completamente saturado, mientras que las tobas grises están parcialmente saturadas.

Mientras que hacia el noreste después de la quebrada Hornos, no se reportan los depósitos fluviolacustres ni las tobas y cenizas gris, y el nivel freático señalado se encuentra somero.

Es necesario destacar el reporte de un lahar al noreste del perfil. Las arcillas por otro lado, están comúnmente asociadas como lentes o capas dentro de las lavas.

Generalmente, sobreyaciendo la secuencia se encuentra una capa de arcillas café, de alta plasticidad, impermeable, con un promedio de 8 m de espesor.

4.2.2.1.2 Perfil C – D

Se dispone paralelo al perfil anterior, en la sección baja de la subcuenca Rosario (ver Figura 4.8). Este perfil se caracteriza por presentar mayores espesores de tobas en lugar de lavas, como prevalecían en el perfil anterior.

Se detallan tres niveles estáticos, el más profundo se encuentra al SW dentro de lavas, hacia el NE se detalla un nivel menos profundo en lavas y tobas, mientras que al NE se encuentra el nivel más somero asociado a tobas grises.

El acuífero está constituido por al menos tres unidades. La unidad inferior se refiere a una toba café, porosa, fracturada, con permeabilidad regular a baja, en ocasiones con fragmentos de lava y con un espesor promedio de 35 m. Sobreyaciendo, afloran lavas grises, con textura afanítica, permeabilidad moderada, con espesores entre 4 y 15 m.

La capa superior del acuífero se ha denominado una secuencia de tobas, ya que las descripciones de las capas inmediatamente por encima de las lavas son deficientes, y solo coinciden en que se trata de tobas, algunas veces con fragmentos de lava y otras veces, muy finas y soldadas. La permeabilidad generalmente es de regular a baja. El espesor promedio es de 27 m, pero se aumentan hasta los 47 m al suroeste, por lo que se piensa está acuñado. Al noreste sobre la secuencia de tobas café, aflora una toba gris, parcialmente saturada y sobreyacida por un material arcilloso con colores blancuzcos.

Se observa evidencia de un sistema multi - acuíferos de tipo confinado, al suroeste por una capa de lava que se acuña y una capa superior de toba café, que se degrada hacia el noreste en materiales arcillosos café.

4.2.2.1.3 Perfil E – F

El perfil E – F (ver Figura 4.9), exhibe una orientación Este - Oeste y muestra la parte media de la subcuenca Rosario, complementando la información reflejada en los perfiles anteriores.

El perfil detalla un acuífero constituido principalmente por lavas y tobas, completamente o parcialmente saturadas. El nivel estático al Este alcanza la unidad de secuencias de tobas, y al Oeste abarca parcialmente las capas de materiales tobáceos y materiales arcillosos.

El espesor de las lavas es muy variable y es la zona productora. Alcanza los 78 m en el centro del perfil, en los alrededores de la quebrada Arley, y se adelgaza significativamente hacia los costados, hasta un espesor promedio de 5 m, posiblemente debido a la presencia de fallas. Las descripciones detallan lavas meteorizadas café rojizo entre impermeables a baja permeabilidad, lavas basálticas fracturadas, lavas grises andesíticas fracturadas y lavas café alteradas por la oxidación.

Las capas de materiales tobáceos situadas al Oeste del perfil, alcanza espesores de 90 m, pero no se detalla su descripción.

Mientras que la secuencia de tobas en el Este varía entre espesores de 12 y 19 m. Las descripciones indican tobas café grisáceas, tobas fracturadas y tobas con fragmentos de lava. La permeabilidad en general es baja.

4.2.2.1.4 Perfil G – H

Este perfil (ver Figura 4.10) corta de Sur a Norte la subcuenca Rosario. Se identifican otras litologías, como ignimbritas y las intercalaciones de brechas y lavas correlacionables con el Grupo Aguacate.

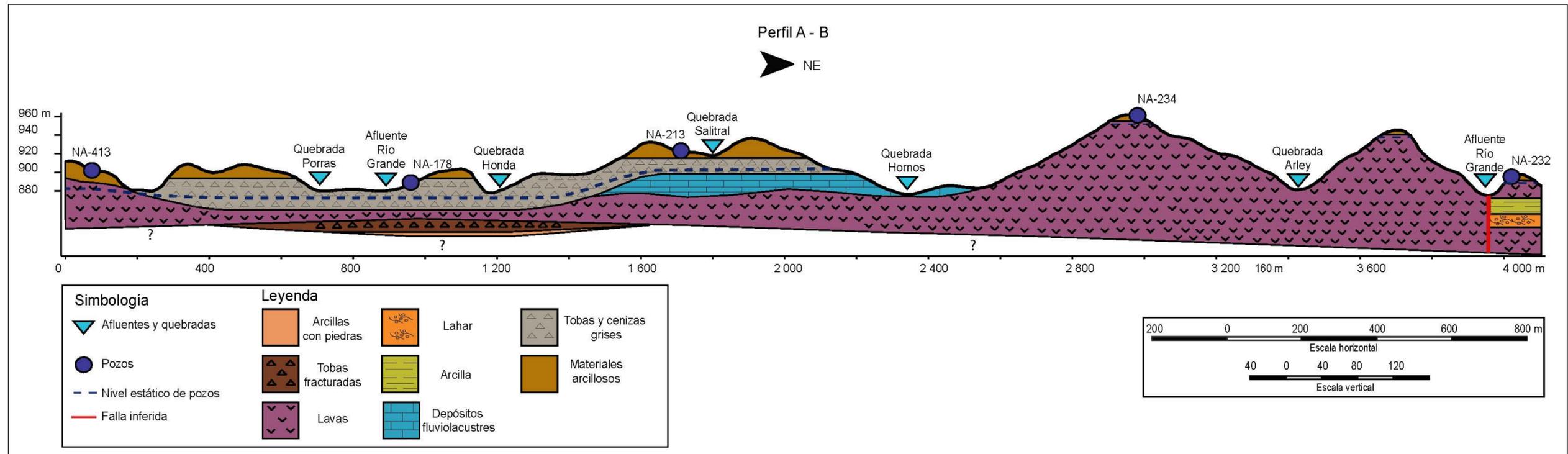


Figura 4.7: Perfil hidrogeológico de la subcuenca Rosario A – B

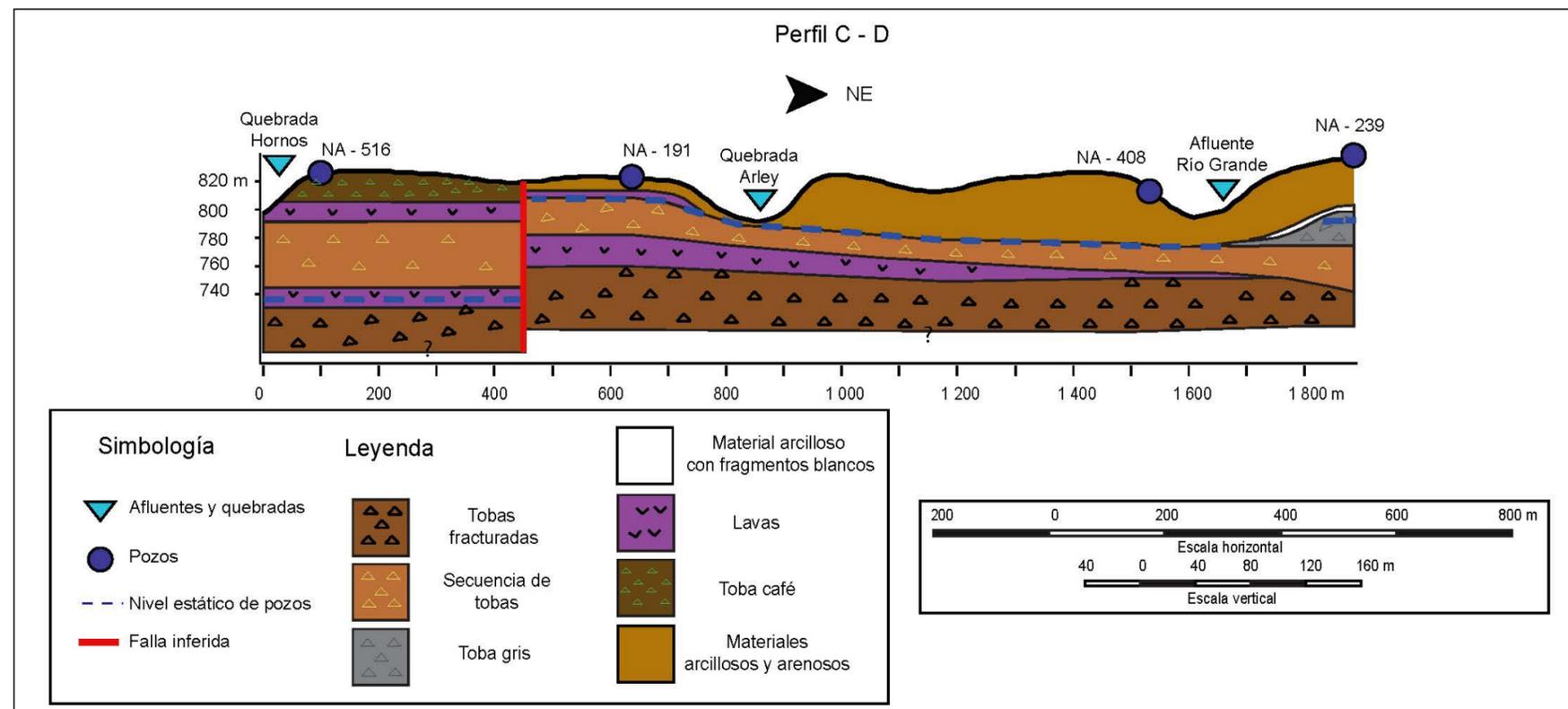


Figura 4.8: Perfil hidrogeológico de la subcuenca Rosario C - D.

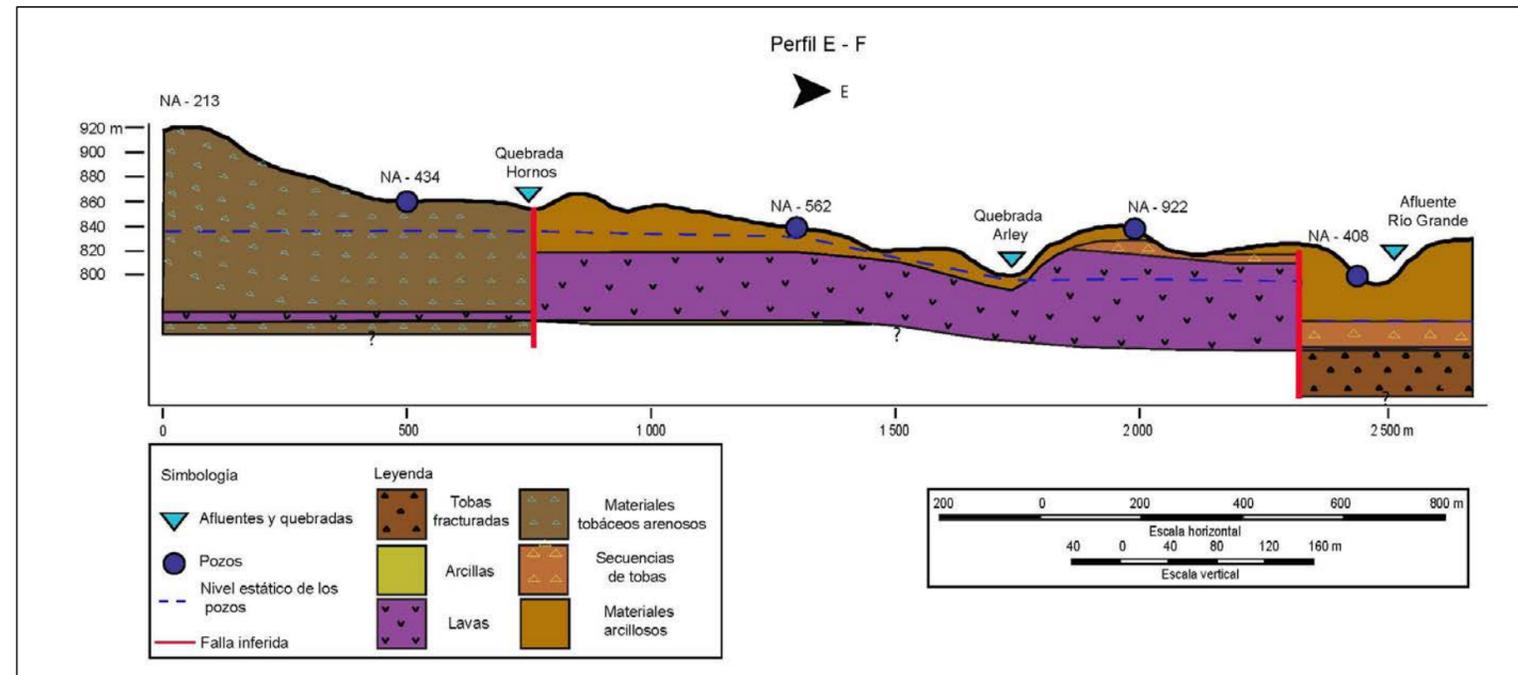


Figura 4.9: Perfil hidrogeológico de la subcuenca Rosario E – F

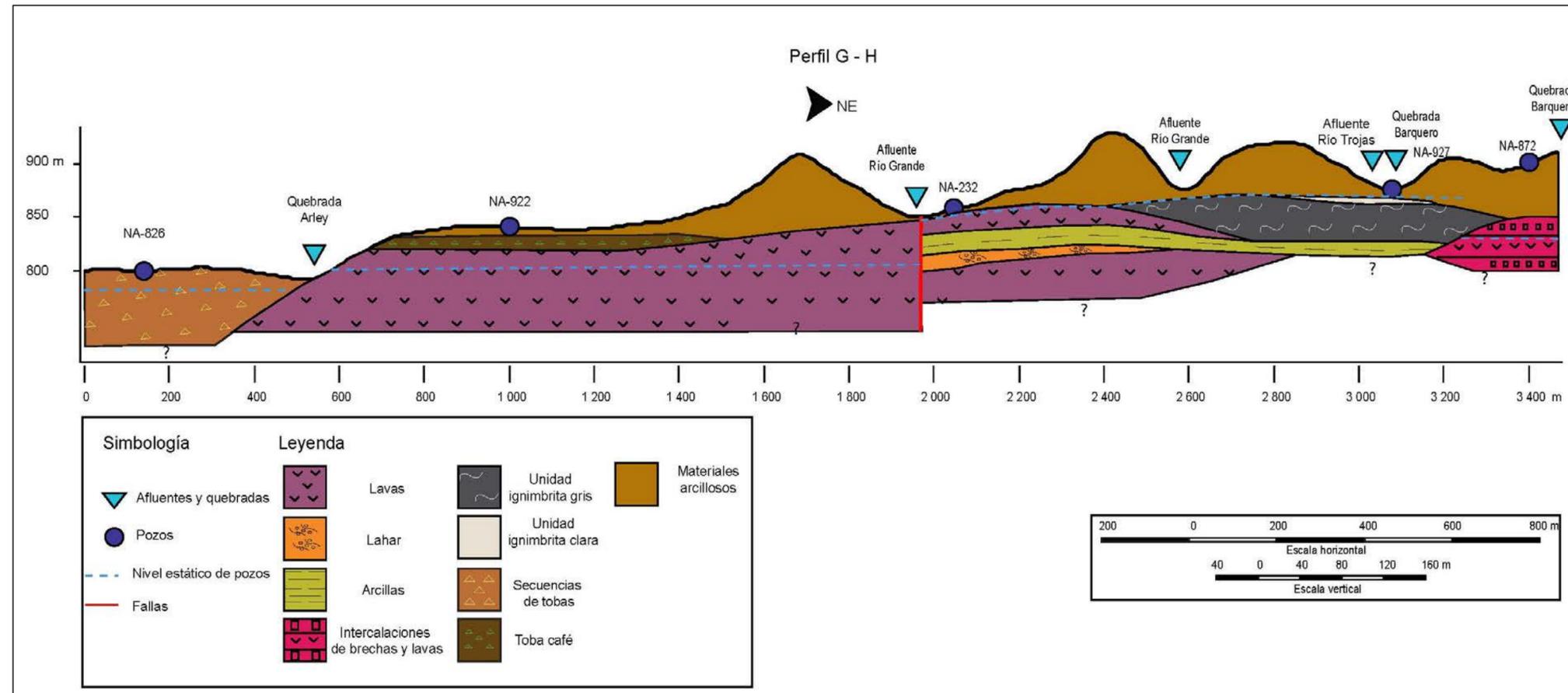


Figura 4.10: Perfil hidrogeológico de la subcuenca Rosario G - H.

Similar con los perfiles anteriores, la principal zona productora consiste en las lavas. Aunque los niveles piezométricos se sobreponen también en las ignimbritas y las intercalaciones de brechas y lavas.

Las lavas exhiben un espesor promedio de 78 m. Consiste en lava meteorizadas a una arcilla café rojiza impermeable, lavas basálticas meteorizadas con permeabilidades bajas, lavas café con gris poco permeables, lavas brechosas de permeabilidad media, lava gris, sana y con permeabilidad media y lavas rojizas.

Al suroeste de la quebrada Arley aflora la secuencia de tobas, con un espesor promedio de 40 m. La secuencia está conformada por tobas finas y tobas líticas con minerales y fragmentos líticos.

Al noreste de la quebrada Arley sobreyaciendo las lavas, aflora una toba café grisácea, muy alterada, baja permeabilidad y con 12 m de espesor.

En las cercanías de la quebrada Barquero se encuentran dos unidades de ignimbritas. La ignimbrita clara, es la superior con un espesor de 6 m y la ignimbrita gris es la inferior, con un espesor de 34 m, consiste en una roca blanda con fracturas.

Limitando al noreste de la quebrada Barquero, afloran las intercalaciones de brechas rojizas y lavas andesíticas. Los clastos en la roca son de tamaños milimétricos a centimétricos y de composición andesítica e ignimbritas rosadas.

4.2.2.2 Subcuenca San Miguel

Seguidamente se detalla cada uno de los perfiles trazados.

4.2.2.2.1 Perfil A' – B'

El perfil A' - B' (ver Figura 4.11) se traza paralelo al río Pilitas, a lo largo de la subcuenca. Este perfil muestra muy bien el contacto entre las lavas del Grupo Aguacate y las tobas de la Formación Tiribí.

Desde suroeste a noreste, el perfil inicia con dos litologías, una capa de tobas café de 50 m de espesor promedio, sin aporte de agua, con permeabilidad baja a buena, que hacia el noreste se degrada a materiales arcillosos y arenosos, café.

Subyaciendo la toba, aflora una lava, color gris hasta negro con textura afanítica de 86 m de espesor y permeabilidad regular. Las lavas equivalen a un acuífero semiconfinado y saturado de acuerdo a la posición del nivel estático, el cual incluso llega a extenderse hasta las tobas degradadas.

Cerca del centro del perfil, la capa superior de materiales arcillosos y arenosos por degradación de tobas y la lava, disminuyen su espesor significativamente, aflorando entre ambas, tobas e ignimbritas grises, con un espesor promedio de 18 m. Hacia el noreste los materiales arcillosos superiores vuelven a ganar espesores de hasta 25m.

Las tobas grises son arenosas, con cuarzo y vidrio volcánico, de permeabilidad buena. Mientras que las ignimbritas presentan arcillas, fragmentos de lava, pómez y vidrio volcánico, con un permeabilidad moderada. Estas rocas son el segundo cuerpo rocoso saturado, donde el nivel estático las sobrepasa en algunos casos, pero disminuyendo hacia el noreste, posiblemente por que aportan a los cuerpos superficiales.

Subyaciendo la secuencia, afloran capas de materiales arcillosos y arenosos de baja a mala permeabilidad, de aproximadamente 48 m de espesor, producto de la alteración de tobas café.

4.2.2.2.2 Perfil C' – D'

Este perfil (ver Figura 4.12) se muestra muy preciso con el perfil anterior. Contiene la información del pozo situada en la cuenca adyacente, atraviesa la divisoria de aguas y llega hasta la parte media de la cuenca San Miguel.

La divisoria está constituida por los materiales arcillosos y arenosos café con espesores cercano a los 50 m, sobreyaciendo las tobas grises, que en el afluente Pilas disminuyen su espesor y se reportan otros materiales arcillosos y arenosos subyaciendo las tobas grises.

El acuífero está constituido por estas tobas grises.

4.2.2.3 Sector Este de la Subcuenca Río Grande

El único pozo, el NA – 848, ubicado en el cañón fluvial del Río Grande, muestra solo dos litologías, 48 metros de capas de arcillas plásticas sobreyaciendo 26 m de tobas arenosas. El nivel estático está a 55 m.b.n.s, en las tobas arenosas que constituyen el acuífero confinado.

4.2.3 Modelo conceptual hidrogeológico

El modelo conceptual hidrogeológico para el área de estudio consta de dos unidades acuíferas, la inferior asociada al Grupo Aguacate y la superior asociada a la Formación Tiribí. Las principales características de estos acuíferos se reporta en el cuadro 4.1. Es importante indicar que el grado de confinamiento se infirió a partir de los perfiles hidrogeológicos.

El acuífero inferior está compuesto por tres capas saturadas interconectadas, la más antigua corresponde con el reservorio principal y consiste de depósitos tobáceos fracturados totalmente saturados.

Luego, sobreyacen capas de lavas meteorizadas y fracturadas. Estas lavas se extienden a lo largo de todo el área de manera irregular, dada la pobre descripción de las perforaciones no es posible diferenciar los eventos de coladas. Entre las coladas es común encontrar lentes arcillosos, posiblemente producto de la meteorización de la misma y algunas veces se pueden correlacionar con brechas basales de coladas de lava.

Finalmente, sobreyaciendo las lavas aflora una capas de tobas café o grises, las cuales pueden almacenar o no almacenar agua, en algunas condiciones se reportan totalmente saturadas y en otras parcialmente. En algunos sitios se reportan lavas sobreyaciendo estas tobas. Estas capas de tobas se encuentran confinadas por un depósito de tobas recientes.

El límite entre la unidad hidrogeológica superior e inferior no está claro y se requieren un estudio más exhaustivo. Sin embargo el nivel piezométrico de los pozos situados en ambas unidades es coincidente, por lo que no se descarta un aporte lateral entre ambas unidades.

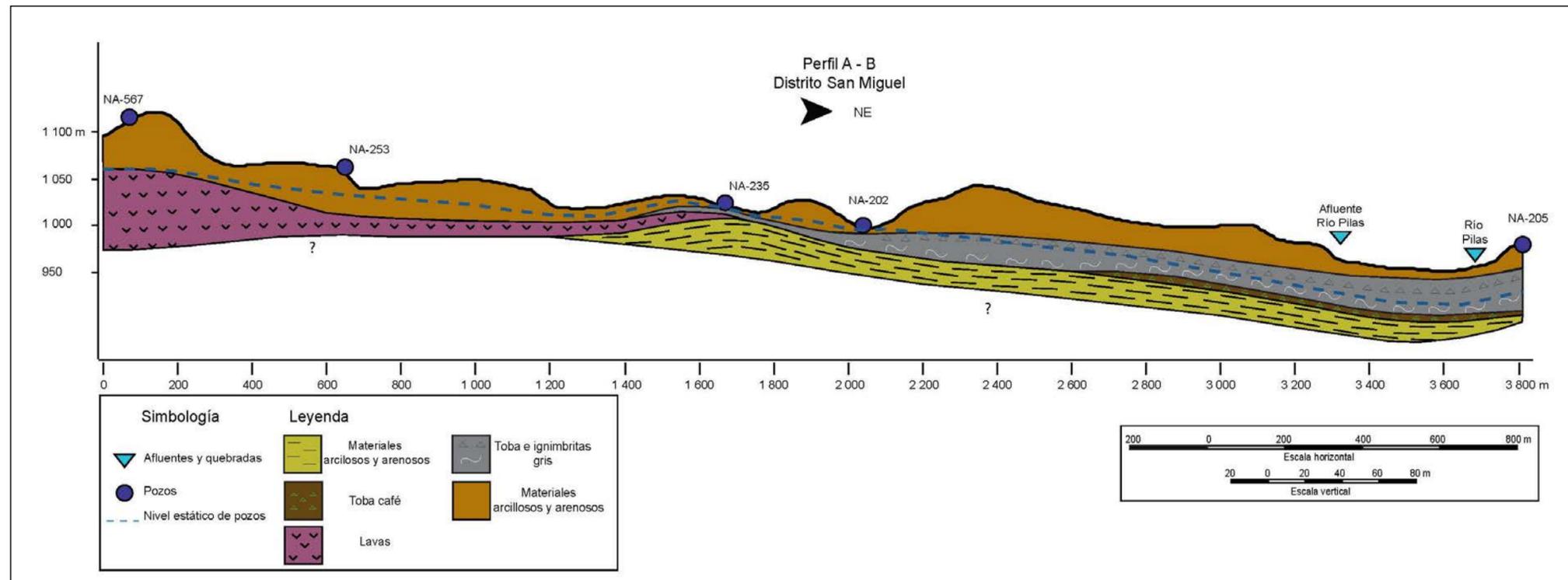


Figura 4.11: Perfil hidrogeológico de la subcuenca San Miguel A' - B'.

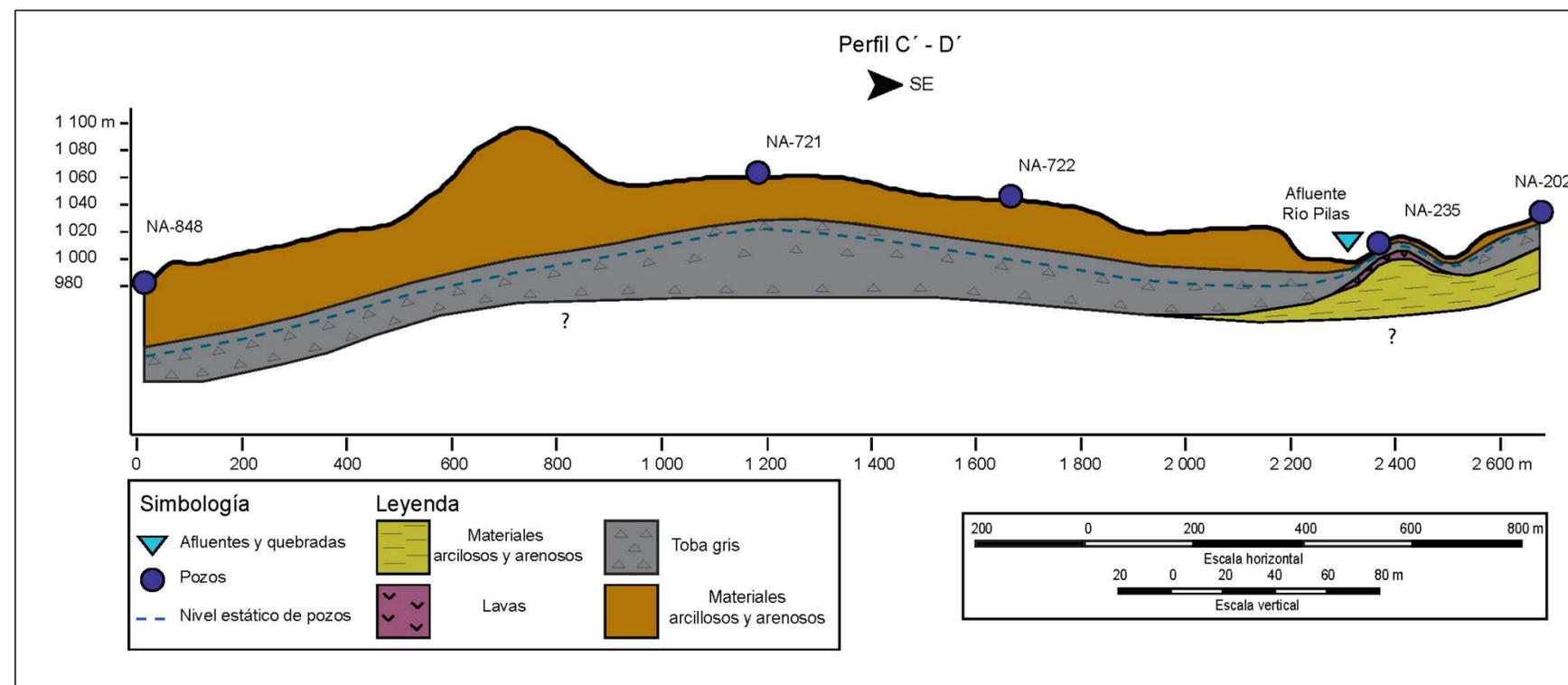


Figura 4.12: Perfil hidrogeológico de la subcuenca San Miguel C' - D'.

El acuífero superior no se extiende por toda el área de estudio, sino solo en el extremo noreste, por lo que para una mejor caracterización es necesario contemplar más datos al Este. Este acuífero se encuentra en ignimbritas grises confinadas por depósitos de tobas. En cuanto a las nacientes y el modelo conceptual hidrogeológico, a partir de las observaciones de campo se pudo determinar que la naciente San Miguel está asociada con el acuífero superior, mientras que las nacientes Santa Margarita 1, Santa Margarita 2, San Francisco, Ramírez, Chacón y Arrollo están asociadas al acuífero inferior. Para determinar la relación de los acuíferos con las nacientes La Pista, La Bomba, Captación 1, Captación 2 y Captación 3 es necesario detallar mejor la hidrogeología, fuera del área de estudio, al noroeste.

Cuadro 4.1: Características generales del sistema acuífero del cantón de Naranjo

Unidades hidrogeológicas	Unidad de lavas	Unidad de ignimbritas
Unidades acuíferas	Acuífero inferior	Acuífero superior
Grado de confinamiento hidráulico	Confinado	Confinado
Profundidad del agua	28 y 55 m.b.n.s.	50 m.b.n.s.
Espesor	Entre 5 y 37 m	Entre 20 y 4 m
Litología predominante	Basaltos andesitas y tobas fracturadas	Ignimbritas y tobas grises
Correlación estratigráfica	Grupo Aguacate	Formación Tiribí
Edad	Plioceno	Pleistoceno Medio – Superior

5 Delimitación de zonas de recarga acuífera

La delimitación de las zonas de recarga acuífera se realizó a través de la elaboración de un balance hídrico, porque facilita una identificación más significativa de las áreas de recarga potencial al evaluar varios parámetros, como por ejemplo la precipitación, uso de suelo, pendiente y tipo de suelo, entre otros.

Para desarrollar el balance hídrico del área de estudio se utilizó la metodología de Schosinsky (2006). Esta metodología ha sido ampliamente usada y hasta la fecha, pese a presentar un porcentaje de error alto (Schosinsky, 2006) no existen publicaciones que la cuestionen o mejoren. Está oficializada con el acuerdo 60 – 2012 del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, dirigido a establecer las metodologías hidrogeológicas para la evaluación del recurso hídrico en el país. Y además, es la metodología implementada en los proyectos de investigaciones del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas para establecer zonas de recarga. A continuación se describe cada una de las variables estudiadas.

5.1 Fracción de lluvia interceptada por el follaje

Para calcular la fracción de lluvia interceptada por el follaje Schosinsky (2006) establece tres condiciones.

- Si la precipitación (P) es menor o igual a 5 mm/mes, la retención (Ret) debe ser igual a la precipitación (P).
- Si el producto entre la precipitación (P) y el coeficiente de retención del follaje (Cfo) es mayor o igual a 5 mm/mes, la retención (Ret) debe ser igual al producto entre la precipitación (P) y el coeficiente de retención del follaje (Cfo).
- Si la precipitación (P) es mayor a 5 mm/mes y el producto entre la precipitación (P) y el coeficiente de retención del follaje (Cfo) es menor a 5 mm/mes, la retención (Ret) debe ser igual a 5 mm/mes.

Para evaluar este parámetro es necesario establecer la precipitación en el área de estudio. Como se indicó en el capítulo anterior dentro del área de estudio se registra la precipitación por dos estaciones meteorológicas, Beneficio Pilas y La Argentina. Los polígonos de *Thiessen* definen los sectores de influencia proyectados para cada una de las estaciones meteorológicas. Dichos polígonos se muestran en la Figura 5.1. El polígono Norte contempla los valores de precipitaciones mensuales de la estación Beneficio Pilas y el polígono Sur representa los valores de precipitaciones mensuales de la estación La Argentina.

No obstante, debido a que el límite entre los polígonos de *Thiessen* se traza muy cerca de la divisoria entre las subcuencas, San Miguel y Rosario, se modificó dicho límite para tener mayor precisión en la distribución de las precipitaciones, ya que las divisorias de aguas comúnmente actúan como barrera climática. De tal manera que la distribución de las precipitaciones se modifica utilizando las características morfológicas del terreno, como la divisoria de aguas (Figura 5.2).

El coeficiente de retención del follaje (C_{fo}) es un valor adimensional, que corresponde a 0,20 para bosques muy densos y para el resto de la vegetación es 0,12 (Schosinsky, 2006). Por lo tanto, para distinguir el coeficiente de retención del follaje (C_{fo}) se debe separar las áreas boscosas del resto del follaje. Esta diferenciación se hace a partir del mapa de uso de suelo (Figura 5.3).

El mapa de uso de suelo se tomó de los mapas de uso de suelo del IGN & PRUGAM (2008). Se establecieron cuatro categorías de uso de suelo, urbano, bosque, cultivos y pastos. Los sectores urbanos (9,4%) se ubican al sureste y al noroeste, y corresponden con los poblados de El Rosario y San Miguel, respectivamente. El bosque (18,8%) se ubica principalmente al sureste del área de estudio, en las riberas del Río Grande. Los pastos (20%) resaltan al suroeste y los cultivos (51,8%) son el uso dominante extendiéndose en toda el área, donde el café es el principal cultivo.

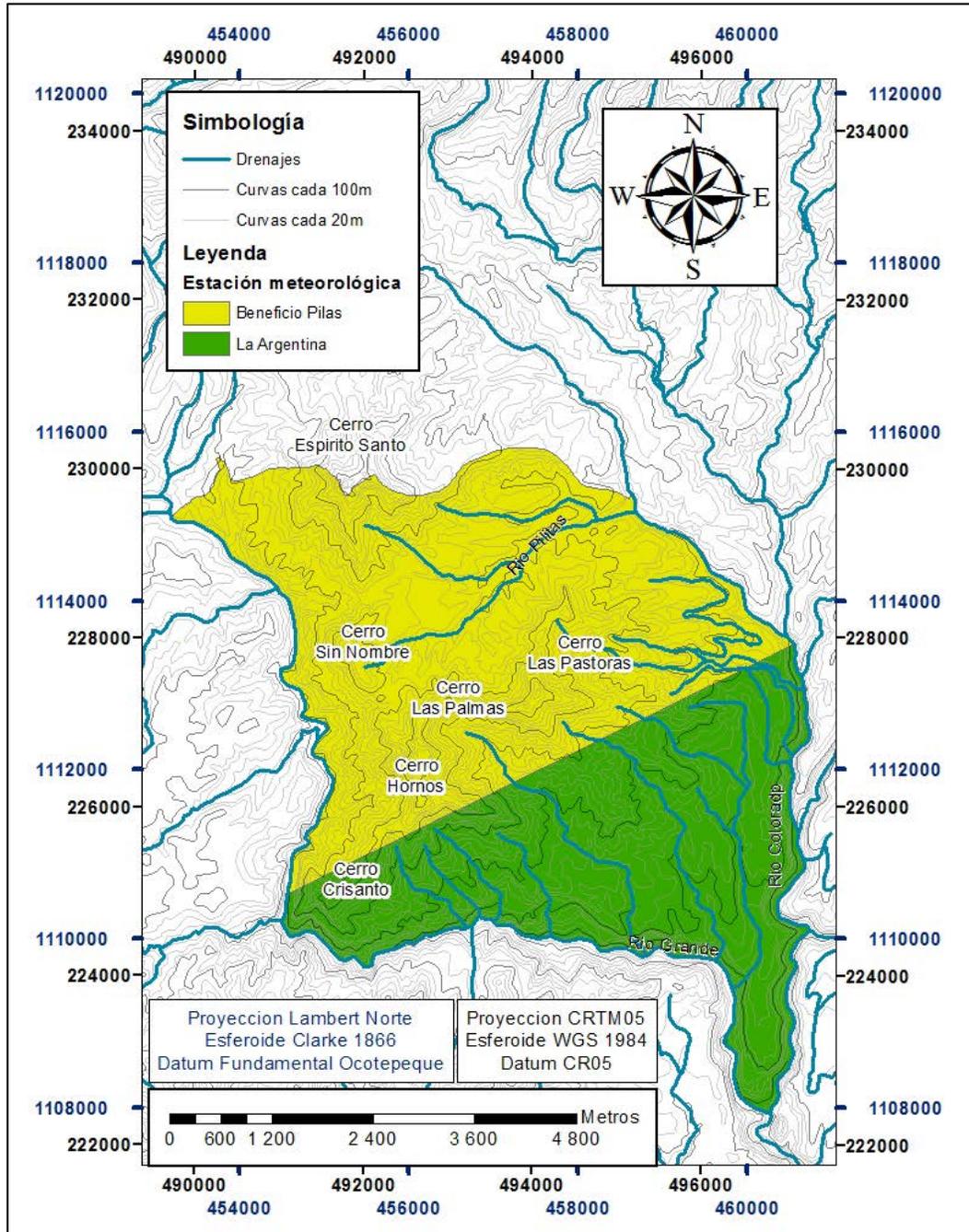


Figura 5.1: Mapa de polígonos de *Thiessen* dentro del área de estudio de las estaciones meteorológicas influyentes.

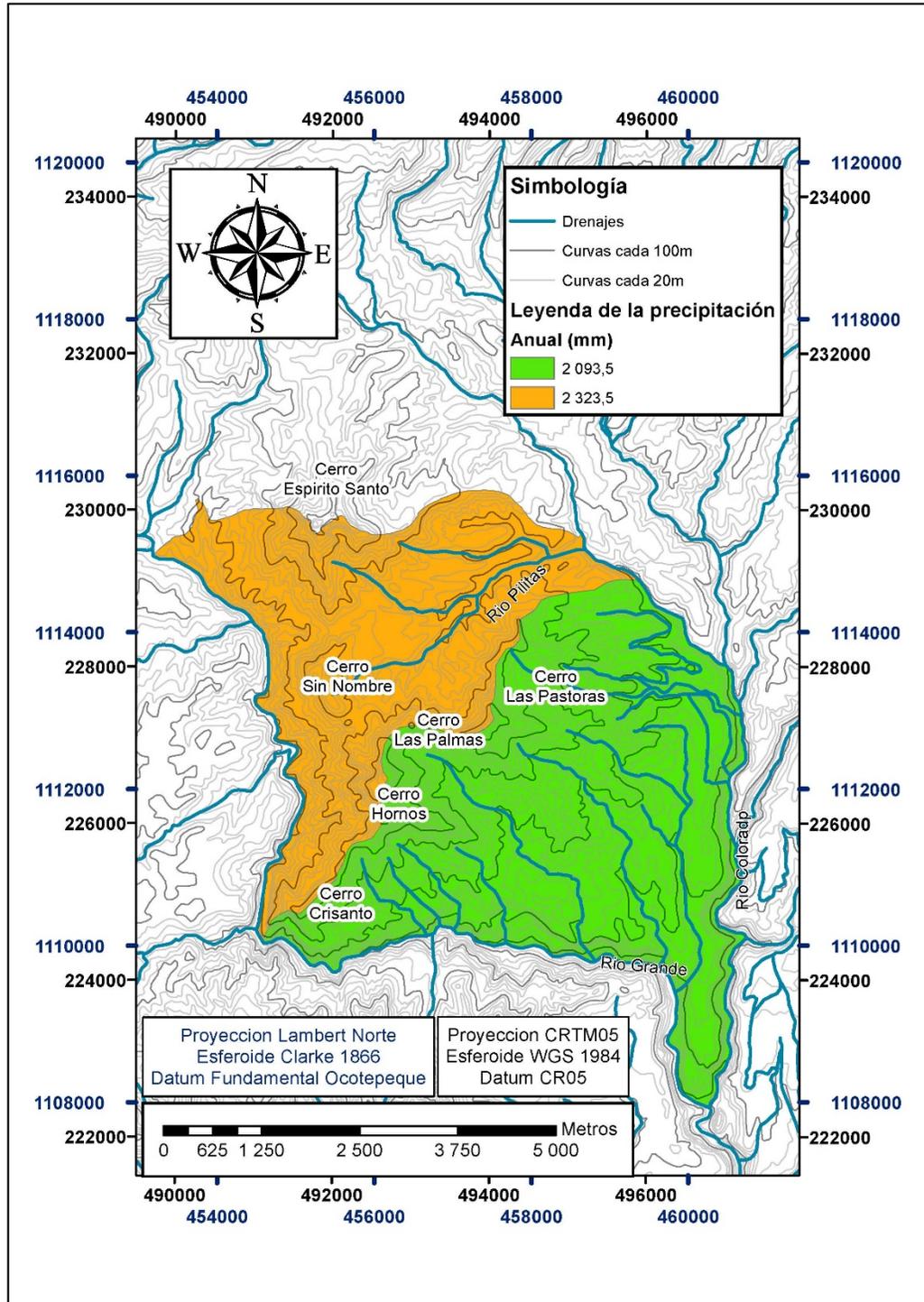


Figura 5.2: Mapa de distribución de la precipitación anual en el área de estudio.

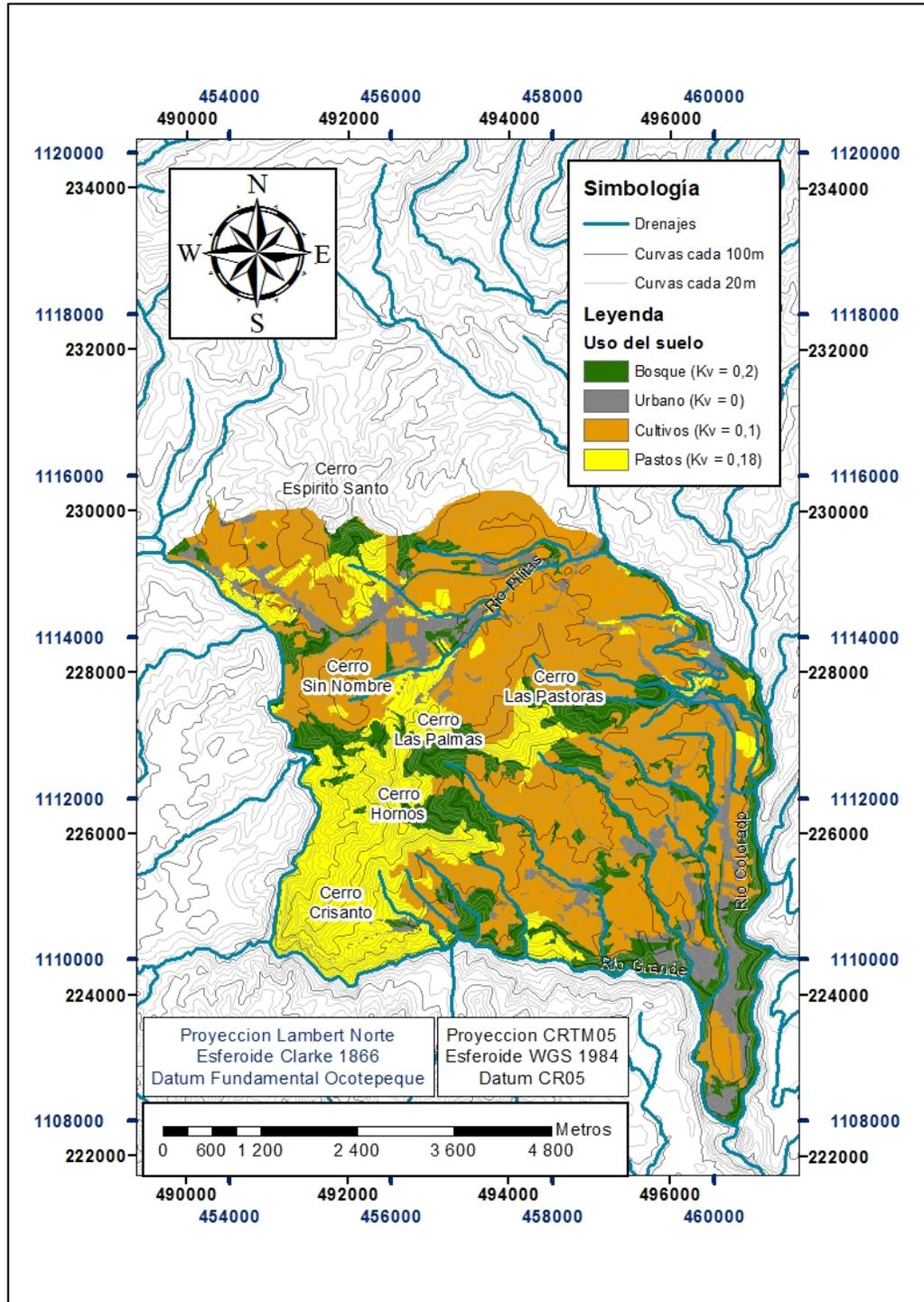


Figura 5.3: Mapa de uso del suelo y clasificación del coeficiente K_v del área de estudio.

La Figura 5.4 presenta la distribución de los valores del coeficiente de retención del follaje (*Cfo*), esto se refiere a un coeficiente de 0,20 en las áreas boscosas y 0,12 en el resto del área. Este mapa se obtuvo a partir de la reclasificación del uso de suelo del área de estudio. Finalmente, teniendo el mapa del coeficiente de retención del follaje (*Cfo*) y creando los mapas de precipitación mensuales, es posible mediante el álgebra de mapas calcular la retención (*Ret*).

Para los meses diciembre, enero, febrero, marzo y abril, donde las precipitaciones son bajas, la retención del follaje es baja también (4,7 y 10,06 mm), por lo que se retiene la mayoría de la precipitación.

En los siguientes meses, mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre y noviembre, las precipitaciones aumentan, los meses setiembre y octubre son los de mayores precipitaciones.

La retención del follaje no es homogénea como en los tres meses anteriores, sino que las zonas boscosas retienen parte de la precipitación.

En abril la retención del follaje por parte de los bosques es casi el doble que la retención del follaje por parte de las áreas sin coberturas boscosas. En el mes de mayo la retención del follaje del bosque es cerca de una quinta parte de la precipitación. Para los meses de junio, julio, agosto, setiembre y octubre la retención de las zonas boscosas es significativamente mayor que la retención del follaje en el resto del área. Finalmente en noviembre y diciembre, pese que las precipitaciones disminuye bastante, la retención del follaje de los sectores boscosos permanece mayor que en los sectores sin zonas boscosas.

En la Figura 5.5 se muestra el mapa de retención anual en el follaje. En las áreas boscosas la retención varía entre 400 y 475,8 mm /año, mientras que el resto del área de estudio presenta una retención del follaje entre 264, 41 y 300 mm / año. Se estima que cerca de una quinta parte de la precipitación es retenida por los bosques.

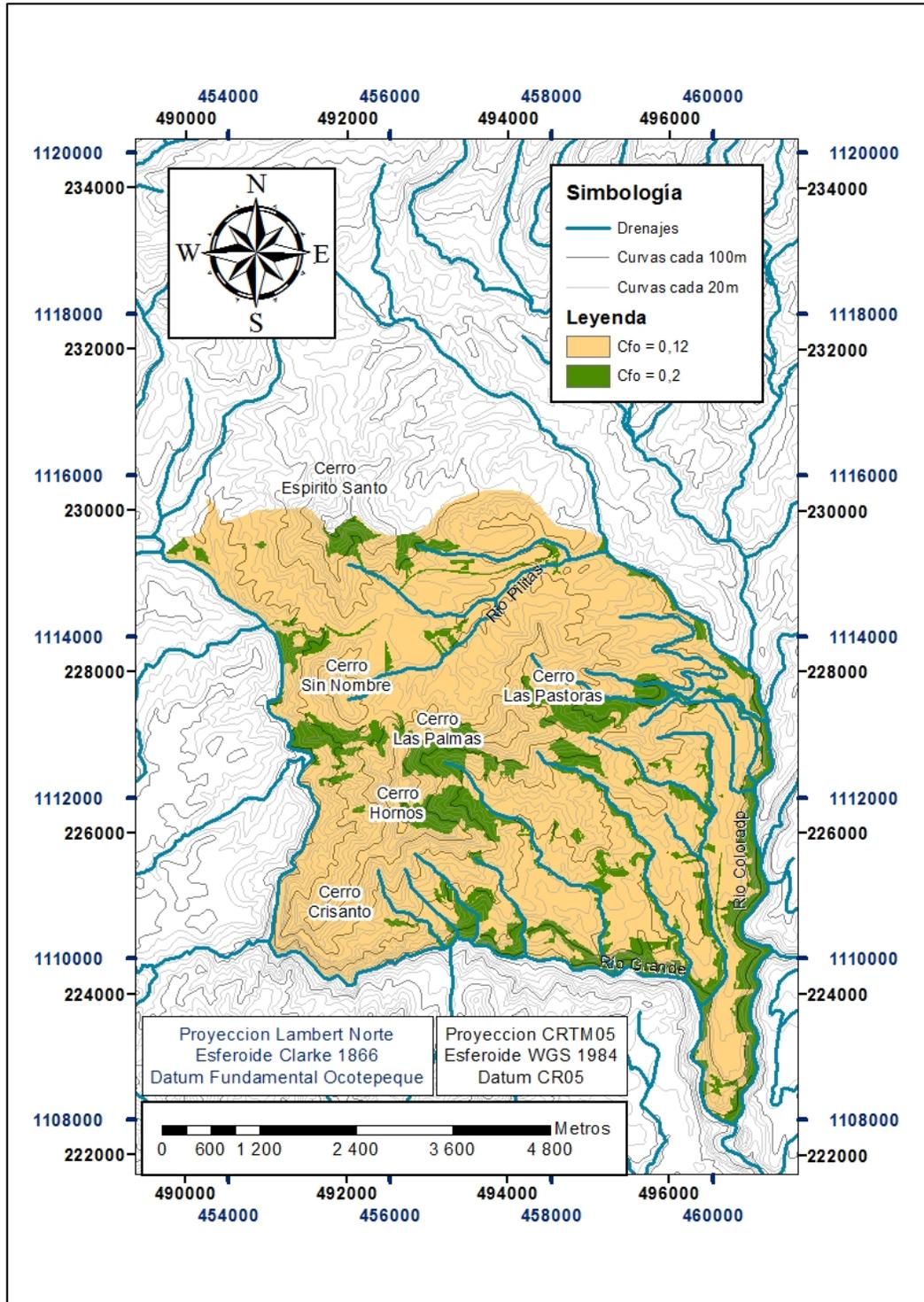


Figura 5.4: Mapa del coeficiente de retención del follaje (*Cfo*) del área de estudio.

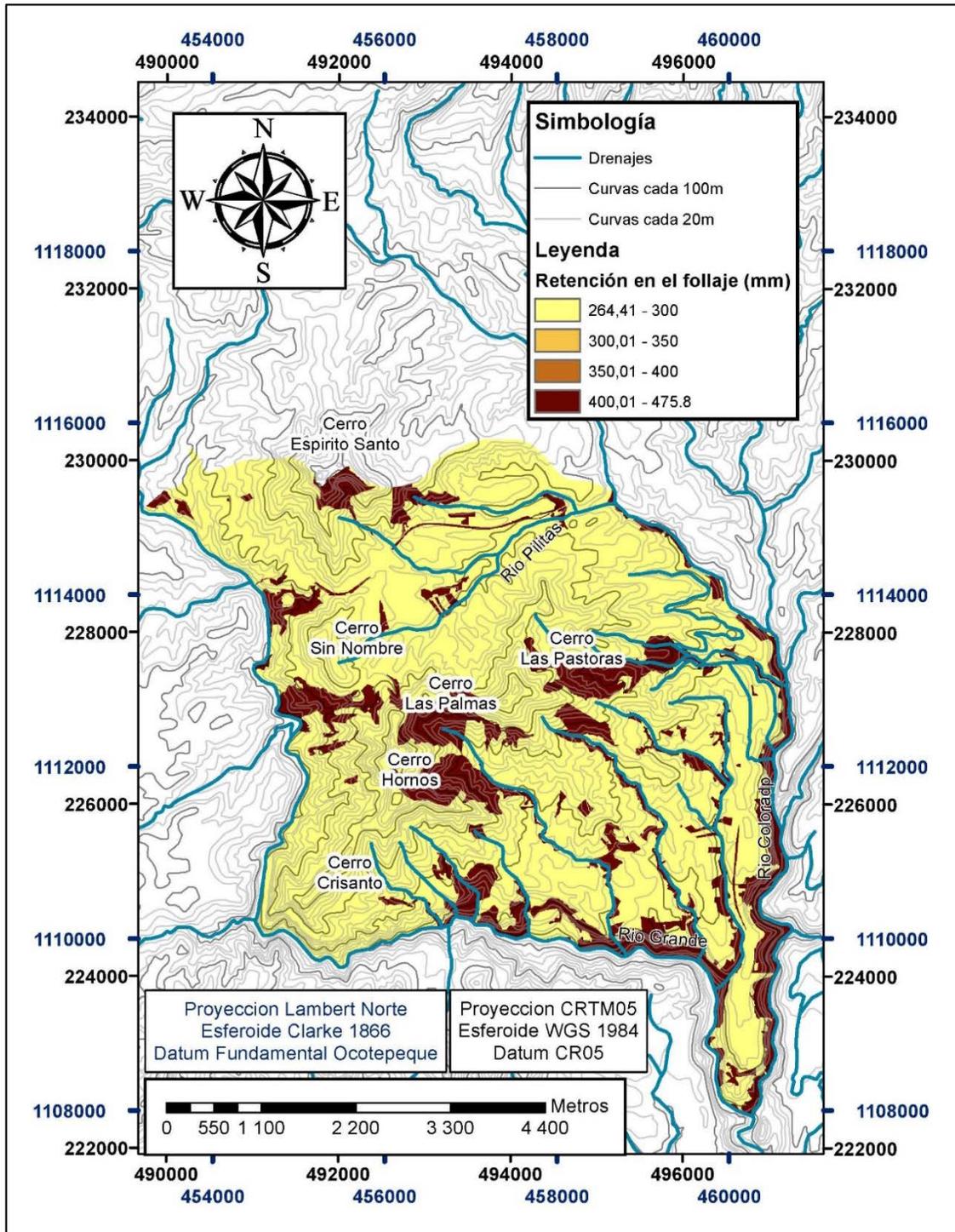


Figura 5.5: Mapa de retención de lluvia en el follaje (*Ret*) anual en el área de estudio.

5.2 Infiltración

La infiltración en la metodología de Schosinsky (2006) contempla dos coeficientes de infiltración adimensionales, el coeficiente de infiltración por textura del suelo (K_{fc}) y el coeficiente de infiltración (C_i), que depende de la pendiente, la vegetación y la tasa de infiltración del suelo.

5.2.1 Coeficiente de infiltración por textura del suelo (K_{fc})

Para establecer el coeficiente de infiltración por textura del suelo (K_{fc}), Schosinsky (2006) indica tres condiciones.

- Si la infiltración básica del suelo (f_c) se encuentra entre 16 y 1.568 mm/día, el coeficiente de infiltración por textura del suelo (K_{fc}) se calcula con la fórmula de Schosinsky & Losilla (2000).

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

- Si la infiltración básica del suelo (f_c) es menor a 16 mm de infiltración básica del suelo (f_c), el coeficiente de infiltración por textura del suelo (K_{fc}) se calcula a través de la siguiente ecuación.

- $$K_{fc} = \frac{0,0148 f_c}{16}$$

- Si la infiltración básica del suelo (f_c) es mayor a 1.568 mm/día, el coeficiente de infiltración por textura del suelo (K_{fc}) es igual a uno.

Schosinsky (2006) define la infiltración básica del suelo (f_c) como la permeabilidad del suelo saturado en los primeros 30 cm de profundidad, ya que considera que ese espesor es el que está en contacto directo con el agua de lluvia. Este valor de infiltración se obtuvo en el campo con las pruebas de infiltración del método de doble anillo. Dicho método es usado porque conserva mejor las condiciones reales de la superficie del suelo, ya que no perturba el medio (por ejemplo para el método de porchet y permeámetro de Guelp se debe realizar

una excavación de forma cilíndrica en el suelo para instalar el instrumento y tomar las medidas). Esto permite obtener un dato que refleja las condiciones del suelo inmediato o superficial que entra en contacto en primera instancia con la precipitación. Hay que tener en cuenta que los valores de infiltración obtenidos en el campo, se encuentran en unidades de cm / h por lo que se debe realizar la conversión a mm / día.

En el Cuadro 5.1 se muestran los datos de infiltración básica del suelo (f_c) obtenidos en el campo, los valores convertidos a mm/día y el valor de los coeficientes de infiltración por textura del suelo (K_{fc}) respectivos. Los valores de infiltración básica del suelo (f_c) fueron mayores a 16 mm / día en todos los casos y solo en dos casos fueron menores a 1.568 mm / día, los restantes diez valores fueron mayores a 1.568 mm / día por lo que los coeficientes el coeficiente de infiltración por textura del suelo (K_{fc}) fueron igual a uno.

Cuadro 5.1: Valores de infiltración básica del suelo (f_c) y los coeficientes de infiltración por textura del suelo (K_{fc}) para los puntos de muestreo en el área de estudio.

Código de la prueba	Coordenada Este	Coordenada Norte	f_c [cm/h]	f_c [mm/d]	K_{fc}
NA - B1	456026	1110516	30,09	7.221,60	1,00
NA - A2	454654	1115189	75,38	1.8091,20	1,00
NA - B3	454658	1115634	81,73	19.615,20	1,00
NA - A4	455819	1114761	94,32	22.636,80	1,00
NA - B4	458838	1114973	5,32	1.276,80	0,99
NA - A5	456417	1112470	16,87	4.048,80	1,00
NA - B5	457302	1112866	11,85	2.844,00	1,00
NA - C5	457091	1112808	88,52	21.244,80	1,00
NA - A6	457230	1113893	1,52	364,80	0,80
NA - X1	460108	1112292	24,98	5.995,20	1,00
NA - X2	458383	1111450	31,51	7.562,40	1,00
NA - X3	456258	1113192	55,76	13.382,40	1,00

5.2.2 Coeficiente de infiltración (Ci)

El coeficiente de infiltración (Ci), contemplan tres coeficientes más, el de infiltración por textura del suelo (Kfc) obtenido en el apartado anterior, la fracción que infiltra por efecto de la pendiente (Kp) y la fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal (Kv).

Para conocer la distribución del coeficiente de infiltración por textura del suelo (Kfc) se graficaron los puntos de muestreo de suelo y ensayos de infiltración, luego a partir de un modelo de sombras (tamaño de pixel 5x5) se delimitaron unidades morfológicas locales sobre las cuales incide un valor de infiltración. En el Cuadro 5.2 se describe la delimitación propuesta de cada una de las unidades y en la Figura 5.6 se muestra el modelo de sombras y el mapa de unidades morfológicas con la respectiva ubicación del punto de muestreo. En la Figura 5.7 se observa la distribución de los valores de coeficientes de infiltración por textura del suelo (Kfc). Los valores bajos de Kfc se encuentran en la esquina noreste del área de estudio.

Cuadro 5.2: Descripción de las unidades morfológicas delimitadas a partir del modelo de sombras en el área de estudio.

Código de Unidad	Descripción	Código de la prueba	Kfc
M1	Se sitúa en la esquina suroeste del área, corresponde con laderas de pendientes fuertes entre 30 y 60%, orientadas al sureste. La geología es del Grupo Aguacate. El uso del suelo son pastos y cultivos.	NA – B1	1,00
M2	Se localiza al sureste del área, se trata de pendientes bajas menores al 8%, con relieves suaves y ondulados, orientadas al sureste, con un patrón de drenaje Norte a Sur. La geología es del Grupo Aguacate y la Formación Tiribí. Geomorfológicamente cubre totalmente la unidad de colinas volcánicas denudacionales. El uso de suelo contempla áreas urbanas, bosque y cultivos.	NA-X1	1,00
M3	Se refiere al sector Sur de la unidad geomorfológica de conos volcánicos, presenta un relieve irregular con pendientes variables menores a 60%, orientadas al sureste. Geológicamente corresponden con el Grupo Aguacate. El uso del suelo más representativo son los cultivos. El uso de suelo es representado en mayoría por cultivos.	NA-X2	1,00
M4	Abarca las secciones Sur del cerro Las Pastoras y Este del cerro Hornos correspondientes con parte de la unidad	NA-A5	1,00

	geomorfológica de conos volcánicos y geológicamente con el Grupo Aguacate. Las pendientes rondan entre 30 y 60%, orientadas hacia el Este y sureste. El uso del suelo muestra pastos, bosques y cultivos.		
M5	Se ubica al Norte y Oeste del cerro Hornos, en la unidad geomorfológica de conos volcánicos. Las pendientes rondan entre 30 y 60%, orientadas hacia el Oeste y Norte. La geología es del Grupo Aguacate. El uso del suelo se representa en mayoría por pastos.	NA-C5	1,00
M6	Se sitúa al Norte del cerro Las Pastoras. Son relieves ondulados y suaves, con pendientes menores a 60%. La geología pertenece al Grupo Aguacate y Formación Tiribí. El uso de suelo es cultivos principalmente.	NA-B5	1,00
M7	Se encuentra al Oeste del río Pilas, geológicamente se trata del Grupo Aguacate y la Formación Tiribí. Son terrenos ondulados y planos con pendientes entre 3 y 60%, orientados al noreste y sureste. El uso de suelo es representado por cultivos y bosque.	NA-B4	0,99
M8	Rodea el río Pilitas, geológicamente es la Formación Tiribí. El relieve es plano, con pendientes menores a los 15%, orientadas al noreste. La geomorfología coincide con la unidad volcánica denudacional de baja pendiente. El uso de suelo varía entre cultivos y urbano.	NA-A6	0,80
M9	Es similar a M6. Son las partes bajas de las laderas del cerro Espíritu Santo. Las pendientes son menores al 15% y se orientan al noreste. Geológicamente se trata del Grupo Aguacate y geomorfológicamente coincide con la unidad volcánica denudacional de baja pendiente. El uso de suelo son cultivos, pastos y bosque.	NA-X3	1,00
M10	Se refiere a las laderas sureste del cerro Espíritu Santo, las pendientes varían entre 30 y 60%, con orientaciones al noreste y sureste. La geología es consistente con el Grupo Aguacate y la geomorfología coincide con la unidad de conos volcánicos. El uso de suelo son cultivos, pastos y bosque.	NA-A4	1,00
M11	Se trata de ladera Oeste del cerro Espíritu Santo y del cerro sin nombre ubicado al Sur. El relieve es empinado con algunos sectores planos por lo que la pendiente varía entre 3 y 60% y se orienta al suroeste. Geológicamente corresponde con el Grupo Aguacate y el Lacustre de Palmares, en cuanto a la geomorfología, forma parte de la unidad de conos volcánicos. El uso del suelo es muy variable, contiene las 4 categorías.	NA-A2	1,00
M12	Es similar al anterior, solo que su orientación es hacia el Oeste y el uso del suelo es cultivos y urbano.	NA-B2	1,00

La fracción que infiltra por efecto de la pendiente (K_p) se selecciona con el Cuadro 5.3. Para definir los valores de K_p es necesario desplegar un mapa de pendientes en porcentajes y clasificado en los intervalos definidos por Schosinsky & Losilla (2000). Dicho mapa se observa en la Figura 5.8. El área de estudio presenta pendientes únicamente menores a 0,06 % y mayores a 7%, siendo estas últimas las más abundantes, por lo tanto los valores de K_p serán 0,30 y 0,06 respectivamente.

Cuadro 5.3: Valores del coeficiente de infiltración por efecto de la pendiente (K_p). Tomado de: Schosinsky & Losilla (2000).

Por pendiente	Pendiente	K_p
Muy plana	0,02 – 0,06 %	0,30
Plana	0,3 – 0,4 %	0,20
Algo plana	1 – 2 %	0,15
Promedio	2 – 7 %	0,10
Fuerte	> 7 %	0,06

La fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal (K_v) está definido en el Cuadro 5.4 propuesto por Schosinsky & Losilla (2000). Similar a la determinación del coeficiente de retención del follaje (C_{fo}), los valores de K_v se establecerán de acuerdo a la información del mapa de uso del suelo. Esto se refiere a que los pastos tendrán un valor de 0,18, los cultivos 0,10, los bosques 0,20 y lo urbano 0 puesto que no hay cobertura vegetal. El mapa de coeficiente de infiltración por efecto de la cobertura vegetal (K_v) se muestra en la Figura 5.3

Cuadro 5.4: Valores del coeficiente de infiltración por efecto de la cobertura vegetal (K_v). Tomado de: Schosinsky & Losilla (2000).

Por cobertura vegetal	K_v
Cobertura con zacate menos del 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más del 75%	0,21

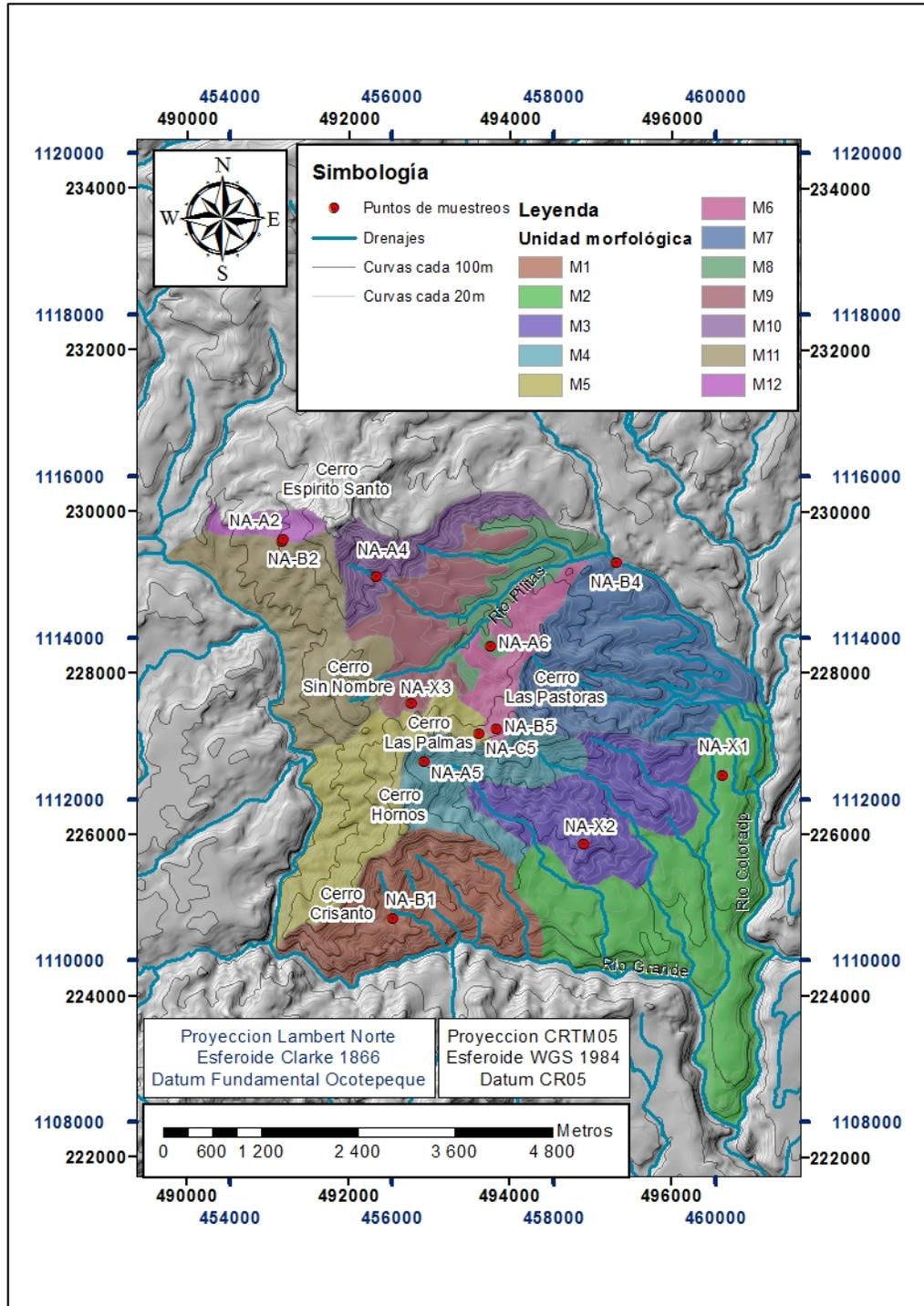


Figura 5.6: Modelo de sombras, unidades morfológicas locales y puntos de muestreo de suelo y ensayos de infiltración en el área de estudio.

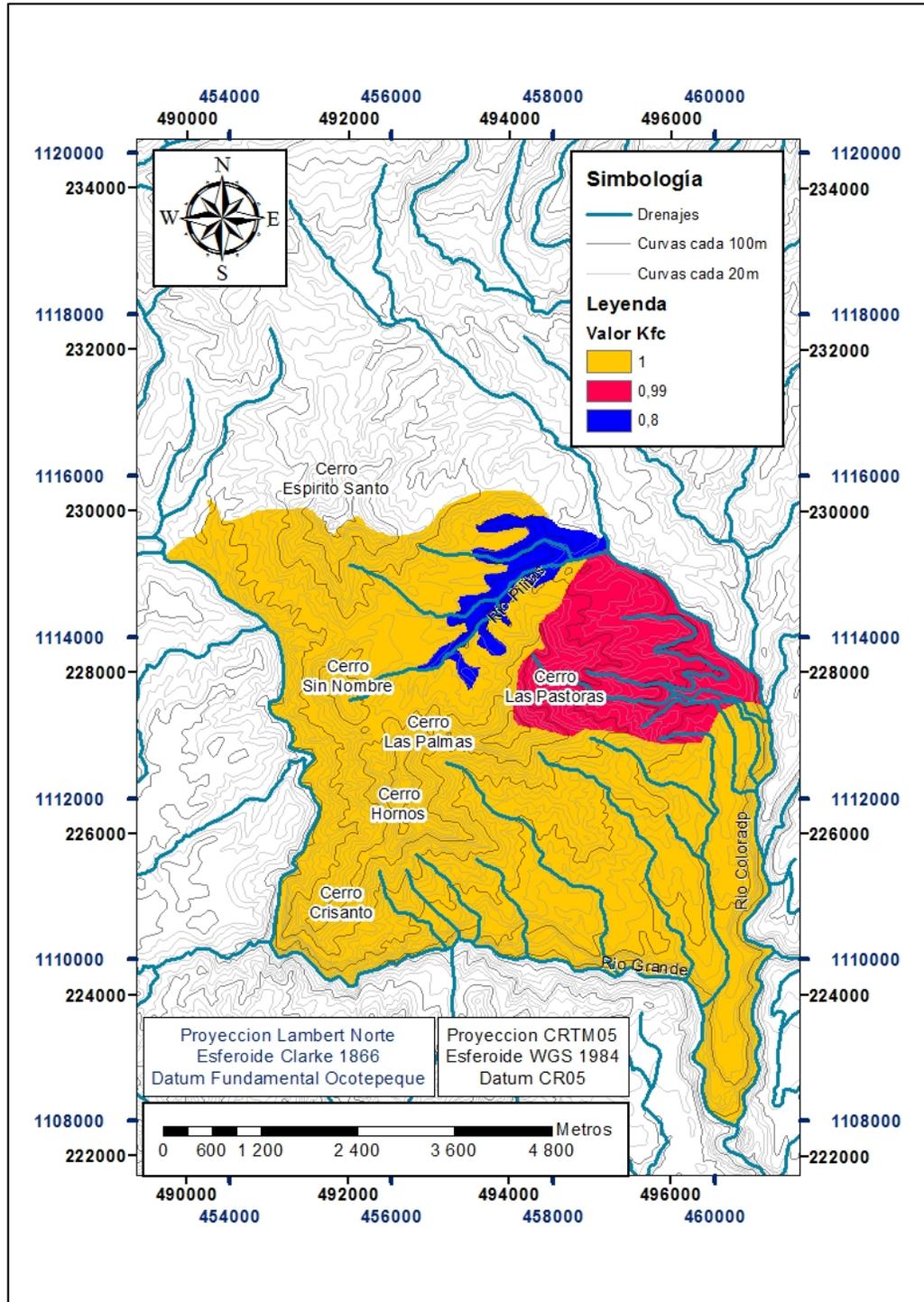


Figura 5.7: Mapa del coeficiente de infiltración por textura del suelo (Kfc) del área de estudio.

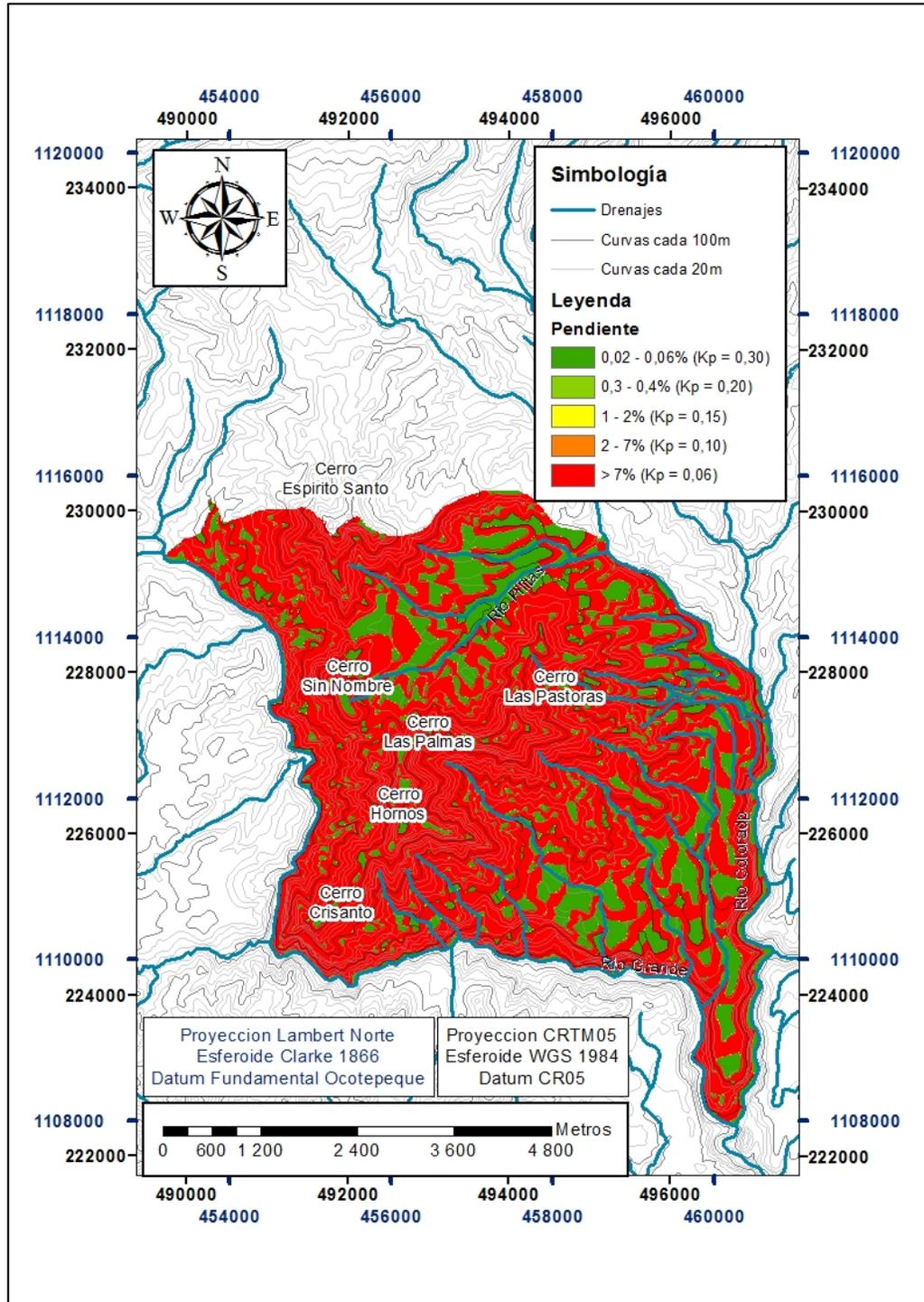


Figura 5.8: Mapa de pendientes del área de estudio y clasificación del coeficiente K_p , clasificado según los intervalos definidos por Schosinsky & Losilla (2000).

Una vez calculados los coeficientes K_{fc} , K_p y K_v se procede a calcular el coeficiente de infiltración (C_i), para ello Schosinsky (2006) establece tres condiciones.

- Si $K_p + K_v + K_{fc}$ es mayor de 1, entonces C_i es igual a 1.
- Si $K_p + K_v + K_{fc}$ es menor o igual a 1, entonces $C_i = K_p + K_v + K_{fc}$.

El desarrollo de las condiciones anteriores para determinar el coeficiente C_i se realizó con algebra de mapas mediante un condicional. Los valores de C_i obtenidos se muestran en la Figura 5.9.

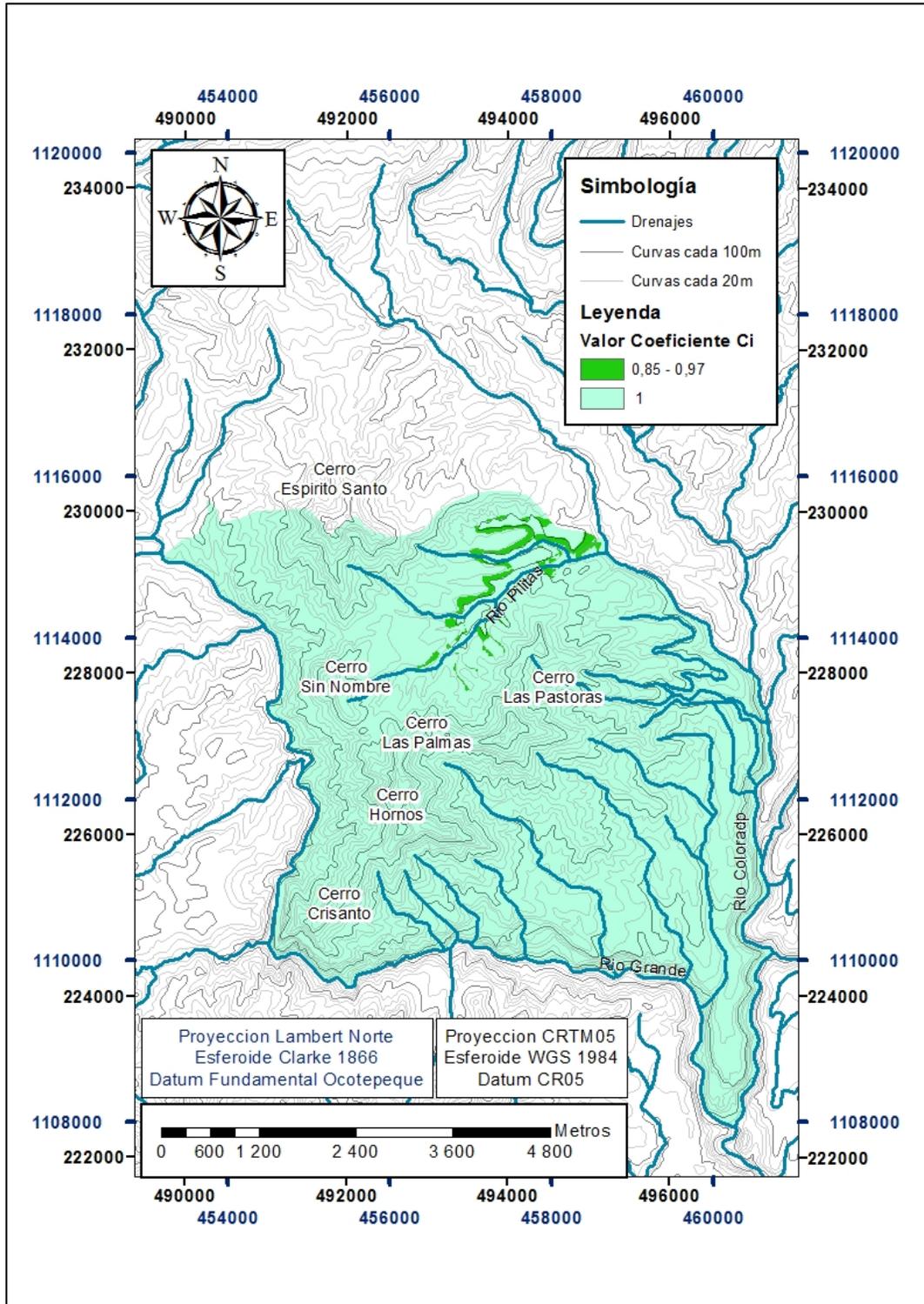


Figura 5.9: Mapa del coeficiente de infiltración (C_i) en el área de estudio.

5.3 Infiltración pluvial mensual

Para calcular la precipitación que infiltra mensualmente, Schosinsky (2006) propone la siguiente fórmula.

$$P_i = (C_i)(P - Ret)$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo [mm / mes].

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional].

P = Precipitación mensual [mm / mes].

Ret = Retención de lluvia mensual por el follaje [mm / mes].

Estos parámetros han sido calculados anteriormente en mapas tipo ráster, por lo que se puede utilizar la herramienta de álgebra de mapas para desarrollar la ecuación de la precipitación que infiltra mensualmente y obtener los valores mensuales.

La precipitación que infiltra es casi nula para los meses de enero, febrero y marzo, varía entre 0 y 5,3 mm.

Los meses con mayor infiltración pluvial son mayo, junio, julio, setiembre, octubre y noviembre. Siendo setiembre y octubre los meses de mayor infiltración, con valores de 271,76 a 402,46 mm / mes.

En abril la infiltración pluvial comienza a incrementar, sin embargo se observa que los valores menores de infiltración ocurren en las zonas boscosas al Norte. En los restantes meses la precipitación que infiltra varía entre 112,76 y 402,40 mm / mes.

En la Figura 5.10 se observa el mapa de la infiltración pluvial anual. Las menores infiltraciones ocurren en las áreas boscosas. En la zona Norte ocurre la mayor infiltración de 1.800 a 2.059 mm / anual.

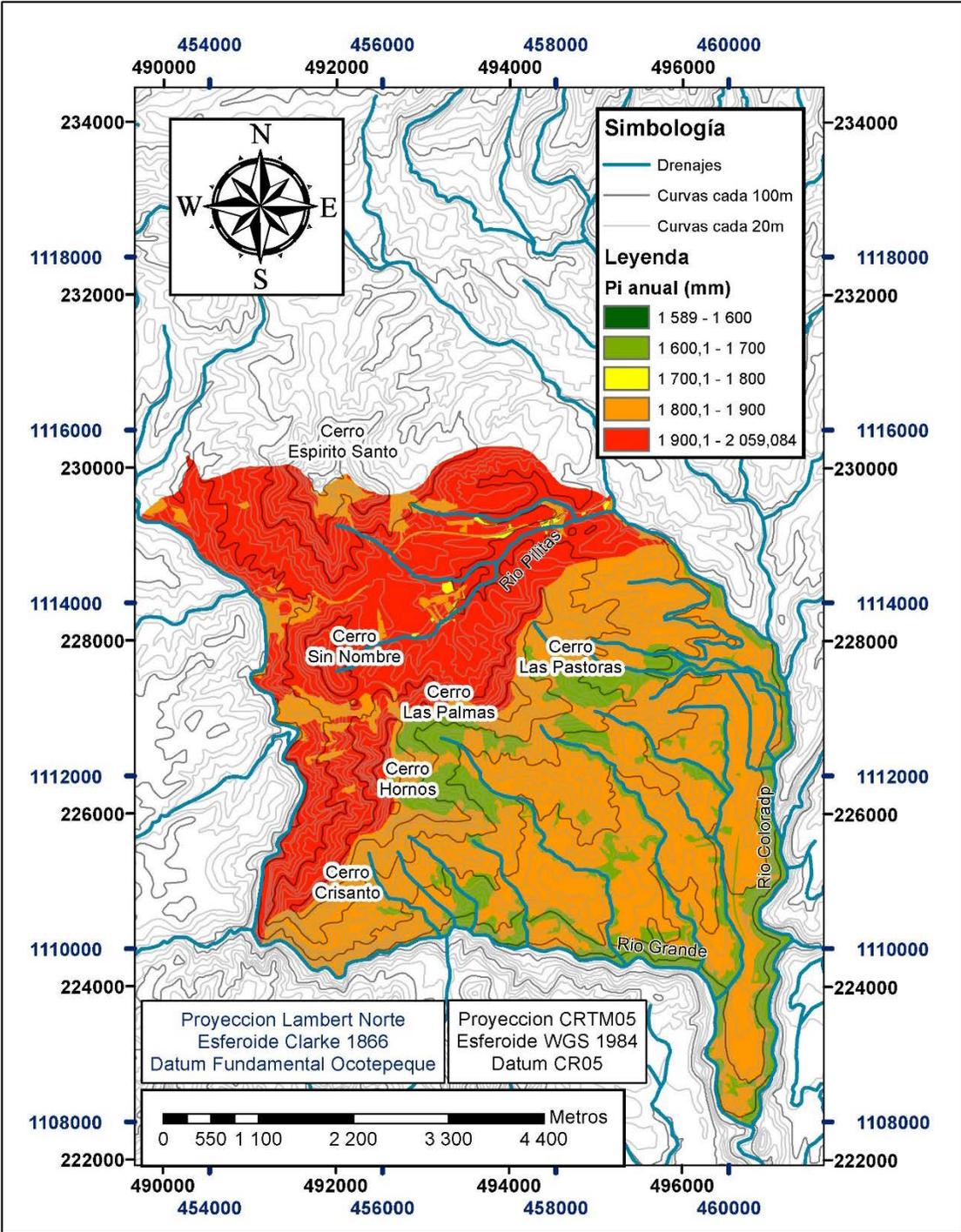


Figura 5.10: Mapa de precipitación que infiltra (P_i) anualmente en el área de estudio.

5.4 Escorrentía superficial

La escorrentía superficial por mes se calcula con la siguiente fórmula (Schosinsky, 2006).

$$ESC = P - Ret - Pi$$

Donde:

ESC = Escorrentía superficial [mm / mes].

P = Precipitación mensual [mm / mes].

Ret = Retención de lluvia mensual por el follaje [mm / mes].

Pi = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo [mm / mes].

De igual manera que el apartado anterior, la ecuación de escorrentía superficial (ESC) se desarrolla con álgebra de mapas para generar los mapas mensuales.

Entre los meses de diciembre a abril, la escorrentía superficial es cero en toda el área. De mayo a noviembre, la escorrentía tiende a cero, excepto en algunas zonas cercanas al río Pilitas, donde puede alcanzar una escorrentía de 284,47 mm.

Ante lo anterior, anualmente las escorrentías son cercanas a cero y se restringen a los alrededores del río Pilitas. En la Figura 5.11 se muestra el mapa anual de escorrentía.

5.5 Evapotranspiración

La metodología de Schosinsky (2006) sugiere utilizar la siguiente fórmula para calcular la evapotranspiración potencial.

$$ETP = (8,10 + 0,46 T)Ps$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes].

T = Temperatura media mensual [°C].

Ps = Porcentaje de horas luz solar mensual con respecto al año [%].

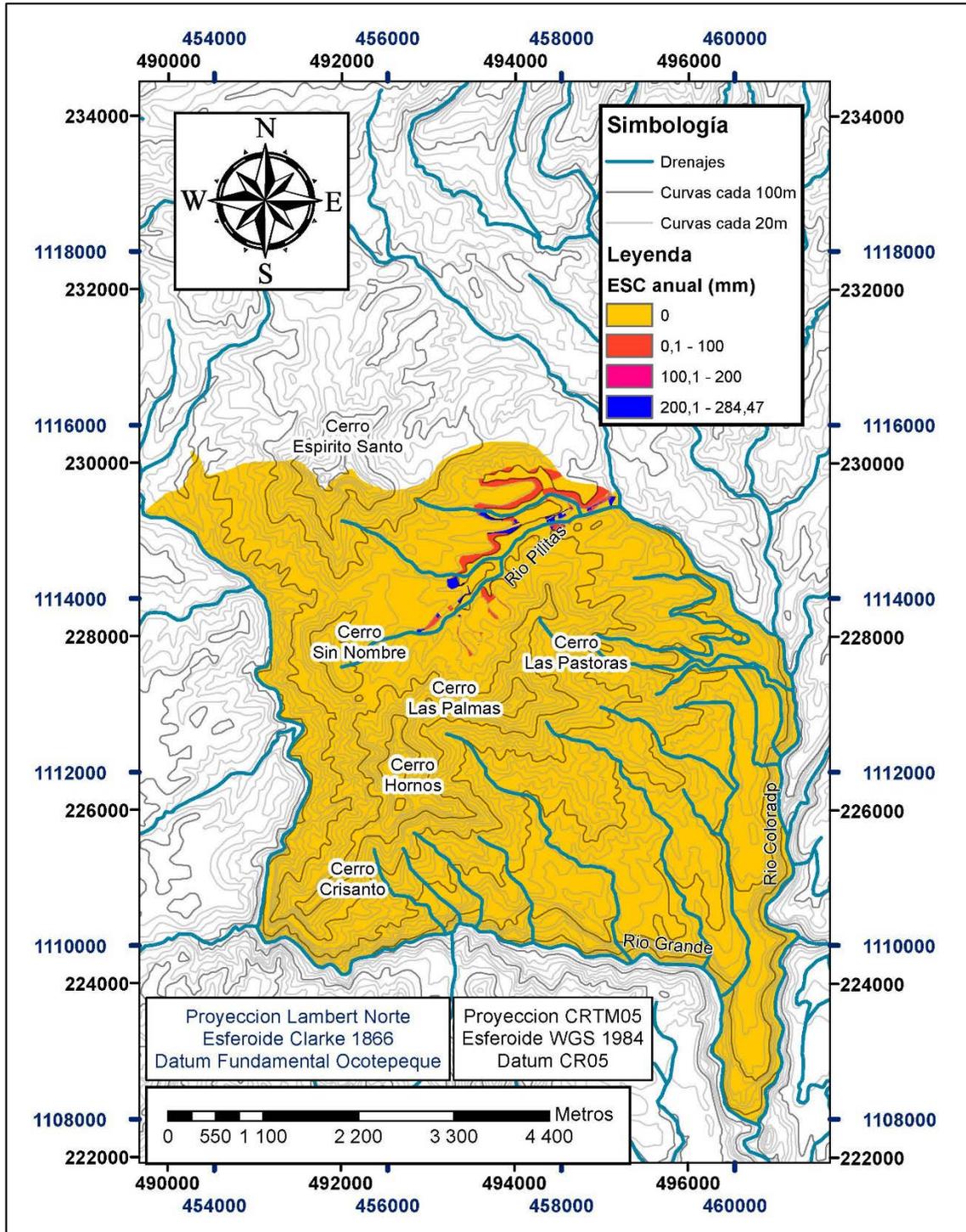


Figura 5.11: Mapa de escorrentía superficial (ESC) anual en el área de estudio.

La temperatura media mensual es un dato que se obtiene directamente de los cuadros de temperatura de las estaciones meteorológicas. Mientras que para obtener el valor P_s , Schosinky (2006) propone usar los datos indicados por Calvo (1999), mostrados en el Cuadro 5.5.

Cuadro 5.5: Promedio de los porcentajes de horas del sol mensual, respecto al año, en la latitud 10° Norte.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
%	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,60	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,10

Esta ecuación de evapotranspiración es fácilmente manejable mediante el álgebra de mapas.

A diferencia de otros parámetros analizados, los valores de evapotranspiración potencial mensual, en el área de estudio, varían poco y se mantienen constantes.

En el sector Norte los valores varían entre 141,2 y 160,5 mm, siendo noviembre el de menor evapotranspiración potencial y mayo el mes de mayor evapotranspiración potencial, con valores entre 160,5 y 170,2 mm. Al Sur del área de estudio, los valores varían entre 142,6 mm en febrero y 170,2 mm en mayo.

Los resultados de la evapotranspiración potencial total anual (ETP) se muestran de la Figura 5.12. La subcuenca San Miguel tiene un total de 1.796,46 mm, mientras que la subcuenca Rosario presenta 1907,38 mm.

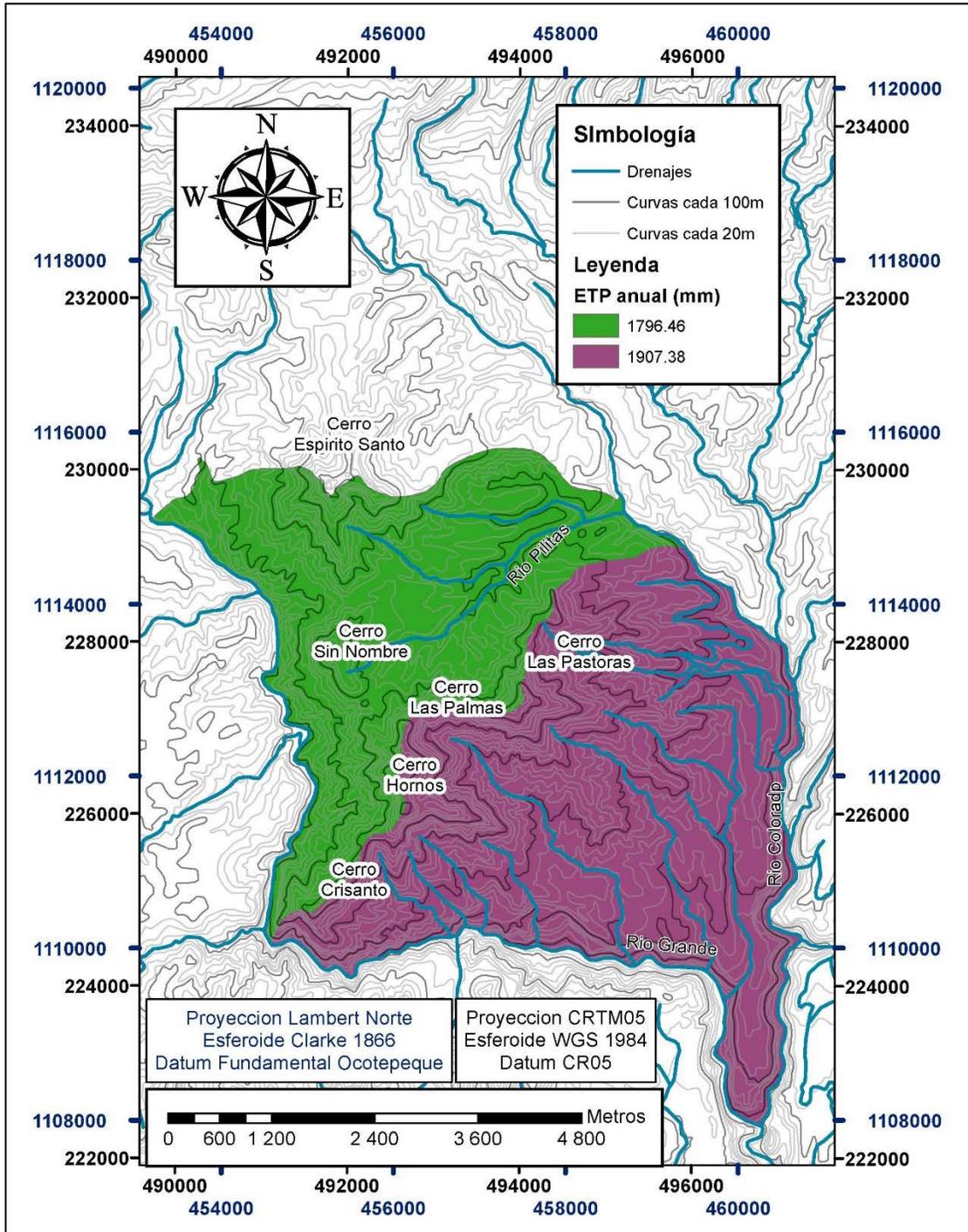


Figura 5.12: Mapa de evapotranspiración potencial mensual (ETP) para el área de estudio.

5.6 Recarga del acuífero

5.6.1 Capacidad de campo y punto de marchitez

La definición de capacidad de campo de Schosinky (2006) es cuando ocurre la máxima humedad del suelo sin que se encuentre saturado y las plantas tienen mayor capacidad de evapotranspiración. Mientras que el punto de marchitez se refiere a la humedad mínima necesaria para que una planta viva.

Para comenzar a desarrollar las fórmulas de recarga del acuífero es importante estandarizar todas las unidades de medición a mm. Los parámetros recolectados que no se encuentran en esta unidad son capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM), ya se encuentran en porcentaje por peso de suelo seco. Para convertirlos, Schosinky (2006) sugiere multiplicar los valores en porcentaje por peso de suelo seco por la densidad aparente [g/cm^3] y por la profundidad de las raíces [mm].

Las primeras dos variables provienen de los resultado de laboratorio y se muestran gráficamente en la Figura 5.13, Figura 5.14 y Figura 5.15.

Los valores de capacidad de campo se encuentran en un intervalo de 0,3855 a 0,4391 %, mientras que los valores de punto de marchitez entre 0,1986 y 0,2274 %. La densidad aparente varía de $1,05 \text{ g}/\text{cm}^3$ a $1,16 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Para la profundidad de raíces se realizó un estimado del promedio en función de lo observado en las giras de campo y de acuerdo al tipo de cobertura. De esta manera a los cultivos se les otorgó una profundidad de raíces de 500 mm, a los bosques de 2.000 mm y al zacate de 1.000 mm, en la Figura 5.16 se muestra la distribución de estos valores en función del mapa de uso de suelo.

El producto de la multiplicación de los parámetros anteriores, para convertir los valores de porcentaje de peso de suelo seco a milímetro se observa en la Figura 5.17 y la Figura 5.18. Los mayores valores de capacidad de campo y punto de marchitez se sitúan en las áreas boscosas; los pastos muestran valores intermedios y los cultivos valores bajos. Las áreas urbanas implican valores de cero.

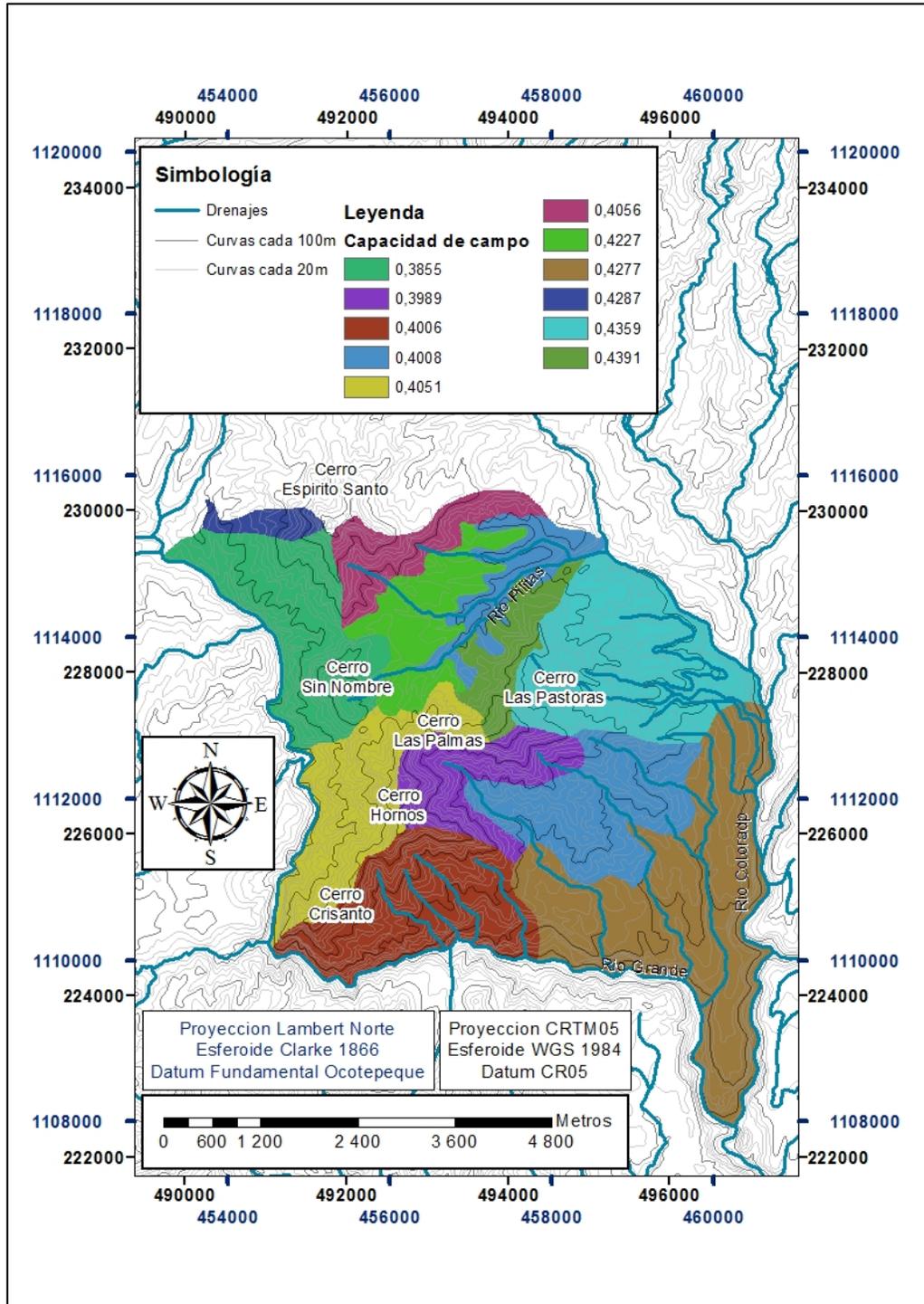


Figura 5.13: Mapa de capacidad de campo (CC) en porcentaje por peso de suelo seco, en el área de estudio.

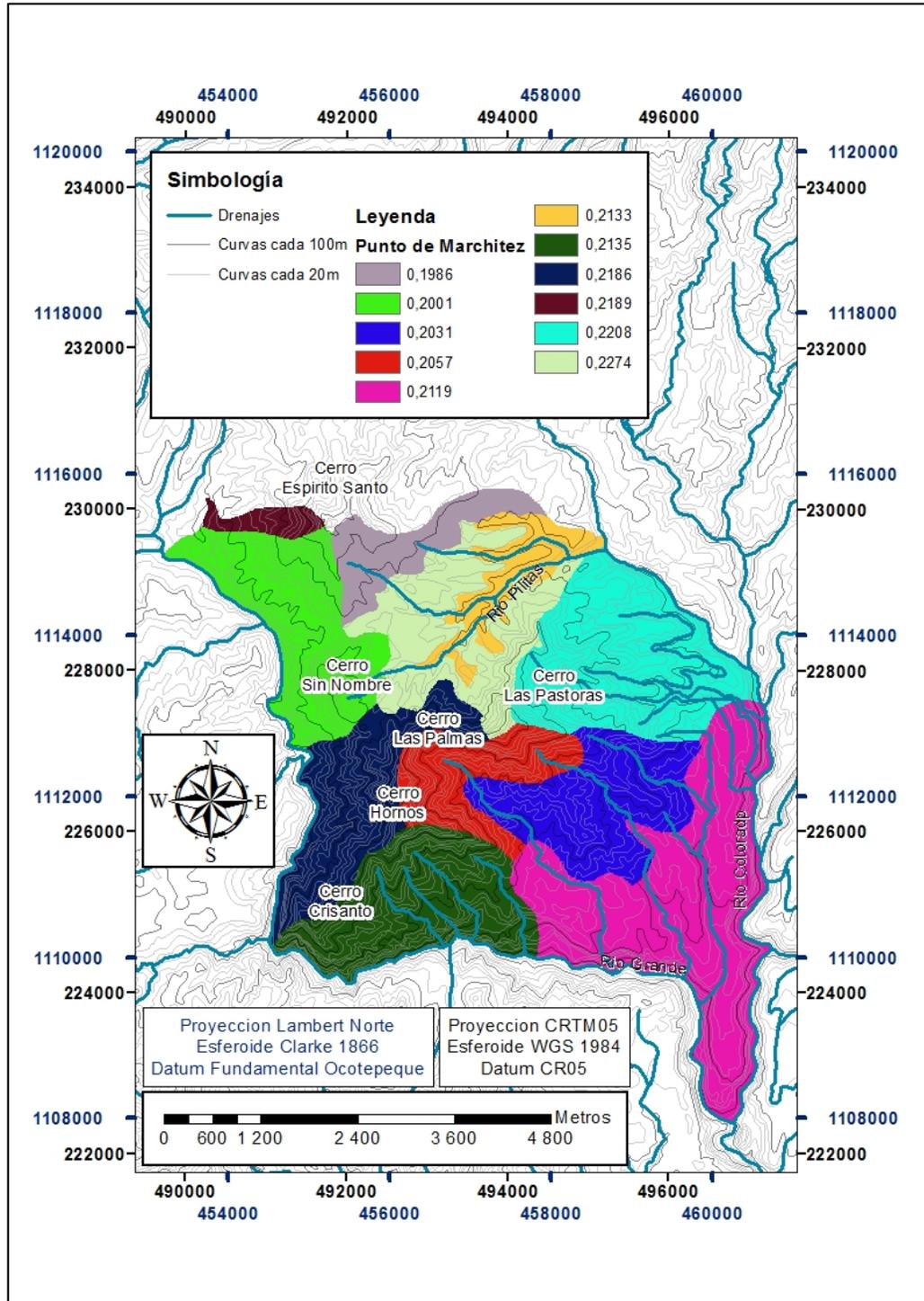


Figura 5.14: Mapa de punto de marchitez (PM) en porcentaje por peso de suelo seco, en el área de estudio.

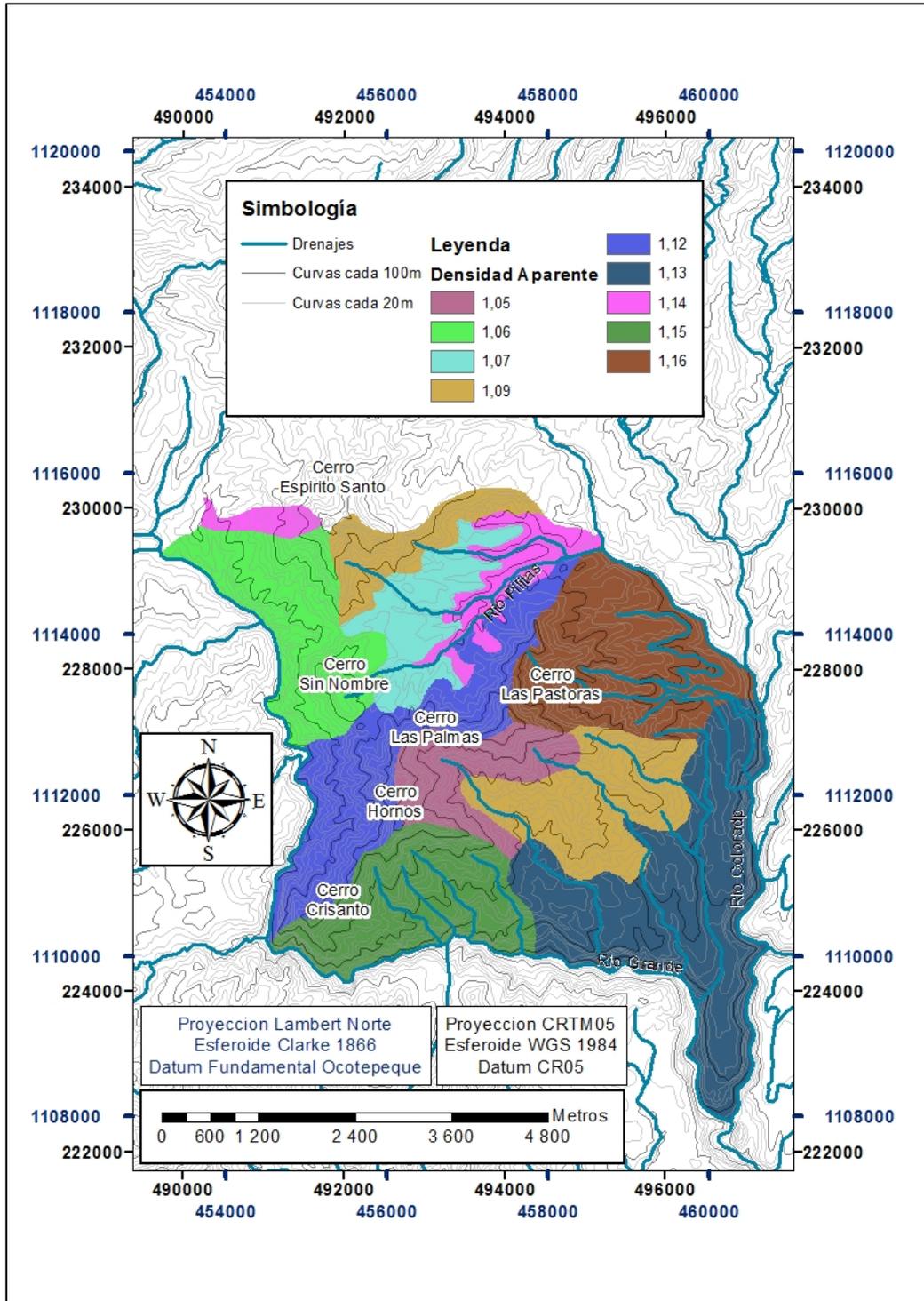


Figura 5.15: Mapa de densidad aparente [g/cm³] en el área de estudio.

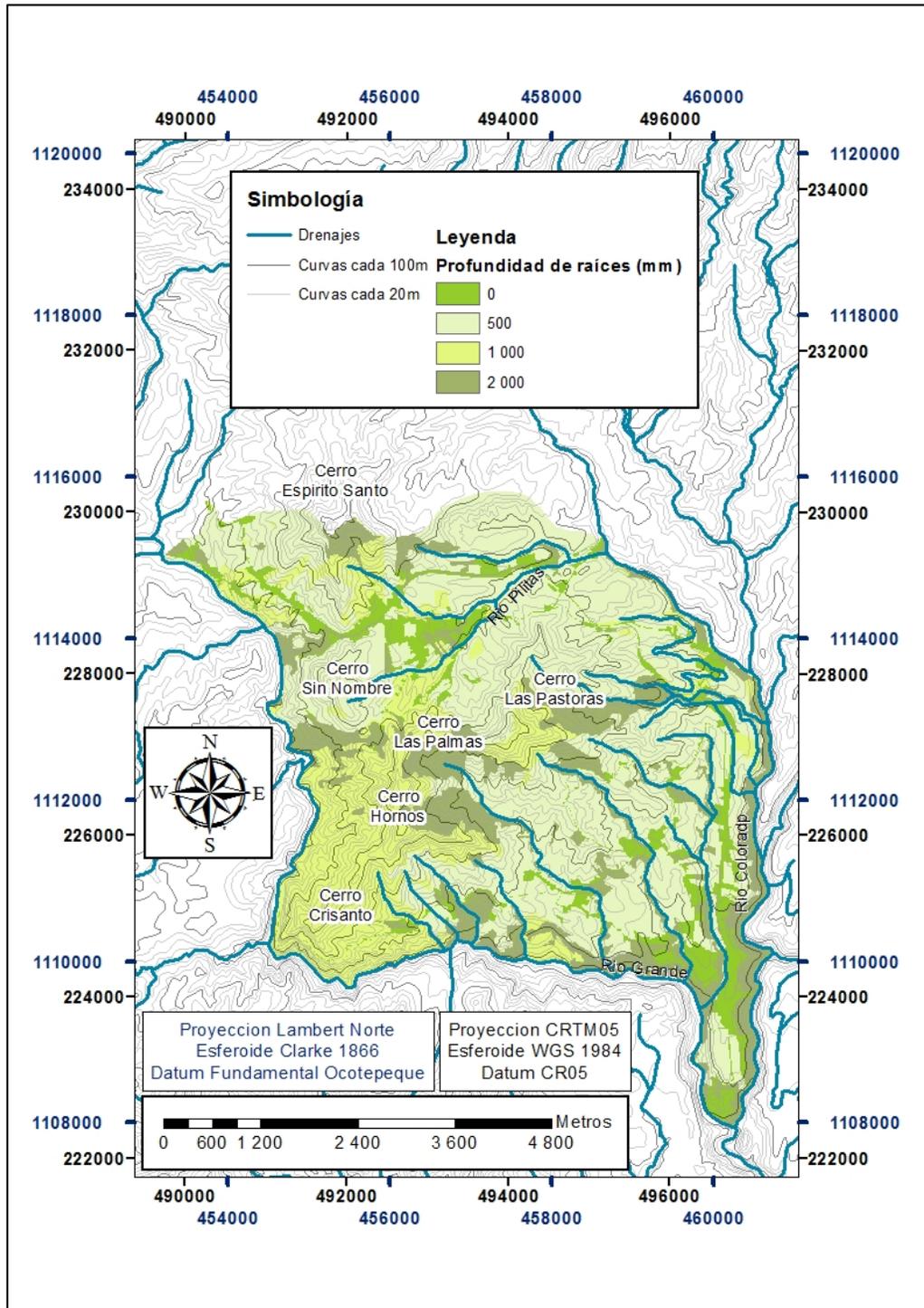


Figura 5.16: Mapa de profundidad de raíces [mm] en el área de estudio.

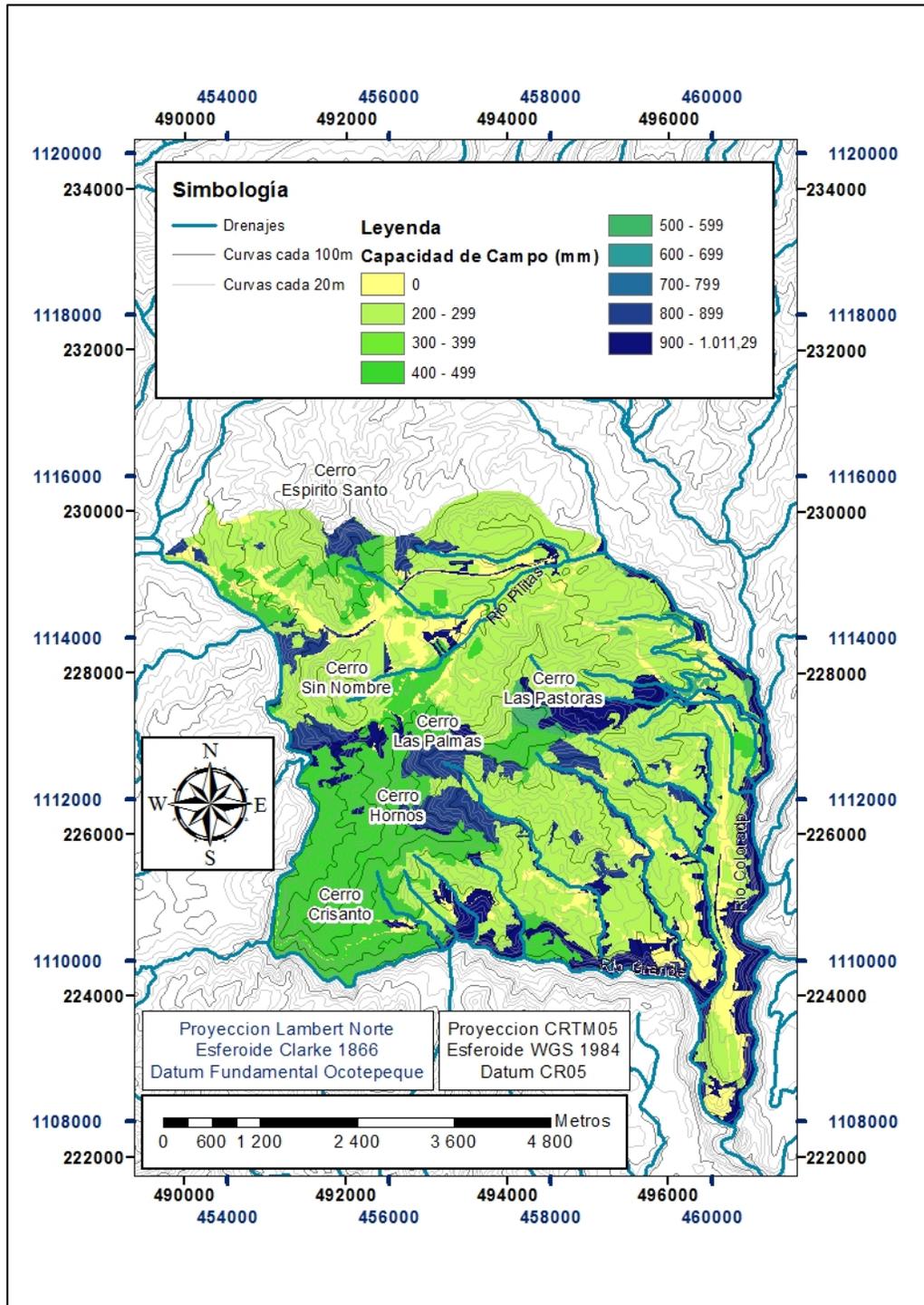


Figura 5.17: Mapa de capacidad de campo (CC) en milímetros en el área de estudio.

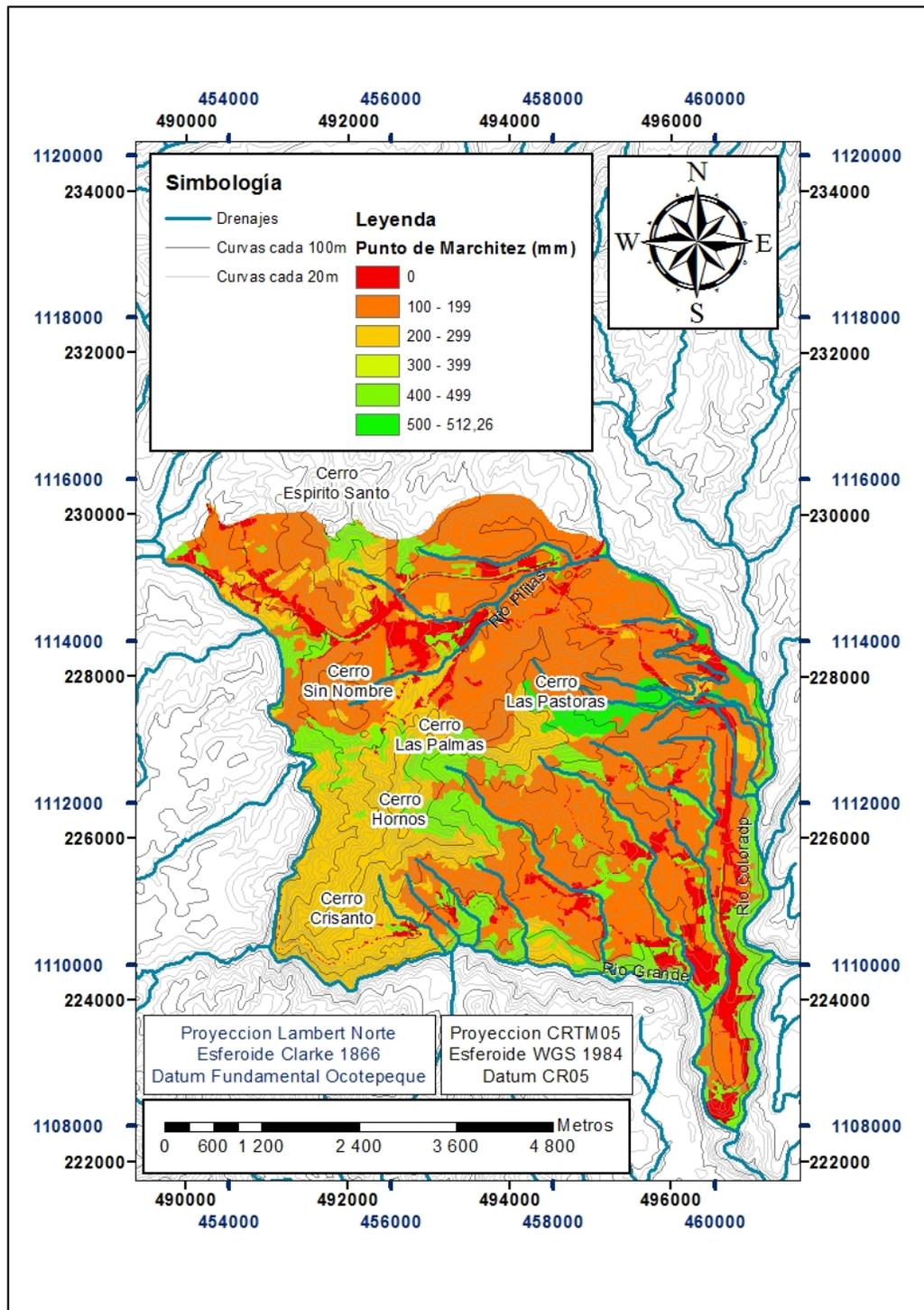


Figura 5.18: Mapa de punto de marchitez (PM) en milímetros en el área de estudio.

5.6.2 Coeficientes de humedad C1 y C2

Para obtener la recarga del acuífero, es necesario la obtención de los coeficientes de humedad $C1$ y $C2$, a través de las siguientes ecuaciones (Schosinsky, 2006).

$$C1 = \frac{HSi - PM + Pi}{CC - PM}$$
$$C2 = \frac{HSi - PM + Pi - ETR1}{CC - PM}$$

Donde:

$C1$ = Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.

$C2$ = Coeficiente de humedad al final del mes después de que ocurra la evapotranspiración.

HSi = Humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial [mm].

PM = Punto de marchitez [mm].

Pi = Precipitación que infiltra [mm/mes].

CC = Capacidad de campo [mm].

$ETR1$ = Evapotranspiración potencial real [mm/mes].

La variable $ETR1$ es calculada por la siguiente ecuación:

$$ETR1 = (C1)(ETP)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes].

$C1$ = Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.

Para abordar la determinación de la humedad inicial del suelo (HSi) y calcular la humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración ($C1$), Schosinsky (2006) parte del hecho que antes que ocurra la evapotranspiración, toda la precipitación que se infiltra aumenta la humedad del suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración posteriormente, en ese instante el suelo contiene su máxima humedad.

La humedad inicial del suelo (HSi) en las condiciones descritas anteriormente, es la capacidad de campo. Dicho en otras palabras, la humedad inicial del suelo es igual a la capacidad de campo en el mes inmediato después de la estación lluviosa, que es cuando el suelo se encuentra completamente saturado o bien a capacidad de campo. Para el área de estudio, noviembre presenta una humedad inicial del suelo igual a la capacidad de campo. Una vez indicado esto y conociendo los valores de capacidad de campo (CC) se utilizan las herramientas de álgebra de mapas para desarrollar las ecuaciones y obtener los coeficientes del mes. Hay que tener en cuenta que la humedad inicial del suelo del siguiente mes, equivaldría a la humedad final del suelo del mes anterior, por ejemplo en diciembre la humedad inicial del suelo es la humedad final del suelo en noviembre. No obstante, Schosinsky (2006) indica que los coeficientes de humedad ($C1$ y $C2$) no pueden ser superiores a 1 o inferiores a 0 y que, en caso de que sean mayores a 1 se tomarán los $C1$ y $C2$ igual a 1 pero si fuesen negativos se tomarán como 0.

5.6.3 Evapotranspiración real y humedad disponible

La evapotranspiración real (ETR) se establece a partir de una condición.

- Si $\left(\frac{C1+C2}{2}\right)ETP$ es menor o igual a HD , entonces $ETR = \left(\frac{C1+C2}{2}\right)ETP$; por el contrario si resulta mayor, entonces $ETR = HD$.

Donde:

ETR = Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].

$C1$ = Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.

$C2$ = Coeficiente de humedad al final del mes después de que ocurra la evapotranspiración.

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes].

HD = Humedad disponible accesible a las raíces de las plantas para que estas evapotranspiren [mm/mes].

La humedad disponible está definida por la siguiente ecuación.

$$HD = HSi + Pi - PM$$

Donde:

HSi = Humedad al inicio del mes [mm].

Pi = Precipitación que infiltra [mm/mes].

PM = Punto de marchitez [mm].

Los meses de diciembre a abril presentan una evapotranspiración real (ETR) baja, 6,04 a 130,33 mm, mientras que en los meses de mayo a noviembre varía entre 92,99 a 168,77mm. La evapotranspiración real total en un año se muestra en la Figura 5.19.

Respecto a la humedad disponible (HD) total en un año, en el área de estudio se estima que varía entre 2.429,16 y 6.226,22 mm. Los valores de humedad disponible mensual son bajos entre los meses de enero y abril (7,83 a 395,75 mm) y son altos entre los meses de mayo a diciembre (120,40 y 630,15 mm). En general, los valores mayores de humedad disponible están asociados con zonas boscosas y pastos.

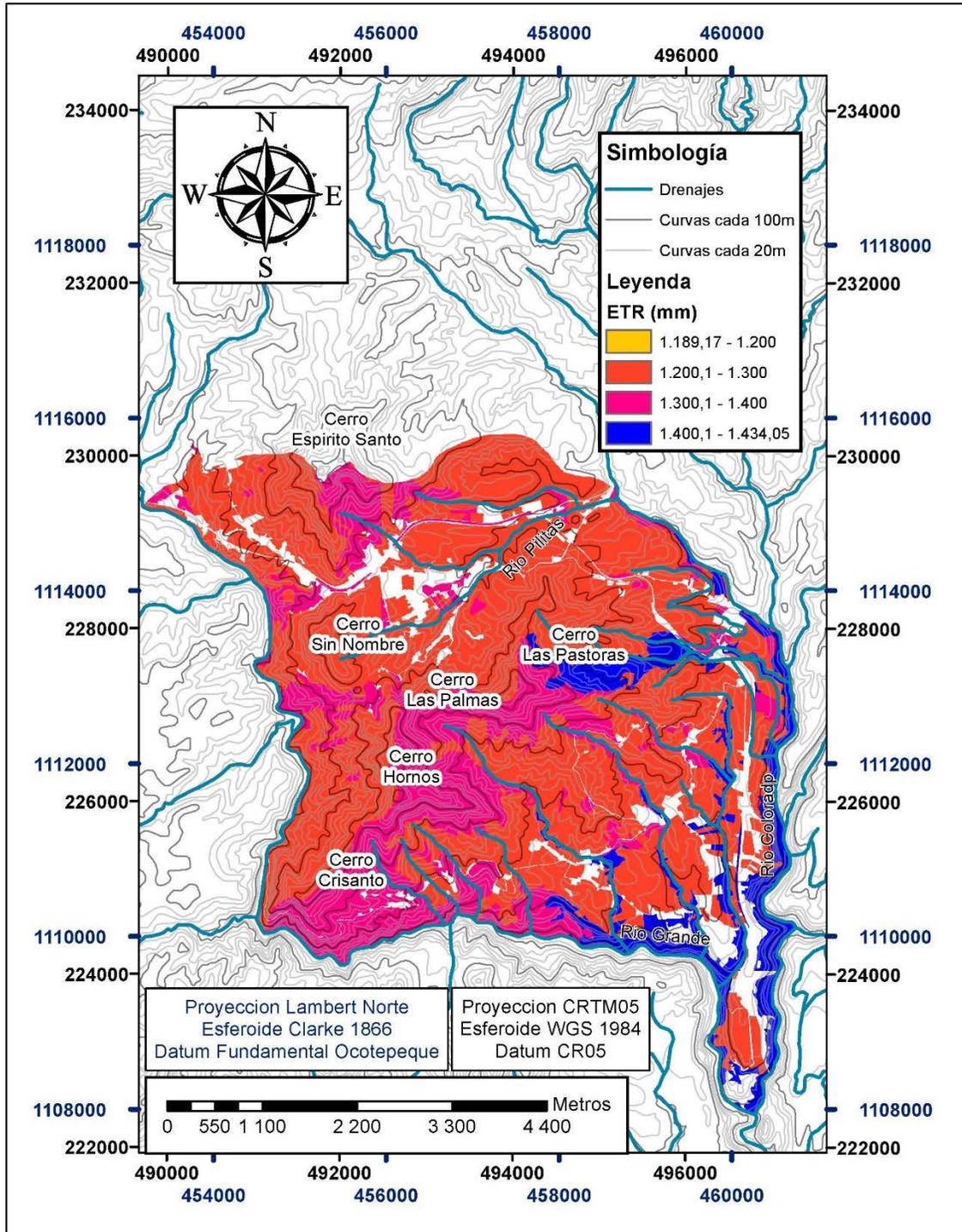


Figura 5.19: Mapa de la evapotranspiración real promedio (ETR) anual para el área de estudio.

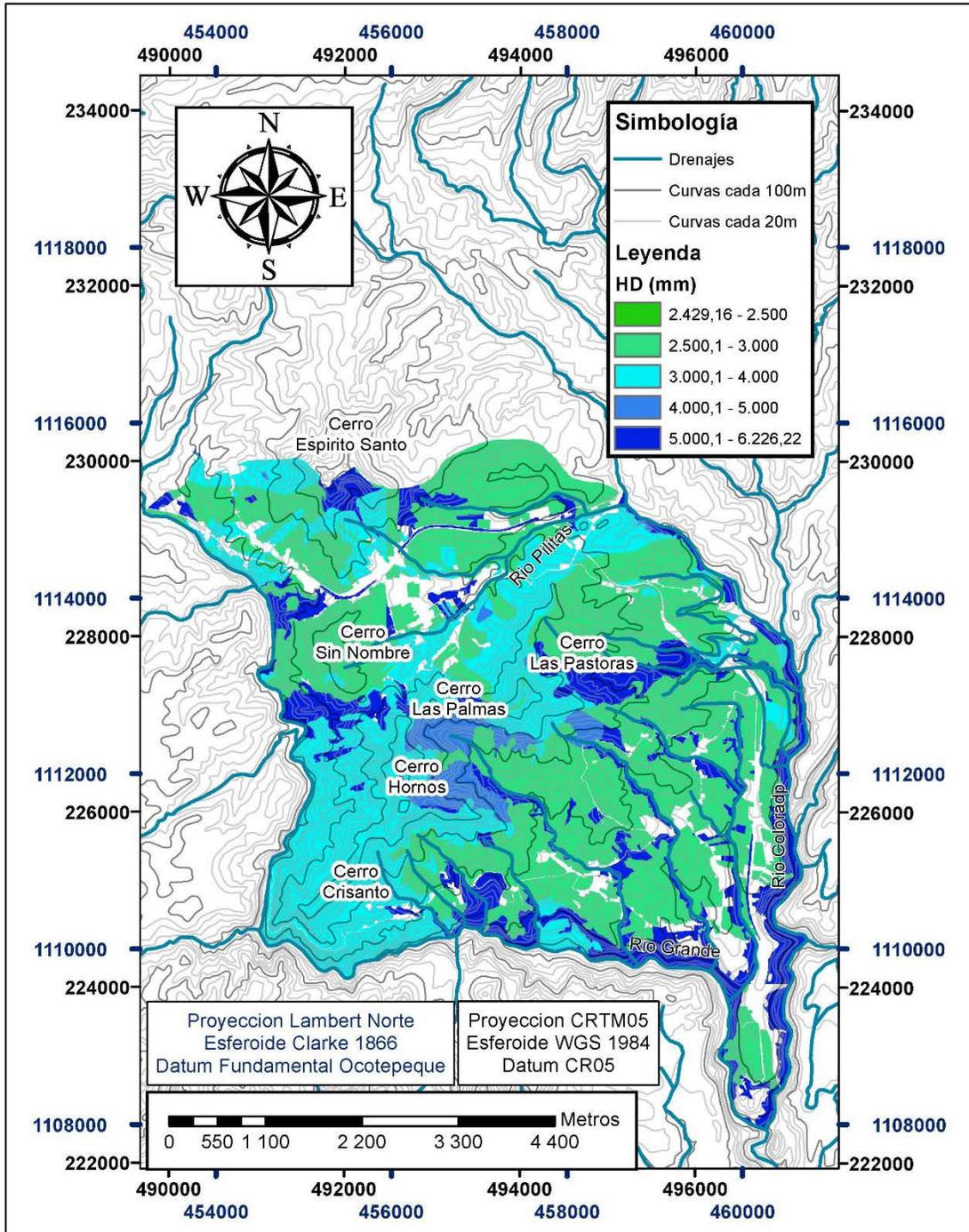


Figura 5.20: Mapa de humedad disponible (*HD*) anualmente para el área de estudio.

5.6.4 Recarga potencial del acuífero

Finalmente, la recarga potencial de acuíferos (R_p), según Schosinsky (2006), se calcula de la siguiente manera.

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra [mm/mes].

H_{Si} = Humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial [mm].

ETR = Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].

H_{Sf} = Humedad del suelo al final del mes [mm]. Se obtiene bajo la siguiente condición.

- Si $HD + PM - ETR$ es menor que la capacidad de campo, entonces $H_{Sf} = HD + PM - ETR$, de lo contrario $H_{Sf} = CC$.

El mapa de la recarga potencial anual se muestra en la Figura 5.21, varía entre 230,21 y 801,23 mm. La subcuenca Rosario presenta un recarga entre 230,21 y 600 mm, mientras que la subcuenca San Miguel recarga entre 400 y 801, 23 mm. Además del mapa se puede inferir que las zonas boscosas disminuyen la recarga potencial, posiblemente por que generan mayor demanda del recurso hídrico que los pastos y cultivos.

En noviembre la recarga potencial es menor a 12,46 mm. Entre los meses diciembre, enero, y febrero no hay recarga potencial del acuífero. En marzo y abril es despreciable. Pero en mayo hay una recarga puntual de 22,09 mm al noroeste del área de estudio, en los alrededores del cerro Espíritu Santo y un cerro sin nombre ubicado al sur.

Para junio se presenta una recarga más regular en la subcuenca San Miguel. Y en julio hay una recarga muy leve, menor a 35 mm, en toda el área de estudio, excepto en las zonas boscosas. En agosto solo hay recarga al Norte del área de estudio, pero en setiembre y octubre ocurre la recarga potencial del acuífero de toda el área de estudio, aunque en mayor medida en el sector Norte.

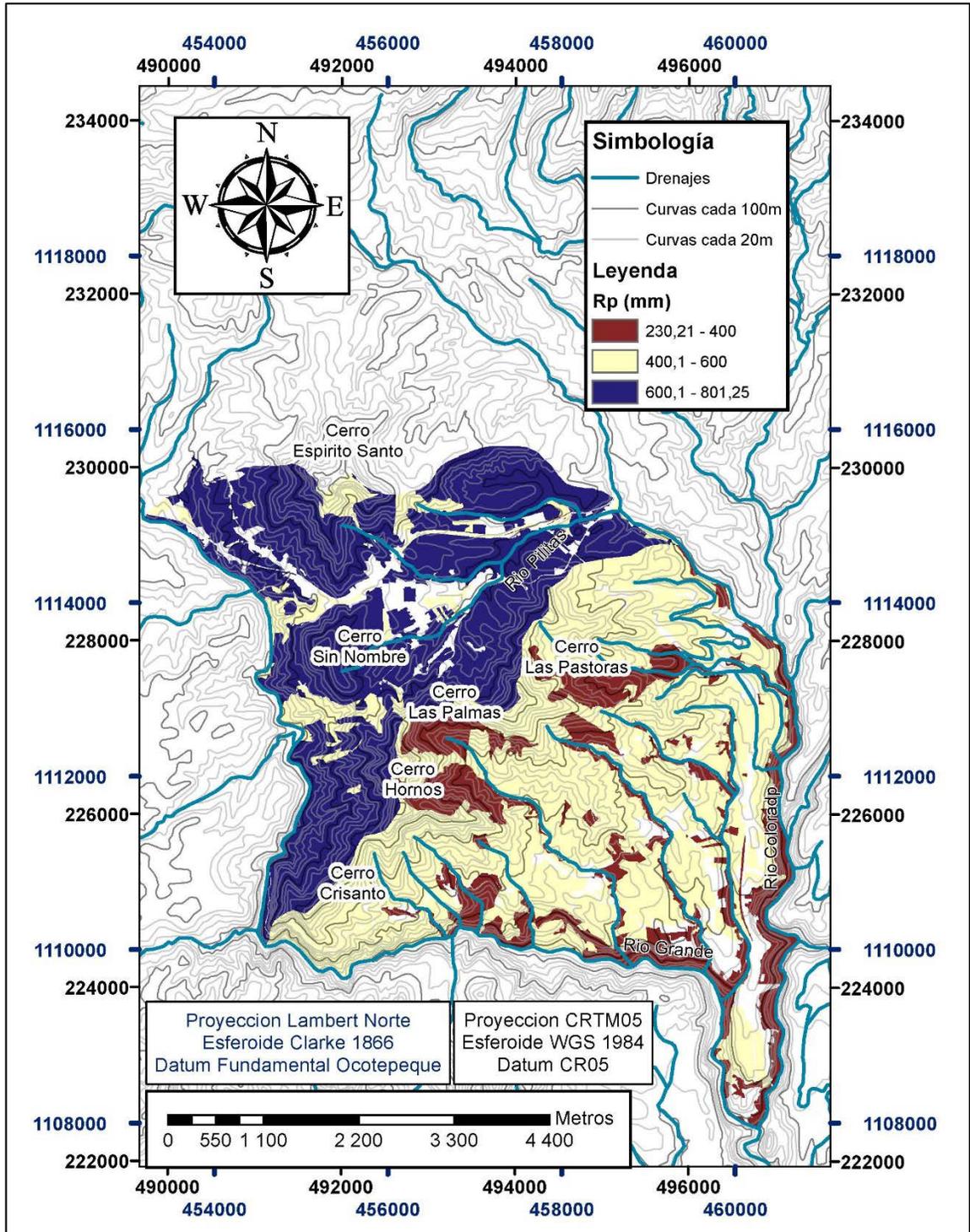


Figura 5.21: Mapa de recarga potencial del acuífero (R_p) anual en el área de estudio.

6 Delimitación de zonas de protección de nacientes

6.1 Introducción a las zonas de protección de nacientes

La protección del recurso hídrico tiene como finalidad garantizar el abastecimiento de agua potable de buena calidad y cantidad. Una adecuada planificación del recurso incluye la identificación del problema, la caracterización por medio del desarrollo de herramientas, la implementación de estrategias y la toma de decisiones (Birkel, 2007).

Entre las estrategias para la protección del recurso Choconi (2009) señalan las siguientes.

- Clasificación de los acuíferos según su calidad, uso o vulnerabilidad. Incluyendo criterios como características hidrogeológicas, calidad físico – química y biológica del recurso y los usos o destinos actuales y proyectados del recurso.
- Mapeos de vulnerabilidad.
- Identificación y clasificación de actividades contaminantes, incluyendo el mapeo de fuentes de contaminación e inventarios de cargas contaminantes.
- Protección de zonas de recarga de acuíferos, vinculado al uso del suelo y al ordenamiento territorial.
- Determinación de perímetros de protección de pozos de abastecimiento de agua para consumo.
- Registro y control de pozos.
- Criterios y actividades de inspección ambiental para el monitoreo de actividades industriales y / o procesos de remediación.
- Implementación de políticas que aseguren la protección cualitativa y cuantitativa de las aguas subterráneas.
- El rol o función ecológica del recurso o sus usos indirectos.
- Y las posibles valoraciones económicas

Dentro del marco de la planificación del recurso, la delimitación de perímetros de protección para las captaciones son herramientas que forman parte de las estrategias para

la conservación de los recursos y la explotación sostenible, que facilitan la toma de decisiones.

Las medidas de protección de captaciones pretenden regular, ordenar y prohibir determinadas actividades potencialmente nocivas que podrían contaminar las captaciones (Expósito *et al.*, 2004).

Para discutir el criterio de riesgo, se debe valorar el contexto social – económico, la fuente contaminante que se refiere al origen y tipo de amenaza, las condiciones de vulnerabilidad y la calidad del agua subterránea que actúa como receptor (Choconi, 2009).

La lógica detrás de la delimitación de zonas de protección se basa en que es más fácil, barato y seguro proteger las fuentes de agua contra la contaminación que remediar después de contaminada una fuente. Sin embargo para ello es necesario el compromiso de las políticas provinciales (Patrick, 2009).

El ingreso de las fuentes contaminantes a las aguas subterráneas es un proceso lento que dependen de las características del suelo o roca en la zona saturada y en la zona no saturada, y de las actividades humanas que se desarrollan sobre el mismo (Choconi, 2009). Los recursos hídricos subterráneos poseen características naturales propias de la geología que los contiene, dichas características corresponden con los aspectos hidrogeológicos (Choconi, 2009). De aquí la estrecha relación entre la geología y el estudio de las aguas subterráneas, y por ende la importancia de tomar en cuenta la geología en las metodologías para la delimitación de áreas de protección de las nacientes y pozos.

Un factor muy importante a tener en cuenta para la delimitación de zonas protectoras de captaciones es la anisotropía y la heterogeneidad del acuífero (Expósito *et al.*, 2004).

6.2 Metodologías para delimitar las zonas de protección de nacientes

A continuación se describirá brevemente los diferentes tipos de metodologías aplicables en la delimitación de perímetros de protección.

6.2.1 Metodología de radio fijo arbitrario

Establece radios de protección de dimensiones escogidas convencionalmente, tomando como centro la ubicación de la naciente. En el caso de Costa Rica se encuentran definidas en la legislación nacional. Estos radios carecen de criterio y sustento técnico.

En el artículo 31 de la Ley de Aguas No. 276 se establece un perímetro de 200 m de radio que circunden las captaciones o tomas Surtidoras de agua potable como reserva de dominio a favor de Costa Rica. Mientras que en el artículo 33 de la Ley Forestal No. 7575 se establece un perímetro de 100 m de radio alrededor de las nacientes. La Figura 6.1 muestra los radios de protección arbitrarios de 100 y 200 m.

Con esta normativa vigente las áreas de protección de las nacientes La Pista y San Miguel coinciden con las áreas de protección ribereñas, por lo que son zonas prioritarias por intervenir.

Las nacientes Captación 1, Captación 2, Captación 3 y La Bomba comparten sus zonas de protección, por lo que una labor conjunta entre ASADAS podría gestionar una adecuada y económica conservación y protección de la naciente. Lo mismo aplica para las nacientes Santa Margarita 1 y Santa Margarita 2 así como las nacientes Chacón y Arroyo.

Las áreas de protección de las nacientes San Miguel y Ramírez corresponden con un uso de suelo de bosque, por lo que pese a que las ASADAS no son propietarios de los terrenos incluidos dentro del radio arbitrario, las nacientes están protegidas. El resto de las nacientes son afectadas por el cambio de uso del suelo a pastos y cultivos.

Lo anterior indica que la función de los radios arbitrarios, establecidos en la legislación de Costa Rica pretende evitar el cambio de cobertura del suelo de bosques a actividades de producción económica y promover la conservación de la vegetación, sin necesariamente garantizar la conservación del recurso hídrico.

Esta metodología no contempla el modelo hidrogeológico y ni siquiera involucra aspectos geomorfológicos, ya que es un radio uniforme.

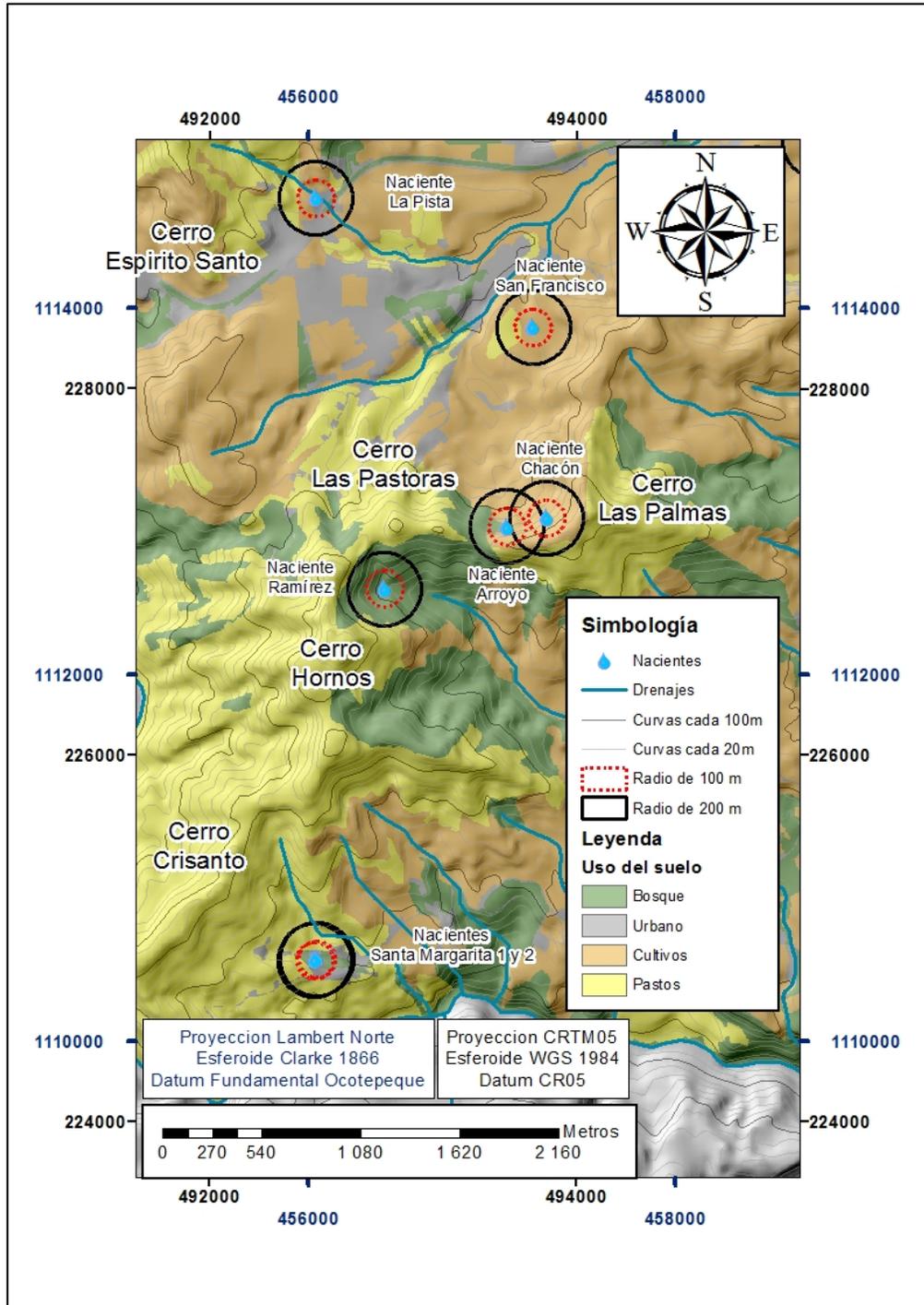


Figura 6.1: Mapa de radios de protección arbitrarios para las nacientes Santa Margarita 1 y 2, Ramírez, Arroyo, Chacón, San Francisco y La Pista con la cobertura del suelo.

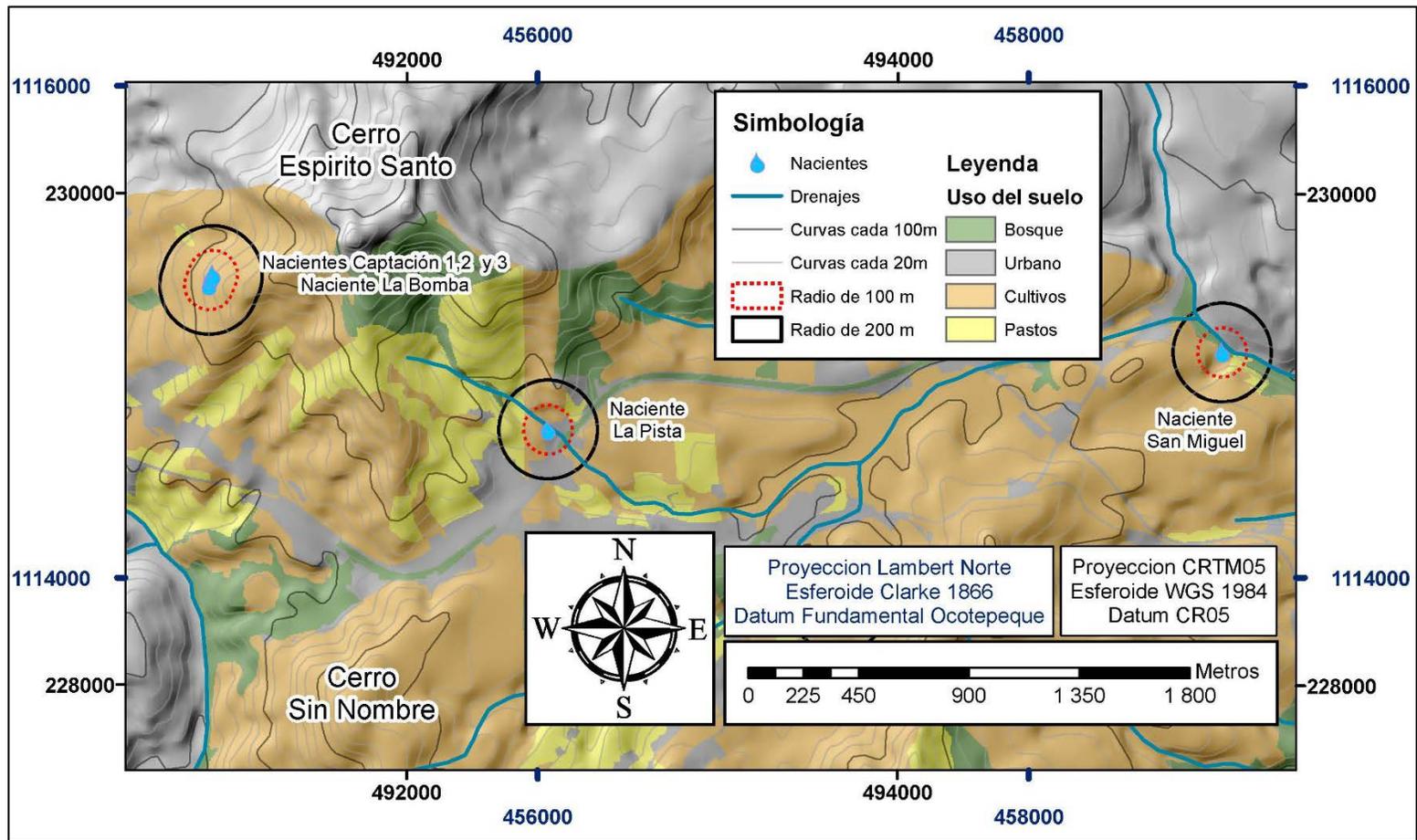


Figura 6.2: Mapa de radios de protección arbitrarios para las nacientes Captación 1, 2 y 3, La Bomba, San Miguel y La

Pista con la cobertura del suelo.

6.2.2 Metodologías de radio fijo calculado y metodologías analíticas

Las metodologías de radio fijo calculado se basan en cálculos con algunos parámetros hidráulicos o geométricos de los acuíferos y no necesariamente consideran el flujo del sistema. Las metodologías analíticas corresponden con la solución de ecuaciones más complejas que se originan a partir de modificaciones y suposiciones de las fórmulas base de los flujos de agua, como la ley de Darcy y la ecuación de la continuidad (USEPA, 1994).

La metodología de tiempo de tránsito de contaminantes es una variante de la ecuación de Darcy. Esta metodología permite calcular la distancia que recorre una contaminante ideal a través de un medio poroso hasta el acuífero, durante un tiempo determinado. La ecuación es la siguiente.

$$d = \frac{t x k x i}{w}$$

Donde:

T: es el tiempo de tránsito[días]. Losilla & Rodríguez (1994) sugieren utilizar 70 días por ser la cantidad de días en que se degradan los coliformes, mientras que Foster *et al.* (2002) sugieren utilizar 500 días como el mayor tiempo de degradación de un contaminante.

k: es conductividad hidráulica [m/día].

w: es la porosidad del medio [%].

d: es el radio o la distancia calculada a la fuente contaminante [m].

i: es el gradiente hidráulico [adimensional].

Las nacientes: Captación 1, Captación 2, Captación 3, La Bomba, La Pista, San Francisco, Chacón, Arroyo, Ramírez, Santa Margarita 1 y Santa Margarita 2 pertenecen al acuífero asociado al Grupo Aguacate. De la descripción de campo y la interpretación de los pozos, se infiere que todas las nacientes anteriores, excepto la naciente San Miguel, cuentan con un caudal aportado por las lavas del Grupo Aguacate.

El caudal de la naciente San Miguel está asociada a tobas de la Formación Tiribí.

Ya que los flujos de las nacientes son aportes del acuífero asociado al Grupo Aguacate. Por esta razón el análisis de las zonas de protección de las nacientes debe incluir parámetros hidráulicos de este acuífero. Utilizar los parámetros obtenidos del suelo a partir de los ensayos de campo no refleja las condiciones del acuífero.

En el área de estudio, solo en el expediente de pozo NA-935, se presenta un parámetro hidráulico. Muestra una transmisibilidad de 122 m² / d. Debido a que un dato no es representativo se debe recurrir a métodos indirecto para calcular los parámetros hidráulicos. Galofré (En Custodio y Llamas, 1983) indica la siguiente ecuación para calcular la transmisibilidad.

$$T = \frac{100 \times Q}{ND - NE}$$

Donde:

T: es transmisibilidad [m²/ d].

Q: es caudal [l / s].

ND: es el nivel dinámico de un pozo [m].

NE: es el nivel estático de un pozo [m].

Estos datos se pueden recolectar de los expedientes de pozos. Por otro lado, la Ley de Darcy también permite obtener la siguiente ecuación.

$$k = \frac{T}{b}$$

Donde:

k: es la permeabilidad de la capa acuífera [m/ d].

T: es transmisibilidad del acuífero [m²/ d].

b: es el espesor del medio acuífero [m].

El espesor del acuífero se puede aproximar de las descripciones litológicas de los pozos. De esta manera se puede calcular la permeabilidad requerida en la ecuación de tiempos de tránsito.

La porosidad de rocas ígneas fracturadas según Sanders (1998) varía entre 1 y 10%. Como valor intermedio se utilizará 5%.

El gradiente hidráulico (i) se calcula con la siguiente ecuación, y los datos se pueden obtener a partir del mapa de equipotenciales de las nacientes del Grupo Aguacate.

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Donde:

i = es el gradiente hidráulico [adimensional].

Δh = es la diferencia de carga hidráulica entre dos líneas equipotenciales [m].

L = es la distancia entre dos líneas equipotenciales [m].

La aplicación de esta metodología contempla varias incertidumbres. Estas se detallan a continuación.

1. El parámetro de la transmisibilidad es indirecto ya que se obtiene a partir de una ecuación. Los datos de entrada para desarrollar esta ecuación son obtenidos de los expedientes de pozos. Estos datos no son revisados ni actualizados por el SENARA.
2. El espesor del acuífero es interpretado por el investigador a partir de las descripciones litológicas de los pozos. En algunas ocasiones se trata de un valor mínimo, ya que el espesor del acuífero puede continuar más allá de lo que se refleja en las columnas litológicas, por lo que es un valor aproximado.
3. El dato de porosidad fue aproximado a partir de Sanders (1998).

Por lo anterior, este método se vuelve teórico y es necesaria una validación con datos de campo verdaderos.

Para la naciente San Miguel, la prueba de infiltración de doble anillo se realizó en una capa de toba de la Formación Tiribí, por lo que el resultado del coeficiente de infiltración, 1,2768

m / d , es un valor que se puede utilizar como permeabilidad para la metodología del tiempo de tránsito.

Los datos de los parámetros hidráulicos se contemplan en el Cuadro 6.1. En la Figura 6.3 se muestra la ubicación de los pozos que contaban con la información para calcular la conductividad hidráulica.

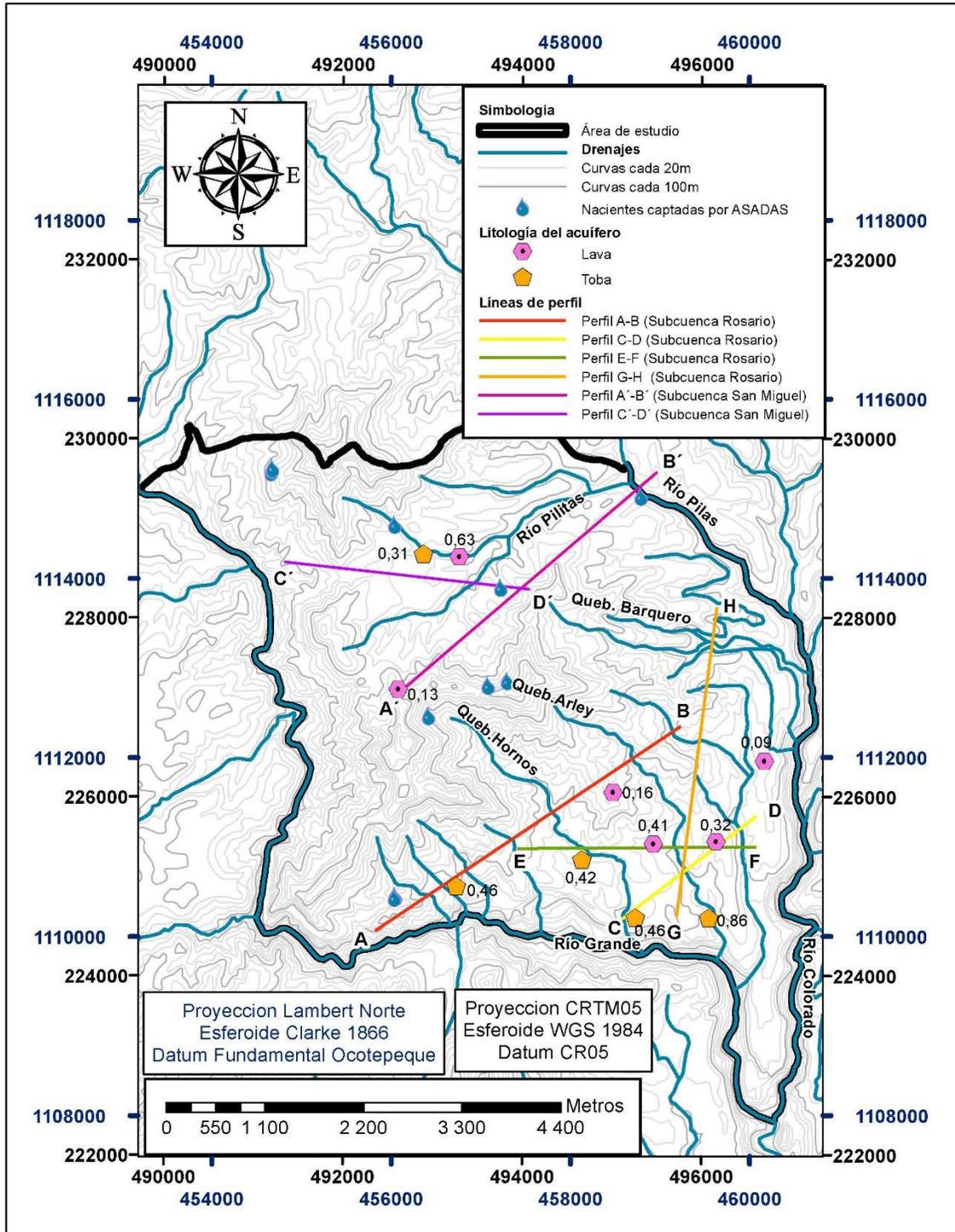


Figura 6.3: Mapa de la distribución de los pozos que permiten obtener datos de conductividad hidráulica.

Es importante señalar que los valores de conductividad hidráulica se muestran muy dispersos, lo que no permite aproximar una relación entre datos. Además la cantidad de datos no son estadísticamente representativos ya que son menos de 13 para cada litología, lo que representa una limitante para aplicar métodos estadístico.

No obstante, al ser los únicos datos disponibles se procedió a calcular un promedio en función de la litología. La conductividad hidráulica de las tobas varía entre 0,31 y 0,86 m / d, siendo el promedio 0,50 m / d. Mientras que la conductividad hidráulica de las lavas varían entre 0,10 y 0,63, siendo 0,29 m / d el promedio de la permeabilidad.

Cuadro 6.1: Parámetros hidráulicos del acuífero asociado al Grupo Aguacate. Valores de nivel estático (NE), nivel dinámico (ND), caudal (Q), transmisibilidad (T), espesor (b) y conductividad hidráulica (k) y litología de la capa acuífera.

Pozos	NE (m)	ND (m)	S (m)	Q(l/s)	T (m ² /d)	b (m)	k (m/d)	Litología del acuífero
NA-178	16,00	45,00	29,00	2,00	6,90	15,00	0,46	Toba
NA-234	7,10	14,37	7,27	0,50	6,88	42,00	0,16	Lava
NA-429	37,00	58,00	21,00	1,50	7,14	23,00	0,31	Toba
NA-434	24,00	65,00	41,00	2,40	5,85	14,00	0,42	Toba
NA-516	90,00	115,00	25,00	3,60	14,40	31,00	0,46	Toba
NA-562	8,00	21,00	13,00	3,00	23,08	56,00	0,41	Lava
NA-567	55,00	115,00	60,00	2,00	3,33	25,00	0,13	Lava
NA-809	23,00	98,00	75,00	0,50	0,67	7,00	0,10	Lava
NA-826	18,00	25,00	7,00	3,00	42,86	50,00	0,86	Toba
NA-922	41,00	87,00	46,00	4,00	8,70	27,00	0,32	Lava
NA-935	43,00	51,80	8,80	1,00	11,36	18,00	0,63	Lava

En el Cuadro 6.2 se muestran los parámetros requeridos para desarrollar la metodología de los tiempos de tránsito así como los resultados para cada nacimiento. El gradiente hidráulico se obtuvo a partir de los mapas de equipotenciales de las nacientes asociadas al Grupo Aguacate y a la Formación Tiribí (Figura 6.4).

Para el caso de las nacientes Captación 1, Captación 2, Captación 3, La Bomba y La Pista (ver Figura 6.5) el radio a partir del tiempo de tránsito de 70 días es más pequeño que el radio arbitrario de 100 m, no obstante el radio de 500 días es mayor al radio arbitrario de 200 m.

Para las nacientes Captación 1, 2, 3 y La Bomba el radio calculado casi alcanza la divisoria de aguas del cerro Espíritu Santo, mientras que para la naciente La Pista el radio alcanza el pie del cerro.

Los radios de protección con la metodología del tiempo de tránsito para las nacientes Ramírez, Arroyo y Chacón se muestran en la Figura 6.6. Los radios de 70 días son menores que los radios de 100 m, en el caso particular del radio de 500 días para la naciente Ramírez, es cercano al radio de 100 días. Pero el radio de 500 días para las nacientes Chacón y Arroyo supera significativamente el radio de 200 m.

Cuadro 6.2: Datos de entrada y salida de la aplicación de la metodología de tiempos de tránsito.

Naciente	I	k (m/día)	W	t (días)		d (m)	
						70 días	500 días
Santa Margarita 2	0,2830	0,2900	0,0500	70	500	114,9002	820,7160
Santa Margarita 1	0,2830	0,2900	0,0500	70	500	114,9002	820,7160
San Miguel	0,0249	1,2768	0,5230	70	500	4,2510	30,3644
Ramírez	0,0402	0,2900	0,0500	70	500	16,3249	116,6064
Arroyo	0,1577	0,2900	0,0500	70	500	64,0126	457,2330
Chacón	0,0887	0,5000	0,0500	70	500	62,0567	443,2624
San Francisco	0,0362	0,2900	0,0500	70	500	14,7048	105,0344
La Pista	0,1224	0,2900	0,0500	70	500	49,6879	354,9137
Captación 1	0,1535	0,2900	0,0500	70	500	62,3273	445,1950
Captación 2	0,1535	0,2900	0,0500	70	500	62,3273	445,1950
Captación 3	0,1535	0,2900	0,0500	70	500	62,3273	445,1950
La Bomba	0,1985	0,2900	0,0500	70	500	80,5715	575,5110

Para el caso de las nacientes Santa Margarita 1 y Santa Margarita 2 (Figura 6.7) el radio de tránsito de 70 días es similar al radio de 100 m, no obstante el radio de tránsito de 500 días supera significativamente al radio de 200 m, alcanzando la divisoria del cerro Crisanto.

En la naciente San Francisco (Figura 6.8) el radio de tránsito de contaminantes de 70 días es de 14,7 m, mientras que el radio de tránsito de contaminantes de 500 días es muy similar

al radio de tránsito de los 100 días. Esto significa que para la nacientes San Francisco el radio arbitrario de 200 m sobredimensiona el radio de protección de la naciente.

Mientras que en la naciente San Miguel los radios de tránsito de contaminantes de 70 y 500 días, reflejan valores de 4,2 y 30,36 m respectivamente. Estos datos son significativamente menores a los radios arbitrarios.

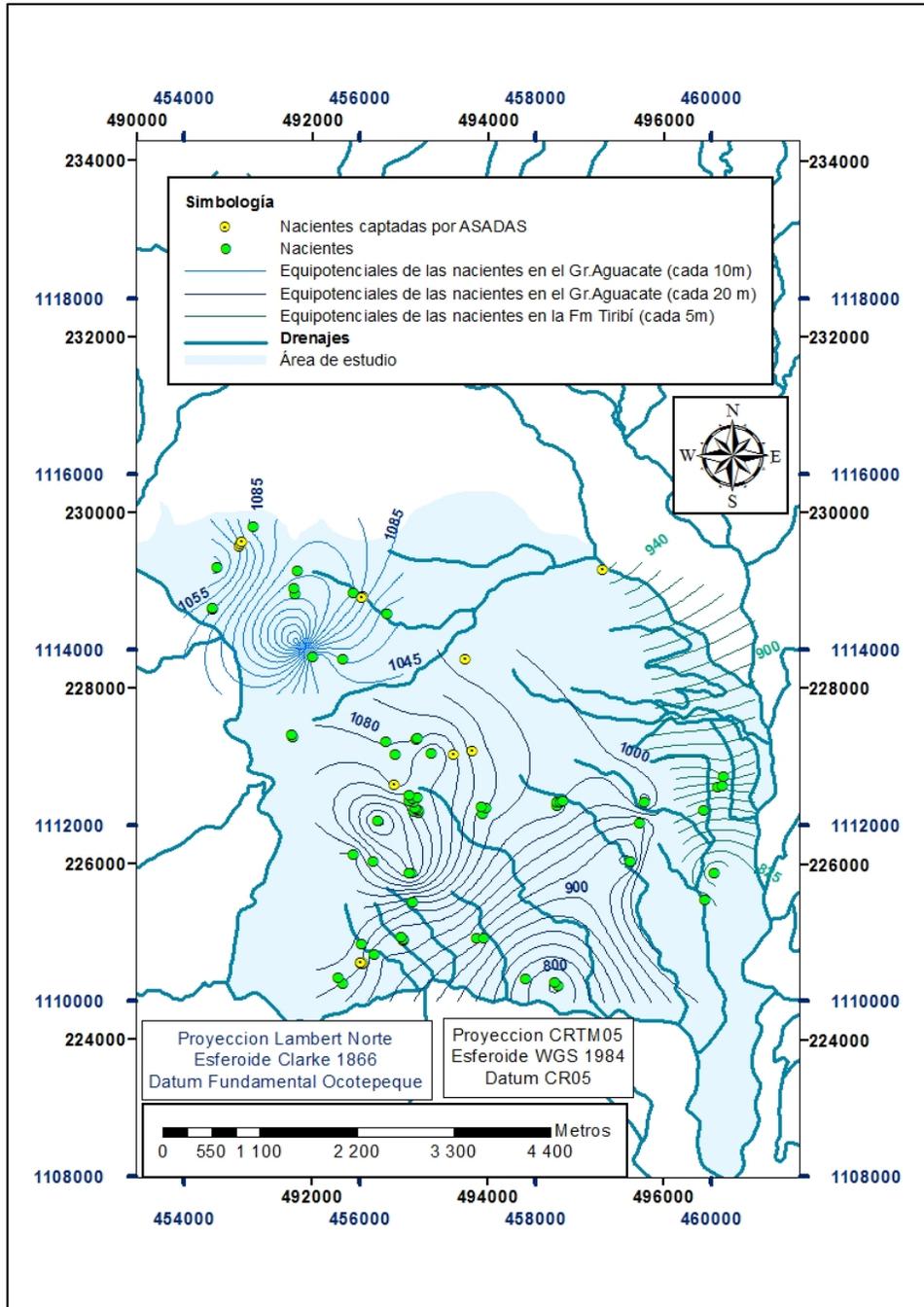


Figura 6.4: Mapa de las equipotenciales de las nacientes asociadas al Grupo Aguacate y la Formación Tiribí.

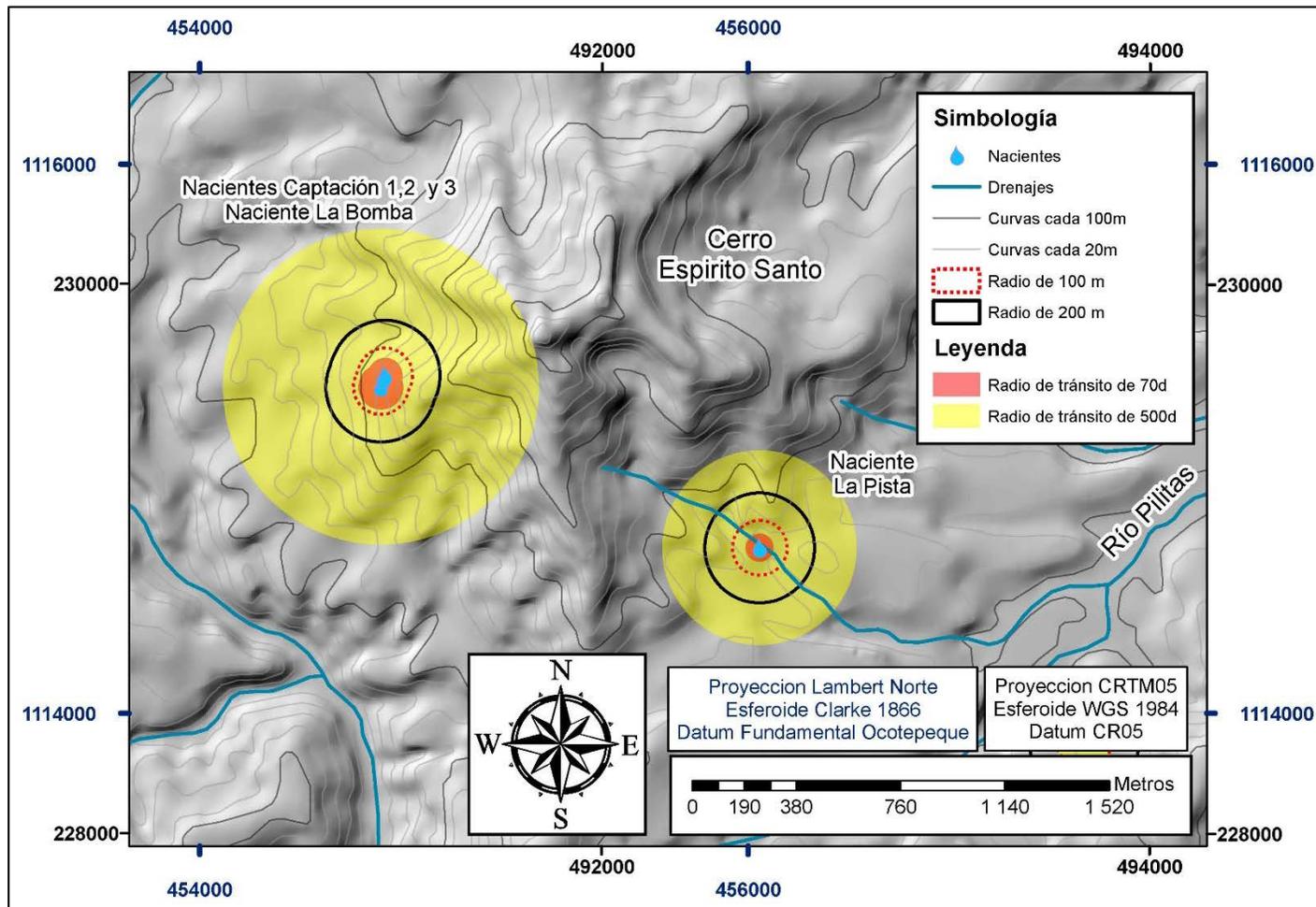


Figura 6.5: Mapa de perímetros de protección a partir del tiempo de tránsito para las nacientes Captación 1, 2 y 3, La Bomba y La Pista en el área de estudio.

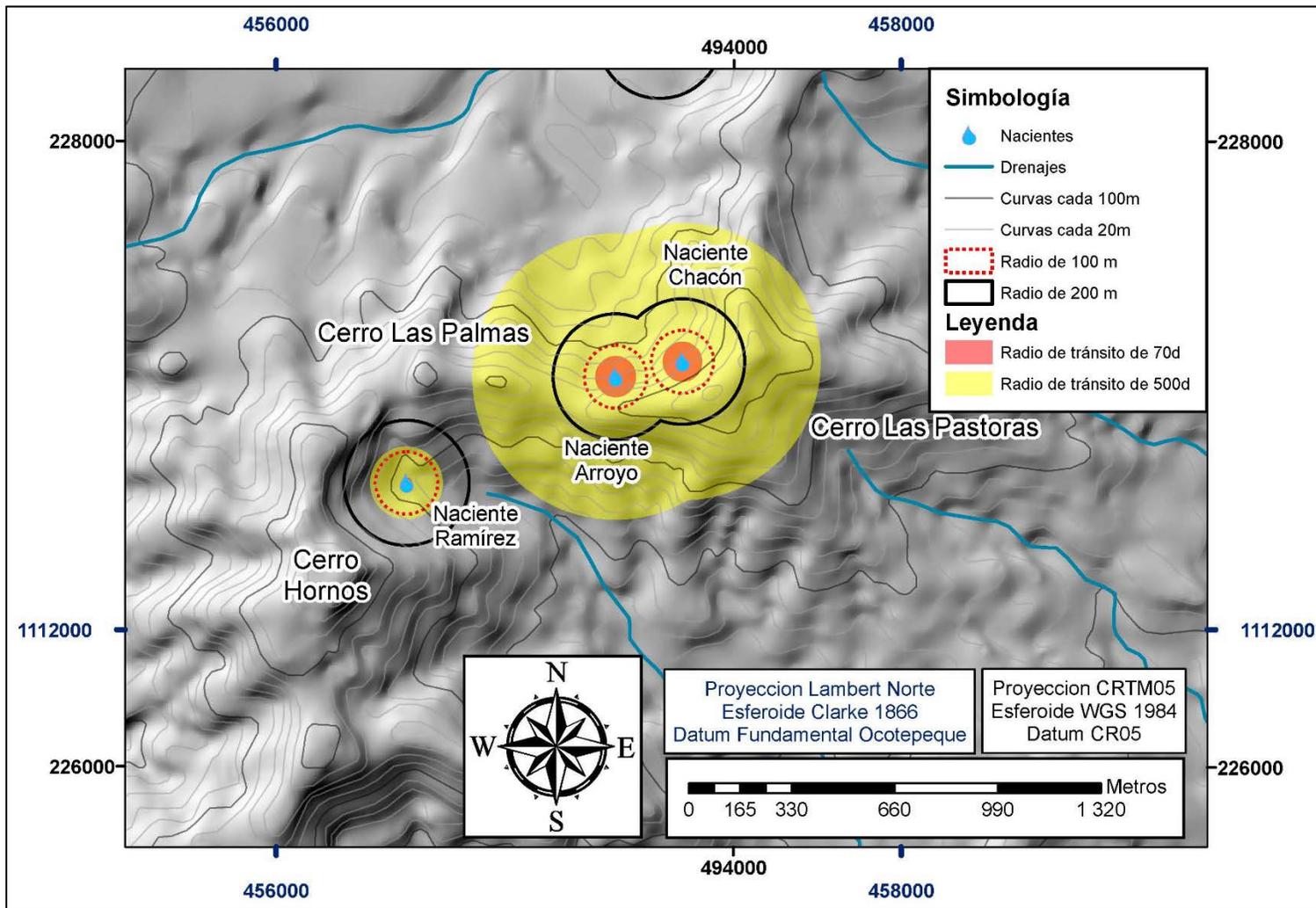


Figura 6.6: Mapa de perímetros de protección a partir del tiempo de tránsito para las nacientes Ramírez, Arroyo y Chacón en el área de estudio.

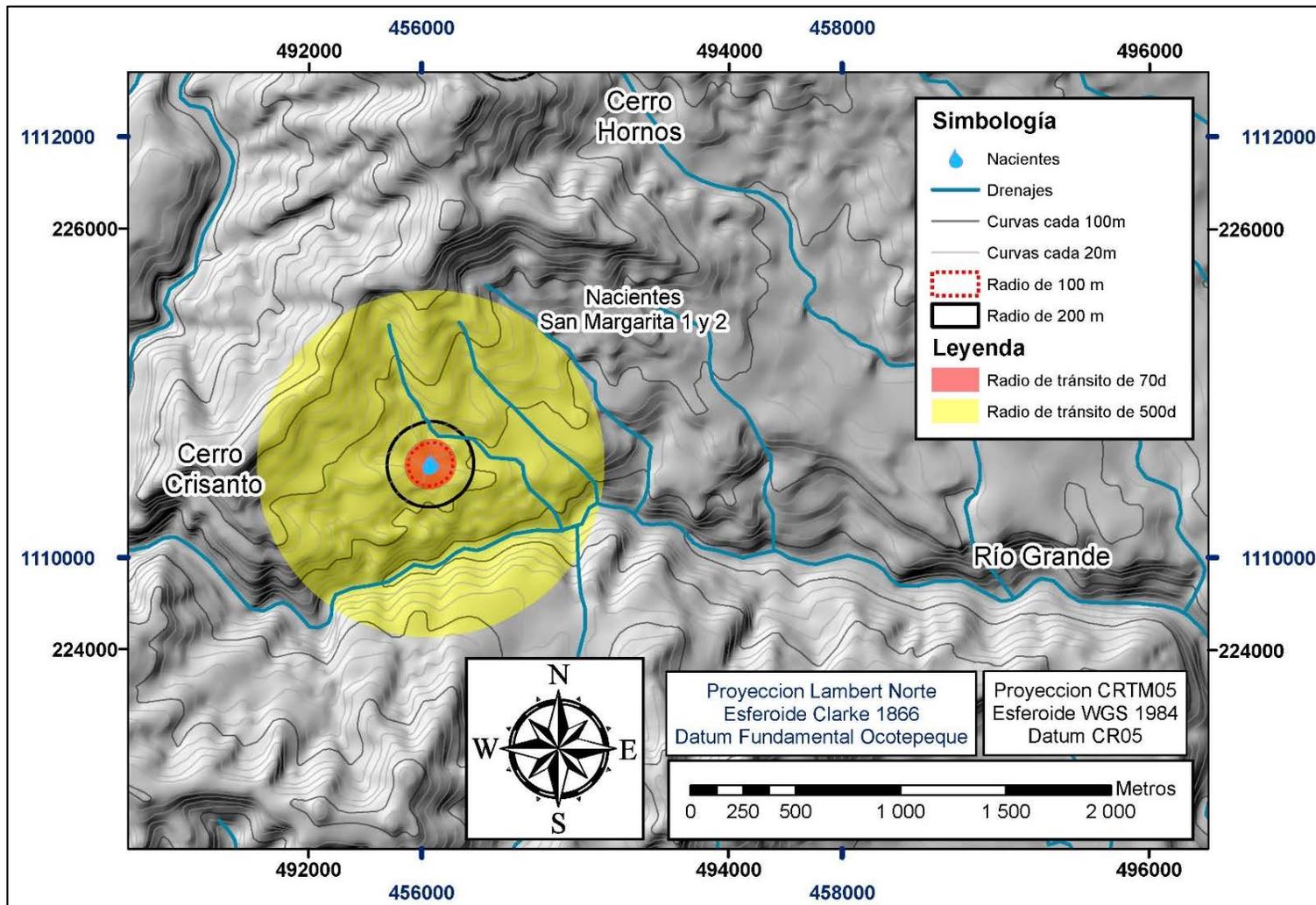


Figura 6.7: Mapa de perímetros de protección a partir del tiempo de tránsito para las nacientes Santa Margarita 1 y Santa Margarita 2 en el área de estudio.

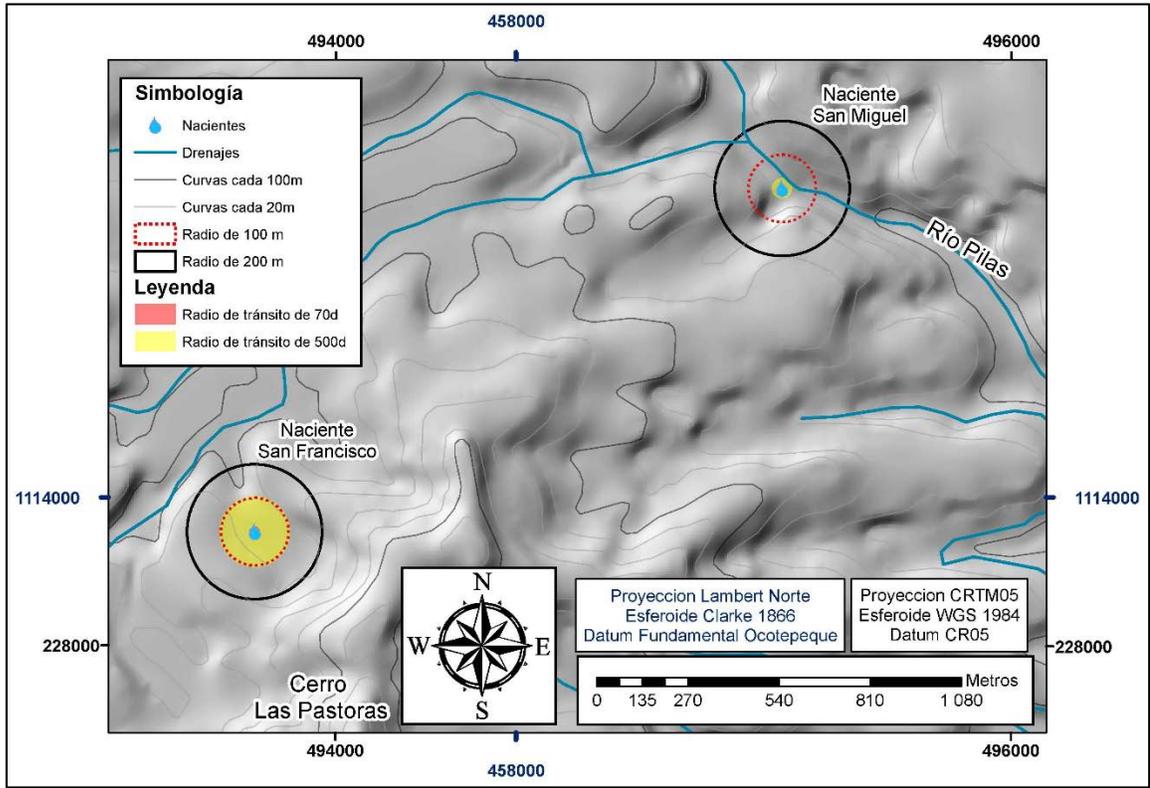


Figura 6.8: Mapa de perímetros de protección a partir del tiempo de tránsito para las nacientes San Francisco y San Miguel en el área de estudio.

6.2.3 Metodología de mapeo hidrogeológico

La zona de recarga de una naciente se puede determinar por condiciones hidrogeológicas, y se define por el área geográfica donde se infiltra el agua que se dirige hacia el punto de descarga en la naciente (Vargas, 2002). Losilla (2002; En Vargas, 2002) propone un área de protección delimitada con base en las divisorias de la cuenca hidrográfica donde se ubica la naciente, el trazo coincide con la curva de elevación topográfica más baja de la naciente a ambos lados del mismo y se continua hasta cruzar con un río influente, luego el trazo se sigue por las divisorias de las subcuencas hasta unirse en la parte superior de la cuenca. Esta metodología supone que la cuenca hidrográfica y la cuenca hidrogeológica coinciden y aplica para nacientes de acuíferos someros.

USEPA (1994) indica que estas metodologías involucran la identificación de las zonas de contribución de aguas subterráneas, basándose en los límites de las líneas de flujo y en las características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas e hidroquímicas del acuífero.

La evaluación de las condiciones hidrogeológicas se puede desarrollar mediante la creación, descripción y sobreposición de mapas temáticos generados por la implementación de sensores remotos y técnicas de Sistemas de Información Geográfica. Punithavathi *et al* (2011) indican que para esto son indispensables los mapas de geología, tipo de suelo, uso del suelo, geomorfología y el mapa topográfico a partir del cual se pueden generar los mapas de drenajes y lineamientos.

Para el caso del área de estudio se cuentan con una serie de mapas temáticos que incluyen entre otros, geología, geomorfología, patrón y orden de drenaje, modelos de sombras y niveles piezométricos. Estos mapas se sobrepusieron para delimitar la Figura 6.9.

Para implementar esta metodología, se trazó el límite hidrogeomorfológico descrito por Vargas (2002), para cada nacimiento seleccionada, porque este modelo contempla el patrón de drenaje y la morfología local (modelo de sombras), y además se complementa con la geología asociada a la unidad acuífera.

Posteriormente se involucran las equipotenciales y las líneas de flujo. Al comparar las direcciones del flujo subterráneo contra el flujo superficial, se observa que estas no coinciden siempre en los alrededores de las nacientes.

El flujo subterráneo tiene un patrón radial dominado por los cerros Espíritu Santo, Hornos y Las Pastoras (relictos de conos volcánicos) y las fallas, posiblemente asociado a las actividades caldéricas en la región. Este patrón permite inferir una zona potencial de recarga de las aguas subterráneas en los alrededores de los cerros. Esta observación permite deducir que en el área de estudio, las cuencas hidrográficas no coinciden con la cuenca hidrogeológica.

En las nacientes Chacón y Arroyo la cuenca hidrográfica no coincide con la orientación del flujo subterráneo. Las cuencas hidrográficas tienen una orientación Sur – Norte, mientras

que el flujo de agua subterránea se dirige de Oeste a Este, siguiendo la alineación de los cerros Las Palmas y Pastoras. Por lo que el perímetro de protección de estas nacientes corresponde con la divisoria de dichos cerros.

La cuenca hidrográfica de la naciente Ramírez tampoco coincide con el flujo subterráneo de agua. La cuenca tiene una dirección Oeste – sureste y el flujo una dirección suroeste – noreste.

Para las nacientes Santa Margarita 1 y Santa Margarita 2, la cuenca hidrográfica y el flujo subterráneo de agua coinciden en la dirección. Pero el detalle de las líneas de flujo sugiere que está influenciado por el alineamiento situado en el cerro Crisanto.

La naciente La Pista cuenta con una cuenca hidrográfica que coincide con el flujo subterráneo de agua. No obstante la zona de protección propuesta no se extiende hasta la divisoria puesto que hay alineamientos que permiten afinar este límite.

Para las nacientes Captación 1, Captación 2, Captación 3 y La Bomba, la cuenca hidrográfica (detallada con los lineamientos en el cerro Espirito Santo) coincide muy precisa con el flujo subterráneo de agua.

Para la naciente San Francisco el flujo subterráneo es perpendicular a la dirección de la cuenca hidrográfica.

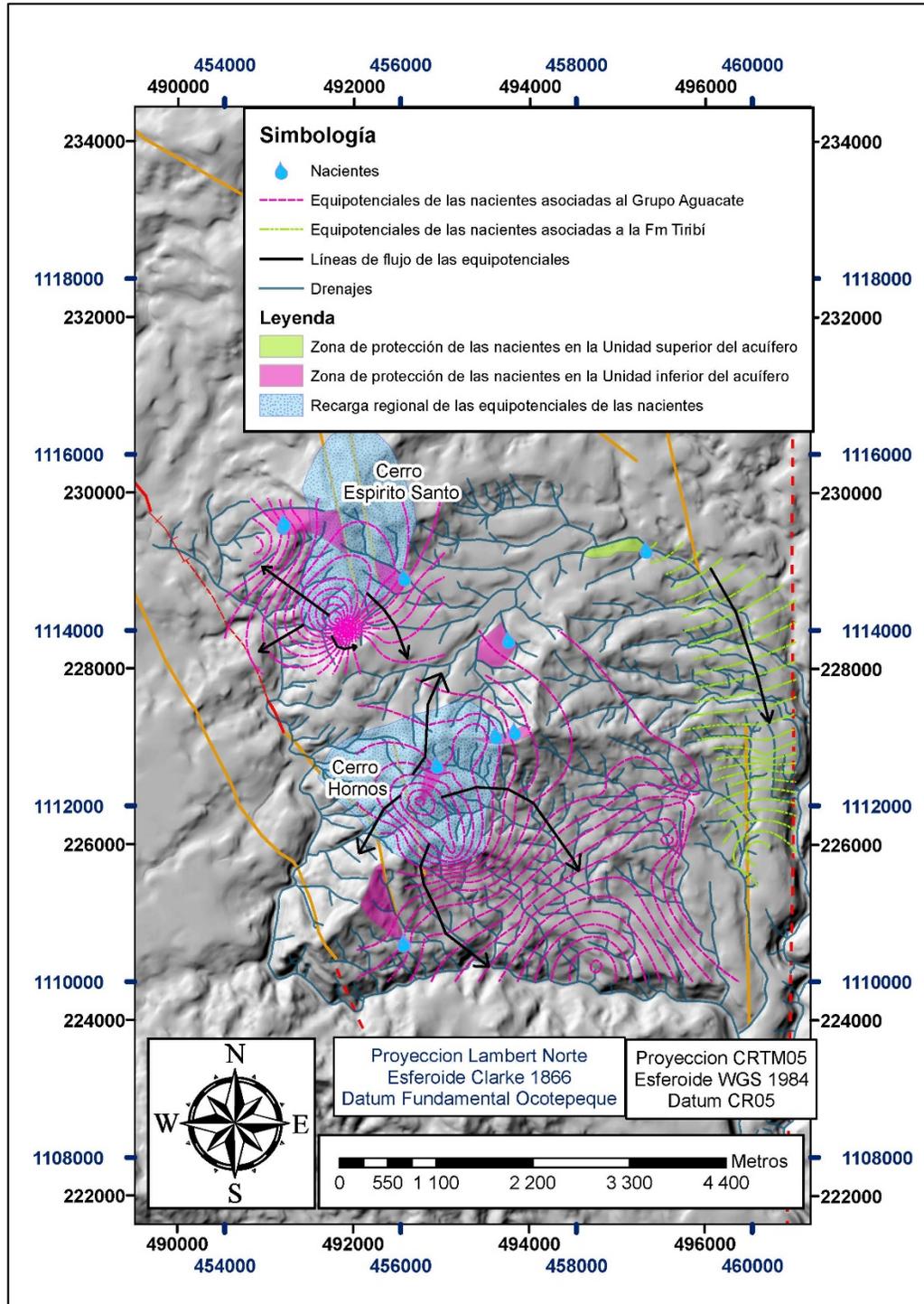


Figura 6.9: Mapeo hidrogeológico para la determinación de zonas de protección para las nacientes captadas por ASADAS en el área de estudio.

6.3 Comparación de las metodologías para la delimitación de zonas de protección de las nacientes.

Un resumen de las metodologías empleadas para la delimitación de zonas de protección de nacientes se muestra en el Cuadro 6.3. Brevemente, la metodología consiste en el trazo de un círculo con un radio fijo, la metodología de tránsito de contaminantes desarrolla una fórmula matemática con parámetros obtenidos directamente del campo, y la metodología del mapeo hidrogeológico consiste en una sobreposición de mapas. Además, la metodología de radio arbitrario fijo es la de menor costo, tiempo y dificultad, mientras que el mapeo hidrogeológico conlleva los mayores, costos, tiempo y dificultad.

En el Cuadro 6.4 se detallan las ventajas y desventajas de cada método y algunas sugerencias para enriquecer la aplicación del método.

La metodología de radio arbitrario es más sencilla de usar, sin embargo carece de fundamentos técnicos. El tiempo de tránsito evalúa la vulnerabilidad a partir de datos extraídos en el campo o mediante ecuaciones, pero durante la selección de los sitios para la recolección de las muestras, puede incidir un error humano como la selección de sitios por facilidad de desplazamiento y no por criterios técnicos. En cuanto al mapeo hidrogeológico su ventaja es que integra gran cantidad de información, pero esto puede recargar el mapa final y dificultar su comprensión.

El Cuadro 6.5 contiene la comparación entre cada uno de los métodos y el modelo hidrogeológico, la geología y la geomorfología. Teniendo el método de radio fijo arbitrario una relación nula, mientras que el mapeo hidrogeológico es el método más enriquecido en estos aspectos.

Cuadro 6.3: Cuadro comparativo sobre la información general de las metodologías para delimitar zonas de protección de nacientes empleadas.

Metodología	Radio fijo arbitrario (100 – 200m)	Radio fijo calculado (tiempo de tránsito)	Mapeo hidrogeológico
Datos de entrada	Ubicación geográfica (coordenadas Este y Norte). Dimensión convencional (Ejemplo: 100 y 200m).	Ubicación geográfica (coordenadas Este y Norte). Parámetros: tiempo de tránsito (Ejemplo. 70, 100 o 500 días), conductividad hidraulica, gradiente hidraulico y porosidad del medio.	Ubicación geográfica (coordenadas Este y Norte). Modelo hidrogeológico. Mapas temáticos (límites hidrogeomorfológicos, geología, patrón de drenaje, nivel piezométrico, recarga acuífera, morfología del terreno).
Datos de salida	Zona de protección circular.	Una longitud máxima para un polígono, que usualmente se interpreta como un diámetro.	Un mapa.
Consideraciones	Asume que la recarga de la naciente es importante solo dentro de la circunferencia. Asume que coberturas de suelo diferentes a la vegetación natural no son apropiadas y que únicamente las coberturas boscosas garantizan la calidad y cantidad del agua.	Asume que sólo estas variables impactan en la protección de las nacientes. Asume un medio poroso y que los datos de campo son uniformes Así como un intervalo de tiempo de tránsito entre 70 y 500 días	La exactitud del resultado depende de la incertidumbre y error de cada mapa temático. Hay una única georeferenciación en todos los mapas temáticos. La información proporcionada por los mapas coincide
Limitantes	No contemplan las afectaciones que puedan provocar las fuentes de contaminación en las afueras del perímetro circular. Omite rasgos geológicos, geomorfológicos y estructurales asociados a las nacientes. Excluye el concepto de cuenca hidrográfica y cuenca hidrogeológica.	No aplica para medios fracturados ni medios kársticos. Evalúa solo el tránsito de contaminantes y no otros componentes como zonas de recarga. Cuando se trata de acuíferos colgados, estudia solo los parámetros superficiales y no toma en cuenta unidades hidrogeológicas subterráneas.	El detalle y alcance de la metodología depende de la cantidad y calidad de la información presente en los mapas temáticos. Entre más información esté disponible más similitud con la realidad tendrá el resultado. Una mala interpretación de datos durante la generación de los mapas temático puede guiar a un mapeo hidrogeológico erróneo.

Continuación del
Cuadro 6.3.

Metodología	Radio fijo arbitrario (100 – 200m)	Radio fijo calculado (tiempo de tránsito)	Mapeo hidrogeológico
<p>Tiempo / Costos / Dificultad</p>	<p>Poco tiempo después de obtener las coordenadas de las nacientes.</p> <p>Requiere los gastos de alimentación y transporte durante la gira de campo para obtener las coordenadas de la naciente.</p> <p>La dificultad se limita al acceso físico a la naciente y a la práctica en mediciones con herramientas como un compás o bien un <i>software</i> de dibujo para trazar la circunferencia.</p>	<p>Requiere al menos un mes de tiempo, ya que involucra una visita al campo para obtener las coordenadas y realizar los ensayos de campo, el análisis de las muestras en los laboratorios (varía entre 15 y 22 días), y el tiempo para desarrollar los cálculos de las ecuaciones.</p> <p>En cuanto a los costos, son los gastos de la gira de campo y la facturación de los laboratorios.</p> <p>La dificultad es moderada, requiere conocimiento técnico y profesional para desarrollar los muestreos de campo y los cálculos matemáticos.</p>	<p>Conlleva meses de recolección, interpretación y generación de información en mapas <i>ráster</i>.</p> <p>Costos altos, ya que requiere de ensayos de campo y laboratorio, compra de equipo e información y la adquisición de <i>software</i>.</p> <p>La dificultad es alta, ya que implica procesos de sistematización de información, análisis e interpretación profesional en el área de geología.</p>

Cuadro 6.4: Cuadro comparativo sobre las ventajas y desventajas de las metodologías para delimitar zonas de protección de nacientes y algunas sugerencias para mejorar los métodos.

Metodología	Radio fijo arbitrario (100 – 200m)	Radio fijo calculado (tiempo de tránsito)	Mapeo hidrogeológico
Ventajas	<p>No requiere información, salvo coordenadas.</p> <p>No contempla criterios profesionales, por lo que es accesible para que cualquier persona la emplee.</p> <p>Promueve la conservación de la vegetación boscosa.</p> <p>Facilita la protección de las instalaciones de la captación.</p> <p>Sirve para declarar servidumbres o derechos de paso.</p>	<p>Utiliza datos que reflejan las condiciones del terreno.</p> <p>Proporciona dimensiones para la protección de nacientes, en función del tránsito de contaminantes.</p> <p>Permite evaluar la vulnerabilidad de la naciente a la contaminación.</p> <p>En algunos casos sugiere disminuir los radios de protección de 100 o 200 m establecidos en la legislación.</p>	<p>Integra diversa información disponible.</p> <p>El estudio incluye información local y regional, por lo que no solo sirve para delimitar polígonos alrededor de la naciente.</p> <p>Incluye las zonas de recarga acuífera.</p> <p>Contempla la información del flujo subterráneo, lo que permite incorporar los conceptos de cuenca hidrográfica e hidrogeológica.</p> <p>Modela las condiciones hidrogeológicas predominantes en la naciente y en la región.</p>
Desventajas	<p>Ausencia de conceptos técnicos.</p> <p>No siempre permite garantizar la calidad y cantidad del recurso.</p>	<p>El manejo y la interpretación de los datos, como en la determinación de los espesores del acuífero puede variar de un profesional a otro.</p> <p>Evalúa solo la protección contra un contaminante ideal, o sea el agua.</p>	<p>Contiene tanta información que puede ser difícil de visualizar en un mapa y complicado de entender para los usuarios.</p>

Continuación del Cuadro 6.4.

Metodología	Radio fijo arbitrario (100 – 200m)	Radio fijo calculado (tiempo de tránsito)	Mapeo hidrogeológico
Sugerencias	<p>Esta información es preliminar de cualquier estudio técnico profesional.</p> <p>El área delimitada se podría mejorar estableciendo límites de microcuencas y detallando en la descripción del suelo y la geología dentro del perímetro.</p>	<p>Detallar y describir todas las variaciones del suelo en superficie, en las cercanías de la naciente. Como por ejemplo, cambios de textura, presencia de fracturas, coloraciones, entre otros.</p> <p>Realizar un muestreo representativo (en el acuífero de la naciente) de los valores reales de la conductividad hidráulica en las rocas.</p> <p>Identificar fuentes de contaminación y tipos de contaminantes detalladamente aguas arriba de la naciente.</p> <p>Acompañar con un monitoreo de la calidad del agua.</p> <p>Detallar el perfil del suelo en la naciente y en los alrededores.</p>	<p>Esta información se complementa y mejorr con otros estudios más precisos, como por ejemplo métodos geofísicos y geoquímicos, perforaciones, controles litológicos y parámetros hidráulicos, entre otros. Esto para delimitar mejor el acuífero, la dirección del flujo y, la presencia de fallas y otras estructuras que favorecen la conductividad.</p>

Cuadro 6.5: Cuadro comparativo entre las metodologías utilizadas para la delimitación de zonas de protección de nacientes según su relación con el modelo hidrogeológico y el rol de la geología y geomorfología.

Metodología	Radio fijo arbitrario (100 – 200m)	Radio fijo calculado (tiempo de tránsito)	Mapeo hidrogeológico
Rol de la geomorfología	Ninguno	No es indispensable, aunque en algunas ocasiones suele mejorarse los polígonos en función de la delimitación de cuencas.	La correlación del terreno con los niveles estáticos reportados en los pozos permite visualizar correctamente el nivel piezométrico. Además, la delimitación de las cuencas hidrogeomorfológicas de cada nacimiento es indispensable.
Rol de la geología	Ninguno.	Es relevante para la descripción de la capa de suelo o roca donde se encuentra la nacimiento.	Contempla las unidades hidrogeológicas.
Comparación con el modelo hidrogeológico conceptual	Ninguno.	Contempla tanto las capas superficiales observadas en el campo como la dirección del flujo subterráneo.	Incluye todos los mapas temáticos utilizados para desarrollar el modelo hidrogeológico.

7 Conclusiones

Geológicamente e hidrogeológicamente, el Grupo Aguacate y la Formación Tiribí son las litologías relevantes para la delimitación de las unidades acuíferas en la zona de estudio. El Grupo Aguacate consiste de intercalaciones de basaltos, andesitas basálticas y tobas, mientras que la Formación Tiribí incluye litologías de tobas e ignimbritas.

Geomorfológicamente, se definieron cinco unidades producto de una actividad volcánica tipo caldérica. Este ambiente facilitó el fuerte encajamiento a profundidad de la red de drenajes en las zonas de fallas y fracturas, para posteriormente originar el cañón del Río Grande. Este cañón fluvial es caracterizado por sus cauces alineados en dirección Norte – Sur y Este – Oeste.

Dentro de este contexto geológico y geomorfológico, se localizan 52 pozos y 77 nacientes. De estas nacientes 12 son captadas por las ASADAS El Rosario, San Miguel Este, San Miguel Oeste y Concepción, dichas nacientes se denominan de la siguiente manera: Santa Margarita 1, Santa Margarita 2, San Miguel, La Pista, Arroyo, Chacón, Ramírez, San Francisco, Captación 1, Captación 2, Captación 3 y La Bomba.

Respecto a la hidrología e hidrogeología, se identificaron tres subcuencas hidrográficas, la subcuenca Rosario, subcuenca San Miguel y un sector Este de la subcuenca Río Grande. La Subcuenca San Miguel se caracteriza por equipotenciales del agua subterránea entre 930 y 1.040 m.b.n.s., con una dirección desde el cerro Hornos, sur – noreste y noroeste. La subcuenca Rosario presenta equipotenciales con las líneas de flujo tienen una dirección noreste a suroeste, desde la divisoría de aguas del cerro Hornos y cerro Las Palmas. Mientras que en la subcuenca Río Grande las líneas de flujo se dirigen de Este a Oeste hacia el Río Grande.

Hidrogeológicamente a nivel regional, los perfiles muestran espesores variados de capas de lavas basálticas, tobas, brechas y arcillas asociadas al Grupo Aguacate e ignimbritas y tobas referidas a la Formación Tiribí. Esto permitió establecer un modelo hidrogeológico conceptual con dos unidades acuíferas. La unidad superior consiste de un acuífero

confinado con espesores entre 20 y 4 m, en depósitos de ignimbritas y cenizas grises asociadas a la Formación Tiribí, la extensión de esta unidad limita al Oeste del área y la información hidrogeológica de los pozos registrados no permite detallar suficiente. Por otro lado, la unidad inferior trata de acuíferos confinados en capas de lavas y / o tobas fracturadas, con espesores muy variables entre 5 y 37 m, asociado al Grupo Aguacate.

Se concluye que la ubicación de las nacientes estudiadas con respecto a la unidad geomorfológica de conos volcánicos permite inferir que estas son generadas por contactos litológicos, fracturas y cambios en las pendientes. La naciente San Miguel está asociada a la Formación Tiribí, mientras que las restantes al Grupo Aguacate.

El cálculo del balance hídrico permitió detallar la recarga potencial total del acuífero entre 230,21 y 801,23 mm y varía entre la subcuenca Rosario y San Miguel, siendo mayor al Norte. La recarga del acuífero ocurre entre mayo y noviembre, en los meses diciembre, enero, febrero, marzo y abril no ocurre ninguna del acuífero debido a la disminución de las precipitaciones. La recarga que inicia en mayo, está limitada a los alrededores del cerro Espíritu Santo y un cerro sin nombre ubicado al Sur, hasta homogenizarse a lo largo del área de estudio durante los meses de setiembre y octubre.

Respecto a la protección de nacientes, la metodología de radio arbitrario no contempla ningún soporte técnico que respalde la necesidad de salvaguardar el perímetro, no obstante continúan siendo las áreas establecidas en la legislación nacional. Algunas de las nacientes, como los casos de Santa Margarita 1 y Santa Margarita 2, Captación 1, Captación 2, Captación 3 y La Bomba, así como las nacientes Chacón y Arroyo, comparten áreas en común, por lo que se sugiere a las ASADAS que captan estas nacientes, trabajar en conjunto para comprar estos terrenos y dedicarlos a la protección e investigación del recurso hídrico. Cuando no sea posible comprarlos, las ASADAS junto con los propietarios de los terrenos deben reconocer en el campo el perímetro arbitrario y hacer esfuerzos en conjunto para evitar situaciones de eventos naturales dañinos como inundaciones y deslizamientos, y acciones antropogénicas como la contaminación de la zona no saturada por plaguicidas.

La metodología de radio calculado, presentan varias limitaciones que provocaron que el radio obtenido fuera teórico y no se pudiera validar con datos de campo. Con estos radios de protección las ASADAS deben de ser partícipes en los cambios de uso de suelo y velar porque se realicen inspecciones preventivas para evitar la contaminación del flujo subterráneo de agua. En los casos en los que el radio resultó menor a los radios arbitrarios, no deben ceder áreas ni descuidar las actividades que se desarrollen en los alrededores.

Las áreas de protección señaladas en la metodología con el mapeo hidrogeológico deben ser prioritarias para la intervención por parte de la ASADA. Las ASADAS deben trabajar en conjunto para promover y facilitar la conservación en los cerros que participan en la recarga potencial regional del área de estudio. Por lo que se recomienda diseñar un plan para el muestreo y monitoreo del flujo subterráneo de agua através de piezómetros, así como la validación del valor de campo de la conductividad hidráulica de los acuíferos. Por otro lado, las áreas señaladas alrededor de las nacientes deben tratar de adquirirse y conservarse, de lo contrario, la ASADA debe tener una fuerte influencia política para participar en la regulación del ordenamiento territorial.

Sobre la comparación de las metodologías la metodología que resultó con valoraciones mas completas e integrales es el mapeo hidrogeológico.

Se debe destacar, que pese a que en este proyecto de graduación se colaboró con ASADAS y el SINAC, el desarrollo de investigaciones sobre el recurso hídrico no debe recaer sobre un único ente. Es necesario una articulación de las diferentes instituciones del estado, como el SENARA, la Dirección de Aguas, el AyA, el Ministerio de Salud y el ICE, entre otras, para apoyar con investigadores, invertir en tecnologías y financiar estudios. La Gestión del Recurso Hídrico debe implementarse a nivel país y no solamente realizar actividades aisladas.

Como parte de lo anterior, se sugiere incluir en la tarifa de servicio de agua potable un rubro orientado a realizar investigaciones en las zonas de captura de nacientes y recarga de las

aguas subterráneas. Así como un rubro dirigido a la adquisición de terrenos para protección del recurso hídrico e inversión a futuro.

Finalmente, respecto la metodología de Schosinsky (2006), es necesario desarrollar investigaciones dirigidas a discutir y mejorar el método. Desde el presente proyecto, está fuera del alcance aportar en dicha discusión, no obstante es evidente la necesidad de depurar los límites o valores de los coeficientes así como normar los métodos para recolectar datos de campo como la evapotranspiración y la tasa de infiltración.

Por ejemplo, se debe retomar y validar los valores establecidos en los cuadros de Schosinsky (2006), así como evaluar la relación o el impacto, de unificar valores para coeficientes (como por ejemplo K_p , K_v , K_{fc} , C_i , C_o) en la recarga potencial del acuífero.

Para el cálculo de la evapotranspiración es necesario incluir más parámetros climáticos con la finalidad de precisar las condiciones reales de las áreas de estudio. La falta de instrumentación instalada y moderna, en las cuencas hidrográficas, para recolectar información climatológica, es una gran limitante en el desarrollo de investigaciones orientadas a gestionar sosteniblemente el recurso hídrico en el país.

Se debe realizar una discusión, con bases estadísticas y cualitativas, sobre los diferentes métodos disponibles para medir la infiltración del suelo. Es importante detallar, en función del tipo de suelo y otras condiciones hidrogeológicas de la zona no saturada, las limitantes e incertidumbre de cada método, así como establecer los escenarios u objetivos en los que se puede implementar cada uno de ellos.

También se debe argumentar sobre las técnicas utilizadas para definir la cobertura del suelo del área de estudio. Para el presente proyecto el uso de Sistemas de Información Geográfica permitió detallar con precisión la extensión de las coberturas. No obstante es importante estudiar en detalle como se comporta la recarga potencial de los acuíferos en áreas urbanas, como en parques y jardines, ya que a pesar de tener zonas verdes expuestas a la precipitaciones, los factores antropogénicos, como la compactación en canchas deportivas y el aporte de capas de suelos orgánicos en jardines, entre otros, pueden variar y modificar

significativamente, a corta distancia, la recarga. El Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas actualmente se encuentra realizando una investigación al respecto.

En el presente proyecto, también se observó que la recarga potencial en bosques resultó menor que en sectores con cultivos. Esto podría deberse a que la metodología de Schosinky (2006) asume que las zonas boscosas requieren mayor humedad para desarrollarse, pero esta afirmación se debe corroborar para otras áreas de estudio y con otros métodos. De confirmarse, se abriría una puerta a que otros usos de suelo, diferentes a los bosques, puedan utilizarse como medidas de protección de las zonas de recarga de aguas subterráneas.

8 Referencias

- Alvarado, G.E. & Gans, P.B., 2012: Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. – Rev. Geol. de Amér. Central,, 46: 7 – 122.
- Bergoeing, J.P. & Malavassi, V., 1982a: Geomorfología del Valle Central de Costa Rica: explicación de la carta geomorfológica 1: 50 000. – 25 págs. Convenio Universidad de Costa Rica, Depto. De Geografía – Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Instituto Geográfico Nacional.
- Bergoeing, J.P. & Malavassi, V., 1982b: Hoja Naranja. – Escala 1: 50 000. Convenio Universidad de Costa Rica, Depto. De Geografía – Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Instituto Geográfico Nacional.
- Birkel, C., 2007: Delimitación empírica de áreas prioritarias para el manejo del recurso hídrico en Costa Rica. – Rev. Reflexiones, 86 (2): 39-49.
- Bonilla, J., De Lemos, R. & Fallas, N., 1993: Estudio Geológico – Ambiental de la Hoja Topográfica Colorado 3346 III 13, Escala 1: 10 000 Naranja, Alajuela. – 89 págs. Universidad de Costa Rica, San José. [Campaña Geológica].
- Calvo, J., 1999: Principios de hidrología forestal tropical. – 136 págs. Instituto Tecnológico de Cosya Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica.
- Chaves, C. & Áviles, L., 1993: Estudio geológico integral de la hoja topográfica Cirrú 3346 III 8 (escala 1: 10 000) Cantón de Naranja, Provincia de Alajuela, Costa Rica. – 153 págs. Universidad de Costa Rica, San José. [Campaña Geológica].
- Choconi, G., 2009: Análisis preliminar sobre el posible desarrollo de criterios de riesgo considerando a los cuerpos de aguas subterráneas como receptores abióticos. – 28 págs. SAyDS – UERA, Argentina. [Inf. Interno].
- Custodio, E. & Llamas, M., 1983: Hidrología Subterránea. – 1161 págs. Ediciones Omega, Barcelona, España.

- Denyer, P. & Arias, O., 1991: Estratigrafía de la región Central de Costa Rica. – Rev. Geol. de Amér. Central,, 12: 1 – 59.
- Expósito, J.L., Garfias, J.M., Franco, R. & Velásquez, A., 2004: Delimitación de zonas de protección sanitaria: Consideraciones sobre la exactitud de los métodos utilizados en Cuba en el ejemplo del acuífero Margarita. – Minería y Geología, (3-4): 15 – 27.
- Fajardo, H.D., 1994: Geología de una Parte de la Hoja Oratorio (Esc. 1: 10 000), Cantones Naranjo, Palmares y San Ramón, Provincia Alajuela. -45 pags. Universidad de Costa Rica, San José. [Campaña Geológica].
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, 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. Banco Mundial, Washington, D.C.
- Huapaya, S. & Rojas, V. 2012: Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (3346 – III). – Escala 1: 50 000. Dirección de Geología y Minas & Laboratorio de Ingeniería Sísmica.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN) & Proyecto de Planificación Urbana de la Gran Área Metropolitana del Valle Central de Costa Rica (PRUGAM), 2008: Hornos. Hoja 3346 – III – 18. – Escala 1: 10 000. San José, Costa Rica.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN) & Proyecto de Planificación Urbana de la Gran Área Metropolitana del Valle Central de Costa Rica (PRUGAM), 2008: Palmares. Hoja 3346 – III – 17. – Escala 1: 10 000. San José, Costa Rica.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN) & Proyecto de Planificación Urbana de la Gran Área Metropolitana del Valle Central de Costa Rica (PRUGAM), 2008: Oratorio. Hoja 3346 – III – 12. – Escala 1: 10 000. San José, Costa Rica.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN) & Proyecto de Planificación Urbana de la Gran Área Metropolitana del Valle Central de Costa Rica (PRUGAM), 2008: Colorado. Hoja 3346 – III – 13. – Escala 1: 10 000. San José, Costa Rica.

- Instituto Geográfico Nacional (IGN) & Proyecto de Planificación Urbana de la Gran Área Metropolitana del Valle Central de Costa Rica (PRUGAM), 2008: Cirrú. Hoja 3346 – III – 8. – Escala 1: 10 000. San José, Costa Rica.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN) & Proyecto de Planificación Urbana de la Gran Área Metropolitana del Valle Central de Costa Rica (PRUGAM), 2008: Cañuela. Hoja 3346 – III – 7. – Escala 1: 10 000. San José, Costa Rica.
- Jiménez, J., 2010: Ley de Aguas: Anotada y Concordada. – 248 págs. Litografía e Imprenta LIL, San José, Costa Rica.
- Laurito, C., Valerio, A. & Pérez, E., 2005: Los Xenarthras fósiles de la localidad de Buenos Aires de Palmares (Blancario Tardío, Irringtoniano Temprano), Provincia de Alajuela, Costa Rica. – Rev. Geol. Amer. Central, 33: 83 – 90.
- Losilla, M. & Rodríguez, H., 1994: Normas para el cálculo de los tiempos de tránsito entre los drenajes de tanques sépticos y las fuentes de agua subterráneas. – AyA, SaN José. [Informe Interno].
- Macías, J.E. & Zamora, E., 1993: Geología de la topografía Cañuela edición 1 IGNCR escala 1 10 000 Cantón de Naranjo, Provincia de Alajuela. – 98 págs. Universidad de Costa Rica, San José. [Campaña Geológica].
- Madrigal, R. & Rojas, E., 1982: Mapa Geomorfológico de Costa Rica. Hoja San José. - Escala:1:200 000. San José, Costa Rica.
- Madrigal, R. & Salazar, L.G., 1994: Unidades geomorfológicas y su relación directa con la litología. – En: Denyer, P. & Kussmaul, S. (comp.): Atlas Geológico Gran Área Metropolitana. - Editorial Tecnológica de Costa Rica: 111 – 121.
- Patrick, R., 2009: Source water protection in a landscape of 'New Era' deregulation. - Le Géographe canadien, 53 (2): 208–221.
- Pérez, W., 2000: Vulcanología y petroquímica del evento ignimbrítico del Pleistoceno Medio (0,33 M.a.) del Valle central de Costa Rica. – 170 págs. Universidad de Costa Rica, San José. [Tesis Licenciatura].

- Pérez, W., Alvarado, G.E. & Gans, P.B., 2006: The 322 ka Tiribí Tuff: stratigraphy, geochronology and mechanisms of deposition of the largest and most recent ignimbrite in the Valle Central, Costa Rica. – Bull. Volcanology, 69: 25 – 40.
- Porras, H., Cascante, M., Granados, R. & Alvarado, G.E., 2012: Volcano – estratigrafía y tectónica del Valle Central occidental y las estribaciones de los Montes de Aguacate a lo largo de la ruta 27, Costa Rica. – Rev. Geol. de Amér. Central,, 47: 69 – 93.
- Punithavathi, J., Tamilenth, S. & Baskaran, R., 2011: Geologic and geomorphologic investigation of Cauvery River basin in Thanjavur District, Tamil Nadu, India using spatial technology. - Archives of Applied Science Research, 3 (3): 358-366.
- República de Costa Rica. Ley Forestal, No. 7575. – La Gaceta No. 72, martes 16 de abril de 1996, San José, Costa Rica.
- República de Costa Rica. Metodologías Hidrogeológicas para la Evaluación del Recurso Hídrico. – Acuerdo 60–2012, Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, 12 de junio de 2012, San José, Costa Rica.
- Rojas, K.V., 2013: Relación entre los procesos volcano – sedimentarios y el neotectonismo de la cuenca lacustrina de Palmares y San Ramón, Costa Rica. – 159 págs. Universidad de Costa Rica, San José. [Tesis Licenciatura].
- Sanders, L., 1998: A manual of Field Hydrogeology. 381 págs. Editorial Prentice Hall, London, England.
- Schosinsky, G. & Losilla, M., 2000: Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. – Rev. Geol. de Amér. Central, 23:43-55.
- Schosinsky, G., 2006: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. – Rev. Geol. de Amér. Central,, 34-35: 13-30.
- USEPA, 1994: Handbook Ground Water and Wellhead Protection. 288 págs. – EPA/625/R-94/001, Washington, DC.
- Vargas, A., 2002: Manantiales de una parte del valle central de Costa Rica. – Rev. Geol. de Amér. Central, 27: 39-52.

- Vargas, J.E., 1978: Geología de una parte de la hoja "Naranja". - 35 págs. Informe Técnico y Notas Geológicas, N° 58.
- Villegas, A., 2004: La Formación Alto Palomo: Flujos pumíticos de la cordillera volcánica Central, Costa Rica. – Rev. Geol. Amer. Central, 30: 73 – 81.
- Žáček, V., Vorel, T., Kycl, P., Huapaya, S., Mixa, P., Grygar, R., Havlíček, P., Čech, S., Hrazdír, P., Metelka, V., Ševčík, J. & Pécskay, Z., 2012: Geología y Estratigrafía de la hoja 3246 – II Miramar, Costa Rica. – Rev. Geol. Amer. Central, 47: 7 – 54.

Anexo 1: Guía para la descripción de un manantial

	UNIVERSIDAD DE COSTA RICA		CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS GEOLOGICAS
GUIA PARA LA DESCRIPCIÓN DE UN MANANTIAL			
Número del manantial: _____ Nombre del manantial: _____			
Coordenadas georeferenciadas: _____ latitud, _____ longitud			
Hoja cartográfica: _____ Escala: _____			
Altitud: _____ msnm. Fecha de visita: _____			
Cuenca: _____ Subcuenca: _____ Microcuenca: _____			
Provincia: _____ Cantón: _____ Distrito: _____			
Dirección exacta: _____			
El Manantial esta: _____ captado _____ no captado			
Descripción de la captación: _____			
Use como guía:			
<ul style="list-style-type: none">• MUY BUENO (Malla de protección con candado, con tapa, candado en la tapa, captación de cemento, sin fuga, pintada, caudal ecológico, desviación de aguas pluviales, rotulación preventiva y de vigilancia, área alrededor limpia de basura)• BUENO (Con tapa, candado en la tapa, captación de cemento, sin fugas, desviación de aguas pluviales)• REGULAR (Con tapa, captación de cemento)• MALO (Captación rústica sin seguridad)			
Uso Actual del Agua: _____ Consumo Humano, _____ Agropecuario _____ Agroindustrial, _____ Riego, _____ Industrial _____ Comercial, Otro: _____			
Poblados abastecidos: _____			
Caudal reportado del manantial: _____ l/s, Referencia: _____			
Telefax: (506) 2225-1684		cicg@geologia.ucr.ac.cr	
Barrio Los Profesores (carretera a Sabanilla) de GlaxoSmithKline 50 m N y 200 m W, Casa #13.			



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



Datos de aforo realizado: N.1: _____ l/s, N.2: _____ l/s

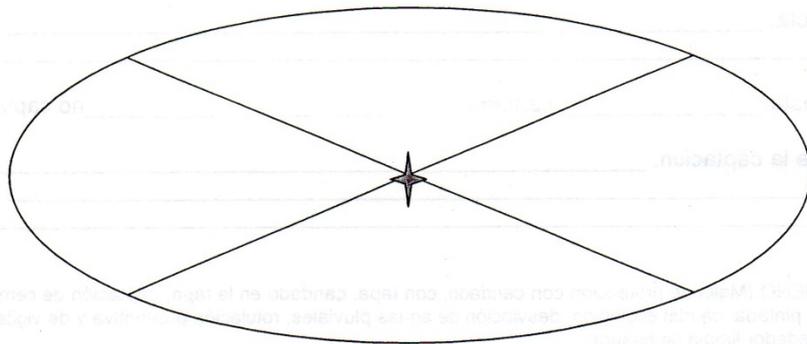
N.3: _____ l/s, N.4: _____ l/s N.5: _____ l/s

Promedio: _____ l/s.

Especifique si el aforo realizado corresponde a:

_____ captación, _____ efluente, _____ otro

Determine la distancia del manantial a cultivos, bosque, pasto, infraestructura u otros, dentro de los 100 metros de radio. Especifique el tipo de cultivo: café, caña, helechos, chile, bosque (primario, secundario), tacotal o charral.



N

Describe si el Manantial presenta alguna amenaza antrópica o natural eminente: _____

Presente y describa fotos del manantial.

Ubique este manantial en un mapa topográfico e inclúyalo en la base de datos correspondiente.

Investigador: _____, Proyecto _____

Mario E. Arias Salguero, Director, 2009

Telefax: (506) 2225-1684

cicg@geologia.ucr.ac.cr

Barrio Los Profesores (carretera a Sabanilla) de GlaxoSmithKline 50 m N y 200 m W, Casa #13.

Anexo 2: Gráficas de Infiltraciones

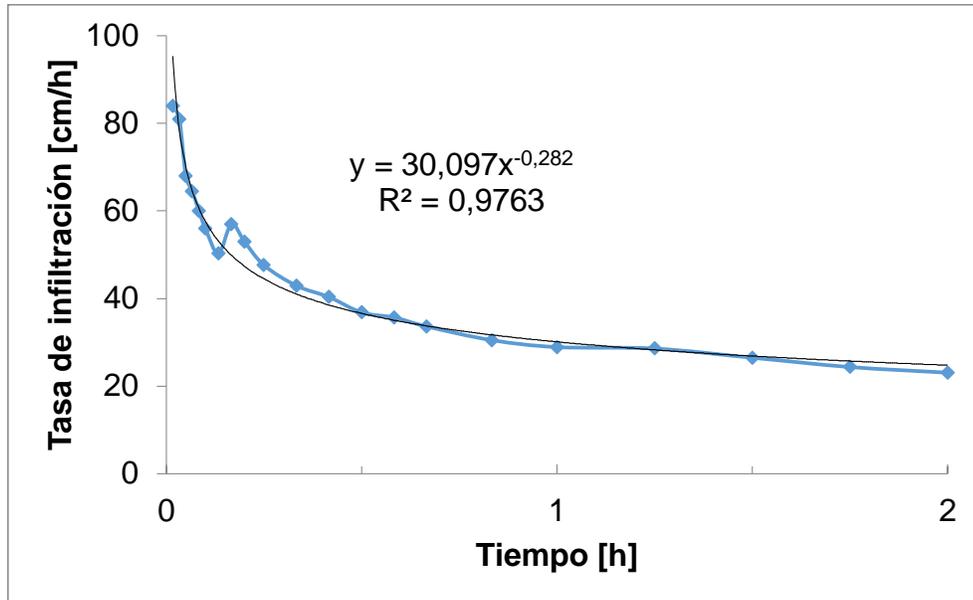


Figura No. 1: Gráfica de la prueba de infiltración NA – B1 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 456.026 / 1.110.516, para la naciente Santa Margarita 1.

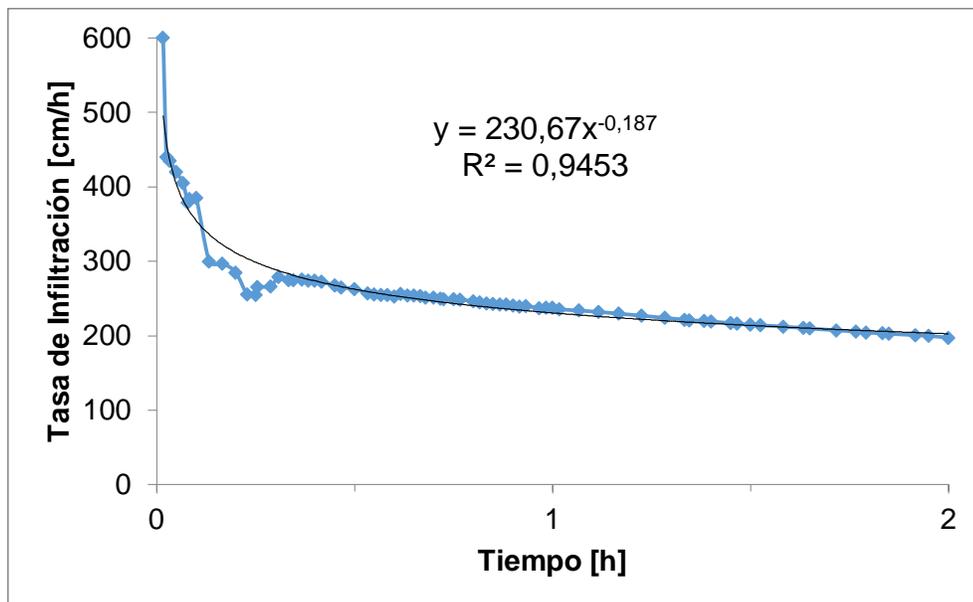


Figura No. 2: Gráfica de la prueba de infiltración NA – A1 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 456.042 / 1.110.109, para la naciente Santa Margarita 2.

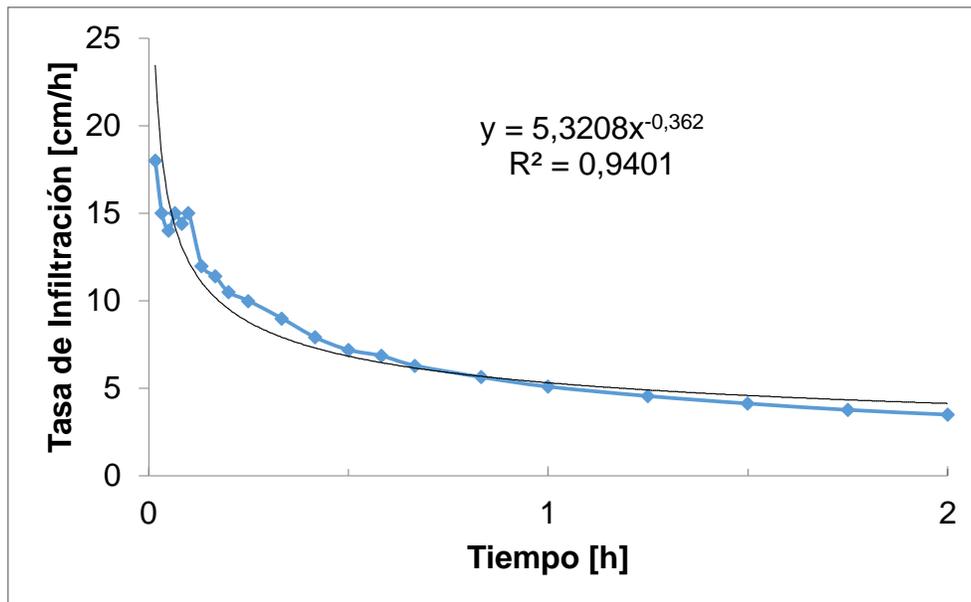


Figura No. 3: Gráfica de la prueba de infiltración NA – B4 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 458.838 / 1.114.973, para la naciente San Miguel.

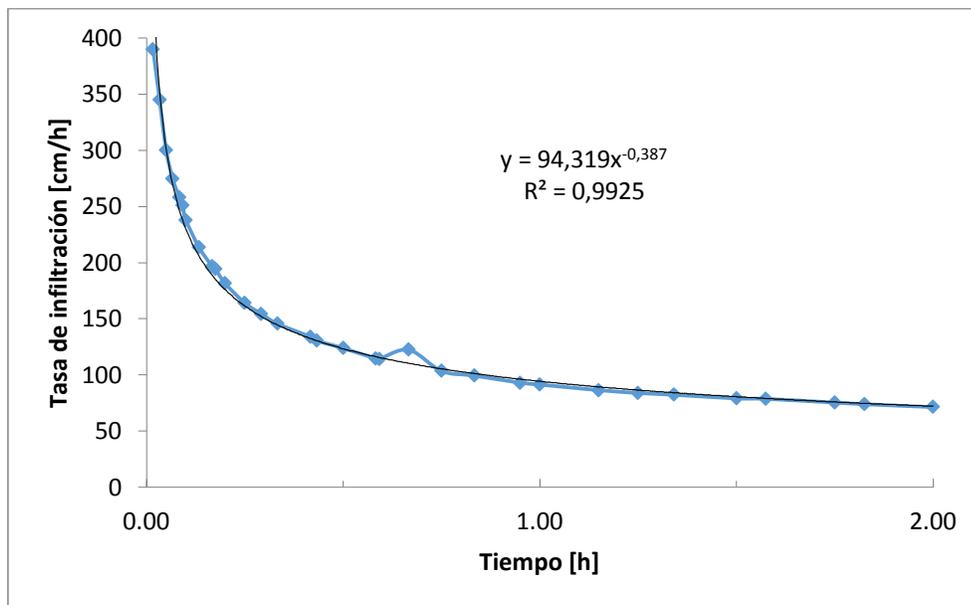


Figura No. 4: Gráfica de la prueba de infiltración NA – A4 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 455.819 / 1.114.761, para la naciente La Pista.

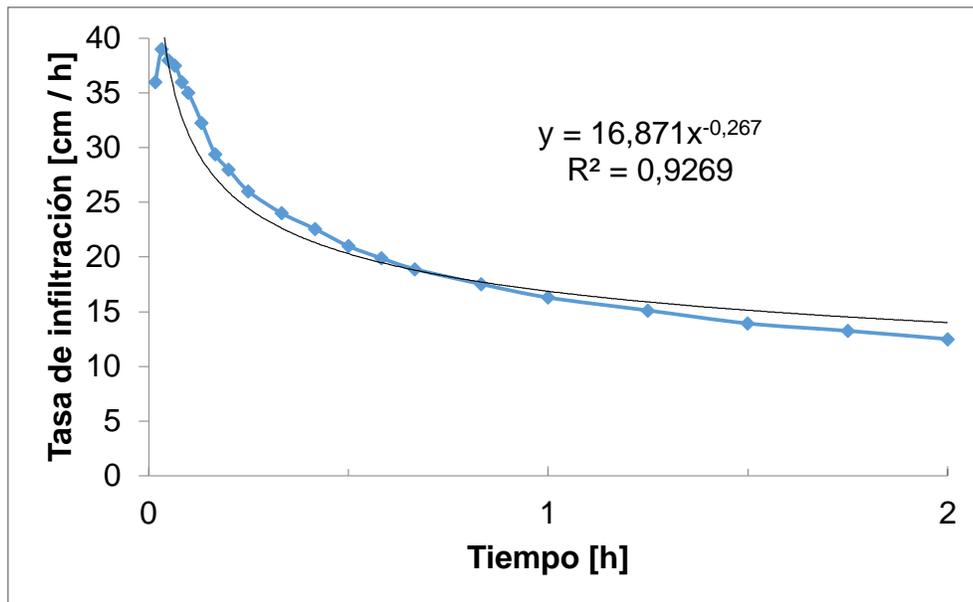


Figura No. 5: Gráfica de la prueba de infiltración NA – A5 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 456.417 / 1.112.470, para la naciente Ramírez.

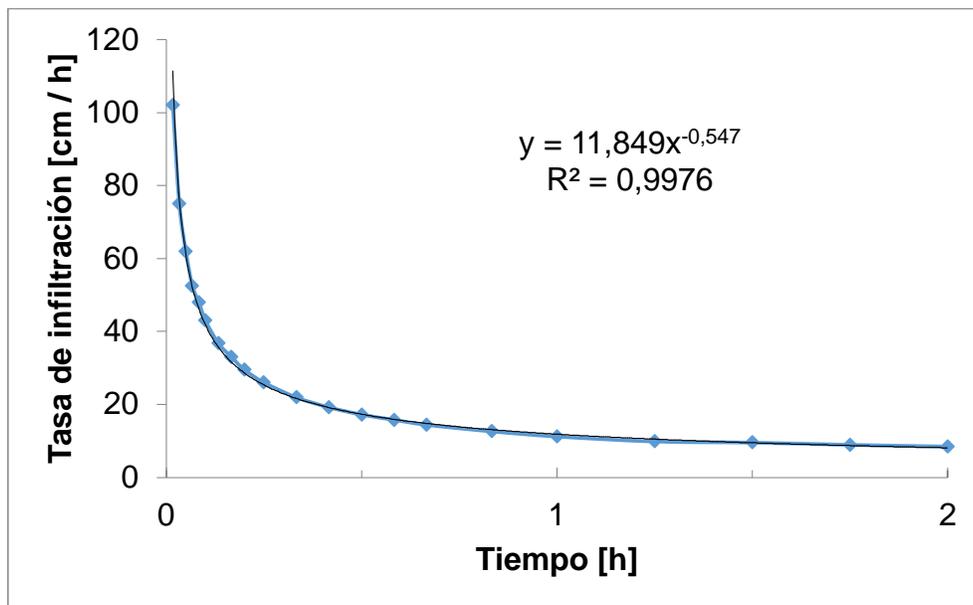


Figura No. 6: Gráfica de la prueba de infiltración NA – B5 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 457.302 / 1.112.866, para la naciente Chacón.

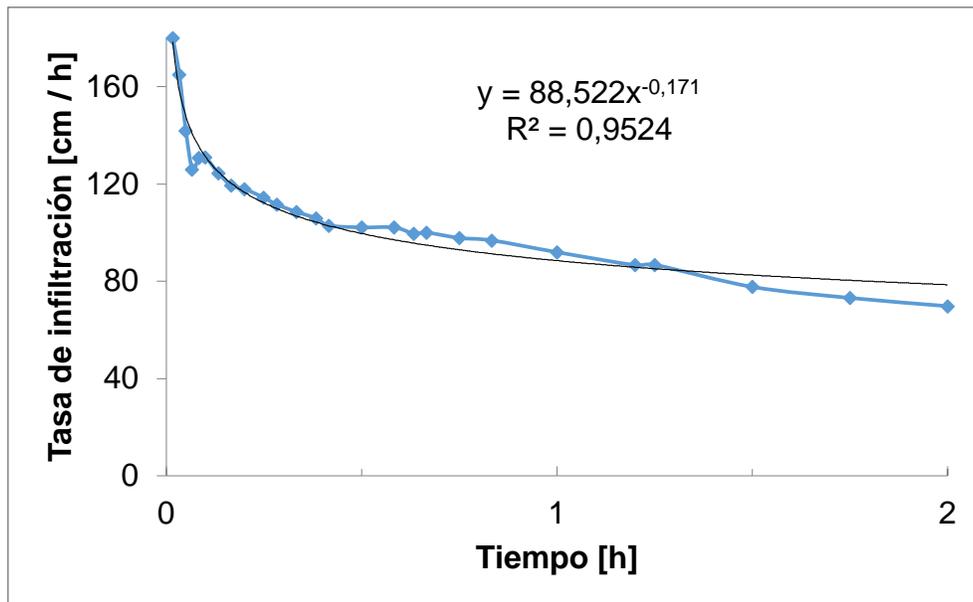


Figura No. 7: Gráfica de la prueba de infiltración NA – C5 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 457.091 / 1.112.808, para la naciente Arroyo.

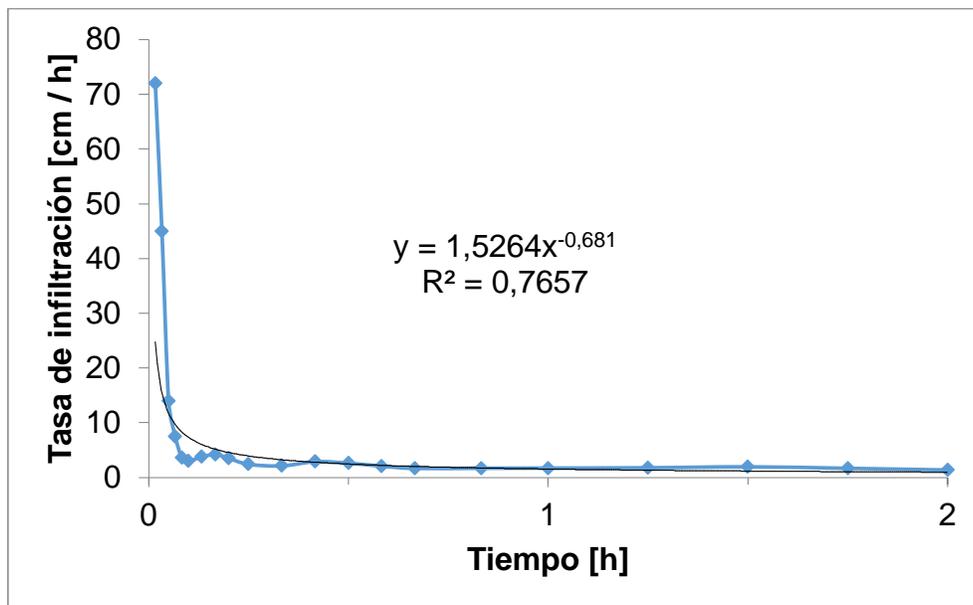


Figura No. 8: Gráfica de la prueba de infiltración NA – A6 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 457.230 / 1.113.893, para la naciente San Francisco.

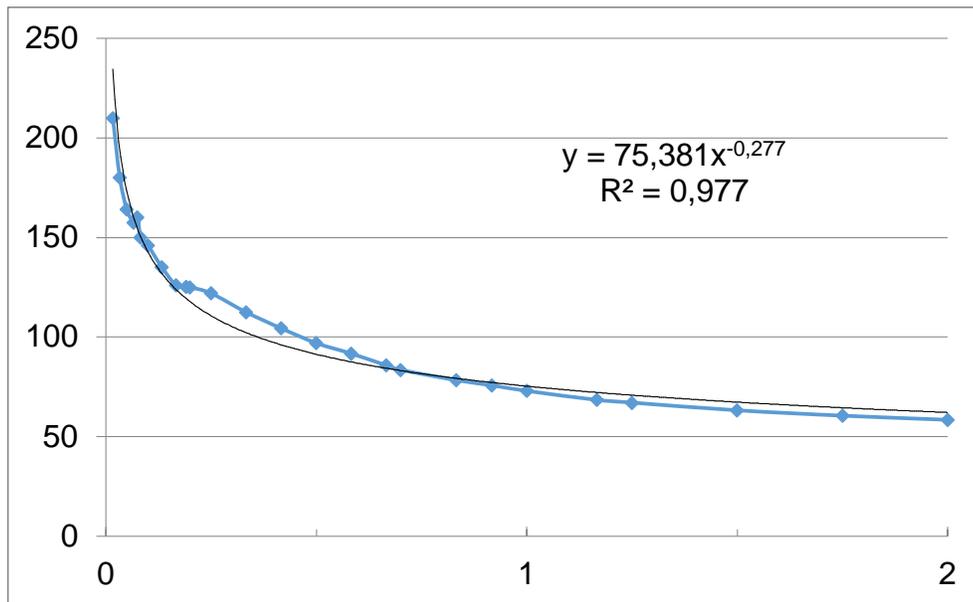


Figura No. 9: Gráfica de la prueba de infiltración NA –A2 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 454.654 / 1.115.189, para la naciente La Bomba.

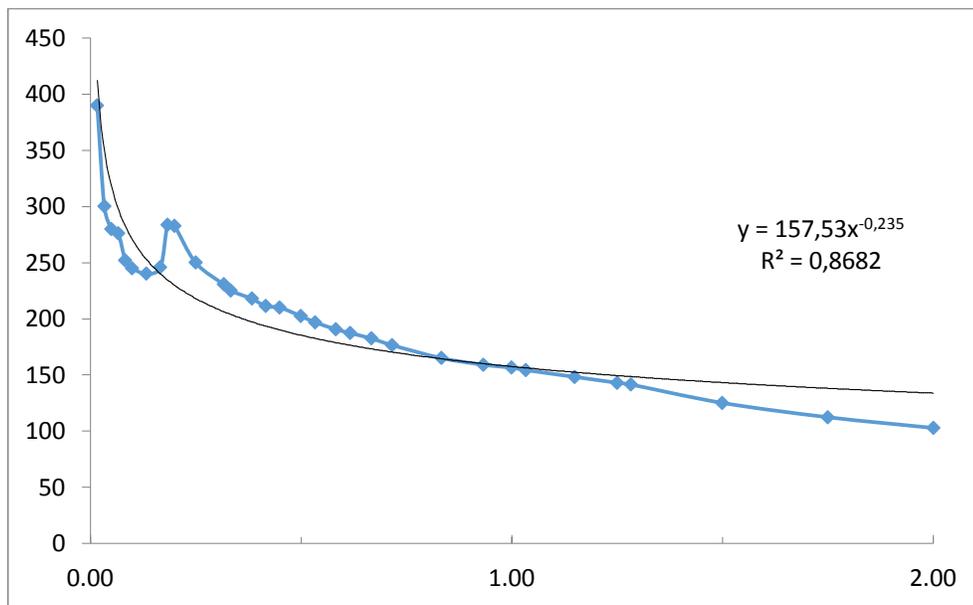


Figura No. 10: Gráfica de la prueba de infiltración NA –A3 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 454.676 / 1.115.239, para la naciente Captación 1.

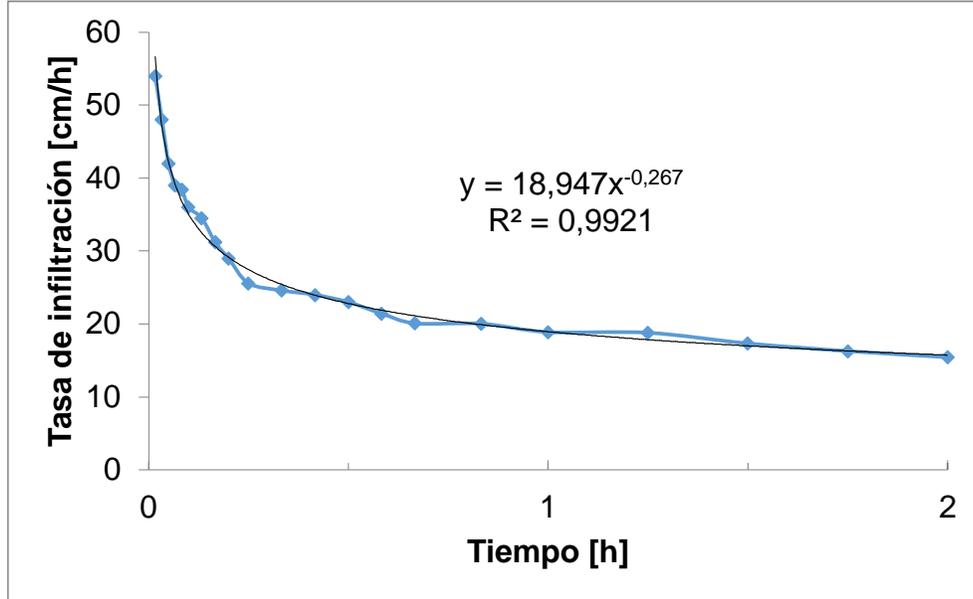


Figura No. 11: Gráfica de la prueba de infiltración NA –B2 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 454.621 / 1.115.625, para la naciente Captación 2.

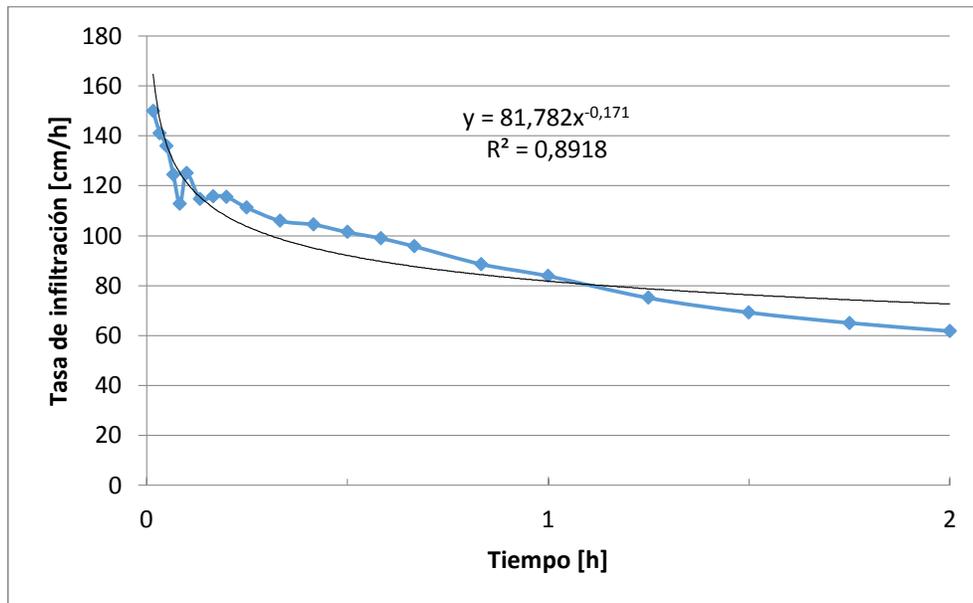


Figura No. 12: Gráfica de la prueba de infiltración NA –B3 con la metodología de doble anillo en las coordenadas 454.658 / 1.115.634, para la naciente Captación 3.

Anexo 3: Propiedades geotécnicas e hidrológicas de muestras de suelo.

Cuadro No 1: Propiedades geotécnicas de las muestras de suelo NA - B1, NA - A1, NA - B4, NA - A4, NA - A5 y NA - B5.

Naciente		Santa Margarita 1	Santa Margarita 2	San Miguel	La Pista	Ramírez	Chacón
Código de la muestra		NA - B1	NA - A1	NA - B4	NA - A4	NA -A5	NA - B5
Coordenada x/y		456.026 1.110.516	456.042 1.110.109	458.838 1.114.973	455.819 1.114.761	456.417 1.112.470	457.302 1.112.866
Gravedad específica		2,65	2,65	2,49	2,88	2,46	2,55
Contenido de Humedad		33,01	31,84	42,07	37,49	36,99	24,63
Pesos Unitarios [kN / m³]	Húmedo	15,09	17,84	16,54	14,15	13,90	14,76
	Seco	11,34	13,53	11,64	10,29	10,15	11,84
	Saturado	16,87	18,23	16,77	16,52	15,83	17,00
	Sólido	25,99	25,99	24,43	28,24	24,13	25,01
Relación de vacíos		1,29	0,92	1,10	1,74	1,38	1,11
Porosidad [%]		56,40	47,90	52,30	63,60	57,90	52,70
Grado de saturación [%]		67,70	91,70	95,40	61,90	66,10	56,50
Límites de Atterberg	Límite plástico	42,00	42,00	41,00	41,00	46,00	28,00
	Límite líquido	62,00	68,00	67,00	66,00	76,00	57,00
	Índice de plasticidad	20,00	26,00	26,00	25,00	30,00	29,00
Granulometría	Grava [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40	3,30
	Arenas [%]	10,00	11,00	10,70	14,80	17,20	8,30
	Finos [%]	90,00	89,00	89,30	85,20	81,40	88,40
	Nombre	Limo orgánico (OH) de alta plasticidad	Limo orgánico con arenas (OV) de muy alta plasticidad	Arcilla orgánica (OH) de alta plasticidad			
	Clasificación USCS	MH	MH	MH	MH	MH	CH

Cuadro No 2: Propiedades hidrológicas de las muestras de suelo NA - B1, NA - A1, NA - B4, NA - A4, NA - A5 y NA - B5.

Naciente		Santa Margarita 1	Santa Margarita 2	San Miguel	La Pista	Ramírez	Chacón
Código de la muestra		NA- B1	NA -A1	NA - B4	NA - A4	NA -A5	NA - B5
Coordenada x/y		456.026 1.110.516	456.042 1.110.109	458.838 1.114.973	455.819 1.114.761	456.417 1.112.470	457.302 1.112.866
Capacidad de campo [%]		40,06	41,06	43,59	40,56	39,89	43,91
Punto de marchitez [%]		21,35	20,37	22,08	19,86	20,57	22,74
Densidad aparente [%]		1,15	1,12	1,16	1,09	1,05	1,12
Densidad real [%]		2,21	2,16	2,22	2,12	2,09	2,15
Textura	Arena [%]	32,00	32,00	28,00	32,00	30,00	32,00
	Limo [%]	34,00	32,00	26,00	34,00	34,00	28,00
	Arcilla [%]	34,00	36,00	46,00	34,00	36,00	40,00
	Clasificación	FA	FA	A	FA	FA	FA/A
Conductividad Hidráulica [cm / h]		1,80	1,10	0,65	1,10	4,20	0,91
Materia Orgánica [%]		1,85	2,15	0,91	2,35	2,85	1,15

Cuadro No 3: Propiedades geotécnicas de las muestras de suelo NA - C5, NA - A6, NA - A2, NA - A3, NA - B2 y NA - B3.

Naciente		Arroyo	San Francisco	La Bomba	Captación 1	Captación 2	Captación 3
Código de la muestra		NA - C5	NA - A6	NA - A2	NA - A3	NA -B2	NA - B3
Coordenada x/y		457.091 1.112.808	457.230 1.113.893	454.654 1.115.189	454.676 1.115.239	454.621 1.115.625	454.658 1.115.634
Gravedad específica		2,39	2,58	2,68	2,65	2,53	2,54
Contenido de Humedad		86,40	21,10	35,33	42,10	27,48	32,40
Pesos Unitarios [kN / m³]	Húmedo	14,25	12,39	14,73	15,30	14,74	16,20
	Seco	7,64	10,23	10,88	10,77	11,56	12,23
	Saturado	14,25	16,07	16,36	16,51	16,80	17,22
	Sólido	23,44	25,30	26,28	25,99	24,81	24,91
Relación de vacíos		2,07	1,47	1,41	1,41	1,15	1,04
Porosidad [%]		67,40	59,60	58,60	58,60	53,40	50,90
Grado de saturación [%]		99,90	37,00	66,90	78,90	60,70	79,40
Límites de Atterberg	Límite plástico	47,00	31,00	36,00	41,00	35,00	39,00
	Límite líquido	80,00	51,00	63,00	69,00	62,00	69,00
	Índice de plasticidad	33,00	20,00	27,00	28,00	27,00	30,00
Granulometría	Grava [%]	0,00	1,70	0,00	0,00	4,70	0,00
	Arenas [%]	9,10	11,70	4,40	3,00	17,20	3,60
	Finos [%]	90,90	82,90	95,60	97,00	78,10	96,40
	Nombre	Limo orgánico (OV) de muy alta plasticidad	Limo orgánico con arenas (OV) de alta plasticidad	Limo orgánico (OH) de alta plasticidad	Limo orgánico (OH) de alta plasticidad	Limo orgánico con arena (OH) de alta plasticidad	Limo orgánico (OH) de alta plasticidad
	Clasificación USCS	MH	MH	MH	MH	MH	MH

Cuadro No 4: Propiedades hidrológicas de las muestras de suelo NA – C5, NA – A6, NA – A2, NA – A3, NA – B2 y NA – B3.

	Naciente	Arroyo	San Francisco	La Bomba	Captación 1	Captación 2	Captación 3
Código de la muestra	NA - C5	NA - A6	NA - A2	NA - A3	NA -B2	NA - B3	
Coordenada x/y	457.091	457.230	454.654	454.676	454.621	454.658	
	1.112.808	1.113.893	1.115.189	1.115.239	1.115.625	1.115.634	
Capacidad de campo [%]	40,51	40,08	38,55	40,44	39,28	42,87	
Punto de marchitez [%]	21,86	21,33	20,01	21,49	20,44	21,89	
Densidad aparente [%]	1,12	1,14	1,06	1,11	1,07	1,14	
Densidad real [%]	2,18	2,19	2,11	2,15	2,11	2,19	
Textura	Arena [%]	34,00	34,00	32,00	34,00	34,00	30,00
	Limo [%]	34,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
	Arcilla [%]	32,00	36,00	38,00	36,00	36,00	40,00
	Clasificación	FA	FA	FA	FA	FA	FA
Conductividad Hidráulica [cm / h]	2,30	1,60	4,60	1,30	3,90	0,85	
Materia Orgánica [%]	2,15	2,28	2,65	2,37	2,05	1,11	