UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES

ESCUELA DE GEOGRAFÍA

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CAPAS DE DESECHOS SUBTERRÁNEOS EN EL RELLENO SANITARIO SAN RAMÓN, ALAJUELA, COSTA RICA. AÑO-2015

Práctica dirigida para optar por el grado

de Licenciatura en Geografía

JORGE SUÁREZ MATARRITA

Ciudad Universitaria "Rodrigo Facio", Costa Rica

Setiembre 2016

"Esta memoria de Práctica Dirigida fue aceptada por el Tribunal Examinador, como requisito parcial para optar al grado de Licenciado en Geografía.

Dr. Víctor Cortés Granados
Presidente del Tribunal Examinador

Dr. M.Sc. Francisco Solano Mata
Profesor invitado del Tribunal Examinador

Dr. Rafael Arce Mesén
Director de Tesis

Dr. Christian Birkel
Lector

Jorge Suárez Matarrita

Dedicatoria

A mis padres, hermanos y esposa quienes siempre me han apoyado a cumplir las metas propuestas.

Gracias totales.

Agradecimientos

Le agradezco a mis padres y a mi familia por la motivación y apoyo incondicional.

A mi equipo asesor Rafael, Héctor y Christian por acompañarme y dedicarme su tiempo a lo largo de la investigación.

A Mario Arias y al Centro de Investigaciones Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica (UCR), institución que colaboró con datos, instrumentos, vehículos, viáticos y tiempo de asesoría académica.

A la Escuela de Geografía, UCR, por haberme dado la posibilidad de seguir educándome durante 15 años de estudios.

ÍNDICE

Hoja de aprobación ii
Dedicatória iii
Agradecimientos iv
Índice v
Lista de Cuadros vii
Lista de Figuras vii
Resumen x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. El problema 1
1.2. Ubicación del área de estudio 2
1.3. Institución de práctica dirigida 5
1.4. Justificación 5
1.5. Objetivos 6
1.6. Objetivo general 6
1.7. Objetivos específicos 6
1.8. Limitantes 7
CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL 8
2.1 Rellenos sanitarios y la evolución del RSSR 8
2.2 La geografía física y su transdisciplinaridad 9
2.3 Métodos geofísicos 14
a- Geoeléctrica 14
b- Prospección sísmica 16
CAPITULO 3. METODOLOGÍA 24
3.1 Etapa 1: Recopilación y análisis de Información bibliográfica 25
3.2 Etapa 2: Caracterización general 25

3.2.1 Información del contexto humano 25
3.2.2 Información geológica 26
3.2.3 Información geomorfológica 26
3.2.4 Información meteorológica 27
3.3 Etapa 3: Captura de datos, procesamiento y análisis de resultados 27
3.2.1 Análisis e interpretación de sondeo eléctrico vertical 27
3.2.2 Análisis e interpretación de tomografías geoeléctricas 27
3.2.3 Análisis e interpretación de perfiles sísmicos 28
CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO 29
4.1 Contexto humano 29
4.2 Meteorología 35
4.3 Geología 38
4.3.1 Geología Regional 38
4.3.2 Geología Local 40
4.4 Geomorfología 46
4.4.1 Geomorfología Regional 46
4.4.2 Geomorfología Local 50
4.5 Características geotécnicas de suelos 56
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS 57
5.1 Prospección geoeléctrica 57
5.1.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV) 57
5.1.1.1 Equipo de campo y software 57
5.1.1.2 Resultados de la prospección 61
5.1.2 Tomografías eléctricas 63
5.2 Prospección sísmica 69
5.2.1 Equipo de campo y software utilizado 69
5.2.2 Resultados de la prospección 70
5.3 Análisis de la deformabilidad y resistencia cortante de las capas geosísmicas 76

5.3.1 Deformabilidad y resistencia del Perfil #1 76
5.3.2 Deformabilidad y resistencia del Perfil #2 77
5.4 Cartografiado de los sitios con presencia de lixiviados 78
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 85
CAPITULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 89

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Velocidades de onda sísmica de corte y su correlación de tipo de suelo 22
Cuadro 2. Datos de estación pluviométrica Piedades Sur. 35
Cuadro 3. Datos de resistividades eléctricas de campo y ajustadas 59
Fuente: Cuadro 4. Datos de resistividades eléctricas de campo y ajustadas 60
Cuadro 5. Características de la inversión del SEV1 (Caracterización del basamento) . 62
Cuadro 6. Resumen de resultados alcanzados por la Sísmica de Refracción perfil #1. 76
Cuadro 7. Resumen de resultados de la Sísmica de Refracción Perfil sísmico #2 78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista General del Relleno Sanitario de San Ramón 1
Figura 2. Ubicación del Relleno Sanitario San Ramón hojas Cartográficas IGN. 3
Figura 3. Ubicación del área en ortofografía aérea 4
Figura 4. Vista de información digital sobre la comisión de Geofísica en el IPGH 11
Figura 5. Vista de la pág. web del Instituto Geográfico de Panamá y su Departamento de Geofísica y estudios Especiales. 12
Figura 6. Vista de la pág. web del Instituto Geográfico Nacional de España, donde se muestras las funciones de Geofísica 13
Figura 7. Organigrama del Inst. Geog. Nacional de España con su apartado de Astronomía, Geofísica y aplicaciones espaciales 13
Figura 8. Esquema General del Dispositivo Schlumberger. Dibujo: Zúñiga (2012) 15
Figura 9. Esquema de los tipos de propagación de ondas sísmicas. 17
Figura 10. Refracción de una onda símica emitida desde la superficie. Tomado de Braja (2004) 19
Figura 11. Esquema conceptual del proceso de realización de un perfil de refracción sísmica. 20
Figura 12. Modelo conceptual de la metodología a seguir. 24

Figura 13. Poblados cercanos y delimitación de microcuenca del Relleno Sanitario San Ramón..... 32
Figura 14. Poblados, fuentes de ASADAS y concesiones de agua en la cuenca del río Barranca..... 33
Figura 15. Promedio de precipitación mensual, estación Piedades Sur 1984-2013. 36
Figura 16. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas..... 37
Figura 17. Mapa de geología regional..... 39
Figura 18. Perfil Geológico..... 41
Figura 19. Mapa de geología local..... 42
Figura 20. Proceso de análisis de secciones delgadas..... 43
Figura 21. Muestra Código RSSR-1..... 44
Figura 22. Muestra Código RSSR-2..... 44
Figura 23. Modelo de elevación regional con vista 3D..... 47
Figura 24. Mapa geomorfológico regional..... 48
Figura 25. Mapa del modelo de elevación digital local..... 51
Figura 26. Mapa del modelo de sombreado de montañas..... 52
Figura 27. Mapa de pendientes..... 53
Figura 28. Mapa de geomorfología local..... 54
Figura 29. Equipo SYSCAL PLUS operando en el RSSR..... 57
Figura 30. Mapa de sitios de prospección geofísica..... 58
Figura 31. Gráfico de resistividades aparentes y reales vs separación de electrodos .. 60
Figura 32. Interpretación del modelo SEV-1 de 2 capas geoeléctricas..... 60
Figura 33. Fotografía del talud retrabajado, con la roca madre expuesta en superficie. 62
Figura 34. Fotografía del proceso de realización de una tomografía eléctrica..... 63
Figura 35. Proceso de modelación de datos para la tomografía #1..... 65
Figura 36. Interpretación de la tomografía eléctrica #1..... 65
Figura 37. Proceso de modelación de la tomografía #2..... 67
Figura 38. Interpretación de tomografía eléctrica #2..... 67
Figura 39. Vista del talud de basura sobre el cual se realizó la tomografía #3..... 68
Figura 40. Fotografías del proceso de ejecución #1 de sísmica de refracción..... 70
Figura 41. Sismograma y selección de primer arribo de onda..... 70
Figura 42. Ejemplo de selección de punto de arribo contraste en colores..... 71
Figura 43. Dromocrónica para la selección de capas subterráneas..... 71
Figura 44. Interpretación del perfil sísmico #1..... 72
Figura 45, Ejemplo de selección de punto de arribo en registro sismográfico..... 73
Figura 46. Ejemplo de selección de punto de arribo contraste en colores..... 74
Figura 47. Interpretación del perfil sísmico #2..... 75
Figura 48. Fotografías de sitios de muestreo de conductividad eléctrica, STD, temperatura y ph..... 79

Figura 49. Fotografías de sitios de muestreo de conductividad eléctrica, STD, temperatura y ph 80
Figura 50. Gráfico de variación de la conductividad eléctrica en cuerpos de agua superficial 81
Figura 51. Comparación de variogramas en la interpolación kriegeana de contaminantes según conductividad eléctrica del agua. Izq. Variograma lineal, centro esférico y derecha logarítmica 82
Figura 52. Mapa de conductividades eléctricas en agua 84

RESUMEN

El Relleno Sanitario de San Ramón, Alajuela, ha recibido desde el año 2000 hasta la actualidad, residuos producidos por 4 cantones de la provincia de Alajuela. Para una gestión adecuada del cierre técnico del Vertedero y prevenir la contaminación del recurso hídrico, es necesario conocer la geometría subterránea del sitio y los sitios donde descargan lixiviados. El objetivo general de este estudio fue elaborar un modelo geofísico conceptual de la distribución espacial de capas de desechos presentes y sus descargas de lixiviados, debido a que es una potencial fuente de contaminación para los aprovechamientos de agua ubicados cuenca abajo para abastecer poblados como Esparza y Puntarenas. Para esto, se realizó un análisis de los elementos geológicos, geomorfológicos, meteorológicos, geofísicos y geotécnicos. Específicamente para la prospección subterránea se utilizaron métodos sísmicos y eléctricos, respectivamente dos perfiles de sísmica de refracción, así como un sondeo eléctrico vertical y dos tomografías eléctricas 2D.

Los resultados de las tomografías eléctricas alcanzaron una profundidad de 50m y mostraron que el sistema se compone en general de tres unidades geofísicas, la primera capa corresponde con suelo o cobertura de desechos que varía de 0,5 a 1m de profundidad (resistividades de 20 a 40 Ohm), el segundo estrato resistivo se relaciona son los desechos subterráneos que presenta espesores de 15 a 30m y resistividades entre 1 y 20 Ohm y la tercera capa detectada es el basamento que está compuesto por tobas volcánicas meteorizadas de la Formación Grifo Alto y su techo se detectó en profundidades de 15 a 30 metro bajo el nivel del suelo.

El modelo sísmico de refracción logró caracterizar principalmente las primeras dos capas superficiales. La primera capa corresponde con suelos, antiguas coberturas de desechos o zonas de caminos, con un espesor variable entre 1 y 2 m, presenta valores de velocidad de onda primaria de 350-374 m/s, y velocidad de onda secundaria entre 122-126 m/s. La segunda capa corresponde a los desechos enterrados mezclados con limos de muy alta plasticidad y sus velocidades de onda primaria variaron entre 355-374 m/s y las ondas secundarias entre 124-130 m/s.

La caracterización geotécnica basada en las velocidades de onda sísmica, indican que el módulo de esfuerzo cortante (G) fue de 22,56MPa y el módulo de elasticidad (E) y 64,54 MPa, por lo tanto, esta capa se define como blandos propensa a deformarse y a sufrir falla por capacidad soportante de una carga externa.

Se logró detectar y cartografiar los focos de descarga de caudales de lixiviados subterráneos hacia las aguas superficiales del proyecto. Esto basado en el indicador de conductividad eléctrica en agua., el cual obtuvo que las aguas subterráneas naturales en la microcuenca presentaron valores promedio de 73 µS/cm, mientras que los valores de lixiviados usualmente superaron los 1000 µS/cm. que descarga en el Río Barranca y finalmente en el Océano Pacífico, todo esto sin recibir un tratamiento para su depuración, puesto que no existe una planta de tratamiento en el sitio.

Como conclusión de este estudio a partir de los resultados se evidencia la necesidad mejorar el sistema de captación de lixiviados en el fondo de las capas de desechos para su respectiva depuración en una nueva planta de tratamiento de aguas residuales y de esta forma prevenir la contaminación al recurso hídrico superficial y subterráneo en la cuenca del río Barranca.
Palabras clave: Distribución espacial, geofísica, geoeléctrica, tomografía, sondeo eléctrico vertical, sísmica de refracción, vertederos, relleno sanitario, San Ramón.

Acrónimos

AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados)

CICG (Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas)

CSCR-2010 (Código Sísmico de Costa Rica 2010)

IGN (Instituto Geográfico Nacional)

MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería)

m b.n.s. (metros bajo nivel del suelo)

m s.n.m. (metros sobre nivel del mar)

MinSa (Ministerio de Salud)

PT (Planta de tratamiento)

RSSR (Relleno Sanitario San Ramón)

SENARA (Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento)

SEV (Sondeo eléctrico vertical)

UCR (Universidad de Costa Rica)

UGM Unidades Geoestadísticas Mínimas

INEC Instituto de Estadística y Censos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Este estudio corresponde a la práctica dirigida de graduación en la licenciatura en Geografía de la Facultad de Ciencias de Sociales de la Universidad de Costa Rica, y se desarrolla a través del proyecto de investigación "Impacto del vertedero municipal de San Ramón, sobre el medio físico, biológico y social", debidamente inscrito en la Vicerrectoría de Investigación bajo el código 830-B4-402 por medio del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de la UCR.

1.1. El problema

El Vertedero controlado de San Ramón (Fig. 1), recibió desde el año 1999 hasta la actualidad residuos producidos por cuatro cantones de la provincia Alajuela (San Ramón, Naranjo, Valverde Vega y Palmares). Sin embargo, el sitio inicialmente se caracterizaba como un botadero, debido a la falta de condiciones técnicas, legales, administrativas y ambientales para una adecuada gestión de los desechos sólidos y lixiviados, las cuales han ido mejorando a través del tiempo hasta llegar a la etapa de cierre técnico programada para el 2016.

Figura 1. Vista General del Relleno Sanitario de San Ramón

La disposición inadecuada de los residuos generan lixiviados, los cuales son contaminantes producidos por las reacciones del contacto entre los líquidos con los desechos presentes; estas son reacciones de descomposición química y orgánica, en las que los productos se podrían clasificar como sólidos totales disueltos (STD), metales pesados y sales por mencionar algunos, los cuales pueden dirigirse a las aguas subterráneas por medio de flujos verticales, horizontales y gradientes químicos (Suarez 2014). En efecto, el lixiviado es considerado el gran contaminante de un relleno (Rojas, 2007).

En la actualidad, en el Relleno Sanitario de San Ramón (RSSR), se encuentra en una etapa de cierre técnico, sin embargo, todavía no se conoce la distribución espacial de las capas subterráneas de desechos, su profundidad y el contacto con el basamento lo cual es básico para los estudios geotécnicos, geológicos, hidrogeológicos, de amenazas naturales y potencial de contaminación. Para abordar este problema, se propone realizar un análisis de mediciones ambientales subterráneas y superficiales, utilizando técnicas geofísicas de tomografías eléctricas, sondeos eléctricos verticales y sísmica de refracción.

1.2. Ubicación del área de estudio

El área de estudio se ubica en el distrito Piedades Norte del cantón San Ramón, de la provincia Alajuela, Costa Rica (Fig. 2 y fig. 3) y tiene un área de 0,116 km^2, comprende dos propiedades referidas a los planos catastro número A – 0404408 – 1997 (32.798,31 m^2) y A- 0679542 – 2001 (83.877,55 m^2) y está inserta en la microcuenca quebrada Sin Nombre, en la cuenca alta del Río Barranca, San Ramón. Las coordenadas centroides de la zona en estudio son X: 447175 y Y:1117743 de la Hoja Naranjo Escala 1:50000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en sistema de coordenadas Costa Rica Trasversal de Mercator 05 (CRTM05).

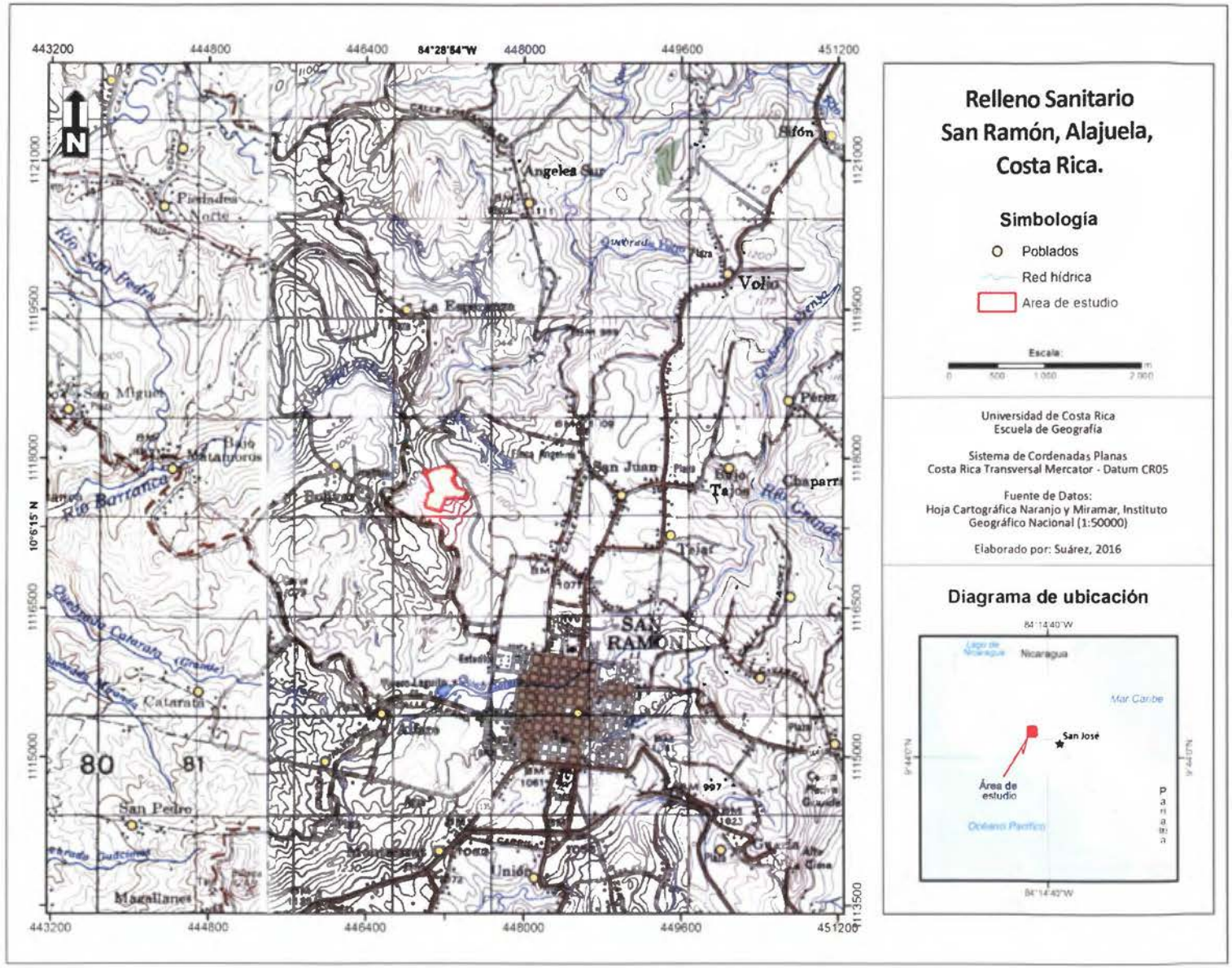


Figura 2. Ubicación del Relleno Sanitario San Ramón hojas Cartográficas IGN.

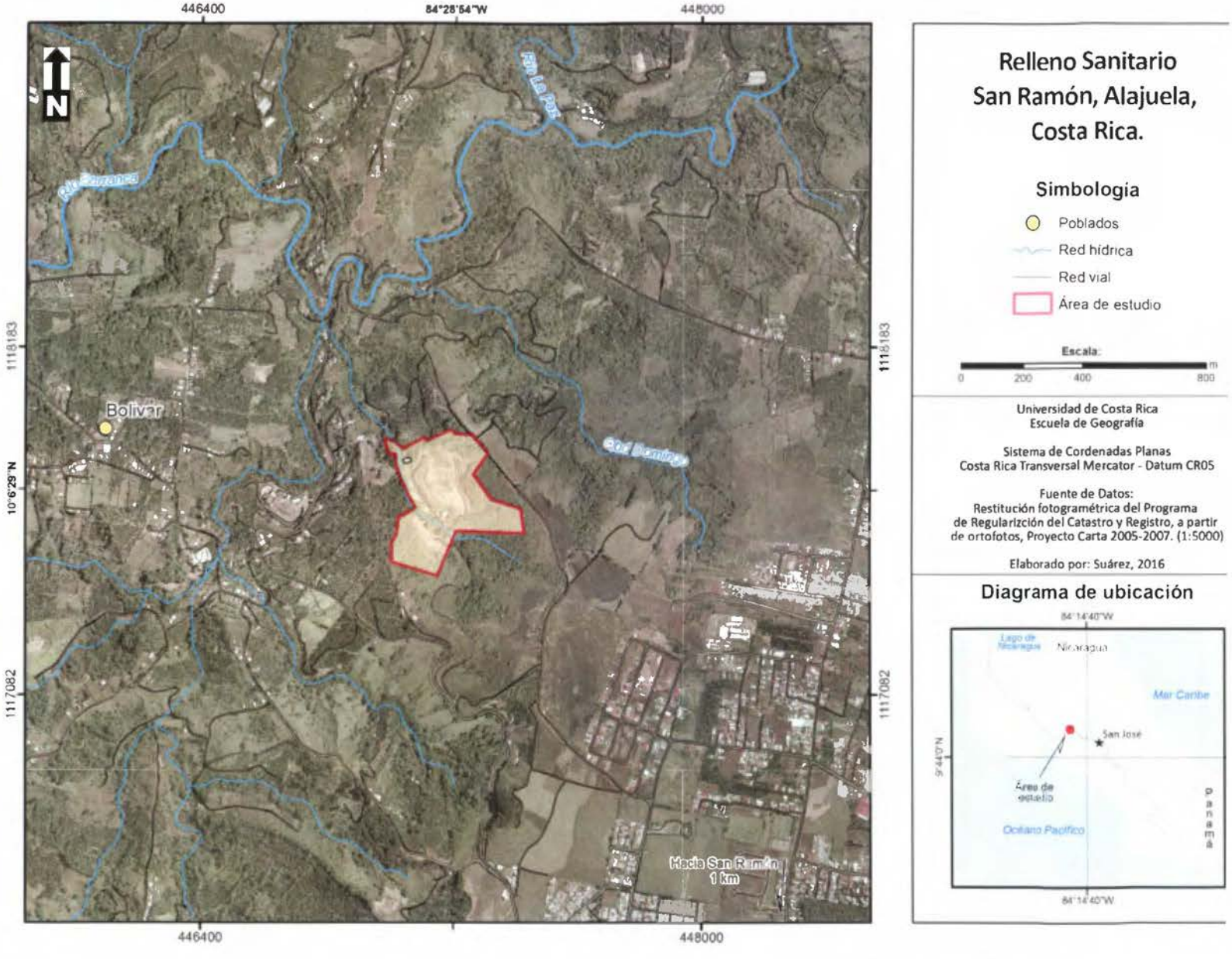


Figura 3. Ubicación del área en ortofografía aérea

1.3. Institución de práctica dirigida

La institución donde se realizó la práctica dirigida fue el Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica. Es una unidad de investigación científica de carácter multidisciplinario, dedicada al estudio de los procesos geológicos que han dado origen al planeta y lo continúan modificando. Esto con el propósito de brindar a la sociedad los insumos necesarios para una gestión adecuada de los recursos geológicos, del territorio y del riesgo. El Centro de investigación fue creado en la sesión N°. 5186, del Consejo Universitario de la Universidad de Costa Rica, efectuada el 29 de agosto del 2007. Su reglamento específico fue aprobado por la Rectoría en resolución R-4329-2009 y publicado en el Alcance a la Gaceta Universitaria 9-2009 de 14 de julio de 2009.

En la actualidad, el CICG tiene la labor de realizar un diagnóstico ambiental del Relleno Sanitario de San Ramón. Por lo que un insumo básico es conocer la geometría de las capas subterráneas de desechos debido a que este conocimiento dará paso a investigaciones en modelos geológicos, geográficos, hidrogeológicos, geotécnicos, de amenazas naturales y contaminación ambiental.

1.4. Justificación

La Sala Constitucional en el voto 9374-13 ordenó a la municipalidad de San Ramón presentar ante el Ministerio de Salud, un plan de cierre técnico del relleno sanitario de San Ramón de Alajuela. Por ello, se contrató al Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas para elaborar el diagnóstico actual para dicho estudio.

El sistema de tratamiento de los desechos no fue adecuado a lo largo de su historia (1999-2014), existiendo un potencial de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales producida principalmente por los lixiviados, en su estado líquido, tienen potencial de flujo hacia los acuíferos subyacentes y cuerpos

de agua superficial. Por tanto, existe la necesidad de caracterizar geofísicamente el Relleno Sanitario San Ramón para determinar la geometría de las capas subterráneas de desechos, conocer sus límites verticales y horizontales y generar un insumo para investigaciones en modelos geológicos, geográficos, hidrogeológicos, geotécnicos, de amenazas naturales y contaminación ambiental.

1.5. Objetivos

1.6. Objetivo general

Elaborar un modelo geofísico del Relleno Sanitario San Ramón para conocer la distribución espacial y profundidad de las capas de desechos subterráneos.

1.7. Objetivos específicos

1- Proponer un modelo geoeléctrico del Relleno Sanitario San Ramón para definir el espesor de las capas de desechos, ubicar el basamento, detección de lixiviados y comprender la geometría de los estratos presentes.

2- Proponer un modelo de refracción sísmica del Relleno Sanitario San Ramón para definir el espesor de los desechos, la profundidad del basamento y los límites laterales de los estratos presentes.

3- Calcular la deformabilidad y resistencia cortante del estrato de desechos a partir de velocidades de onda sísmica, para caracterizar geotécnicamente el RSSR.

4- Cartografiar los sitios con presencia de lixiviados por medio de indicadores de conductividad eléctrica para determinar los principales sitios de contaminación de aguas superficiales.

1.8. Limitantes

- En el Relleno Sanitario de San Ramón hay una ausencia de información litológica, pues son inexistentes los piezómetros de observación.
- Inexistencia de datos geofísicos previos, se carece de estudios de línea base geoeléctricos ni sísmicos.
- Inexistencia de registros eléctricos previos sobre la calidad del agua como indicador de contaminación.
- En el uso del método geofísico de sísmica de refracción, si una capa subyacente es de menor velocidad que la suprayacente, esta no se podrá medir adecuadamente.

CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Rellenos sanitarios y la evolución del RSSR

La disposición de residuos en Costa Rica toma una mayor relevancia en los años 90´s. En el año de 1998, se publica en el diario oficial "La Gaceta" Nº 206, el decreto ejecutivo 27378-S "Reglamento sobre Rellenos Sanitarios"; el cual expresa que una inadecuada disposición de los desechos sólidos, atenta severamente **contra** la salud pública, la vida y cualquier ambiente sano y ecológicamente equilibrado. Por todo ello, existe un potencial de contaminación de las aguas subterráneas principalmente a través de lixiviados, los cuales se producen al contacto de la humedad que infiltra resultado de las lluvias con los residuos presentes; manifestándose luego en agua residual como consecuencia de la descomposición de los desechos orgánicos y la disolución de desechos inorgánicos (Reglamento sobre Rellenos Sanitarios). En general estos fluidos están formados de sólidos totales disueltos (STD), metales y sales entre otros (Suarez 2014).

En el año 2006, se generaban unas 3.780 ton/día de residuos sólidos ordinarios en Costa Rica, lo que equivalía 0,86 kg/persona/día en promedio (a nivel nacional). Aproximadamente el 55% de los residuos ordinarios son materia orgánica y el resto inorgánica y alrededor de un 38% son materiales inorgánicos como papel, plástico, metal y vidrio, de los cuales una buena parte es recuperable (CYMA, 2008).

Específicamente, el Vertedero de San Ramón inició sus labores a partir del 2000 y en el 2008, la Municipalidad de San Ramón recibió de desechos de los cantones Naranjo y Valverde Vega; posteriormente en el año 2011 se incorporó desechos provenientes de Palmares y en el año 2013, a partir de marzo se reciben los desechos de Atenas (País, 2013).

Para el año 2013, según la Municipalidad de San Ramón (2013) se recibía un promedio de 3835,38 toneladas mensuales de desechos distribuidas de la siguiente manera:

Cantón San Ramón	1986,42 toneladas
Palmares	700,00 toneladas
Naranjo	661,09 toneladas
Sarchí	328,04 toneladas
Atenas	280,33 toneladas

- Fuente: (Municipalidad de San Ramón, 2013)

De acuerdo con el Plan Municipal para la Gestión de Residuos Sólidos del 2011, indican que "El servicio de tratamiento y disposición final de los residuos sólidos es brindado por la Municipalidad en un vertedero semi-controlado que inició sus actividades desde el 2000. Cuenta con un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y con viabilidad ambiental de parte de SETENA y la vida útil que le queda al sitio fue estimada en uno 5 años."

En cuanto al Relleno Sanitario de San Ramón (RSSR), en el año 2013, el Ministerio de Salud ordena el cierre definitivo de operaciones y proceder al cierre técnico, sin embargo, en la actualidad continúa recibiendo desechos y está en proceso del cierre técnico.

2.2 La geografía física y su transdisciplinaridad

La Geografía explica los fenómenos que ocurren en el planeta Tierra, a diversas escalas, tanto en el medio físico natural como social.

Para explicar los fenómenos, los geógrafos deben abstraer la realidad por medio de modelos conceptuales que tienen como común denominador el análisis espacial.

La Geografía tiene como objetivo primordial el mejor entendimiento de nuestro planeta, con todas y cada una de las complejidades humanas y naturales, no sólo la localización de los objetos, sino cómo son y cómo han cambiado para llegar a ser lo que son. La Geografía se divide en tres ramas principales, a saber, Geografía Física, Geografía Humana y Regional, lo cual no implica una desconexión entre una y otra, aunque dicha división se plantea sólo como un punto de partida en particular e intangible.

La Geografía Física, según Strahler (1960), es la unificación de un conjunto de ciencias de la Tierra que se encargan de estudiar las bases físico - naturales de la Geografía General.

> "La Geografía física es un conjunto de principios básicos de las ciencias naturales que tratan sobre la atmósfera (meteorología, climatología), los océanos (oceanografía), las rocas (geología), los suelos (pedología), la vegetación (ecología de las plantas, biogeografía) y las formas del relieve terrestre (geomorfología). Como rama de la Geografía, la geografía física también subraya las interrelaciones espaciales, el orden sistemático de los elementos medio ambientales en regiones de la superficie terrestre y las causas de esos modelos".(Strahler. 1994)

La Geografía Física integra varias subramificaciones como la Climatología que se encarga del estudio del clima, la Hidrografía que es el estudio de las aguas superficiales, la Hidrogeología la cual estudia las aguas subterráneas, la Glaciología que se ocupa de los cuerpos de agua en estado sólido, la Georciología que se dedica al estudio del permafrost; la Geografía litoral se dedica al estudio de las dinámicas de los paisajes costeros, Oceanografía para el estudio de los océanos y la Edafogeografía que estudia los suelos desde el punto de vista geográfico.

Existen varias ciencias las cuales Geografía Física se apoya. Esto enmarcado dentro de las Ciencias de la Tierra, que sirven para integrar el conocimiento no geográfico que tenemos de nuestro planeta. De esta manera se pueden realizar estudios integradores interdisciplinarios y multiparticipativos, por ejemplo:

La Geología, tanto la histórica como la Geología estructural. También la Petrografía, la Estratigrafía, la Sedimentología y la Vulcanología.

La Geodesia, encargada del estudio de la Tierra como planeta, especialmente en lo que se refiere a su forma, dimensiones, y características geométricas, la cual trabaja muy de cerca con la Geoinformática y Sistemas de Información Geográfica.

La Geofísica aplicada o exploración geofísica que se refiere al uso de métodos físicos y matemáticos para determinar las propiedades físicas de las rocas y sus contrastes. El propósito de tal determinación es conocer el arreglo de los cuerpos de roca en el interior de la Tierra, así como las anomalías presentes en ellas.

Algunos de los métodos de exploración geofísica más usados son: los métodos eléctricos (Geoeléctrica), electromagnéticos y los métodos sísmicos por mencionar algunos.

En esta práctica dirigida, se propone un acercamiento transdisciplinario desde la geografía hacia la geofísica, empleando métodos geofísicos y Sistemas de Información Geográfica para analizar la distribución espacial de las capas subterráneas de desechos y sus descargas de lixiviados, generando modelos en dos y tres dimensiones de la superficie del terreno y sus profundidades.

El tema de la geofísica ha se encuentra dentro del ámbito oficial de la Geografía, por ejemplo, El Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) tiene una comisión de Geofísica (Figura 4) en la cual se desarrollan temas de Gravimetría, Geofísica Ambiental, Meteorología y Física Atmosférica, Sismología y Vulcanología entre otros.

Figura 4. Vista de información digital sobre la comisión de Geofísica en el IPGH

Fuente: https://www.ipgh.org/

A nivel institucional internacional, también los Institutos Geográficos de Panamá y de España tienen su respectivo departamento de Geofísica, tal y como se muestra en los extractos de sus páginas web en las Figura 5, Figura 6 y Figura 7

Figura 5. Vista de la pág. web del Instituto Geográfico de Panamá y su Departamento de Geofísica y estudios Especiales.

Fuente:http://ignpanama.anati.gob.pa/minstituto/mdepartamentos/184-ageofisicayestudiosespeciales

Además, reconocidos Geógrafos de la Escuela de Geografía han publicado estudios científicos en la reconocida Revisa de American Geophysical Union, como por ejemplo el Dr. Christian Birkel, profesor de la Escuela de Geografía de la UCR el cual recientemente publicó el artículo "Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous región".

Figura 6. Vista de la pág. web del Instituto Geográfico Nacional de España, donde se muestras las funciones de Geofísica

Fuente: http://www.ign.es/ign/main/index.do

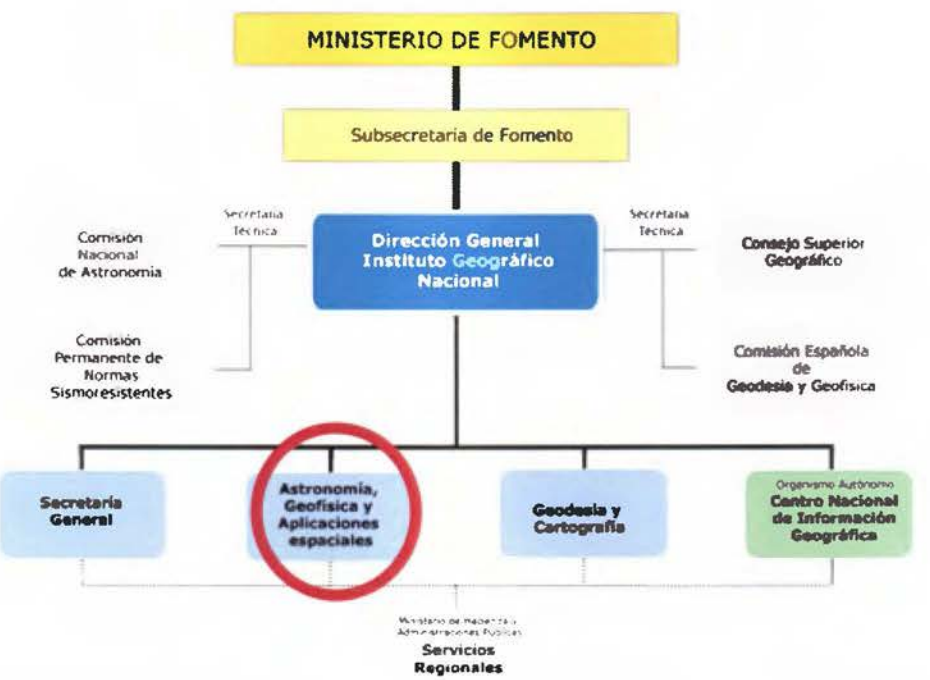


Figura 7. Organigrama del Inst. Geog. Nacional de España con su apartado de Astronomía, Geofísica y aplicaciones espaciales

Fuente: http://www.ign.es/ign/layoutIn/acercaFunciones.do

2.3 *Métodos geofísicos*

Los métodos geofísicos se pueden usar para determinar indirectamente la profundidad y la naturaleza de los materiales geológicos debajo de la superficie. Se puede determinar el espesor de los materiales superficiales no consolidados, la profundidad del nivel freático, la ubicación de las fallas del subsuelo, y la profundidad de las rocas del basamento (Fetter, 2000).

A continuación, se presentan los principales conceptos de los métodos geoeléctricos y sísmicos empleados:

a- Geoeléctrica

Arias (2007), indica que la geoeléctrica es uno de los métodos geofísicos de prospección con mayor difusión y aplicación en las Ciencias de la Tierra. Consiste en la inyección de corriente eléctrica (I) al subsuelo y a partir del potencial (ΔV) generado en el mismo se determina la resistencia (R) del suelo. Este valor de resistencia es transformado a un valor de resistividad aparente (R_a), a partir de una constante geométrica (k) cuya magnitud dependerá del dispositivo empleado y de la separación de los electrodos, tanto de inyección de corriente (A, B) como de medición del potencial (M, N). La fórmula matemática utilizada para calcular la resistividad aparente del medio investigado para una determinada profundidad es la siguiente:

$$\rho_a = k\frac{\Delta v}{I}$$

Ecuación 1. Cálculo de la resistividad aparente

Donde:

ρ_a : resistividad aparente (Ohmio-metro),

ΔV: diferencia de potencial (Voltio),

I: intensidad de corriente (Amperios),

K: coeficiente geométrico,

El sondeo eléctrico vertical (SEV) utiliza cuatro electrodos geoeléctricos (A, B, M, N), los cuales dependiendo de su ubicación y distancia dan origen a los diversos dispositivos existentes. En estos sondeos, el centro del dispositivo de los electrodos es fijo y el espaciamiento entre ellos va aumentando para obtener información a mayor profundidad (Arias, 2007).

En esta investigación se decidió aplicar este tipo de métodos, pero en configuración tomográfica, ya que con ellos se obtienen buenos resultados al definir capas subterráneas en medios con altos contrastes de conductividad eléctrica. Es de esperar que las capas de desechos presenten una concentración relativamente elevada de sales y sólidos totales disueltos, que favorecerá una alta conductividad del medio. En contraparte, se espera que la conductividad eléctrica sea más baja en las zonas con ausencia de desechos.

El dispositivo Schlumberger (Figura 4) consta de dos electrodos (M y N) que miden la diferencia de potencial "mV" (en milivoltios), los cuales, están ubicados en medio de otros dos electrodos (A y B) en los que se inyecta la corriente "I" (en miliamperios). La relación AB / MN debe ser lo más grande posible, cumpliéndose que AB debe ser al menos de cuatro a veinte veces mayor que MN. (Arias, 2002).

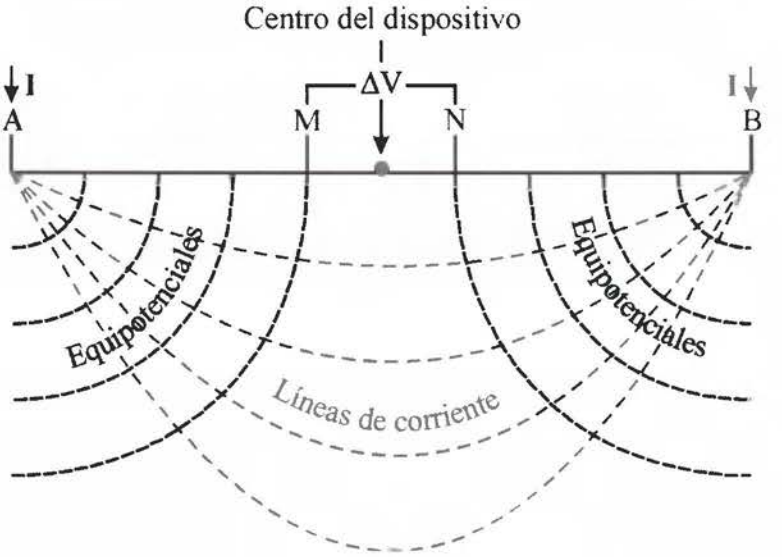


Figura 8. Esquema General del Dispositivo Schlumberger. Dibujo: Zúñiga (2012)

La profundidad a la que se realiza el sondeo está en parte, en función de la separación AB, del medio y de la corriente, por lo que el procedimiento habitual contempla desplazamientos simétricos de A y B, los cuales han sido definidos previamente. La separación entre los electrodos M y N se mantiene constante, y solo debe aumentarse dicha separación cuando medir la diferencia de potencial se torna difícil. El aspecto más importante en este dispositivo es mantener un voltaje suficientemente grande para ser medido, ya que a conforme aumenta la separación entre A y B, la diferencia de potencial disminuye. (Arias, 2002)

La tomografía eléctrica es un modelo 2D con adquisición de valores de resistividad aparente, utilizando dispositivos de electrodos comunes como Schlumberger, Wenner y Dipolo-Dipolo. Con las mediciones realizadas en una tomografía eléctrica, se amplía la cantidad de información obtenida, ya que no solo se toma datos bajo un punto sino que además permite tener medidas laterales al mismo (Ravelo, 2007).

b- Prospección sísmica

Pinto (2011) indica que en el método sísmico se provocan perturbaciones dinámicas artificiales (martillo, explosivo, etc.) en la superficie del terreno. Estas perturbaciones originan ondas elásticas, longitudinales y transversales que se registran en pequeños detectores o geófonos. La medición y registro de los intervalos de tiempo que transcurren desde que se genera el impulso hasta su recepción en los geófonos colocados a diferentes distancias crea un sismograma; del cual se compone un posteriormente esto permite construir una gráfica de tiempo-distancia conocida como dromocrónica que permite determinar la velocidad de propagación de las ondas en el terreno. Mediante estas velocidades también es posible obtener propiedades de interés geotécnico como son: Velocidad de onda p (v_p), Constante elástica del módulo de Young (E), Coeficiente de Poisson (μ) y módulo de cortante o cizalla (V_s)

La prospección sísmica analiza la característica petrofísica de elasticidad de las rocas. Kirsch (2009) expone que esta técnica es una de las más usadas para investigar a diversas profundidades, ha sido utilizada para exploraciones petroleras, pero también en capas subterráneas someras para exploración de aguas subterráneas y estructuras geológicas.

Milsom (2003) indica que las ondas sísmicas son similares a la energía acústica trasmitida por las vibraciones en las partículas de las rocas, conforme aumenta su energía, las rocas pueden fracturase.

Según Milsom (2003), existen dos grupos de ondas sísmicas, las profundas (que se subdividen en ondas P y S) y las superficiales (las cuales son Rayleigh y Love) (Figura 9. Esquema de los tipos de propagación de ondas sísmicas.).

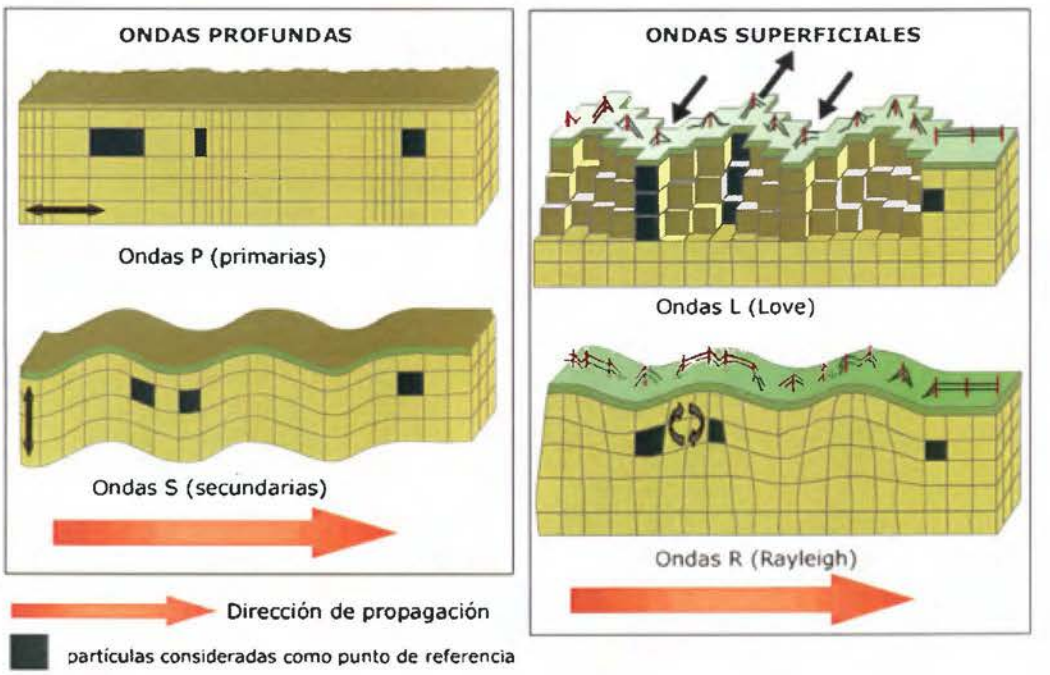


Figura 9. Esquema de los tipos de propagación de ondas sísmicas.

Tomado de www.cienciasfera.com

<u>Ondas profundas (P y S):</u> Las ondas P y S viajan a diferente velocidad y, por tanto, sus tiempos de llegada a la misma estación son diferentes. Las ondas P son más rápidas y llegan primero, las ondas S viajan a menor que la velocidad de las P y por eso llegan después, a continuación, se detalla cada una:

Ondas de Compresión (P): Estas ondas se caracterizan por tener una dirección longitudinal y está relacionada con las constantes elásticas y la densidad. Para estas ondas compresionales se puede conocer su velocidad (v_p) de acuerdo a la constante elástica del módulo de Young (E_s), el Coeficiente de Poisson (μ_s), la aceleración debido a la gravedad (g) y peso específico del medio (Braja 2004).

$$v_p = \sqrt{\frac{E_s}{(\frac{\gamma}{g})} \frac{(1-\mu)}{(1-2)(1+\mu)}}$$

Donde:

v_p: Velocidad de onda de compresión P (m/s)
E: Constante elástica del módulo de Young (MPa)
μ: Coeficiente de Poisson
g : la aceleración debido a la gravedad (m/s^2)
γ : peso específico del medio (kN/m^3)

Las ondas de corte, cizalla, trasversales o secundarias (S): son ondas donde los movimientos trasversales o perpendiculares a la dirección del movimiento. El cálculo de velocidad lo expone Braja (2004) de la siguiente manera:

$$G = \rho V_s^2$$

Dónde:

G= módulo de cortante (MPa)

V_s= Velocidad de onda cortante o de cizalla S (m/s)

ρ= Densidad del medio (kg/m^3)

Ondas de Superficiales: Las ondas superficiales presentan valores de velocidad muy bajos y en la prospección sísmica por lo general son agrupadas como efecto del suelo. Estas ondas se subdividen en:

- **Ondas Superficiales de Rayleigh:** Son ondas superficiales donde las partículas se propagan en un movimiento elíptico, pero son mucho más lentas que las ondas profundas (P y S).
- **Ondas Superficiales tipo Love:** También ondas superficiales muy lentas y son similares a las de cizalla. En el caso de los terremotos, estas suelen ser las más dañinas para la infraestructura antrópica.

En la geofísica sísmica se presentan dos tipos de análisis de ondas, por reflexión y por refracción. Cuando una onda sísmica encuentra una interface entre dos tipos de roca, parte de la energía es reflectada a la superficie y el resto continúa viajando, pero en un ángulo diferente. (Figura 10)

La Ley de reflexión se basa en que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Mientras que la refracción se basa en la Ley de Snell, donde relaciona los ángulos de incidencia (i_1) y refracción (i_2) en el punto de contacto (Milsom 2003) con respecto a las velocidades en un sitio de transición de litologías con densidades diferentes.

En la Figura 10. Refracción de una onda símica emitida desde la superficie., se aprecia como en el punto A se emite un disparo, el cual genera perturbaciones de ondas sísmicas que se pueden medir en los puntos B, C, D y dependiendo de los estratos que atraviesen, así se tienen cambios de velocidad ($V_1>V_2>V_3$).

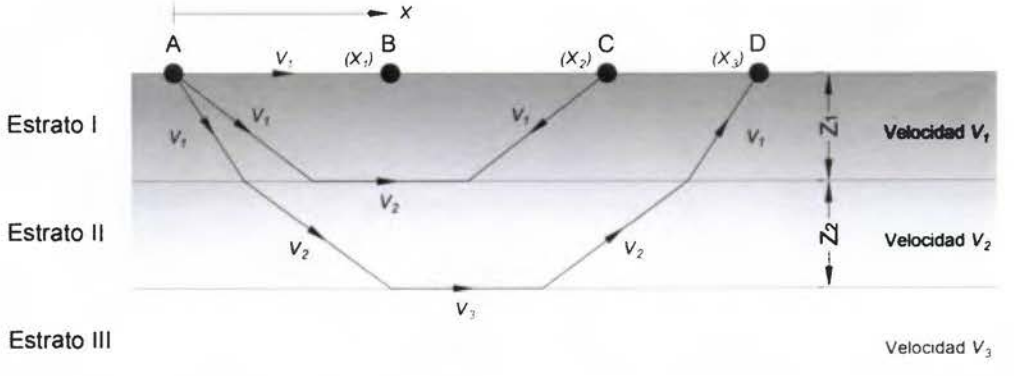


Figura 10. Refracción de una onda símica emitida desde la superficie. Tomado de Braja (2004)

La velocidad de propagación de las ondas P depende en gran medida de la porosidad y la saturación de agua de los sedimentos (Kirsh 2009). La velocidad de las ondas S o el módulo de cizalla están determinadas principalmente por la rigidez de la roca matriz. En consecuencia, tanto las velocidades de onda S y P dependen significativamente en la densidad de fractura de rocas. Por tanto investigaciones sísmicas pueden contribuir básicamente en lo que respecta a diferentes investigaciones hidrogeológicas, determinar el marco estructural y litológico de estudios en las ciencias ambientales y para cuantificar la heterogeneidad del medio.

Según Arias (2010), se requiere de una fuente sísmica (dispositivo emisor) unos geófonos (dispositivo receptor) y un laboratorio de procesamiento numérico. Los geófonos tienen frecuencias bajas del orden de 8, 15 ó 30 Hz, sin embargo para las adquisiciones de alta resolución se pueden utilizar geofónos de 100 Hz, tradicionalmente estos geófonos son del tipo vertical, sin embargo es igual mente posible utilizar los geófonos de dos o tres componentes. (Figura 11. Esquema conceptual del proceso de realización de un perfil de refracción sísmica.

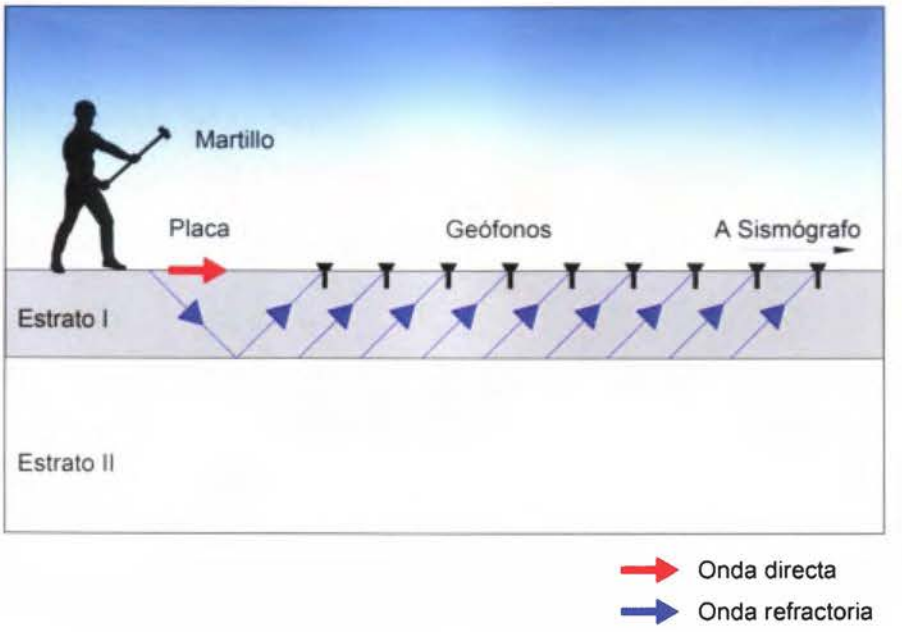


Figura 11. Esquema conceptual del proceso de realización de un perfil de refracción sísmica.

En Costa Rica ya existe el precedente del uso de herramientas de sensores remotos no invasivos en rellenos sanitarios. Por ejemplo, INGEOFICA 2000 S.A (2001) realizó tres perfiles de refracción sísmica de 110m cada uno, con el objetivo de evaluar las condiciones geológicas-geotécnicas en el Relleno Sanitario Río Azul; determinando a su vez, los espesores de suelo y de desechos, así como la profundidad del sustrato rocoso.

En general, la roca basal tiene su techo a los 25m de profundidad y sus características de fuerte alteración se reflejan en la relativa baja velocidad de 1,7 km/s, mientras que la capa desechos tiene velocidades muy bajas 0,4 km/s .

Una de las limitantes la sísmica de refracción es que sólo funciona cuando la velocidad de propagación de las ondas aumenta con la profundidad. Lo que significa que si un estrato subyacente es de baja velocidad no se va a ver, y se llama el efecto de la capa ciega.

El contraste de velocidad entre estratos y su espesor, debe ser suficientemente alto para que puedan ser representados con claridad en las domocrónicas y en general, el modelo sísmico refractivo. Mundialmente, se han utilizado las velocidades sísmicas para inferir características geotécnicas, como por ejemplo los tipos de suelo definidos por el Programa Nacional de Reducción de Amenazas por Sismos de Estados Unidos (NEHRP 2016) y localmente, se tiene el Código Sísmico de Costa Rica CSCR-2010 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Velocidades de onda sísmica de corte y su correlación de tipo de suelo

Programa Nacional de Reducción de Amenazas por Sismos de Estados Unidos (NEHRP)			**Código Sísmico de Costa Rica (CSCR-2010)**		
Clase de suelo	Características del suelo	Rango Vs30* (m/s)	Sitio de cimentación	Características del suelo	Rango Vs30 (m/s)
A	Roca dura	≥ 1500			
B	Roca	760-1500	S_1	Roca o suelo rígido o denso	≥ 760
C	Suelo muy denso y roca suave	360-760	S_2	Medianamente denso a denso o medianamente rígido a rígido	350 a 750
D	Suelo firme a medio	180-360	S_3	6-12m de arcilla de consistencia de suave a medianamente rígida o con más de 6 m de suelos no cohesivos de poca a media densidad	180 a 350
E	Suelo blando	30-180	S_4	Más de 12 m de arcilla suave.	180

Fuente: NEHRP (2016), Código Sísmico de Costa Rica (2010)

**V_s30= Velocidad cortante o secundaria a 30mbns.*

El coeficiente de Poisson es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e

isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

El módulo de elasticidad transversal, también llamado módulo de cizalla (G), es una constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico (lineal e isótropo) cuando se aplican esfuerzos cortantes. También conocido como módulo de rigidez transversal o módulo de corte.

Tanto el módulo de Elasticidad de Young (E) como el módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G) y el coeficiente de Poisson (μ) fueron estimados despejando la variable correspondiente tal como se muestra en las siguientes relaciones:

$$E = (V_S^2)(2\rho)(1+\mu)$$

donde:

E = Constante elástica del módulo de Young (MPa)

V_S = Velocidad de onda cortante o de cizalla S (m/s)

ρ = Densidad del medio (kg/m^3)

μ = Coeficiente de Poisson

$$G = \rho.(V_S)^2$$

donde:

G = Módulo de cortante (MPa)

V_S = Velocidad de onda cortante o de cizalla S (m/s)

ρ = Densidad del medio (kg/m^3)

$$\frac{(V_P)^2}{(V_S)^2} = 2\frac{(1-\mu)}{(1-2\mu)}$$

donde:

V_P = Velocidad de onda de compresión P (m/s)

V_S = Velocidad de onda cortante o de cizalla S (m/s)

μ = Coeficiente de Poisson

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

Para realizar este proyecto bajo el método científico, se elaboró una metodología que se subdivide en cuatro etapas, la primera corresponde a la revisión bibliografía, una caracterización general del área en estudio, posteriormente la captura de datos, procesamiento y análisis de resultados, para finalmente realizar las conclusiones y recomendaciones. Esto se representa en forma de mapa conceptual en la Figura 12.

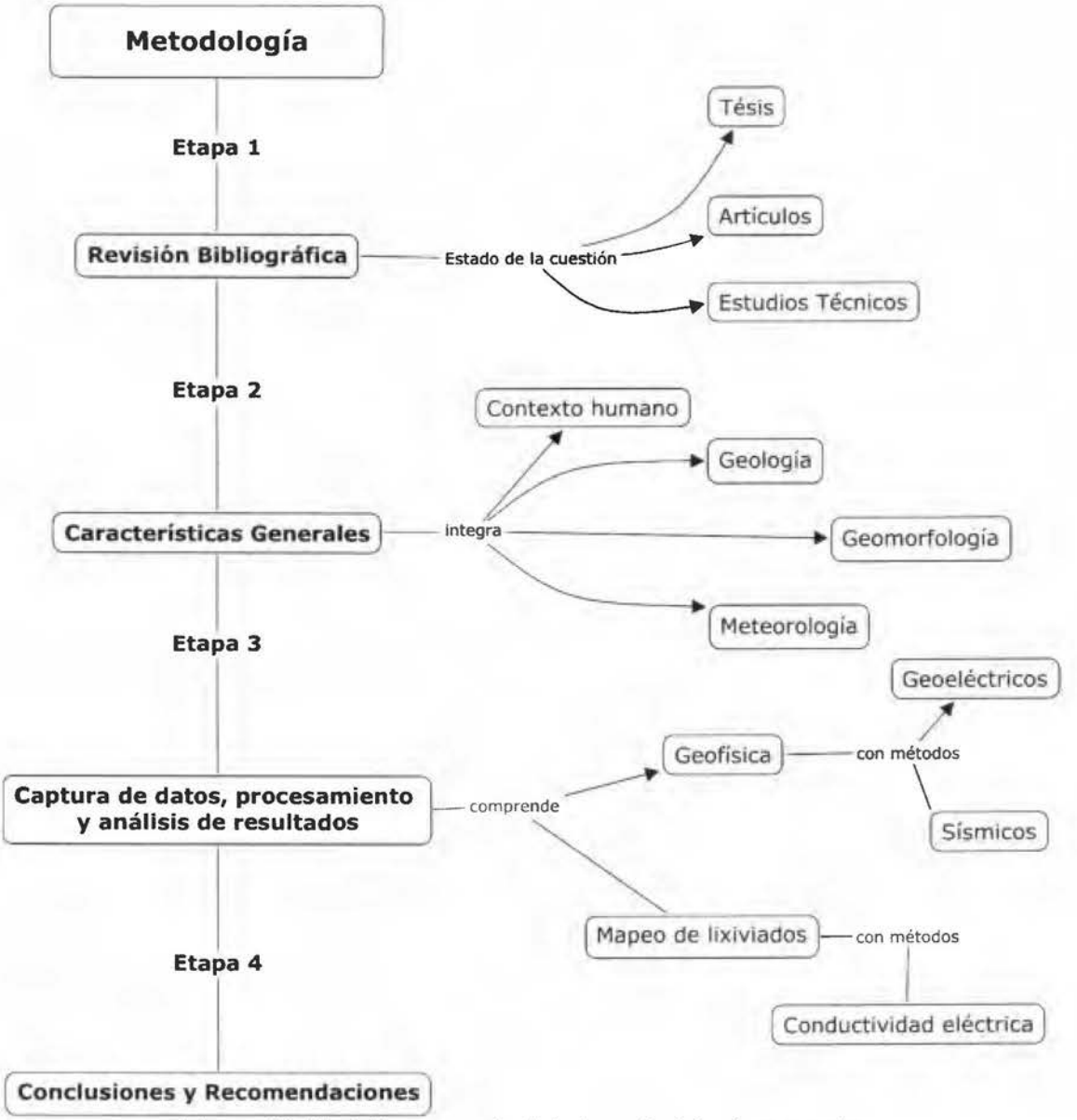


Figura 12. Modelo conceptual de la metodología a seguir.

3.1 Etapa 1: Recopilación y análisis de Información bibliográfica

Se realizó una recopilación y análisis de la información existente en cuanto a geología, geomorfología y meteorología con el objetivo de seleccionarla y valorarla para tener una línea base sobre la cual trabajar. Se utilizaron las Hojas Cartográficas Nacionales Naranjo y Miramar a escala 1:50,000 del IGN; así como la cartografía 1:5000 del Plan de Regularización de Registro y Catastro de Costa Rica (PRCR) para elaborar las características cartográficas básicas del área de estudio, específicamente carreteras, curvas de nivel cada 10 metros, ríos y ortofotografía aérea del año2005.

3.2 Etapa 2: Caracterización general

3.2.1 Información del contexto humano

El paradigma de la gestión de territorial por medio de cuencas hidrográficas, supone que las acciones que se realicen aguas arriba de la cuenca, pueden afectar a los poblados que se ubican aguas abajo. Por ello, es de interés conocer las poblaciones que se ubican aguas debajo de la microcuenca y cuenca, para poder advertir y mitigar una potencial contaminación de las aguas superficiales y subterráneas proveniente del Relleno Sanitario San Ramón.

Para ello se investigó en sobre los últimos estudios realizados en gestión de la cuenca hidrográfica del río Barranca, así como sus datos derivados de Unidades Censales Mínimas del censo INEC 2011.

Para obtener datos de concesiones de agua en la cuenca del Barranca se investigó con la base de datos de la Dirección de Aguas del MINAE y el Instituto de Acueductos y Alcantarillados. El objetivo fue conocer la cantidad de personas que consumen agua superficial del río Barranca, así como de su acuífero aluvional.

3.2.2 Información geológica

Para el área de estudio se definieron las unidades geológicas a escala regional y local, basado en estudios previos y en la información recolectada en las giras de campo realizadas con geólogos del Centro de Investigaciones Geológicas (CICG). Se identificaron afloramientos de rocas en la superficie, se muestrearon y se realizaron dos secciones delgadas para generar el análisis petrográfico. Posteriormente se procedió a plasmar la información en mapas geológicos.

Los geólogos profesionales que colaboraron en la parte del estudio relacionado con los análisis petrográficos y de identificación de afloramientos son: M.SC Héctor Zúñiga, asesor de tesis; M.Sc Mario Arias, Contraparte del CICG; Bachilleres en Geología Carolina Suárez y Dennis Sojo.

3.2.3 Información geomorfológica

Con base en las giras de campo y la información proporcionada por la hoja Geomorfológica Naranjo del IGN (Bergoeing & Malavassi, 1981), el mapa Geomorfología Regional de Costa Rica de Bergoeing, J. P. (2014) y Geomorfología del área de Palmares, San Ramón, Cerro Espirítu Santo, Costa Rica de Bergoeing, J., & Masís, R. (2013); se realizó una descripción general de los procesos geodinámicos regionales y locales de la zona de estudio, los cuales permitirán explicar el modelado del rasgo morfoestructural en ambas escalas.

Una vez descritas las unidades geomorfológicas adoptadas por el relieve del área de estudio, se elaboró un mapa geomorfológico a escala local empleando para ello restitución de fotografías aéreas, un modelo de elevación digital, pendientes y sombreado de montañas a través de sistemas de información geográfica basado en el mapa geomorfológico de Bergeoeing, J & Masís R. (2013) escala 1:10000. Esto porque este mapa de referencia no cubre el área de proyecto y se debía entonces generar la información local.

3.2.4 Información meteorológica

Se empleó el modelo de precipitaciones calculado por Birkel (2016) para el cálculo de la variable de precipitación promedio total anual, debido a que es uno de los modelos más actualizados y científicamente robustos. Para los demás valores mensuales, se recolectaron los datos actualizados de las variables de precipitación, de las estaciones administradas por el Instituto Meteorológico Nacional en un radio de 6km del proyecto.

3.3 Etapa 3: Captura de datos, procesamiento y análisis de resultados

3.2.1 Análisis e interpretación de sondeo eléctrico vertical

Para conocer la firma de resistividad eléctrica de la litología natural que se comporta como basamento relativo para las capas de desechos, se realizó un sondeo eléctrico vertical (SEV) en configuración Schlumberger. Para ello se utilizó el equipo SYSCAL PLUS de Iris Instruments (propiedad del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de Universidad de Costa Rica) a una apertura de AB/2 de 30m.

3.2.2 Análisis e interpretación de tomografías geoeléctricas

Para caracterizar el perfil de forma detallada del Relleno Sanitario de San Ramón (RSSR), se recurrió al método geoeléctrico para determinar la configuración espacial de los materiales que lo conforman, así como los límites verticales y horizontales del basamento. En tal sentido, se realizaron tres tomografías eléctricas en configuración Schlumberger, las cuales están distribuidas estratégicamente en el relleno sanitario. La exploración se realiza con el equipo

SYSCAL PLUS de Iris Instruments (propiedad del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de Universidad de Costa Rica) con un espaciado de 5m de cada electrodo y una distancia horizontal de 190 a 450 metros a una profundidad de exploración entre 37 y 50 metros.

Los datos geoeléctricos derivados de las tomografías fueron analizados e interpretados con el software libre especializado Res2D para generar perfiles en 2D, proporcionando información continua de los estratos que conforman el relleno sanitario

3.2.3 Análisis e interpretación de perfiles sísmicos

La geometría de los desechos en cuanto a sus propiedades sísmicas se realizó mediante 2 perfiles sísmicos: uno para exploración en nuevos sitios y otro, para corroborar los datos de la tomografía eléctrica. La captación de datos en campo se llevó a cabo con el sismógrafo de exploración StrataVisorTM NZXP, Geometrics con 24 geófonos espaciados a 2 metros entre sí. El procesamiento de datos se realizó con el programa Pickwin para seleccionar la onda de arribo, el proceso de elaboración de las domocrónicas y modelado de los perfiles se ejecutó con el programa PlotTefra del CICG, UCR y finalmente, editado en AutoCad 2015, UCR.

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Desde el punto de vista ambiental, el Relleno Sanitario representa una amenaza potencial como foco de contaminación de aguas superficiales y subterráneas, por ello se considera el análisis de cuenca como un elemento básico para la mitigación y prevención del recurso hídrico que es aprovechado por poblaciones a lo largo de su cuenca.

El proyecto del Relleno Sanitario de San Ramón se encuentra en la cuenca del río Barranca. Esta cuenca área total de la cuenca es de 479,60 km^2 y administrativamente incorpora las provincias de Alajuela y Puntarenas; en los cantones de San Ramón, Naranjo en la provincia de Alajuela y Esparza, Montes de Oro y Puntarenas de la provincia de Puntarenas.

4.1 Contexto humano

Desde el punto de vista de la geografía ambiental, la unidad de cuenca se considera un elemento básico en la interpretación de las relaciones humanas y su medio ambiente; por ello se ha delimitado la microcuenca de la quebrada "Sin Nombre" que atraviesa el Relleno Sanitario de San Ramón. En la Figura 13. Poblados cercanos y delimitación de microcuenca del Relleno Sanitario San Ramón. del área en estudio.

El paradigma de la gestión de territorial por medio de cuencas hidrográficas, supone que las acciones que se realicen aguas arriba de la cuenca, pueden afectar a los poblados que se ubican aguas abajo. Por ello, es de interés conocer las poblaciones que se ubican aguas debajo de la microcuenca y cuenca, para poder advertir y mitigar una potencial contaminación de las aguas superficiales y subterráneas proveniente del Relleno Sanitario San Ramón.

De acuerdo a la delimitación cartográfica de la microcuenca a escala 1:10.000 con curvas de nivel cada 10m, se cuantificó su área en 44,9 ha y se notifica que, dentro de la misma, no existen barrios o pueblos, únicamente dos casas de habitación que se encuentran muy cerca de la divisoria de aguas en la ladera Suroeste y noroeste aguas abajo del RSSR (Figura 13). El uso del suelo de uso antrópico está compuesto por el Relleno Sanitario (6,8 ha), así como cultivos de café y plátano (18,8ha) seguidos de bosques secundarios en recuperación (8,4ha), el resto son pastos y matorrales (7,2 ha). El poblado más cercano lleva por nombre Bolívar y se ubica a 1500m de la entrada del RSSR y se ubica en otra microcuenca al suroeste. La ciudad de San Ramón se ubica a 750m y también se ubica otra cuenca, específicamente en la cuenca Río Grande de Tárcoles. Estos barrios se van a ver beneficiados con el cierre técnico del Relleno principalmente en que va a detenerse el flujo de camiones recolectores de desechos en las rutas hacia el RSSR. Sin embargo, es necesario cambiar de escala y visualizar la cuenca del Río Barranca en la cual descargan las aguas superficiales con lixiviados provenientes del Relleno Sanitario. Para poder analizar la población que verdaderamente podría verse afectada negativamente a pesar el cierre técnico del RSSR, donde los lixiviados residuales descargan sus aguas sin previo tratamiento al río Barranca. Para ello se realizó el mapa de la Figura 14, donde se ubica la cuenca, los principales poblados, las concesiones de agua y las fuentes de ASADAS y AYA.

Chaves, Ramírez & Zeledón 1991, fueron geógrafos que realizaron su tesis sobre un diagnóstico de los recursos naturales de la cuenca del río Barranca: Ramírez ya que denotaron su importancia estratégica para la región y el país, posteriormente, Ramírez (1991) se enfocó en la importancia de la cuenca del Río Barranca respecto a la captación de agua superficial del AYA para abastecer a parte de la ciudad de Puntarenas. En la actualidad, según el más reciente y novedoso estudio sobre gestión de cuenca es el realizado por Catie (2015) para SINAC, MINAE, indican que la población en la cuenca es de 83.323 personas según información de Unidades Geoestadísticas Mínimas (UGM) del Instituto de Estadística y Censos (INEC) del Censo 2011. La concentración de población se

presenta en las zonas cercanas a los principales centros urbanos como San Ramón y Esparza.

La Universidad Catie (2015) también cuantificó que en cuanto a la densidad de población en la cuenca es de 173,7 hab/km^2. La distribución de población a nivel cantonal para San Ramón es de 75% rural y 25% urbana, los datos para Naranjo son 53,9% urbano y 46,1% rural. Para el cantón de Puntarenas únicamente un 4,25% de población es rural, y para El Roble se tiene que el 100% de población es urbana, lo que señala un paisaje geográfico diverso en cuanto a población urbana y rural.

Abastecimiento de agua potable

El análisis realizado por Catie (2015) según datos del INEC, el 94% de la población de la cuenca cuenta con abastecimiento de agua potable tratada. La mejor condición la tiene el cantón de Naranjo con 99,3%, seguido de Esparza 97,7%, San Ramón 95%, Montes de Oro 94,9% y en menor porcentaje Puntarenas con 94% de población cubierta. El abastecimiento de agua para consumo humano en la cuenca esta suministrada por 156 entes operadores, el AyA y la Municipalidad de Naranjo, esta última extrae el agua de la Zona Protectora El Chayote. De los entes operadores en mención, aún hay un porcentaje (al menos un 4%) que no da tratamiento/cloración a su sistema de acueducto.

Estos datos llaman la atención, que la población está abasteciendo su necesidad hídrica con recursos hídricos dentro de la misma cuenca hidrográfica del río Barranca. Por ello, existe una población que potencialmente podría verse afectada por la contaminación de lixiviados en aguas superficiales y subterráneas.

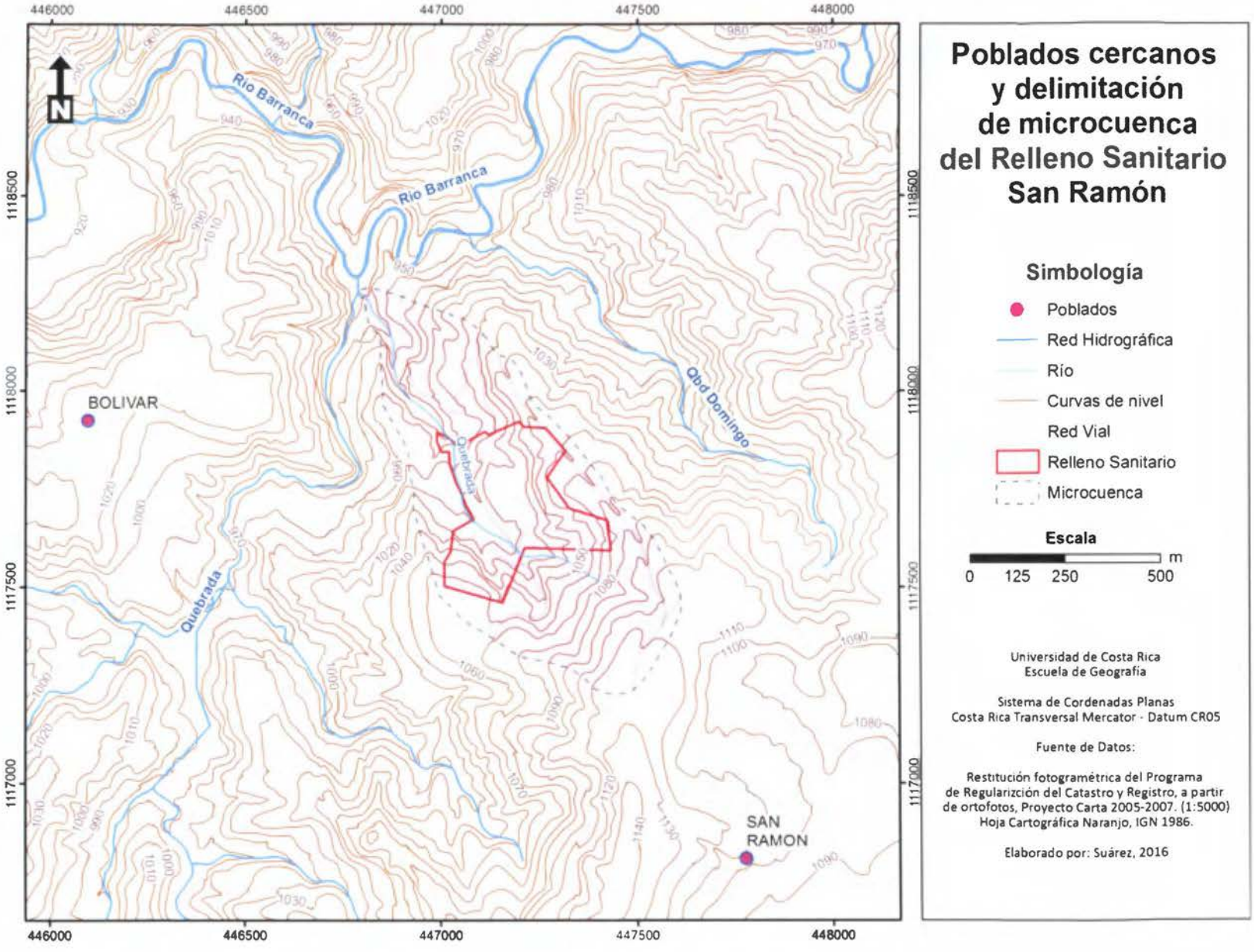


Figura 13. Poblados cercanos y delimitación de microcuenca del Relleno Sanitario San Ramón.

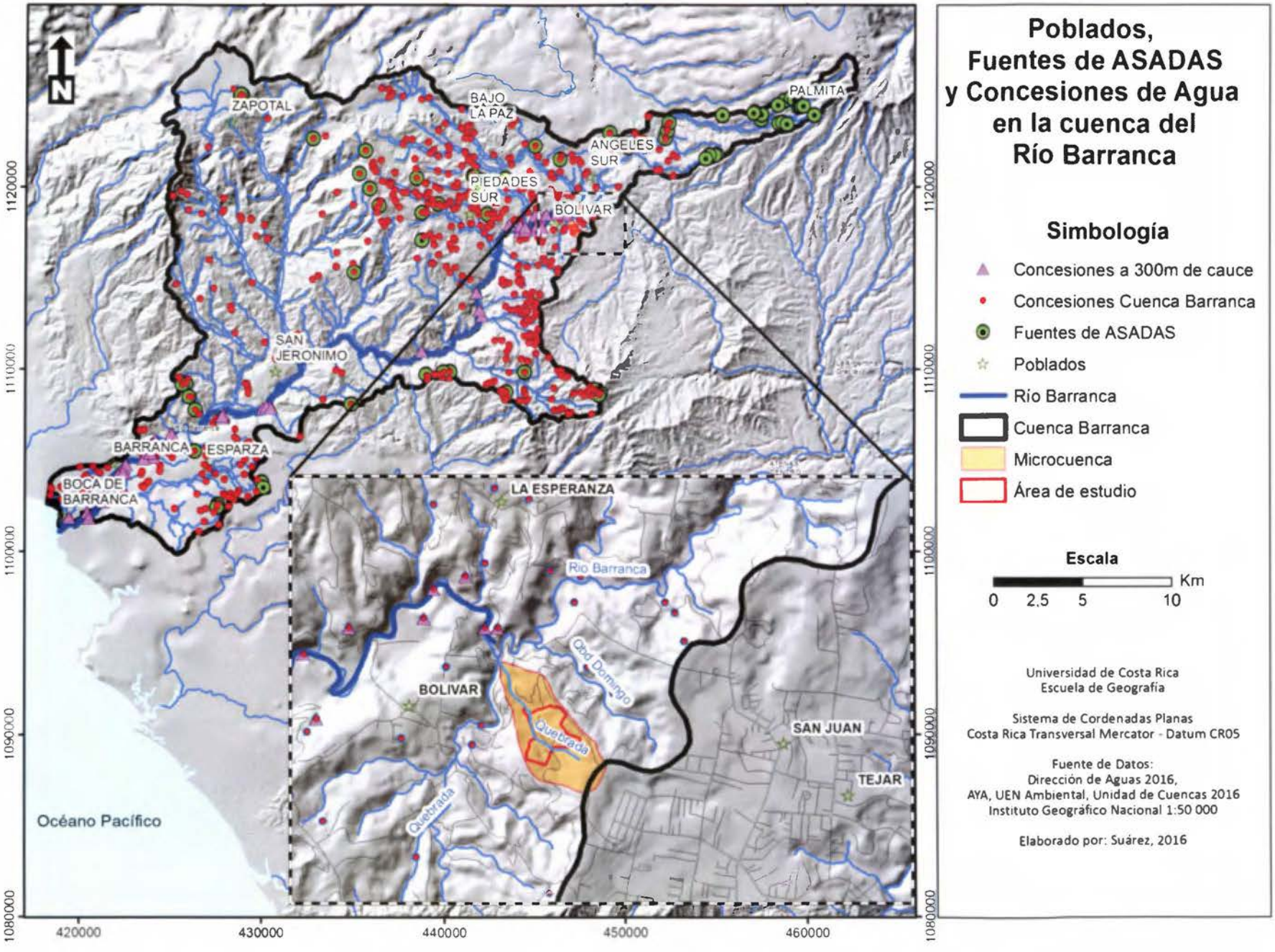


Figura 14. Poblados, fuentes de ASADAS y concesiones de agua en la cuenca del río Barranca.

Población potencialmente afectada por contaminación de lixiviados en aguas superficiales y subterráneas

La población que potencialmente se podría ver afectada por una posible contaminación de lixiviados en las aguas superficiales y subterráneas proveniente del Relleno Sanitario son las personas aprovechan el agua del río Barranca y de su acuífero aluvional. Para definir esta población se recurrió a la base de datos de la Dirección de Aguas del MINAE, donde se tienen anotadas las concesiones de agua registradas, así como su propietario y su uso y caudal en la mayoría de los casos.

Se realizó un análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica se seleccionaron por localización todos los expedientes ubicados a menos de 300m de distancia del Río Barranca (Figura 14), considerando que se obtendría la información de concesiones de agua superficial y de pozos en acuíferos aluvionales del río Barranca que potencialmente puede tener una relación hidráulica de efluencia e influencia río-acuífero. En total se cuantificaron la existencia de 58 expedientes, de los cuales 19 son pozos y 10 son nacientes que captan agua subterránea de los acuíferos y otros 29 son captaciones de agua superficial en el río Barranca y quebradas.

Resalta que 22 concesiones pertenecen al AYA, quien toma el agua para abastecimiento poblacional de los cuales 21 son pozos y una captación superficial. Algunos de nombre de los pozos son: Marañonal 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10, Pocamar 1,2, 3, MI66, MI68, BC-84, 03-21, 03-22. 20745

Respeto a los pozos Marañonal, AyA indica que se tiene un registro de caudal de 82 l/s según AYA y se tienen más de 113 l/s y formar parte del sistema con abastecimiento para 5222 servicios del acueducto de Esparza.

Los pozos Pocamar tiene 28 l/s y abastece a 522 servicios en acueducto de los poblados Carmen Lyra, La Guaria y Mojoncito de Esparza. La única captación de agua superficial aguas abajo del RSSR es la toma sobre el río Barranca con un caudal de 320 l/s y abastece el 73% de los 20745 servicios abastecidos en los acueductos de Puntarenas Centro, Barranca, El Roble y Chacarita.

La nueva toma del AYA para abastecer parte de Palmares y San Ramón se ubica a 800m aguas arriba del sitio de confluencia de la quebrada sin nombre que drena la microcuenca donde se encuentra el relleno sanitario. De esta forma la captación de agua no se ve afectada por presencia de lixiviados en las aguas, pero las captaciones aguas abajo podrían estar en riesgo.

Con este estudio, se pretende detectar por medio de modelos en dos dimensiones la presencia de capas de desechos que puedan generar lixiviados y a su vez, un cartografiado de las descargas de lixiviados a las aguas superficiales, para sí proponer medidas de mitigación y prevención de contaminación a las captaciones de agua para abastimiento público y a11grícola.

4.2 Meteorología

Para el conocer la precipitación en el área de estudio, se analizó la estación meteorológica Para los demás valores mensuales, se recolectaron los datos actualizados de la estación Piedades Sur. (IMN 2015

Para la recopilación de información, se filtró espacialmente las estaciones pluviométricas cercanas en un radio de 6 kilómetros al área de estudio. De las cuales, solo la estación Piedades Sur tiene un periodo de registro confiable de 30 años, por tanto, se presenta resumen en el Cuadro 2. La subestación San Ramón no cumple con los requisitos mínimos, por ello se descartó. La distribución espacial de las estaciones se muestra en la Figura 16.

Cuadro 2. Datos de estación pluviométrica Piedades Sur.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m.s.n.m)	Precipitación promedio total anual (mm)	Periodo de registro
80-9 Piedades Sur,	10°07´	84°32´	1.020	2.933	1984-2013

Fuente: IMN (2015)

La estación Piedades Sur se caracteriza por presentar precipitaciones mensuales muy contrastantes, según la época seca o lluviosa. El periodo de

menores precipitaciones va de diciembre a abril (menores a 58 mm/mes), mientras que la época lluviosa se presenta a lo largo del resto del año (mayo-noviembre).

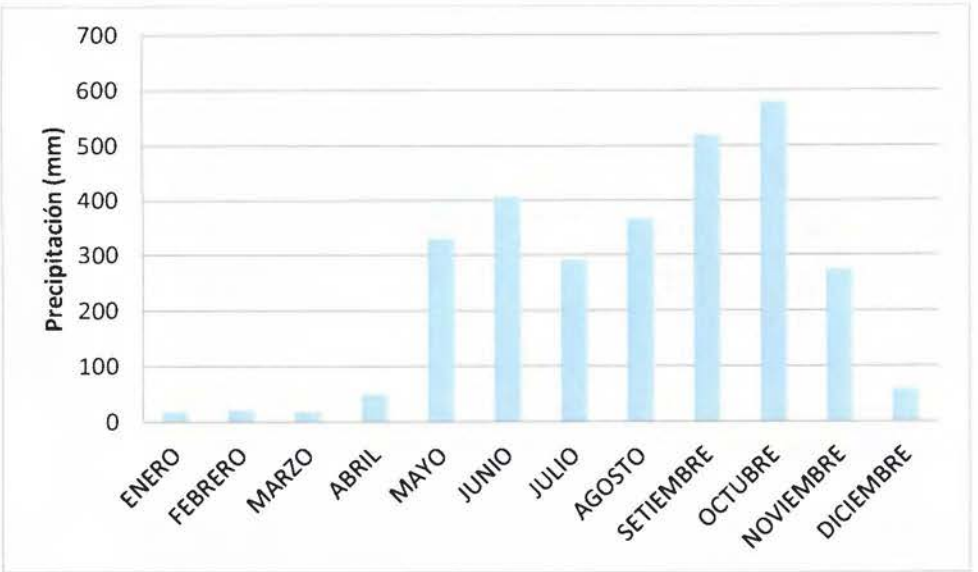


Figura 15. Promedio de precipitación mensual, para la estación Piedades Sur 1984-2013.

También se analizó el modelo de precipitaciones calculado por Sanchez & Birkel (2016) para el cálculo de la variable de precipitación promedio total anual la cual es de 2780mm anuales, el cual es uno de los modelos más actualizados y robustos de Costa Rica y lo cual coincide en general con los valores de 2933mm de la estación más cercana Piedades Sur del Instituto Meteorológico Nacional.

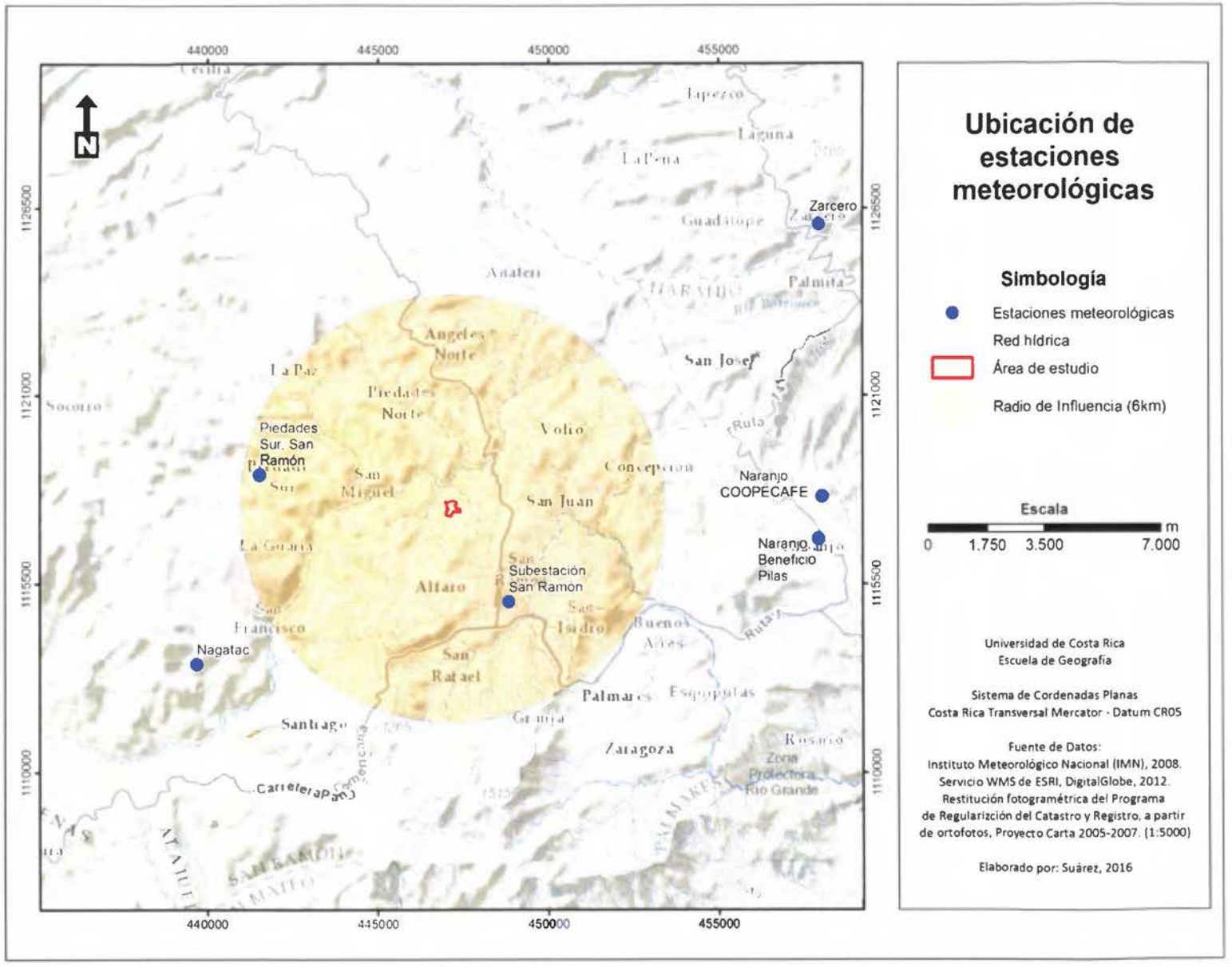


Figura 16. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas.

4.3 Geología

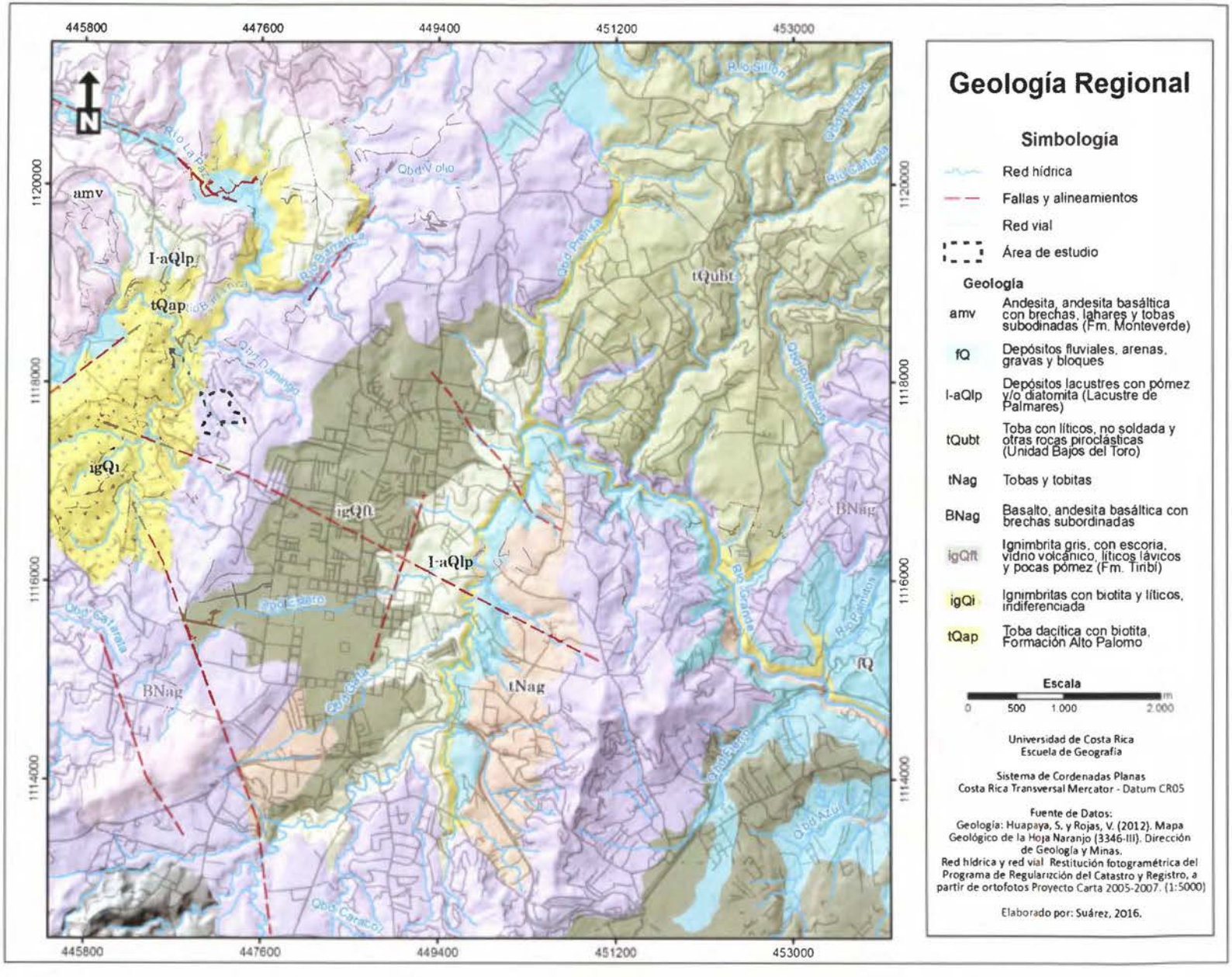
4.3.1 Geología Regional

De acuerdo con el mapa geológico de Costa Rica, escala 1:400000, de Denyer & Alvarado (2007) (**Figura 17**), tectónicamente, la zona de estudio se encuentra dentro de la región intra-arco, que tiene un basamento ígneo que corresponde con la zona de los Montes de Aguacate la cual consiste de magmatismo calco – alcalino del Neógeno. Específicamente la ciudad de San Ramón es de edad Mioceno y se identifica como Grupo Aguacate, se encuentra constituida por rocas volcánicas andesíticas y piroclásticas, que corresponden con un vulcanismo explosivo, anterior a la instauración del arco magmático actual (Denyer & Arias, 1991). Además, al suroeste afloran ignimbritas y tobas del Pleistoceno.

El Grupo Aguacate tiene una edad Mioceno - Plioceno, forma parte de un antiguo arco volcánico que está compuesto principalmente por lavas basálticas hasta basalto - andesíticas, rocas piroclásticas, brechas y sedimentos vulcanclásticos. Se caracteriza por la intensa alteración hidrotermal con coberturas de hasta 20 m de espesor, se caracteriza por su relieve pronunciado (Huapaya & Rojas (2012); Zacek et al. (2012))

Posteriormente entre e Pleistoceno y Holoceno se emplazó la actual Cordillera Volcánica Central, donde la influencia volcánica de la zona proviene del volcán Platanar, Porvenir y Poás, representada en la Formación Tiribí, ignimbritas indiferenciadas de Las Musas y la Formación Monteverde (Rojas, 2013).

La formación Monteverde está compuesta litológicamente por lavas andesíticas, andesíticas-basálticas y en menor porcentaje tobas (Rojas, 2013), forma una extensa plataforma producto de vulcanismo efusivo fisural ocurrido hace 2,1 a 1, Ma (Alvarado & Gans, 2012), el cual es estratigráficamente discordante al Grupo Aguacate (Zacek et al., 2012). Es de edad Pleistoceno Inferior.



Geología Regional

Simbología

- Red hídrica
- Fallas y alineamientos
- Red vial
- Área de estudio

Geología

amv	Andesita, andesita basáltica con brechas, lahares y tobas subodinadas (Fm. Monteverde)
fQ	Depósitos fluviales, arenas, gravas y bloques
I-aQlp	Depósitos lacustres con pómez y/o diatomita (Lacustre de Palmares)
tQubt	Toba con líticos, no soldada y otras rocas piroclásticas (Unidad Bajos del Toro)
tNag	Tobas y tobitas
BNag	Basalto, andesita basáltica con brechas subordinadas
igQft	Ignimbrita gris, con escoria, vidrio volcánico, líticos lávicos y pocas pómez (Fm. Tiribí)
igQi	Ignimbritas con biotita y líticos, indiferenciada
tQap	Toba dacítica con biotita, Formación Alto Palomo

Escala

0 500 1.000 2.000 m

Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía

Sistema de Cordenadas Planas
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05

Fuente de Datos:
Geología: Huapaya, S. y Rojas, V. (2012). Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (3346-III). Dirección de Geología y Minas.
Red hídrica y red vial Restitución fotogramétrica del Programa de Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)

Elaborado por: Suárez, 2016.

Figura 17. Mapa de geología regional

Las ignimbritas indiferenciadas de Las Musas, se localizan al oeste-noroeste del centro de San Ramón (principalmente Bolívar y alrededores) y se caracterizan por ser soldadas y en menor medida no soldadas. Sus colores característicos que *van de gris a* café, con líticos de lava milimétricos a centimétricos, además fragmentos y/o fiammes de pómez y abundantes cristales de biotita. Se le asigna una edad del Pleistoceno (Rojas, 2013).

La formación Tiribi, corresponde con flujos ignimbríticos compuestos por tobas soldadas con fragmentos de pómez negro y bombas que cubren gran parte del Valle Central, originados en un periodo de vulcanismo fuertemente explosivo, a lo largo de fisuras en la base de los volcanes actuales. Este mismo autor le asigna una edad del Pleistoceno.

La formación Alto Palomo, es descrita por Madrigal (1967) como pómez blanca grisácea a crema y fragmentos de lava andesítica centimétrica, más abundantes que la pómez. Posteriormente, Alvarado & Carr (1993), mencionan que se trata de flujos pumíticos, incluyendo flujos de ceniza, flujos de ceniza y bloques, tobas y aluviones locales de edad Pleistoceno.

4.3.2 Geología Local

De acuerdo con Denyer & Arias (1991), en el sitio se presenta el Grupo Aguacate y está conformado por dos formaciones; la inferior denominada Formación La Cruz y la superior designada como Formación Grifo Alto; dicha formación es la que aflora en el área de estudio. (Figura 18. Perfil Geológico)

La formación Grifo Alto, se encuentra constituida principalmente por rocas volcánicas andesíticas y piroclásticas, que corresponden con un vulcanismo explosivo, anterior a la instauración del arco magmático actual (Denyer & Arias, 1991). Esta formación conforma la mayor parte de los sistemas montañosos

alrededor del Lacustre de Palmares, con excepción del sector norte, en donde predominan las rocas volcánicas de la cordillera volcánica actual (Rojas, 2013).

Las rocas en el proyecto se caracterizan por tener una intensa alteración hidrotermal y presenta un horizonte de alteración de hasta 20 m de espesor. Al este se presenta un contacto con las lavas de la formación Tiribí y al oeste, con las Ignimbritas indiferencias La Musas.

En la Figura 18. Perfil Geológico se observan las diferentes litologías correlacionadas según los pozos A-339, NA-167 y NA-554, los cuales fueron obtenidos de la base de datos de SENARA (2015).

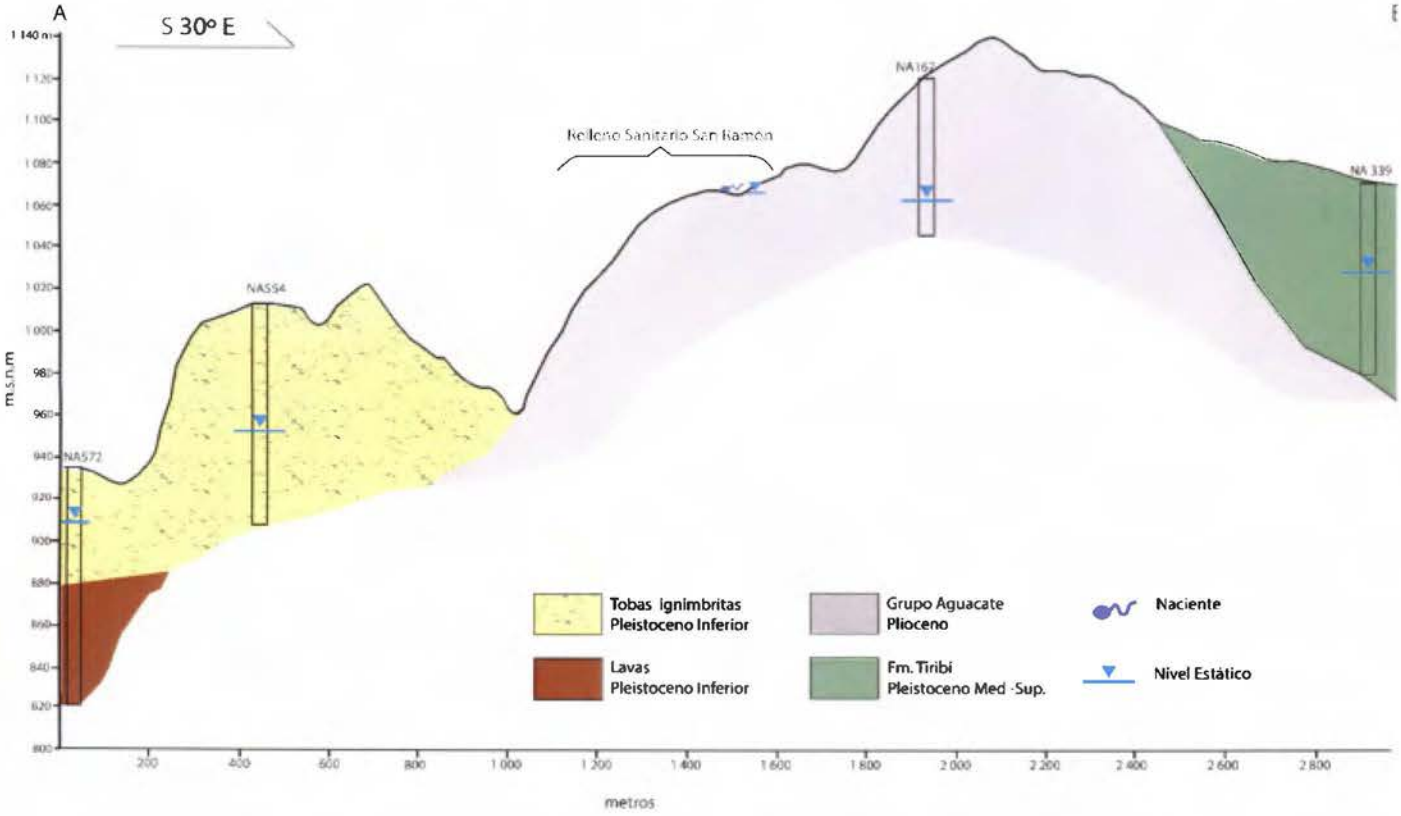


Figura 18. Perfil Geológico

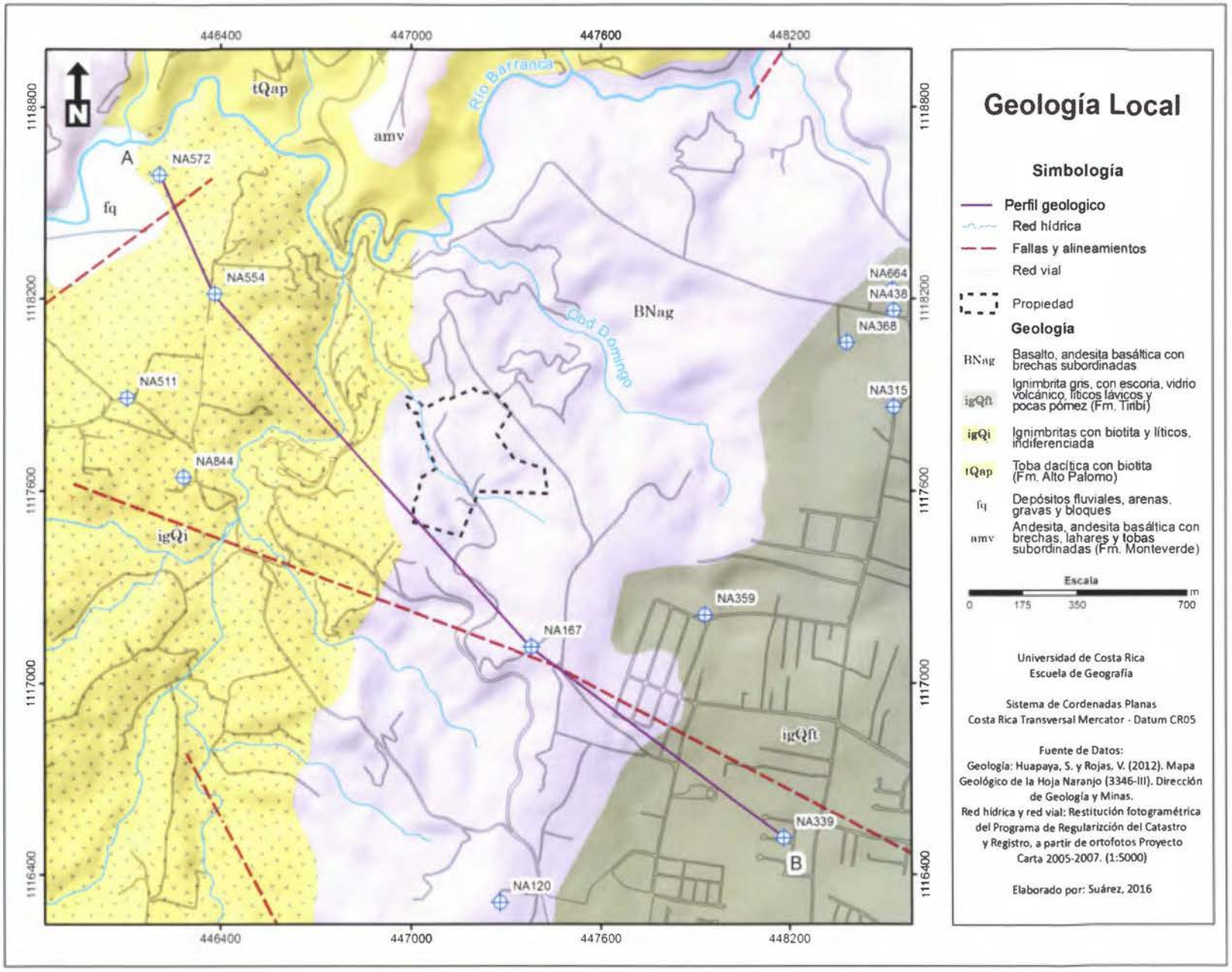


Figura 19. Mapa de geología local

A continuación se describen las muestras de las secciones delgadas RSSR-1 y RSSR-2 tomadas insitu del talud Este con afloramiento expuesto en las coordenadas CRTM05 447.250X, 1.117.706Y y 447.229X, 1.117.779Y respectivamente.

Los análisis petrográficos fueron realizados por la Geóloga Carolina Suárez (Fig.16) y revisados por el profesor M.Sc. Hector Zuñiga, analizados en el Centro de Investigaciones Geológicas.

Figura 20. Proceso de análisis de secciones delgadas. Geóloga Carolina Suárez

La muestra de código RSSR-1 (Fig. 17 y 18), es una roca volcánica retrabajada presenta fenocristales se encuentran muy fracturados y alto grado de alteración, con un 5% de olivinos de forma hipidiomórfica completamente iddingzitizados, fracturados y cristales fantasmas, además plagioclasas con forma xenomórfica e hipidiomórfica, con inclusiones de opacos, muy alterados, y fracturados que presentan el 2% de volumen total de la roca. Los opacos corresponden a magnetita con forma xenomórfica y representan un 5 % de volumen total de la roca, y presenta como minerales accesorios apatito y circón. El mayor porcentaje del volumen de la roca corresponde con un 88% de matriz arcillosa color café con microlitos y fragmentos de magnetita.

La muestra de código RSSR-2, presenta también fenocristales fracturados y alterados, rodeados de una matriz arcillosa color café con microlitos de opacos. Los olivinos tienen forma hipidiomórfica, algunos fracturados y otros caídos, con alteración a iddingzita, las plagioclasas tienen forma hipidiomórficos y se encuentran arcillitizados y los opacos presentan formas xenomórficas. Debido al alto grado de alteración y fracturación no es posible obtener los porcentajes.

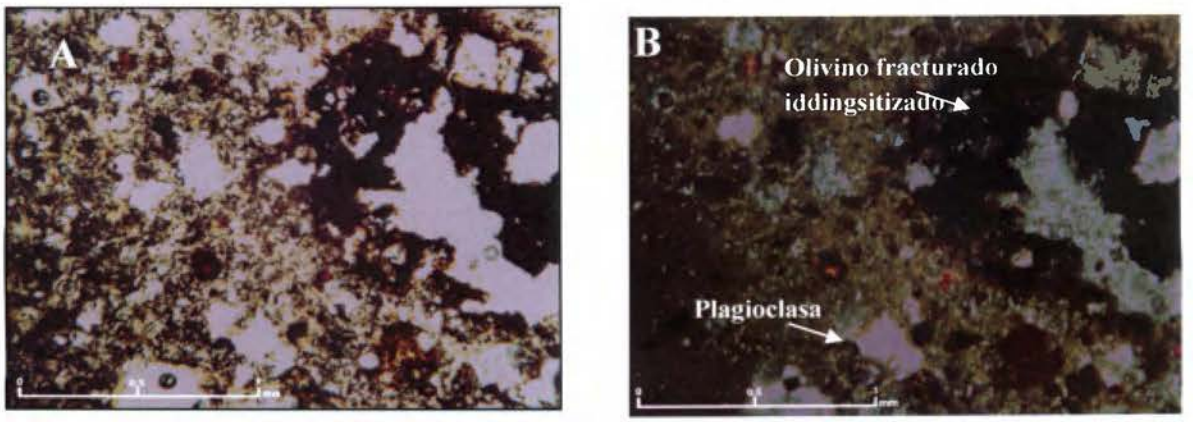


Figura 21. Muestra Código RSSR-1. A) Fotografía nícoles paralelo. B) Fotografía nícoles cruzado.

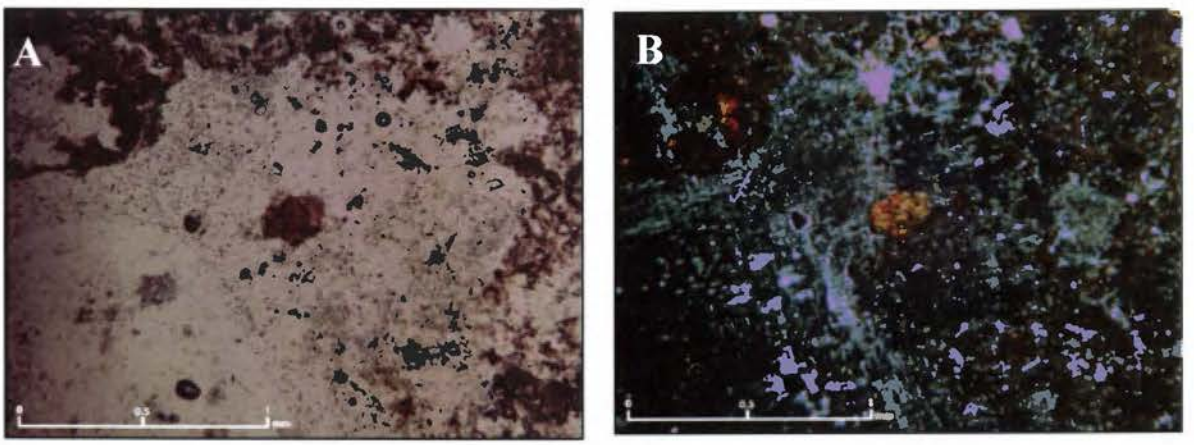


Figura 22. Muestra Código RSSR-2. A) Fotografía nícoles paralelo. B) Fotografía nícoles cruzado.

Las dos muestras son muy similares y constituyen los mismos minerales primarios, con un alto grado de alteración y de fragmentación. Las dos muestras corresponden con tobas. De acuerdo con las descripciones realizadas, la ladera en la que se ubica el Relleno Sanitario, corresponde con el Grupo Aguacate.

Según Zúñiga (2014), específicamente dentro del área de estudio, la formación Grifo Alto corresponde con tobas meteorizadas de color café-rojizo, con un importante contenido de arcillas. El espesor observado en los taludes es de aproximadamente 25 – 30 metros.

Zacek et al., (2012) describen las tobas y/o tobitas del Grupo Aguacate y menciona que su presencia es muy común y se localizan en la parte superior cerca

del contacto con la Formación Monteverde. Una intercalación significativa de un cuerpo volcano-sedimentario de tobas ferrosas color café con hematita, aparece en la ladera norte del valle del río Barranca aproximadamente a 1 km de la planta hidroeléctrica Nagatac y aflora gracias al corte de la carretera. La matriz es de hematita opaca, aparte de ello hay acumulaciones de hematita masiva de hasta 1 cm de tamaño.

Por otro lado, las ignimbritas indiferenciadas de Las Musas, se localizan al oeste-noroeste del centro de San Ramón (principalmente Bolívar y alrededores) y se caracterizan por ser soldadas y en menor medida no soldadas. Poseen colores que van de gris a café, con líticos de lava milimétricos a centimétricos, fragmentos y/o fiammes de pómez y abundantes cristales de biotita. Se le asigna una edad del Pleistoceno (Rojas, 2013).

Respecto a la geología estructural, San Ramón se encuentra influenciado por el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), donde predominan las fallas dextrales con rumbos entre N-S a NW, y fallas sinestrales, de rumbos entre E-W a NE, subsidiarias de las primeras (Marshall et al., 2000; Montero, 2001).

Según el mapa geológico de Naranjo realizado por Huapaya & Rojas (2012) trazan dos fallas/lineamientos geológicos. El primero se ubica a un km de distancia hacia el oeste del área de estudio y tiene dirección SO-NE, la cual pasa por el cauce del río Barranca y se considera como parte del sistema de Fallas que disectan esta cuenca. La segunda tiene una dirección Oeste-Este y se ubica a 300m del proyecto, esta estructura atraviesa hacia el este la ciudad de San Ramón.

4.4 Geomorfología

4.4.1 Geomorfología Regional

El área de estudio se ubica en la sección Sur de la cordillera de Tilarán, la cual es producto de la actividad volcánica de la época del Plioceno, periodo del Neógeno en la Era del Cenozoico (Bergoeing J. P., 2014) y pertenece al Grupo Aguacate en el sector entre los ríos Barranca y Tárcoles, limitando al Este con la sección occidental del Valle Central; la misma se caracteriza por estar rodeada de grandes calderas de colapso (como por ejemplo Palmares), seguido de un episodio lacustre (ej. San Ramón). En la Figura 24. Mapa geomorfológico regional se presenta el proyecto dentro de la Hoja Geomorfológica del Valle Central Bergoeing (2014), en general el proyecto se encuentra parte en una zona de erosión del Neógeno Volcánico y parte en áreas sedimentarias perilacustres con presencia de valles en V, deslizamientos cercanos y ríos que fluyen en el fondo de valle.

La evacuación del sistema geodinámico, producto del tectonismo y volcanismo de la zona se realizó a través de las fallas y cuencas de los ríos Grande y Barranca Bergoeing (2014).

El vulcanismo de la época del pleistoceno y periodo del cuaternario contribuyeron a cubrir con el modelado regional al rellenar zonas con zonas con ignimbritas, ceniza volcánica y lahares. Algunos de los volcanes que destacan son: Poás y Barva

Según Bergoeing (2014) la zona de estudio por tratarse de zonas volcánicas antiguas y de altas pendientes, se definen como modelado multifacético, de disectación y depositación donde es posible encontrar rocas vulcano-sedimentarias, los ríos se caracterizan por presentar cauces muy profundos y vertientes en forma de facetas triangulares; las cuales el autor asocia con las fallas, fuertes pendientes, las abundantes precipitaciones y los procesos de orogénesis para explicar los deslizamientos y procesos denudacionales que se ubican en la zona. De este mismo modo se definen sectores altitudinales (Bergoeing J. P., 2014) en los cuales se presenta el modelado multifacético el sector comprendido entre los 2000 y 2800 msnm se denominan sector de bosques, mientras que entre los 1000

a 2000 msnm se enmarca el sector de solifluxión, el cual se caracteriza por movimientos de masa considerables que transporta materiales gradiente abajo.

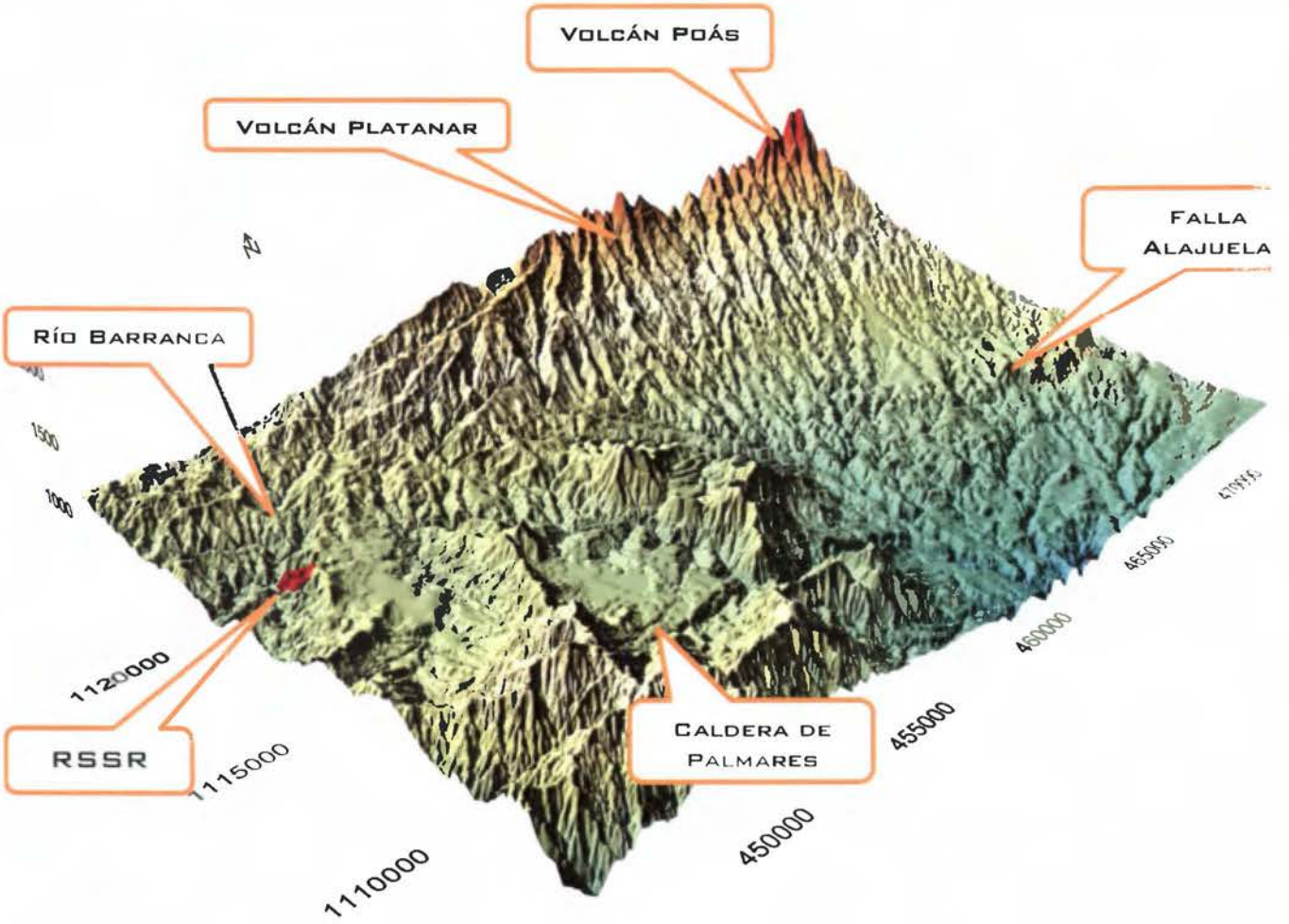


Figura 23. Modelo de elevación regional con vista 3D

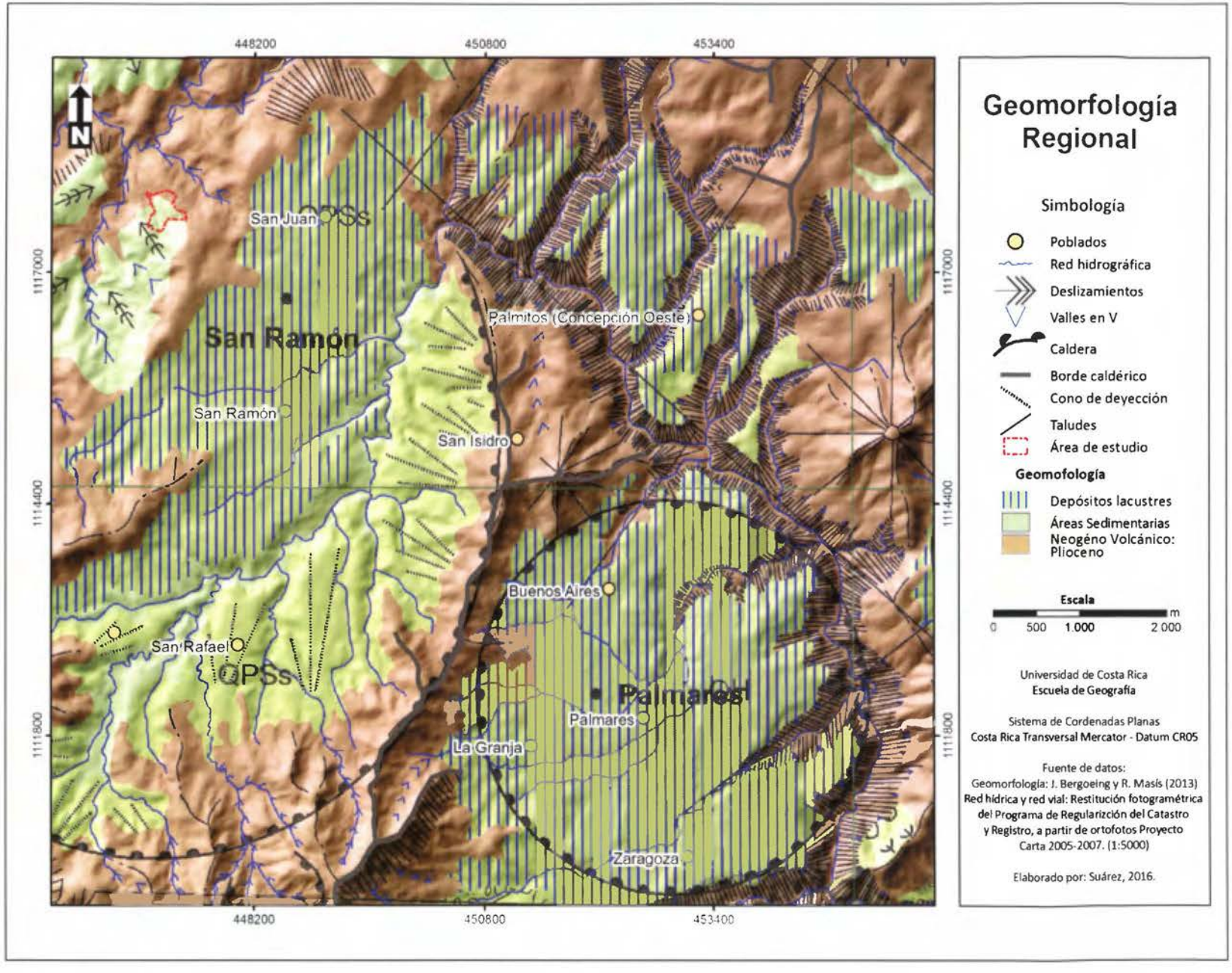


Figura 24. Mapa geomorfológico regional

A nivel de caracterización de la zona de estudio, se tomó como base la propuesta Bergoeing & Masís (2013) sobre la "Geomorfología del área de Palmares, San Ramón, Cerro Espirítu Santo, Costa Rica" la cual es la infromación con mayor detalle en los alrededores del proyecto; ya que es una cartografía a escala 1:10 000. Se proponen tres unidades geomorfológicas para los alrededores del área, las cuales se detallan a continuación:

a. Área paleo-lacustre de San Ramón

La ciudad de San Ramón se ubica en una "*meseta topográfica*" (Bergoeing & Masís, 2013), antes ocupada por un sistema lagunar, al igual que la zona paleo-lacustre de Palmares; el área actual de la ciudad de San Ramón era ocupada por una caldera de colapso, según Bergoeing & Masís (2013), la misma puede ser contemporánea a la de Palmares. Prueba de la existencia del área paleo-lacustre es la laguna relicto que se ubica en la Sede Universitaria de San Ramón. Algunos focos volcánicos que contribuyeron a colmatar la zona lacustre fueron el Cerro Espíritu Santo, Piedra Grande, San Isidro y la Cordillera Volcánica Central. (Bergoeing & Masís, 2013).

En el área se encuentra depósitos de cenizas, pómez y lapilli; los cuales presentan gran alteración, en estos sitios se originan algunos sistemas hídricos importantes como las nacientes del río Grande; Bergoeing & Masís (2013) mencionan que este cañón fluvial separo la zona paleo-lacustre de los conos volcánicos (cerro Piedra Grande, cerro san Isidro y cerro Alto Cima) del vulcanismo del *fini-terciario* hasta el *Pleistoceno inferior*.

b. **Área paleo-lacustre de Palmares**.

Asociada a una caldera de colapso del Plioceno superior, compuesta principalmente por brechas volcánicas, basaltos y andesitas pertenecientes al grupo del Aguacate. La fase del sistema lagunar se considera que esta zona fue afectada por depósitos volcánicos finos del vulcanismo circundante del Espíritu Santo, San Isidro y el Piedra Grande los cuales colmataron la cuenca paleo-lacustre

de Palmares, que generó lagunas que posteriormente fueron drenadas por el entallamiento de los cañones fluviales neotectónicos río Grande.

c. Conos Volcánicos Circundantes

El vulcanismo circundante está determinado por diversos conos volcánicos los cuales se caracterizaron por una actividad efusiva desde la época del Plioceno hasta el Pleistoceno. Bergoeing & Masís (2013), detallaron los siguientes edificios volcánicos; Los cerros Piedra Grades y San Isidro en donde predominan basaltos, andesitas y brechas; con pendientes acusadas con evidencias de deslizamientos en el sector Sur. En el Volcán San Isidro afloran depósitos horizontales de lapilli, ceniza y Tobas sueltas. Finalmente, el volcán Espíritu Santo el cual está formado por basaltos y andesitas con muy poca alteración, lo cual evidencia la juventud del edificio volcánico.

4.4.2 Geomorfología Local

Mediante el uso de herramientas de sistemas de información geográfica se realizó un análisis de fotografías aéreas ortorectificadas, modelo de elevación digital de terreno (Figura 25), el modelo de sombras (Figura 26) y de pendientes (Figura 27), para proponer 4 unidades geomorfológicas locales, las cuales son: Unidad de laderas denudacionales del Plioceno, Unidad de depósitos lacustres del pleistoceno y Unidad de depósitos sedimentarios del holoceno. También se identificaron elementos geomodinámicos como el cañon fluvial, deslizamientos, fallas y alineamientos.

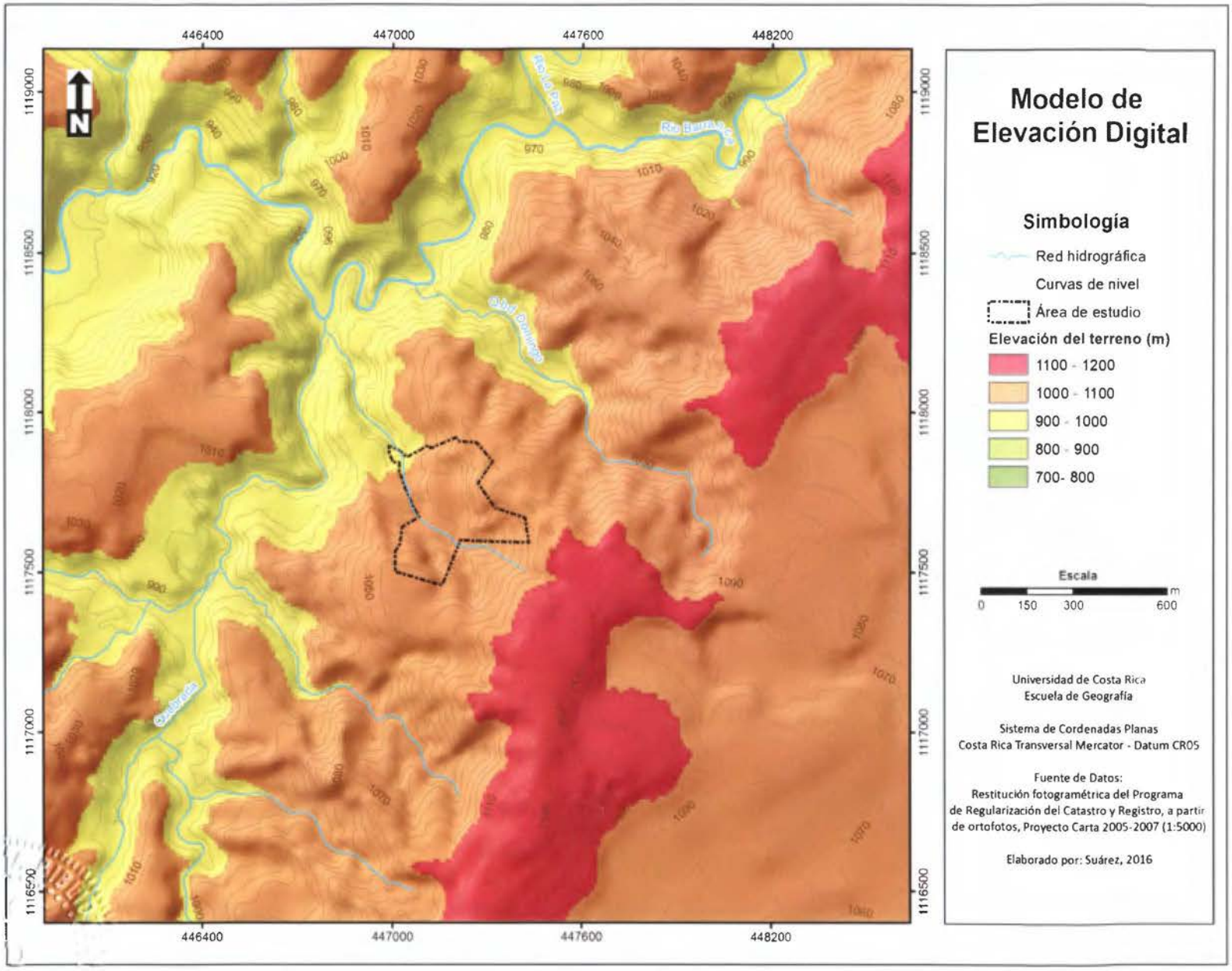


Figura 25. Mapa del modelo de elevación digital local.

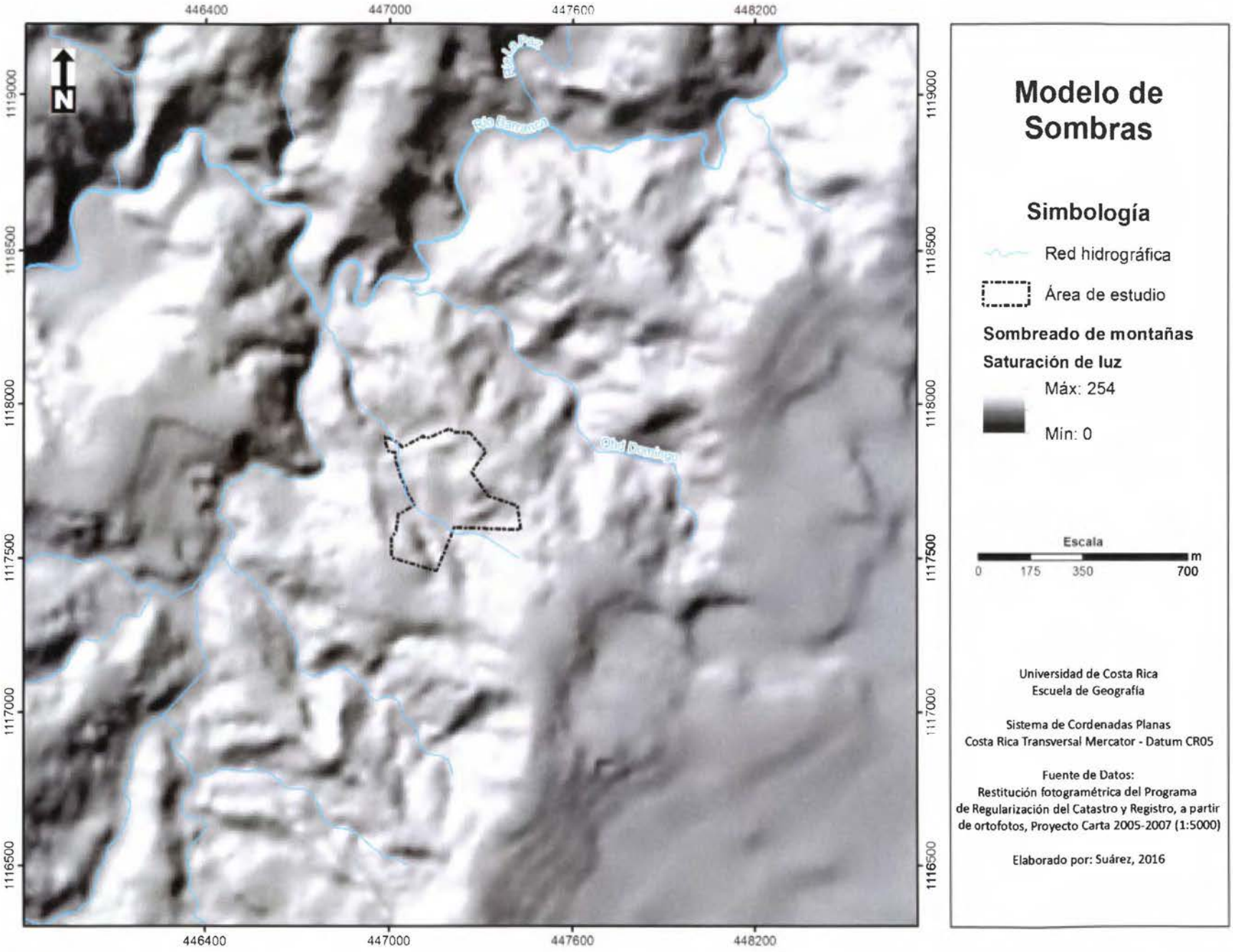


Figura 26. Mapa del modelo de sombreado de montañas.

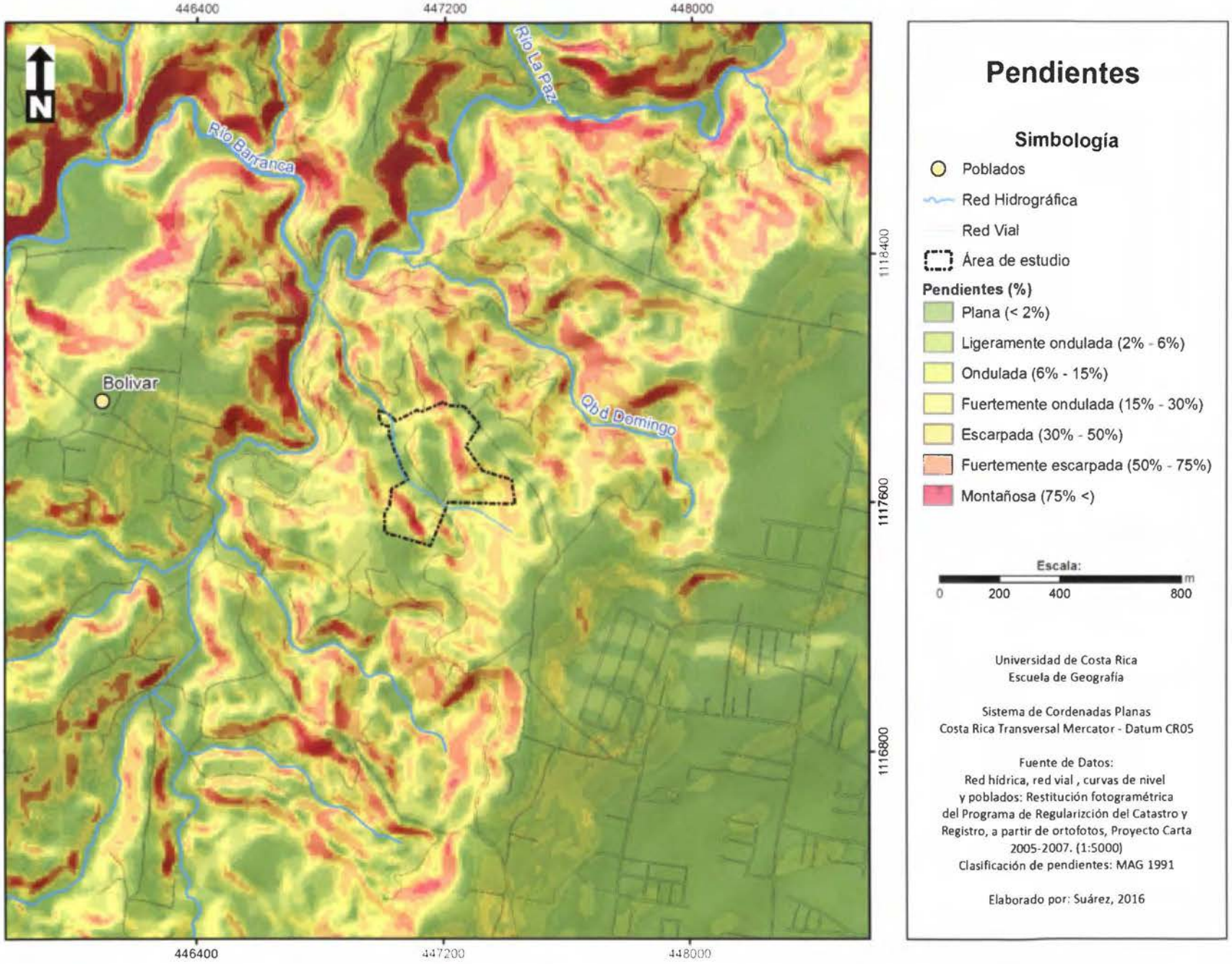


Figura 27. Mapa de pendientes

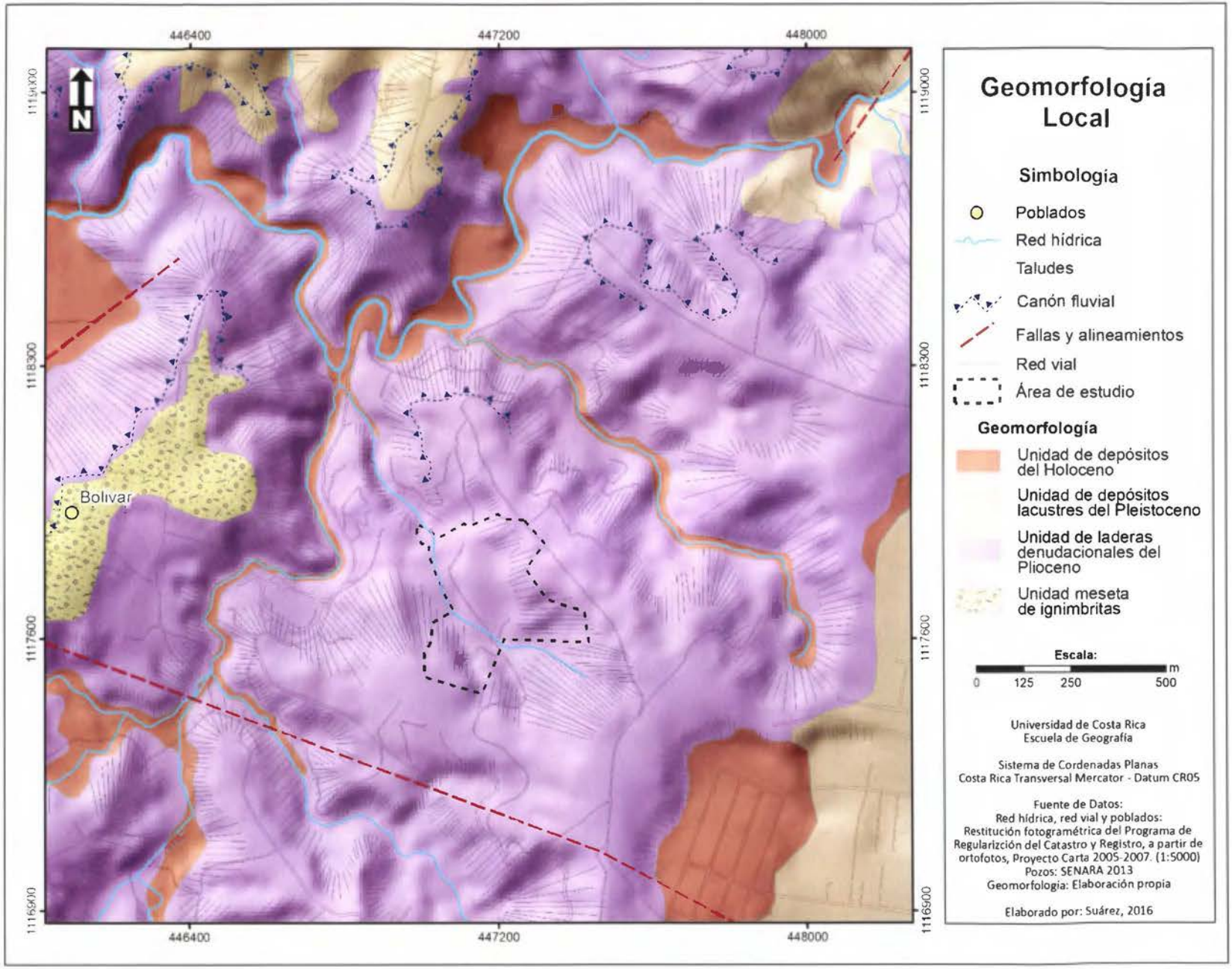


Figura 28. Mapa de geomorfología local

A continuación, se describen las principales unidades geomorfológicas locales identificadas en el mapa Figura 28. Mapa de geomorfología local.

Unidad Denudacional del Plioceno

El relleno sanitario se encuentra en sobre laderas denudacionales de alta pendiente, con taludes y pendientes hasta de 15-75%, el cual conforma un sistema de drenaje dirección SE-NO, sobre rocas volcánicas del Plioceno, presentes como el grupo Aguacate con fases de lavas, brechas y tobas tectonizadas y meteorizadas. En las zonas cercanas al río Barranca se presenta el cañon fluvial y la falla Barranca. El proyecto se ubica entre los 990msnm y los 1100msnm.

Unidad de depósitos lacustres del pleistoceno

La zona del centro de la ciudad San Ramón se caracteriza por depositación de los sedimentos lacustres (Rojas, 2013) por lo tanto, al ser una zona de relleno tiende a tener relieve horizontal con bajas pendientes, ligeramente onduladas 12-25% además de tener con formas elongadas con dirección suroeste - noreste. Las zonas del centro de San Ramón y el área de los distritos Los Ángeles, La Esperanza y Bolívar, al noroeste de San Ramón, zonas que se encuentran separadas por una fila de laderas denudacionales con dirección suroeste – noreste.

Unidad de depósitos sedimentarios del holoceno

En los fondos de las quebradas y del río Barranca se depositan los materiales transportados de los taludes, cañones y laderas denudacionales. Estos materiales se depositan, pero también son transportados gradiente abajo en las crecidas de los ríos durante la época lluviosa. En proyecto se ubica una quebrada "Sin Nombre" la cual cumple con estas características descritas.

4.5 Características geotécnicas de suelos

El Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) en el año 2014 realizó un análisis de siete muestras de suelos, por medio del Laboratorio de Geotecnia de la Escuela de Geología. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos –SUCS, Salazar, Retana & Zúñiga (2014) indicaron que todos los suelos se clasifican como suelos de grano fino Limos elásticos de alta plasticidad (MH). Los resultados de la cohesión varían entre 0 y 22 kPa, mientras que los ángulos de fricción interna están en el rango de 35 a 43. Además, las permeabilidades son muy bajas, con valores entre los $5{,}0 \times 10^{-7}$ y $1{,}9 \times 10^{-4}$ m/s.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación, se presentan los análisis y resultados de la prospección *geofísica realizada* en el RSSR, la cual incluye tres tomografías eléctricas, un sondeo eléctrico vertical y dos perfiles de sísmica de refracción (Figura 30), además se calcularon las variables geotécnicas a partir de velocidades de compresión y también se identificaron zonas con descarga de lixiviados a las aguas superficiales y ríos del área de estudio.

5.1 Prospección geoeléctrica

5.1.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV)

En el área en estudio se realizó un sondeo eléctrico vertical (SEV) en un talud sano (sin depósito de desechos, Figura 33) con el fin de caracterizar geoeléctricamente el basamento geológico, con ello se pretende tener una línea base o dato comparativo para la hora de explorar en las zonas de relleno sanitario donde existenten coberturas de suelos y desechos sobre este material geológico natural.

5.1.1.1 Equipo de campo y software

Para la ejecución de los SEV en el campo, se utilizó el instrumento SYSCAL PLUS el equipo de Iris Instruments (propiedad del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de Universidad de Costa Rica), junto con los accesorios respectivos para este tipo de ensayo (pines, cables, carruchas, entre otros). La abertura AB/2 utilizada fue de 30 metros, con lo cual se esperaría una profundidad de prospección de al menos 10m.

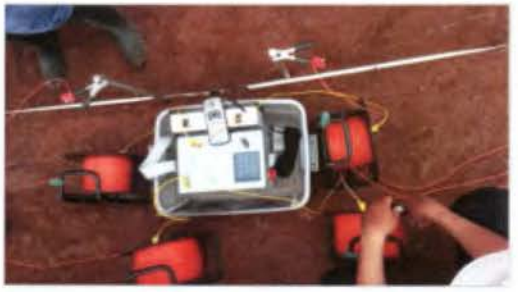


Figura 29. Equipo SYSCAL PLUS **operando en el RSSR.**

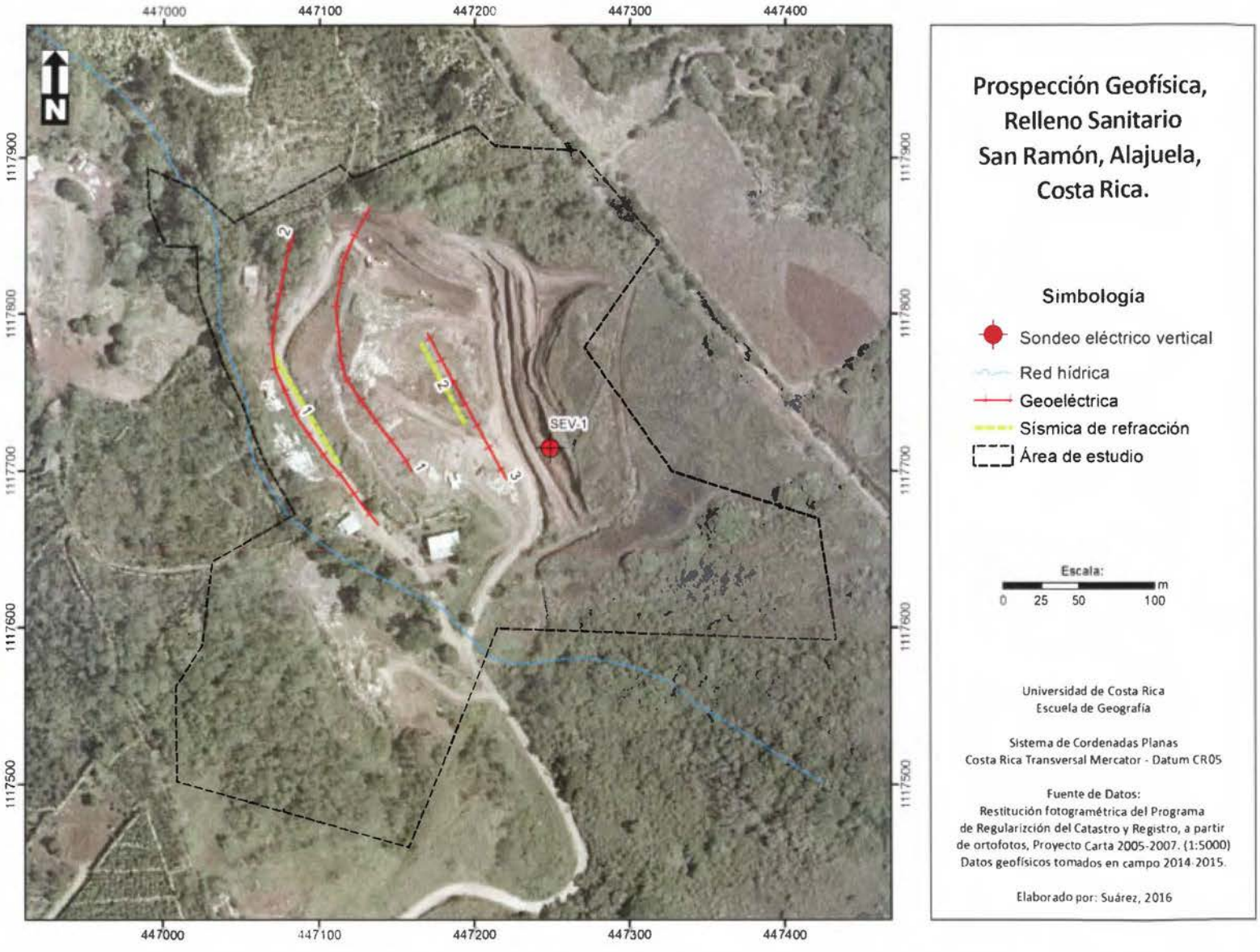


Figura 30. Mapa de sitios de prospección geofísica

La inversión de los datos de campo de cada SEV se realizó con el programa de cómputo IP2WIN (versión 3.01, de Moscow State University), el cual es de licencia libre. Se determinaron los valores de las resistividades verdaderas y los espesores de las diferentes capas para cada punto prospectado. Los resultados de campo y su respectivo ajuste se muestran en el Cuadro 3 y Figura 31. Gráfico de resistividades aparentes y reales vs separación de electrodos de la curva de resistividades, mientras que en la Figura 32. Interpretación del modelo SEV-1 de 2 capas.

Cuadro 3. Datos de resistividades eléctricas de campo y ajustadas

AB/2	MN/2	Resistividad aparente	Resistividad Real
(m)	(m)	(Ω m)	(Ω m)
1	0,25	171	171
1,5	0,25	166	166
2	0,25	161	161
2,5	0,25	159	159
3	0,25	155	159
4	0,25	150	154
5	0,25	149	153
5	0,25	150	154
6	1	147	151
8	1	139	131
10	1	123	126
10	2	123	126
15	2	100	126
20	2	94	126
25	2	89	121
25	2	89	121
30	5	84	116

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

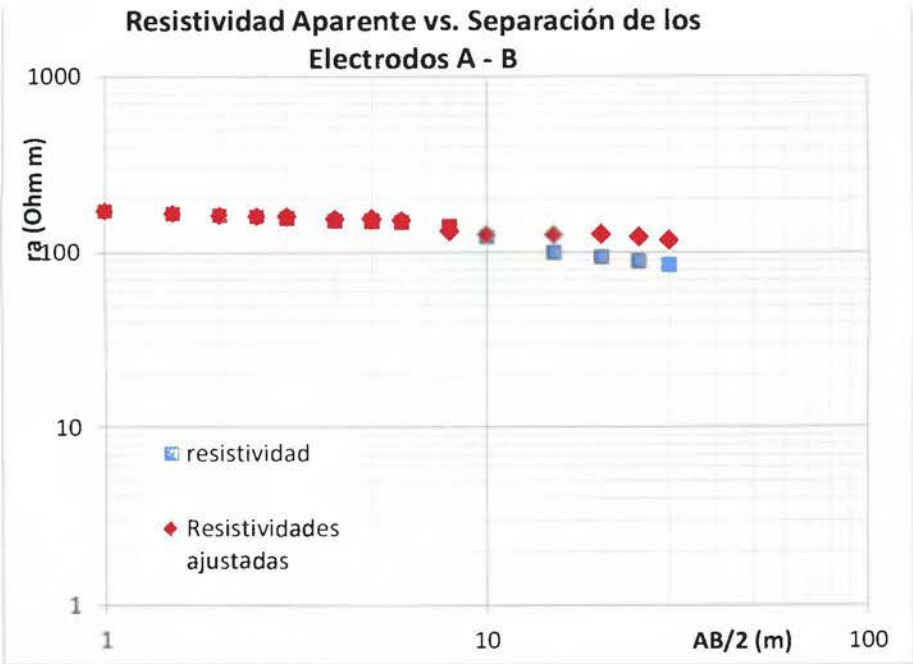


Figura 31. Gráfico de resistividades aparentes y reales vs separación de electrodos

Fuente: Cuadro 4. Datos de resistividades eléctricas de campo y ajustadas

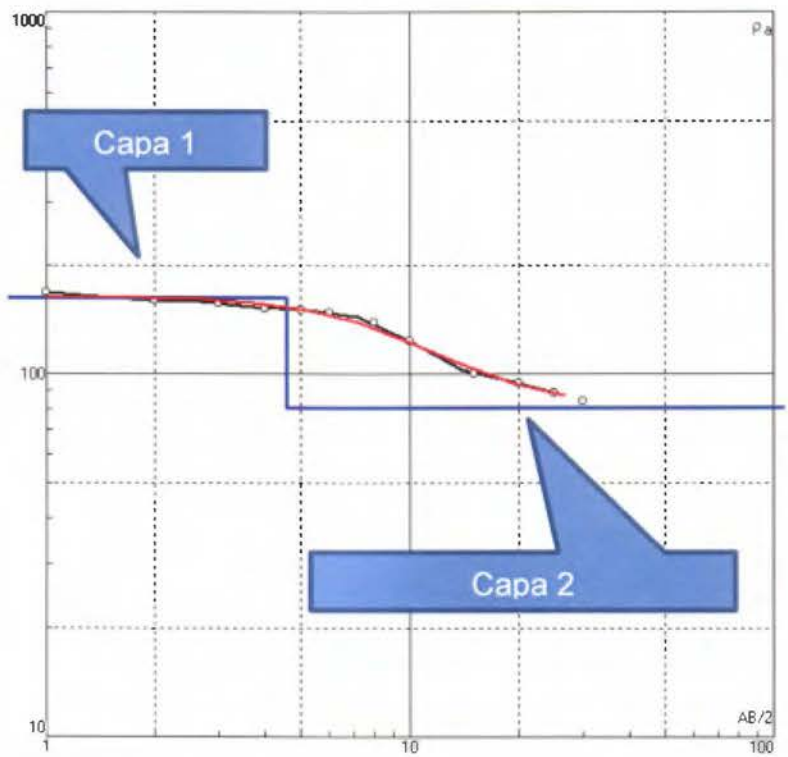


Figura 32. Interpretación del modelo SEV-1 de 2 capas geoeléctricas

Fuente: Elaboración propia

5.1.1.2 Resultados de la prospección

Para la interpretación de los SEV's, fue necesario digitar primero los datos de campo en hojas logarítmicas y se aplicó la respectiva corrección en los puntos de traslape, esto con el fin de obtener una única curva continua. Posteriormente se determinaron los valores de las resistividades reales y los espesores de las diferentes capas, generando un modelo Geoeléctrico para cada SEV.

Los criterios empleados para la interpretación de los datos fueron: contexto espacial, análisis cualitativo según Orellana (1972), las magnitudes relativas y el contexto geofísico.

En general, los resultados obtenidos con la inversión de los datos son los siguientes:

Sondeos para caracterizar la respuesta del basamento

Para la caracterización de la respuesta del basamento, se realizó el SEV 1 en la ladera de un talud expuesto, sitio escogido debido a que es una zona donde aflora la roca considerada el basamento del Relleno Sanitario y nunca ha sido cubierto con desechos durante la operación del mismo, actualmente está siendo estabilizado con maquinaria.

Según se observó en el campo, es una roca meteorizada color café-rojizo, con un importante contenido de arcillas clasificadas del Grupo Aguacate, específicamente de la Formación Grifo Alto. Esto se refleja en el rango de resistividades obtenidas, las cuales varían entre 120 y 80 Ωm. En el Cuadro 5, se resumen los resultados de cada capa, donde se presenta un suelo con resistividades de 160 Ωm y un espesor de 4,6m, que en realidad es más una exposición somera del basamento de tobas, pero compactado por el retrabajo de la maquinaria.

Figura 33. Fotografía del talud retrabajado, con la roca madre expuesta en superficie.

Cuadro 5. Características de la inversión del SEV1 (Caracterización del basamento)

Nº Capa	Resistividad real (Ω m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Correlación	Interpretación
1	160	4,6	4,6	Suelo	Suelo residual de toba "compactada"
2	120	-	>4,6	Basamento	Tobas meteorizadas

Fuente: Elaboración propia

Para el SEV1, la forma de la curva se cataloga de dos capas, donde la segunda capa es menos resistiva en magnitud que la primera ($\rho a1 > \rho a2$), aunque sea levemente por una diferencia de 20 Ωm, este contexto geofísico se correlaciona con la toba de la Formación Grifo Alto.

En este caso, no se pudo conocer el espesor de la segunda capa, debido a que no se detectó el techo de alguna tercera capa, por lo tanto es indefinida.

5.1.2 Tomografías eléctricas

En el relleno sanitario se realizaron 3 tomografías eléctricas con el método Schlumberger, durante el segundo semestre del 2014. El objetivo fue identificar en formato 2D las capas de desechos, su distribución espacial tanto en la vertical como en la horizontal, para ello se utilizó el equipo SYSCAL PLUS de Iris Instruments y el programa RES2D del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de la Universidad de Costa Rica.

En la Figura 30 se observan los sitios de realización de las tomografías y en la Figura 34. Fotografía del proceso de realización de una tomografía eléctrica.

Figura 34. Fotografía del proceso de realización de una tomografía eléctrica.

Resultados de la prospección

a- Tomografía 1

En el perfil tomográfico 1 se realizaron 565 mediciones de resistividad aparente, utilizando 48 electrodos con espacio entre los mismos de 4m y

empleando el arreglo Schlumberger, para un perfil de prospección con extensión en superficie de 188m y 35m de profundidad. Los valores de resistividad real se encuentran en el rango del 1,0 Ohm hasta los 160 Ohm. El error calculado de correlación entre los datos reales y los datos modelados es de 6,3%, el cual es relativamente bajo y resultante de la limpieza de datos por medio de exterminación de datos incoherentes, la interpolación con el método de mínimos cuadrados y con 3 iteraciones para la mejora de la imagen subterránea.

Los rangos de resistividad eléctrica entre 0-10 Ohm se consideran como desechos impregnados de lixiviados (colores morados-rojizos), mientras que los rangos entre 10-20 Ohm (colores rojos) se consideran como desechos con algún grado de presencia de lixiviados. El suelo o capas de cobertura de los desechos, compuesta de limos arcillosos se expresa en valores de 20-40 Ohm y el basamento geológico tiene valores superiores a 40 Ohm.

En las tomografía 1 se identifica una primera capa discontinua de suelo, que en realidad es una mezcla de desechos con suelo, con un espesor de hasta 8 metros bajo nivel del suelo (mbns) con restistividades en el rango de los 20 a 30 Ohm, el espesor de desechos con lixiviados es de al menos 25m y presenta resistividades de 1-20 Ohm, extiendiendose lateralmente a lo largo de todo el perfil. En la estación 0+95m, se aprecia lo que podría ser los indicios del contacto con el basamento, con resistividades superiores a 40 Ohm. El basamento según el Sondeo eléctrico vertical, en su condición natural presenta resistividades alrededor de 160 Ohm. Por lo que también podría inferir que se produce una percolación de lixiviados hacia los estratos geológicos meteorizados del Grupo Aguacate y estos hacen que dismuya su resistividad eléctrica.

En la Figura 35. Proceso de modelación de datos para la tomografía #1 se aprecia la inversión de datos de campo al modelo geofísico

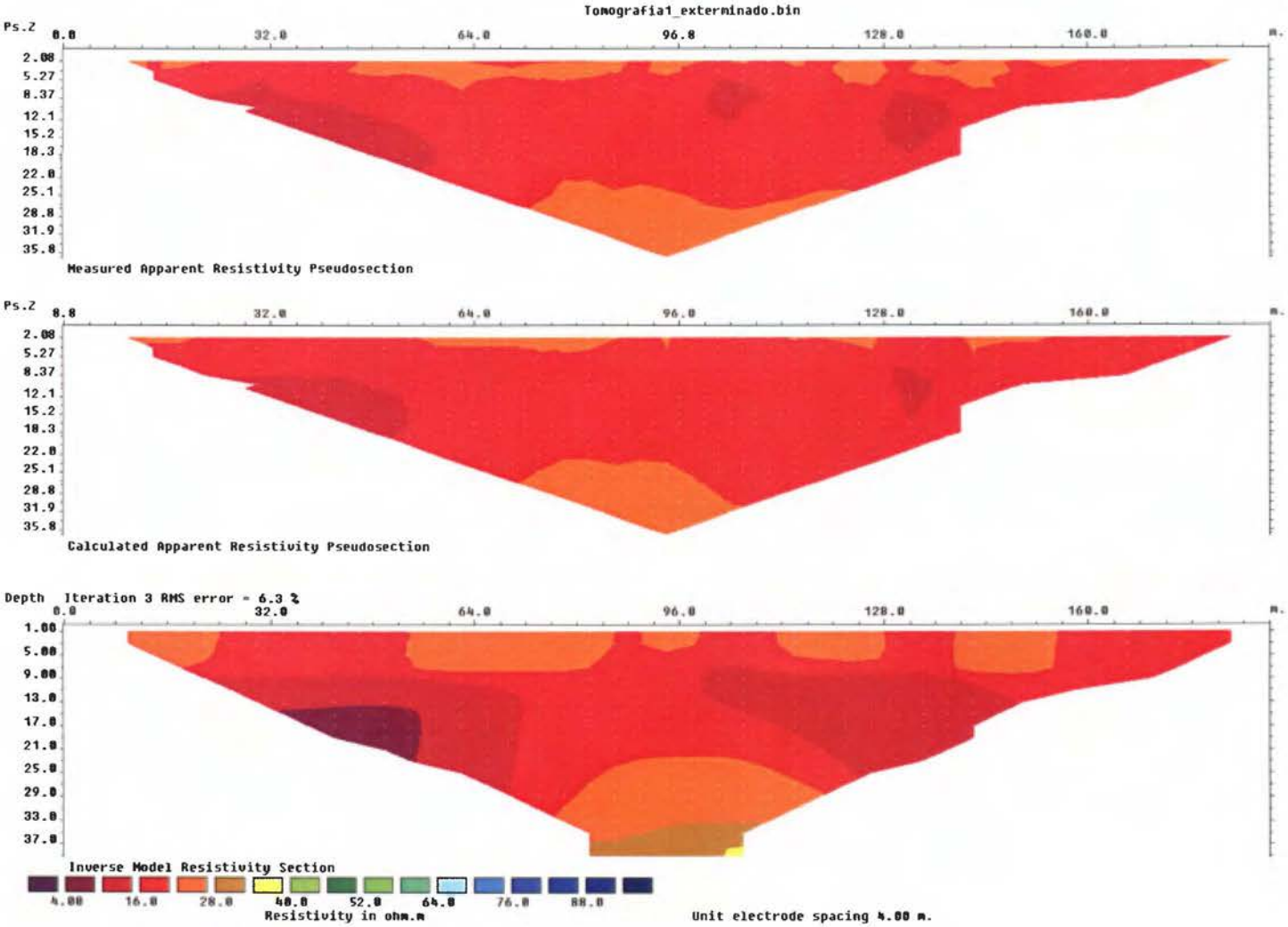


Figura 35. Proceso de modelación de datos para la tomografía #1

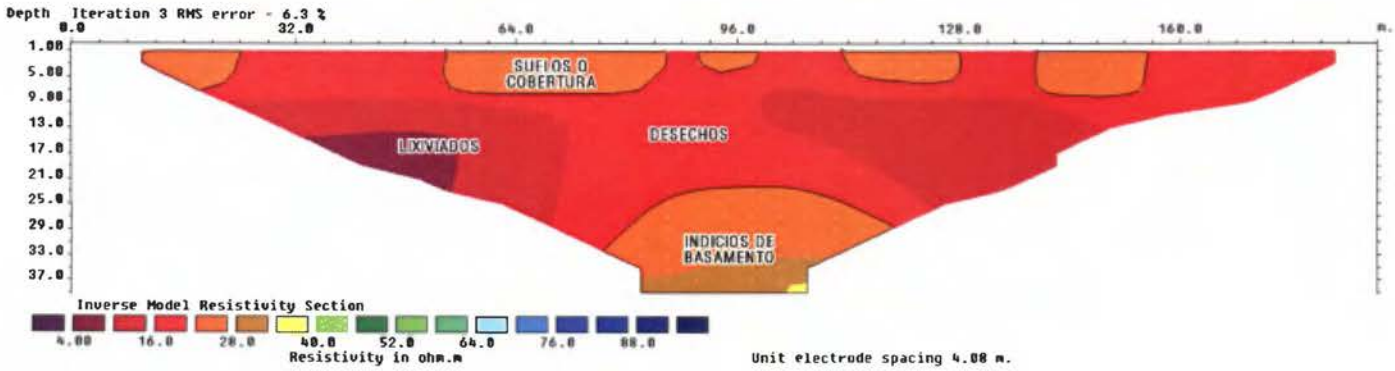


Figura 36. Interpretación de la tomografía eléctrica #1

b- Tomografía 2.

Para la tomografía 2, se realizaron 565 mediciones de resistividad aparente *con 48 electrodos* (24 a cada lado) utilizando el arreglo Schlumberger con espacio entre electrodos de 5m, para un perfil de prospección con extensión en superficie de 235 m y 50m de profundidad. Los valores de resistividad real se encuentran en el rango del 1,0 Ohm hasta los 60 Ohm. El error calculado de correlación entre los datos reales y los datos modelados es de 11,7%, resultando moderadamente aceptable, esto aplicando la inversión de datos resultante de la limpieza por medio de exterminación de datos, la interpolación con el método de mínimos cuadrados y con 3 iteraciones para mejora de la imagen subterránea.

Los resultados del modelo indican un perfil con una matriz de desechos discontinua de mezcla de desechos con presencia de lixiviados con conductividades en el rango de 1-20 Ohm con profundidades que varían entre los 13 y 50m de profundiad, que aparentan ser una zona de flujo preferencial por la forma vertical que presentan.

En la estación 0+80 se observan zonas de anomalía, la cual contrasta con un aumento en la resistividad eléctrica, por ello podría ser el indicio del basamento con un espesor de 20m (entre 10mbns y 40mbns) con resistividades mayores a 40 Ohm. En general, se nota la impregnación de la roca base con lixiviados que hace decrecer su resistividad eléctrica. Figura 37.

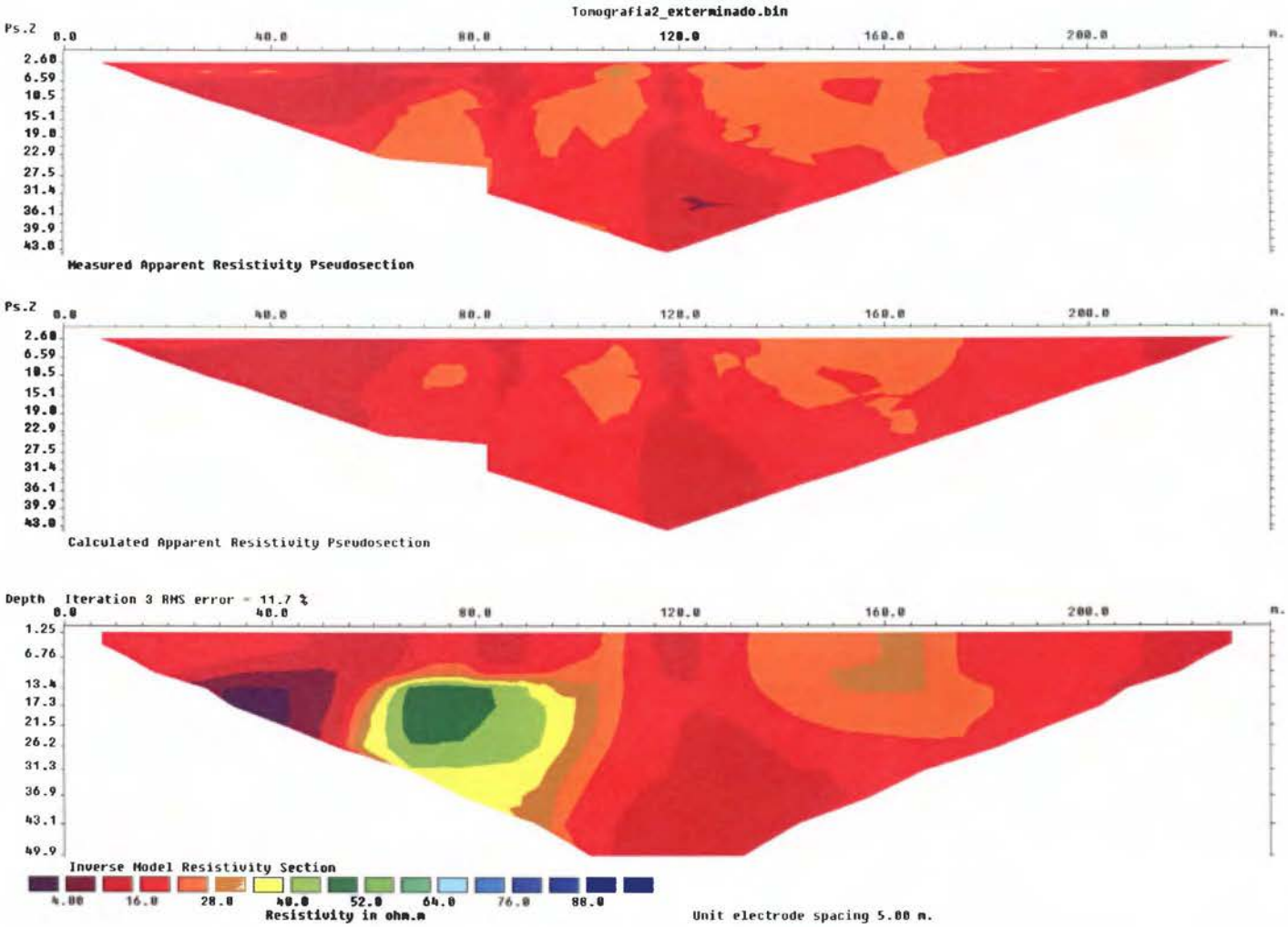


Figura 37. Proceso de modelación de la tomografía #2

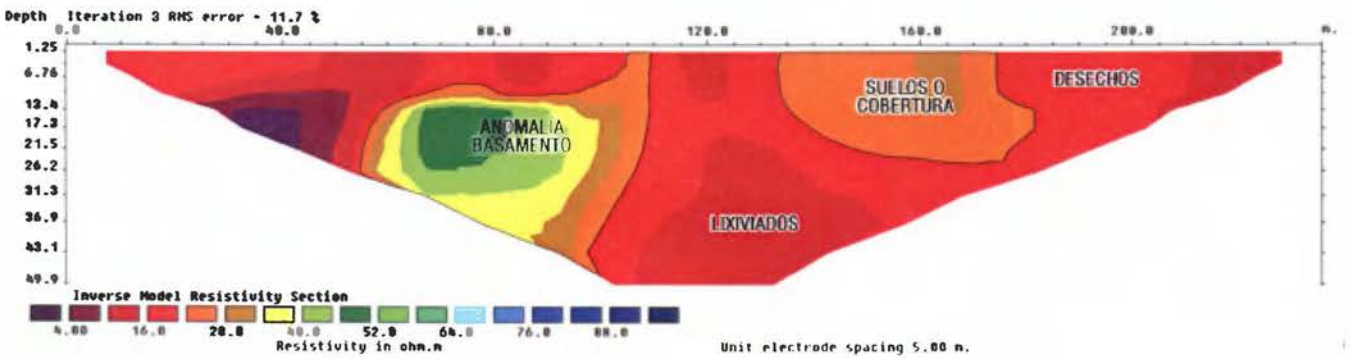


Figura 38. Interpretación de tomografía eléctrica #2

c- Tomografía 3.

En la tomografía 3 tuvo que descartar debido a un error de postoperación del equipo, porque al parecer otro usuario, en los días posteriores, realizó una tomografía y sobreescribió el archivo digital de la tomografía #3.

En la Figura 39. Vista del talud de basura sobre el cual se realizó la tomografía #3 .

Figura 39. Vista del talud de basura sobre el cual se realizó la tomografía #3

5.2 Prospección sísmica

5.2.1 Equipo de campo y software utilizado

El CICG, UCR colaboró con el equipo sismógrafo de exploración StrataVisorTM NZXP, Geometrics con 24 geófonos espaciados a 2m de distancia. El procesamiento de datos se realizó con el programa Pickwin para seleccionar la onda de arribo, el proceso de la domocrónicas y modelado de los perfiles se ejecutó con el programa PlotTefra.

Entre las limitaciones de estos ensayos se destacan las siguientes:

- Distintos tipos de suelos o rocas pueden tener velocidades de propagación semejantes. Para resolver la incertidumbre es necesario contar con información geológica o geotécnica.

- No es posible detectar estratos cubiertos con otros de mayor velocidad de propagación de ondas.

- La distancia entre los sensores controla la precisión con que se puede evaluar el espesor de los estratos.

- La profundidad máxima está limitada por la longitud del perfil de refracción utilizado. Con las dimensiones utilizadas en los ensayos cuyos resultados se entregan, no puede prospectarse más allá de unos 25 metros.

- En el caso de existir agua subterránea los resultados de los ensayos basados en medir la velocidad de ondas de compresión estarán limitados a su profundidad, a menos que existan materiales con mayor velocidad de propagación, como algunas gravas y rocas.

A continuación, presentan los resultados obtenidos con este ensayo en dos sitios del Relleno Sanitario de San Ramón. (Ubicación en Figura 30)

Figura 40. Fotografías del proceso de ejecución del ensayo #1 de sísmica de refracción.

5.2.2 Resultados de la prospección

a- Perfil de sísmica de refracción #1

El primer perfil de refracción sísmica, fue realizado sobre la línea de perfil tomográfico #2, esto con el objetivo de corroborar los datos entre métodos, ya que no existen piezómetros instalados en el sitio y se desea validar los datos geoeléctricos. A continuación, se presentan dos ejemplos del gráfico sismográfico y selección de primer arribo de onda. Figura 41 y Figura 42.

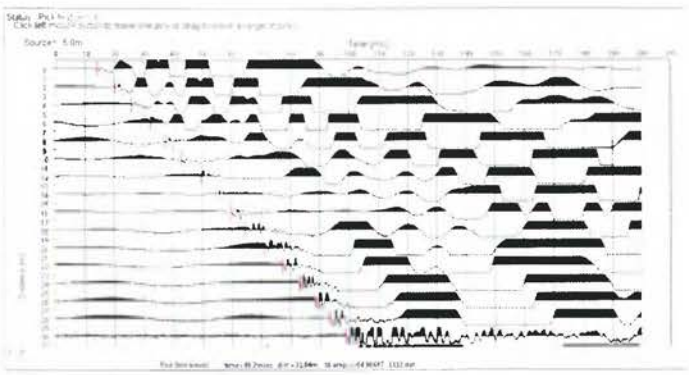


Figura 41. Sismograma y selección de primer arribo de onda.

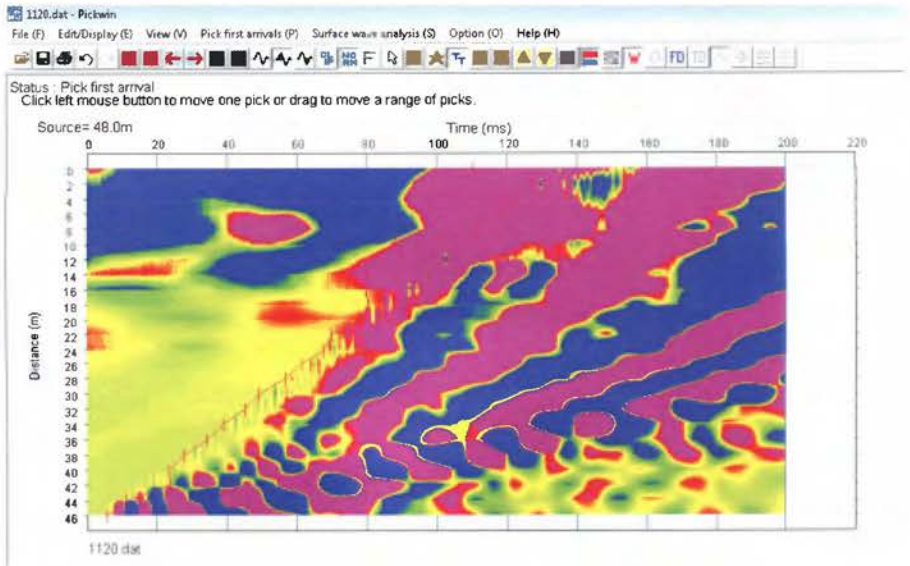


Figura 42. Ejemplo de selección de punto de arribo contraste en colores.

Una vez obtenido el punto de arribo de cada disparo, se construyeron las dromocrónicas de tiempo en milisegundos versus distancia horizontal en metros. En estas domocrónicas se procedió a asignar las capas subterráneas identificadas, esto según las inflexiones que se puedan detectar. Figura 43.

Durante este proceso, surge a la luz que no existen puntos de inflexión abruptos o contrastantes, lo que es un indicador de dos opciones, la primera que es una sola capa de una misma velocidad, y la segunda es que las capas tengan velocidades similares o que la capa inferior es más lenta que la superior.

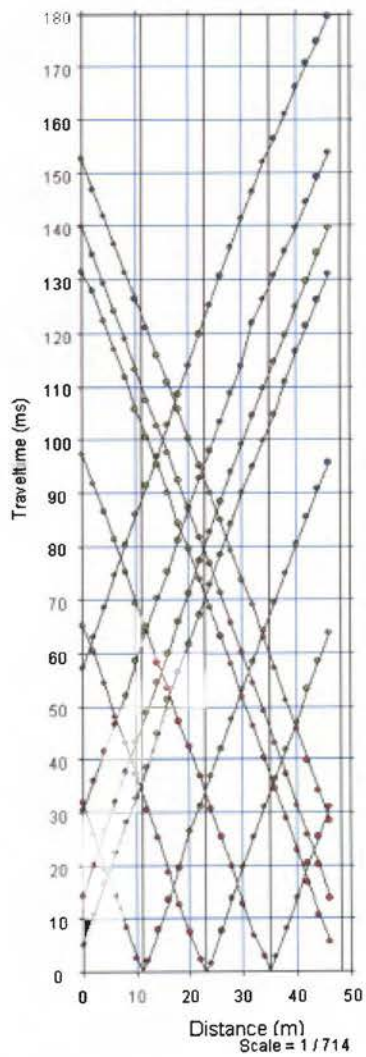


Figura 43. Dromocrónica para la selección de capas subterráneas

Considerando las capas seleccionadas en la domocrónica, se procedió a plotear el perfil de refracción sísmica #1, que se aprecia en la Figura 44. En el perfil se observa una primera capa de suelo tiene en promedio 2 metros bajo nivel del suelo (mbns) con una "velocidad p" de 360m/s y le subyace una capa con velocidad de onda p de 374 m/s. En general la variación es de 1,6% por lo que tampoco se infiere que son capas muy similares. Esto coincide con la realidad, puesto que lo visto en campo, es un camino de acceso mezclado con desechos, limos y arcillas, que sobreyacen acumulaciones de mezclas de desechos y materiales de préstamo. Para las velocidades de onda "s", los valores resultaron ser muy similares entre si, con 126m/s en la capa más somera y de 130,9 en la capa suprayacente.

No se detectó una tercera capa o roca madre. De ello se infiere que las capas de roca madre tienen velocidades similares o que la capa inferior es más lenta que la superior y por lo tanto no se puede apreciar en el perfil.

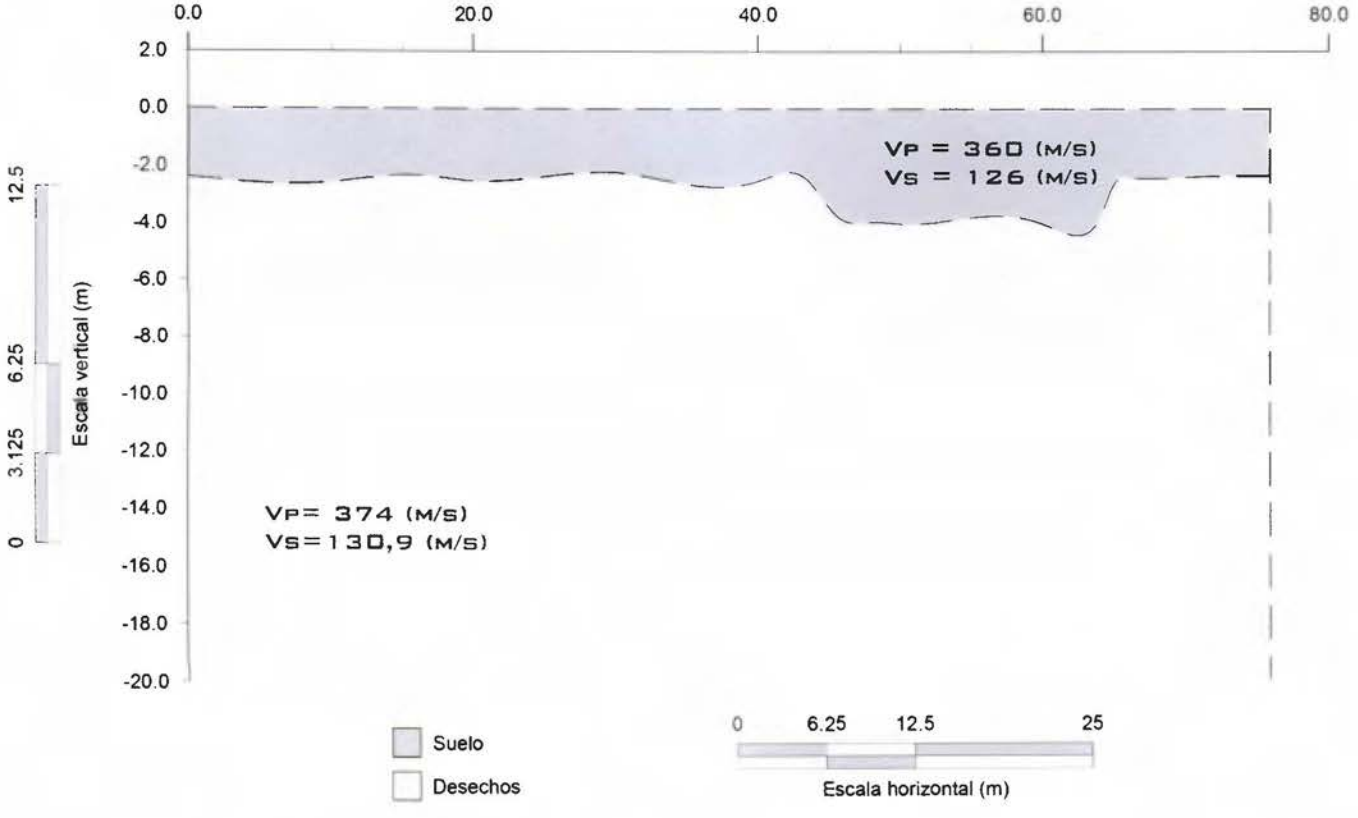


Figura 44. Interpretación del perfil sísmico #1

b- Perfil de sísmica de refracción #2

El primer perfil de refracción sísmica, fue realizado sobre la línea de perfil tomográfico #3, también con el objetivo de corroborar los datos entre métodos, sin embargo, la tomografía #3 tuvo que descartarse, debido a una sobreescritura de datos con otro proyecto de investigación del CICG. A continuación, se presentan dos ejemplos del gráfico sismográfico y selección de primer arribo de onda que fueron insumos para la construcción del perfil 2. Figura 45y Figura 46.

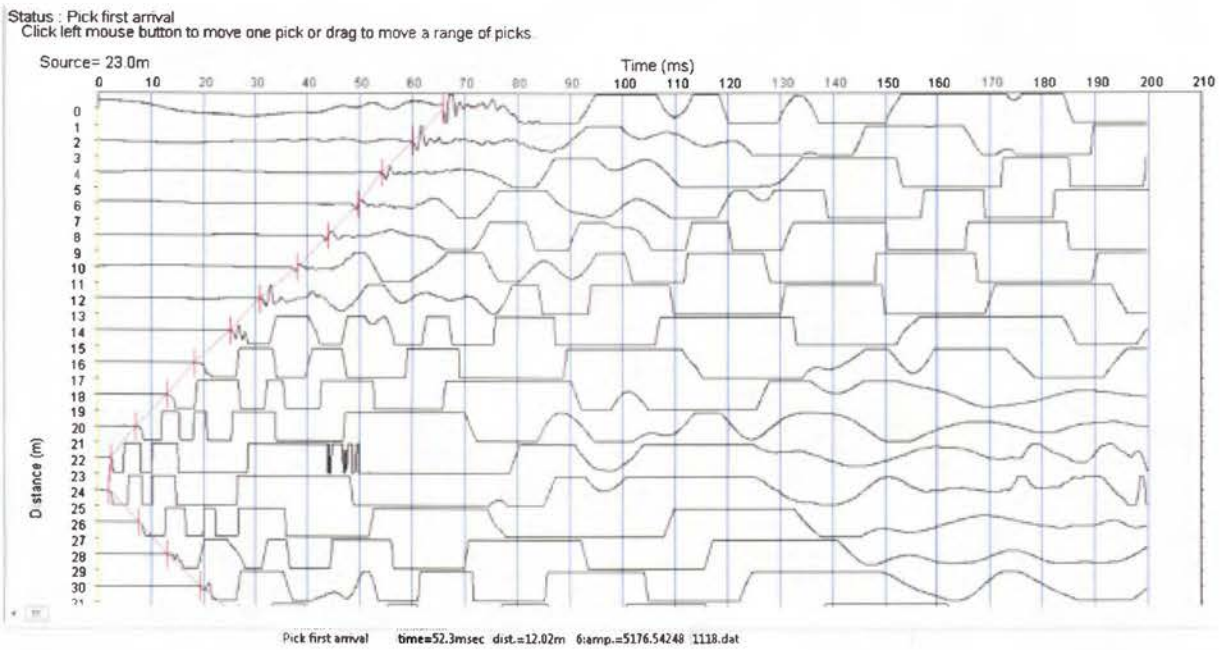


Figura 45, Ejemplo de selección de punto de arribo en registro sismográfico

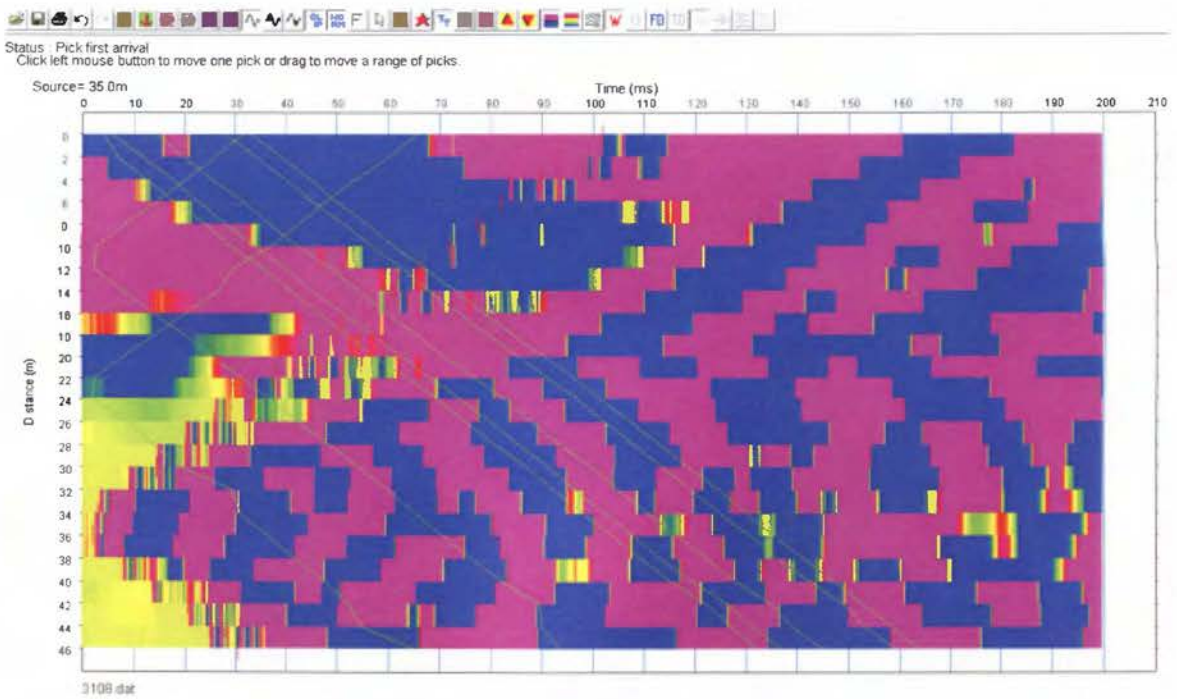


Figura 46. Ejemplo de selección de punto de arribo contraste en colores

El perfil de sísmica de refracción #2 se observa en la Figura 47 y de él se puede identificar una capa de suelo de 1,5m de espesor con velocidades de onda p de 348 m/s que sobreyace a una capa de desechos con una velocidad de 350m/s , lo cual corresponde con una diferencia de velocidades de 0,57%. Por lo tanto también se consideran que son capas muy similares o prácticamente una misma capa. En cuanto al cálculo de las velocidades de onda "s", ambas presentaron resultados muy similares de 122m/s en la capa superficial y de 124,2 m/s en la capa subyacente.

En este perfil, tampoco se pudo identificar la roca madre como una tercera capa, esto puesto que las velocidades de ambas capas son similares o que la capa inferior es más lenta que la superior y por lo tanto no se puede apreciar en el perfil.

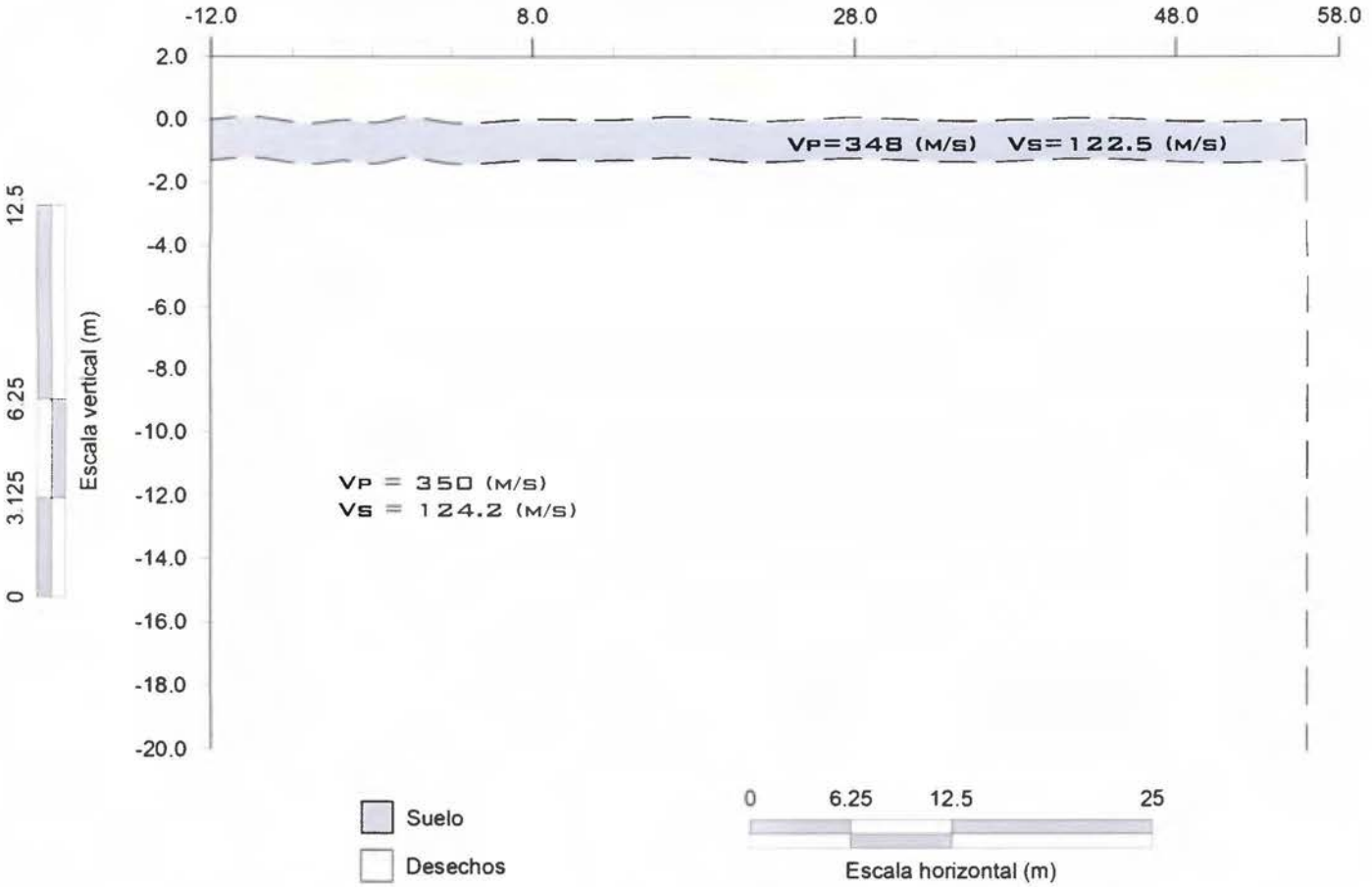


Figura 47. Interpretación del perfil sísmico #2

5.3 Análisis de la deformabilidad y resistencia cortante de las capas geosísmicas.

De acuerdo a lo señalado en el apartado 2.3 del marco teórico, el método geofísico de refracción sísmica permite conocer de manera indirecta la deformabilidad del suelo a través de sus módulos de elasticidad de Young (E) y el coeficiente de Poisson (μ), además de su resistencia de rigidez al esfuerzo cortante (G).

En este sentido, obtenidas las velocidades de profundas del medio (V_P= Onda primaria de compresión y V_S= Onda secundaria o cortante), se procedió a calcular y caracterizar geotécnicamente al subsuelo que cubre parte del Relleno Sanitario en estudio.

5.3.1 Deformabilidad y resistencia del Perfil #1

Cuadro 6 resume los resultados alcanzados para el perfil #1. Tomando en cuenta que la deformabilidad se describe por medio del Módulo de elasticidad de Young (E) y el Coeficiente de Poisson (constante elástica).

Cuadro 6. Resumen de resultados alcanzados por la Sismica de Refracción perfil #1.

Capa	Espesor	V_p	V_s	Densidad	Módulo de Elasticidad de Young (E)	Esfuerzo cortante (G) Shear Mode	Coeficiente de Poisson (μ)
	(m)	(m/s)	(m/s)	(kN)/m^3	(MPa)	(MPa)	
Capa 1	1	360	126.0	1.556	24.70	70.64	0.430
Capa 2	Indefinido	374	130.9	1.556	26.65	76.24	0.430

kN/m^3= KiloNewtons sobre metro cúbico.
MPa= MegaPascales (unidades de presión)
Coeficiente de Poisson: Índice de deformabilidad, entre más cercano a cero, más fácil de deformar. (sin unidades)
Deformabilidad: Módulo de Young y Coeficiente de Poisson.

Del cuadro anterior, se puede inferir que el suelo analizado, desde un punto de vista geotécnico, presenta condiciones de alta deformabilidad y compresibilidad, dada las características de alta plasticidad presentadas en los estudios de suelos mostrados en el capítulo 4.4 sobre caracterización geotécnica, en donde se obtuvieron suelos blandos de alta plasticidad clasificación tipo MH (Salazar et al 2014).

Puede apreciarse como la capa 1 presenta velocidades de ondas sísmicas primarias y secundarias o cortantes entre 360 y 126 m/s (V_P y V_S respectivamente), las mismas que generan un coeficiente de Poisson (μ) de 0,43, y módulos de elasticidad (E) y esfuerzo cortante (G) de entre 70,64 y 24,70 MPa. Estos valores indican la presencia de suelos poco elásticos y poco resistentes a los esfuerzos cortantes, lo cual podría suponer suelos con poca capacidad soportante a cargas externas. Así mismo, por lo general (salvo excepciones) se cumple que las condiciones del suelo mejoran con la profundidad, tanto en resistencia como en deformabilidad. En el caso de análisis, la presencia de una segunda capa de suelo más competente es cierta, dado que la caracterización del suelo por ambos módulos (E y G) mejoran en cuanto calidad del suelo, ascendiendo ello a 76,64 y 26,65 MPa, indicando con ello que el material de la segunda capa es un poco más elástico y resistente a los esfuerzos de corte; dejando relegado el comportamiento plástico que pudiera haber tenido.

5.3.2 Deformabilidad y resistencia del Perfil #2

De la interpretación geotécnica de este perfil, se puede deducir que los valores hallados de velocidad de onda primaria y secundaria de 350 y 122,50 m/s del primer estrato, según la clasificación del Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR-2010) correspondientes a suelos blandos, es decir, a suelos poco competentes para soportar cargas elevadas de esfuerzos, así como una alta tasa de deformabilidad debido principalmente por ser limos de alta plasticidad (clasificación SUCS: MH). Tanto los valores alcanzados del módulo de esfuerzo cortante (G) como del módulo de elasticidad de 22,56 y 64,54 MPa, muestran que esta capa de suelo de

aproximadamente 1,5 m de espesor, estaría propensa a sufrir falla por capacidad soportante de una carga externa, así como una gran parte de su área a deformarse.

Los valores hallados en la segunda capa así lo demuestran, alcanzando estos una ligera mejora en los mismos de 23,21 y 66,40 MPa. Por tanto se infiere que esta capa, de profundidad no determinada, presenta una ligera mejoría en la soportabilidad de cargas actuantes externas, pero siempre se mantienen en rangos de alta deformabilidad. Los resultados se resumen en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Resumen de resultados alcanzados por la Sísmica de Refracción Perfil sísmico #2

Capa	Espesor	Vp	Vs	Densidad	Módulo de Elasticidad de Young (E)	Esfuerzo cortante (G) Shear Mode	Coeficiente de Poisson (μ)
	(m)	(m/s)	(m/s)	(kN/m^3)	(MPa)	(MPa)	
Capa 1	1	350	122.500	1.504	22.56	64.54	0.430
Capa 2	Indefinido	355	124.250	1.504	23.21	66.40	0.430

KN/m^3= KiloNewtons sobre metro cúbico.
MPa= MegaPascales (unidades de presión)
Coeficiente de Poisson: Índice de deformabilidad, entre más cercano a cero, más fácil de deformar. (sin unidades)

5.4 Cartografiado de los sitios con presencia de lixiviados

La conductividad eléctrica es un indicador de presencia de lixiviados, ya que se componen de sólidos totales disueltos (STD), aniones, cationes, metales pesados y sales, por lo tanto presentan una mayor facilidad para conducir la electricidad que las aguas naturales.

El Reglamento de Vertidos de Costa Rica 33601-2007 no tiene límites máximos establecidos para la conductividad eléctrica, pero el Reglamento de Calidad de Agua Potable de Costa Rica No. 32327.-S recomienda valores menores a los 400 μS/cm. Las aguas subterráneas naturales investigadas en la microcuenca presentan valores promedio de 73 μS/cm gracias a las treinta y cuatro mediciones in situ que se realizaron con conductivímetro de campo, mientras que los valores

de lixiviados usualmente superan los 1000 µS/cm según mediciones realizadas en el RSSR.

Figura 48. Fotografías de sitios de muestreo de conductividad eléctrica, STD, temperatura y ph.

Figura 49. Fotografías de sitios de muestreo de conductividad eléctrica, STD, temperatura y ph

En la Figura 50. Gráfico de variación de la conductividad eléctrica en cuerpos de agua superficial se observan los contrastes entre las aguas naturales con conductividades inferiores a 115µS/cm y las aguas provenientes de los desechos con valores superiores en los rangos entre 1000µS/cm hasta los 4000µS/cm. La mezcla de aguas de manantial y lixiviados en la quebrada Sin Nombre presenta valores aguas abajo del RSSR de 500 µS/cm, lo que presenta un efecto de dilución de los contaminantes. Lo preocupante respecto a la contaminación del agua superficial y subterránea, es que no existe un sistema de recolección y tratamiento de lixiviados, por lo que los contaminantes del Relleno Sanitario se transportan libremente hasta el Río Barranca y finalmente al Océano Pacífico.

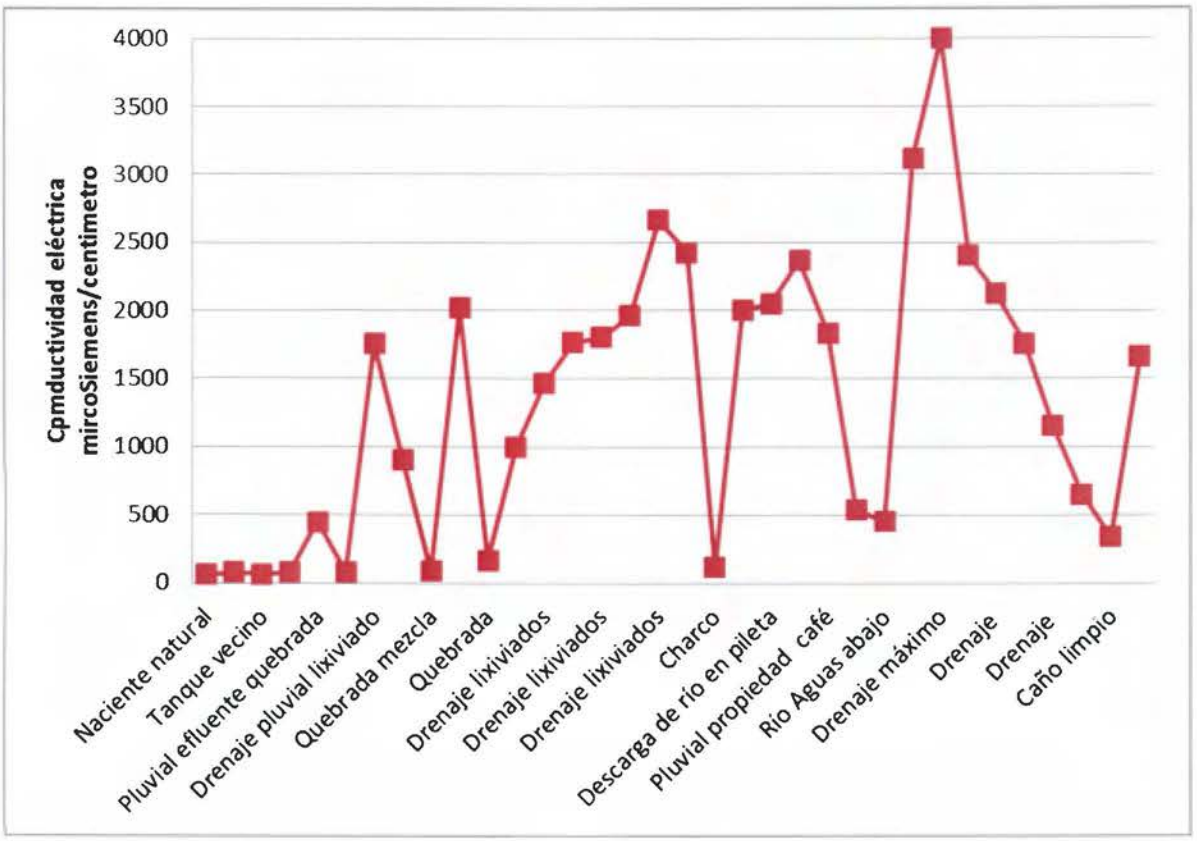


Figura 50. Gráfico de variación de la conductividad eléctrica en cuerpos de agua superficial

Definición del variograma para la interpolación Krigeana en la espacialización de la contaminación por lixiviados

Para realizar un cartografiado de la distribución espacial de los lixiviados según la conductividad eléctrica del agua, se hizo un análisis con el método kriegen para tres variogramas, específicamente lineal, esférico y logarítmico programa Surfer 11. Los resultados comparativos se observan en la Figura 51 y con ellos se tomó la decisión de utilizar el variograma con tendencia esférica, pues es la que mejor se ajusta espacialmente a la realidad vista en campo.

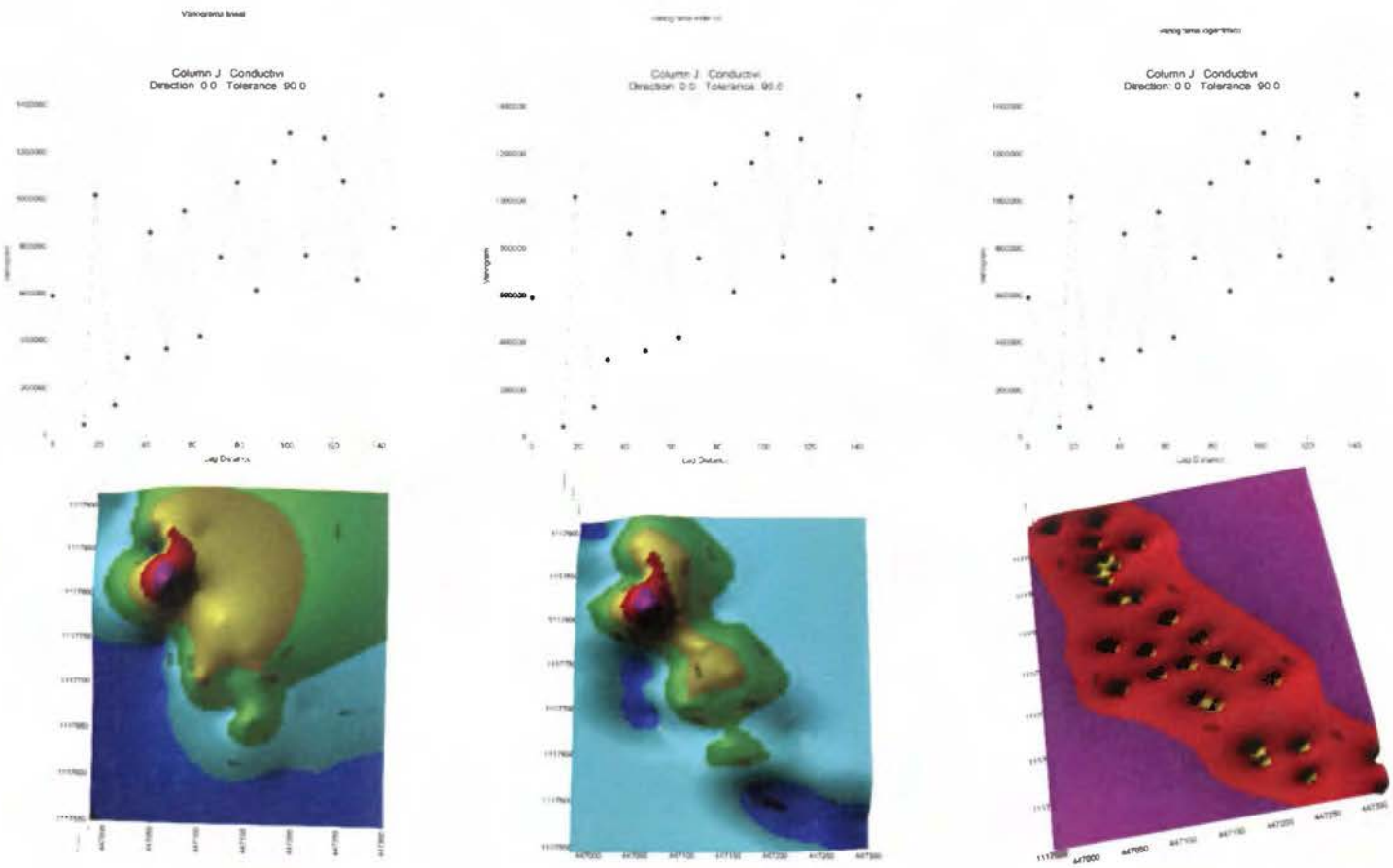


Figura 51. Comparación de variogramas en la interpolación kriegeana de contaminantes según conductividad eléctrica del agua. Izq. Variograma lineal, centro esférico y derecha logarítmica.

La optimización espacial de los geodatos de conductividades sirven de herramienta para la toma de decisiones en la implementación de un sistema de recolección y tratamiento de lixiviados. De esta forma se pueden definir los focos de descarga de contaminantes y establecer zonas prioritarias a intervenir. Se detecta que las principales zonas con presencia de lixiviados se ubican en los pies de talud, así como en las laderas de los desfogues pluviales, principalmente hacia el Sur-Este de la propiedad, el cual coincide con el flujo de escorrentía del agua. Figura 52. Mapa de conductividades eléctricas en agua.

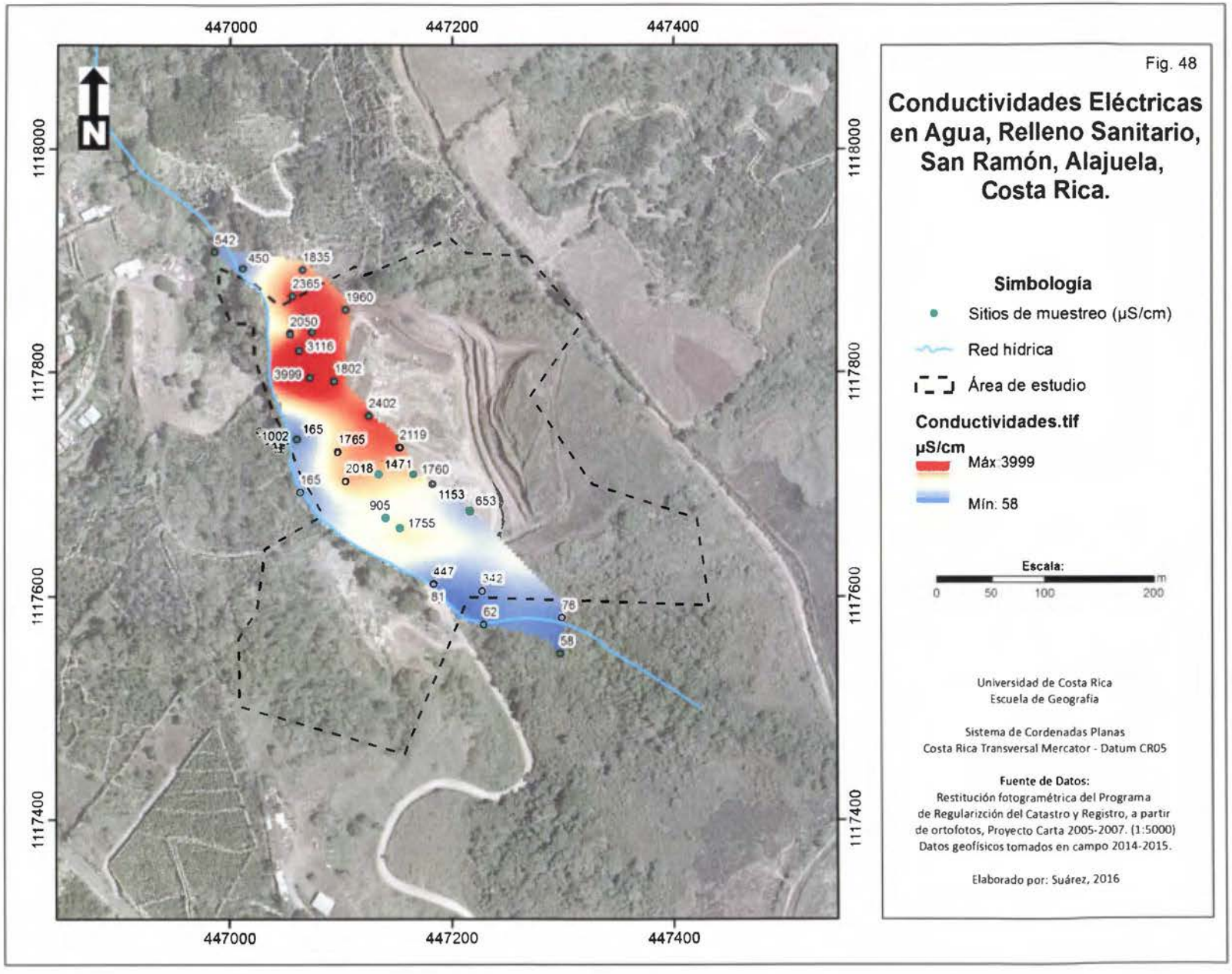


Figura 52. Mapa de conductividades eléctricas en agua.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se cumplió con el objetivo general de este estudio: la creación de un modelo geofísico del Relleno Sanitario San Ramón con base en métodos geoeléctricos y sísmicos. Ahora se conoce con más detalle la distribución espacial y profundidad de las capas de desechos subterráneos.
- El modelo geoeléctrico propuesto para el Relleno Sanitario San Ramón, basado en dos tomografías eléctricas y un sondeo eléctrico vertical, reveló que tiene una primera capa que se relaciona con suelos, antiguas coberturas de desechos o zonas de caminos, la cual presenta valores de resistividad en el rango de los 20-40 Ohm y espesores de 1 a 2m. La segunda capa se compone de desechos enterrados con resistividades entre los 1 y 20 Ohm, de los cuales se puede subdividir la zona zonas con presencia de lixiviados que tienen resistividades inferiores a los 10 Ohm; estas capas tienen espesores entre 15 y 30m. Además, se detectaron los indicios del basamento a partir de los 37m de profundidad con resistividades mayores de 40 Ohm. Las resistividades tan bajas del basamento permiten considerar la posibilidad de una percolación de lixiviados hacia este estrato geológico subyacente.
- La construcción del modelo sísmico para el Relleno Sanitario San Ramón se realizó por medio de dos perfiles de sísmica de refracción, los cuales lograron caracterizar principalmente las primeras dos capas superficiales. La primera capa corresponde con suelos, antiguas coberturas de desechos o zonas de caminos, tiene un espesor variable entre 1 y 2 m, presenta valores de velocidad de onda p de 350-374 m/s, y velocidad de onda s 122-126 m/s. La segunda capa corresponde a los desechos enterrados mezclados con limos y arcillas de muy alta plasticidad, sus velocidades de onda p variaron entre 355-374 m/s y las ondas s entre 124-130 m/s. Las profundidades de

prospección alcanzaron los 20m, sin embargo, no se logró detectar el basamento.

- Se realizó una caracterización geotécnica del relleno donde los valores hallados de velocidad de onda primaria (350 m/s) y secundaria (122 m/s) del primer estrato según el Código Sísmico de Costa Rica 2010, correspondientes a suelos blandos, es decir, a suelos poco competentes para soportar cargas elevadas de esfuerzos, así como una alta tasa de deformabilidad debido principalmente a su alta plasticidad (clasificación ML). Los valores alcanzados en el módulo de esfuerzo cortante (G) como del módulo de elasticidad de 22,56 y 64,54 MPa, muestran que esta capa de suelo de aproximadamente 1,5 m de espesor, estaría propensa a sufrir falla por capacidad soportante de una carga externa, así como una gran parte de su área a deformarse.

- En cuanto a la comparación entre métodos geofísicos, se concluye que ambos sistemas más bien se complementan, la tomografía eléctrica tiene una mayor profundidad de prospección para la detección de estratos en con bajas velocidades de onda, y la sísmica permite calcular parámetros geotécnicos, que son insumo para el diseño ingenieril de construcción de un sistema de recolección y tratamiento de lixiviados.

- Se logró detectar y cartografiar los focos de descarga de caudales de lixiviados subterráneos hacia las aguas superficiales del RSSR. Para ello se realizó un cartografiado empleando Sistemas de Información Geográfica por medio de medición del indicador de conductividad eléctrica insitu y ubicación con Sistema de Posicionamiento Global. Las aguas subterráneas naturales en la microcuenca presentaron valores promedio de 73 µS/cm, mientras que los valores de lixiviados usualmente superaron los 1000 µS/cm. Todos los sitios mencionados, tienen un drenaje hacia el sistema fluvial natural de la quebrada Sin Nombre, que descarga en el Río Barranca y finalmente en el Océano Pacífico, todo esto sin recibir un tratamiento de descontaminación, puesto que no existe una planta de tratamiento en el sitio.

Recomendaciones:

1. Continuar investigando en la mejora de los modelos geofísicos del Relleno Sanitario San Ramón por medio de la perforación de tres piezómetros de investigación, con profundidades de al menos 80m que permitan conocer la litología insitu y definir las características estratigráficas del basamento.
2. Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual y posteriormente un modelo numérico, utilizando información de los piezómetros de exploración, y el modelo geofísico mejorado, para conocer la presencia de aguas subterráneas y por medio de la realización de tres pruebas de bombeo definir las caracteristicas hidráulicas de los estratos encontrados, tomando en cuenta la transmisividad, conductividad hidráulica, gradiente hidráulico, dirección de flujo del agua subterránea.
3. De encontrarse acuíferos, analizar fisicoquímicamente la presencia de contaminantes, para descartar que el relleno sanitario esté contaminando las aguas subterráneas. Según reglamento de vertidos y reuso de aguas residuales No. 33601-2007 del Ministerio de Salud.
4. Se recomienda que en las campañas de monitoreo de calidad de agua, agregar el parámetro de conductividad eléctrica como indicador de presencia de lixiviados. De esta forma se pueden monitorear las quebradas, los desfogues pluviales y los futuros piezómetros existentes y saber si aumenta o disminuye la presencia de lixiviados en las aguas superficiales y subterráneas.
5. Se recomienda calcular la recarga hídrica efectiva a través de metodologías especializadas como el modelo numérico HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance), la cual va de la mano con el modelaje matemático hidrogeológico y permitirá conocer cuánta agua le ingresa al relleno y proceder a impermeabilizar esas zonas, pare prevenir la generación de lixiviados.
6. Instalar una estación hidrométrica en la quebrada colindante con el RSSR a fin de conocer los caudales de descarga al Río Barranca y facilitar su monitoreo, ello generará series históricas de caudales, las cuales son insumos para modelos matemáticos hidrológicos e hidrogeológicos.

7. Diseñar un sistema de recolección de lixiviados que recoja los contaminantes y los encause a una planta de tratamiento, la cual también tiene que ser diseñada y construida en el sitio, previo a la descarga a la quebrada Sin Nombre y Río Barranca.

CAPITULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIAS, M.E., 2007: Modelación directa y comparación de los principales dispositivos geoeléctricos. - Ciencia y Tecnología, 25: 7 – 23.

ARIAS, M. 2010. *Sísmica de refracción.* Curso de Geofísica. Univ. Costa Rica, San José. 16 págs.

ARIAS, M.E., 2010: Sísmica de reflexión – Curso geofísica, Univ. Costa Rica 13 págs.

INSTITUTO DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS (AyA) 2015: Características de los derechos de uso de aguas en sistemas de abastecimiento en la Región Pacífico Central. 2 Págs.

BERGOEING, J. & MALAVASSI, E., 1981: Hoja geomorfológica del Valle Central de Costa Rica, Hoja Naranjo Hoja 3345 I - Escala 1:5000, IGN, San José.

BIRKEL, CHRISTIAN., 2016: Balance hídrico nacional. Sin publicar

BRAJA M. DAS., 2004: Principios de ingeniería de cimentaciones. 5ª edición, Editorial CENGAGE Learning. USA, 743 págs.

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA (CATIE) 2015: Producto 2 "Plan de manejo integral de la cuenca del río Barranca", SINAC, MINAE. 286 págs.

CHAVES E., RAMÍREZ G.; ZELEDÓN R., 1991: Diagnóstico de los recursos naturales de la cuenca del río Barranca, Costa Rica. 389 p. Universidad de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].

Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR-2010), Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos. Costa Rica.

DENYER, MONTERO & ALVARADO 2003: Atlas Tectónico de Costa Rica. -79 págs. Univ. Costa Rica. San José.

DENYER, P. & ARIAS, O., 1991: Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica.- Rev. Geol. América. Central, 12: 1-59.

DENYER, P. & ALVARADO, G.E., 2007: Mapa Geológico de Costa Rica, Escala 1:400 000.- Dirección de Geología y Minas, San José.

DÍAZ S. 2007: Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie. 28 págs. III Coloquio, Academia de Ingeniería, México.

FEDERACIÓN OCCIDENTAL DE MUNICIPALIDADES DE ALAJUELA (FEDOMA), INSTITUO DE FOMENTO Y ASESORIA MUNICIPAL DESCENTRALIZACIÓN DEMOCRÁTICA Y FORTALECIMIENTO LOCAL (IFAM), PROYECTO DE FORTALECIMIENTO MUNICIPAL Y DESCENTRALIZACIÓN (FOMUDE). (2011). *Plan Municipal para la Gestión Integral de Residuos Sólidos.* San Ramón.

FETTER, C.W., 2000: Applied Hydrogeology (4th Edition), Oshkosh 98 pág.. Fetter, C. W., Jr., 2000, Applied Hydrogeology, Third Edition, Prentice-Hall Publishing Co. New York, 691 págs.

INGEOFICA 2000 S.A, 2001: Estudio geofísico complementario para el estudio de estabilidad de los taludes en tres zonas selectas. Relleno Sanitario Río Azul, Costa Rica; 16 págs.

KIRSCH R., (2009): Groundwater Geophysics, a Tool for Hydrogeology. Ed. Springer, Germany, 556 págs.

MADRIGAL, R., 1967: Estudio geológico y evaluación de algunos yacimientos de piedra pómez en Costa Rica.- 9 pág. Informes Técnicos y Notas Geológicas.

MILSOM J., (2003): Field Geophysics, the geological field guide series. Ed Wiley, Third Edition, London, 249 págs.

MUNICIPALIDAD DE SAN RAMÓN. 2013: *Relleno Sanitario de San Ramón: Antecedentes y estado actual.* San Ramón: Municipalidad de San Ramón.

ORELLANA E. 1972: Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid, 571págs.

Özcep F., 2010: SoilEngineering: a Microsofts Excel® Spreadsheet© Program for Geotechnical and Geophysical Analysis of Soils, Computers & Geosciences, Volume 36, Issue 10, October 2010, Págs 1355-1361.

PAÍS, P. E. (18 DE 07 DE 2013). Sala IV ordena a Municipalidad de San Ramón iniciar cierre del basurero. *El País*.

PROGRAMA COMPETITIVIDAD Y MEDIO AMBIENTE (CYMA) 2008: Plan de Residuos Sólidos Costa Rica (PRESOL). Plan de Acción—San José, 78 págs.

RAMIREZ G., 1991: Situación ambiental de la cuenca del rio Barranca. Puntarenas-Costa Rica. Proyecto de abastecimiento de agua potable para el gran Puntarenas.

RAVELO, D., 2007: Inversión e interpretación de datos de resistividad aparente en 2D adquiridos en relieve topográfico. –118 págs. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela. [Tesis Lic.]

REGLAMENTO DE VERTIDOS Y REUSO DE AGUAS RESIDUALES 33601-2007, Ministerio de Salud, Gobierno de Costa Rica, San José.

REGLAMENTO DE CALIDAD DE AGUA POTABLE 32327.-S, Ministerio de Salud, Gobierno de Costa Rica, San José.

RETANA, M., SALAZAR V., & ZUÑIGA, H. 2014: Proyecto Cierre Técnico Relleno Sanitario de San Ramón, Provincia de Alajuela, Costa Rica Estudio de Diagnóstico Ambiental (EDA). Expediente Administrativo N° D1 – 963 – 2010 SETENA. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, UCR. 105 págs.

ROJAS, I., 2007: Diagnóstico de la generación, recolección y tratamiento de los lixiviados del Relleno Sanitario San Ramón y propuesta de alternativas tecnológicas para su mejoramiento. 226 págs. Univ. Costa Rica, San José. [Tesis Lic.].

ROJAS, V., 2013: Relación entre los proceso Volcano – sedimentarios y el neotectonismo de la cuenca lacustrina de Palmares y San Ramón, Costa Rica.- 159 págs. Univ. de Costa Rica. [Tesis Lic.].

SALAZAR V, RETANA M., ZÚÑIGA H., 2014: Estudio de Diagnóstico Ambiental (EDA), Proyecto Cierre Técnico Relleno Sanitario de San Ramón, Alajuela, Costa Rica. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG), Universidad de Costa Rica (UCR) 105 págs.

SANCHEZ R., & BIRKEL C., 2016: Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous región. AGU Publications, Geophysical Research Letters. 43, doi:10.1002/ 2016GL068888.

SUÁREZ, J. (2014). Evaluación hidrogeológica del Relleno Sanitario Río Azul. .- 226 págs. Universidad de Costa Rica, San José [Tesis MSc.].

ŽÁČEK, V., VOREL, T., KYCL, P., HUAPAYA, S., MIXA, P., GRYGAR, R., HAVLÍČEK, P., ČECH, S., PETR HRAZDÍRA, P., METELKA, V., ŠEVČÍK, J. & PÉCSKAY, Z., 2012: Geología y estratigrafía de la hoja 3246-ii Miramar, Costa Rica.- Revista Geológica de América Central, 47: 7-54, 2012.