



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



PROGRAMA PRESUPUESTAL N° 068: REDUCCIÓN DE LA VULNERILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERENCIAS POR DESASTRES

Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica
Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico



ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE SAN ANTONIO

Lima - Perú

2017

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipion

Autores

Isabel Bernal

Caracterización Geofísica de la Ciudad de San Antonio

Juan Carlos Gómez

Caracterización Geológica y Geotécnica de la Ciudad de San Antonio

Equipo de Evaluación Geológica y Geotécnica: Mariana Vivanco

Equipo de Evaluación Sísmica y Geofísica: Fabiola Rosado / Henry Salas / Wilfredo Sulla Liliana
Torres / Javier Oyola / Kelly Parí / Luz Arredondo / Jesús Huarachi / Orlando Huancoco

Personal de apoyo: Augusto Cárdenas / Roberth Yupanqui

Personal administrativo: Estela Torres

Este Informe ha sido producido por:

Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169, Mayorazgo IV etapa, Ate
Teléfono (511) 3172300

ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE SAN ANTONIO

Distrito de San Antonio – Provincia de Cañete – Región Lima

Lima - Perú
2017

RESUMEN

*En el marco del Programa Presupuestal por Resultados N°068: Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres se ejecutó el proyecto “**Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica**”, el mismo que tuvo como una de sus actividades la “**Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico**” obteniéndose como resultado final, la Zonificación Geofísica - Geotécnica de las áreas urbanas de las ciudades/localidades de Chilca (distrito de Chilca), Coayllo (distrito de Coayllo), Humay y Bernalles (distrito de Humay), Imperial (distrito de Imperial), Nuevo Imperial (distrito de Nuevo Imperial), Quilmaná (distrito de Quilmaná), San Antonio (distrito de San Antonio), San Clemente (distrito de San Clemente) y San Luis (distrito de San Luis). Estos estudios permiten conocer el Comportamiento Dinámico de los Suelos a partir de la recolección de datos de campo utilizando técnicas geofísicas, sísmicas, geológicas y geotécnicas.*

El análisis e interpretación de los datos obtenidos permiten tener como resultado la “Zonificación Geofísica – Geotécnica de los suelos de la ciudad de San Antonio”, información primaria que debe ser utilizada por ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio. Este documento técnico debe constituirse como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

ÍNDICE

RESUMEN

ÍNDICE

PARTE 1: Presentación

1. Introducción

1.1. Objetivo

1.2. Historia

1.3. Accesibilidad y clima

1.4. Economía

1.5. Estudios Previos

2. Condiciones locales de sitio

2.1. La Norma Técnica E.030

PARTE 2: Caracterización geológica y geotécnica de la ciudad de San Antonio.

PARTE 3: Caracterización geofísica de la ciudad de San Antonio.

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS: Documentos y Anexos se adjuntan en formato digital.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 '**Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres**', el Instituto Geofísico del Perú ejecutó durante el año 2016 el Proyecto **-Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica** y como parte del mismo, la Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida desarrollo la Actividad "**Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico**" a fin de obtener el Mapa de Zonificación Geofísica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para el área urbana de las siguientes ciudades (Figura 1):

- **Chilca**, distrito de Chilca, provincia de Cañete, región de Lima.
- **Coayllo**, distrito de Coayllo, provincia de Cañete, región de Lima.
-
- **Humay y Bernales**, distrito de Humay, provincia de Pisco, región de Ica.
-
- **Imperial**, distrito de Imperial, provincia de Cañete, región de Lima.
-
- **Nuevo Imperial**, distrito de Nuevo Imperial, provincia de Cañete, región de Lima.
-
- **Quilmaná**, distrito de Quilmaná, provincia de Cañete, región de Lima.
-
- **San Antonio**, distrito de San Antonio, provincia de Cañete, región de Lima.
-
- **San Clemente**, distrito de San Clemente, provincia de Pisco, región de Ica.
-
- **San Luis**, distrito de San Luis, provincia de Cañete, región de Lima.

De acuerdo a su historia sísmica, el Perú presenta en su borde occidental un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos que de acuerdo a su magnitud, muchos de ellos han producido daños importantes en ciudades y localidades distribuidas cerca de la zona costera. La ocurrencia de efectos secundarios como asentamientos, licuación de suelos, derrumbes, caídas de roca y tsunamis propiciaron el incremento de pérdidas humanas y materiales en el área epicentral (Silgado, 1978; Dorbath et al., 1990; Tavera y Buforn, 2001). Al ser los sismos cíclicos, es de esperarse que, en el futuro, las mismas ciudades y/o áreas urbanas sean afectadas por nuevos eventos sísmicos con la misma o mayor intensidad. Entonces, no es tan importante el tamaño del sismo, sino la intensidad del sacudimiento del suelo, la educación de la población y la calidad de las construcciones.

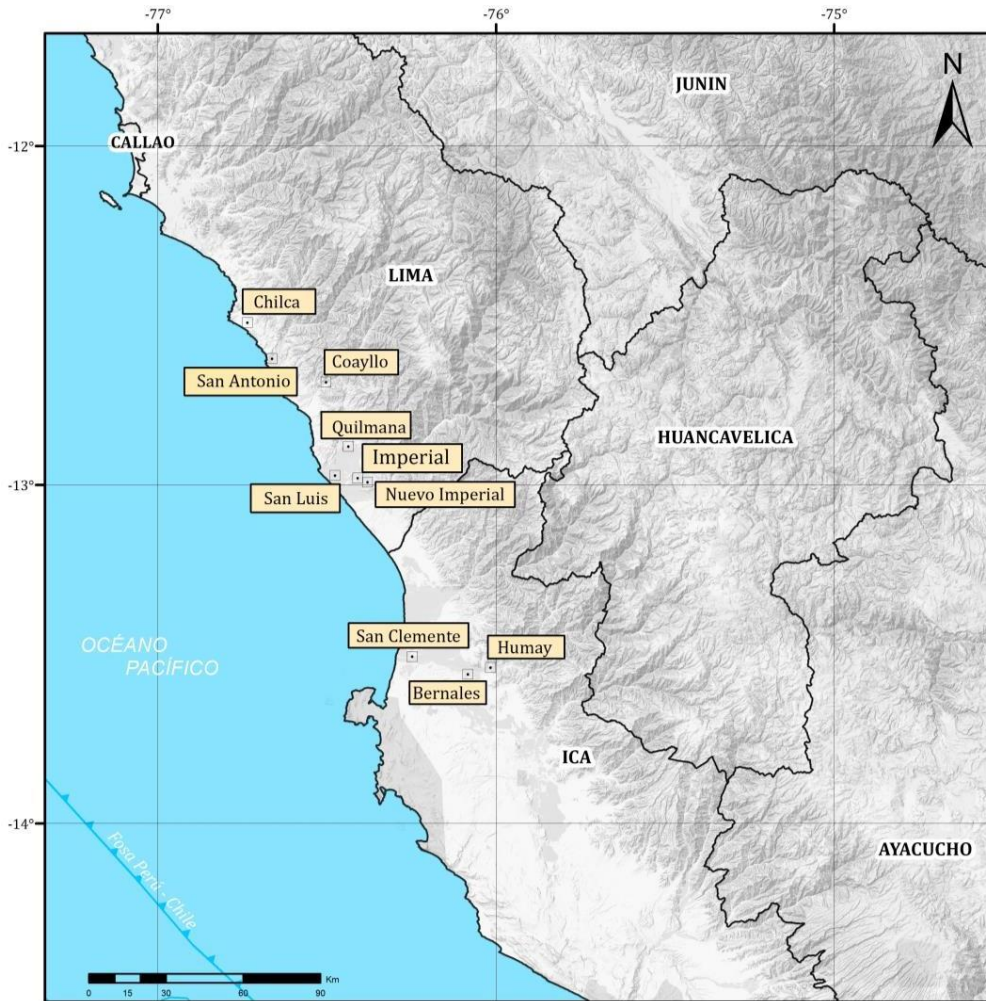


Figura 1: Distribución espacial de las ciudades con estudios de Zonificación Geofísica- Geotécnica de suelos.

Los estudios de Zonificación Geofísica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo), permitirán tener mayor conocimiento sobre las características dinámicas del suelo sobre el cual se levantan las ciudades y/o futuras áreas de expansión. Para ello se realiza la aplicación de diferentes metodologías que consideran datos sísmicos, geológicos y geotécnicos. Los resultados que se obtienen permiten comprender que no hay suelo malo y que solamente se debe considerar el diseño y la construcción de viviendas y estructuras apropiadas para cada tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de la ciudad de San Antonio debe comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente (www.acerosarequipa.com):

- a) **Buenos Planos.** Los planos de construcción deben ser hechos por profesionales con pleno conocimiento de las características dinámicas del suelo descritas en los Mapas de Zonificación Geofísica – Geotécnica.
- b) **Buenos Profesionales.** Para la construcción de las viviendas y/o obras de

ingeniería se debe contar siempre con la supervisión de ingenieros civiles, arquitectos, etc.

- c) **Buenos materiales.** Solo la calidad de los materiales que se utilizan en la construcción permitirá tener la seguridad de que las estructuras fueron correctamente construidas.

Es importante remarcar que la Zonificación Geofísica – Geotécnica de suelos permite conocer sus características y se constituye como información primaria a ser utilizada por los ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de las estructuras apropiadas para cada tipo de suelos identificados en cada zona de estudio. Asimismo, debe considerarse como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

1.1. Objetivo

El principal objetivo a cumplir en este estudio es obtener el mapa de Zonificación Geofísica - Geotécnica para la ciudad de San Antonio, provincia de Cañete región Lima, a partir de la integración de los resultados obtenidos con diferentes métodos sísmicos, geofísicos, geológicos y geotécnicos. Asimismo, es de interés del presente estudio que las autoridades dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del ordenamiento territorial y desarrollo sostenible de la ciudad.

1.2. Historia

En el Intermedio Tardío (900 – 1475 d.n.e.) se desarrollaron 162 sitios arqueológicos en todo el valle de Mala, siendo los más representativos El Salitre por su función de centro ceremonial y cerro Salazar por su cerámica (Municipalidad de Mala, s.f.). La ocupación inca del valle durante el Horizonte Tardío, ocasionó la creación de nuevos asentamientos como Conrral Quemado, Piedra Angosta, Cuesta Alta, La Vuelta y Ollerial, que se encontraban unidos por un camino inca paralelo al cauce del valle. Los sitios establecidos en el periodo cronológico anterior, continuaron con sus funciones sin cambios (Paredes, 2010).

En la época colonial, Mala pasa a ser constituida como una encomienda al igual que Cañete a cargo de Pedro Alconchel. En el año de 1600, se inició la constitución de

haciendas en oposición al sistema de encomiendas, las primeras localizadas en el valle fueron Señor de la Escala, Chuquipampa y El Salitre (Municipalidad de Mala, s.f.).

En 1769 Nicolás Avila Manco Rimanchi Yupanqui Quispe, partió a España para presentarse ante el Concejo de Indias y reclamar la propiedad de sus tierras y de la comunidad de San Antonio, pues los habitantes de Chilca pretendían apoderarse de ellas. El viaje de tres meses fue sufragado con recursos de Avila Manco y aportes de los comuneros de San Antonio. El reclamo fue atendido y en consecuencia la propiedad de las tierras quedó legitimada. El viajero retornó trayendo manzanas, vides, olivos y otras plantas que fueron sembradas para beneficio de los pobladores de esta zona (Municipalidad de San Antonio, s.f.).

En 1900, la British Sugar Company se asentó sobre los terrenos de haciendas situadas en el valle de Mala, organizadas para explotar la caña de azúcar de bourbón, incrementándose la organización del agro, con tierras cultivadas de frutales sobretodo la vid (Municipalidad de San Antonio, s.f.). La demanda de mano de obra para los campos de cultivo de caña y frutales, ocasionó el incremento demográfico de las comunidades y/o anexos ubicados en el valle de Mala, debido a las migraciones suscitadas.

Considerando el aumento poblacional y la potencialidad agrícola de las tierras de la comunidad de San Antonio, se hizo imperiosa la necesidad de una repartición territorial independiente como lo señala acertadamente don Germán Stiglich, representante de la Comisión de Demarcación Territorial de la Sociedad Geográfica de Lima, con fecha 26 de octubre de 1921, en un informe elevado al Presidente de la misma Sociedad indicando las razones para crear el distrito y los posibles límites. Don Pablo Nosiglia, Diputado por la provincia de Cañete, fue el autor intelectual de la Ley de creación. El Congreso de la República elevó a San Antonio a la categoría de Distrito el 21 de diciembre de 1922 y el Presidente Augusto B. Leguía rubricó la Ley N° 4611 el 27 del mismo mes (Municipalidad de San Antonio, s.f.).

La ciudad de San Antonio se encuentra ubicada en la zona costera de la provincia de Cañete al lado noroccidental, aproximadamente a 70 km al sur de Lima, se emplaza sobre el eje de la antigua carretera Panamericana Sur. Tiene una extensión total de 37.15 km² y está localizada en las coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator): 320645 E, 8601666 N y cota promedio de 36 m.s.n.m; geopolíticamente limita: por el norte con el distrito de Chilca, al este con el distrito de Santa cruz de Flores, al sur con el distrito de Mala y por el oeste con el Océano Pacífico. Desde el punto de vista jerárquico de la

Iglesia católica del Perú, forma parte a la Prelatura de Yauyos (Figura 2).

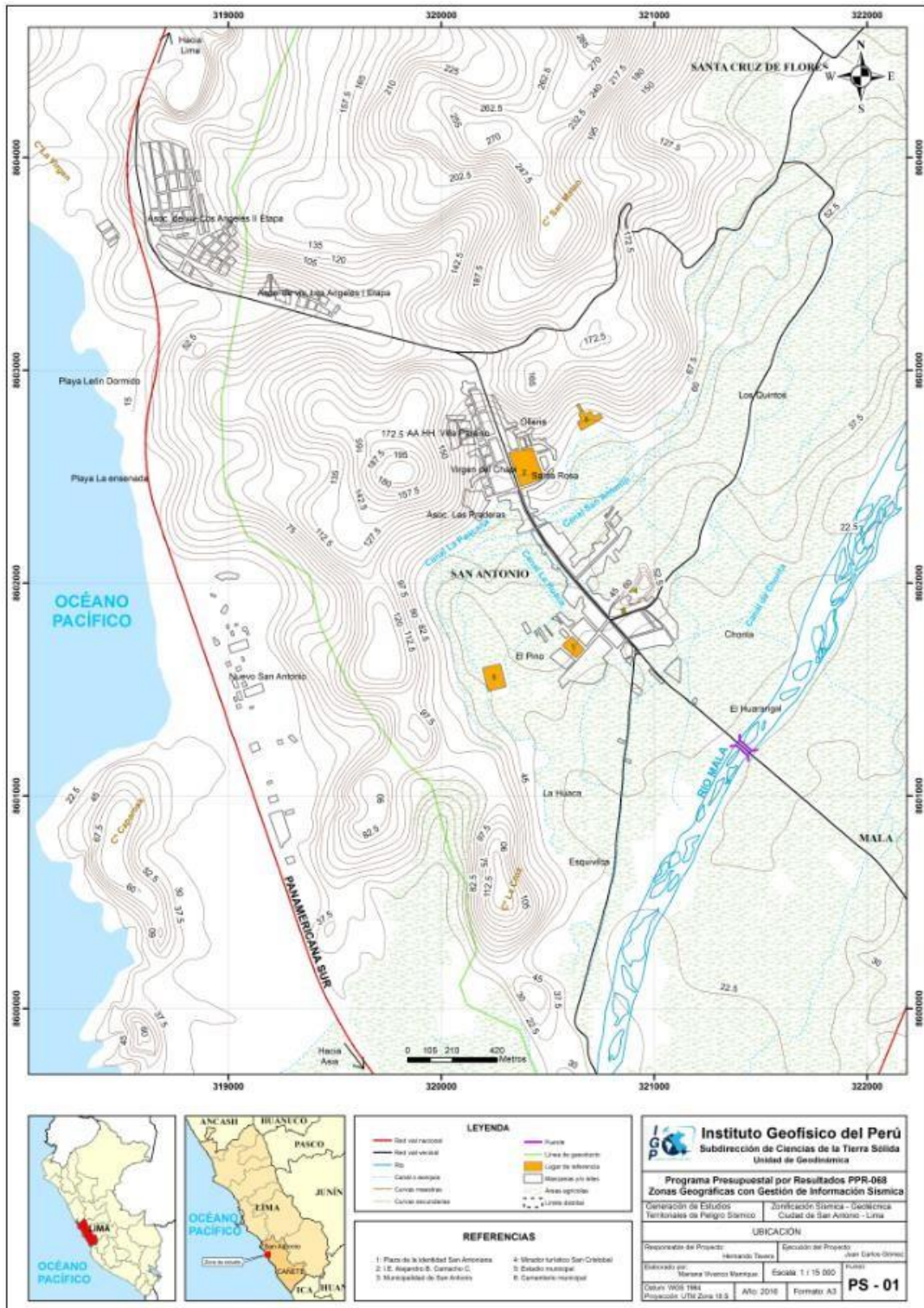


Figura 2: Mapa de ubicación geográfica de la ciudad de San Antonio.

Actualmente, la ciudad de San Antonio se encuentra constituido por 4343 habitantes (INEI, 2017), la densidad poblacional es de 116,4 hab/km², con crecimiento urbano hacia el lado norte del distrito (Figura 3).



Figura 3: Plaza principal de la ciudad de San Antonio.

1.3. Accesibilidad y Clima

El acceso a la ciudad de San Antonio se realiza por la carretera Panamericana Sur haciendo un recorrido longitudinal, hasta el intercambio vial en el kilómetro 79 (León dormido), para luego recorrer la antigua Panamericana Sur. Otra ruta de acceso a la ciudad en mención, es por el distrito de Mala, siguiendo la carretera Panamericana Antigua en dirección norte cruzando el río Mala aproximadamente a 2.5 km.

Para determinar las condiciones climáticas en la ciudad de San Antonio, se han tomado datos referenciales de la web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La estación meteorológica La Capilla 2 se encuentra ubicada a 22.67 km al NW de la ciudad, en las coordenadas geográficas; Latitud: 12° 31´ 18.1", longitud: 76° 29´ 35.3" y en cota de 442 m.s.n.m. De acuerdo a los datos obtenidos para el período 2011 – 2016), determina que la ciudad presenta un clima seco y semi-cálido, con una temperatura media mensual, que durante los meses de verano oscila entre 26 °C y 32 °C, mientras que, el mes más frío es en agosto con temperaturas de 12.60°C a 21 °C en promedio (Figura 4 y Tabla 1).



Figura 4: Estación Meteorológica "La Capilla 2", ubicada a 22 km al NO de la ciudad de San Antonio.

Tabla1: Temperaturas máximas y mínimas medias mensuales, período 2011 - 2016, Donde SD: Sin Datos. (SENAMHI, 2010).

| Estación: LA CAPILLA 2 | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------|---------------|----------|---------|-------|-------|
| Tipo Convencional - Meteorológica | | | | | | | |
| Departamento | Lima | Provincia | Cajete | Distrito | Calango | | |
| Latitud | 12° 31' 18.1" | Longitud | 76° 29' 35.3" | Altitud | 442 | | |
| Mes | Temperatura Promedio | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
| Enero | T° Max. Media mensual (°) | SD | 30.97 | 28.38 | 29.85 | 29.54 | 29.62 |
| | T° Min. Media mensual (°) | SD | SD | 18.76 | 19.31 | 18.07 | 17.14 |
| Febrero | T° Max. Media mensual (°) | SD | 30.93 | 32.14 | 31.58 | 31.25 | 31.95 |
| | T° Min. Media mensual (°) | SD | SD | 19.93 | 18.79 | 19.91 | 20.97 |
| Marzo | T° Max. Media mensual (°) | SD | 31.46 | 31.77 | 31.21 | 31.79 | 32.85 |
| | T° Min. Media mensual (°) | SD | SD | 19.58 | 18.95 | 19.68 | 20.53 |
| Abril | T° Max. Media mensual (°) | SD | 30.79 | 30.31 | 29.23 | 30.24 | 30.83 |
| | T° Min. Media mensual (°) | SD | 18.12 | 17.25 | 17.34 | 18.65 | 18.54 |
| Mayo | T° Max. Media mensual (°) | SD | 26.93 | 26.22 | 24.94 | 27.26 | 28.25 |
| | T° Min. Media mensual (°) | SD | 15.77 | 15.18 | 16.3 | 17.12 | 16.41 |
| Junio | T° Max. Media mensual (°) | 23.24 | 26.6 | 23.71 | 29.76 | 24.11 | 24.08 |
| | T° Min. Media mensual (°) | 14.87 | 15.03 | 17.77 | 15.61 | 14.91 | 14.33 |
| Julio | T° Max. Media mensual (°) | 22.38 | SD | 21.95 | 22.01 | 23.61 | |
| | T° Min. Media mensual (°) | 13.93 | 14.65 | 12.98 | 13.29 | 14.49 | |
| Agosto | T° Max. Media mensual (°) | 22.22 | SD | 21.96 | 23.12 | 22.9 | |
| | T° Min. Media mensual (°) | 13.11 | 13.43 | 12.6 | 13.33 | 14.28 | |
| Septiembre | T° Max. Media mensual (°) | 25.07 | SD | 24.13 | 23.73 | 24.61 | |
| | T° Min. Media mensual (°) | 13.58 | 14.17 | 13.41 | 13.72 | 14.55 | |
| Octubre | T° Max. Media mensual (°) | 26.44 | SD | 25.82 | 26.37 | 26.63 | |
| | T° Min. Media mensual (°) | 14.82 | 14.45 | 13.85 | 14.58 | 15.59 | |
| Noviembre | T° Max. Media mensual (°) | 27.59 | SD | 26.34 | 26.37 | 26.11 | |
| | T° Min. Media mensual (°) | SD | 15.48 | 15.1 | 15.19 | 16.14 | |
| Diciembre | T° Max. Media mensual (°) | 28.71 | SD | 28.47 | 28.27 | SD | |
| | T° Min. Media mensual (°) | SD | 17.38 | 17.17 | 16.89 | SD | |

1.4. Economía

La principal actividad económica de la ciudad de San Antonio, es el comercio al por menor y la agricultura, cuyos porcentajes de participación al PBI local es del 28.5 % y 18% respectivamente (INEI, 2007).

Según INEI (2013), el 6.5 % (271 hab) de la población total de San Antonio son pobres y dependen de los ingresos por prestaciones sociales (s/. 69 300), programas sociales de apoyo, obtenidos del gasto presupuestal anual del 2017 y del 2010, cuyo monto del ultimo asciende a la suma de s/. 2 705 976 (MEF, 2010), se observa un incremento del presupuesto que indica aún, una continua dependencia de la municipalidad con el gobierno regional y nacional.

1.5. Estudios previos

Para la ciudad de San Antonio, se ha recopilado información sobre estudios previos de geología, geotécnica, sísmica y geofísica realizados por diversos investigadores e instituciones a fin de ser considerada para cumplir con los objetivos del presente estudio, además de complementar los resultados a obtenerse. Entre los principales documentos técnicos consultados, se tiene:

- INDECI – PNUD – PER/02/051 – CIUDADES SOSTENIBLES (2003), Mapa de Peligros, Plan de prevención de desastres: Usos del suelo y medidas de mitigación ciudad de San Antonio. Este informe describe los daños causados por sismos en los años de 1940 y 1954, el uso del suelo, identifica los peligros naturales que afectarían la infraestructura física de la ciudad y finalmente hace un estudio geotécnico para determinar las propiedades de los suelos de la ciudad en mención y en base al estudio de Microzonificación Geofísica determinaron tres tipos de zonas de acuerdo al peligro por sismos en la zona de estudio, a continuación se describen cada uno de los apartados anteriormente mencionados:

San Antonio fue afectada por el sismo ocurrido en el año 1940 de intensidad VIII en escala de Mercalli Modificada de 8.2 de Magnitud y un tsunami que afectó directamente las costas de la provincia de Cañete, la consecuencia de esto fue la destrucción de viviendas, pérdidas de vidas humanas y materiales que en conjunto afectaron la economía de la zona. El sismo de 1954 de grado VI en la escala de Mercalli Modificado afectó directamente el distrito de San Antonio (destrucción de viviendas construidas con adobe y quinche).

Los suelos en la ciudad de San Antonio son de: (actividades urbanas), uso agrícola (parte baja del valle del río Mala) y uso forestal (palmeras, plantaciones de carrizales a lo largo de los canales y acequias existente). Las viviendas en San Antonio presentan problemas de salitre que aflora en sus cimientos siendo estas más notorias en el área urbana antiguall (ubicada en la terraza del margen derecho del río Mala).

Identificación de peligros naturales: Tsunami, inundaciones y erosión de laderas, estos se describen a continuación:

Peligro por tsunami: Recomienda que las construcciones urbanistas en la playa deben ubicarse a partir de la cota 4 m.s.n.m y “si hubiese algún tipo de infraestructura en esta zona sería declarada en emergencia, ante la ocurrencia de un tsunami”.

Inundaciones: El distrito de San Antonio abarca aproximadamente un área de 6.5 km por la margen derecha del río Mala, está se encuentra expuesta a inundaciones ocasionadas por los desbordes del río sobre todo en las épocas de máximas avenidas y en la presencia de fenómenos como “El Niño”. La expansión urbana hacia el sur de San Antonio donde las cotas son iguales o menores a las del río, en la margen derecha del mismo ante un eventual aumento del caudal generaría inundación de viviendasll, del mismo modo lo afirma para las áreas agrícolas que se encuentran adyacentes a las riberas del río, la infraestructura vial (antigua carretera panamericana sur, caminos carrozables internos y otras) pueden ser afectadas por la erosión de las aguas de inundaciónll. Se determinó que el riesgo por inundación es principalmente en los terrenos agrícolas que se encuentran en la margen derecha del río Mala. Inundaciones por acequias: viviendas localizadas al sureste y suroeste de San Antonio que serían afectadas por el desborde de las acequias que cruzan la ciudad producto de la colmatación por residuos sólidos y antrópicos. La erosión de laderas donde se asientan los sectores de Los Ángeles, Las Casuarinas, Virgen del Chapí, entre otros.

En San Antonio se han identificado zonas de peligro:

“Zona de Peligro Alto”: zonas ubicadas en el litoral a una cota menor de 3 m.s.n.m (tsunami) y la ribera del río Mala (inundaciones por áreas agrícolas y la zona urbana antigua de la ciudad está expuesta a peligros por sismos por presentar, tipo de suelos de relleno y relieve con pequeñas pendientes, la capacidad portante en este sector es de 1.34 kg/cm².

Zona de Peligro Medio: suelos limosos que corresponde a la parte norte de San Antonio, en los sectores de Virgen del Chapí, A.H (Los Ángeles, Miguel Grau, Madre del Amor Eterno), en estos el “relieve es bastante accidentado pendiente mayor a 12%, la capacidad portante de 1.50 a 3.30 kg/cm²”.

Zona de Peligro bajo: “áreas ubicadas al sur de la faja marginal del cauce de

la quebrada San Marcos de la Aguada, canal Bujama e inmediaciones del P.J 27 de Diciembre”.

Investigación Geotécnica:

Se realizaron cuatro (4) calicatas para determinar las propiedades físicas del suelo y para determinar la capacidad portante realizaron ensayos dinámicos DPL.

Las calicatas estuvieron distribuidas en el área urbana del distrito en mención (zonas urbanas consolidadas y de expansión).

Según los análisis de los ensayos de laboratorio de las muestras de las calicatas, se determinó:

“San Antonio tiene suelos de origen aluvial u suelos gravosos arenosos con lentes de arcilla (suelos que predominan el casco urbano de la ciudad)”.

Se realizó la MicroZonificación Geofísica del distrito de San Antonio, del cual se determinaron tres zonas: “Zona III de Peligro Medio +” (ubicada en la margen derecha del río Mala, se identificó material limoso “ML” y saturado a 0.80 m, la capacidad portante para esta zona es de 1.34 kg/cm²), “Zona II Peligro Medio (nuevas urbanizaciones, el relieve es en pendiente”, el tipo suelo es arena con gravas ‘SP”, la capacidad portante es de 1.5 kg/cm² a 3.30 kg/cm² y finalmente la Zona I - Peligro Bajo (plaza de armas e iglesia del distrito, tipo de suelo grava arenosa GP, la capacidad portante en este sector es mayor a 3.30 kg/cm².

- INGEMMET (1998). Estudio geotécnico de futuras áreas de expansión urbana entre Lima y Cañete, Boletín N° 20 – Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, señala lo siguiente:

En el sector del río Mala, predominan depósitos fluviales y aluviales que forman las terrazas del mismo, conformadas por gravas angulares y subangulares, la clasificación SUCS que reciben estos materiales son GP-GM, de naturaleza volcánica (60%) e intrusiva (40%). Señala como futura “área urbana” frente a playa La Ensenada a la fecha es Nuevo San Antonio.

2. CONDICIONES LOCALES DE SITIO

En la actualidad, es ampliamente conocido que las condiciones locales de sitio son uno de los principales factores responsables de los daños que se producen en cualquier tipo de edificación durante la ocurrencia de sismos severos. Este factor es fuertemente dependiente de las características geológicas, geomorfológicas, geodinámicas, geotécnicas y geofísicas de los suelos. En conjunto, estos controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en superficie después de ocurrido un evento sísmico.

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de Zonificación Geofísica - geotécnica y el resultado es considerado como una de las herramientas más importantes para minimizar los daños producidos por los sismos. La finalidad es evaluar el comportamiento dinámico de los suelos (CDS), teniendo en cuenta que la intensidad del sacudimiento sísmico varía considerablemente a distancias cortas y áreas pequeñas. Diversos estudios muestran, que los suelos ante la incidencia de ondas sísmicas asociadas a movimientos débiles y/o fuertes, responden de acuerdo a sus condiciones locales, pudiendo estos modificar el contenido frecuencial de las ondas y/o generar amplificaciones de las ondas sísmicas (Hartzell, 1992; Beresnev et al., 1995; Bard 1995; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994 a, b; Bard y Sesame, 2004; Bernal, 2002), ver Figura 5.

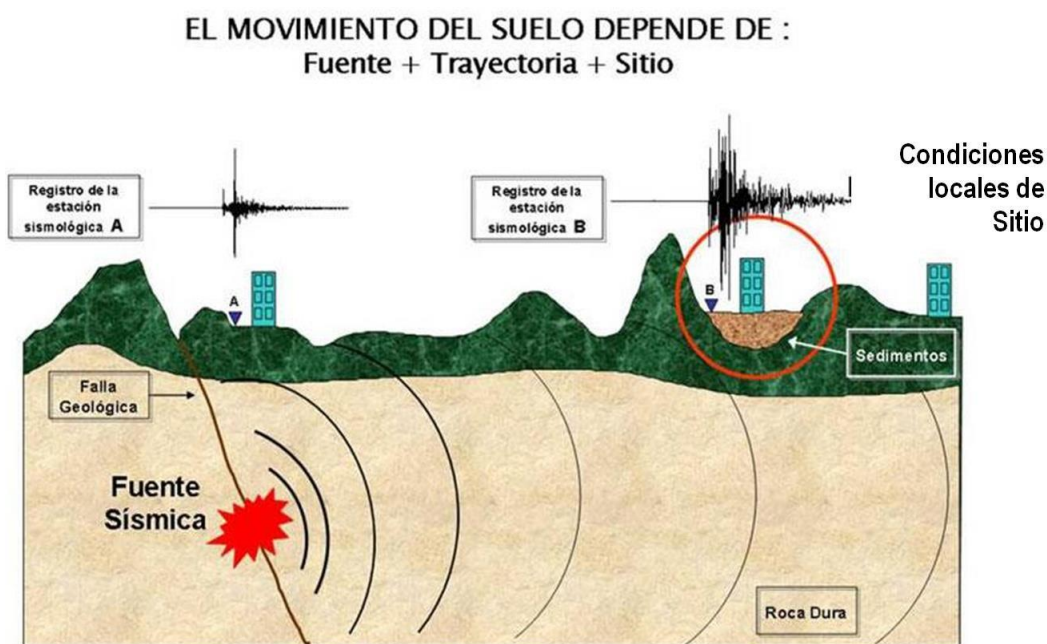


Figura 5: Las condiciones locales de sitio controlan la amplificación del sacudimiento del suelo, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos.

La metodología a seguir para lograr el mayor conocimiento sobre el comportamiento dinámico del suelo o efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad, considera estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos. Cada uno de estos campos de investigación proveen de información básica a partir de observaciones de campo y la toma de data in situ, para lo cual es necesario disponer de mapas catastrales actualizados de las zonas en estudio, así como los correspondientes a las zonas de futura expansión urbana.

En conclusión, los efectos que produce cada tipo de suelo sobre la propagación y amplitud de las ondas sísmicas, permiten tipificar los suelos y estimar su comportamiento dinámico. El resultado final es el Mapa de Zonificación Geofísica - Geotécnica que debe constituirse como el documento más importante en las tareas y programas de gestión del riesgo ante la ocurrencia de sismos.

2.1. La Norma Técnica E.030

En el Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar la Norma Técnica E.030 —Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones, modificada según Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda. Básicamente, esta norma considera los perfiles de suelos en función de sus propiedades físicas, tomando en cuenta la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte, o alternativamente, para suelos granulares, considera el promedio ponderado de los N60 obtenidos mediante un ensayo de penetración estándar (SPT), o el promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada S_u para suelos cohesivos. Se estable 5 perfiles (Tabla 2).

- **Perfil Tipo S_0 : Roca Dura**, corresponde a las rocas sanas con velocidades de propagación de ondas de corte (V_s) mayor a 1500 m/s.
- **Perfil Tipo S_1 : Roca o Suelos Muy Rígidos**, a este tipo corresponden rocas con diferentes grados de fracturación, de macizos homogéneos y los suelos muy rígidos con velocidades de propagación de onda de corte V_s , entre 500 y 1500 m/s.
- **Perfil Tipo S_2 : Suelos Intermedios**, son suelos medianamente rígidos, con velocidades de propagación de onda de corte V_s entre 180 y 500 m/s.

Tabla 2: Clasificación de los perfiles de suelo según la norma E.030

| Perfil | V_{S30} (m/s) | Descripción |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| S₀ | > 1500 | Roca dura |
| S₁ | 500 a 1500 | Roca o suelo muy rígido |
| S₂ | 180 a 500 | Suelo medianamente rígido |
| S₃ | < 180 | Suelo blando |
| S₄ | Clasificación basada en el EMS | Condiciones Excepcionales |

- **Perfil Tipo S₃: Suelos Blandos**, corresponden suelos flexibles con velocidades de propagación de onda de corte V_s menor o igual a 180 m/s.
- **Perfil Tipo S₄: Condiciones Excepcionales**, corresponde a suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables, en los cuales se requiere efectuar un estudio específico para el sitio. Será determinado con un Estudio de Mecánica de Suelos (EMS).

La velocidad de propagación de ondas de corte para los primeros 30 metros (V_{S30}) se determina con la siguiente fórmula:

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{V_{Si}}\right)}$$

Dónde:

d_i = espesor de cada uno de los estratos n.

V_{Si} = velocidad de ondas de corte (m/s)

En general, para cualquier estudio se deberá considerar el tipo de suelo que mejor describa las condiciones locales de cada zona de interés. Para este estudio, la Zonificación Geofísica – Geotécnica se realiza en función de las características mecánicas y dinámicas de los suelos que conforman el terreno de cimentación del área de estudio y de las consideraciones dadas por Norma E.030 (Diseño Sismorresistente). En tal sentido y de acuerdo a los estudios realizados, se establece la existencia de 5 zonas cuyas características son:

ZONA I: Zona conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene comportamiento rígido con periodos de vibración natural determinados por las mediciones de microtrepidaciones (registros de vibración ambiental) que varían entre 0.1 y 0.3 s, con velocidad de las ondas de corte (V_s) varía entre 500 y 1500 m/s. Corresponden a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana.

ZONA II: En la zona se incluye las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 3.0 y 10.0 m., subyaciendo a estos estratos se tiene grava eluvial o grava coluvial. Los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de microtrepidaciones, varían entre 0.3 y 0.5 s, con velocidades de las ondas de corte (V_s) que varía entre 180 y 500 m/s, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana.

ZONA III: Zona conformada, en su mayor parte, por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos varían entre 0.5 y 0.7 s, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S3 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte (V_s) fluctúa alrededor de los 180 m/s.

ZONA IV: Zona conformada por depósitos de arena eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (Según la Norma E.030, es un caso especial y/o condiciones excepcionales).

ZONA V: Zona constituida por áreas puntuales conformadas por depósitos de rellenos sueltos correspondientes a desmontes heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado con espesores entre 5 y 15 m. En esta zona se incluye también a los rellenos sanitarios que en el pasado se encontraban fuera del área urbana y que, en la actualidad, han sido urbanizados. El comportamiento dinámico de estos rellenos es incierto por lo que requieren de estudios específicos.

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, tipo de material, geometría y el número de pisos en las viviendas o de grandes obras de ingeniería. Se debe buscar que el periodo fundamental de respuesta de la estructura no coincida con la del suelo a fin de evitar el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA
DE LA CIUDAD DE ANTONIO**

CONTENIDO

1.- METODOLOGÍA

1.1.- Base Topográfica

2.- GEOMORFOLOGÍA

2.1.- Modelo Digital del Terreno (MDT)

2.2.- Pendientes

2.3.- Unidades geomorfológicas

3.- GEOLOGÍA

3.1.- Geología regional

3.2.- Geología local

4.- GEODINÁMICA

4.1.- Procesos de geodinámica interna

4.2.- Procesos de geodinámica externa

5.- ASPECTOS GEOTÉCNICOS

5.1.- Exploraciones a cielo abierto (Norma ASTM D 420)

5.2.- Densidad de suelo in situ (Norma ASTM D1556)

5.3.- Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D 1452)

5.4.- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, norma DIN4094)

5.5.- Clasificación SUCS para suelos

5.6.- Ensayo de corte directo (Norma ASTM D - 3080)

5.7.- Capacidad de carga admisible

5.8.- Problemas geotécnicos

1.- METODOLOGÍA

El estudio de cartografiado geológico, geomorfológico, geodinámico y geotécnico realizado en la ciudad de San Antonio, se desarrollaron en 3 fases:

- ✓ **Gabinete I:** Las actividades realizadas incluyeron la revisión de imágenes satelitales georreferenciadas (GeoEye-1 del Servidor Digital Globe, 2013, con resolución 0.46 m), con la finalidad de delimitar la zona de estudio. Asimismo, la recopilación de información bibliográfica de la zona a escala regional y local (boletines geológicos, informes técnicos, entre otros).
- ✓ **Campo I:** Se realizó el cartografiado de las unidades geomorfológicas y litológicas aflorantes a escala 1:15 000. Asimismo, se identificó y delimitó los eventos geodinámicos de la zona: Inundaciones (desborde de río Mala), zonas potencialmente susceptibles a la ocurrencia de flujos.
- ✓ **Campo II:** Elaboración de ensayos geotécnicos los cuales se detallan a continuación:

Elaboración de calicatas: se realizaron 8 calicatas distribuidas equitativamente entre el casco urbano y área de expansión urbana. Estas se realizaron a una profundidad promedio de 3.00 m.

Ensayos de Penetración Dinámica Ligera (DPL), estos se realizaron con el fin de determinar la resistencia de los suelos al ser penetrados. En la ciudad de San Antonio se llevaron a cabo 9 DPL.

Ejecución de auscultaciones haciendo uso de posteadora, estas se distribuyeron en zonas intermedias a la ubicación de la calicata más próxima, con el fin, de complementar la información de los tipos de suelos. En el área de estudio se llevaron a cabo 10 postes.

- ✓ **Laboratorio:** Procesamiento de las muestras de suelos, a través de ensayos de mecánica de suelos tales como granulometría (clasificación SUCS), humedad, densidad y corte directo (capacidad de carga admisible).

- ✓ **Gabinete II:** Elaboración del informe técnico que adjunta los siguientes anexos: Fichas geotécnicas (calicatas, posteos, DPL,), fichas geodinámicas (identificación de zonas susceptibles a movimientos en masa e inundaciones) y planos temáticos a escala 1:15000.

1.1. Base Topográfica

Para la ciudad de San Antonio se obtuvo a partir de un levantamiento topográfico realizado sobre un área de 200 has con el propósito de obtener la representación digital del relieve que conforma (terrazas, colinas, montañas, entre otros). Para este objetivo, se utilizó una estación total (marca Nivo 3.C con resolución de 3") y un punto de control, cuyas coordenadas fueron establecidas con una antena y receptor GPS/GNSS de doble frecuencia (Tabla 1).

Tabla 1: Punto de control ubicado a 50 m al NE de la municipalidad.

| BM | Este (m) | Norte (m) | Altitud (m.s.n.m) | Descripción |
|----|----------|-----------|-------------------|-----------------------------------|
| BM | 320938 | 8601992 | 72 | Ubicado al NE de la municipalidad |

Luego, desde el punto de control antes mencionado se estableció un polígono cerrado conformado por 5 vértices (Figura 1) y la toma de 192 mediciones (puntos de relleno) que contienen información planimétrica (coordenadas este y norte) y altimétrica (elevación ortométrica), proyectados en el sistema Universal Transversal Mercator (UTM). Asimismo, con la finalidad de complementar la topografía de las zonas aledañas al sector urbano, un área de 3300 has., se utilizaron imágenes SRTM en formato GeoTiff, descargadas de Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) y procesadas con los vértices citados.

A partir del uso de un software de Diseño Asistido por Computador (CAD) y los datos recabados del levantamiento topográfico y del SRTM, se obtuvo un plano topográfico para la ciudad de san antonio y alrededores a escala 1:15000 con las curvas de nivel (líneas que unen puntos con igual altitud) con una resolución espacial de 5 m.



Figura 1: En línea roja el área del polígono (80 ha), en amarillo el sector urbano (200 ha) y en blanco las zonas aledañas (3300 has.)

2.- GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología estudia las diferentes formas de relieve de la superficie terrestre (geoformas) y los procesos que las generan, este relieve es el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Las primeras actúan como creadoras de grandes elevaciones y depresiones producidas fundamentalmente por movimientos en masa de componente vertical, mientras que, las segundas, como desencadenantes de una continua denudación que tiende a rebajar el relieve originado, estos últimos llamados procesos de geodinámica externa, se agrupan en la cadena meteorización, erosión, transporte y sedimentación (Gutiérrez, 2008).

El estudio de la geodinámica externa se efectúa en un sistema proceso-respuesta, siendo el primero el agente creador (origen) y el segundo la geoforma resultante. El término geoforma es un concepto genérico que designa todos los tipos de formas de relieve independientemente de su origen y dimensión (Zinck, 1988; Zinck & Valenzuela, 1990).

En este capítulo se describen las características físicas de las geoformas existentes en la ciudad de San Antonio, en relación a su origen. Previamente, en base al levantamiento topográfico realizado y mediante herramientas computacionales (SIG) se han elaborado los planos: Modelo Digital del Terreno (MDT) y pendientes, con el fin de delimitar las características geomorfológicas del terreno (geoformas). Esta información fue verificada y validada durante el trabajo de campo; asimismo fue útil para delimitar las unidades geomorfológicas del área de estudio.

2.1.- Modelo Digital del Terreno (MDT)

El MDT es representación gráfica de la superficie del terreno, conformado por un número de puntos con información altimétrica y planimétrica. Por su naturaleza digital, permite ser utilizados para realizar mapas de pendientes, acumulación de horas de radiación, parámetros morfométricos, entre otros (Felicísimo, 1994).

Para la elaboración del MDT de la ciudad de San Antonio, se tomó en cuenta el uso de herramientas SIG sobre las curvas de nivel indicadas anteriormente, obteniendo como resultado la representación digital de la superficie del terreno sobre un área de 16 km² aproximadamente (Figura 2).

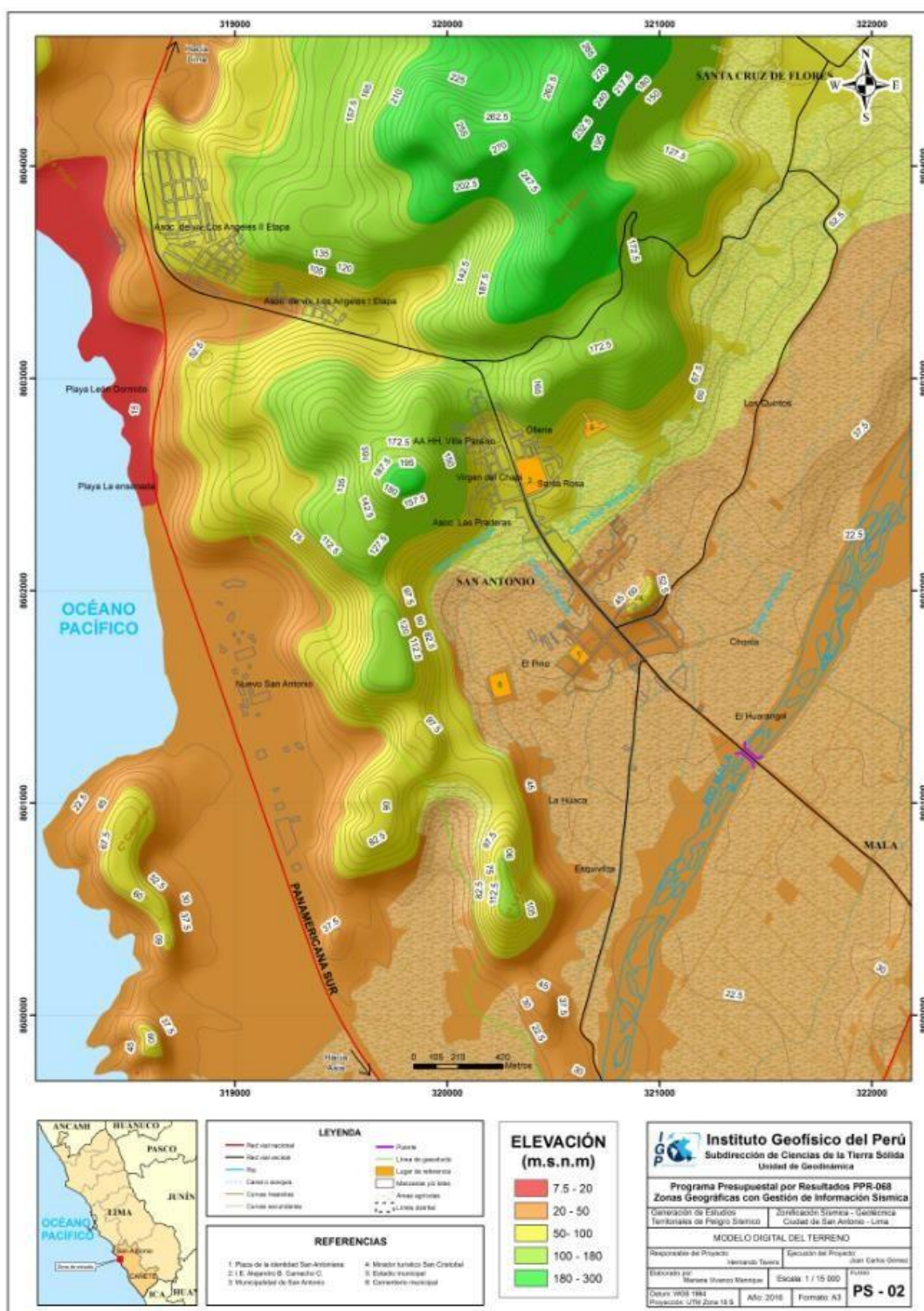


Figura 2: Mapa de modelo digital del terreno para la ciudad de San Antonio y alrededores.

En base al MDT elaborado para la ciudad de San Antonio se ha reconocido que la zona urbana se asienta sobre una terraza aluvial, con un rango de cotas entre 34 y 110 m.s.n.m. En los alrededores, hacia la parte noroeste de la ciudad, se observan lomas que presentan un desnivel máximo de 210 m con respecto al área urbana.

2.2.- Pendientes

Es el ángulo de la superficie del suelo que se expresa en grados o porcentajes. Este parámetro influye en la formación de los suelos y condiciona el proceso erosivo, puesto que, mientras más pronunciada sea la pendiente, la velocidad del agua de escorrentía será mayor, no permitiendo la infiltración del agua en el suelo (Belaústegui, 1999). El diseño del mapa de pendientes de la ciudad de San Antonio, fue desarrollado a partir del MDT elaborado anteriormente, haciendo usos de herramientas de geoprocésamiento (área de influencia, construcción de modelos, análisis espacial, etc.) para diferenciar gráficamente los ángulos de inclinación del relieve en el área de estudio.

Clasificación del grado de pendientes: Para la clasificación de los rangos de pendientes se usó como fuente el informe “Estudio de riesgos geológicos del Perú - Franja N° 4” (Boletín N° 29, Serie C, 2006) (Tabla 2):

Tabla 2: Rangos de pendientes del terreno (Fidel et al., 2006).

| PENDIENTE EN GRADOS (°) | CLASIFICACIÓN |
|-------------------------|---------------|
| <5 | Muy baja |
| 5 - 20 | Baja |
| 20 - 35 | Media |
| 35 - 50 | Fuerte |
| >50 | Muy fuerte |

La mayor área de la ciudad de San Antonio se encuentra asentada sobre una terraza aluvial que presenta pendientes 5° a 10° promedio, al noroeste de dicha ciudad se encuentran los sectores Esquivilca, Virgen del Chapí, Los Jardines, Asociación de vivienda Los Ángeles (I y II etapa) asentados sobre las laderas de lomas que presentan inclinaciones de 20° a 35°, y el sector de Nuevo San Antonio, asentado sobre la planicie costanera presenta inclinación menor a 5° (Figura 3).

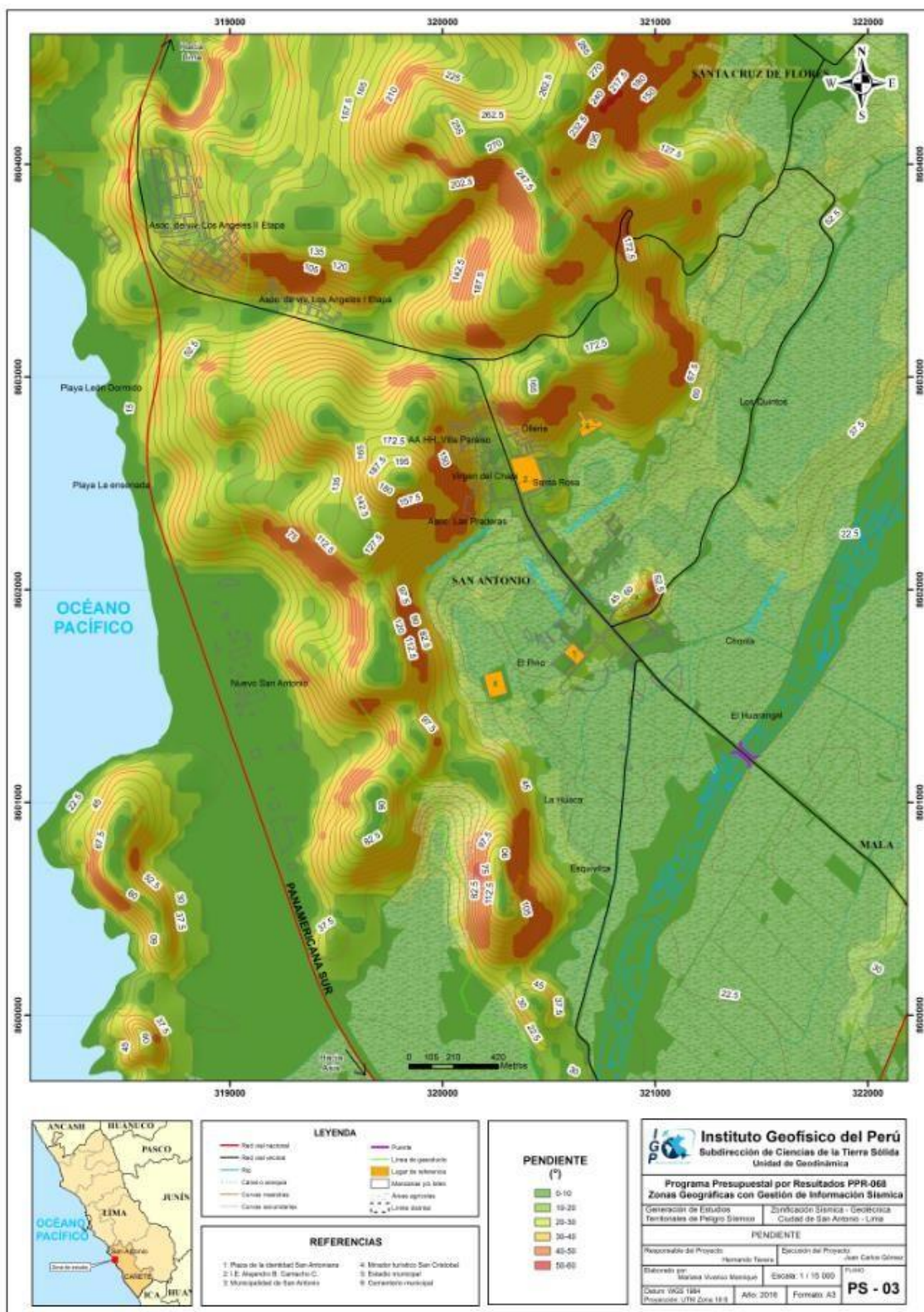


Figura 3: Mapa de pendientes del terreno para la ciudad de San Antonio y alrededores.

2.3.- Unidades geomorfológicas

Estas unidades con ciertas características físicas son generadas por procesos morfogenéticos de carácter endógeno (procesos internos) y exógeno (procesos externos) formando relieves positivos y negativos.

Características físicas: Las características físicas; es decir, su relieve, expresa una combinación de parámetros como: pendiente, altura, geometría y drenaje (modificado de Pike et al, 2009). Estos parámetros son directamente accesibles a la percepción visual proximal o distal, sea humana o instrumental.

Procesos: Los agentes modeladores como el agua, el viento, temperatura, entre otros, desencadenan diversos procesos externos tales como: intemperismo, meteorización, erosión, transporte y depositación que generan diferentes geoformas. Esto se clasifica de acuerdo a su origen, en depositacional y denudacional (erosional). Otros procesos internos como el magmatismo y tectonismo generan geoformas de origen estructural.

En base a las características físicas de las de las unidades geomorfológicas y su origen, en la ciudad de San Antonio, se cartografiaron diez unidades: Lomas, colinas, terraza aluvial (T1 y T2), llanura de inundación, lecho fluvial, planicie costera, playa, isla, acantilados, isla, plataforma de abrasión (Tabla 3 y Figura 4).

Tabla 3: Descripción de las unidades geomorfológicas, en la ciudad de San Antonio, en base a las características físicas y su origen

| CARACTERÍSTICAS FÍSICAS | | ORIGEN | UNIDAD GEOMORFOLÓGICA |
|-------------------------|--------------------|----------------|------------------------|
| Pendiente | <35° | Denudacional | Loma |
| Altura | <300 m | | |
| Geometría | alargada | | |
| Drenaje | dendrítico | | |
| Pendiente | 20° | Denudacional | Colina |
| Altura | <100 m | | |
| Geometría | redondeada | | |
| Drenaje | radial | | |
| Pendiente | <10° | Depositacional | Terraza aluvial |
| Geometría | irregular | | |
| Drenaje | variable | | |
| Pendiente | <5° | Depositacional | Llanura de inundación |
| Geometría | irregular | | |
| Drenaje | variable | | |
| Pendiente | <5° | Denudacional | Lecho fluvial |
| Geometría | alargada | | |
| Drenaje | variable | | |
| Pendiente | <5° | Depositacional | Llanura costera |
| Geometría | alargada | | |
| Drenaje | variable | | |
| Pendiente | <5° | Depositacional | Playa |
| Geometría | irregular-alargada | | |
| Drenaje | variable | | |
| Pendiente | 90° | Estructural | Acantilado |
| Altura | 25 m | | |
| Geometría | irregular | | |
| Drenaje | variable | | |
| Pendiente | >35° | Estructural | Isla |
| Altura | 35 m | | |
| Geometría | redondeada | | |
| Drenaje | radial | | |
| Pendiente | <5° | Denudacional | Plataforma de abrasión |
| Geometría | irregular | | |
| Drenaje | variable | | |

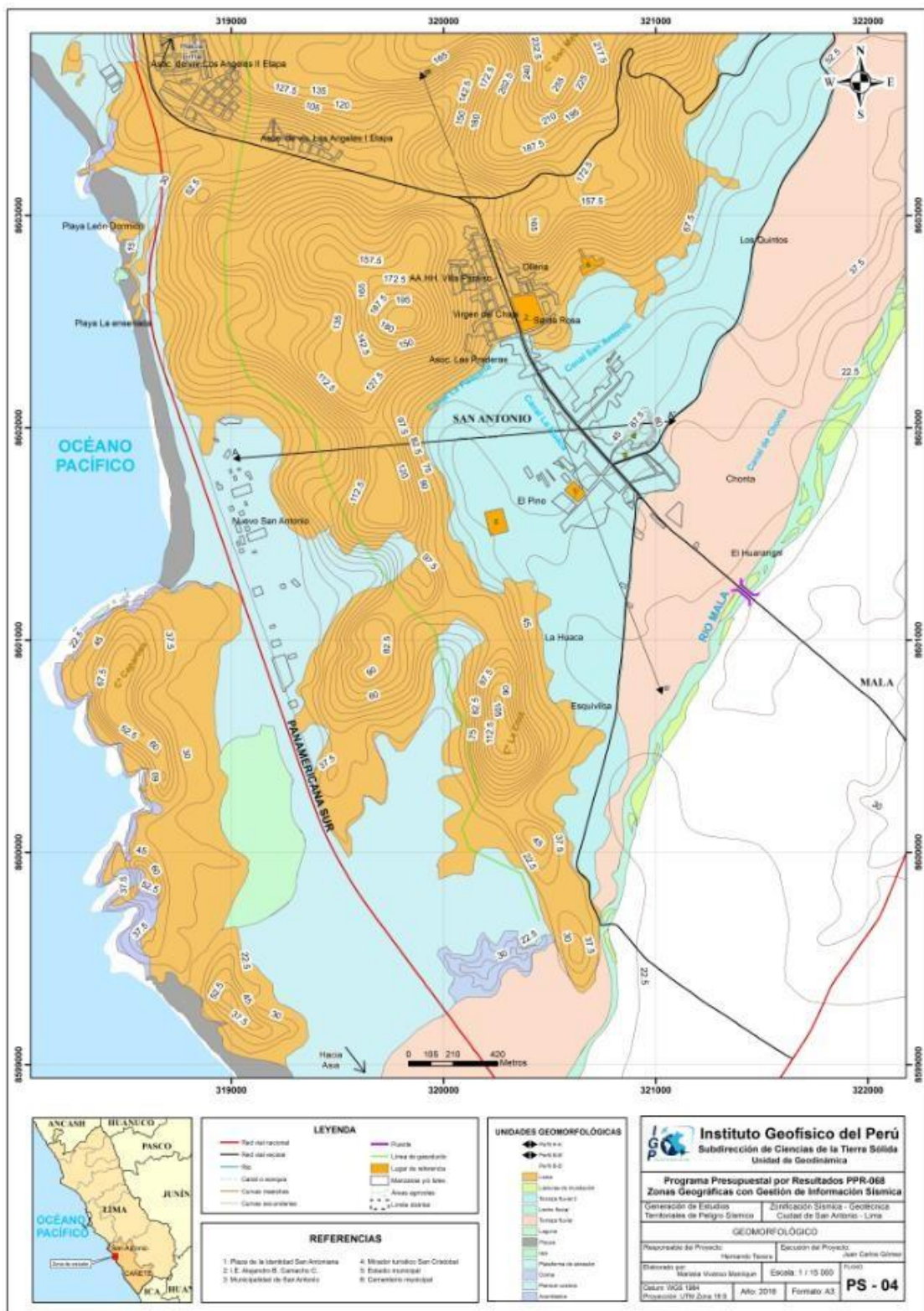


Figura 4: Mapa geomorfológico para la ciudad de San Antonio y alrededores.

Loma: Esta unidad geomorfológica presenta una pendiente $<35^\circ$, altura <300 m, geometría alargada, drenaje dendrítico y un origen denudacional. Esta unidad abarca el 30% de la zona de estudio. Se ubica lomas al noroeste y sureste de la ciudad de San Antonio, sobre estas se asientan los sectores de Esquivilca, virgen del Chapí, Los Jardines y Asociación de vivienda Los Ángeles etapa (Figura 5).

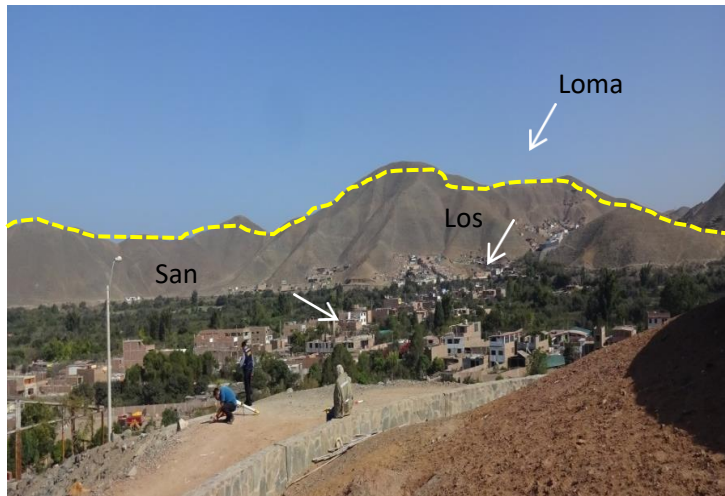


Figura 5: Lomas ubicadas al lado oeste de la ciudad de San Antonio.

Colina: Esta unidad geomorfológica de origen denudacional presenta una pendiente de 20° , altura <100 m, geometría redondeada y drenaje radial. Esta unidad abarca el 3% de la zona en estudio. Se ubican sureste y suroeste de la misma, sobre una de ellas se ha construido un mirador turístico denominado San Cristóbal (Figura 6).

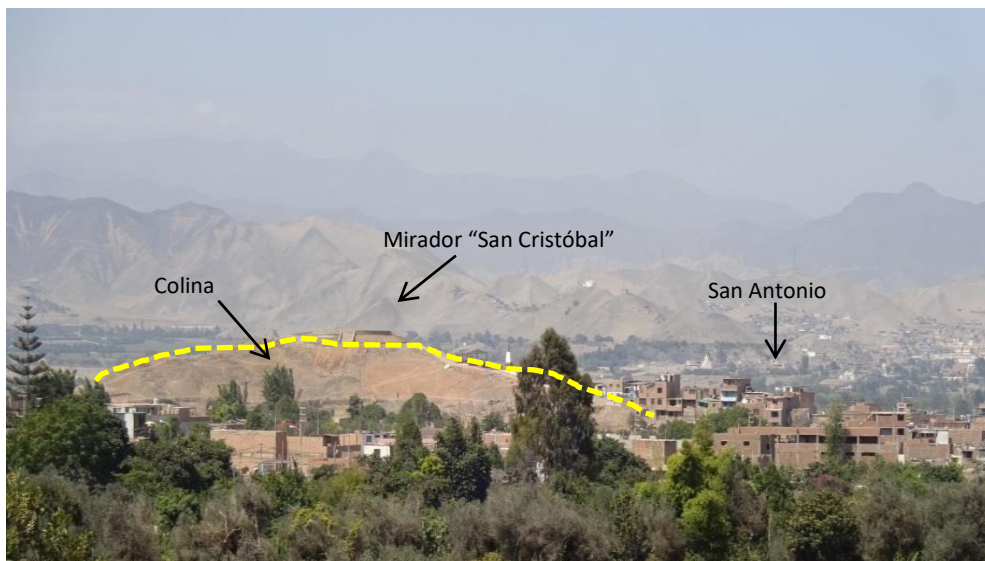


Figura 6: Colina ubicada al lado suroeste del casco urbano de San Antonio.

Terraza aluvial (T_1 y T_2): Esta unidad geomorfológica de origen depositacional presenta una pendiente $<10^\circ$, así como una geometría irregular y drenaje variable. Esta unidad abarca el 30% de la zona en estudio. En la ciudad de San Antonio, se han diferenciado dos terrazas, denominadas T_1 y T_2 , de acuerdo al desnivel que presentan uno con respecto a la otra, siendo la T_1 adyacente al río Mala compuesta por gravas, arenas y arcillas homogéneos en tamaño y de composición heterogénea (intrusiva y volcánica) en esta área se realiza la actividad de la siembra frutal (Figura 7), esta zona ha sido afectada en un 50 % por inundaciones a causa del desborde del río Mala en épocas del evento “El Niño”. La terraza aluvial T_2 , se encuentra a un desnivel con respecto del río de 5 m, y sobre esta se asienta el 50% de la población de San Antonio y se realiza la siembra de frutal, este sector, hasta la fecha no ha sido afectado por inundaciones.



Figura 7: Terraza aluvial sobre el cual se desarrollan la siembra de frutales en la ciudad de San Antonio.

Llanura de inundación: Esta unidad geomorfológica de origen depositacional presenta una pendiente $<5^\circ$, así como una geometría irregular y drenaje variable. Esta unidad abarca el 5% de la zona en estudio. Se encuentra ubicada adyacente al cauce del río Mala y está constituida por materiales granulares y/o finos (Figura 8).

Lecho Fluvial: Esta unidad geomorfológica de origen denudacional presenta una pendiente $<5^\circ$, así como una geometría alargada y drenaje variable. Esta unidad abarca el 5% de la zona en estudio

En la ciudad de San Antonio, el río Mala recorre aproximadamente 5 km, hasta su desembocadura en el océano Pacífico, llevando los materiales (gravas, arenas y limos) por arrastre, saltación y rodamiento en el fondo (Figura 9).



Figura 8: Llanura de inundación (delimitada por línea amarilla) dentro del cauce del río Mala.



Figura 9: Flujo hídrico permanente en el río Mala, en épocas de precipitaciones excepcionales suele desbordarse hacia el lado de San Antonio (margen derecha del río)

Llanura costera: Esta unidad geomorfológica de origen depositacional presenta una pendiente $<5^\circ$, así como una geometría alargada y drenaje variable. Esta unidad abarca el 15% de la zona en estudio.

Esta unidad se desarrolla a lo largo de una franja paralela a la costa, limitada por el oeste con la línea de playa y al este por cadenas de cerros bajos que corresponden a contrafuertes andinos son altitud hasta 200 m aproximadamente, se caracterizan por presentar una superficie plana y amplia, que se extiende a lo largo del frente oceánico, localmente con algunas colinas o cerros bajos. (Landa & Salazar, 1993).

En la ciudad de San Antonio la Planicie costera se localiza entre las geoformas playas y lomas, esta es de forma plana está constituida en su mayoría por material eólico, tiene una longitud en la zona de estudio de aproximadamente 5 km, desde playa “La Virgen” hasta la Laguna “La Ensenada de San Antonio” (Figura 10).



Figura 10: Planicie costera, donde se asienta el sector de Nuevo San Antonio.

Playa: Esta unidad geomorfológica de origen depositacional presenta una pendiente $<5^\circ$, así como una geometría irregular, alargada y drenaje variable. Esta unidad abarca el 6% de la zona en estudio. Está constituida por acumulaciones de arena, grava o una mezcla de ambas, situados en el límite del mar y la planicie costera, en cuya dinámica interviene fundamentalmente el oleaje, (Flor, 2004). En la ciudad de San Antonio se han identificado las Playas: León Dormido, Chica y La Ensenada, estas están constituidas en un 100% de arena y de longitudes de 250 m, 270 m y 1, 300 m respectivamente (Figura 11).



Figura 11: Playa La Ensenada, que forma parte del circuito de playas de San Antonio, siendo esta la de mayor extensión en la zona

Acantilado: Esta unidad geomorfológica de origen estructural presenta una pendiente $<5^\circ$, así como una geometría irregular, alargada y drenaje variable. Esta unidad abarca el 4% de la zona en estudio. Son escarpas verticales, producidas por socavación y desplome de las rocas de las costas debido a la erosión marina (oleaje), lo que da como resultado el retroceso de los acantilados.

Las rocas que constituyen los acantilados están sometidos a la actividad de procesos de erosión marina (mecánica, meteorización física y química), en la ciudad de San Antonio, estas unidades se han reconocido en la playa La Ensenada y León dormido (Figura 12).



Figura 12: Acantilado de la playa La Ensenada

Isla: Esta unidad geomorfológica de origen estructural presenta una pendiente $<35^\circ$, así como una geometría redondeada y drenaje radial. Esta unidad abarca el 1% de la zona en estudio. En la ciudad de San Antonio, se identificó una isla en la playa 'Chica'



Figura 13: Isla ubicada en la playa Chica, se observa una cueva en su base, producto de la erosión marina (olas)

3.- GEOLOGÍA

La geología es la ciencia que estudia la Tierra, los materiales que la componen, las estructuras y los procesos que actúan sobre y debajo de la superficie a lo largo de millones de años desde su origen hasta la actualidad. La litología como parte de la geología, estudia las características físicas de las rocas y depósitos que constituyen una formación geológica, es decir una unidad litoestratigráfica. Los tipos de rocas han sido originados por procesos internos (tectónica de placas, ascenso de magma, etc.) como también por la erosión, transporte y depositación de rocas preexistentes (proceso de meteorización).

El intemperismo asociado a los procesos de meteorización, es básicamente un proceso químico, el agua actúa como disolvente, la remoción de los elementos más pequeños del cuerpo de roca deja espacios, por ende, el agua sigue penetrando y acelerando el proceso de desintegración. La roca se vuelve porosa, después, se descompone en fragmentos cada vez más pequeños, hasta que, al ser transportada y asociada se convierte en suelo. Los procesos químicos son complejos y dependen de los diversos minerales que constituyen las rocas lo que determina también su naturaleza y fragilidad. Por ejemplo: la sílice (SiO₂) en forma de cuarzo es estable en climas templados, pero en climas ecuatoriales, las altas temperaturas y las precipitaciones pluviales contribuyen a su descomposición; es por ello que, es importante conocer los tipos de rocas y sus características físicas (Harvey, 1987). Estos procesos de meteorización, modelan tanto la roca como el suelo, dando como resultado las geoformas que componen el relieve, los factores condicionantes como la litología, pendiente, hidrología, etc; así como, los detonantes: sismos y precipitaciones pluviales ocasionan movimientos en masa (deslizamientos, flujos, caídas de rocas).

Para entender el comportamiento dinámico del terreno, es necesario conocer los procesos geológicos externos (meteorización, erosión, transporte y sedimentación) Se estudian las rocas y los suelos que provienen de las mismas, analizando las propiedades asociadas al comportamiento mecánico.

La geología comprende varias disciplinas tales como la geología regional, histórica y estructural que permiten explicar el cómo, cuándo y que procesos actuaron en el emplazamiento de las rocas y materiales que constituyen los suelos sobre los que se asienta la zona de estudio.

3.1. Geología regional

El marco geológico regional de una ciudad es importante para comprender los procesos y eventos geológicos que ocurrieron a gran escala. Es así que, se recopiló la información geológica regional del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 1993) a escala 1:50,000. En ésta, se describen las unidades litológicas aflorantes cuyas edades se encuentran desde el Cretáceo Inferior (145 Ma) hasta el Cuaternario reciente.

Geología histórica: Según Salazar Díaz, 1993, la sedimentación epicontinental, en el Valanginiano (aproximadamente hace 139.8 millones de años (Ma) las transgresiones y regresiones fueron de forma continua, comportándose como un mar somero con aporte de sedimentos provenientes de zonas positivas.

La formación Chilca, cuyos afloramientos se evidencian en la zona costera son producto de la transgresión marina (aproximadamente hace 113.0 Ma) con una fase de actividad volcánica intercalada en unidades fosilíferas de ambiente nerítico (línea de marea baja y la terminación de la plataforma continental), esto se interpreta que al inicio hace 113.0 Ma (inicios del Albiano) hubo una subsidencia general de la cuenca, dando lugar a la formación Chilca y Grupo Imperial en la zona costanera.

En la transgresión del Albiano superior (aproximadamente hace 113.0 Ma) señala la depositación de facies marina poco profunda y ambiente reductor, a lo que sucedió la transgresión del mar Jumasha en la zona de la cuenca y al Grupo Quilmaná al lado occidental de la cuenca, asociado a la actividad volcánica (cuellos volcánicos) y flujos de lava con intercalaciones de unidades sedimentarias.

A fines del Neógeno y principios del Cuaternario (2.5 Ma), que acompañó al levantamiento de la cordillera. La zona costera fue controlada por fallas regionales que dieron origen a la fisiografía y desarrollo del litoral. A partir de entonces, la erosión modeló la superficie dando forma al relieve actual.

Geología estructural: Los eventos de deformación y metamorfismo produjeron el plegamiento de las estratificaciones andinas y fallamientos en bloques evidenciados en esta parte de la costa. Los mismos se detallan las estructuras resultantes de dichos eventos geológicos:

-Zonas de Plegamientos: La deformación asociada a esfuerzos de compresión se manifiesta en los plegamientos existentes en la Cordillera Occidental

interrumpidos por cuerpos intrusivos que forman parte del Batolito de la Costa.

En la zona de estudio y alrededores de la ciudad de San Antonio no se han evidenciado dichas estructuras; sin embargo, se hace una descripción de estas reconocidas y cartografiadas en el cuadrángulo regional de Mala (26 j1) a escala 1: 50000.

-Zona de fallas: Pueden afectar grandes extensiones de paquetes de rocas y materiales, cambiando la geomorfología de la superficie y alterar el curso de los ríos.

Según Salazar (1993), la geometría de las Estructuras Andinas, la zona de estudio, está determinada por la Zona I, la misma que comprende la unidad volcánica- sedimentaria de la faja costanera con deformación relativamente suave. Aquí el batolito de la costa sigue una alineación paralela al litoral que correspondería a una zona de falla longitudinal de orientación noroeste-sureste. Esta zona se caracteriza por un conjunto de rocas sedimentarias y volcánicas del Cretáceo inferior a superior afectadas por la “Fase Tectónica Peruana” y en menor grado los sinclinales y anticlinales son abiertos, con buzamientos suaves y moderados, entre ellos destaca: El anticlinal de Imperial, los anticlinales y sinclinales en el sector este de las lomas de Quilmaná y sinclinal de Chilca, el cual parece guardar relación con el sinclinal de Mala.

La zona costera en la zona de estudio se presenta afectada por un sistema de fallas longitudinales que guardan paralelismo a la costa y fallas transversales que interrumpen la secuencia estratigráfica o desplazan cuerpos del batolito y su propagación norte-sur, estas fallas siguen aproximadamente el curso principal de los ríos y quebradas, estas tienen orientación que varían de norte a noreste, los efectos se observan en el borde litoral. La Zona I está afectada por un fallamiento en bloques (Figura 14).

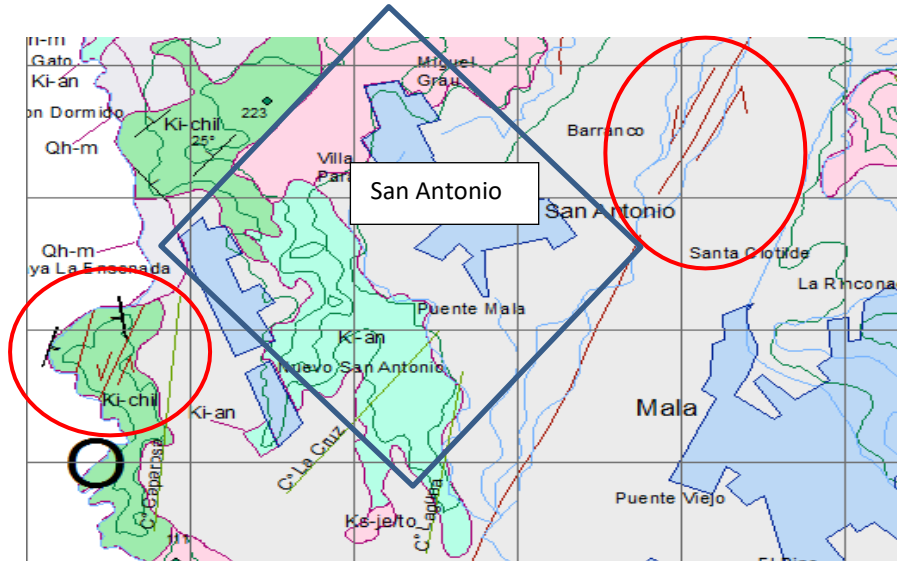


Figura 14: Los círculos rojos muestran las fallas tipo rumbo cartografiadas en el cerro Caparosa y río Mala en la zona de estudio (Salazar, 1993). El cuadrado azul delimita la zona urbana de San Antonio.

3.2.- Geología local

Las unidades litológicas aflorantes en la ciudad de San Antonio han sido cartografiadas a escala 1:15,000, sobre un área de 16 km² aproximadamente (Tabla 4). Las características de cada una de estas unidades se describen a continuación (Figura 15):

Tabla 4: Columna cronolitoestratigráfica de las unidades aflorantes en las inmediaciones de la ciudad de San Antonio.

| ERATEMA | SISTEMA | SERIE | UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS | SÍMBOLO | LITOLOGÍA |
|-----------|-------------|----------|-----------------------------|-------------|--|
| CENOZOICA | CUATERNARIO | HOLOCENA | DEPÓSITO EÓLICO | Qh-e | ARENAS FINAS |
| | | | DEPÓSITO ALUVIAL | Qh-al | GRAVAS REDONDEADAS A SUB REDONDEADAS CON MATRIZ ARENO LIMO |
| | | | DEPÓSITO MARINO | Qh-m | ARENAS GRUESAS Y FINAS |
| MESOZOICA | CRETÁCEO | SUPERIOR | | ks-je/to | TONALITA |
| | | | SÚPER UNIDAD JECUAN | ks-je/mz,di | MONZODIORITA |
| | | | | ks-je/di | DIORITA |
| | | INFERIOR | FORMACIÓN CHILCA | ki-chil | CALIZAS INTERCALADAS CON MARGAS |
| | | | SUBVOLCÁNICA | ki-an | ANDESITA |

Rocas intrusivas: Tienen por origen la solidificación de una mezcla fundida llamada magma cuando está dentro de corteza (Rivera, 2011). En el área de estudio se han reconocido las siguientes rocas intrusivas:

Súper Unidad Jecuán (ks-je): Esta unidad aflora a ambos márgenes del río Mala. En la ciudad de San Antonio al lado noroeste, noreste y al oeste afloran rocas tipo dioritas (ks-je/di), tonalitas (ks-je-to) y monzodioritas (ks-je/mz,di) (Figura 16).

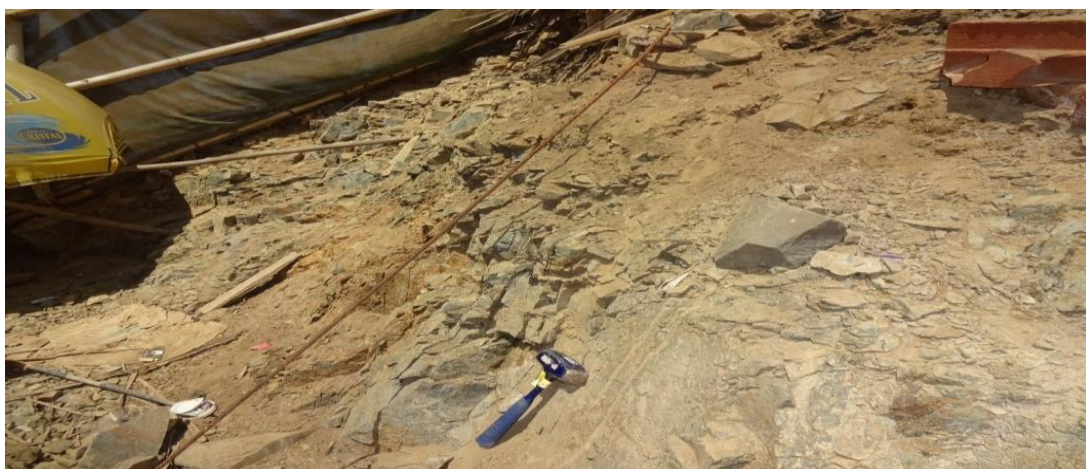


Figura 16: Afloramiento de diorita en el sector Los Jardines, ubicado al noroeste de San Antonio.

Subvolcanicas (ki-an): Este tipo de rocas están asociadas a las secuencias volcánicas del terciario de composición andesíticas y asociadas a la mineralización (Figura 17).



Figura 17: Roca tipo andesita, aflora al lado noroeste de San Antonio en la zona de antenas.

Grupo Casma: Es una secuencia andesítica, con material volcánico-clástico y sedimentos de origen marino, contiene a la formación Chilca, que se describe a continuación:

Formación Chilca (ki-chil): Esta formación consiste de un predominio de derrames andesíticos de color verdosos, violáceos y abigarrados, con intercalaciones de brechas piroclásticas, tobas brechoides en capas delgadas de color gris verdoso y marrón violáceo; calizas grises a negras en capas gruesas, discontinuas con intercalaciones delgadas de margas (Figura 18).

En la ciudad de San Antonio, este tipo de rocas afloran en las lomas que contienen a los acantilados ubicados en la playa La Ensenada y León Dormido, también se aprecia este tipo de roca en las lomas en los laterales de la carretera Panamericana sur.



Figura 18: Intercalación de calizas y margas de la formación Chilca.

Depósitos Cuaternarios: Suprayaciendo al sustrato rocoso, conformado por rocas volcanoclásticas (calizas intercaladas con margas) se encuentran los depósitos Cuaternarios de edad Holocena, principalmente aluvial, marino y eólicos, los que se describen a continuación:

Depositos eolicos (Qh-e): Corresponden a arenas bien seleccionadas, que proceden del litoral playero. Sobre este tipo de depósito se asienta la Asociación de Viviendas Los Angeles (I y II etapa) de la ciudad de San Antonio (Figura 19).



Figura 19: Depósitos eólicos sobre los cuales se han asentado nuevas poblaciones en San Antonio.

Depósitos aluviales (Qh-al): Conformados por conglomerados (gravas, arenas y arcillas), de origen volcánico intrusivo sedimentario. Han sido reconocidos en las terrazas que conforman la margen derecha del río Mala en San Antonio (Figura 20). Sobre este tipo de depósito se asienta el 50 % de San Antonio.



Figura 20: Gravas, arenas y arcillas que conforman la terraza aluvial en el sector Los Quintos

Depósitos marinos: Compuestos por arenas, limos y cantos re trabajados por la acción erosiva de las olas, distribuidos por corrientes a lo largo del borde litoral. Estos depósitos se encuentran formando las playas (León dormido, Chica y La ensenada) y la planicie costera (Figura 21). Sobre este tipo de depósitos se asienta el sector Nuevo San Antonio.



Figura 21: depósitos marinos (arenas) conformando la playa León Dormido

3.- GEODINÁMICA

Comprende todos aquellos eventos geodinámicos producto de la interacción de procesos geológicos (internos y externos) que originan cambios físicos, químicos y/o morfológicos que dan como productor eventos que modifican el actual relieve.

Es importante recalcar que, analizar factores como la litología permite explicar el origen de los materiales que constituyen las geoformas (colinas, lomas, entre otras) y en las cuales se generan procesos como meteorización y erosión que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

4.1. Procesos de geodinámica interna

Son transformaciones de la estructura interna de la Tierra en relación con los agentes (magmáticos, sísmicos y tectónicos). El territorio peruano está sometido a una constante actividad sísmica, debido a la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana, considerada como la principal fuente sismogénica en el Perú, produciendo los eventos de mayor magnitud conocidos hasta el presente. Otra fuente, la constituye la deformación de la zona continental, que ha dado origen a la formación de fallas de diversas longitudes con la consecuente ocurrencia de magnitudes menores (Cahill & Isacks, 1992; Tavera & Buforn, 2001).

4.2. Procesos de geodinámica externa

Entre estos procesos se encuentran la meteorización (física o mecánica) y la erosión (fluvial, eólica y marina). Estos procesos aprovechan la fuerza de la gravedad, es decir las rocas descienden algunos metros debido a desplazamientos masivos de terreno o son transportadas por medio de las corrientes fluviales hasta depositarse. En general, estos procesos, transportan materiales desde la parte alta de la cuenca hacia la parte baja de ésta.

Asimismo, estos procesos tienen como factores condicionantes: geomorfología (formas de relieve), litología (tipos de rocas y/o suelos), estructuras geológicas (pliegues y disposición de estratos) que interactúan con los factores detonantes como sísmicos (sismicidad de la zona), climatológicos (incremento de las precipitaciones) y antrópicos (urbanismo, usos del suelo y construcción de vías de comunicación).

a) Meteorización: Las rocas que afloran en la superficie terrestre están expuestas a una lenta, pero a la vez efectiva, alteración. Ésta, puede ser física (la simple rotura de un bloque al caer, como química (la oxidación de un metal como resultado de la acción de los agentes externos, el tiempo de exposición de las rocas a estos agentes, de la naturaleza de la roca y del clima).

b) Erosión: Desgaste de los suelos y rocas de la superficie terrestre resultado de la acción combinada de varios factores, como la temperatura, los gases, el agua, el viento, la gravedad y la vida vegetal y animal, así como, se produce una erosión acelerada como el resultado de la acción humana. La erosión presenta tres fases: desgaste, transporte y depósito de los materiales, esto trae como consecuencia que se formen relieves por desgaste (degradación) y por depósito (agradación).

La acción por separado o en conjunto de los factores que dan origen a los procesos externos, favorecen a la ocurrencia de los eventos geodinámicos (Figura 22), los cuales se dividen según su origen en: fluvio-aluvial e hidro-gravitacional, descritos a continuación:

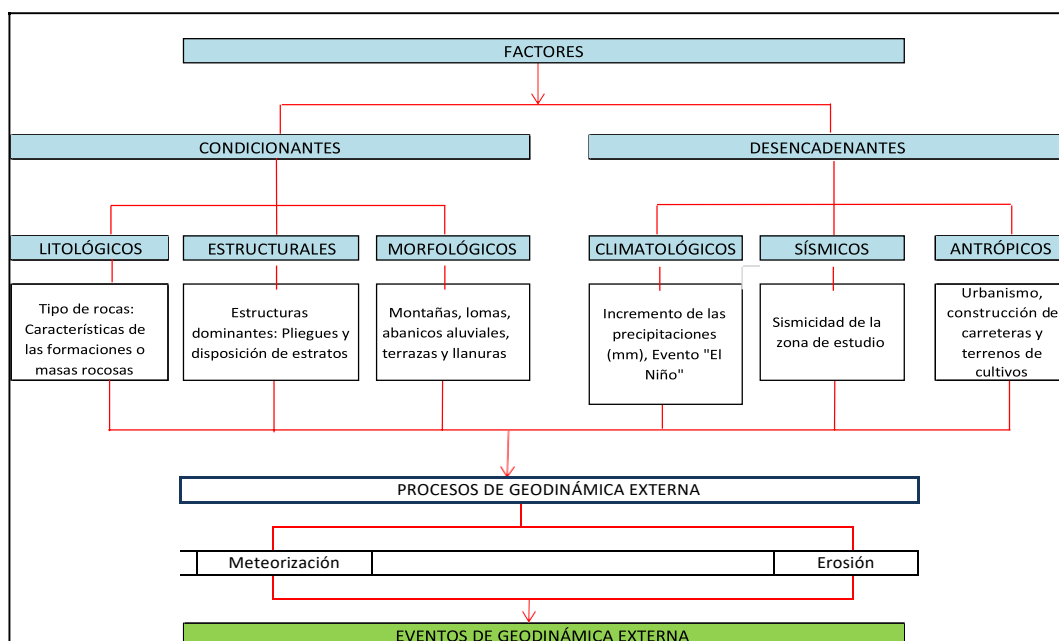


Figura 22: Factores asociados a procesos de geodinámica externa que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

a.)- Fluvio-aluvial: Los procesos de erosión (carcaveo, incisión y desgaste laminar), son originados por las precipitaciones que se presentan en la cuenca fluvial, la cual genera la escorrentía superficial, esto provoca el arrastre progresivamente de los materiales a posiciones de menor energía potencial (menor pendiente). La carga de sedimentos transportados por la quebrada o río incrementan la acción erosiva y son capaces de producir remoción de los materiales como (Brusi, 2013): Flujos e inundación.

Los eventos geodinámicos originados por procesos pluviales son:

-Flujos de detritos (huaycos): movimiento de materiales sin cohesión (materiales sueltos) que se comportan como fluidos a causa del agua (provoca la pérdida total de resistencia de estos materiales) y se desplazan sin presentar superficies de rotura definidas, en algunos casos depositan sus materiales en forma de conos de deyección (Figura 23).

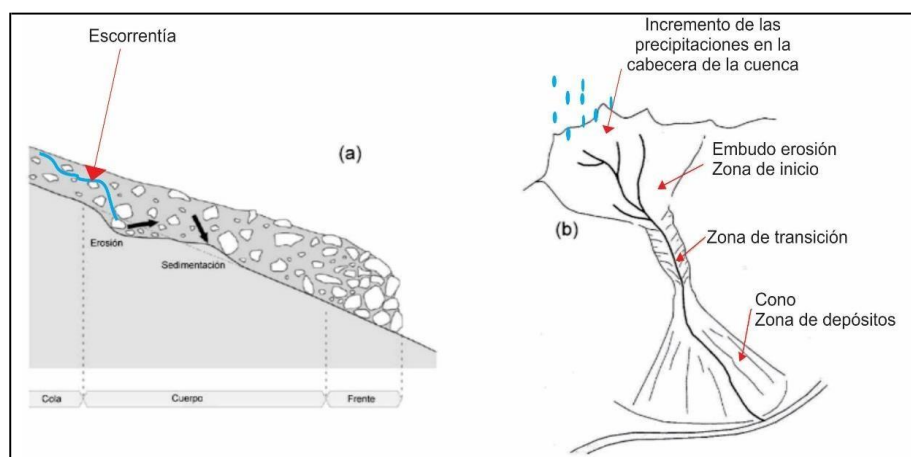


Figura 23: a) Proceso de erosión por las aguas de escorrentía y acumulación de material. b) Vista frontal de la cuenca y desarrollo del evento en cabecera de la cuenca por incremento de las precipitaciones, zona de transición (zona de almacenamiento de material y la depositación del material).

-Inundación: Es el resultado del comportamiento de la cuenca hidrográfica en un período de incremento de precipitaciones. Es la ocupación ocasional de terreno por el agua de un río o una quebrada. Puede ocurrir en zonas litorales debido a tsunamis o a la superposición de oleaje y las mareas, pero las más frecuentes son las inundaciones en el interior de los continentes, producidas por las aguas de escorrentía superficial (ríos, arroyos y torrentes) que sufren una crecida (avenida) transitoria del caudal (Figura 24). Cuando el caudal de una corriente llega a ser tan grande que supera la capacidad de su cauce, se desborda hacia sus márgenes. Estas se describen en términos de intervalo de

recurrencia o período de retorno, es decir, la inundación puede repetirse en 30, 50 y 100 años. Un ejemplo es: El caudal de inundación que tiene un 1 por ciento de probabilidades de ser superado en un año cualquiera se denomina una inundación de 100 años. Las inundaciones pueden ser consecuencia de varios factores naturales y humanos (Tarbuck, 2005).

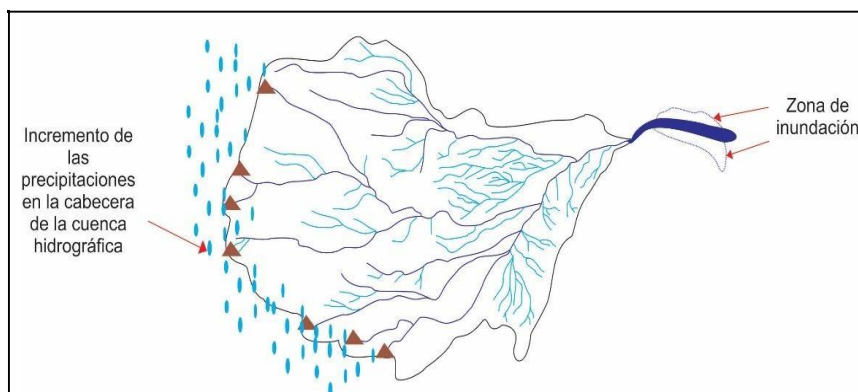


Figura 24: Inundación por incremento de las precipitaciones en la cabecera de la cuenca hidrográfica.

b.)- Hidro-gravitacional: En este mecanismo interviene el agua y la gravedad. Se presentan en los fondos de los valles y en las partes bajas de las vertientes. En estos se encuentran los movimientos en masa (MM) que son todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de rocas, detritos o tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Para la descripción de los MM, se ha tomado en cuenta la clasificación de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988), la cual se basa en dos elementos: el tipo de movimiento (caída, volcamiento y deslizamiento) y el material sean rocas y suelos (divididos en detritos y tierras).

Asimismo, Wyllie & Norrish, (1996), indican como causas de las caídas de roca: la lluvia, la roca fracturada, el viento, la escorrentía, la infiltración, las fracturas planares, la erosión, las raíces de los árboles, fuentes de agua superficial, la descomposición del suelo, los sismos, los cortes de las vías, la explotación de materiales, el uso de explosivos, las vibraciones de la maquinaria, los vehículos y las diversas actividades antrópicas.

-Caída de rocas: Es resultado del debilitamiento de la masa de roca, debido a la fragmentación y a la ausencia de soporte lateral, produciendo un deterioro en la estructura del talud por la acción de la meteorización. En este caso se forman prismas o pequeñas placas con dimensión mínima de 50 mm, que caen por gravedad (Figura 25).

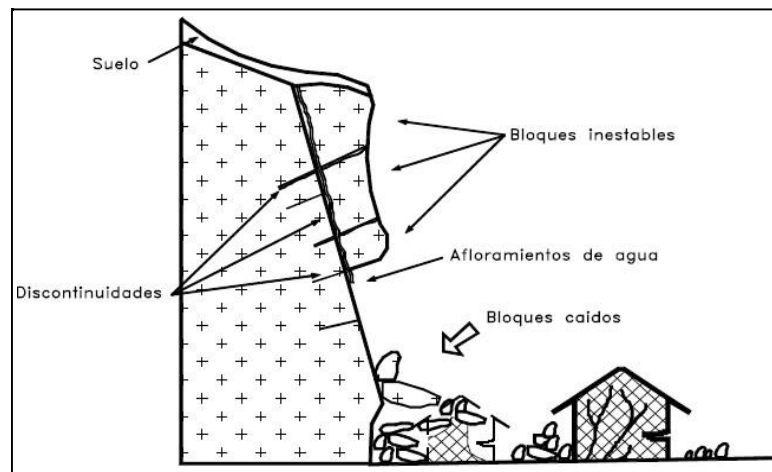


Figura 25: Proceso de caída de suelo y rocas, Suárez (1998).

-Deslizamiento: Este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies. El movimiento puede ser progresivo, es decir, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla (Figura 26).

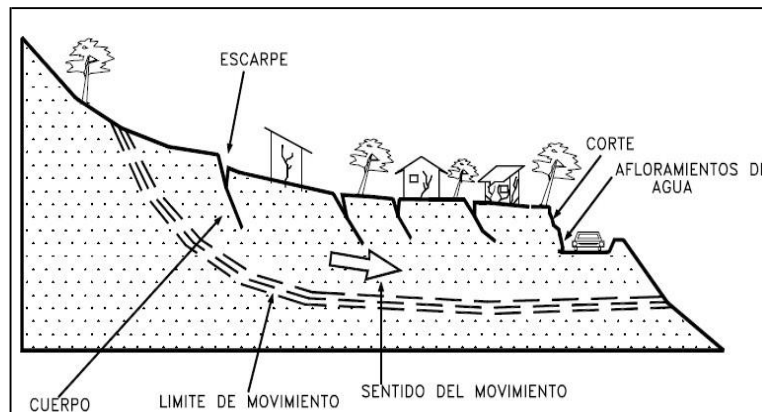


Figura 26: Deslizamiento en laderas Suárez (1998).

Los deslizamientos pueden ser de dos tipos:

D. Rotacional, cuando la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento.

D. Traslacional, cuando el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada

En la ciudad de San Antonio se ha reconocido dos tipos de eventos geodinámicos (Figura 27) que según su proceso y factores que intervienen, se han clasificado de la siguiente manera:

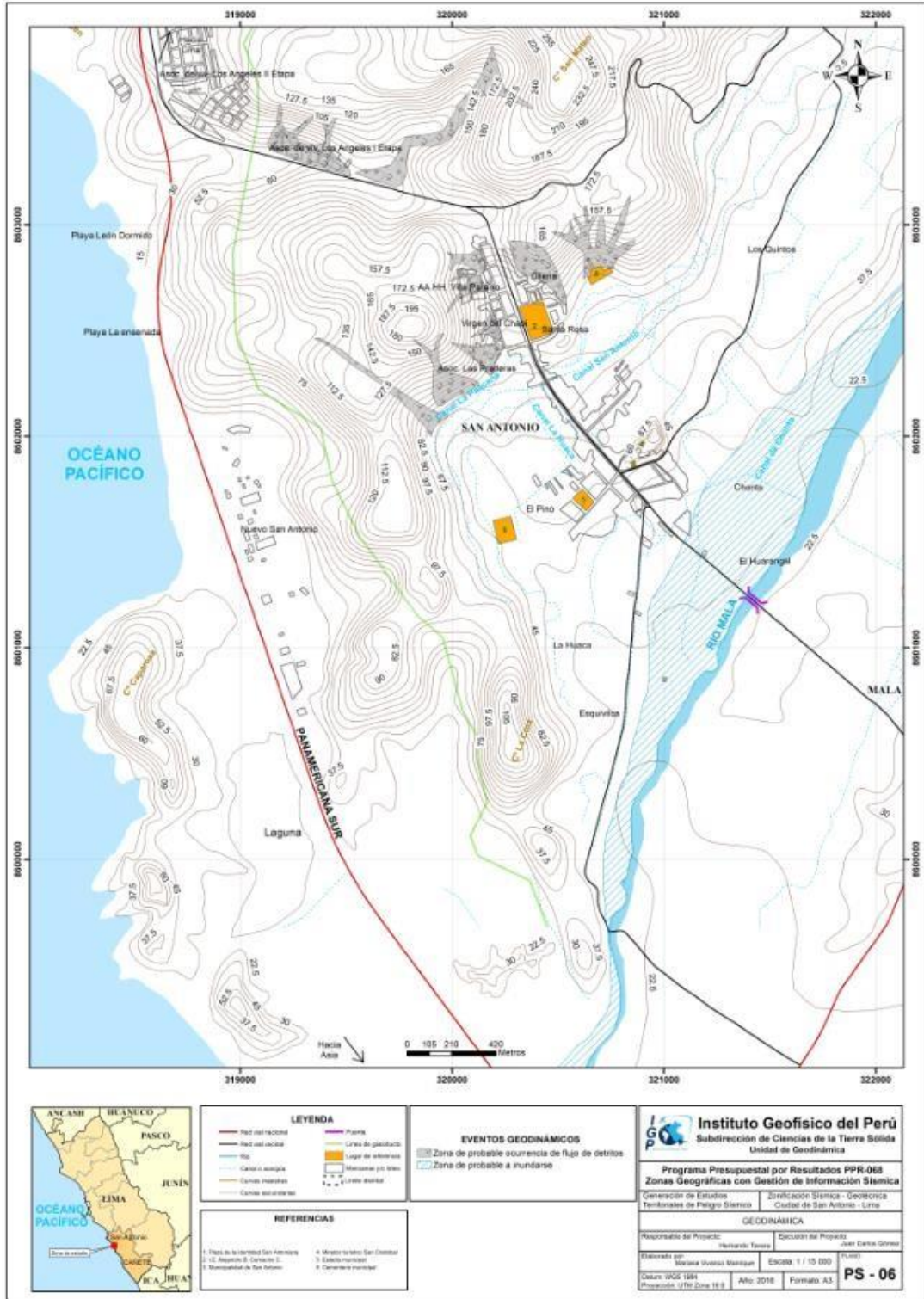


Figura 27: Mapa Geodinámico de la ciudad de San Antonio y alrededores.

Flujo de detritos: Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido, ya que el contenido de sedimentos controla este tipo de flujos y predominan sobre la fase granular. Asimismo, se caracterizan por ser rápidos a extremadamente rápidos dependiendo de la topografía por la cual se desplacen.

En las laderas de las lomas de la ciudad se han identificado acumulaciones de detritos que generarían flujos (huaicos) ante una precipitación excepcional. Sobre estas laderas de lomas se han asentado los sectores Los Jardines, Virgen del Chapi, AA. HH Las Praderas de San Antonio. De producirse un flujo afectaría la seguridad física de estos sectores (Figura 28).



Figura 28: Viviendas instaladas sobre las laderas de las lomas en San Antonio.

Inundaciones: En el área de estudio se determinó que ante un eventual incremento del caudal en el río Mala, producido por las precipitaciones estacionales, podría ocurrir el desbordamiento del mismo afectando a las viviendas que se encuentran aledañas a su margen derecha (Figura 29).



Figura 29: Río Mala, el interlineado (blanco) delimita la zona que sería invadida por el flujo hídrico ante el incremento del caudal del mismo.

Zonas susceptibles a procesos geodinámicos externos: La susceptibilidad se define como la mayor o menor predisposición a que un proceso geodinámico suceda u ocurra sobre determinado espacio geográfico y tiempo (Hauser 1985 y 1993) y depende de los factores: litología, tectonismo, agentes geológicos y actividad humana (taludes de corte).

Para identificar y delimitar las zonas susceptibles se utilizó la información recopilada en campo durante el cartografiado, así como la descripción contextual del evento geodinámico ocurrido en zonas adyacentes (antecedentes).

- a) **Zonas susceptibles a flujos de detritos:** Sobre las laderas de las lomas existen acumulación de material detrítico (producto de la erosión) y sobre ella se ubican los sectores de Virgen de Chapí, Los Jardines y A.H. Las Praderas.
- b) **Zonas susceptibles ante inundaciones:** La longitud del área afectada por el desborde del río Mala es de aproximadamente 3.5 km abarcando 102 ha aproximadamente. Sobre esta área se tiene terrenos de sembrío y viviendas asentadas aledañas al cauce del mismo (Figura 30).

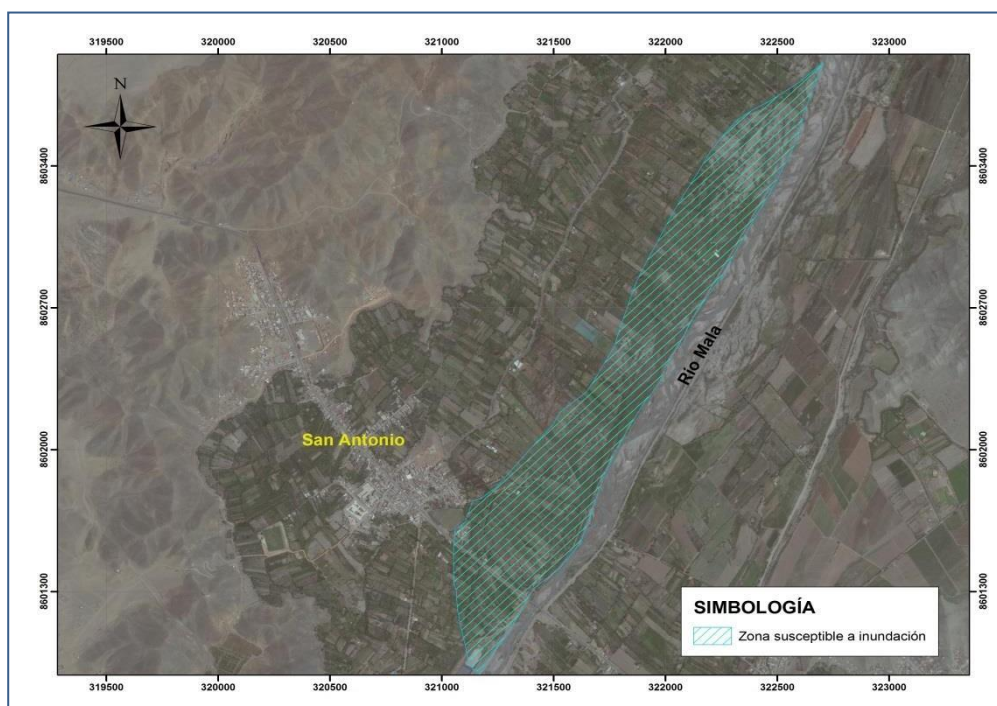


Figura 30: La margen derecha del río Mala, donde se asienta la población de San Antonio es susceptible ante una inundación, afectando no solamente la infraestructura física, sino también a los sembríos de la zona.

Asimismo, para estimar las áreas susceptibles a inundarse ante la ocurrencia de estos eventos, es necesario conocer la variación temporal de la cantidad de agua (altura en mm) que cae durante una tormenta extrema en la cuenca estudiada. Este registro de lluvia (lluvia total) es representado a través de un hietograma, que consiste en la representación de la variación de altura de precipitación en intervalos de tiempo.

Con estos datos se realiza el análisis de frecuencia; es decir, se establece una curva de tendencia de los datos registrados y posteriormente se pronostica una magnitud de precipitación para cierto grado de probabilidad (período de retorno). Este resultado, que representa el volumen total caído al suelo, se le resta el agua que se infiltra en él, éste es medido en campo calculando la cantidad de agua que ingresa al suelo en un determinado tiempo (capacidad de infiltración del suelo), como resultado de esta sustracción es el hietograma de la lluvia neta, que representa el agua (mm) que escurrirá sobre el suelo.

Este hietograma de la lluvia neta es transformado a un hidrograma, que es la representación del caudal como resultado de la caída de agua (escorrentía) a través del tiempo mediante un gráfico de dispersión. Esto se logra utilizando un modelo del sistema hidrológico. Este sistema es una aproximación al sistema real a través de leyes físicas que representan los procesos hidrológicos, en este caso la transformación de lluvia a escorrentía (hietograma a hidrograma). Esta es ingresada a un modelo numérico

hidráulico computacional para simular un escenario de un evento hidrometeorológico extremo en el cual se obtendrán las áreas inundables.

Para la simulación de los eventos hidrometeorológicos, la estimación de áreas inundables y la obtención del umbral de inundación del río Mala es necesario utilizar un modelo numérico hidráulico computacional. Para este caso se utilizó el programa FLO-2D porque permite la simulación de tránsito de avenidas en 2 dimensiones; simula flujo en canales (abiertos y cerrados), superficies no confinadas, flujo en calles; y las características físicas del flujo pueden ser modificadas, como la geología (viscosidad, esfuerzo cortante), concentración de sedimentos, composición de sedimentos finos (granulometría del sedimento), etc.

Este modelo está validado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencia de los Estados Unidos (FEMA); El cuerpo de Ingenieros del Ejército (Corps), distrito de Sacramento; Control de Inundaciones del Condado de Maricopa (FCDMC), Phoenix Arizona; y entre otras entidades internacionales involucradas en el tema de gestión de riesgo de desastres.

Datos de entrada al programa: El primer dato de ingreso al programa es la topografía del área de estudio. Luego es necesario caracterizar el coeficiente de rugosidad del cauce del río y de las áreas circundantes, esto se logra mediante el método del valor del número de Manning (n).

Con la información topográfica y sus características físicas estimadas (n); se procede con el ingreso del hidrograma del evento que se desea simular; se realiza la simulación y se extrae la información de las alturas máximas alcanzadas del flujo para identificar la intensidad y magnitud del evento.

Con los resultados de la simulación de los escenarios de inundación, se generan mapas de peligro que ayudaran a visualizar las potenciales áreas a inundarse.

En la Figura 31, se muestra de manera esquemática el ingreso necesario al programa FLO-2D para el modelamiento de los eventos hidrometeorológicos.

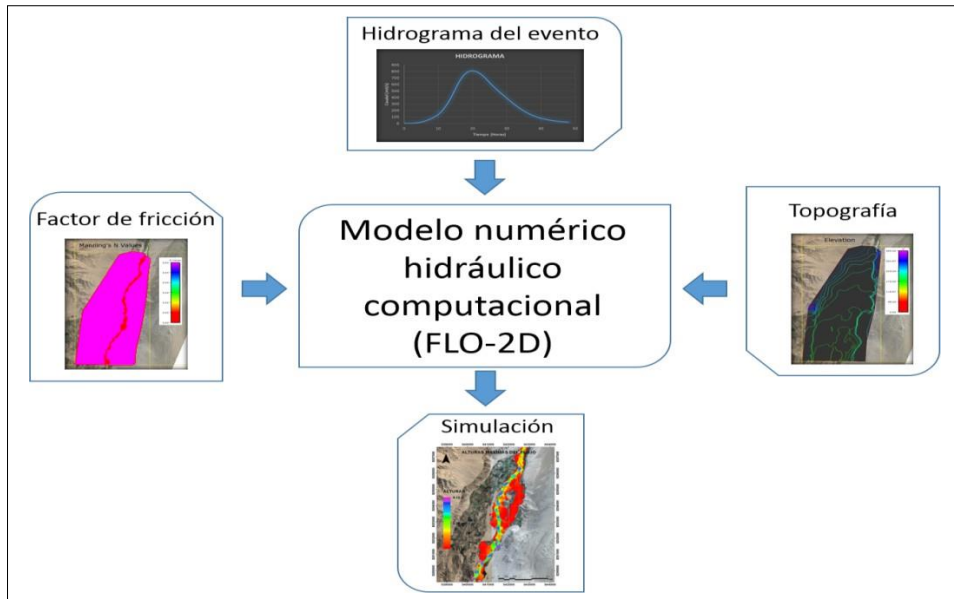


Figura 31: Esquema de datos de entrada al programa FLO-2D.

Topografía: Para el desarrollo de este estudio se utilizó la información digital del informe de levantamiento batimétrico del río Mala (distrito de San Antonio). Esta información abarca un tramo aproximado de 3 kilómetros del río en mención, 1.4 kilómetros aguas arriba y 1.7 kilómetros aguas abajo. Esta batimetría se complementó extrapolando los puntos hacia las áreas aledañas al río, aproximadamente 400 metros en ambos márgenes. En la Figura 32, se muestra una comparación entre los puntos de elevación obtenidos en el levantamiento batimétrico (460 puntos) y los puntos extrapolados de la batimetría (4770 puntos) en base a los puntos de control en campo e imágenes satelitales.

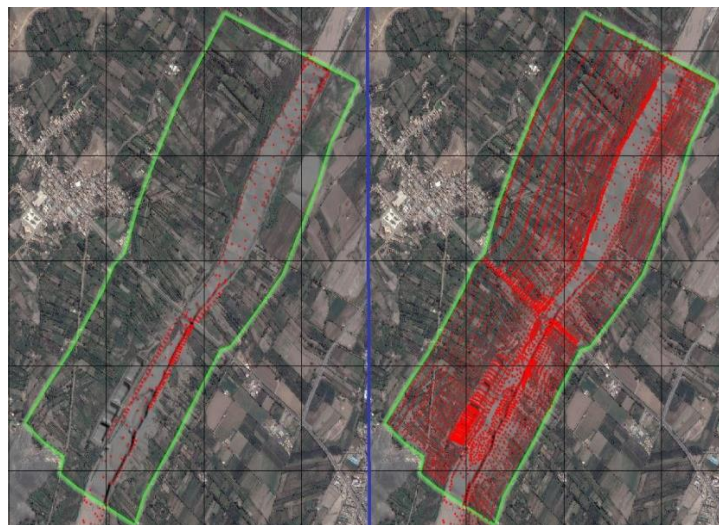


Figura 32: Comparación entre los puntos del levantamiento batimétrico y los puntos extrapolados.

La extrapolación permitió generar un modelo digital del terreno con una resolución de 5 metros, el cual fue ingresado al programa FLO-2D. En la Figura 33, se presenta el producto final del modelo digital del terreno que se utilizó en la simulación de los escenarios de inundación.

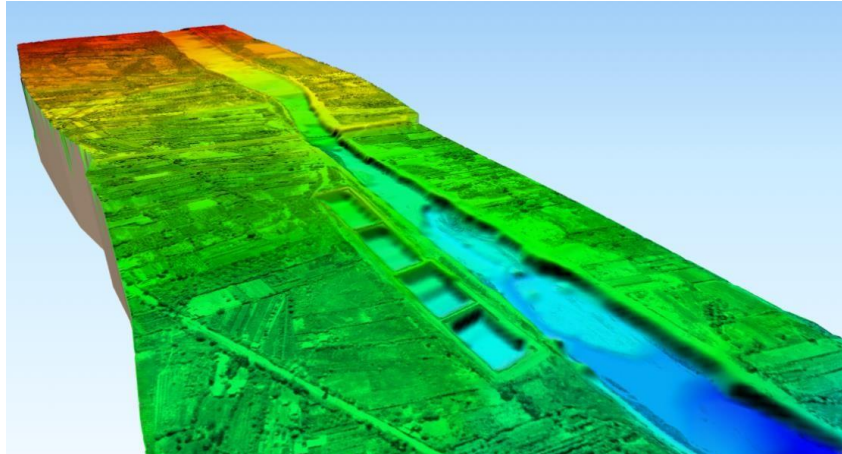


Figura 33: Modelo digital del terreno del río Mala (San Antonio)

El modelo digital del terreno generado fue ingresado al programa FLO-2D para confeccionar la malla. La misma que consiste en dividir el modelo digital del terreno en grillas (cuadros) en el cual el programa calculará las alturas y velocidades del flujo para cada grilla. En este caso, la resolución de la malla generada fue de 5 metros. Esta resolución fue necesaria debido a la extensión del área de estudio (1.71 Km^2) y para poder observar la dinámica del flujo (comportamiento del agua) en toda su extensión. En la Figura 34, se observa una vista ampliada de la malla del modelo digital del terreno con una resolución de 5 metros, esto quiere decir que por cada 25 m^2 del terreno existe un dato de elevación que representa el relieve del terreno.

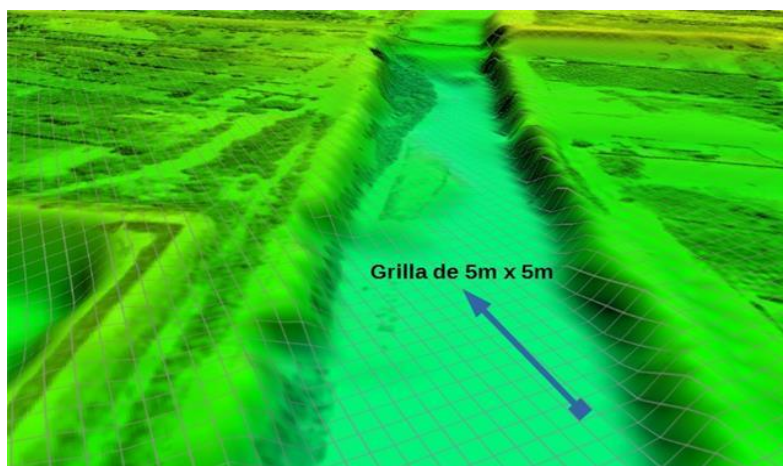


Figura 34: Vista ampliada de la malla del modelo digital del terreno del río Mala

Factor de fricción: El movimiento del fluido en un canal se ve afectado por la fuerza de gravedad, como la fuerza más importante, y la resistencia ocasionada en las fronteras rígidas por la fricción y la naturaleza turbulenta del flujo. El flujo en un canal natural se aloja dentro de lo que se llama cauce, producido por el movimiento del agua en el paso del tiempo; generalmente su perfil longitudinal es sinuoso, su sección transversal es irregular, y presenta forma y dimensiones que varían continuamente a lo largo del mismo.

Un canal natural nunca posee una sección geométrica constante. El flujo en un río, por lo general arrastra material sólido (materia en suspensión, arena, grava e incluso grandes bloques), que modifica continuamente la forma, dimensiones de la sección y perfil del cauce e impide una definición precisa de su rugosidad. Sin embargo, esta rugosidad puede expresarse en términos numéricos mediante ensayos empíricos, de los cuales el más utilizado por su metodología es el coeficiente de Manning.

La ecuación de fricción de Manning, es de carácter netamente empírico. Donde n es el factor de fricción, llamado número de Manning que, por ser aplicable a canales hidráulicamente rugosos, depende solo de la rugosidad de la frontera y es independiente del número de Reynolds (relación entre fuerzas inerciales y viscosas). Su aplicación se restringe a flujo turbulento en canales rugosos. Además, su precisión depende mucho de una selección cuidadosa de n , coeficiente que por lo general se considera dependiente sólo de la rugosidad en las paredes y fondo del canal. Sin embargo, n es propiamente un factor de fricción, esto es, depende también de la geometría de la sección y características hidráulicas del flujo.

En la práctica n es función de diferentes variables, y la estimación de un valor adecuado precisa del conocimiento cualitativo y cuidadoso de los factores que más influyen. La rugosidad del canal proporciona un punto crítico de partida en la selección de n . cuando se realizan estudios de canales naturales para distintos fines, pueden obtenerse fotografías de campo en partes estratégicas para compararlas con las de canales de resistencia conocida, junto con un resumen de los parámetros geométricos e hidráulicos que permitan una definición más adecuada de las condiciones del flujo.

Selección del valor del número de Manning: Para la selección del valor del número de Manning en el cauce del río Mala y de las áreas aledañas se utilizó el método de técnicas de campo en superficie de agua por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la tabla de coeficiente de rugosidad de Manning propuesta por Ven Te Chow (1984), respectivamente. Como resultado se obtuvo que el valor del número de Manning para el cauce del río es 0.032 y para las áreas aledañas es 0.05 (Figura 35). Esto quiere decir que el cauce del río ejerce menor fuerza de oposición al movimiento del flujo que en el de las áreas aledañas.

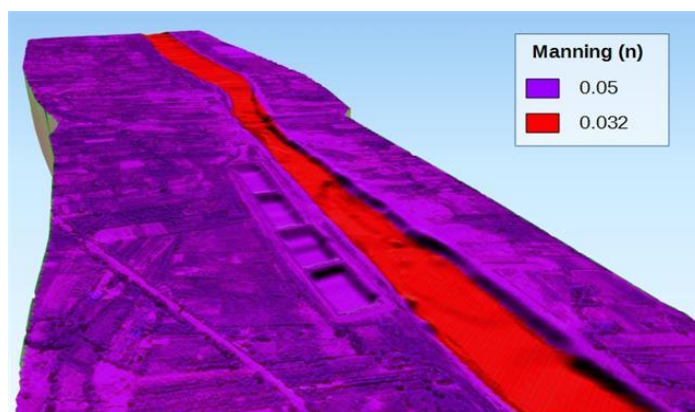


Figura 35: Valores del número de Manning en el río Mala (San Antonio).

Hidrograma de un evento hidrometeorológico: A continuación, se presentan las metodologías utilizadas y los resultados para los eventos hidrometeorológicos simulados:

-Evento hidrometeorológico extremo: En el país se tiene limitaciones en la disponibilidad de datos, ya sea hidrométricos, como pluviométricos y la mayor parte de las cuencas hidrográficas no se encuentran instrumentadas, generalmente se utilizan métodos indirectos para la estimación de caudales y tormentas de diseño. Tomando en cuenta las metodologías propuestas por: el Ministerio de Transporte y Comunicaciones en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje aprobado mediante el Decreto Supremo N° 034 – 2008 – MTC; y el Ministerio de Economía y Finanzas en la Guía Metodológica para Proyectos de Protección y/o Control de Inundaciones en Áreas Agrícolas o Urbanas aprobada por la Dirección General de Programación Multianual del Sector Público; y otras a nivel internacional, se presenta la siguiente metodología para la estimación de áreas inundables ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos:

- Como dato básico se utilizaron las precipitaciones máximas en 24 horas para los

años registrados (multianuales), las cuales pasan por un análisis de frecuencias que son validadas a través de una prueba de bondad de ajuste, que consiste en determinar que la correlación de la curva generada y los datos reales se ajuste al nivel mínimo de significancia (0.05) para las distintas distribuciones probabilísticas.

- Determinada la distribución probabilística que más se ajusta al registro de datos, se pronostica una precipitación (mm) para un determinado período de retorno. Con esta altura de precipitación, se procede a realizar el diseño por medio del método de tormentas del Servicio de Conservación del suelo de los Estados Unidos (US-SCS, 1986), con la distribución del tipo I, debido a que este método (calibrado por pruebas empíricas) presenta semejanza del medio geográfico y del clima marítimo del Pacífico, con inviernos húmedos y veranos secos.
- Con la aplicación de este método se obtiene el hietograma de la tormenta de diseño, al cual se le restará el agua infiltrada con el método de Número de curva del SCS (1972), éste es utilizado por la facilidad en el manejo e ingreso de datos. Este modelo se desarrolló en base resultados empíricos de cuencas experimentales en donde relaciona el potencial de infiltración en una cuenca y la infiltración máxima. Obteniendo ecuaciones empíricas con distintos coeficientes para los distintos tipos de suelo y condiciones de humedad.
- Con este nuevo hietograma, será transformado a un hidrograma a través del modelo de hidrograma sintético unitario del SCS (1972), este modelo de es uno de los más usados, debido a que el hidrograma generado es similar al que puede esperarse en una cuenca real. Este método fue calibrado con mediciones de caudales en zonas rurales de gran tamaño y en cuencas pequeñas.

A continuación, en la Figura 36, se presenta un esquema que resume la metodología aplicada para el cálculo del hidrograma de un evento hidrometeorológico extremo.

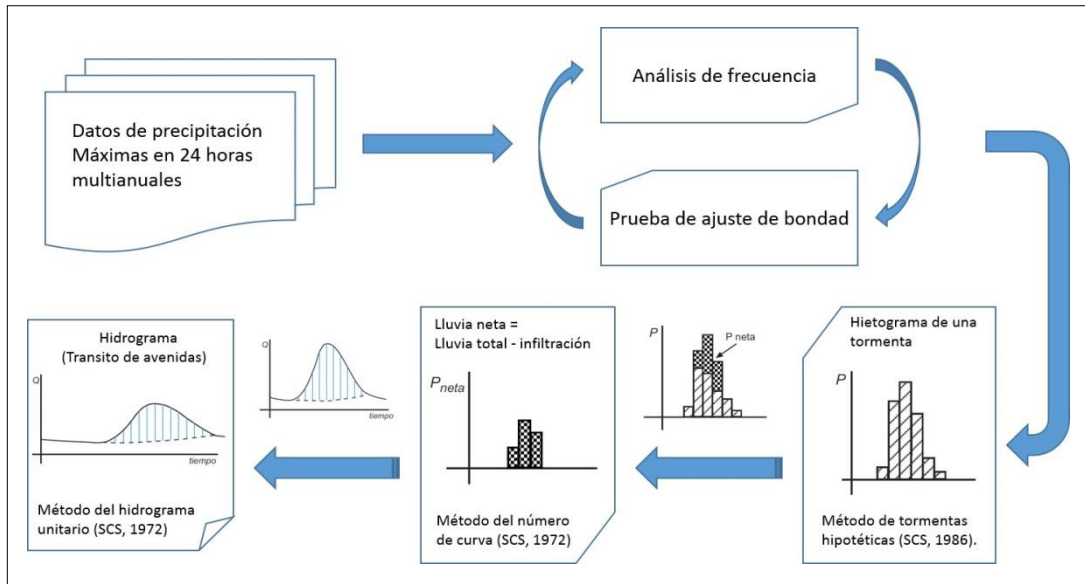


Figura 36: Esquema para el cálculo de un hidrograma de un evento hidrometeorológico extremo.

Para la simulación hidrometeorológica de un evento extremo es necesario conocer los parámetros de la cuenca (área, cota máxima, cota mínima, longitud del curso principal, tiempo de concentración y tiempo de retardo) a partir del punto en donde comenzará la simulación. En este caso, se delimitó la cuenca del río Mala a partir de un punto de descarga en las coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) 321872.78 m, 8602047.41 m con datum WGS 84 (Sistema Geodésico Mundial 1984), zona 18 sur. A partir de esta delimitación (Figura 37) se obtuvo los parámetros de la cuenca (Tabla 5).

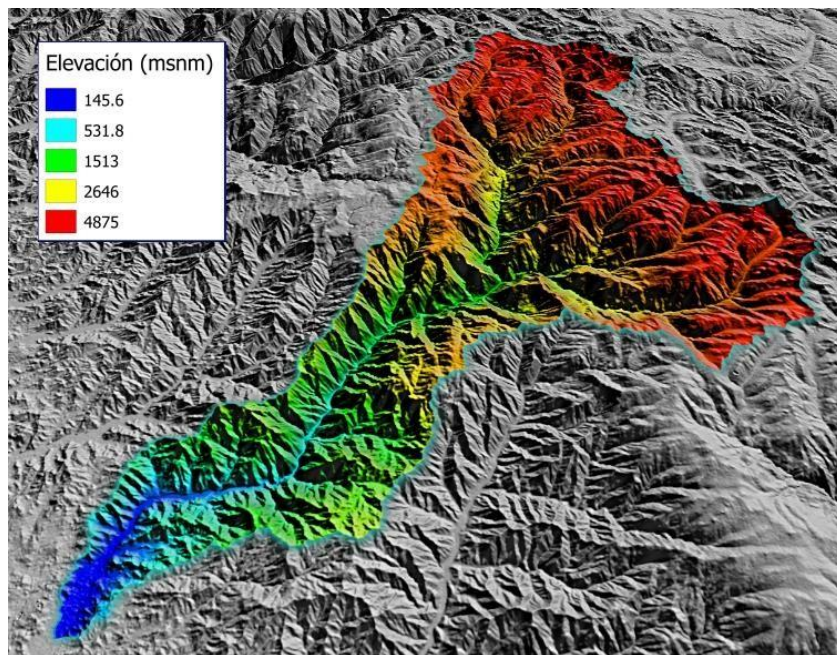


Figura 37: Cuenca delimitada del río Mala.

Tabla 5: Parámetros de la cuenca del río Mala delimitada.

| DESCRIPCIÓN | UND | VALOR |
|---|---------|-----------|
| SUPERFICIE | | |
| ÁREA | Km.2 | 2317.09 |
| COTAS | | |
| COTA MÁXIMA | msnm. | 5827.10 |
| COTA MÍNIMA | msnm. | 28.00 |
| RED HÍDRICA | | |
| LONGITUD DEL CURSO PRINCIPAL | metros | 132071.00 |
| PARÁMETROS GENERADOS | | |
| TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T _c) | minutos | 569.74 |
| TIEMPO DE RETARDO (T lag) | minutos | 341.84 |

Se utilizó la ecuación de Kirpich del método de California Culverts Prattice (1942) para estimar el tiempo de concentración que fue de 569.74 minutos, el cual es el tiempo en que demora en recorrer una gota de agua desde el punto más alejado de la cuenca hacia el punto de descarga. El tiempo de retardo calculado fue de 341.84 minutos (5 horas con 41 minutos), lo que significa que es el desfase de tiempo entre la precipitación máxima de la tormenta y el caudal máximo que se genera por dicha precipitación.

Con los parámetros calculados de esta delimitación de la cuenca del río Mala, se procedió a calcular el hidrograma del evento extremo. Para esto, se extrajo los caudales máximos diarios para periodos de retorno de 100 y 2 años del estudio de Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río Mala (Ministerio de Agricultura, 2007, pp 150-151). Los caudales extraídos del informe fueron de 162.5 m³/s y 424.1 m³/s para periodos de retorno de 2 y 100 años o probabilidad del 50% y 1% de no excedencia del caudal, respectivamente. Estos caudales fueron obtenidos mediante un análisis de frecuencia basado en datos de registros de precipitaciones máximas en 24 horas multianuales de las estaciones meteorológicas de toda la cuenca hasta el año 2007.

Con estos datos de caudales máximos se realizó un artificio para la obtención del hidrograma del evento, debido a que no se cuenta con información pluviométrica para el cálculo del hietograma de la tormenta. Este artificio consistió en la realización de una iteración, partiendo de un dato de precipitación al azar y este se transforma a un hietograma con el método de tormentas del SCS, y luego es convertido a un hidrograma utilizando el método del Hidrograma Unitario del SCS, en el cual se puede obtener el caudal pico del hidrograma. Este caudal pico deberá ser aproximadamente igual al caudal que se desea simular. Para la facilidad de los cálculos se utilizó el programa Hec-Hms 4.0 el cual contiene todos los métodos descritos anteriormente.

Para el periodo de retorno de 2 años, se obtuvo un caudal de 162.5 m³/s que es generado por una tormenta 3.91 mm en un área de 2317.09 km², con una duración de 24 horas y una precipitación máxima de 0.28 mm. En la Figura 38, se muestra el hidrograma (color azul) e hietograma (color rojo) generado para un evento extremo en la cuenca del río Mala.

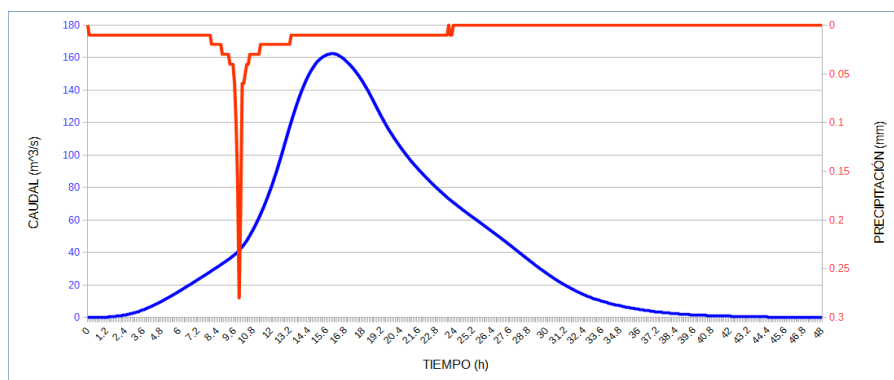


Figura 38: Gráfica del Hidrograma e hietograma de un evento hidrometeorológico extremo con un periodo de retorno de 2 años en el río Mala

Para el periodo de retorno de 100 años, se obtuvo un caudal de 424.1 m³/s que es generado por una tormenta 9.82 mm en un área de 2317.09 km², con una duración de 24 horas y una precipitación máxima de 0.74 mm. En la Figura 39, se muestra el hidrograma (color azul) e hietograma (color rojo) generado para un evento extremo en la cuenca del río Mala.

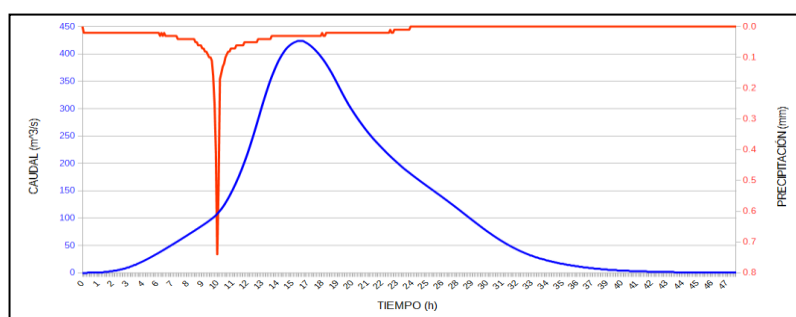


Figura 39: Gráfica del Hidrograma e hietograma de un evento hidrometeorológico extremo con un periodo de retorno de 100 años en el río Mala.

Umbral de inundación: El cálculo del hidrograma del umbral de inundación, el cual es el caudal máximo que puede fluir en el cauce del río Mala antes de que ocurra un desbordamiento y provoque una inundación, se realizó con simulaciones de flujo permanente (caudales constantes) menores al máximo calculado del evento extremo, hasta llegar al mínimo caudal que produzca desbordamiento, en este caso el umbral de inundación calculado fue de 94 m³/s aproximadamente.

En la Tabla 6, se muestra en resumen los caudales calculados que serán simulados en el programa FLO-2D, los cuales fueron clasificados por escenarios.

Tabla 6: Resumen de caudales calculados del río Mala (San Antonio)

| CLASIFICACIÓN | CONDICIONES HIDROLÓGICAS | CAUDAL PICO (m ³ /s) |
|---------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Escenario I | Periodo de retorno de 2 años | 162.5 |
| Escenario II | Periodo de retorno de 100 años | 424.1 |
| Escenario III | Umbral de inundación | 94 |

Resultado de las simulaciones

A continuación, se presenta los resultados de las simulaciones para los distintos escenarios.

a) Escenario I: Simulación de un evento hidrometeorológico extremo para un periodo de retorno de 2 años (probabilidad del 50% de no excedencia) con un caudal de 162.5 m³/s. El tiempo de simulación es de 48 horas, con un terreno de resolución de 5 metros.

En la Figura 40, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante un evento hidrometeorológico extremo. Se aprecia que las zonas inundadas son mayormente terrenos de cultivos.

Durante el desarrollo del evento extremo el flujo comienza a desbordarse por el margen derecho (antes del puente vehicular de la ex panamericana sur). El cual provoca la inundación de zonas de cultivo. Cuando el flujo se desarrolla hasta su máximo nivel (162.5 m³/s) se observa que el flujo sobre las áreas de cultivos escurre en dirección noroeste, inundando hasta 14 hectáreas.

El flujo llega a alcanzar alturas de hasta 2.40 metros (medidos desde el fondo del río) y en las zonas inundadas las alturas del flujo llegan hasta 0.50 metros, tal como se puede observar en la Figura 41. Este evento hidrometeorológico de un periodo de retorno de 2 años (162.5 m³/s), no afecta a las estructuras de la población y las áreas inundadas presentan una altura relativamente baja, por lo cual no causarían efectos negativos en los cultivos.

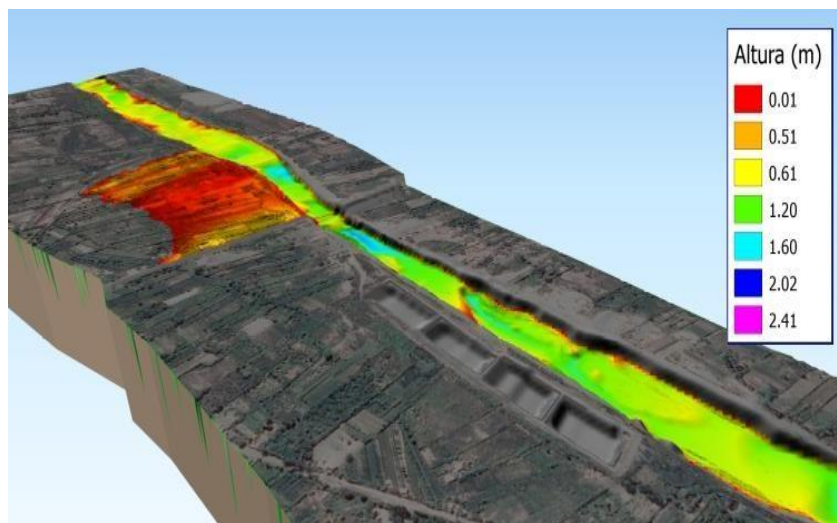


Figura 40: Alturas máximas del flujo para un periodo de retorno de 2 años ($162.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

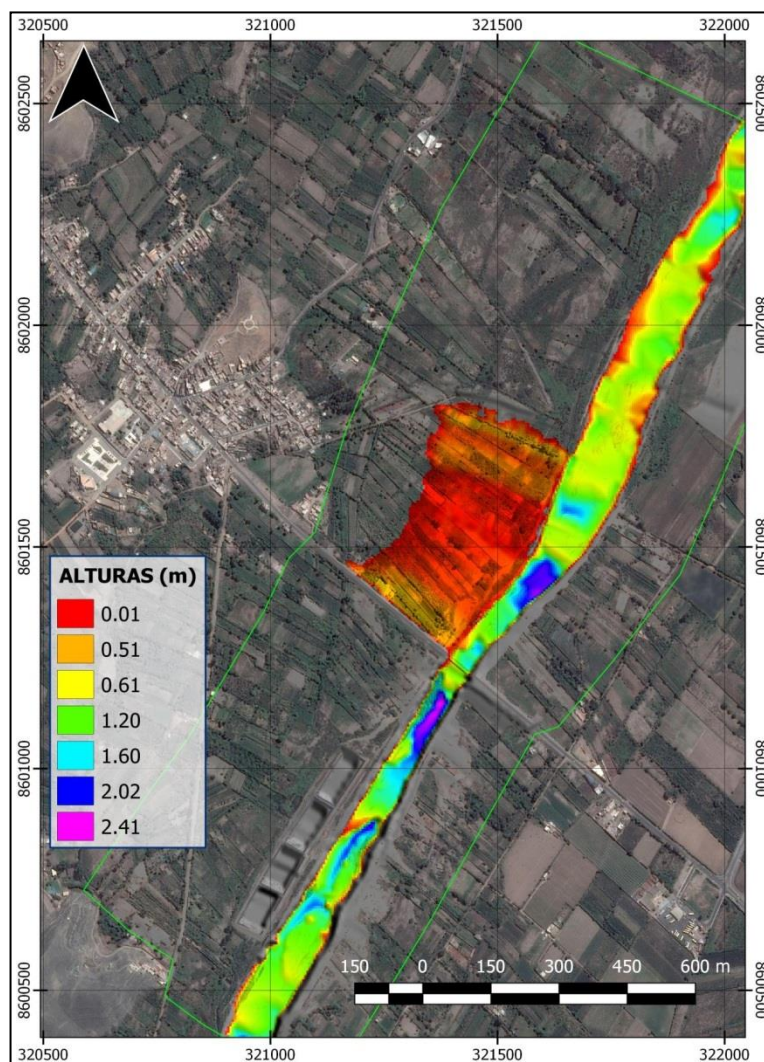


Figura 41: Vista en planta de las alturas máximas del flujo en un evento hidrometeorológico extremo para un periodo de retorno de 2 años ($162.5 \text{ m}^3/\text{s}$)

b) Escenario II: Simulación de un evento hidrometeorológico extremo para un periodo de retorno de 100 años (probabilidad del 1% de no excedencia) con un caudal de 424.1 m³/s. El tiempo de simulación es de 48 horas, con un terreno de resolución de 5 metros.

En la Figura 42, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante un evento hidrometeorológico extremo. Se aprecia que las zonas inundadas son mayormente terrenos de cultivos.

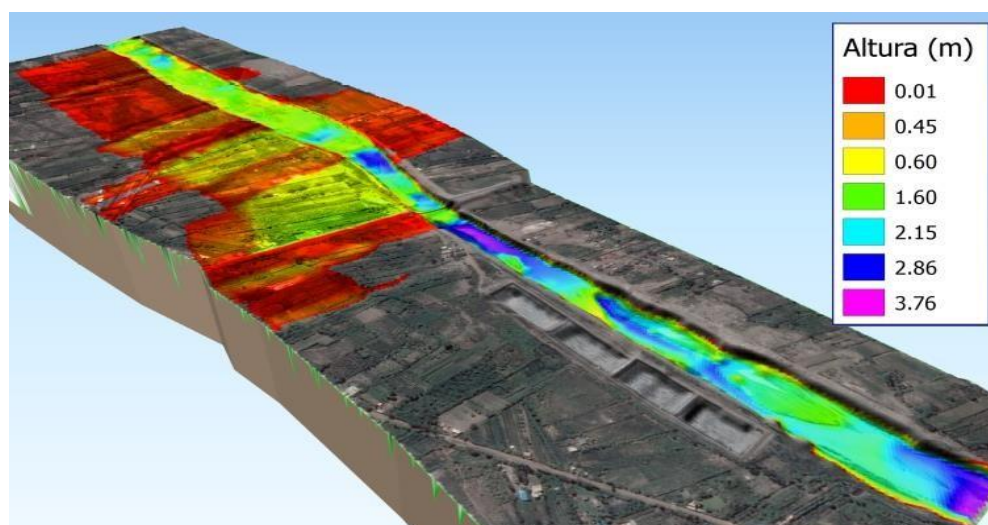


Figura 42: Alturas máximas del flujo para un periodo de retorno de 100 años (424.1 m³/s).

Durante el desarrollo del evento extremo el flujo comienza a desbordarse por el margen derecho (similar al Escenario I) y en el margen izquierdo antes del puente vehicular de la ex panamericana sur. El cual provoca la inundación de zonas de cultivo. Cuando el flujo se desarrolla hasta su máximo nivel (424.1 m³/s) se observa que el flujo sobre las áreas de cultivos escurre en dirección noroeste (margen derecho) y sureste (margen izquierdo), inundando hasta 48 y 10 hectáreas, respectivamente.

El flujo llega alcanzar alturas de hasta 3.80 metros (medidos desde el fondo del río) y en las zonas inundadas las alturas del flujo llegan hasta 1.50 metros, tal como se puede observar en la Figura 43.

Este evento hidrometeorológico de un periodo de retorno de 100 años (162.5 m³/s), no afecta a las estructuras de la población, pero llega inundar parte de la carretera de la ex panamericana sur, el cual podría generar accidentes vehiculares durante el evento.

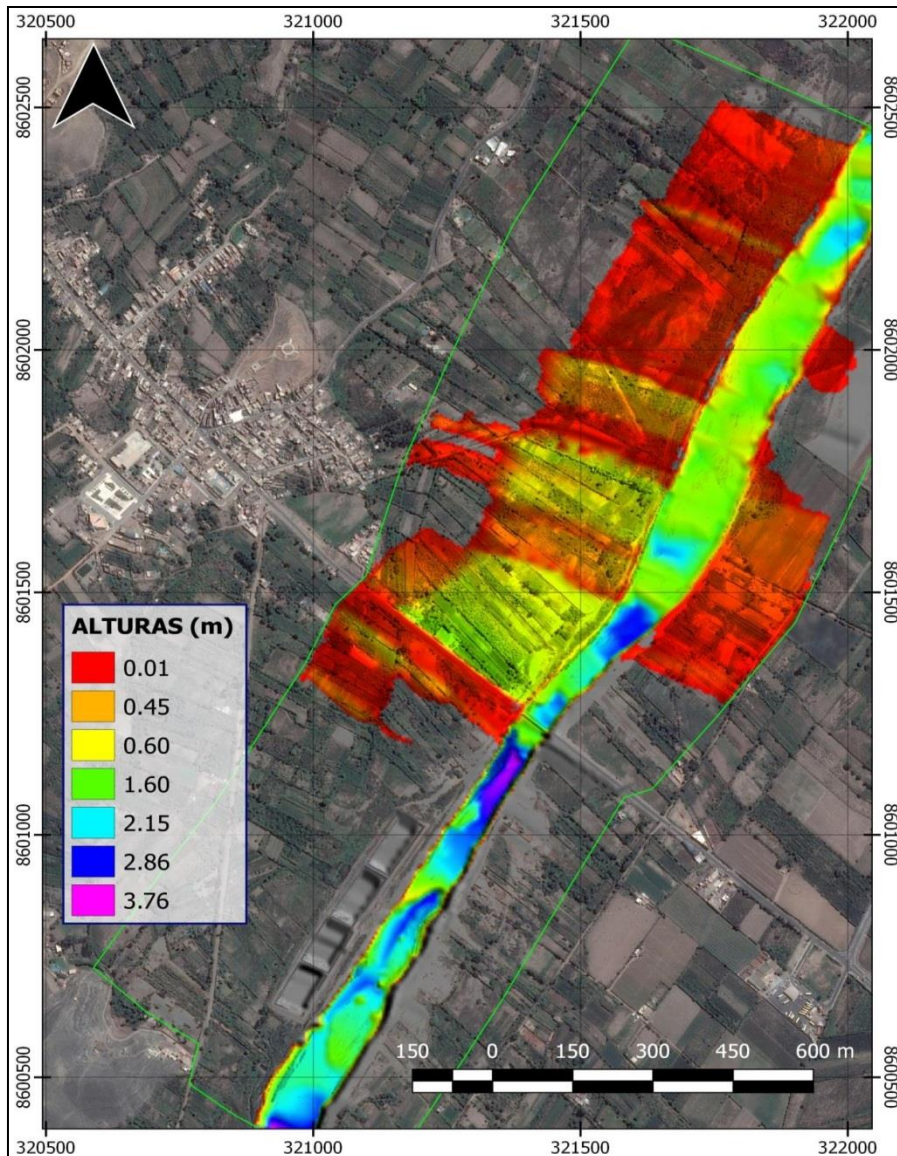


Figura 43: Vista en planta de las alturas máximas del flujo en un evento hidrometeorológico extremo para un periodo de retorno de 100 años ($424.1 \text{ m}^3/\text{s}$)

c) Escenario III: Simulación de un evento hidrometeorológico con un caudal de $94 \text{ m}^3/\text{s}$ (umbral de inundación), con tiempo de simulación de 5 horas con una malla con resolución de 5 metros.

En la Figura 44, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante la simulación. Se realizó simulaciones con distintos caudales y se observó que para medidas cercanas a $94 \text{ m}^3/\text{s}$ el flujo comienza a desbordarse de su cauce, el cual es un indicador para el reconocimiento del umbral de inundación.

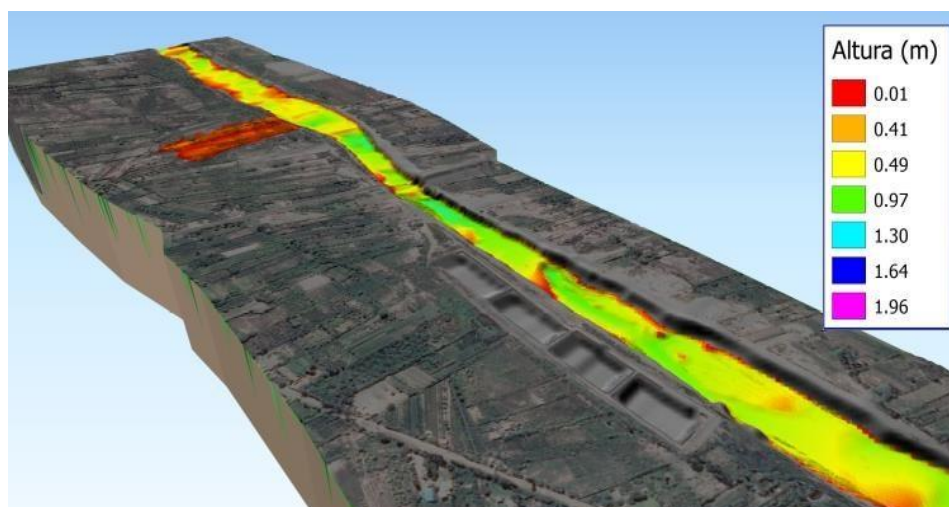


Figura 44: Alturas máximas del flujo para el umbral de inundación (94 m³/s).

Durante el desarrollo de la simulación con un caudal de 94 m³/s (umbral de inundación) el flujo comienza a desbordarse aguas arriba del puente vehicular de la ex panamericana sur en el margen derecho del río.

El flujo llega alcanzar alturas de hasta 2.00 metros (medidos desde el fondo del río). En las zonas que empiezan a inundarse las alturas del flujo llegan hasta 0.50 metros, tal como se puede observar en la Figura 45.

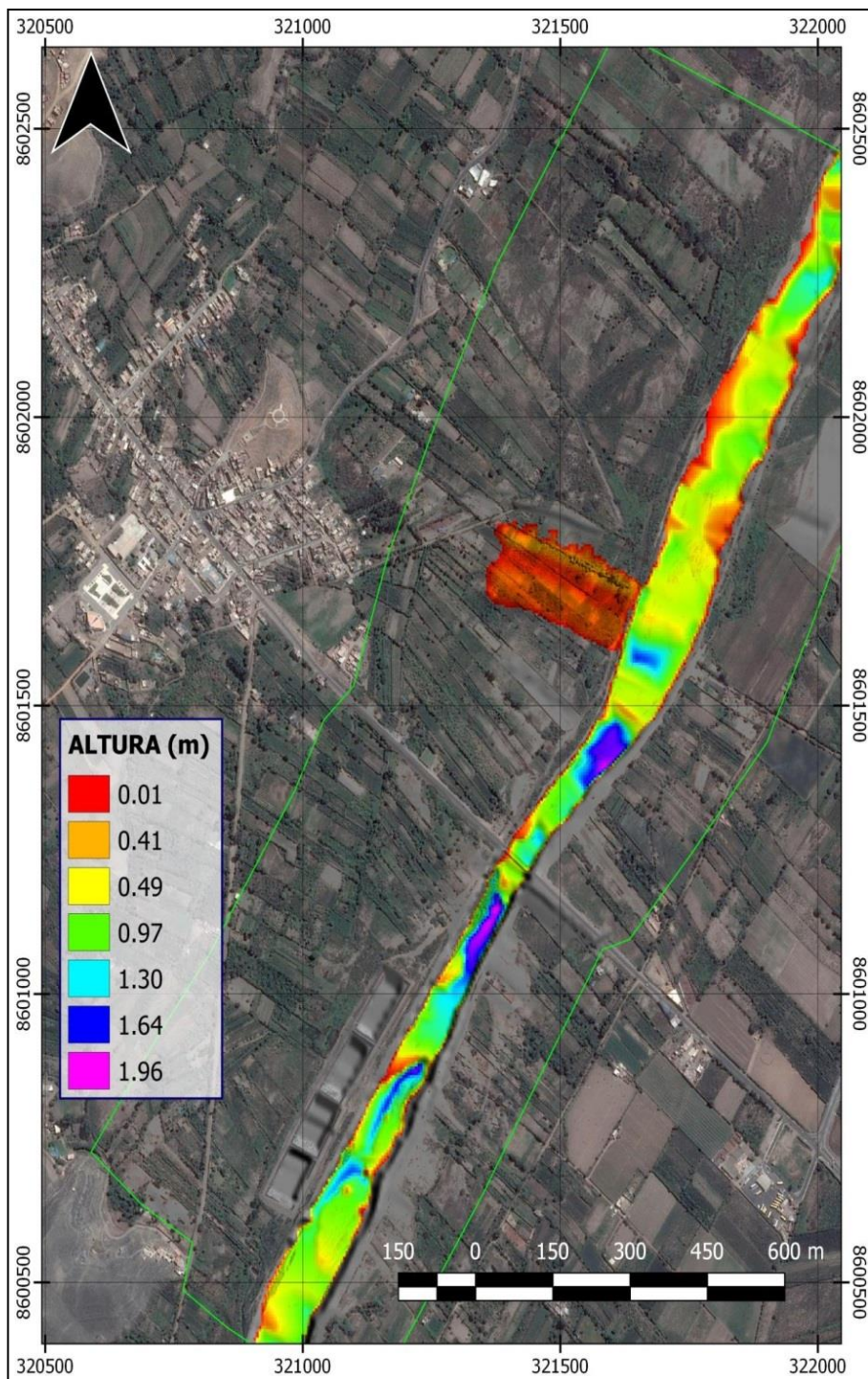


Figura 45: Vista en planta de las alturas máximas del flujo para el umbral de inundación de río Mala (94 m³/s) en la zona de San Antonio

5.- ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Los suelos son materiales inconsolidados conformados por minerales, materia orgánica, agua y aire entre sus poros, que se generan a partir de la alteración de la roca madre por agentes atmosféricos, erosionándola y formando una cobertura de variado espesor de sedimentos, que posteriormente han sido transportados y redepositados en las partes bajas de las cuencas hidrográficas, sobre los cuales se asientan las áreas urbanas. En geotecnia para clasificar los tipos de suelos se hace uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para determinar las características granulométricas, mientras que, la capacidad de carga admisible de los materiales (arcillas, limos, arenas, gravas y clastos) se encuentra condicionada a las características litológicas de las rocas pre-existentes y la dinámica con que fueron depositados. En el diagrama líneas abajo se indica el origen de los suelos (Figura 46).

Cabe destacar que, en algunas ciudades se presentan materiales eólicos (arenas), cuyo aporte se debe, principalmente a las corrientes de aire que proviene del Océano Pacífico.

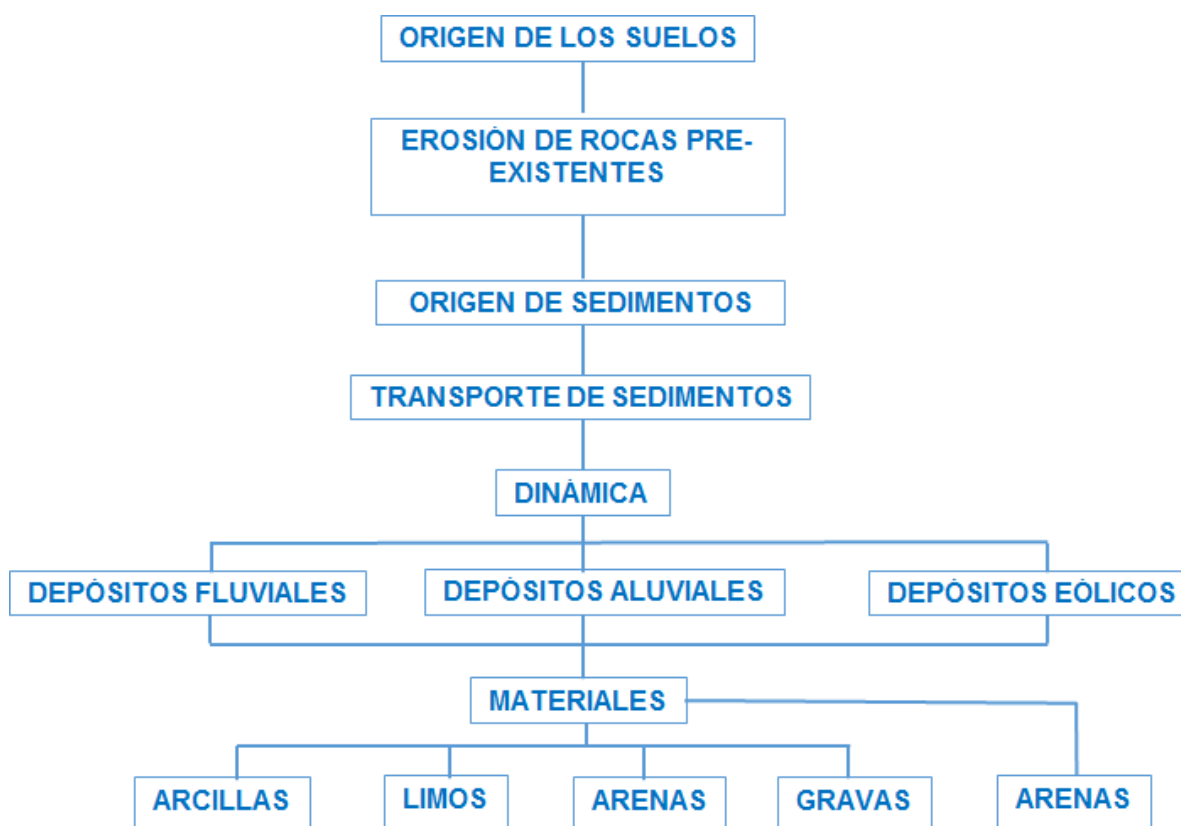


Figura 46: Vista en planta de las alturas máximas del flujo para el umbral de inundación de río Mala (94 m³/s) en la zona de San Antonio

La geotecnia es la rama de la geología aplicada a la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de cimentación en condiciones estáticas mediante la aplicación de técnicas de exploración entre las cuales se tienen: calicatas, perforaciones y ensayos de suelos en laboratorio; a fin de determinar las propiedades físicas de los suelos de cimentación.

En la ciudad de San Antonio, se realizó un estudio geotécnico que consistió en la elaboración de calicatas, densidad de campo, posteos y ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) (Figura 47)

Asimismo, de las calicatas se extrajeron 8 muestras de suelo para realizar los ensayos geotécnicos como: granulometría, plasticidad, corte directo y el cálculo de la capacidad de carga admisible.

5.1. Exploraciones a cielo abierto (Norma ASTM D 420)

Es un método de exploración directo que consiste en realizar una excavación en el terreno para la observación. Estas exploraciones se realizaron hasta profundidad (aproximadamente 3 m), a fin de describir los estratos que lo conforman, así como extraer muestras para la realización de ensayos y análisis. Estas calicatas pueden ser realizadas con maquinaria (retroexcavadora) o de forma manual.

El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

Reconocimiento de la zona de estudio: En base al análisis visual de las características del terreno, accesibilidad y lugares apropiados, las exploraciones se realizaron en puntos distribuidos de manera uniforme en la ciudad de San Antonio.

Excavaciones: Estas tuvieron las siguientes dimensiones: 1.5 x 1.5 m. y una profundidad aproximadamente de 3.00 m., en promedio.

Muestreo: Proceso de extracción de dos muestras alteradas de suelo (para la identificación y la otra para determinar las propiedades de resistencia del suelo).

Descripción de calicatas: Una vez terminada la excavación de la calicata, se procede a describir el perfil estratigráfico del subsuelo, elaborado las mismas que se adjuntan en los Anexos. Las excavaciones realizadas se ubican en las siguientes coordenadas UTM, ver Tabla 7 y Figura 47.

Tabla 7: Ubicación de calicatas (NP, no presenta)

| CALICATA | UTM ESTE (m) | UTM NORTE (m) | ELEVACIÓN (m.s.n.m) | PROFUNDIDAD (m) | NIVEL FREÁTICO (m) |
|----------|--------------|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|
| SA_01 | 318779 | 8603445 | 65 | 2.50 | N.P |
| SA_02 | 320306 | 8602485 | 83 | 1.50 | N.P |
| SA_03 | 320547 | 8602031 | 63 | 2.60 | N.P |
| SA_04 | 320603 | 8601616 | 58 | 1.90 | N.P |
| SA_05 | 321323 | 8601255 | 40 | 2.30 | 2.30 |
| SA_06 | 321456 | 8602650 | 55 | 1.30 | 1.30 |
| SA_07 | 321414 | 8601856 | 47 | 1.90 | 1.90 |
| SA_08 | 319261 | 8600984 | 33 | 1.10 | N.P |

5.2.- Densidad de suelo in situ (Norma ASTM D1556)

Se define como la relación entre la masa del suelo (sólido y líquido) y el volumen total de un suelo o la medida del estado de empaquetamiento del suelo y consiste en extraer material del suelo. El objetivo es obtener la relación entre la masa y el volumen que ocupa la arena del cono (arena calibrada).

En cada exploración (estrato muestreado) se debe llevar a cabo un ensayo de densidad de campo, haciendo uso del método del cono de arena, y así obtener el grado de compacidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales es información necesaria para desarrollar los ensayos de corte directo a las muestras de suelo (en su estado inicial); sin embargo, no es aplicable en suelos que contengan cantidad excesiva de roca o materiales gruesos de diámetro mayor a 1 ½ pulgada (38 mm), así como en suelos saturados; sino más bien, en suelos que presenten cierta cohesión, tales como: arenas limosas y arenas arcillosas con contenido de gravas inferiores a 38 mm de diámetro.

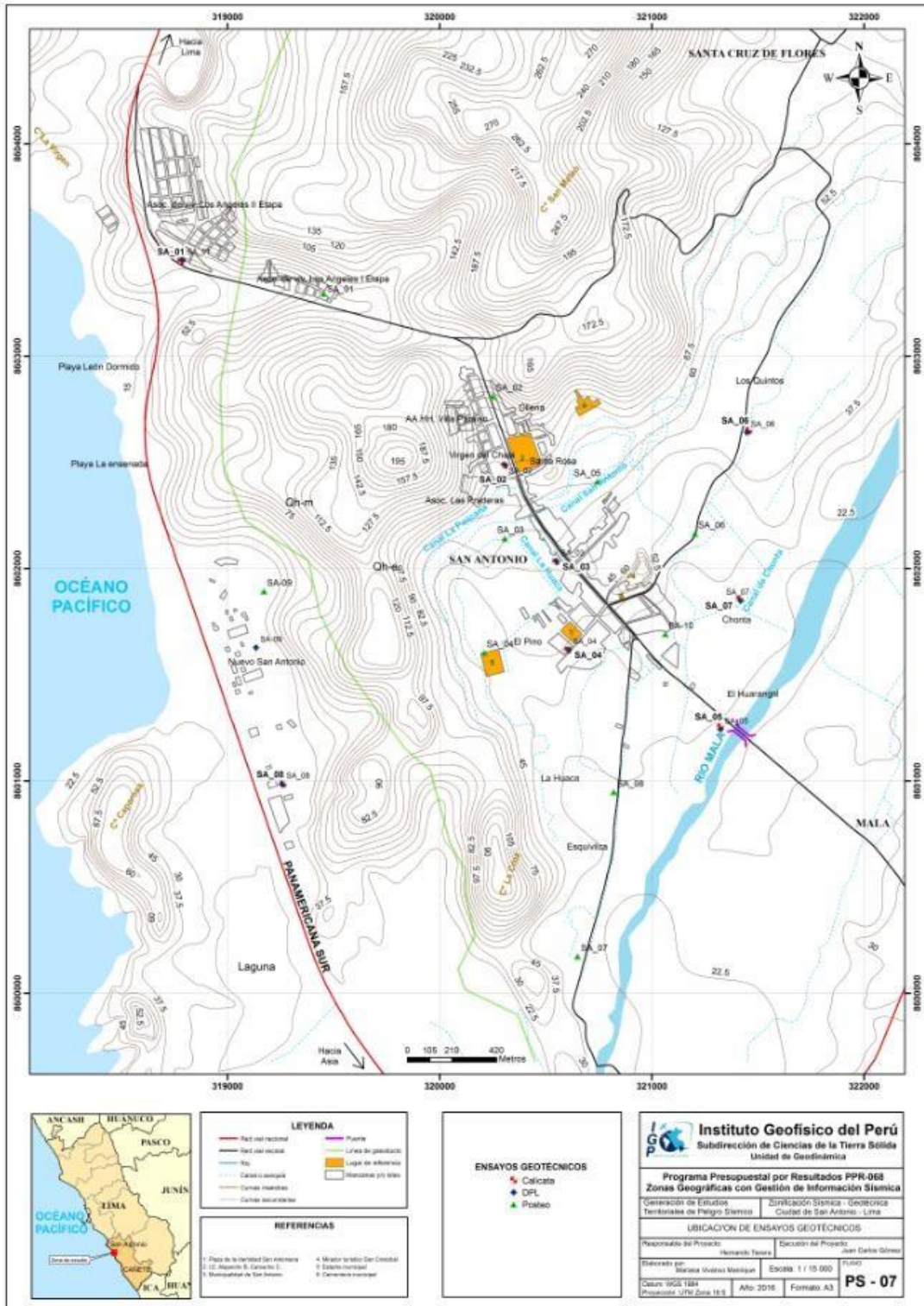


Figura 47: Mapa de distribución de calicatas, posteos y DPL en la ciudad de San Antonio y alrededores

El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

Excavación proceso de diseño de agujero (profundidad de 10 a 12 cm) haciendo uso de cinceles y comba, se tiene como guía el diámetro de la placa metálica.

Extracción de la muestra de suelo del agujero elaborado anteriormente y pesado de este material extraído.

Posicionamiento de cono de arena pesado sobre la placa, se espera hasta que este deje de vaciar arena y se llene el agujero.

Finalmente, se pesa la arena que sobra en el cono y se procede a realizar los cálculos para la obtención de la densidad húmeda, mientras que, la densidad seca se obtiene en el laboratorio al momento de conocer la humedad natural de la muestra extraída.

A continuación, en la Tabla 8, se presenta los resultados de las 8 calicatas elaboradas en el área de estudio. Las fichas de densidades se adjuntan en Anexos.

Tabla 8: Resultado de densidades in – situ

| CALICATA | MUESTRA | PROFUNDIDAD (m) | DENSIDAD HUMEDA (gr/cm ³) | DENSIDAD SECA (gr/cm ³) |
|----------|----------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| SA_01 | DC-SA-01 | 2.50 | 6.49 | 6.30 |
| SA_02 | DC-SA-02 | 1.50 | 1.68 | 1.57 |
| SA_03 | DC-SA-03 | 2.60 | 2.04 | 2.00 |
| SA_04 | DC-SA-04 | 1.90 | – | – |
| SA_05 | DC-SA-05 | 2.30 | 1.58 | 1.30 |
| SA_06 | DC-SA-06 | 1.30 | 1.85 | 1.80 |
| SA_07 | DC-SA-07 | 1.90 | 1.42 | 1.34 |
| SA_08 | DC-SA-08 | 1.10 | 2.12 | 2.01 |

En base a la Tabla 9, se conoce que, los suelos de la ciudad de San Antonio, presentan rangos de densidad entre 1.30 – 2.12 gr/cm³, es decir, presentan densidad media, debido a que están conformados por arenas y gravas; a excepción de las calicatas SA-04 que están conformadas por suelos tipo gravas.

Tabla 9: Valores típicos de densidad de suelos, (CISMID, 2016).

| MATERIALES | | DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm ³) | DENSIDAD SECA (gr/cm ³) |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| ARENA Y GRAVA | MUY SUELTA | 1.70 – 1.80 | 1.30 – 1.40 |
| | SUELTA | 1.80 – 1.90 | 1.40 – 1.50 |
| | MEDIO DENSA | 1.90 – 2.10 | 1.50 – 1.80 |
| | DENSA | 2.00 - 2.20 | 1.70 – 2.00 |
| | MUY DENSA | 2.20 – 2.30 | 2.00 – 2.20 |
| ARENA | POBREMENTE GRADUADA (SP) | 1.70 – 1.90 | 1.30 – 1.50 |
| | BIEN GRADUADA (SW) | 1.80 – 2.30 | 1.40 – 2.20 |
| | MEZCLA DE ARENA (SW Y SP) | 1.90 – 2.30 | 1.50 – 2.20 |
| ARCILLA | LODO NO CONSOLIDADO | 1.60 – 1.70 | 0.90 – 1.10 |
| | BLANDA, AGRIETADA | 1.70 – 1.90 | 1.10 – 1.40 |
| | TÍPICA (CONS. NORMAL) | 1.80 – 2.20 | 1.30 – 1.90 |
| | MORRENA (SOBREC.) | 2.00 – 2.40 | 1.70 – 2.20 |
| SUELOS ROJOS TROPICALES | | 1.70 – 2.10 | 1.30 – 1.80 |

5.3.- Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D 1452)

Se define posteadora como un barredor manual en forma de “T” que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas) hasta una profundidad de 5 a 6 m., a fin de obtener muestras del suelo. Las muestras extraídas se obtienen trituradas y completamente alteradas, sin embargo, sirven para conocer el tipo de suelo y contenido de humedad que presenta.

Este ensayo, posteadora presenta restricciones en suelos con presencia de gravas y gravillas (la cuchara saca muestra se entranpan con este tipo de suelos).

Procedimiento: Con la posteadora se penetra el subsuelo desde la superficie de tal manera que, se gira manualmente el equipo ejerciendo presión sobre el suelo, a medida que va incrementando la profundidad, se van conectando y añadiendo las varillas de 1 metro de extensión para la obtención de muestras con las cucharas acopladas en el extremo. Estas exploraciones fueron distribuidas entre las calicatas, lugares donde no existía información geotécnica, a fin de obtener mejor caracterización de los suelos de la ciudad de San Antonio. En la Tabla 10 se muestra los resultados obtenidos y ubicación.

Tabla 10: Ubicación de posteos y clasificación de suelos SUCS.

| POSTEO | ESTE (m) | NORTE (m) | ELEVACIÓN (m) | PROFUNDIDAD (m) | TIPO DE SUELO | NIVEL FREÁTICO |
|--------|----------|-----------|---------------|-----------------|---------------|----------------|
| SA_01 | 319454 | 8603293 | 80 | 0.50 | SP | NO |
| SA_02 | 320249 | 8602810 | 116 | 0.90 | SM | NO |
| SA_03 | 320307 | 8602140 | 69 | 0.30 | ML | NO |
| SA_04 | 320211 | 8601603 | 59 | 4.50 | SM | NO |
| SA_05 | 320743 | 8602408 | 68 | 1.00 | SM | NO |
| SA_06 | 321203 | 8602163 | 36 | 1.00 | ML | NO |
| SA_07 | 320650 | 8600173 | 24 | 0.30 | SP | NO |
| SA_08 | 320821 | 8600947 | 35 | 1.00 | SC | 1.00 |
| SA_09 | 319172 | 8601892 | 22 | 0.60 | SP | NO |
| SA-10 | 321064 | 8601690 | 44 | 1.40 | SW | NO |

5.4.- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, norma DIN4094)

Es un equipo de campo de registro continuo (se contabiliza el número de golpes para penetrar un tramo de varillaje a lo largo de todo el ensayo), permite estimar la resistencia del material (suelo) en kg/cm^2 al hincado del cono dinámico. La ventaja del instrumento es que es un equipo muy práctico y se puede transportar fácilmente.

Consiste en introducir al suelo una varilla de acero en la que se encuentra una punta cónica de 60° , mediante la aplicación de golpes con un martillo de 10 kg, que se deja caer desde una altura de 0.50 m. Como medida de la resistencia a la penetración se registra el número "N" (número de golpes en 10 cm de penetración), información que luego se correlaciona con algunas propiedades relativas del suelo, en particular, con sus parámetros de resistencia al corte, capacidad portante, densidad relativa, etc. A través de fórmulas empíricas donde se introduce el "N" y se obtiene el ángulo de fricción interna de los distintos materiales.

Se hace mención que, este ensayo es aplicable en terrenos arenosos, arcillosos y limo arenoso, no recomendable a utilizarse en gravas, fragmentos gruesos, conglomerados y terrenos rocosos.

El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

Ubicación de ensayos: Se distribuyeron generalmente al costado y en puntos intermedios a algunas de las calicatas, a fin de obtener mayor información de la resistencia del suelo en el área estudiada.

Ensamble de equipo: Consiste en conectar los accesorios del equipo, la punta cónica va al final de la varilla de penetración, esta se une a la guía que contiene el yunque, posteriormente se ajusta las uniones y finalmente se empieza a hincar el suelo con la caída libre del martillo (acción de la gravedad).

Proceso de toma de datos: Se debe registrar el número de golpes por cada 10 cm que la varilla penetra el suelo; se sigue este procedimiento hasta que el suelo ofrezca resistencia (no exceder los 45 golpes de acuerdo a norma técnica).

En la Tabla 11, se indica la ubicación de los ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) realizados en la ciudad de San Antonio, la profundidad total alcanzada y los datos obtenidos del ensayo (número de golpes y ángulo de fricción) a la profundidad comprendida entre 0.90 y 1.20 m. Las fichas de los ensayos se adjuntan en los Anexos.

Tabla 11: Ubicación de ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) y parámetros obtenidos.

| DPL | ESTE (m) | NORTE (m) | ELEVACIÓN (m) | PROFUNDIDAD (m) | NÚMERO DE GOLPES (0.90 - 1.20) | ϕ |
|-------|----------|-----------|---------------|-----------------|--------------------------------|--------|
| SA_01 | 318790 | 8603452 | 64 | 1.50 | 30-40 | 38.5 |
| SA_02 | 320307 | 8602487 | 81 | 1.10 | 2-45 | 39.7 |
| SA_03 | 320551 | 8602033 | 59 | 0.60 | 45 | 39.7 |
| SA_04 | 320609 | 8601617 | 57 | 0.20 | 40 | 38.5 |
| SA_05 | 321324 | 8601242 | 38 | 1.20 | 6-30 | 36.0 |
| SA_06 | 321449 | 8602640 | 51 | 1.30 | 4-45 | 39.7 |
| SA_07 | 321418 | 8601849 | 46 | 1.40 | 4-6 | 28.5 |
| SA_08 | 319258 | 8600985 | 28 | 0.30 | 45 | 39.7 |
| SA-09 | 319135 | 8601627 | 22 | 3.00 | 23-22 | 33.9 |

En cuatro ensayos DPL (01, 02, 05, 06, 07 y 09) se ha logrado alcanzar una profundidad entre 1.10 m. y 3.00 m. y el resto de ensayos la profundidad alcanzada es mínima (0.20 m) debido a la presencia de materiales granulares, conformados por gravas y arenas de grano grueso con alta resistencia a la penetración.

Asimismo, la profundidad alcanzada a través de la elaboración de estos ensayos permitió inferir que los suelos ubicados al noreste y en las inmediaciones del centro urbano presentan consistencia media a baja (DPL 01, 02, 03, 04 y 05). Finalmente, en el extremo sureste (DPL 06 y 07), se presentan consistencia media por la presencia de materiales con contenido de sal.

Correlación entre el “N” DPL y el “N” SPT (ASTM D1586): El ensayo DPL no cuenta con correcciones normadas para la obtención del ángulo de fricción interna, es por ello que, los valores obtenidos del número de golpes del ensayo DPL (NDPL) fueron correlacionados con el número de golpes del ensayo de penetración estándar (NSPT), a fin de determinar el ángulo de fricción interna corregido y posteriormente, calcular la capacidad de carga admisible.

Entre los diversos métodos de correlación para el número de golpes del ensayo DPL y SPT, en base a las características del terreno (compacidad, resistencia y deformabilidad), e incluso con las dimensiones de las cimentaciones requeridas, se utilizó una fórmula empírica que relaciona los parámetros de los equipos DPL y SPT, tales como: peso del martillo, altura de caída del martillo, área de la punta cónica, el espesor de la hinca y los número de golpes obtenidos con el DPL, a continuación se detalla dicha relación:

$$N_1 = N_2 \frac{W_1 * H_1 * A_2 * e_2}{W_2 * H_2 * A_1 * e_1}$$

Dónde:

N_1 = Número de golpes equivalente en SPT

N_2 = Número de golpes obtenidos en DPL

W_1 = Peso del martillo del DPL

W_2 = Peso del martillo SPT H_1 = Altura de caída de DPL

H_2 = Altura de caída del SPT

A_1 = Área de la punta cónica del DPL A_2 = Área de la punta cónica del SPT

e_1 = Espesor de la hinca del DPL

e_2 = Espesor de la hinca del SPT

Una vez calculado los valores de golpes con el SPT (NSPT), se realizaron las siguientes correcciones por: nivel freático, eficiencia, longitud y diámetro, para así obtener un nuevo valor de número de golpes por ensayo SPT ($N'SPT$), con el cual se procede a estimar el ángulo de fricción interna de los suelos.

Cálculo del ángulo de fricción interna: Para determinar el ángulo de fricción interna de los suelos de cimentación, existen diversas fórmulas empíricas propuestas por diversos autores, por mencionar algunos autores tenemos: Dunham, y Osaki (1959); Muromachi (1974); Peck (1974); Das (1995) y Katanaka - Uchida (1996). Para el caso de la ciudad de San Antonio, se empleó la relación experimental propuesta por Osaki (1959), debido a

que, es la más usada internacionalmente y sus resultados son conservadores, respecto a los otros autores antes mencionados (Tabla 12).

Tabla 12: Cálculo del ángulo de fricción interna, usando valores del N_{SPT} .

| ENSAYO | N_{SPT} CORREGIDO | ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA (ϕ'_{NSPT}) | N_{SPT} CORREGIDO | ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA (ϕ'_{NSPT}) |
|---------------------------|------------------------|--|------------------------|--|
| DPL-01 | 26.37 | 38.0 | 32.66 | 40.6 |
| DPL 02 | 14.03 | 31.8 | - | - |
| DPL -03 | - | - | - | - |
| DPL -04 | - | - | - | - |
| DPL -05 | 5.08 | 25.1 | 10.16 | 29.3 |
| DPL -06 | 22.98 | 36.4 | - | - |
| DPL -07 | 3.63 | 23.5 | - | - |
| DPL -08 | - | - | - | - |
| DPL-09 | 16.21 | 33.00 | 16.21 | 33.00 |
| PROFUNDIDAD DEL ENSAYO | 1.00 – 1.20 m | | 1.30 - 1.50 m | |

Tabla 13: Compacidad relativa de los suelos y ángulo de fricción interna en base al N_{SPT} (J. Badillo & Rico, 1973).

| ARCILLAS | | | ARENAS GRANO MEDIO A GRUESO | | | ARENAS GRANO FINO A LIMOSAS | | |
|------------------------------------|--|--------------|------------------------------------|--|--------------|------------------------------------|--|------------|
| Número de golpes SPT (N_{SPT}) | Ángulo de fricción interna (ϕ') | Compacidad | Número de golpes SPT (N_{SPT}) | Ángulo de fricción interna (ϕ') | Compacidad | Número de golpes SPT (N_{SPT}) | Ángulo de fricción interna (ϕ') | Compacidad |
| < 2 | 0° | Muy Blanda | 0 - 5 | 27° | Muy suelta | 0 - 5 | 27° | Muy suelta |
| 2 - 4 | 0 - 2 | Blanda | 6 - 12 | 28.00° - 30.50° | Suelta | 6 - 12 | 28.00° - 29.50° | Suelta |
| 4 - 8 | 2 - 4 | Media | 13 - 32 | 31.50° - 36.30° | Media | 13 - 45 | 31.00° - 35.80° | Media |
| 8 - 15 | 4 - 6 | Compacta | 33 - 52 | 37.00° - 41.20° | Compacta | 46 - 60 | 36.00° - 36.80° | Compacta |
| 15 - 30 | 6 - 12 | Muy Compacta | 53 - 60 | 42°.00 - 42.60° | Muy Compacta | | | |
| > 30 | > 14 | Dura | | | | | | |

De acuerdo a los datos de las Tablas 12 y 13, los suelos de la ciudad de San Antonio, en su mayoría son arenas con contenido de gravas, el ángulo de fricción está en el rango de 23.50° a 38.00° entre 1.00 m. y 1.20 m., por tanto, los suelos presentan compacidad relativa blanda a media, mientras que, de 1.30 m -1.50 m., varía de 29.30° a 40.60°, cuya compacidad relativa es de media a compacta.

Finalmente, se adjunta en los anexos, las fichas resumen de cada uno de los ensayos realizados en campo y sus respectivos valores de ángulos de fricción interna (Figura 48).

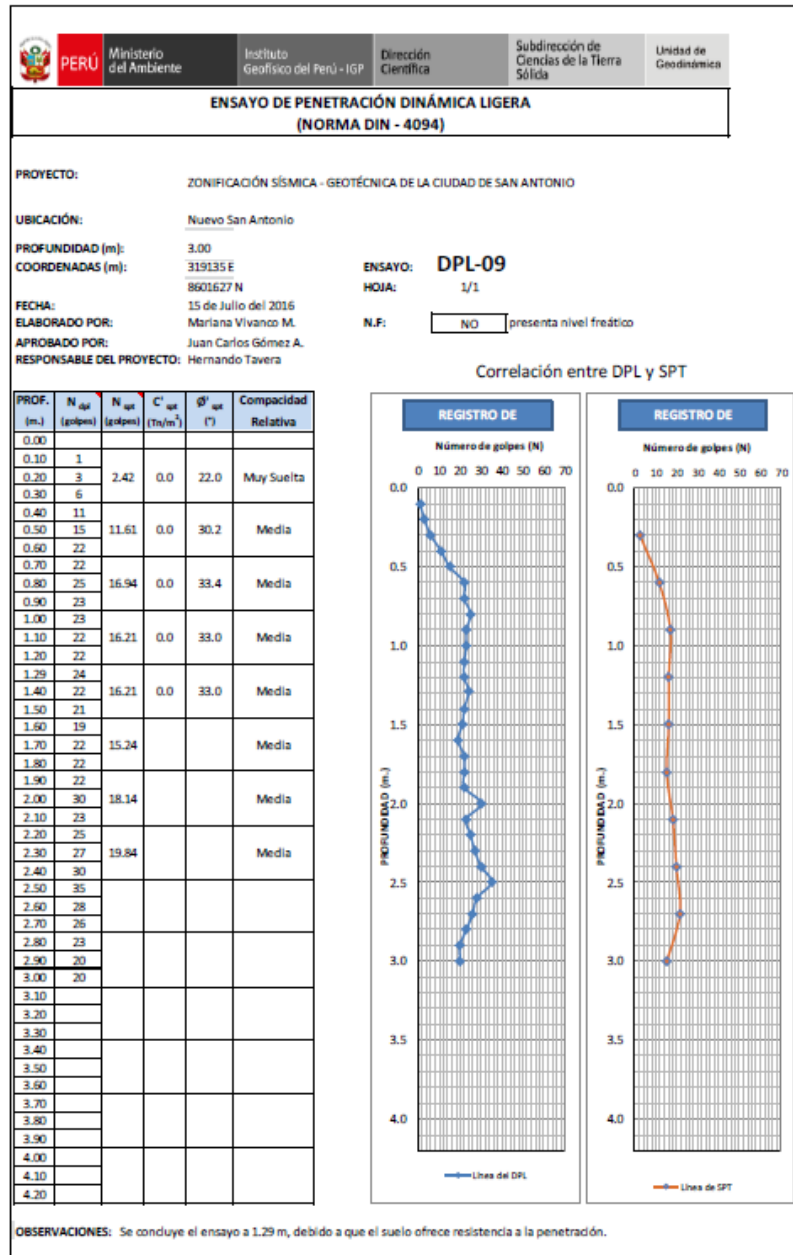


Figura 48: Diagrama de correlación entre el número de golpes del DPL y el número de golpes del SPT, y cálculo del ángulo de fricción interna.

5.5.- Clasificación SUCS para Suelos

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y DPL y la inspección visual del terreno en la ciudad de San Antonio, los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos y de plasticidad han permitido identificar 2 tipos de suelos, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), ver Tabla 14 y Figura 49.

Tabla 14: Clasificación SUCS para suelos presentes en la ciudad de San Antonio.

| CALICATA | PROFUNDIDAD (m) | NIVEL FREÁTICO (m) | GRAVAS % (>4.76 mm) | ARENAS % (>0.074 mm, <7 mm) | FINOS % (<0.074 mm) | LÍMITE LÍQUIDO (%) | LÍMITE PLÁSTICO (%) | ÍNDICE PLÁSTICO | CONTENIDO DE HUMEDAD (%) | CLASIFICACIÓN SUCS | DENOMINACIÓN |
|----------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------------|--------------------|---|
| SA - 01 | 2.50 | N.P | 0.00 | 95.2 | 4.77 | - | - | | 0.64 | SP | Arena pobremente graduada |
| SA - 02 | 1.50 | N.P | 22.7 | 53.2 | 24.14 | 69.8 | 25.4 | 4.40 | 13.66 | SP | Arena pobremente graduada |
| SA - 03 | 2.60 | N.P | 57.9 | 34.6 | 7.49 | | | | 2.41 | GP | Grava pobremente graduada con arena y limos |
| SA - 04 | 1.90 | N.P | 66.3 | 29.3 | 4.42 | | | | 1.63 | GP | Grava pobremente graduada con arena y limos |
| SA - 05 | 2.30 | SP | 17.07 | 66.03 | 14.9 | 32.5 | 31.5 | 1.00 | 19.6 | SP | Arena pobremente graduada |
| SA - 06 | 1.30 | SP | 46.87 | 26.69 | 26.44 | 35.5 | 29.87 | 5.63 | 26.64 | GP | Grava pobremente graduada con arena y limos |
| SA - 07 | 1.9 | SP | 41.8 | 47 | 11.22 | 58.6 | 35.8 | 2.8 | 25.52 | SP | Arena pobremente graduada |
| SA - 08 | 1.1 | NP | 1.3 | 81.1 | 17.59 | 32.5 | 31.8 | 0.7 | 0.96 | SP | Arena pobremente graduada |

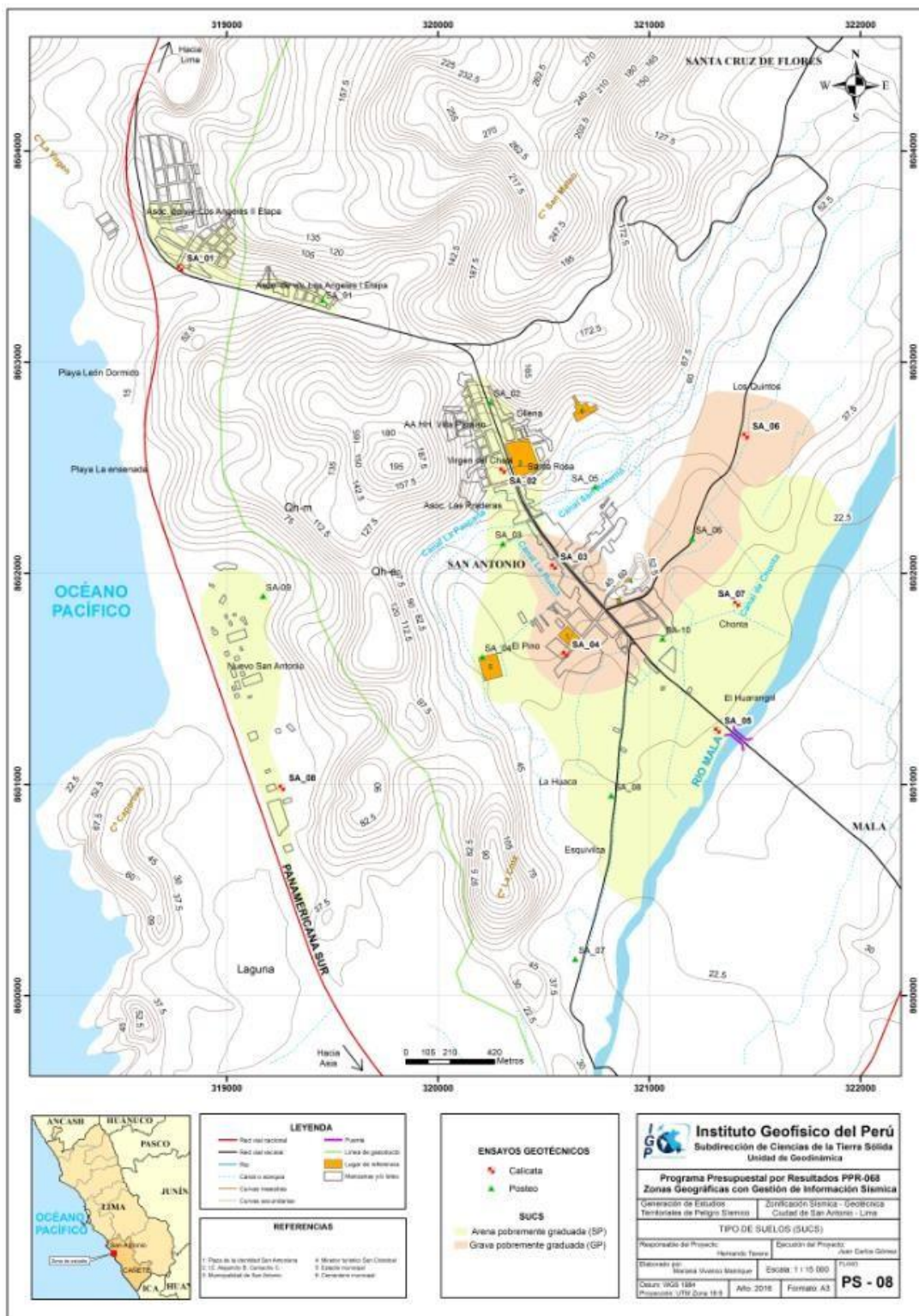


Figura 49: Mapa de clasificación SUCS para los suelos de la ciudad de San Antonio y alrededores.

-Suelos tipo GP: Están conformados por gravas mal graduadas, el contenido de humedad es de 2.41% a 1.63%, 26.64%, constituyen suelos con grado de compactación bajo. Estos suelos representan el 37% del área de estudio, siendo identificados en las calicatas SA-03, SA-04 y SA-06; en el sector “Los Quintos” respectivamente. En la ejecución de la calicata SA-06 se evidencio nivel freático a 1.30 m.

- Suelos tipo SP: Están conformados por arenas mal graduadas, el contenido de humedad es de 0.64% a 25.52%, constituyen suelos con grado de compactación bajo, presenta índice de plasticidad bajo a nulo. Cabe resaltar que, estos suelos representan el 62 % del área de estudios y se han identificado en las calicatas SA-01, SA-02, SA-05, SA-07 y SA-08, en los lugares de Asociación de Vivienda los Ángeles, detrás del Centro de Salud de San Antonio, a 50 m del margen derecho del río Mala, sector “La Chonta” y Nuevo San Antonio respectivamente. En la calicata SA-05, el nivel freático se encuentra a 2.30 m y en la calicata SA-07, el nivel freático se encuentra a 1.90 m.

5.6.- Ensayo de corte directo (Norma ASTM D - 3080)

La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo corte de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones (esfuerzos verticales y horizontales) que simulen la que existe o existiría en el terreno producto de la aplicación de una carga. Esta resistencia al corte en los suelos se debe a dos componentes: la cohesión (comportamiento plástico que presentan las partículas finas de una muestra) y el ángulo de fricción interna (rozamiento que existe en las partículas granulares).

Para conocer esta resistencia al corte en laboratorio se usa el equipo de corte directo, siendo el más usado una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la muestra de suelo con dos placas de piedra porosa en ambos extremos, se aplica una carga vertical de confinamiento (Pv) y luego una carga horizontal (Ph) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra.

De las ocho (8) muestras extraídas de campo, dos (2) se enviaron al laboratorio de JCL consultores y las restantes se analizaron en el Instituto Geofísico del Perú (Tabla 15).

Tabla 15: Valores obtenidos del ensayo de corte directo

| MUESTRA | Ángulo de fricción interna del suelo (ϕ) | Cohesión aparente del suelo (T_n/m^2) | Densidad natural (T_n/m^3) |
|---------|---|---|--------------------------------|
| SA-01 | 29 | 0.36 | 2.51 |
| SA-02 | 36 | 0.52 | 1.61 |
| SA-03 | 28.12 | 0.120 | 2.04 |
| SA-04 | NP | NP | NP |
| SA-05 | 27.55 | 0.003 | 1.58 |
| SA-06 | 35 | 0.39 | 1.77 |
| SA-07 | 33 | 0.60 | 1.36 |
| SA-08 | 36 | 0.52 | 2.03 |

De los resultados obtenidos se evidencia que la cohesión de los suelos es de 0.003 a 0.60 y los valores del ángulo de fricción interna son menores a 36°, característico de suelos mixtos como gravas, arenas y limos.

5.7.- Capacidad de carga admisible

Se define como el esfuerzo máximo que puede ser aplicado a la masa de suelo de tal forma que se cumplan los requerimientos básicos y se encuentra establecido por la relación entre la carga última y un factor de seguridad cuyo valor es de 3, de acuerdo a la norma técnica peruana para el diseño de cimentaciones E.050.

Carga última: Es la presión última por unidad de área de la cimentación soportada por el suelo, en exceso de la presión causada por el suelo alrededor al nivel de la cimentación (Amézquita, et al). Para determinar la carga última se usaron los resultados de los ensayos de corte directo y en base al NSPT (ángulo de fricción y la cohesión), datos que se usaran con la fórmula general de Terzaghi (1943), a través de la siguiente expresión (Tabla 16):

Fórmula para falla por corte general:

$$q_u = c \cdot N_c + q \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

Fórmula para falla por corte local:

$$q_u = \frac{2}{3} \cdot c \cdot N'_c + q \cdot N'_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N'_\gamma$$

C: cohesión Donde:

C: cohesión

q: carga ($\gamma \cdot D_f$)

N_c, N_q, N_γ : Factores de carga, Tabla 16.

Tabla 16: Factores de cohesión, carga y volumétricos. Modificado por Terzaghi (Baja Das, 2007).

| ϕ' | N'_c | N'_q | N'_γ | ϕ' | N'_c | N'_q | N'_γ |
|---------|--------|--------|-------------|---------|--------|--------|-------------|
| 0 | 5.70 | 1.00 | 0.00 | 26 | 15.53 | 6.05 | 2.59 |
| 1 | 5.90 | 1.07 | 0.005 | 27 | 16.30 | 6.54 | 2.88 |
| 2 | 6.10 | 1.14 | 0.02 | 28 | 17.13 | 7.07 | 3.29 |
| 3 | 6.30 | 1.22 | 0.04 | 29 | 18.03 | 7.66 | 3.76 |
| 4 | 6.51 | 1.30 | 0.055 | 30 | 18.99 | 8.31 | 4.39 |
| 5 | 6.74 | 1.39 | 0.074 | 31 | 20.03 | 9.03 | 4.83 |
| 6 | 6.97 | 1.49 | 0.10 | 32 | 21.16 | 9.82 | 5.51 |
| 7 | 7.22 | 1.59 | 0.128 | 33 | 22.39 | 10.69 | 6.32 |
| 8 | 7.47 | 1.70 | 0.16 | 34 | 23.72 | 11.67 | 7.22 |
| 9 | 7.74 | 1.82 | 0.20 | 35 | 25.18 | 12.75 | 8.35 |
| 10 | 8.02 | 1.94 | 0.24 | 36 | 26.77 | 13.97 | 9.41 |
| 11 | 8.32 | 2.08 | 0.30 | 37 | 28.51 | 15.32 | 10.90 |
| 12 | 8.63 | 2.22 | 0.35 | 38 | 30.43 | 16.85 | 12.75 |
| 13 | 8.96 | 2.38 | 0.42 | 39 | 32.53 | 18.56 | 14.71 |
| 14 | 9.31 | 2.55 | 0.48 | 40 | 34.87 | 20.50 | 17.22 |
| 15 | 9.67 | 2.73 | 0.57 | 41 | 37.45 | 22.70 | 19.75 |
| 16 | 10.06 | 2.92 | 0.67 | 42 | 40.33 | 25.21 | 22.50 |
| 17 | 10.47 | 3.13 | 0.76 | 43 | 43.54 | 28.06 | 26.25 |
| 18 | 10.90 | 3.36 | 0.88 | 44 | 47.13 | 31.34 | 30.40 |
| 19 | 11.36 | 3.61 | 1.03 | 45 | 51.17 | 35.11 | 36.00 |
| 20 | 11.85 | 3.88 | 1.12 | 46 | 55.73 | 39.48 | 41.70 |
| 21 | 12.37 | 4.17 | 1.35 | 47 | 60.91 | 44.45 | 49.30 |
| 22 | 12.92 | 4.48 | 1.55 | 48 | 66.80 | 50.46 | 59.25 |
| 23 | 13.51 | 4.82 | 1.74 | 49 | 73.55 | 57.41 | 71.45 |
| 24 | 14.14 | 5.20 | 1.97 | 50 | 81.31 | 65.60 | 85.75 |
| 25 | 14.80 | 5.60 | 2.25 | | | | |

Luego, en base a los resultados de la carga última (q_u) se calculó de la capacidad admisible de los suelos para una profundidad de cimentación de 1.00 m y ancho de zapata de 1.00 m, así como también para profundidad de cimentación de 1.50 m y ancho de zapata de 1.00 m. Los resultados de capacidad de carga admisible de los tipos de suelos analizados se presentan en las Tablas 17,18, 19 y la Figura 50.

Tabla 17: Capacidad de carga admisible de las ocho (8) muestras de suelo extraídas en la ciudad de San Antonio.

| MUESTRA | Capacidad de carga última (Tn/m ²) | Capacidad de carga admisible (kg/cm ²) | Capacidad de carga última (Tn/m ²) | Capacidad de carga admisible (kg/cm ²) |
|----------------------------|--|--|--|--|
| SA-01 | 3.05 | 1.00 | 4.35 | 1.05 |
| SA-02 | 3.82 | 1.26 | 5.21 | 1.76 |
| SA-03 | 9.15 | 3.050 | 11.01 | 3.67 |
| SA-04 | 9.12 | 3.061 | 11.05 | 3.69 |
| SA-05 | 3.85 | 1.28 | 5.19 | 1.73 |
| SA-06 | 5.23 | 1.92 | 7.26 | 1.96 |
| SA-07 | 2.9 | 0.96 | 4.1 | 1.00 |
| SA-08 | 2.86 | 0.92 | 4.29 | 1.05 |
| DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN | Profundidad:1.00 m y ancho: 1.00 | | Profundidad:1.50 m y ancho: 1.00 | |

Tabla 18: Capacidad de carga admisible en base a los ensayos de DPL en la ciudad de San Antonio

| ENSAYO | Capacidad de carga última (Tn/m ²) | Capacidad de carga admisible (kg/cm ²) | Capacidad de carga última (Tn/m ²) | Capacidad de carga admisible (kg/cm ²) |
|----------------------------|--|--|--|--|
| DPL-SA-01 | 5.83 | 1.94 | 16.04 | 5.35 |
| DPL-SA-02 | 2.81 | 0.94 | – | – |
| DPL-SA-05 | 2.31 | 0.77 | – | – |
| DPL-SA-06 | 5.11 | 1.7 | – | – |
| DPL-SA-07 | 1.55 | 0.52 | – | – |
| DPL-SA-09 | 2.81 | 0.94 | 2.99 | 1.00 |
| DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN | Profundidad:1.00 m y ancho: 1.00 | | Profundidad:1.50 m y ancho: 1.00 | |

Tabla 19: Rangos capacidad de carga admisible

| CAPACIDAD CARGA ADMISIBLE (kg/cm ²) | DENOMINACION |
|---|--------------|
| < 1.0 | MUY BAJA |
| 1.0 - 2.0 | BAJA |
| 2.0 - 3.0 | MEDIA |
| > 3.0 | ALTA |

De los resultados obtenidos y considerando los valores de la Tabla 19, se ha determinado que la zona urbana de la ciudad de San Antonio presenta suelos con la siguiente capacidad de carga admisible:

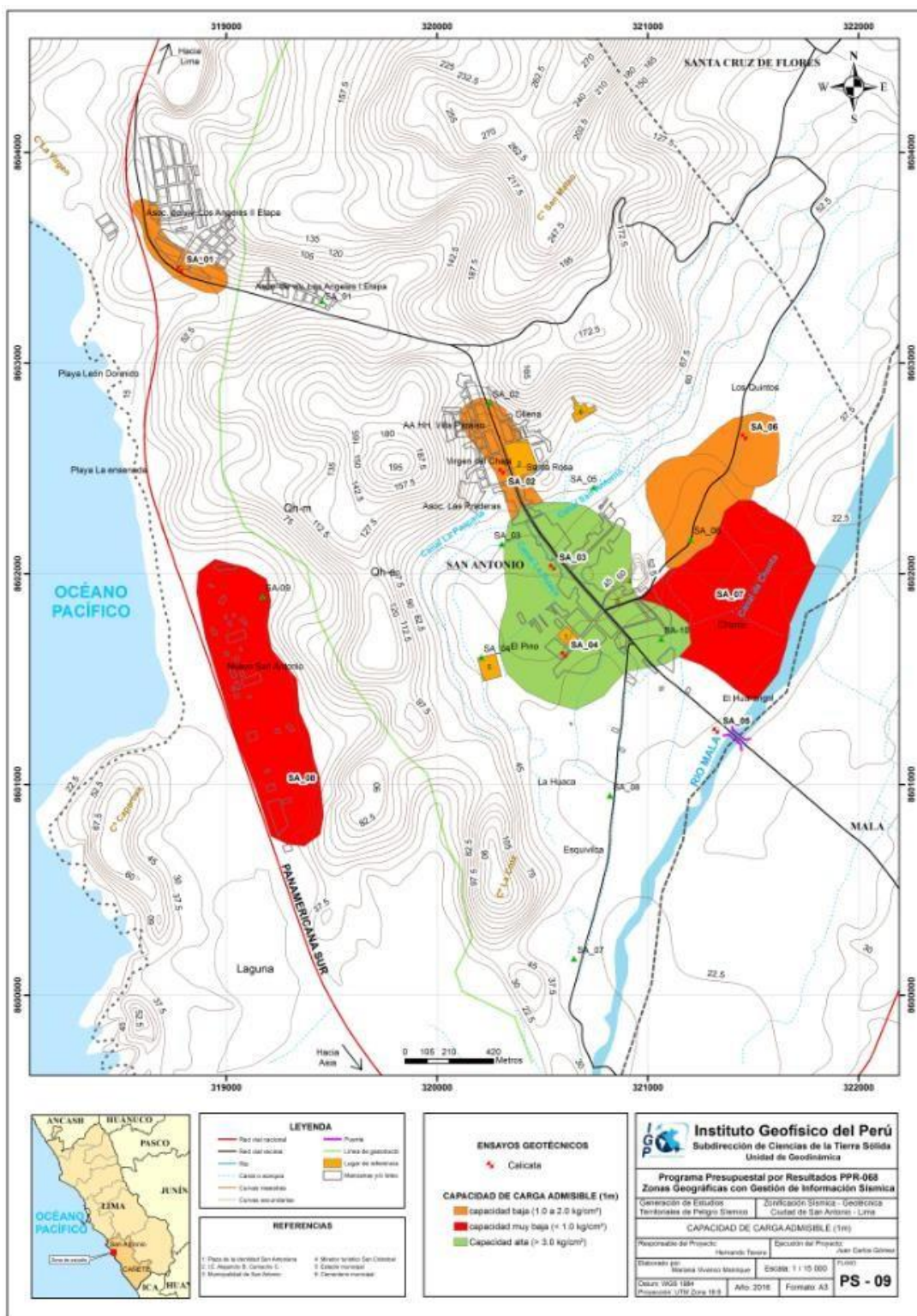


Figura 50: Mapa de capacidad de carga admisible para los suelos de la ciudad de San Antonio y alrededores

Capacidad de carga admisible muy baja: Comprende rangos de capacidad de carga admisible menor a 1.00 kg/cm^2 y corresponde al tipo de suelo arenoso (SP), cuyo grado de compactación es bajo. Esta unidad abarca el 20% del área de estudio y se encuentra en los sectores de Nuevo San Antonio y La Chonta, en este último el nivel freático está a 1.90 m.

Capacidad de carga admisible baja: Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre 1.00 a 2.00 kg/cm^2 y corresponde al tipo de suelo arenoso (SP), areno arcilloso (SP-SC), gravas mal graduada – limosas (GP-GM), cuyo grado de compactación es bajo. Abarca menos 50% del área de estudio y se encuentra en los sectores de Asociación de viviendas Los Ángeles (I y II etapa), detrás del puesto de Salud de San Antonio, a la margen derecha del río Mala y Los Quintos, en este último la profundidad del nivel freático es de 1.30 m.

Capacidad de carga admisible alta: Comprende rangos de capacidad de carga admisible mayores a 3.00 kg/cm^2 y se encuentran representados por los tipos de suelos: Grava limosa (GM), cuyo grado de compactación es medio. Abarca el 30% del área de estudio y se encuentran en el casco urbano de San Antonio.

5.8.- Problemas geotécnicos

Entre los problemas de suelos que se presentan con mayor frecuencia, es la licuación de suelos, el cual está asociado a la ocurrencia de eventos sísmicos. A continuación, se detalla su dinámica y el procedimiento para su determinación:

Licuación de suelos: Se define como la pérdida rápida de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos saturados debido al incremento súbito en las presiones de poros, bajo condiciones no drenadas y cargas cíclicas principalmente. (Pachon et al. Ingeominas, 2000).

-Análisis del potencial de licuación de suelos: Para determinar el potencial de licuación de suelos se debe definir la relación entre la resistencia cíclica (CRR) y el esfuerzo cíclico (CSR), el primero se define como la oposición que presenta un suelo ante la licuación y el segundo como la excitación o demanda sísmica de un determinado estrato de suelo.

Para el cálculo del esfuerzo cíclico se aplica la fórmula de Seed e Idris (1971):

$$CSR = \left(\frac{\tau_{sv}}{\sigma_{vo}} \right) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d$$

Dónde:

a_{max} = Aceleración máxima para un sismo de diseño

g = Aceleración de la gravedad

σ_{vo} = Esfuerzo normal vertical respecto al suelo

σ'_{vo} = Esfuerzo normal vertical efectivo respecto al suelo

r_d = Coeficiente de reducción de esfuerzo, tomando en cuenta la deformabilidad del perfil del suelo

De acuerdo a Idriss 1991, r_d está dado por:

$$r_d = e^{[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M_w]}$$

Dónde:

$$\alpha(z) = -1.01 - 1.06 \cdot \sin \left[\left(\frac{z}{11.73} \right) + 5.133 \right]$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \sin \left[\left(\frac{z}{11.28} \right) + 5.142 \right]$$

Mientras que, la resistencia del suelo se determinó en base a número de golpes del SPT (NSPT) que fue correlacionado en el presente informe con los datos de campo tomados a partir del ensayo DPL que hayan pasado 1.00 m de profundidad. Datos que, se aplicaran en la siguiente formula:

$$CRR = \frac{1}{34 - N} + \frac{N}{13.5} + \frac{50}{(10N + 45)^2} - \frac{1}{200}$$

Dónde:

$N = N$ corregido (N_1)₆₀

Finalmente, la relación entre la Resistencia del suelo (CRR) y el esfuerzo cíclico (CSR) brinda un factor de seguridad (FS), si este es menor a 1 ocurrirá licuación,

$$FS = \left(\frac{CRR}{CSR} \right) MSF^*$$

en caso contrario no se presentará, según la siguiente relación:

MSF*: Factor de Escala de Magnitud, para un sismo de 7.5 Mw este valor es igual a 1.

La zona a evaluar es el sector Las Salinas - barrio Agüita de Coco, zona actualmente en expansión urbana, cuyo suelo está constituido por arenas y existe nivel freático superficial a 1.50 m. de profundidad (Tabla 20).

El análisis de potencial de licuación de suelos se efectuó para un sismo de Mw=7.5

Tabla 20: Datos para el cálculo de potencial de licuación

| Calicatas | σ_v (kg/cm ²) | σ'_v (kg/cm ²) | rd | CRR | NÚMERO DE GOLPES CORREGIDOS | CSR M=7.5 |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------------|------|------|-----------------------------|-----------|
| C-05 | 30862.26 | 40338.72 | 0.94 | 0.11 | 9.19 | 0.23 |
| C-06 | 63853.29 | 97540.83 | 0.94 | 0.11 | 10.16 | 0.2 |
| C-07 | 45694.98 | 67914.63 | 0.94 | 0.06 | 3.63 | 0.26 |

Los resultados del cálculo del Factor de Seguridad (FS) de suelos licuables se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21: Resultados del FS de potencial de suelos licuables.

| CALICATA | CRR | CSR | FS= (CRR/CSR)MSF* |
|----------|------|------|-------------------|
| C-05 | 0.10 | 0.23 | 0.45 |
| C-06 | 0.11 | 0.20 | 0.57 |
| C-07 | 0.06 | 0.26 | 0.30 |

El valor obtenido es de 0.45, 0.57, 0.30, es decir, un factor de seguridad menor a 1 y según Seed e Idris (1999) esto indica que los sectores de margen derecha del río Mala después del puente vehicular (Mala-San Antonio) aguas abajo, Los Quintos (parte baja) y La Chonta presentan potencial de licuación de suelos.

CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DE LA CIUDAD DE SAN ANTONIO

CONTENIDO

1.- METODOLOGÍA

- 1.1.- Razones Espectrales H/V
- 1.2.- Análisis Multicanal de ondas Superficiales (MASW)
- 1.3.- Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

2.- RECOLECCIÓN DE DATOS

3.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

- 3.1.- Estudio Sísmico con la Técnica de H/V
- 3.2.- Estudio Sísmico con la Técnica de MASW
- 3.3.- Periodos Dominantes
- 3.4.- Estudios Eléctricos con la Técnica (ERT)

4.- ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA – GEOTÉCNICA

- 4.1.- Mapa de Zonificación Geofísica

CONCLUSIONES

1.- METODOLOGÍA

El estudio de Zonificación Geofísica - Geotécnica para el área urbana de la ciudad de San Antonio se ha realizado con información recolectada en campo y con la aplicación de las metodologías que a continuación se describen:

1.1.- Razones Espectrales H/V

Para la aplicación de esta técnica se obtiene registros de vibración ambiental y se procede a construir las razones espectrales H/V que consiste en obtener el cociente de los espectros de Fourier de las componentes horizontales entre la vertical (Nakamura, 1989), a fin de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones máximas relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio

Estas características son definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas y dinámicas del suelo.

Para aplicar la técnica de cocientes espectrales H/V, se consideran los siguientes pasos:

- ✓ Los registros de vibración ambiental fueron tratados por ventanas de 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de forma aleatoria diversos tramos de señal sin la presencia de ruidos transitorios.
- ✓ Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto.
- ✓ Los espectros horizontales de la señal se dividieron entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promediaron estos para cada punto de observación considerando su respectiva desviación estándar.
- ✓ Se procedió a identificar la frecuencia predominante considerando, un rango de interés que fluctúa entre 0.5 a 20 Hz y picos/rangos con amplificaciones

relativas de al menos 2 veces (se considera la amplitud de “1” como punto de referencia).

En la Figura 1, se muestra un ejemplo de registro de vibración ambiental (SA-047). El procedimiento seguido para el total de la información obtenida en campo. El primer recuadro presenta la selección de las ventanas de procesamiento para las tres componentes de la señal registrada (Vertical, N-S y E-O), seguidamente la curva H/V, en la cual la curva continua negra es el promedio del cociente H/V; mientras que, las curvas discontinuas son la desviación estándar, las bandas grises identifican las frecuencias principales. Finalmente, para la presentación de los resultados, las frecuencias son expresadas en periodos dominantes.

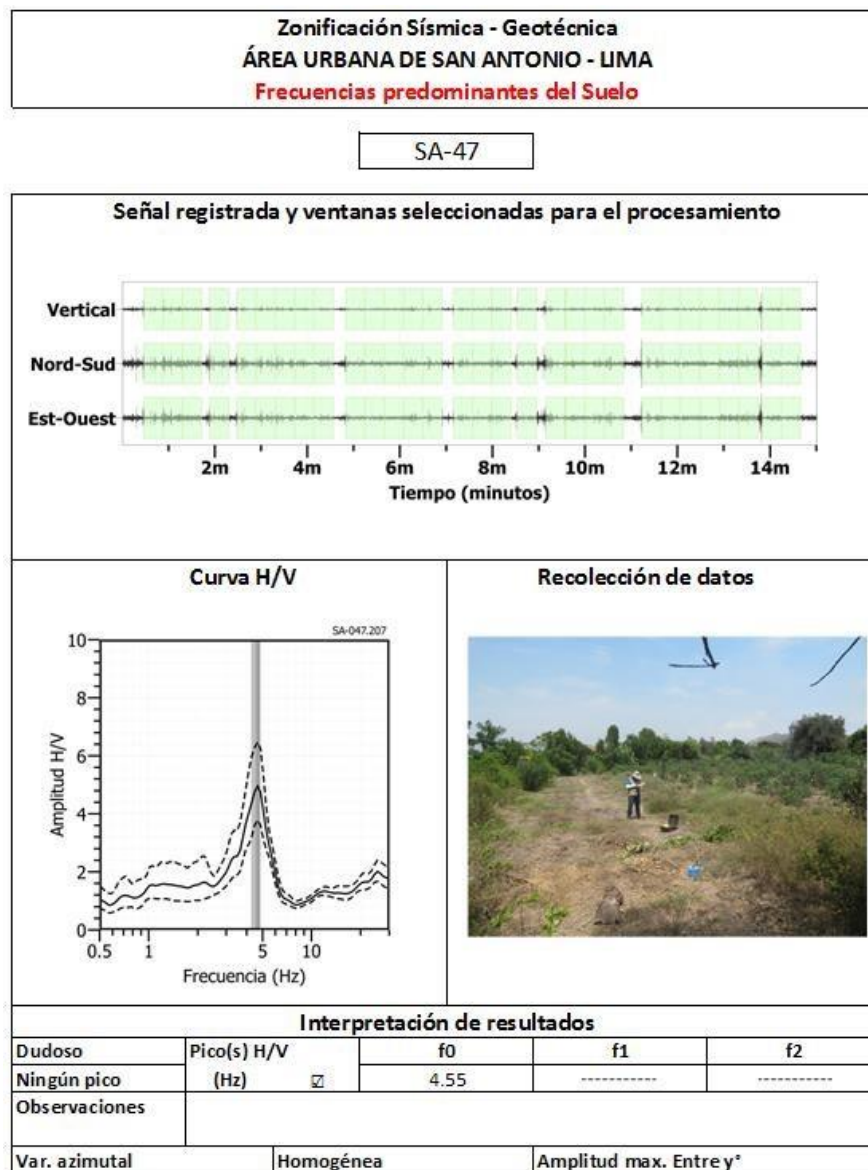


Figura 1: Ejemplo de la ficha H/V para el punto SA-47 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua y Abajo; resultados.

Para la interpretación de los resultados se considera que: 1) Las frecuencias predominantes menores a 1 Hz corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar, y/o cambios meteorológicos (periodos muy largos), 2) Las bajas frecuencias o periodos largos son debidas a la presencia de depósitos profundos y 3) Las frecuencias altas o periodos cortos son debidos a depósitos superficiales blandos y de poco espesor (SESAME, 2004; Bernal, 2006). Asimismo, se evalúa la correspondencia de los parámetros físicos-dinámicos encontrados con los aspectos geológicos, geomorfológicos y geotécnicos que domina a la zona de estudio.

1.2.- Análisis Multicanal de ondas Superficiales (MASW)

La técnica de arreglo lineal MASW es un método indirecto y permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto; es decir, permite conocer la velocidad de propagación de las ondas de Corte Vs en el subsuelo, a partir del análisis de la dispersión de ondas Superficiales (ondas Rayleigh), generados por una fuente de energía impulsiva y registrada por arreglos lineales de estaciones sísmicas, tal como se muestra en la Figura 2.

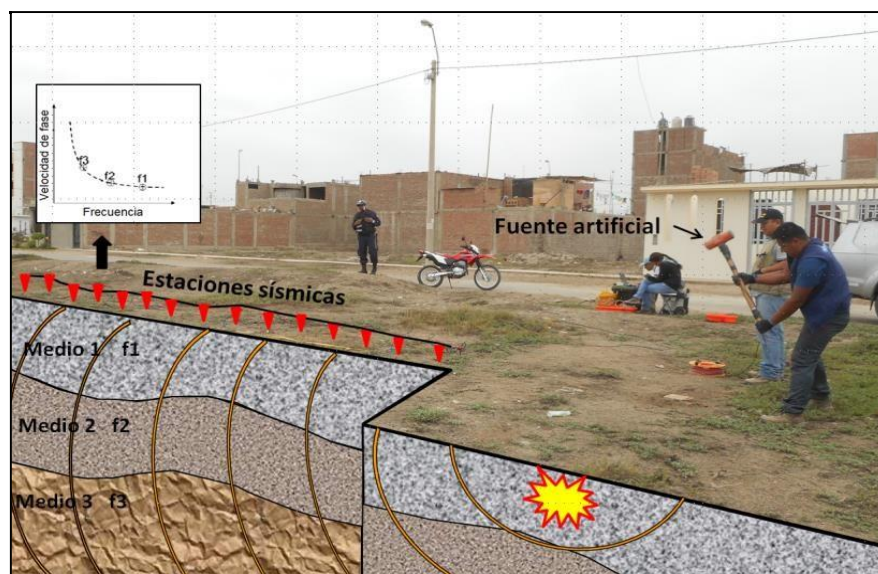


Figura 2: Generación de ondas Rayleigh con fuente artificial y su respectiva curva de dispersión.

El procesamiento de los datos de MASW fue realizado en el programa de computación SeisImager y consiste en aplicar la rápida transformada de Fourier (FFT) en los registros sísmicos obtenidos para cada punto de disparo (Reynolds, 2011), lo cual permite la transformación de los datos en series de tiempo, dando como resultado una imagen de dispersión que relaciona la velocidad de fase de las ondas superficiales con la frecuencia. Una vez obtenidas las curvas de dispersión pertenecientes a un mismo perfil

MASW son sometidas de forma individual a un proceso matemático de inversión con el fin de obtener los perfiles Vs en una dimensión (1D) (Park, 2014; Roma, 2010; Socco et al., 2008).

En la Figura 3, se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos del ensayo ubicado al costado del Hospital regional de Cañete. La imagen de la izquierda muestra la curva de dispersión obtenida y de la derecha, muestra el perfil de velocidad de ondas de corte Vs (línea verde) que considera el promedio final de los perfiles obtenidos post inversión, los círculos de color verde representa la inversión de la curva de dispersión del dominio de frecuencia a profundidad. Esta curva permite verificar el nivel de confiabilidad o la profundidad mínima y máxima de investigación (área sombreada), en este caso; el perfil presenta una capa sísmica y un semiespacio, donde, el nivel de confiabilidad es hasta los 30 metros de profundidad.

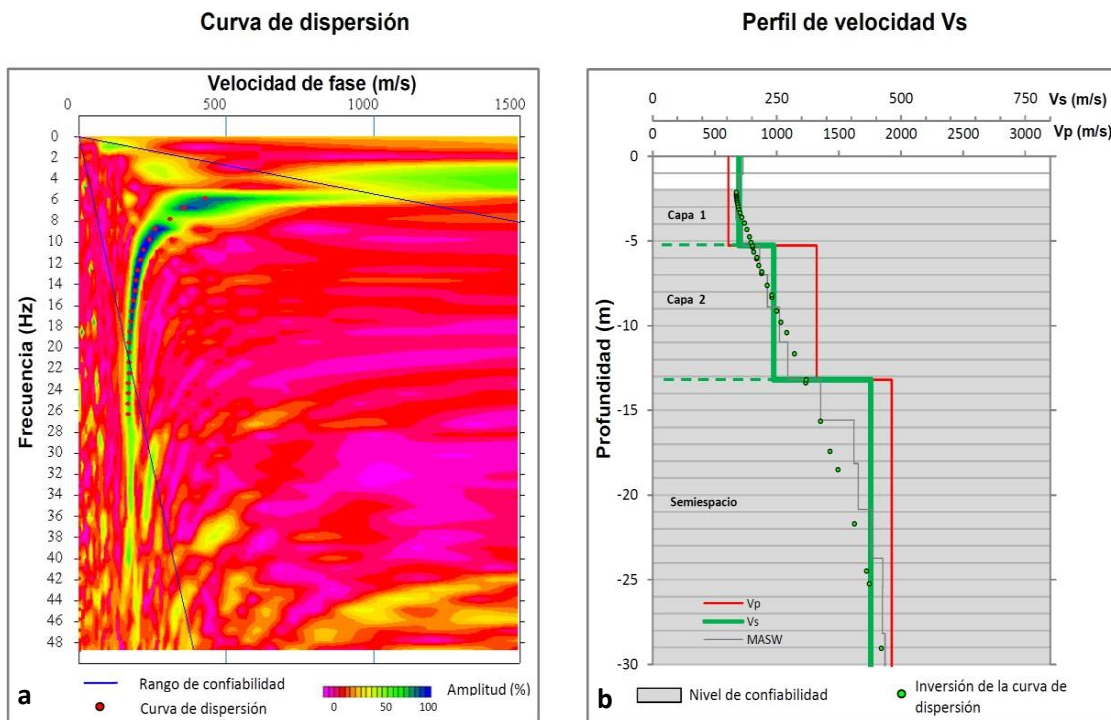


Figura 3: a) Curva de dispersión y b) perfil de velocidad obtenido a partir del ensayo ubicado al costado del Hospital Regional de Cañete.

Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en este ítem se considera la clasificación de suelos según la Norma E.030, que considera la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte para los 30 metros superiores (Vs30), considerando diferentes rangos de Vs30. En este caso, las velocidades de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen según la Tabla 1, para un mayor detalle de la distribución de este parámetro. Asimismo, cada perfil de velocidad es representado con colores, los cuales son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de perfiles de suelo, a partir de la norma E.030.

| Clasificación de los perfiles de Suelo | | | |
|--|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| N° | Vs | Norma E030 | Descripción |
| 1 | < 180 m/s | Suelo blando | Suelo blando |
| 2 | 180 m/s a 350 m/s | Suelo rígido | Suelo medianamente rígido |
| 3 | 350 m/s a 500 m/s | | Suelo rígido |
| 4 | 500 m/s a 800 m/s | Roca o suelo muy rígido | Suelo muy rígido o roca blanda |
| 5 | 800 m/s a 1500 m/s | | Roca moderadamente dura |
| 6 | > 1500 m/s | Roca dura | Roca dura |

Finalmente, se realiza la correlación de las capas sísmicas obtenidas con la geología de la zona de estudio. Asimismo, la relación de algunos sectores con el contenido de humedad o nivel freático, parámetros que influyen en la variación de velocidad de ondas Vs.

1.3.- Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

La tomografía eléctrica permite obtener información sobre las propiedades físicas del subsuelo mediante la evaluación del parámetro de resistividad al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad permite conocer la resistividad del subsuelo asociado a la presencia de capas y superficies con mayor o menor contenido de agua, sales disueltas presentes en las fracturas de las rocas y en la porosidad del suelo.

La tomografía eléctrica es un método convencional que se basan en introducir en el terreno, un campo eléctrico de corriente continua mediante dos electrodos de corriente (A y B) conectados a un miliamperímetro, mientras que con los otros dos electrodos (M y N), que están conectados a un milivoltímetro donde se medirá cual es la diferencia de potencial eléctrica ΔV entre esos dos puntos, Para este estudio se realizó el dispositivo polo-dipolo (Figura 4).

Para el análisis de la información obtenida en campo se ha procedido con su calificación en función de la diferencia del potencial con relación al valor de Intensidad de corriente en cada punto de lectura y en conjunto. Este procedimiento permite eliminar la posible influencia de corrientes externas que afecten los valores de resistividad aparente. El procesamiento de los datos (I: intensidad de corriente, Vp: diferencia de potencia y K: constante geométrica del dispositivo), permite conocer los valores de Resistividad y su configuración en el subsuelo, incluyendo la corrección por topografía.

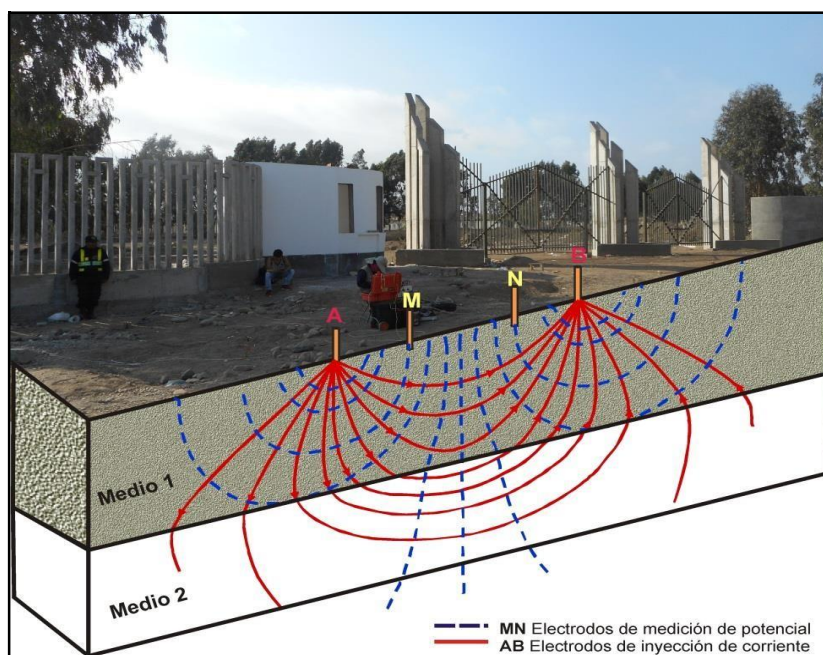


Figura 4: Principio del método de resistividad (LE07-SA), modificado de Orellana E. (1982).

Finalmente, los resultados son presentados mediante Sección de Resistividad 2D (Resistividad) que relacionan la distancia - profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo y secciones de interpretación donde se detallan las posibles estructuras que conforman el subsuelo, las zonas saturadas, los cambios de litología que pudiera existir y otras estructuras que sean de utilidad para el cliente o interesado del estudio.

La Interpretación de la información considera todos los factores posibles que puedan influir en los resultados; es decir, grado de saturación del terreno, porosidad y la forma del poro, la salinidad del fluido, el tipo y composición de la roca, la temperatura, los procesos geológicos que afectan a los materiales y la presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico. Considerando la existencia de una estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, es posible definir la posible ubicación de las áreas de filtración y las zonas saturadas en el subsuelo. De existir incrementos de fluidos en el terreno estos se verán reflejados por una disminución en valores de resistividad.

En este estudio se considera 5 rangos de resistividad (Muy alto resistivo, Alto resistivo, resistivo, medianamente resistivo, bajo resistivo y muy bajo resistivos), los cuales presentan las siguientes características:

- Muy Alto Resistivo (color rojo): Comprende valores mayores a 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a rocas ígneas y metamórficas, y dentro de las sedimentarias, a los conglomerados. Un factor importante a señalar es que estos materiales estarán bajo condiciones de ausencia de agua; sin embargo, si hay presencia de arcilla, su grado de alteración permitiría la disminución en los valores de resistividad del suelo.

- Alto Resistivo (color anaranjado): Comprende valores entre los 500 y 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a las rocas sedimentarias, ya sean de origen detrítico o químico. Asimismo, incluye a los suelos con muy baja composición de materiales orgánicos.

- Medianamente Resistivo (color verde): Comprende valores entre los 100 y 500 ohm.m. Dentro de este grupo se considera a suelos sedimentarios de composición variada; es decir, arenas, arcillas y limos, cada vez con mayor contenido de materiales orgánicos.

- Bajo Resistivo (color celeste): Comprende valores entre los 20 y 100 ohm.m. Según Loke (2001), estas resistividades corresponden a suelos saturados de agua y su variación depende de la relación existente entre la resistividad, porosidad y la permeabilidad de los materiales. Asimismo, se puede considerar dentro de este grupo a los suelos orgánicos, arcillosos, limosos y aquellos con contenido de carbón, los cuales se comportan como buenos conductores de corriente.

- Muy Bajo Resistivo (color azul): Comprende valores menores a 20 ohm.m. y estos están referidos a suelos con presencia de agua, material orgánico, arcillas. Se debe considerar que el grado de salinidad del agua afecta los valores de resistividad, permitiendo que estos alcancen valores del orden del 0.2 ohm.m., equivalente al agua de mar.

Para el presente estudio se han resumido el rango de resistividades en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2: Rango de Resistividades

| Rango de resistividades | ohm.m | Tipo de suelo | |
|--|--------------|----------------------|------------|
| Material muy alto resistivo | > 1500 | Más competente | Red |
| Material alto resistivo | 500 a 1500 | | Yellow |
| Material resistivo o resistividad moderada | 100 a 500 | | Green |
| Material bajo resistivo | 20 a 100 | | Light Blue |
| Material muy bajo resistivo | < 20 | Blandos / saturados | Dark Blue |

Dado la estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, esto permitirá definir la posible ubicación de las áreas de filtración y las zonas saturadas del subsuelo. En tal sentido, se puede decir que al haber incrementos de fluidos en el terreno estos se verán reflejados por una disminución en valores de resistividad.

2.- RECOLECCIÓN DE DATOS

En este estudio se ha realizado la aplicación de métodos sísmicos y geofísicos, para lo cual se han utilizado diferentes tipos de registros y arreglos. Para aplicar la técnica de razones espectrales (H/V) se utiliza registros de vibración ambiental, mediante los arreglos sísmicos lineales (MASW) se obtiene registros sísmicos y los métodos eléctricos (ERT) los valores de resistividad del suelo. A continuación, se describe brevemente la toma de datos.

Para la obtención de los registros de vibración ambiental se utiliza el equipo sísmico compuesto por un registrador tipo CityShark y sensores de tres componentes de registro tipo Lennartz (Figura 5).



Figura 5: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales en San Antonio: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark II

En el área urbana de la ciudad de San Antonio, se consideró registros de vibración ambiental obtenidos de manera puntual en 92 puntos, distribuidos según la Figura 6, a fin de aplicar la técnica de razones espectrales. La distribución de los puntos donde se tomaron los registros de vibraciones ambientales, se define sobre el mapa catastral de San Antonio, teniendo en cuenta la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio. En cada punto, se registran datos por un periodo de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de información para su posterior análisis.

En la Figura 7, se muestra la disposición del equipo sísmico al momento del registro de información, además de ejemplos de señales de vibración ambiental. La señal registrada en el punto SA-62 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en SA-88, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud, que al momento de su análisis fueron filtrados, a fin de no alterar los resultados.

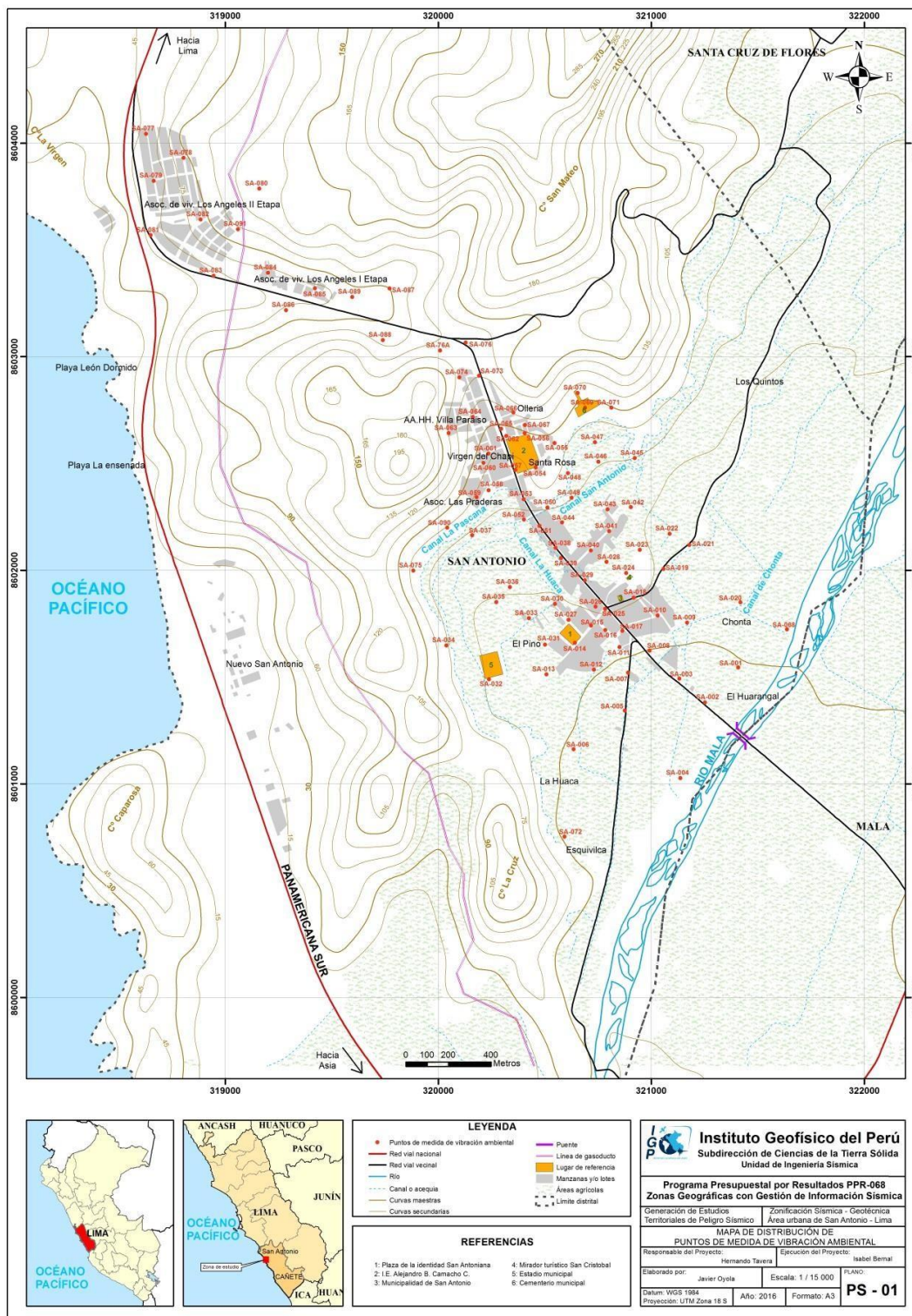


Figura 6: Mapa catastral del área urbana de San Antonio y la distribución de puntos donde se tomaron los registros de vibración ambiental.

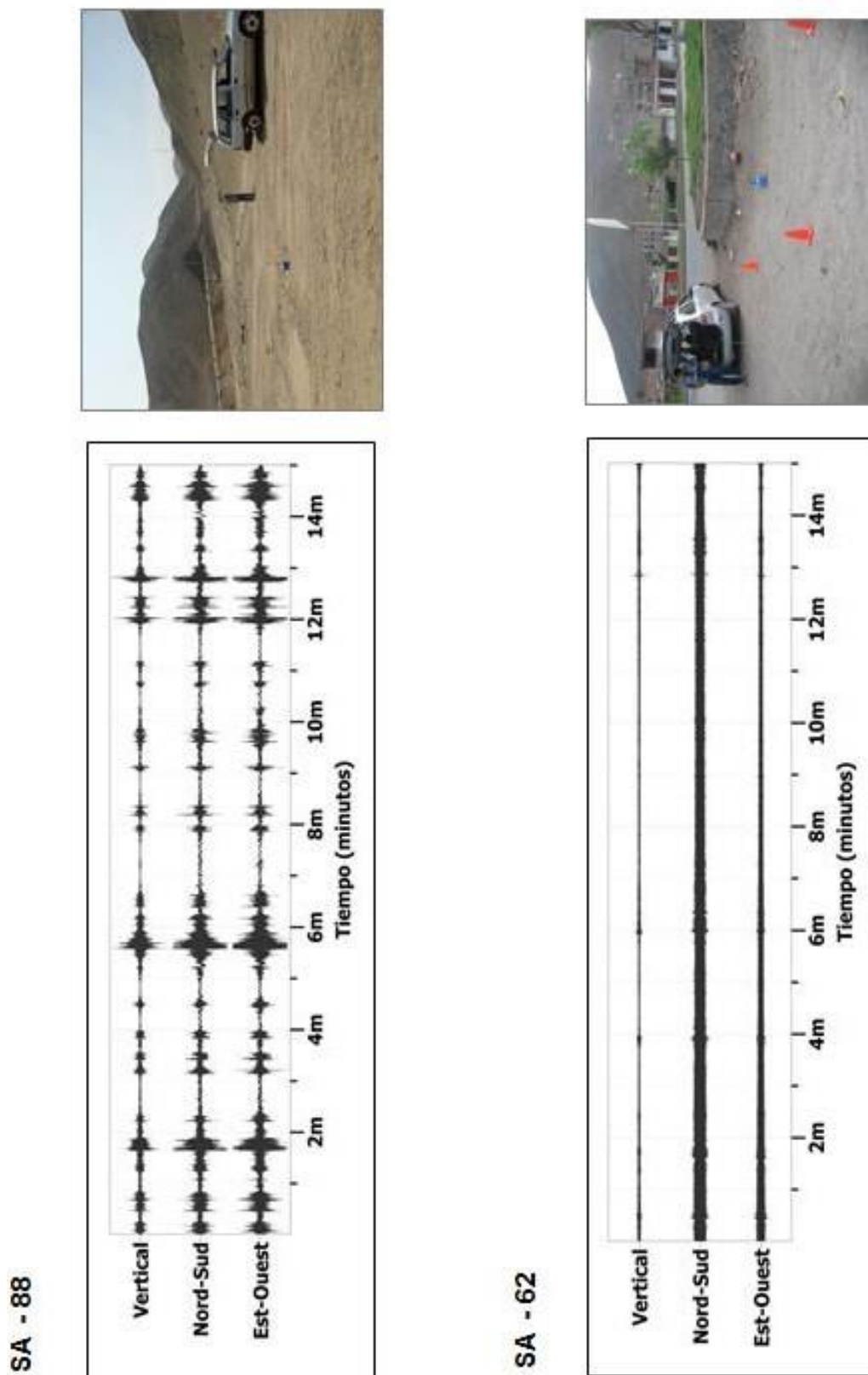


Figura 7: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales y de registros de vibración ambiental, obtenidos sobre una zona con ruido transitorio ((SA-88) y otro con ruido de fondo constante (SA-62).

En la ciudad de San Antonio se realizaron 10 arreglos sísmicos MASW cuyas coordenadas se muestra en la Tabla 3 y Figura 8, su distribución espacial codificadas como: LS01-SA, , LS10-SA.

Tabla 3: Coordenadas y características de las Líneas Sísmicas.

| Línea Sísmica | Este (m) | Norte (m) | Cota (m) | Espaciamiento entre geófonos (m) | Longitud total (m) |
|---------------|----------|-----------|----------|----------------------------------|--------------------|
| LS01-SA | 321558 | 8601501 | 50 | 4 | 92 |
| | 321503 | 8601427 | 49 | | |
| LS02-SA | 320532 | 8601528 | 64 | 4 | 92 |
| | 320597 | 8601593 | 65 | | |
| LS03-SA | 320905 | 8601613 | 44 | 4 | 92 |
| | 320897 | 8601519 | 43 | | |
| LS04-SA | 321209 | 8601766 | 49 | 4 | 92 |
| | 321296 | 8601798 | 49 | | |
| LS05-SA | 320550 | 8602309 | 69 | 4 | 92 |
| | 320466 | 8602267 | 69 | | |
| LS06-SA | 320027 | 8602160 | 69 | 4 | 92 |
| | 320106 | 8602214 | 71 | | |
| LS07-SA | 320187 | 8602752 | 113 | 3 | 69 |
| | 320208 | 8602689 | 110 | | |
| LS08-SA | 320874 | 8602044 | 66 | 3.5 | 80.5 |
| | 320821 | 8602107 | 66 | | |
| LS09-SA | 319352 | 8603353 | 75 | 4 | 92 |
| | 319436 | 8603321 | 78 | | |
| LS10-SA | 318970 | 8603509 | 94 | 4 | 92 |
| | 318899 | 8603568 | 96 | | |

Para el registro de información se utilizó un equipo sísmico (sismógrafo) de uso multipropósito, modelo GEODE de Geometrics, 24 sensores o geófonos de baja frecuencia (4.5 Hz). Como fuente de impacto y/o energía para generar las ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs y para dar inicio a la grabación el dispositivo Hammer Swith (Figura 9). Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido, espaciamiento entre geófonos, fue variable ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio. La frecuencia de muestreo fue de 4000 Hz (0.25 ms) con un pre-trigger de -0.1s y una longitud de registro de 2 segundos.

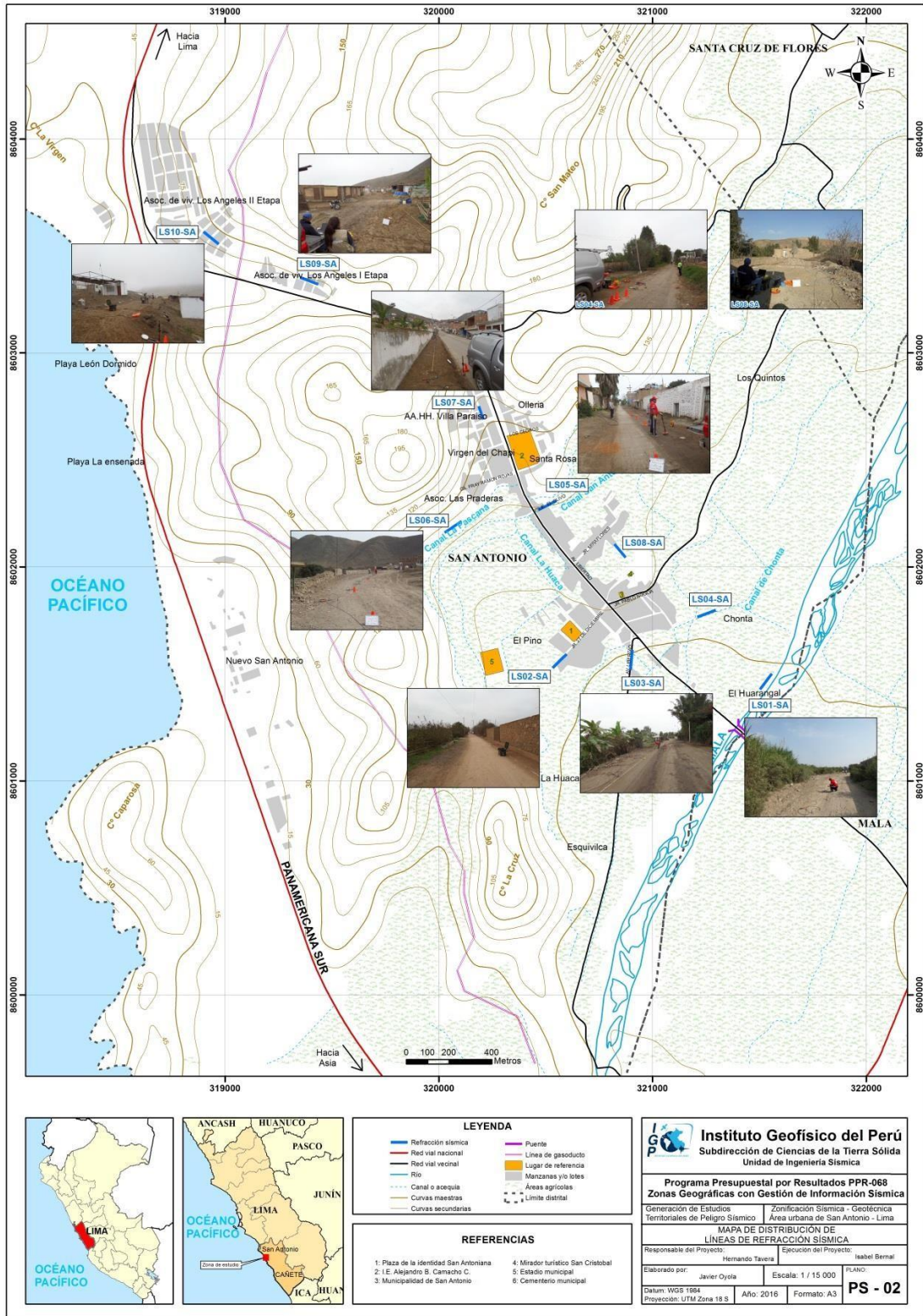


Figura 8: Mapa del área de estudio con la distribución espacial de las líneas sísmicas codificadas como: LS01-SA, ..., LS10-SA.



Figura 9: Equipos utilizados en la toma de datos de MASW realizado en el Jirón Daniel A. Carrión.

La profundidad máxima de investigación depende de la geometría del tendido, espaciamiento entre geófonos y la fuente activa, pudiendo variar entre los 10-30 m, según las características litológicas de los suelos y el espacio para realizar los arreglos considerando que se trabaja en zonas urbanas.

Durante la adquisición de datos se visualiza los sismogramas, a fin de verificar su calidad y el nivel de ruido registrado (Figura 10), para mejorar la relación señal/ruido fue necesario realizar apilamientos de señales (sumatoria de registros sísmicos), realizando de cuatro a cinco golpes en cada punto "shot". Finalmente se realiza el procesamiento preliminar para determinar si la profundidad y la velocidad sísmica obtenida tienen sentido geológico y completan la finalidad del estudio.

En la Figura 11, como ejemplo se muestra la disposición del equipo y el registro sísmico obtenido para la línea sísmica LS02-SA, ubicada próximo a la Plaza de Armas de San Antonio. El sismograma contiene las señales sísmicas con presencia de bajo ruido ambiental, registrados por sensores ubicados a lo largo de la línea y cuyo punto de disparo se encuentra a una distancia de 6 metros al final de la línea sísmica.

En el área urbana y de expansión de la ciudad de San Antonio, se han realizado 07 líneas de tomografía eléctrica (Figura 12) con el dispositivo polo-dipolo y la distribución de 30 electrodos. Para las líneas se consideró un espaciamiento de 10 metros entre cada electrodo sobre un tendido longitudinal que varían en algunos perfiles de 290 metros, 270 metros, 260 metros y 210 metros lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de los 39 metros.

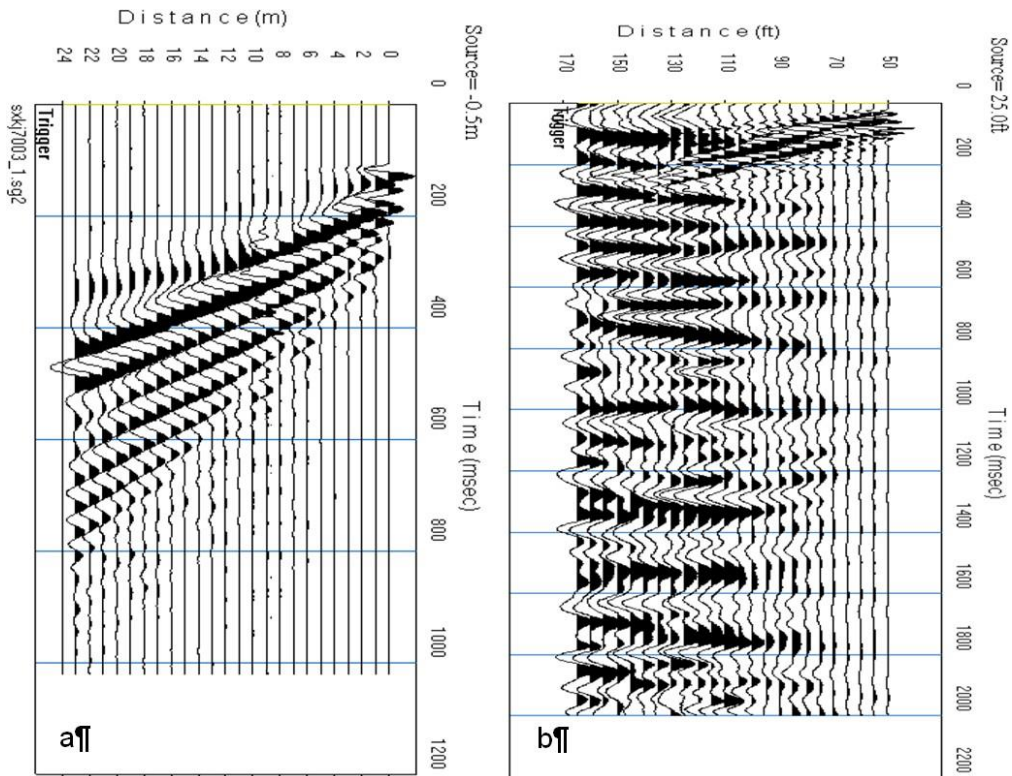


Figura 10: a) Registro sísmico con bajo contenido de ruido ambiental, es decir, alta calidad. b) Registro sísmico con alto contenido de ruido ambiental.

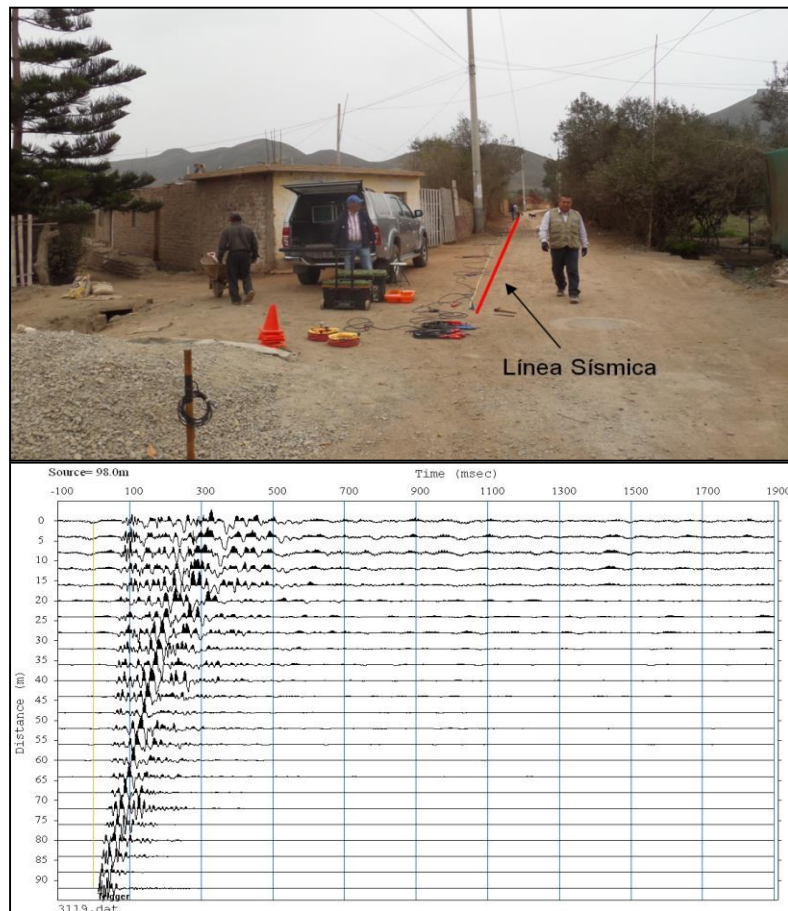


Figura 11: Disposición del equipo de adquisición por el método de MASW y el registro sísmico obtenido.

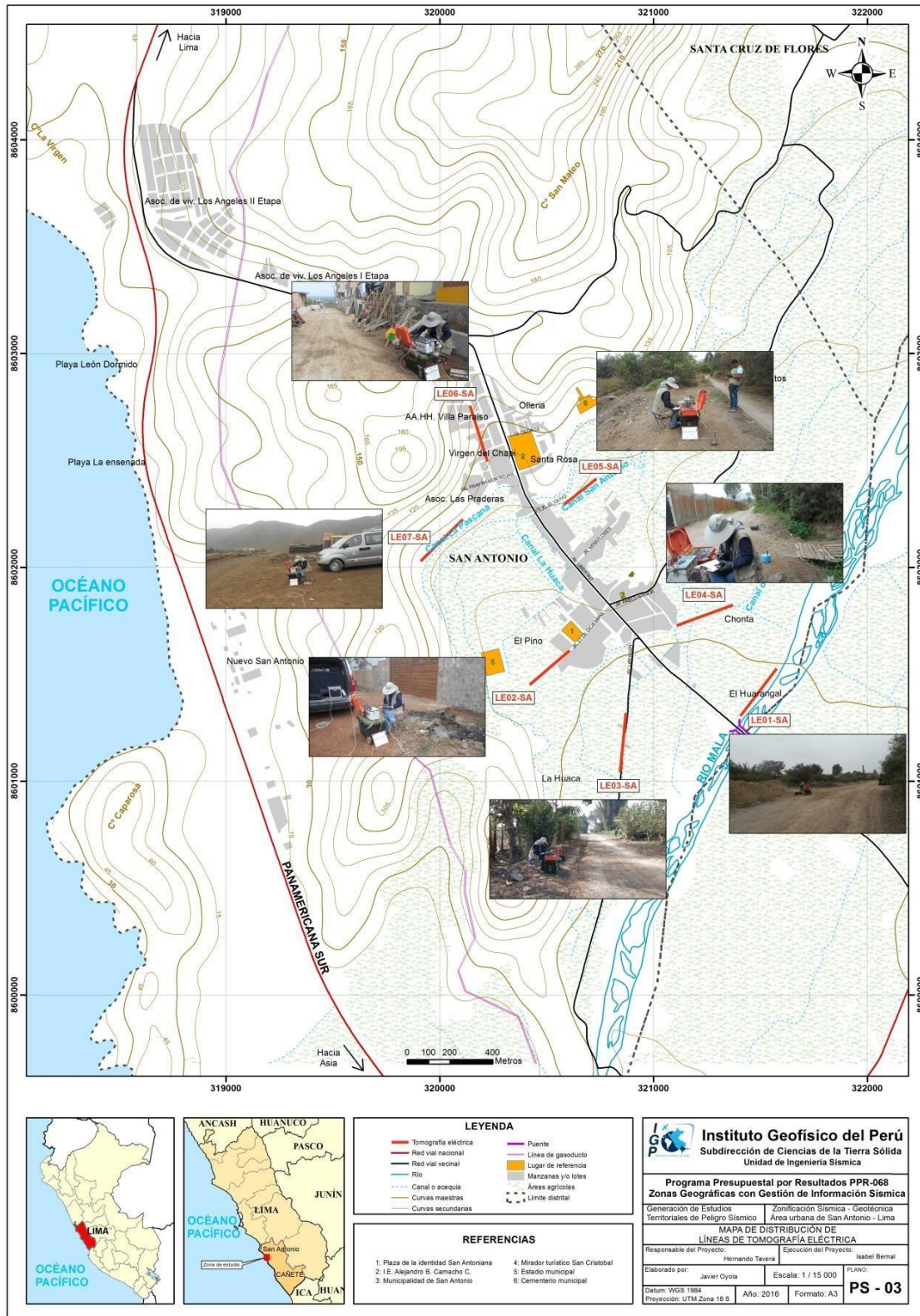


Figura 12: Mapa del área urbana de San Antonio y la distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica codificadas como: LE01-SA, ..., LE07-SA.

La Tabla 4, muestra las coordenadas UTM (WGS84) que corresponden a los puntos extremos de las líneas eléctricas.

Tabla 4: Coordenadas de las Líneas eléctricas (LE) realizadas en la ciudad de San Antonio.

| Línea Eléctrica | Este (m) | Norte (m) | Cota (m) | Espaciamiento entre electrodos (m) | Longitud total (m) |
|-----------------|----------|-----------|----------|------------------------------------|--------------------|
| LE01-SA | 321576 | 8601527 | 46 | 10 | 290 |
| | 321406 | 8601305 | 43 | | |
| LE02-SA | 320607 | 8601611 | 53 | 10 | 260 |
| | 320420 | 8601451 | 48 | | |
| LE03-SA | 320871 | 8601319 | 40 | 10 | 290 |
| | 320843 | 8601040 | 38 | | |
| LE04-SA | 321371 | 8601824 | 45 | 10 | 290 |
| | 321108 | 8601728 | 44 | | |
| LE05-SA | 320733 | 8602415 | 73 | 10 | 210 |
| | 320579 | 8602291 | 70 | | |
| LE06-SA | 320141 | 8602757 | 115 | 10 | 270 |
| | 320223 | 8602495 | 81 | | |
| LE07-SA | 320108 | 8602224 | 81 | 10 | 290 |
| | 319911 | 8602029 | 76 | | |

La calidad de la señal eléctrica en cada registro fue evaluada mediante un test de resistencia de contacto entre los electros y el terreno, garantizando de este modo, la obtención de datos confiables para el procesamiento. Se busca mejorar las imágenes con el uso de filtros que disminuyen los efectos de borde, medidas negativas de resistividad aparente y la obtención de dos ciclos de registro por cada punto de medida de resistividad. Este hecho permitió evaluar la fiabilidad de los datos mediante la comparativa de dos valores de resistividad, siendo los más fiables aquellos con menores diferencias. Se consideran los siguientes criterios:

- ✓ La diferencia de potencial registrada debe ser mayor a 0.2 mV
- ✓ La relación entre el potencial registrado y la intensidad de corriente (V/I) debe ser mayor o igual a $5 \times 10^{-4} \Omega$.
- ✓ La diferencia de resistividad entre los dos ciclos de medida realizados en cada punto de registro debe ser inferior al 3%.
- ✓ La resistividad mínima y máxima aparente ha de estar entre 1 y 100 000 Ω m.

Para el procesamiento de la información recolectada se ha hecho uso de los algoritmos de inversión DCIP2D y OASIS MONTAJ. En la Figura 13, se tienen la disposición de equipo eléctrico en campo y un ejemplo del análisis preliminar del registro obtenido.

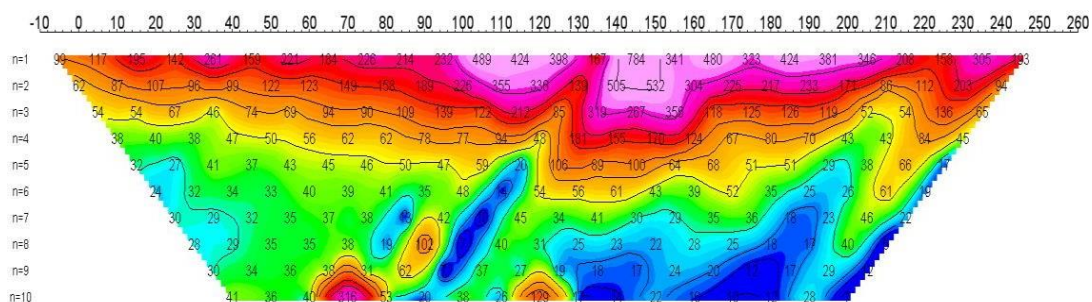


Figura 13: Disposición del equipo de adquisición por la técnica de ERT (LE02-SA) y el registro eléctrico obtenido en campo.

3.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

En este estudio se ha realizado la aplicación de los siguientes métodos sísmicos y geofísicos: razones espectrales (H/V), arreglos sísmicos lineales (MASW) y métodos eléctricos (ERT). Todos tienen como principal objetivo conocer las propiedades físicas y dinámicas del subsuelo (periodos dominantes, velocidades sísmicas, resistividades del subsuelo, etc.). A continuación, se describe el desarrollo de estos métodos y los principales resultados obtenidos en cada caso para el área urbana de San Antonio.

3.1.- Estudio Sísmico con la Técnica de H/V

Esta información permite obtener espectros de Fourier para las tres componentes de registro de vibración ambiental obtenidos de manera puntual en 92 puntos (Figura 6) y a partir de la razón de estos (componentes horizontales/componente vertical), conocer las frecuencias predominantes y/o periodos dominantes de vibración natural del suelo y en algunos casos, la amplificación sísmica relativa para cada punto.

- **Distribución de frecuencias predominantes:** A partir de los valores extraídos de las razones espectrales H/V, se obtiene mapas con la distribución espacial de los valores de frecuencias predominantes (Figura 14). Los resultados obtenidos de las razones espectrales H/V, permite definir un único pico de frecuencia que fluctúan principalmente entre 2.0 y 7.0 Hz, excepto en puntos ubicados próximos al río Mala que tiende a responder en bandas de frecuencia de entre 1.5-5.5Hz. En toda el área de estudio, estos valores se distribuyen de manera uniforme, y conforme se tienden hacia el extremo norte las frecuencias tienden a valores mayores con mínimas amplificaciones, a diferencia de lo observado en el centro de San Antonio que presentan amplificaciones de hasta 6 veces.

- **Frecuencia predominante F_0 :** En la Figura 15, se muestra los ejemplos de razones espectrales ubicados en la zona céntrica del área de estudio. En los puntos SA-07(C), SA-14(D) y SA-36(F), ubicadas próximos a la plaza central de San Antonio, predominan frecuencias a 2.6, 2.2 y 2.8 Hz con amplificaciones de hasta 6 veces. De manera similar en los puntos SA-17(E), SA-40(H) y SA-51(I), ubicados en la zona central del área urbana, a lo largo de la carretera principal que cruza San Antonio de N- S, predominan las frecuencias a 3.8 y 3.4 Hz con amplificaciones máximas relativas de hasta 5 veces. En el extremo SO de la zona céntrica, se observa un ligero incremento de los valores de frecuencias, pero con similares amplificaciones.

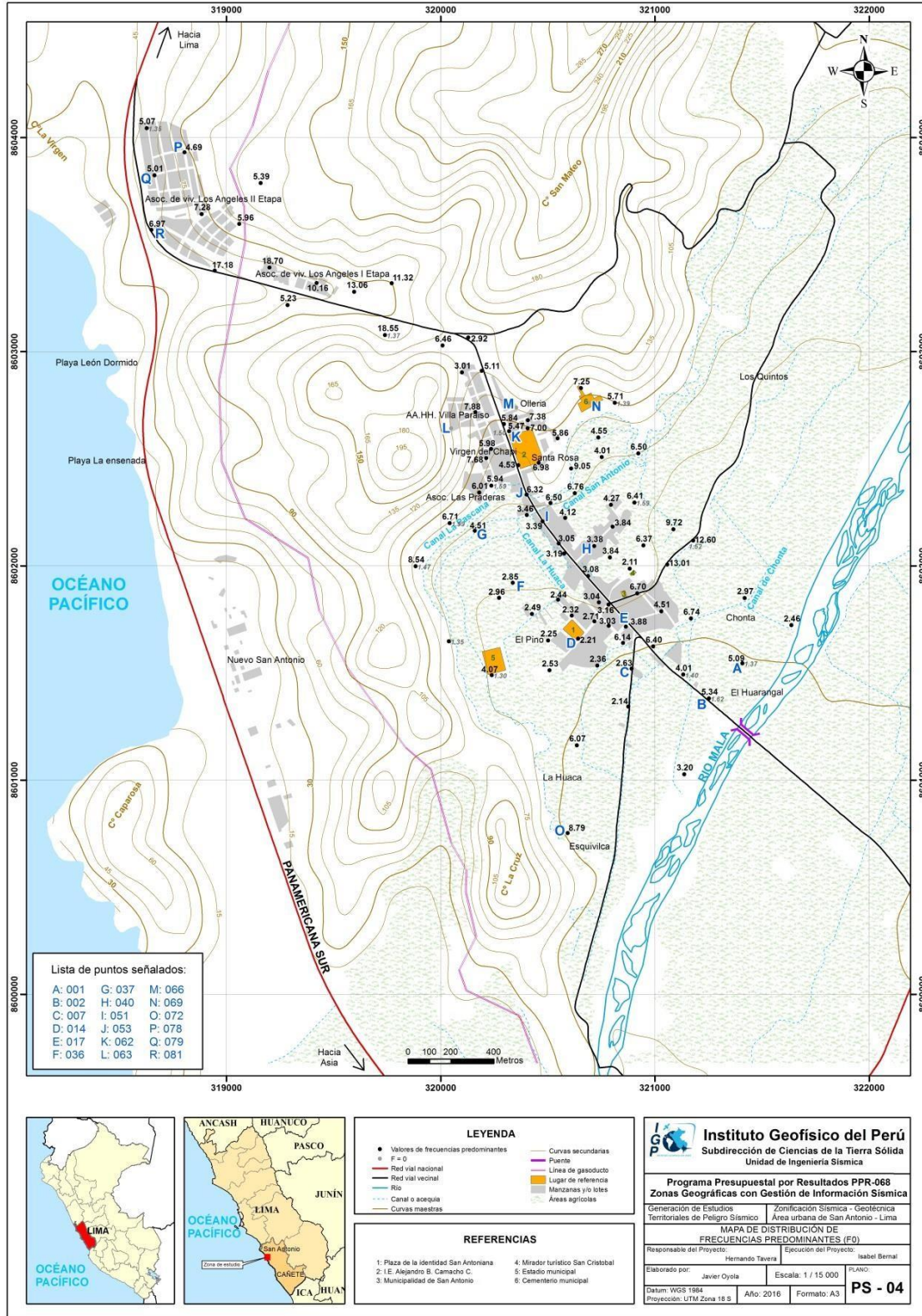
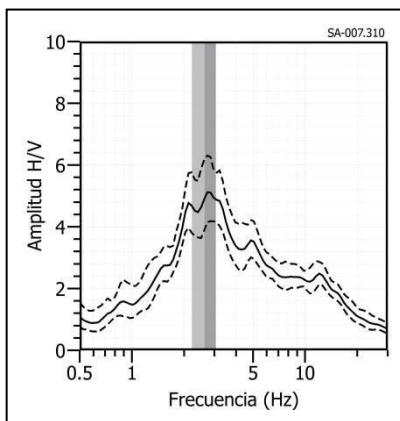
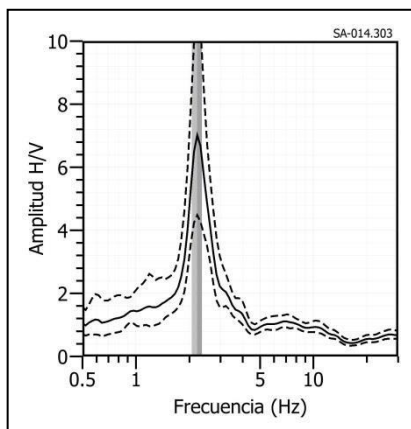


Figura14: Mapa de la ciudad de San Antonio con la distribución espacial de las frecuencias predominantes. Las letras indican la ubicación de los gráficos que se están considerando en la Figura 15 como característicos de este rango.

SA - 07



SA - 14



SA - 36

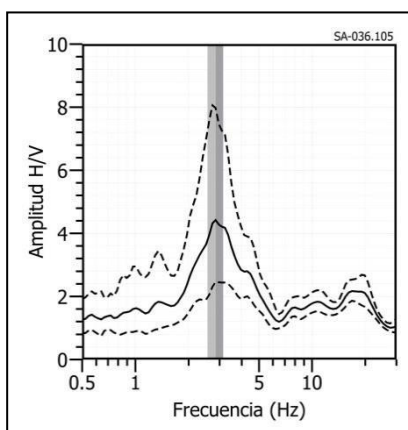
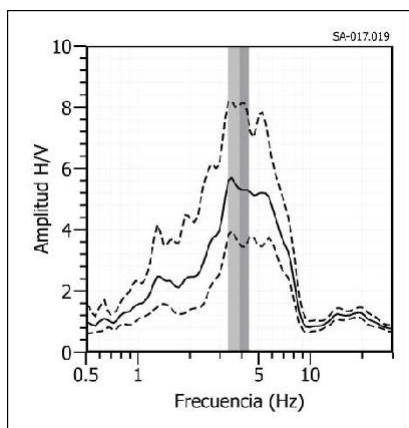
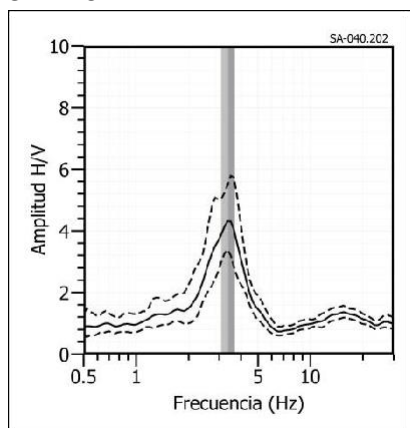


Figura 15: Ejemplos de razones espectrales (H/V). Puntos SA-07(C), SA-14(D) y SA-36(F), ubicados próximos a la plaza central de San Antonio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante

SA - 17



SA - 40



SA - 51

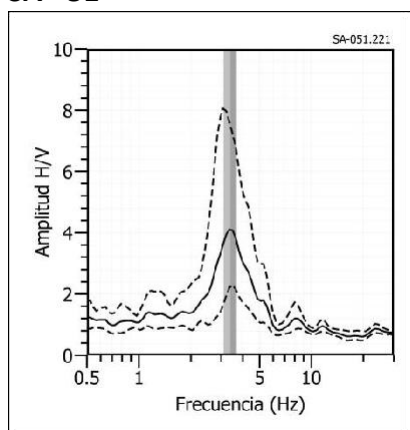
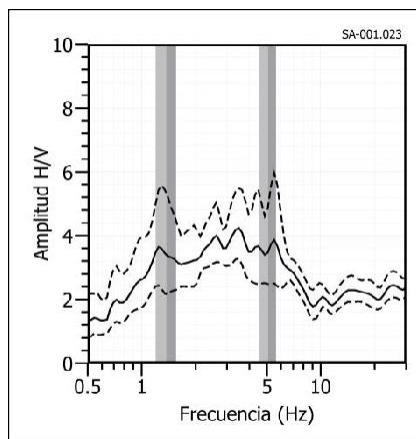
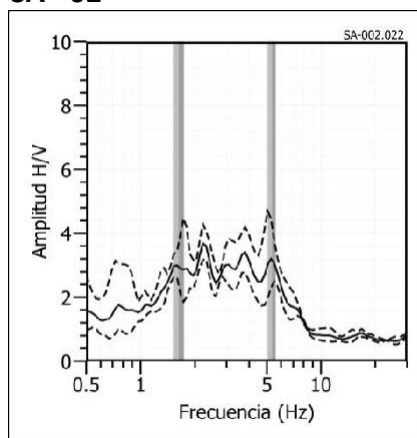


Figura 15: ... Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V). Puntos SA-17(E), SA-40 (H) y SA-51(I), a lo largo de carretera principal que cruza a San Antonio de N-S. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SA - 01



SA - 02



SA - 72

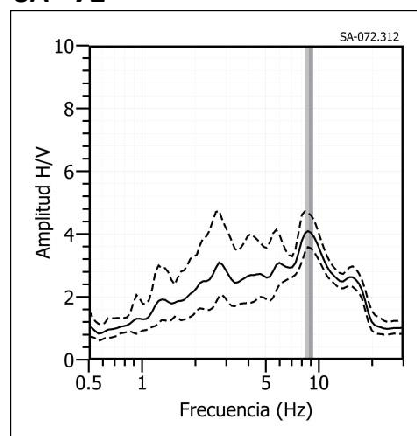
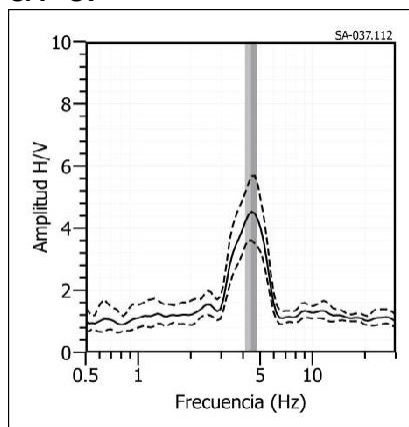
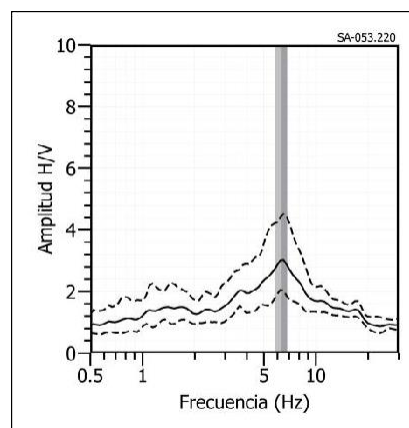


Figura 15:... Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V). Puntos SA-01(A), SA-02(B) y SA-72(O), ubicados próximos al río Mala y el último cerca al cerro la cruz. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SA - 37



SA - 53



SA - 62

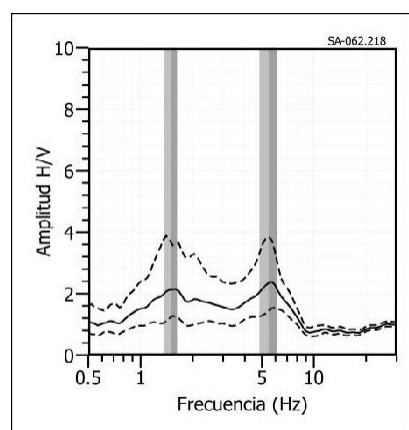
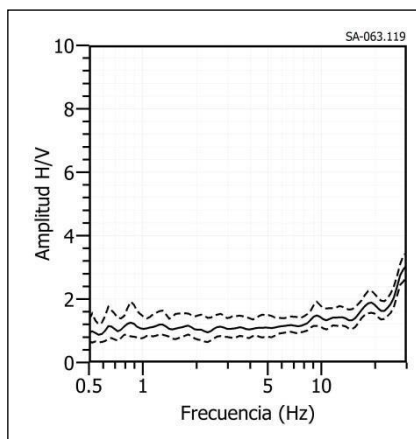
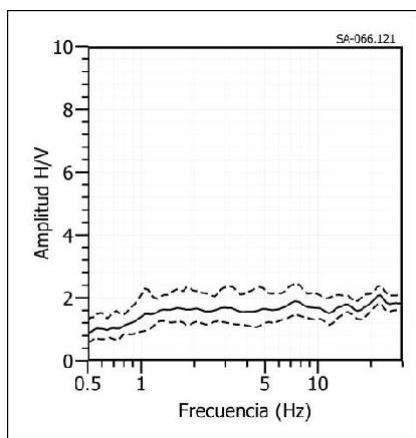


Figura 15: ... Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V). Puntos SA-37(G), SA-53(J) y SA-62(K), en la asociación Las Praderas y el último punto próximo a la institución educativa Alejandro B. Camacho. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SA - 63



SA - 66



SA - 69

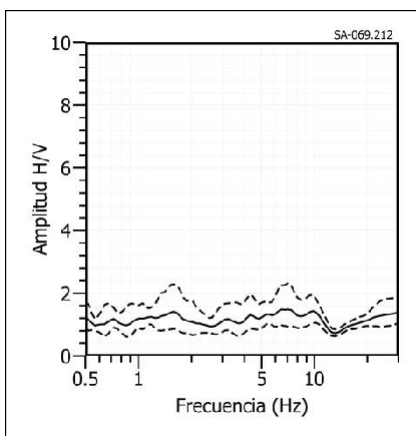
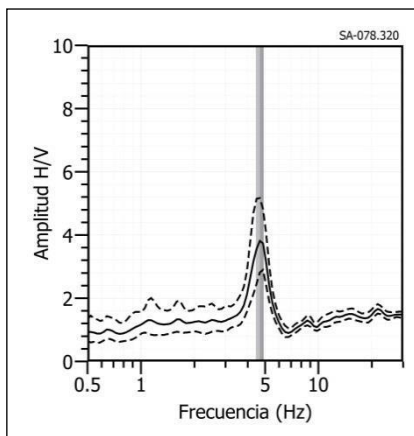
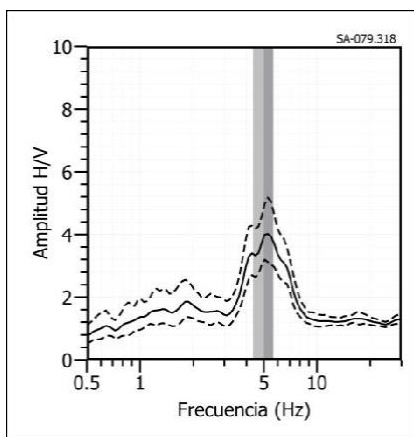


Figura 15: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V). Puntos SA-63(L), SA-66(M) y SA-69(N), al extremo Norte del área de estudio en los AA.HH. Villa Paraíso y Ollería. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SA - 78



SA - 79



SA - 81

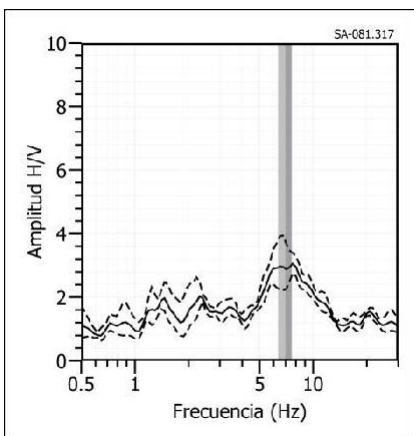


Figura 15: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V). Para los puntos SA-78(P), SA-79(Q) y SA-81(R), en la asociación de vivienda Los Ángeles II Etapa. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

Hacia el extremo SE del área de estudio, próximos al río Mala se considera como representativos a los puntos SA-01(A), SA-02(B) y SA-72(O), donde predominan bandas de frecuencia que fluctúan entre 1.5 a 5.0 Hz, con tendencia a valores mayores de frecuencia y amplificaciones de hasta 4 veces. A diferencia de lo observado en los puntos SA-37(G), SA-53(J) y SA-62(K) ubicados hacia el extremo NO, entre el Canal San Antonio y la Urb. Santa Rosa, donde predomina un pico de frecuencia bien definido a 4.5 y 6.3 en los dos primeros puntos, con amplificaciones máximas relativas de hasta 4 veces. En el punto SA-62(K) ubicado próximo a la IE Alejandro B. Camacho, sobresalen dos picos a 1.5 y 5.5 Hz con mínimas amplificaciones.

Los puntos SA-63(L), SA-66(M) y SA-69(N), ubicados hacia el extremo Norte del área de estudio en los AA.HH. Villa Paraíso y Ollería, no sobresale ningún rango de frecuencia, sugiriendo que los suelos son compactos de toda el área urbana de San Antonio.

Hacia el extremo NO, a más de 1 km de distancia de la zona céntrica de San Antonio, se ubica la Asoc de Vivienda Los Ángeles II Etapa donde se tomaron datos de manera dispersa. En esta zona se consideraron los puntos SA-78(P), SA-79(Q) y SA-81(R), donde predominan las frecuencias a 4.7, 5.0 y 7.0 Hz respectivamente con amplificaciones de hasta 4 veces, evidenciando la presencia de una capa sedimentaria de poco espesor que predomina en este sector.

Interpretación

El análisis de razones espectrales H/V para la ciudad de San Antonio, ha permitido observar un pico de frecuencia bien definido que fluctúa entre 2.0 y 7.0 Hz, distribuidos de manera uniforme sobre toda el área de estudio. Las mayores amplificaciones se encuentran en la zona céntrica de San Antonio y conforme se tiende hacia el extremo NO del área de estudio esta disminuye, alcanzando mínimas amplificaciones en los AA.HH. Villa el Paraíso y Ollerías.

Hacia el río Mala los suelos muestran mayor complejidad porque responden en bandas de frecuencia, con amplificaciones de hasta 4 veces.

3.2.- Estudio Sísmico con la Técnica de MASW

Los modelos de velocidad de propagación (V_s) son una información muy útil en materia de riesgo por sismos y reconocimiento general de la estructura y naturaleza del subsuelo. El procesamiento permitió llegar hasta profundidades de 30 metros en cada línea sísmica. Posicionados: las líneas LS01, y LS04 al sureste, LS02, LS03 y LS05 a LS08 en la zona urbana central y LS09 y LS10 al noroeste del área de estudio (Figura 8). A continuación, se describe los resultados obtenidos, para cada línea, agrupadas según sus valores de velocidad V_s en el perfil sísmico y ubicación geográfica:

Líneas sísmicas LS01-SA, LS04-SA, LS05-SA y LS10-SA: Realizados en el sector de la Chonta (LS04), el Huarangal (LS01), en la Asoc. Los Ángeles II Etapa (LS10) y en el pasaje el Olivo (LS05). Los resultados indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 4 a 9 metros de espesor y velocidades V_s entre 242 a 337 m/s que sugieren la presencia de suelos moderadamente blandos; la segunda capa de 10 a 14 metros de espesor, con velocidades V_s de 393 a 496 m/s y que corresponden a suelos rígidos. La superficie de contacto con el semi-espacio, presenta velocidades $V_s > 580$ m/s que sugiere suelos muy rígidos.

Línea sísmica LS02-SA: Realizado en el jirón 27 de diciembre e indica la presencia de suelos conformados por una capa de 7 metros de espesor y velocidades V_s de 335 m/s que sugieren la presencia de suelos medianamente rígidos. La superficie de contacto con el semi-espacio presenta velocidades $V_s > 427$ m/s que sugiere a suelo duro.

Líneas sísmicas LS06-SA y LS07-SA: Realizadas en la Asoc. Las Praderas (LS06) y en el A.H. Villa Paraíso (LS07), indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 5 a 9 metros de espesor y velocidades V_s entre 379 a 494 m/s que sugiere suelos rígidos. La segunda capa de 10 a 12 metros de espesor con velocidades V_s de 537 a 715 m/s; considerados como suelos muy rígidos. La superficie de contacto con el semi-espacio presenta velocidades $V_s > 826$ m/s, lo cual sugiere a roca moderadamente dura.

Líneas sísmicas LS03-SA y LS08-SA: Realizado en la Av. Libertad (LS03) y cerca al Mirador Turístico San Cristóbal (LS08), indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 4 a 5 metros de espesor y velocidades V_s entre 247 a 310 m/s que sugiere la presencia de suelos medianamente rígidos;

la segunda capa de 9 a 10 metros de espesor con velocidades V_s de 508 a 509 m/s correspondiente a suelos muy rígidos. La superficie de contacto con el semi-espacio presentan velocidades $V_s > 700$ m/s que sugieren también la existencia de suelos muy rígidos.

Línea sísmica LS09-SA: Realizado en la Asoc. Los Ángeles I Etapa e indica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 7 metros de espesor y velocidades V_s de 455 m/s que sugieren la presencia de suelos rígidos. La segunda de 9 metros de espesor, con velocidades V_s de 856 m/s; es considerado como roca medianamente rígida. La superficie de contacto con el semi-espacio presenta velocidades $V_s > 1336$ m/s que sugiere también roca moderadamente dura.

En la Tabla 5, se resume los valores de velocidades de ondas de corte (V_s) obtenidos para los distintos tipos de suelo (Tabla 1) y en la Figura 16 se muestra los resultados obtenidos para el perfil sísmico LS01. Para los otros perfiles, ver Anexos.

Tabla 5: Valores de espesor y V_s de los perfiles sísmicos obtenidos para la ciudad de San Antonio mediante el arreglo lineal MASW.

| Línea Sísmica | Superficie → Profundidad | | | | | | V530 (m/s) |
|---------------|--------------------------|-------------|----------|-------------|-------------|---|------------|
| | N° DE CAPA | | | | | | |
| | 1 | | 2 | | Semiespacio | | |
| V_s (m/s) | Esp. (m) | V_s (m/s) | Esp. (m) | V_s (m/s) | Esp. (m) | | |
| LS01-SA | 254 | 9 | 496 | 12 | 695 | - | 413 |
| LS02-SA | 335 | 7 | 427 | - | - | - | 391 |
| LS03-SA | 247 | 5 | 508 | 10 | 746 | - | 477 |
| LS04-SA | 242 | 9 | 437 | 12 | 580 | - | 371 |
| LS05-SA | 256 | 5 | 393 | 10 | 772 | - | 458 |
| LS06-SA | 494 | 9 | 715 | 12 | 1012 | - | 687 |
| LS07-SA | 379 | 5 | 537 | 10 | 826 | - | 588 |
| LS08-SA | 310 | 4 | 509 | 9 | 700 | - | 555 |
| LS09-SA | 455 | 7 | 856 | 9 | 1336 | - | 829 |
| LS10-SA | 337 | 4 | 464 | 14 | 664 | - | 495 |

| |
|---|
| Suelo blando ($V_s < 180$ m/s) |
| Suelo medianamente rígidos (180 – 350 m/s) |
| Suelo rígido (350 – 500 m/s) |
| Suelo muy rígido o roca blanda (500 – 800 m/s) |
| Roca moderadamente duro (800 – 1500 m/s) |

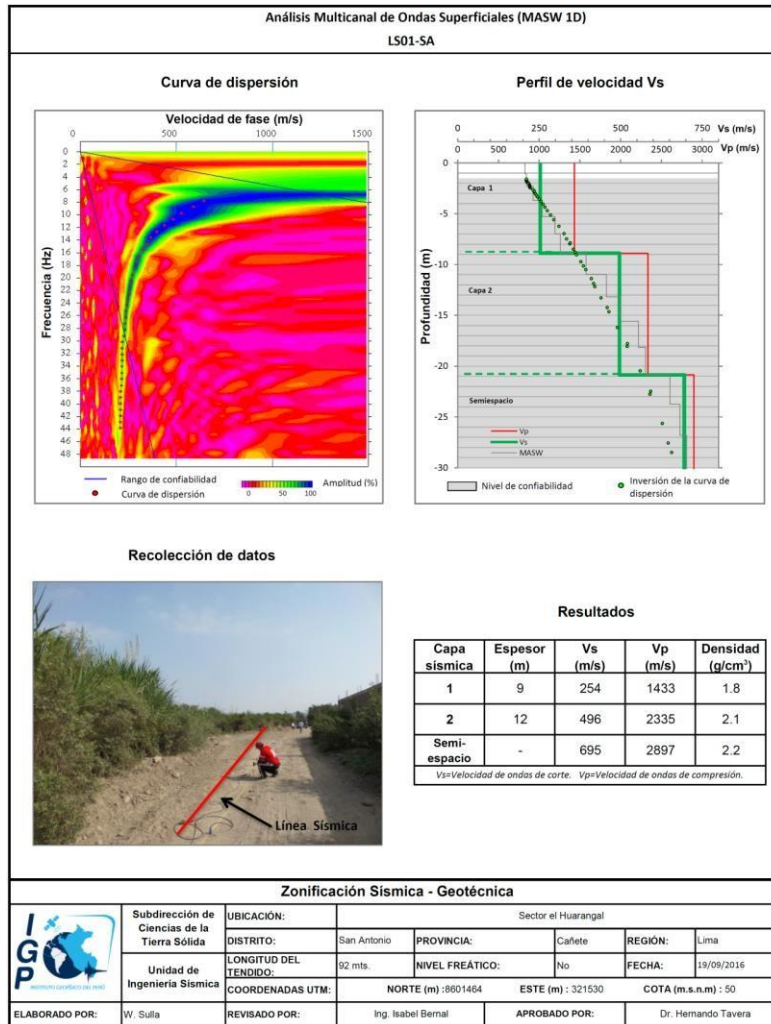


Figura 16: Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo LS01-SA.

Interpretación

En general, los resultados obtenidos definen la existencia de 2 capas sísmicas y un semi-espacio (Tabla 5) y su correlación con la geología son descritas a continuación:

Según la Figura 8, en la zona sureste del área de estudio (sector la Chonta y Huarangal), se identifica la presencia de suelos medianamente rígidos para la primera capa de 9 metros de espesor y velocidades de (V_s 242 a 254 m/s); en profundidad se cuenta con suelos rígidos a muy rígidos (V_s 437 a 695 m/s). En dirección noroeste del área de estudio (Mirador Turístico San Cristóbal y entrada a Esquilca), se tiene la presencia de suelos medianamente rígidos para la primera capa de 4 a 5 metros de espesor (V_s 247 a 310 m/s); en profundidades los suelos son muy rígidos o posible roca blanda (V_s 508 a 746 m/s). Asimismo, en dirección noroeste (pasaje el Olivo y Plaza de Armas), los suelos son medianamente rígidos para la primera capa de 5 a 7 metros (V_s 256 a 335 m/s), para pasar a suelos rígidos a muy rígidos (V_s 393 a 772 m/s) en

profundidad. Estas características son similares a los existentes en el extremo sureste con suelos de mayor espesor emplazados al oeste del área urbana (Plaza de Armas). Es decir, la zona urbana y sureste del área de estudio presenta para la primera capa suelos con similares características físicas, pero en profundidad la consolidación del suelo es variable, esta diferencia posiblemente se debe a que el intrusivo que forma el cerro denominado “El Mirador San Cristóbal” se extiende con dirección sur en forma de dique en el subsuelo cubierto por sedimentos de poco espesor (Figura 17a). Asimismo, esta cobertura superficial corresponde a los depósitos aluviales, que a pesar de la existencia de áreas de cultivo y contenido de humedad es clasificado como suelos medianamente rígidos.

En las zonas cercanas a la ladera del cerro con dirección a los AA.HH. Villa Paraíso y la Asc. Las Praderas (Figura 8), los suelos son rígidos para la primera capa de 5 a 9 metros (V_s 379 a 494 m/s) que suprayace sobre suelos muy rígidos a roca moderadamente dura en profundidad (V_s 537 a 1012 m/s). Estos suelos corresponden también a depósitos aluviales y coluviales depositados sobre el intrusivo.

En la zona de la Asoc. Los Ángeles I Etapa (Figura 8), la primera capa de 7 de espesor (V_s 455 m/s) está conformada por depósitos aluviales que suprayace a rocas medianamente rígidos (V_s 856 a 1336 m/s) y es debido a que esta zona se encuentra sobre la ladera del cerro (Figura 17b). Contrariamente, la zona de la Asoc. Los Ángeles II Etapa, presenta suelos medianamente rígidos (V_s 337 m/s) para la primera capa emplazados sobre suelos rígidos a muy rígidos en profundidad (V_s 464 a 664 m/s); es decir, depósitos de arenas eólicas que cubre la ladera del cerro compuesto de intrusivos.



Figura 17: Ensayo sísmico realizado en el área urbana de San Antonio: a) capa superficial constituida por suelo medianamente rígido (LS08-SA) y b) suelo rígido (LS09-SA).

3.3.- Periodos Dominantes

Para presentar los resultados finales obtenidos con la técnica razones espectrales, los valores de frecuencias fueron transformados a periodos dominantes y para construir el mapa de periodos, se asignó a cada punto de medición un radio de confiabilidad de 10 metros, lo cual facilita los procedimientos seguidos para la zonificación de los suelos. En la Figura 18 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de San Antonio, existiendo un claro dominio de bajos periodos con valores entre 0.1 y 0.4 segundos.

Los periodos de 0.1 y 0.2 segundos, se distribuyen de manera casi uniforme sobre el área de estudio, excepto en la zona céntrica de San Antonio, donde se concentran periodos entre 0.3 y 0.4 segundos. Esta distribución sugiere que en la zona céntrica el espesor de la capa sedimentaria superficial presenta mayor espesor. Por otro lado, los mayores factores de amplificación se presentan próximos al río Mala, a la Plaza central, al canal San Antonio y a la I.E. Alejandro B. Camacho C.

Los periodos dominantes que caracterizan los suelos de la ciudad de San Antonio están relacionados con las condiciones físico-dinámicas a través de la relación $T_0=4H/V_s$, donde T_0 es el periodo dominante, H el espesor del estrato y V_s es la velocidad de onda de corte. Asumiendo velocidades de 300 m/s y 500 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.1 y 0.2 segundos, se estima una capa superficial con espesores de entre 7 y 15 metros. Del mismo modo, al considerar periodos de 0.3 y 0.4 segundos, los espesores de las capas del suelo varían entre 20 a 30 metros.

En la ciudad de San Antonio, la distribución espacial de periodos mayores a 0.4 segundos sugiere la presencia en el subsuelo de una capa de mayor espesor y los periodos menores, una capa superficial de menor espesor. Los suelos con altas amplificaciones están presentes principalmente entre la zona céntrica de San Antonio y el río Mala, sugiriendo que la capa superficial del suelo es más flexible en comparación a los suelos ubicados en dirección NO de la zona de estudio, allí los suelos son más rígidos.

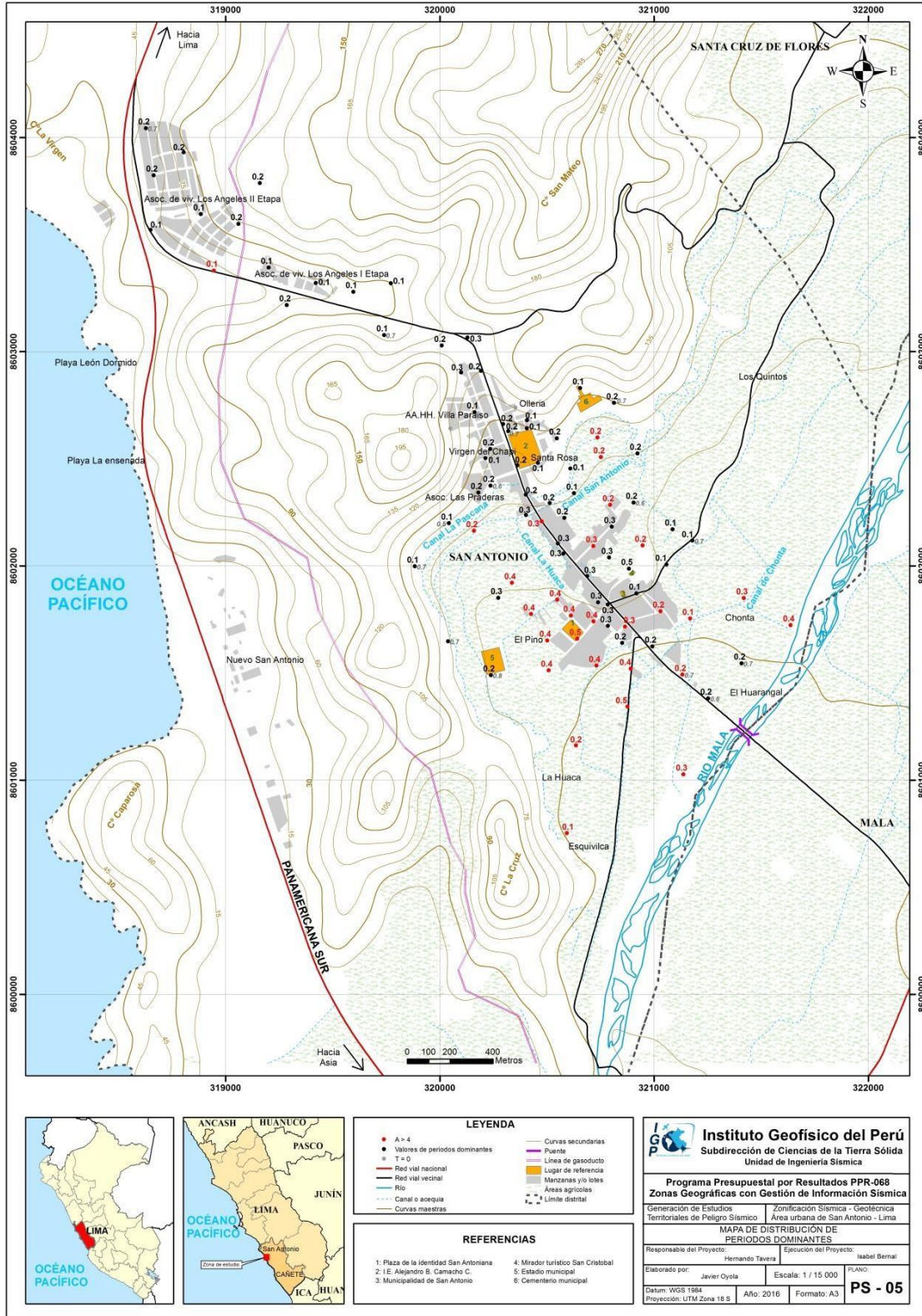


Figura 18: Mapa de la distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

3.4.- Estudios Eléctricos con la Técnica ERT

A continuación, se describe los resultados obtenidos de las líneas de tomografía eléctrica realizados en la ciudad de San Antonio.

Líneas eléctricas LE05-SA, LE06-SA y LE07-SA realizadas en el A.H. Villa Paraíso y los canales San Antonio y La Pascana, próximos al Cerro San Mateo (Figura 12). Corresponderían al sector norte de la zona de estudio.

Estas líneas presentan dos horizontes geoelectrónicos, el primero y más superficial con valores bajos a muy bajos resistivos ($<100 \Omega.m$), lo que sugiere que corresponderían a materiales de alta permeabilidad, influenciado por flujos de agua en superficie que se filtran en profundidad y a roca fracturada. Contrariamente, aunque el material en superficie sea roca este no es un material competente por la presencia de arcillas y por lo tanto, capaces de almacenar gran cantidad de agua y terreno salitroso. El segundo horizonte con materiales medianamente resistivos se presenta a partir de 20 metros en profundidad, donde la roca no se encontraría alterada, ni meteorizada, pero se tendría la presencia de arenas, gravas y conglomerados. En la zona, el nivel freático es superficial, por ejemplo, en la línea LE07-SA está a 1 metro de profundidad (Figura 19).



Figura 19: Vista de las líneas eléctricas LE05-SA, LE06-SA y LE07-SA.

Líneas eléctricas LE02-SA y LE03-SA realizadas en los sectores El Pino, en la prolongación 27 de Diciembre y La Huaca (Figura 12); próximos al Cerro La Cruz. En la línea LE03-SA, se realiza la recolección de agua mediante cisternas.

Presentan dos horizontes geoelectricos: el primero conformado por material medianamente resistivo a resistivo desde la superficie en un horizonte constante y compuesto por gravas, arenas arcillo limosas semiconsolidadas, clastos volcánicos intrusivos y sedimentarios como las calizas masivas de la Formación Atocongo. En profundidad se presenta un segundo horizonte geoelectrico, donde los valores de resistividad tienden a disminuir, con materiales de baja a muy baja resistividad ($< 100 \Omega.m$), indicando la presencia de suelos saturado. Aquí el nivel freático fluctuaría entre 3 y 15 metros de profundidad. Próximo a la línea LE03-SA existe un pozo de agua donde el nivel freático está a 3 metros de profundidad, y alrededor de las líneas se observa vegetación y suelos húmedos (Figura 20).



Figura 20: Vista de la línea LE02-SA y LE03-SA

Líneas eléctricas LE01-SA y LE04-SA realizadas en el sector El Huarangal (La Chonta) y próximo al río Mala (Figura 12).

Presenta dos horizontes geoelectricos: el primero conformado por material medianamente resistivo a resistivo en superficie, distribuyéndose de forma alternada y en profundidad, lo que sugiere la presencia de material como arenas arcillo limosas, gravas y coluviales, tal como se observa en LE01-SA próxima al

río Mala. El segundo horizonte se presenta en profundidad con valores de resistividad que tienden a disminuir debido a la presencia de suelos de baja a muy baja resistividad ($<100 \Omega.m$), indicando la presencia de suelos saturados o material con contenido orgánico. En el sector de La Chonta, el nivel freático es superficial a menos de 10 metros de profundidad. Alrededor de las líneas eléctricas existe vegetación (Figura 21).



Figura 21: Vista de las líneas eléctricas LE01-SA y LE04-SA

Interpretación

De acuerdo a los resultados obtenidos, hacia el extremo Norte de la plaza de San Antonio predominan materiales bajos resistivos y hacia el Sur, predominan materiales medianamente resistivos. Una compilación de la información obtenida se presenta en la Tabla 6.

Al Norte de la plaza San Antoniana en el A.H. Villa Paraíso, Asoc. Las Praderas y paralelos a los canales La Pascana y San Antonio (LE05-SA, LE06-SA y LE07-SA), el nivel freático se presentaría a partir de los 2 metros de profundidad, al Sur de la plaza de San Antonio, líneas ubicadas por la entidad San Antoniana en El Huarangal, La Huaca y la Chonta (LE01-SA, LE03-SA y LE04-SA) el nivel freático se encuentra a partir de los 2 metros, siendo corroborada la información con la existencia de pozos de agua en la zona. En el sector de El Pino (LE02-SA), el nivel freático se encuentra a 3 metros de profundidad.

Geológicamente, la ciudad de San Antonio se encuentra sobre depósitos fluvio aluviales, depósitos aluviales, rocas intrusivas, la formación Atocongo y la formación Chilca. De estos, el más importante es el depósito aluvial por presentar características adecuadas para ser un buen reservorio de agua subterránea. Finalmente, el nivel freático en la ciudad de San Antonio, se presenta a partir de los 2 metros de profundidad. Este alto nivel freático se asocia a la presencia de terrenos de cultivo que utilizan el riego por inundación y a la proximidad del río Mala.

En la Tabla 6, se muestra los valores de rangos de resistividades de acuerdo a la Tabla 2, desde material muy bajo resistivo hasta muy resistivos. En la Figura 22 los resultados obtenidos para la línea LE02–SA. Para las líneas restantes, ver Anexos.

Tabla 6: Valores de resistividad obtenidos en el área de estudio

| Líneas Eléctricas | Orientación | Profundidad de alcance (m) | Horizonte geoelectrico | Resistividad ($\Omega.m$) | Nivel freático (m) |
|--------------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---|---------------------------|
| LE01-SA | EW | 39 | 1 | 100 - 500 500 - 1000 | 2 m |
| | | | 2 | < 100 | |
| LE02- SA | EW | 32 | 1 | 100 - 500 500 - 900 | 3 m |
| | | | 2 | < 100 | |
| LE03- SA | NS | 39 | 1 | 100 - 500 | 3 m |
| | | | 2 | < 100 | |
| LE04- SA | EW | 39 | 1 | 20 - 100 | 10 m |
| | | | 2 | < 20 | |
| LE05- SA | EW | 32 | 1 | 100 - 500 | 5m |
| | | | 2 | < 100 | |
| LE06- SA | NS | 39 | 1 | 20 - 100 | 2 m |
| | | | 2 | < 20 | |
| LE07- SA | EW | 39 | 1 | 100 - 500 | 1 m |
| | | | 2 | < 100 | |

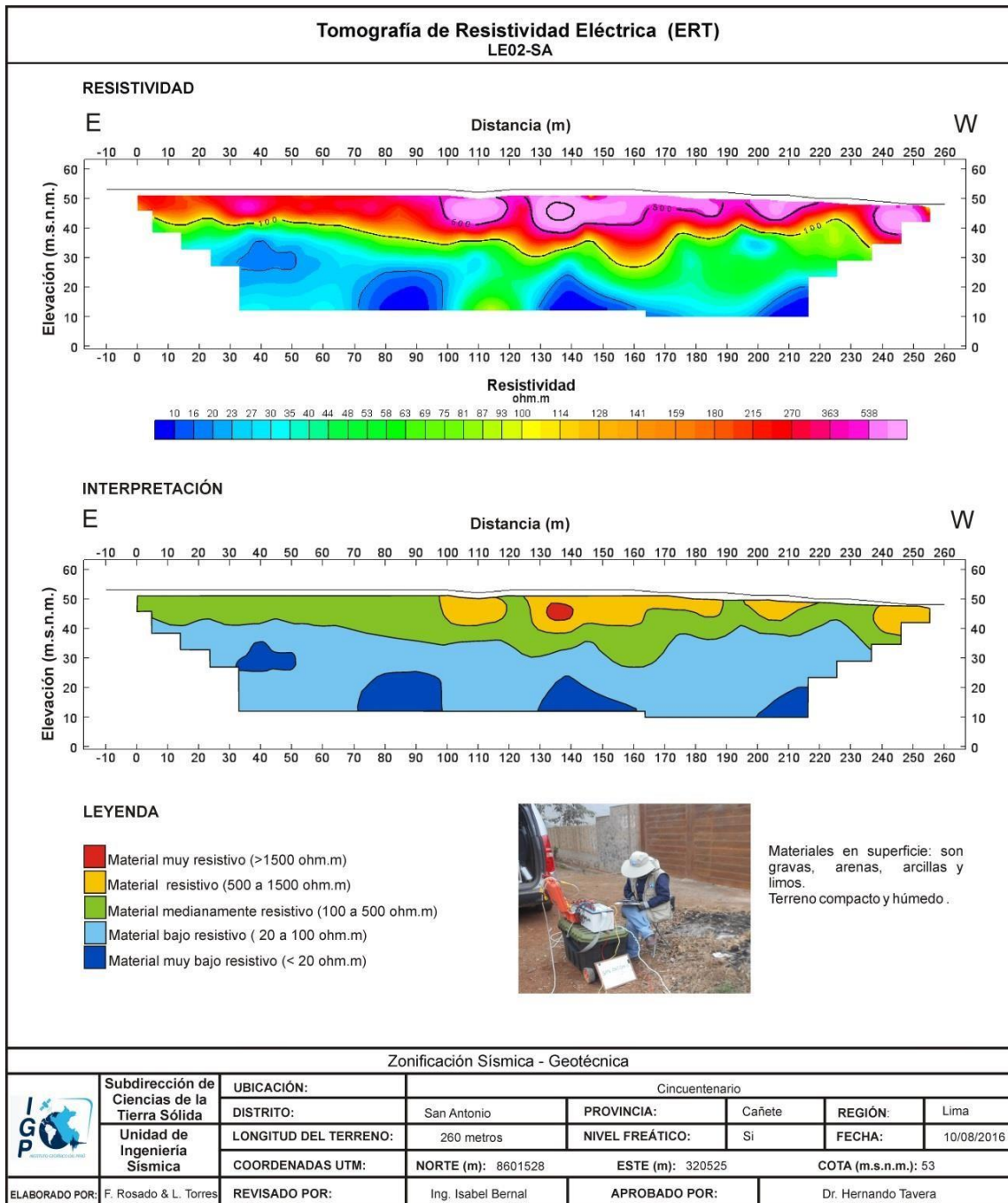


Figura 22: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE02-SA.

4.- ZONIFICACION GEOFÍSICA - GEOTÉCNICA

El mapa de Zonificación Geofísica - Geotécnica se elabora en función de la integración de los resultados obtenidos con los estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos: contenido en el presente informe. Asimismo, se considera los aportes de la Norma de Construcción Sismorresistente E.030, la existencia de suelos de tipo S1 y S2. Este tipo de suelos corresponden a suelos rígidos y medianamente rígidos respectivamente.

4.2.- Mapa de Zonificación Geofísica

Para la ciudad de San Antonio, se propone la siguiente Zonificación Geofísica-Geotécnica (Figura 23).

.- ZONA I: Conformada por estratos de grava coluvial, que se encuentran, a nivel superficial cubiertos por depósitos de material fino (arenas finas) con poco espesor. Este suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos. Considerando las velocidades de las ondas de corte entre 400 y 700 m/s, los suelos son del Tipo S1. Esta zona presente una capacidad admisible de 3.0 Kg/cm².

Esta zona domina en el área de estudio. Asimismo, con líneas en rojo, se delimita áreas donde se presentan las máximas amplificaciones evidenciando una menor consistencia de los suelos superficiales.

.-ZONA II: En la zona se incluye las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos a gruesos con espesores que varían entre 7 y 20 m., subyaciendo a estos estratos se tiene grava. Este suelo tiene un comportamiento medianamente rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.3 y 0.4 segundos. Considerando velocidades de ondas de corte de entre 250 y 390 m/s, correspondiendo a suelos Tipo S2 según la norma sismorresistente peruana, con capacidad admisible de 1.0-2.0 Kg/cm².

Esta zona se presenta en el extremo SO del área de estudio, entre la Plaza central de San Antonio y el Estadio Municipal. Asimismo, con líneas en rojo, se delimita áreas donde se presentan las máximas amplificaciones. Esta zona se encuentra entre las carreteras Nueva y Antigua Panamericana Sur. Con líneas inclinadas en rojo se delimita áreas donde se alcanzarán las máximas amplificaciones.

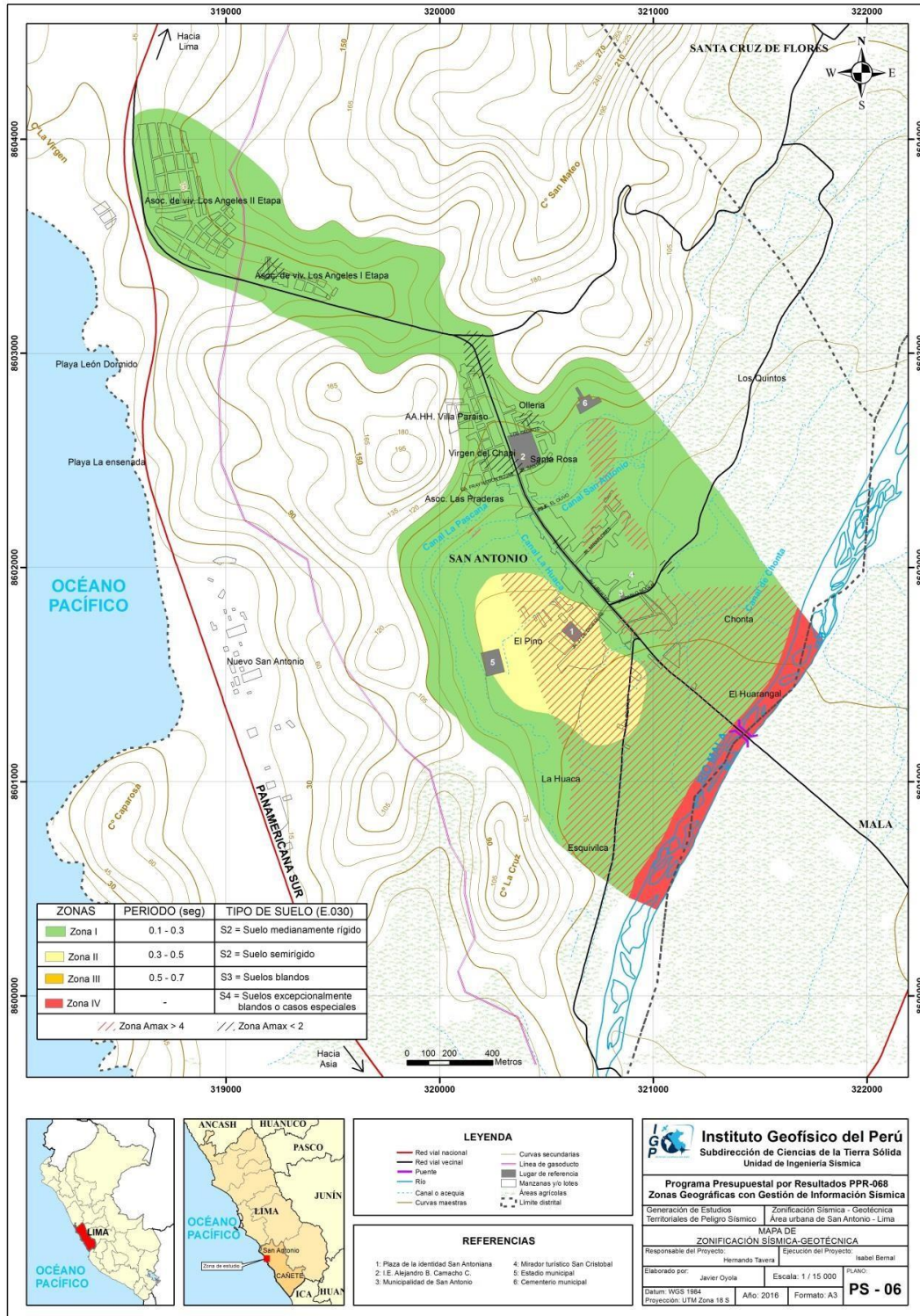


Figura 23: Mapa de Zonificación Geofísica del área urbana de San Antonio.

CONCLUSIONES

El estudio de Zonificación Geofísica-Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para el área urbana de San Antonio, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Las unidades geomorfológicas en la ciudad de San Antonio están conformadas por: Lomas (25%), terrazas (25%), planicie costera (20%), y el 30 % restante corresponde a las unidades colina, isla, plataforma de abrasión, playas, acantilados, lecho fluvial y llanura de inundación. El casco urbano de la ciudad en mención se asienta sobre terrazas, laderas de las lomas y planicie costera.
- Los materiales que conforman el subsuelo de la ciudad de San Antonio corresponden a depósitos aluviales (gravas, arenas y arcillas) que tienen un espesor de 10 m. aproximadamente, depósitos marinos y depósitos eólicos ambos conformados por arenas. El substrato rocoso de la ciudad en mención lo constituyen rocas tipo intrusivas (diorita, tonalita y monzodioritas) y volcánicas-sedimentarias (andesitas y calizas con intercalación de margas) que afloran alrededor de la zona de estudio.
- Se ha identificado acumulación de materiales inestables (detritos) sobre las laderas de las lomas que de ocurrir una precipitación excepcional generarían flujos de detritos (huaycos) que afectarían a las viviendas que se encuentren debajo de estos (sector Los Jardines, Virgen del Chapí, AAHH Las Praderas y Esquivilca).
- En el sector Los Quintos (parte baja) y La Chonta, el nivel freático tiene 1.30 m y 1.90 m de profundidad respectivamente. En el casco urbano y el sector de Nuevo San Antonio a la profundidad de investigación (3 m máximo - calicata) no se evidencio la presencia del nivel freático.
- El cálculo de potencial de licuación de suelos determinó que los sectores La Chonta, Los Quintos (parte baja) y a la margen derecha del río Mala (aguas abajo) después del puente vehicular, son zonas con potencial de licuación.
- En San Antonio, se han identificado dos tipos de suelos: (a) Arenas pobremente graduadas (SP) identificadas en el sector de 'Los Ángeles I y II', detrás del centro médico de salud de San Antonio y en la margen derecha del río

Mala, Chonta y Nuevo San Antonio. Estos suelos presentan capacidad de carga admisible muy baja a baja (al metro de cimentación) de 0.92 kg/cm² a 1.28 kg/cm². (b) Gravas pobremente graduadas (GP) identificados en el casco urbano céntrico de San Antonio, estos suelos presentan capacidad de carga admisible alta (al metro de cimentación) de 3.050 kg/cm² a 3.055 kg/cm²; en el sector Los Quintos. Este suelo presenta capacidad de carga admisible baja (al metro de cimentación) de 1.82 kg/cm².

- En San Antonio, los suelos responden a periodos de 0.1 y 0.2 segundos, excepto en áreas próximas a su plaza central, donde se concentran periodos de entre 0.3 y 0.4 segundos. Esta distribución sugiere que en la zona céntrica el espesor de la capa sedimentaria superficial presenta mayor espesor. Por otro lado, los mayores factores de amplificación se presentan próximos al río Mala, a la Plaza central, al canal San Antonio y a la I.E. Alejandro B. Camacho C. Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de San Antonio están relacionados con las condiciones físico-dinámicas a través de la relación $T_0=4H/V_s$, asumiendo velocidades de 300 m/s y 500 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.1 y 0.2 segundos, se estima una capa superficial con espesores de entre 7 y 15 metros para la capa más superficial y se considera periodos de 0.3 y 0.4 segundos, estratos de 20 y 30 metros de profundidad.

- Asimismo, hacia el extremo Norte de la plaza de San Antonio los materiales bajos resistivos son los que predominan en superficie y hacia el Sur de la plaza de San Antonio los materiales medianamente resistivos. En general, el nivel freático en San Antonio se presenta a partir de los 2 metros de profundidad, siendo asociado a la presencia de terrenos de cultivo que utilizan el riego por inundación y a la proximidad del río Mala.

- Los resultados obtenidos para la ciudad de San Antonio han permitido identificar, según las características dinámicas del suelo, sus propiedades mecánicas y el procedimiento establecido en la Norma E.030, la existencia de Dos (2) zonas sísmicas correspondientes a suelos Tipo S1 y S2, que comprende suelos rígidos y medianamente rígidos (Figura 6).

BIBLIOGRAFÍA

- Alva H, J. E. - Diseño de Cimentaciones.
- Bard, P-Y. (1995) Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues, In Proc. 10 European Conf. Earth. Eng., ed. Duma, Balkema, Rotterdam, 305-323
- Bard, P-Y y SESAME (2001) The SESAME project: an overview and main results. 13 World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 16, 2004 Paper No. 2207
- Beresnev, I.A., K.L. Wen, and Y.T. Yeh 1995a, —Nonlinear Soil Amplification: It's Corroboration in Taiwan. Bull, Seism. Soc. Am., Vol. 85, pp. 496-515
- Bernal, I. (2002) MicroZonificación Geofísica de la ciudad de Tlaxcala, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, pag. 130.
- Braja Das (2007) - Principles of Foundation Engineering, Seven Edition. Pág. 133-180.
- Brusi, D., et al (2013) - Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. ISSN: 1132-9157. Pág.181-194.
- Cahill & Isacks (1992) - Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. Journal Geophys. Res., 97, 17503-17529
- CERESIS (2008) - Centro Regional de Sismología para América del Sur. Informe Técnico, 2008 —El Terremoto de Pisco 15 de agosto 2007II.
- CISMID (2016) – Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
- Ciudades sostenibles PNUD (2008). Mapa de peligros, plan de usos del suelo ante desastres y medidas de mitigación de San Vicente de Cañete, San Antonio y Nuevo San Antonio.
- Chow, Ven Te, Maidment, David y Mays, Larry. (1994). Hidrología aplicada [Escaneado]. MacGRAW-HILL INTERAMERICANA: Santafé de Bogotá, Colombia.
- Cruden, D, M. (1991) - A Simple definition of a landslide: Bulletin of the International Association of Engineering Geology.
- Felicísimo, M. (1994) - Modelos digitales del terreno. Oviedo-España: Pentalfa. 222 p.ISBN: 84-7848-475-2. 222 p.
- Fidel, L., Zavala, B., Núñez, S., Valenzuela, G. (2006) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 4. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 29. 383 p.

- Flores-Estrella, H., Lomnitz, C. y Yussim S. (2004). —Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPACII, *Geophysics*, Vol. 24, Nº 3, 438-445
- Gasulla, M.; Jordana, J.; Pallás, R.; Torrents, J.M. (1998). Subsurface resistivity measurements using square waveforms. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 47(1): 74-77.
- GITS-Grupo de Investigación de Transporte de Sedimentos.
- Gutiérrez, M. (2008) – Geomorfología. Edit. Pearson/Prentice Hall, Madrid, 898p. ISBN 97884832-23895.
- Harvey, J. C., (1987) – *Geology for geotechnical engineers* (Cambridge University Press), 5p y 13p.
- Hauser, A, (1985) - Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: Características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. *Revista Geológica de Chile* No. 24, p. 75-92.
- Hauser, A, (1993) - Remociones en masa en Chile. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín Nº 45.
- Hartzel, S. H. (1992). Site response estimation from earthquake data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 2308-2327
- Hutchinson, J., N., (1968) - Mass Movement. In the *Encyclopedia of Geomorphology* (Fairbridge, R.W., ed., Reinhold Book Corp., New York). 668-696 p.
- Hutchinson, J., N., (1988) - General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides*, (Ed: Bonnard, C.). 1, 3-35 p. Rotterdam: Balkema.
- INDECI – PNUD – PER/02/051 – CIUDADES SOSTENIBLES (2003), Mapa de Peligros, Plan de prevención de desastres: Usos del suelo y medidas de mitigación ciudad de San Antonio.
- INGEMMET (1998) - Estudio geotécnico de futuras áreas de expansión urbana entre Lima y Cañete, Boletín Nº 20 – Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
- INRENA (1994) – Estudio de diagnóstico de la calidad de agua de la Cuenca del río Mala.
- INEI (2007). XI censo de Población y VI de Vivienda. Recuperado de <http://censos.ineei.gob.pe/cpv2007/tabulados/>
- INEI (2013). Mapa de pobreza provincial y distrital 2013. Recuperado de

https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1261/Libro.pdf

Juárez, B. & Rico, A., (1973) – Mecánica de suelos. Tomo II.

Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a). Are microtremors useful in site response evaluation?, Bull. Seism. Soc. Am. 84, 1350-1364 pp.

Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994b). Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records, Soil. Dyn. & Earthq. Eng. 13, 413-423 pp.

Loke, M.H. (2004). Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys.

Ministerio de Economía y Finanzas. (2017). Distribución del Gasto del Gobierno Local por Fuentes de Financiamiento y Grupo Genérico de Gastos. <https://www.mef.gov.pe/es/presupuesto-del-sector-publico/aprobacion-presupuestal/nacional-regional-y-local/182-presupuesto-publico/programacion-formulacion-y-aprobacion/1954-presupuesto-aprobado-ano-2007-nacional-regional-y-local>

Ministerio de Economía y Finanzas. (2017). Distribución del Gasto del Gobierno Local por Fuentes de Financiamiento y Grupo Genérico de Gastos. <https://www.mef.gov.pe/es/presupuesto-del-sector-publico/aprobacion-presupuestal/nacional-regional-y-local/182-presupuesto-publico/programacion-formulacion-y-aprobacion/1954-presupuesto-aprobado-ano-2007-nacional-regional-y-local>

Ministerio de Agricultura (2007). Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río Mala. Perú.

http://www.ana.gov.pe/sites/default/files/normatividad/files/estudio_hidrologico_mala_0_0.pdf

Municipalidad de Mala. (s.f.). Reseña histórica. Recuperado de <http://munimala.gob.pe/distrito/historia/>

Municipalidad de San Antonio. (s.f.). Reseña histórica. Recuperado de http://munisanantonio.gob.pe/portal/?page_id=337

Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst., 30-1, 25-30.

Orellana, E. (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua. Madrid: Ediciones Paraninfo.

O'Brien J.S. (2009). FLO-2D User's Manual. Versión 2009. Nutrioso, Arizona. Disponible en <http://www.flo-2d.com>.

- Paredes, R. (2010). Plan de Desarrollo Local Concertado 2010 - 2021. Mala – Lima.
- Park, C.B. (2015). Data acquisition. Retrieved 23 June, 2015, from <http://www.masw.com/DataAcquisition.html>
- Park, C.B. (2014). MASW for geotechnical site investigation. *The Leading Edge*, 32(6):656-662.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *The Leading Edge*, 26 (1), 60–64.
- Park, C. B., Miller, R. D. y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves *Geophysics* 64 800-8.
- Perrone, A., Iannuzzi, A., Lapenna, V., Lorenzo, P., Piscitelli, S., Rizzo, E., and Sdao, (2004). Highresolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy), *J. Appl. Geophys.*, 5 56, 17–29, doi:10.1016/j.jappgeo.2004.03.004
- Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2nd ed., 712 pp.
- Rivera, M., H., 2005 - *Geología General*. 350 p
- Roma, V. (2010). Seismic geotechnical site characterization by means of MASW and ReMi methods. *FastTIMES*, 15(3):16-28.
- Salazar, H & Landa, C. (1993) – *Geología de los cuadrángulos de Mala, Lunahuaná, Tupe, Conayca, Chincha, Tantará y Castrovirreyna.*, *Boletín*, 26-j, 26-k, 26-l, 26- m, 27-k, 27-l y 27-m Serie A: *Carta Geológica Nacional*, 44. 105p
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand y G. Richard, (2006). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till Res* 83, 173-193
- SESAME European research project WP12 – Deliverable D23.12: (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation.
- Socco, L.V., Boiero, D., Comina, C., Foti, S., y Wis_en, R. (2008). Seismic characterization of an Alpine site. *Near Surface Geophysics*, 6(4):255-267
- Sepúlveda, S.A., (2000) - *Metodología de Evaluación del Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos*. *Revista Comunicaciones*, Departamento de Geología, Universidad de Chile, No.51, p. 3-28.
- Suárez, D., J., (1998) – *Estabilidad de Taludes en Tropicales*. Instituto de Investigación sobre erosión y deslizamientos. Colombia. Ed. Ingeniería de Suelos Ltda. 550 p

- Tavera, H., (2014) - Escenario sísmico en base a la intensidad máxima esperada en un probable sismo frente a la zona costera de Lima.
- Tarback, E., D. Lutgens, F., K., (2005) Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física Pretince Hall. Cap16. 8va edición. 710 pp.
- Tejada, G. (1994) - Vocabulario de Geomorfología. Ediciones AKAL. 184 p.
- USGS. [s.f.]. Técnicas de campo en superficie. Disponible en <http://water.usgs.gov/nrp/index.php>.
- Varnes, D.J., (1958) - Landslide types and processes in Eckel E.B., ed., Landslides and Engineering Practice, Highway Research Board Special Report 29, NAS- NRC Publication 544, Washington, D.C. 20-47 p.
- Varnes, D. J., (1978) - Slope Movement: Types and Proceses. In Scuster R. L. y Krizek, R. J., ed. Landslides analysis and control: Washington, D. C. National Academy Press, Transportation
- Zinck, J. (1988) - Physiography and soils. Lecture notes. Enschede, The Netherlands: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Zinck, J. & Valenzuela, C. (1990) - Soil geographic database: structure and application examples. ITC Journal, 1990(3), 270-294.
- Wyllie, D., C. & Norrish, N., I., (1996). —Stabilization of rock slopesII. Landslides investigation and mitigation. Special report 247. Transportation Research Board. National research council, pp. 474-504.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: Geophysics, 64, 691–700.

ANEXOS

La documentación del presente Informe Técnico: “Zonificación Geofísica – Geotécnica de la ciudad de San Antonio”, se adjunta en formato digital.

1.- Información Geológica Geotécnica:

- Fichas de eventos geodinámicos
- Registros de calicatas
- Densidad de campo
- Fichas de granulometría
- Registro de posteos
- Registro de DPL
- Registro de capacidad de carga admisible
- Mapas temáticos

2.- Información Geofísica

- Perfiles Sísmicos (MASW)
- Secciones Geo eléctricas (ERT)
- Mapas temáticos