



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



PROGRAMA PRESUPUESTAL N° 068: REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS POR DESASTRES

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



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE SULLANA

Lima - Perú

2019

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipion

Autores

Isabel Bernal

Caracterización Sísmica y Geofísica de la Ciudad de Sullana:

Juan Carlos Gómez

Caracterización Geológica y Geotécnica de la Ciudad de Sullana:

Equipo de Evaluación Geológica y Geotécnica: Roberth Carrillo

Equipo de Evaluación Sísmica y Geofísica: Fabiola Rosado / Henry Salas / Wilfredo Sullá / Liliana Torres / Javier Oyola / Kelly Pari / Luz Arredondo / Jesús Huarachi / Jorge Salas

Personal de apoyo: Augusto Cárdenas / Roberth Yupanqui

Personal administrativo: Marisol Enriquez

Este Informe ha sido producido por:

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

**ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA
CIUDAD DE SULLANA**

Distrito de Sullana – Provincia de Sullana – Región Piura

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 Sísmica - Geotécnica de las áreas urbanas de las ciudades/localidades de Piura (distrito de Piura), Castilla (distrito de Castilla), Sullana (distrito de Sullana), Paita (distrito de Paita), Chulucanas (distrito de Chulucanas), Catacaos (distrito de Catacaos), Sechura y Parachique (distrito de Sechura). 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 Sísmica – Geotécnica de los suelos de la ciudad de Sullana”, 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.

El presente informe está constituido por tres (3) partes, en la primera se realiza la presentación y la descripción de las características del área de estudio, así como las conclusiones y recomendaciones. En la segunda parte, se presenta el desarrollo del estudio realizado para la caracterización geológica y geotécnica, y en la tercera parte, el estudio para la caracterización sísmica y geofísica; en ambos, casos para la ciudad de Sullana. Finalmente, en un CD se adjunta toda la documentación y mapas temáticos generados durante la realización del presente estudio.

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

Conclusiones

PARTE 2: Caracterización geológica y geotécnica de la ciudad de Sullana

PARTE 3: Caracterización sísmica y geofísica de la ciudad de Sullana

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS: Documentos y Anexos se adjunta en un CD.

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 2018 el Proyecto “**Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica**” y como parte del mismo, la Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida desarrolló la Actividad “**Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico**” a fin de obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para las áreas urbanas de las siguientes ciudades (Figura 1):

- **Piura**, distrito de Piura, capital de la provincia y región de Piura.
- **Castilla**, distrito de Castilla, provincia y región de Piura.
- **Sullana**, capital del distrito y provincia de Sullana, región de Piura.
- **Paíta**, capital del distrito y provincia de Paíta, región de Piura.
- **Chulucanas**, distrito de Chulucanas, provincia de Morropón, región de Piura.
- **Catacaos**, distrito de Catacaos, provincia y región de Piura.
- **Sechura y Parachique**, capital del distrito y provincia de Sechura, región de Piura.

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región norte ha sido afectada en varias oportunidades por eventos sísmicos de variada magnitud que han generado altos niveles de intensidad, puesta en evidencia con los daños observados post-sismo en la región de Piura (Silgado, 1978; Tavera et al. 2016). 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.

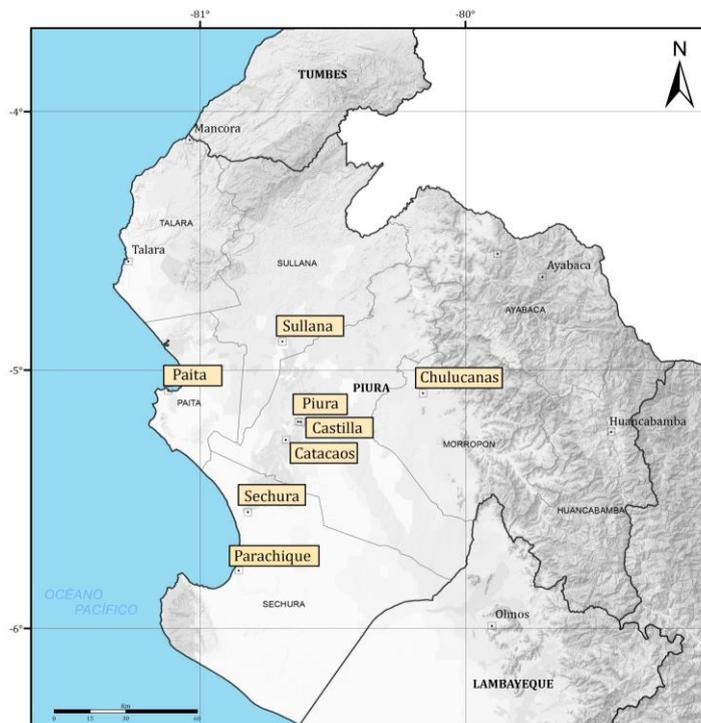


Figura 1: Distribución espacial de las ciudades intervenidas durante el año 2018.

Los estudios de Zonificación Sísmica – 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, geofísicos, 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 localidad de Sullana 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 Sísmica – 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 los Mapas de Zonificación Sísmica – Geotécnica permiten conocer las características dinámicas del suelo y se constituyen 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 Sísmica - Geotécnica para la ciudad de Sullana, provincia de Sullana, (Figura 2), región de Piura, a partir de la integración de los resultados obtenidos con los estudios 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.



Figura 2: Plaza principal de la ciudad de Sullana.

Actualmente, Sullana es uno de los ocho distritos que conforman la provincia del mismo nombre, en la región de Piura, presenta una extensión de 488.10 km² (representa el 9 % de la superficie provincial) y tiene una densidad poblacional de 346.9 hab/km².

1.2. Historia

A finales del siglo XIX, luego de la instalación y puesta en función del tren Paita – La Huaca – Sullana (1879), para facilitar la exportación de algodón por Paita, la ciudad de Sullana comenzaría a crecer con mayor rapidez en el aspecto industrial y económico, pese a la gran recesión que aconteció en el país con la post guerra con Chile. Desde comienzos hasta mediados del siglo XX, las dos guerras mundiales (1914-17, 1939-45), significaron una creciente demanda de productos a nivel mundial, tales como el algodón, minerales, cueros y otros orientados básicamente a la exportación. En la década del 30 se construyó el canal Miguel Checa, de alta incidencia agrícola, así como el primer puente sobre el río Chira y la carretera Panamericana, que obviamente ampliaron los flujos comerciales hacia Talara, Tumbes y Ecuador; desde entonces la ciudad se convirtió en un gran nudo de caminos que unen el norte y sur del país. En el periodo 1940-1961, la población de la ciudad crece aceleradamente, con una tasa de 4.1 %, incrementado su área en 135%, basado en los siguientes hechos: Ampliación de la frontera agrícola, con la construcción de la represa de San Lorenzo, créditos agrícolas, con la instalación de la Agencia del Banco de Fomento Agrario, consolidación del comercio binacional, con el inicio de la Feria de Reyes.

A comienzos de 1962, el ferrocarril a Paita deja de funcionar, surgiendo la necesidad de la construcción de una carretera hacia Paita; en este mismo año se da la interconexión eléctrica Piura-Sullana, impulsando de esta manera el desarrollo industrial y consecuentemente la creación del Parque Industrial de la ciudad; en este mismo periodo de 1961 - 1972, el área de la ciudad aumenta en un 75%, como resultado de las políticas de desarrollo industrial y la Reforma Agraria, y se inaugura el primer hospital de la ciudad. En la década de los ochenta, a partir de diciembre de 1982 a julio de 1983, la ciudad es afectada por la ocurrencia del Fenómeno de El Niño, reactivándose en este proceso las diversas quebradas que atravesaban la ciudad como: la quebrada Cieneguillo, Cola del alacrán y Bellavista; una vez terminado el período lluvioso, en los años siguientes se construiría diversos canales que atravesarían la ciudad; siendo uno de ellos el canal vía, todos estos terminados en el primer año de la década de los noventa. En los últimos años, la ciudad ha pasado de ser un municipio solo industrial comercial para convertirse en núcleo de servicios (Municipalidad provincial de Sullana, 2013).

Sullana está ubicada en la parte baja de la cuenca hidrográfica del río Chira, a una altitud promedio de 40 m.s.n.m. y a 39 km. al noroeste de la ciudad de Piura unido por la carretera Panamericana. Limita por el norte con el distrito de Lancones, por el este con el distrito de Tambogrande, por el sur con el distrito de Piura y Miguel Checa y al oeste con los distritos de Marcavelica, Querecotillo y Salitral (Figura 3). Sullana se convierte en el eje central de vías de comunicación con las Provincias de Piura, Paita, Talara, Ayabaca, el Departamento de Tumbes y la vecina República del Ecuador. Tiene una ubicación estratégica para impulsar el desarrollo de la Región.

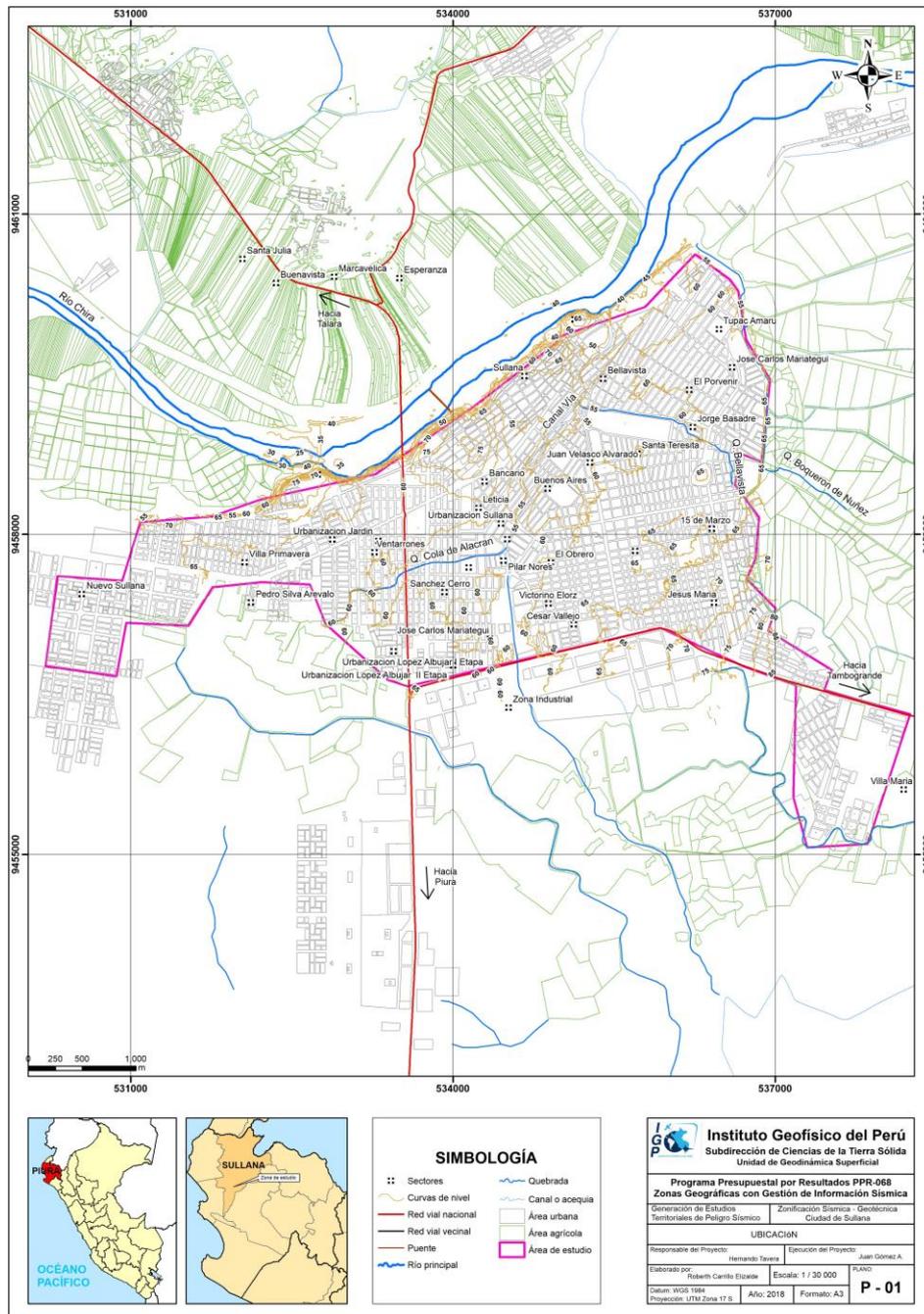


Figura 3. Mapa de ubicación geográfica de la ciudad de Sullana.

1.3. Accesibilidad y Clima

El acceso, desde Lima, hacia la ciudad de Sullana se cuenta con 1017 km que se recorren por la carretera Panamericana Norte, vía que es totalmente asfaltada y se encuentra en buenas condiciones.

De acuerdo con información disponible en la web WEATHER SPARK, con registros históricos para el periodo 1980 – 2016; en la ciudad de Sullana, durante el verano (meses de enero a abril) es muy caliente, bochornoso y nublado; mientras que, los inviernos son secos, ventosos y mayormente despejados. La temperatura varía de 18 °C a 33 °C y rara vez, baja a menos de 16 °C o sube a más de 35 °C.

En base a la precipitación de lluvia acumulada durante un período móvil de 31 días centrado alrededor de cada día del año, se ha determinado que los meses lluviosos (diciembre - abril) presentan, por lo menos 13 milímetros; mientras que, la mayoría de la lluvia cae durante los 31 días centrados alrededor del 8 de marzo, con una acumulación total promedio de 42 milímetros, ver Figura 4.

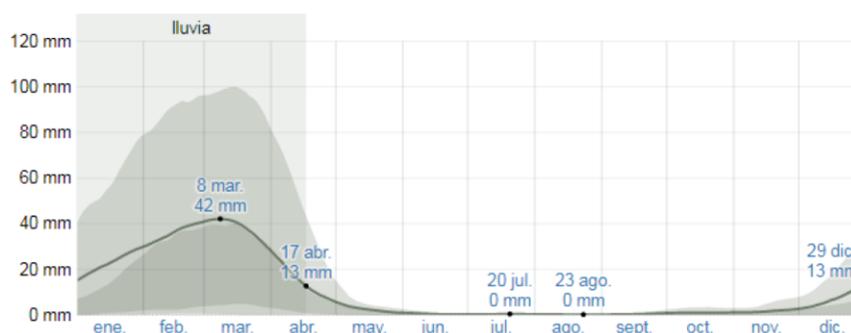


Figura 4: La lluvia promedio mensual (línea sólida) acumulada en un periodo móvil de 31 días centrado en el día en cuestión, con las bandas de percentiles del 25º al 75º y del 10º al 90º. Periodo 1980 – 2016.

1.4. Economía

En Sullana, la principal actividad económica es la comercial, mayormente dentro del Mercado Nacional; es decir al interior del país: Talara, Paita, San Lorenzo, Pacasmayo, Chulucanas y Lima (97%). En general, solo se exporta el 3% de lo que se produce. En la ciudad existe un 59% de locales comerciales; y un 41% son locales de servicios. El giro comercial más importante son los artículos de primera necesidad (44% de los locales comerciales), porcentaje superior a los servicios como el expendio de comidas y bebidas (26% de los locales de servicios).

En los últimos años, la ciudad de Sullana concentra el 95% de la industria de la provincia, y que da ocupación a una parte de la población económicamente activa (PEA). A nivel de la actividad empresarial, el 74 % son microempresas, el 22% pequeña y medianas empresas y el 4% restante, son las denominadas grandes empresas. La industria se dedica a producir en un 53% bienes de consumo no duraderos, un 30% a bienes de capital y 17% bienes intermedios. El sector secundario representa el 16% de la PEA. La industria es muy incipiente y de toda la provincia, en la ciudad de Sullana (Sullana-Bellavista-Marcavelica) se encuentra más del 95% de las industrias. En los últimos años, en la zona de Cieneguillo al este de la ciudad, se han instalado industrias procesadoras de gran volumen, aprovechando las facilidades para la adquisición de terrenos de uso agrícola (luego convertidos en industriales), la proximidad a sus materias primas y las cargas impositivas prediales de tipo agrícola.

1.5. Estudios previos

Para la ciudad de Sullana, se ha recopilado la información sobre estudios previos de geología, geotécnica, sísmica y geofísica realizados por diversos investigadores e instituciones a fin de ser consideradas para los objetivos del presente. Entre los principales documentos técnicos consultados, se tiene:

- Lino (1992). Tesis para optar por título profesional: “Microzonificación Para la Prevención y Mitigación de Desastres de la Ciudad de Sullana”. El basamento rocoso se encuentra representado por la Fm. Zapallal (Tm-s) que está conformada por areniscas de colores blanco-amarillentas de grano fino a medio, compactas e intercaladas con calizas. Asimismo, esta litología aflora en las inmediaciones de la Loma de Teodomiro. Suprayaciendo, a la Fm. Zapallal, indica que se encuentran los depósitos Cuaternarios del Pleistoceno y Recientes, entre los primeros se tienen conglomerados de origen fluvial que afloran al norte de la ciudad, específicamente en las lomas de Mambré y Teodomiro, entre los depósitos recientes se tienen los de origen eólico y aluvial. De acuerdo a los estudios geotécnicos, se ha evidenciado que, el centro histórico se asienta sobre arenas eólicas (SP) con espesores entre 5 a 15m y con un ángulo de fricción de 37° (“N SPT” de 10). Entre el canal vía y mercado modelo se han identificado gravas arenosas (GP) y limosas (GM), en la carretera hacia Tambogrande se reconocieron arenas finas (SP) y limosas (SM) y en las inmediaciones, de la quebrada Cola del Alacrán se encontraron arenas limosas de espesores entre 1 a 1.70 (NSPT de 8).

- Instituto Nacional de Desarrollo Urbano (INADUR) (1999). "Mapa de Peligros, Plan de uso de Suelos y Plan de Mitigación de los Efectos Producidos por los Desastres Naturales en la Ciudad de Sullana", De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) en la ciudad de Sullana y alrededores se han identificado 5 tipos de suelos: suelo arenosos (SP) en las inmediaciones del sector urbano central, así como hacia el extremo occidental (Urb. Jardín y Nvo. Sullana); suelo arcilloso (SC) en las inmediaciones del hospital Solidaridad, Estadio Campeones del 36 y colegio Carlos Augusto Salaverry; Suelo arcilloso con greda en las inmediaciones de la Panamericana (Universidad San Pedro y terminal terrestre) y suelos gredoso (SM) hacia la carretera a Piura (Asoc. Adus y AAHH. 9 de Octubre y 15 de Marzo. Asimismo, en el informe se ha elaborado un mapa de peligros para la ciudad de Sullana, y en el cual se evidencia que, los sectores con Peligro Muy alto son las zonas inundables por el desborde de las quebradas Cola del Alacrán, Cieneguillo y Bellavista; Peligro Alto por la ocurrencia de probables deslizamientos en el talud que se ubica al norte de la ciudad (margen izquierdo del río Chira), así como en sectores aledaños a la quebrada Bellavista, al igual que algunas áreas de Santa Teresita y 9 de Octubre. Peligro medio en la mayoría del área urbana (Urb. Villa Primavera, Av. José de Lama y algunas zonas de Bellavista); y Peligro bajo en la parte sur de la ciudad (zona industrial)

- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), (2010) – "Estudio Mapa de Peligros, Plan de usos del Suelo Ante Desastres y Medidas de Mitigación de la Ciudad de Sullana". En dicho estudio se ha determinado que los suelos de la ciudad de Sullana están conformados, en las inmediaciones de la zona industrial (Carretera Panamericana), por limos y arcillas con espesores de 2 m. En la zona del Par Vial y hacia el este se reconocieron arenas finas (SP) y arenas limosas a profundidades mayores a 1 m; finalmente, indica que en las inmediaciones del canal vía y Mercado Modelo se encuentran gravas arenosas (GP) y limosas (GM). En cuanto a las condiciones dinámicas, el informe indica que, de acuerdo a la norma E 030, los suelos de cimentación de la ciudad de Sullana se consideran flexibles y la velocidad de onda de corte no es mayor a 500 m/s y los periodos de vibración natural del suelo es mayor a 0.90 segundos. Asimismo, indica que para un periodo de retorno de 475 años la aceleración máxima para rocas es de 0.45 g y su intensidad sería de VI a VIII en la escala de Mercalli Modificada.

- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), (2015) – “Levantamiento de Información Sobre los Principales Sectores Vulnerables Ante inundación en la Ciudad de Sullana”. Entre las zonas consideradas con nivel de riesgo Alto se tiene la desembocadura de la quebrada Cieneguillo, Canal vía (altura de hospital de la solidaridad); mientras que, las zonas de riesgo Muy Alto se ubican en los sectores comprendidos en ambos márgenes del canal vía (sectores Buenos Aires y Urb. Sullana), Las inmediaciones de la quebrada Cieneguillo (carretera a Tambogrande, Es-Salud y Colegio Complejo educativo), el cuartel del ejército, así como el cauce de la quebrada Cola del Alacrán.

- Madrid (2016). Tesis para optar por título profesional: Fenómeno del Niño 97 – 98 en Sullana – Bellavista. Respecto al fenómeno del Niño del año 1982 – 1983, en el trabajo de investigación se indica que, este evento inicio en noviembre del año 1982 y culminó en junio del año 1983 y registro precipitaciones máximas de 148.1 mm, en el sector la quebrada se estima que se vieron afectados viviendas, colegios y un hospital. El área de influencia que abarcó aproximadamente una longitud de 4 km y un ancho aproximado de 200 a 300 m. Posterior a ello se construyó el actual canal vía (estructura de concreto armado) como parte del sistema de drenaje pluvial. Mientras que, el Fenómeno del Niño del periodo 1997 – 1998 (diciembre 1997 – abril 1998), es considerado como el de mayor intensidad (precipitaciones de 210 mm) debido a que dejó como consecuencias: 120,637 damnificados y 10,255 viviendas destruidas.

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, sísmicas 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 Sísmica - 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 de las sacudidas sísmicas 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.

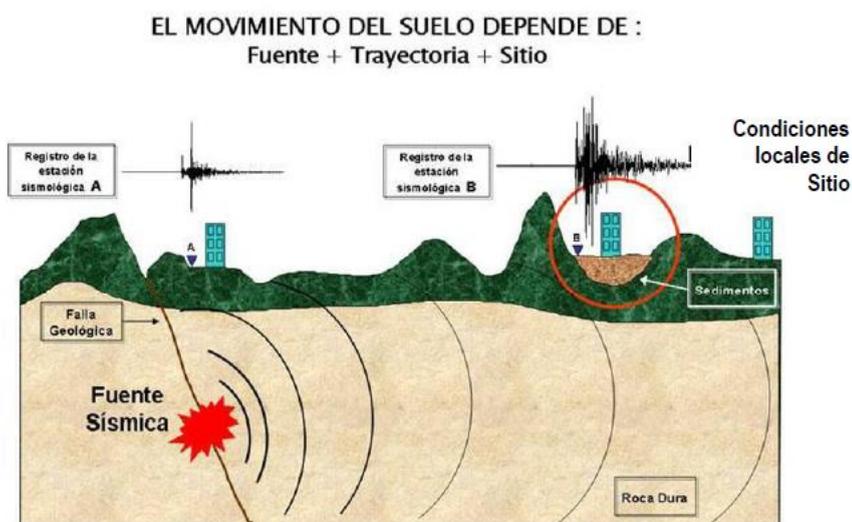


Figura 5: Las condiciones locales de sitio controlan la amplificación del sacudimiento del suelo, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos.

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 Sísmica - 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 lo establecido por 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 N_{60} 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 establece 5 perfiles:

- **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 1).

Tabla 1: 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 Sísmica – 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.

CONCLUSIONES

El estudio de Zonificación Sísmica - Geotécnica para la ciudad de Sullana, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Existen diez unidades geomorfológicas en la ciudad de Sullana: lecho fluvial, islotes, llanura de inundación, terraza fluvio – aluvial, cauce aluvial estacional, terraza aluvial, llanura aluvial, acantilado, loma y montaña. La zona urbana se asienta sobre la unidad terraza aluvial.
- El sustrato rocoso consta de rocas de la Formación Chira, cuyos afloramientos consisten en lutitas y areniscas que se encuentran en el margen derecho del río Chira (Marcavelica) y en la parte baja de la loma de Mambré, al noreste de la ciudad de Piura; mientras que, los depósitos del Cuaternario están conformados por materiales de origen aluvial, fluvial y eólico sobre los cuales se asienta la ciudad de Sullana.
- Los suelos de la ciudad de Sullana presentan dos tipos de capacidad portante: Muy baja ($< 1.0 \text{ Kg/cm}^2$) que predominan en la mayor parte de la ciudad y ocupan el 78 % del área de estudio y capacidad portante baja ($1.0 - 2.0 \text{ Kg/cm}^2$) en menor proporción (22%).
- Los valores de velocidad promedio calculados para los primeros 30 metros de profundidad (V_{s30}), según la norma E030-2018, clasifica el área de estudio en dos tipos de suelo, el primero, con rangos de velocidad V_{s30} entre 347 a 457 m/s lo cual sugiere suelos medianamente rígidos emplazados hacia el sur y sureste de Sullana. En el resto del área de estudio, con rango de velocidad V_{s30} entre 526 a 590 m/s sugiere suelo muy rígido.
- Los resultados obtenidos para el área urbana de Sullana a partir de sus características físicas y dinámicas del suelo, han permitido identificar, de acuerdo a las consideraciones indicadas en la Norma de Construcción Sismorresistente E-030, la existencia de suelos de Tipo S1 y S4 (Figura 6).

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

CONTENIDO

1. METODOLOGÍA
2. GEOMORFOLOGÍA
 - 2.1. Levantamiento fotogramétrico
 - 2.2. Modelo Digital del Terreno (MDT)
 - 2.3. Pendientes
 - 2.3.1. Clasificación del grado de pendientes
 - 2.4. Unidades geomorfológicas
 - 2.4.1. Origen denudacional
 - 2.4.2. Origen depositacional
 - 2.4.3. Origen erosional
 - 2.4.4. Origen tectónico
3. GEOLOGÍA
 - 3.1. Geología regional
 - 3.1.1. Geología histórica
 - 3.2. Geología local
 - 3.2.1. Formación Chira (Te-ch)
 - 3.2.2. Formación Miramar (Tm-m)
 - 3.3. Depósitos Cuaternarios
 - 3.3.1. Depósitos fluvio – aluvial (Qh-fal)
 - 3.3.2. Depósitos eólicos (Qh-e)
 - 3.3.3. Depósitos aluvial 2 (Qh-al2)
 - 3.3.4. Depósito aluvial 1 (Qh-al1)
 - 3.3.5. Depósitos Fluvial (Qh-fl)
4. GEODINÁMICA
 - 4.1. Procesos de geodinámica interna
 - 4.2. Procesos de geodinámica externa
 - 4.2.1. Inundación fluvial
 - 4.2.2. Inundación pluvial
 - 4.2.3. Inundación aluvial
 - 4.2.4. Erosión fluvial
 - 4.2.5. Zonas susceptibles a derrumbes
5. ASPECTOS GEOTÉCNICOS
 - 5.1. Exploraciones a cielo abierto
 - 5.1.1. Densidad del suelo in-situ
 - 5.2. Exploraciones con posteadora
 - 5.3. Ensayo de penetración dinámica ligera - DPL
 - 5.4. Clasificación de suelos SUCS

5.5. Ensayos de corte directo

5.5.1. Capacidad de carga admisible

CONCLUSIONES

1. METODOLOGÍA

Para realizar la caracterización geológica y geotécnica de los suelos en la ciudad de Sullana se ha seguido la siguiente metodología:

- **Gabinete I:** Las actividades realizadas incluyeron la revisión de imágenes satelitales (Orto imagen con 3.0 m. de resolución del servidor Perú SAT-1, año 2017) debidamente georreferenciados haciendo uso de sistemas de información geográfica (SIG). Asimismo, se procedió con la recopilación de información geológica-geotécnica regional y local existente (boletines geológicos, informes técnicos, entre otros).
- **Campo I:** Se realizó el cartografiado de las unidades geomorfológicas y litológicas aflorantes a escala 1:25,000. Asimismo, se identificó y delimitó los eventos geodinámicos relacionados a inundaciones fluviales (desborde del río Chira sobre la margen izquierda) que afecta zonas agrícolas, así como pluviales (acumulación de las aguas de escorrentía en zonas de depresión) en las inmediaciones del área urbana del distrito de Sullana.
- **Campo II:** Elaboración de ensayos geotécnicos de acuerdo al siguiente detalle
Elaboración de calicatas: Éstas se realizaron a una profundidad promedio de 3.00 m. En Sullana se realizaron 08 calicatas distribuidas en las inmediaciones de la zona urbana.

Ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), éstos se elaboraron con el fin de determinar la resistencia de los suelos al ser penetrado. En Sullana se realizaron 11 DPLs.

Ejecución de auscultaciones haciendo uso de una posteadora, éstas se distribuyeron en zonas intermedias a la ubicación de las calicatas más próximas, con el fin de determinar el tipo de suelo. En el área de estudio se llevaron a cabo 10 posteos.

- **Laboratorio:** Análisis de las muestras de suelos, a través de ensayos de laboratorio, tales como granulometría y límites de Atterberg (tipo de suelos SUCS), humedad, densidad y corte directo (capacidad portante).

- **Gabinete II:** Elaboración del informe técnico que acompañado de los siguientes anexos: fichas geotécnicas (calicatas, posteos, DPL, correlación DPL con SPT y análisis granulométrico), fichas geodinámicas (identificación de zonas susceptibles a movimientos en masa e inundaciones) y planos temáticos a escala 1: 25,000 (cabe indicar que, estos se elaboraron a escala gráfica 1:30,000 para mejor representación visual).

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 (Gutierrez, 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 Sullana, en relación a su origen.

Previamente, en base al levantamiento fotogramétrico realizado y mediante herramientas computacionales SIG, se han elaborado los planos: Modelo Digital de Elevación (MDE) y Pendientes con el fin de delimitar las características geomorfológicas del terreno (geoformas), éstas fueron verificadas y validadas durante el trabajo de campo, a través del cartografiado y delimitación de las unidades geomorfológicas en la ciudad de Sullana.

2.1. Levantamiento fotogramétrico

Para la ejecución del levantamiento, se utilizó un vehículo aéreo no tripulado (VANT), servicio que fue contratado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) a una consultora particular para realizar las mediciones de la superficie del terreno. La metodología y los parámetros empleados en el levantamiento fotogramétrico se presentan en los Anexos.

A partir, del levantamiento fotogramétrico, se obtuvo un plano topográfico a escala 1:5,000, el mismo que contiene curvas de nivel (líneas que unen puntos con igual altitud) con resolución espacial de 5 m.

2.2. Modelo Digital del Terreno (MDT)

Los MDT son representaciones gráficas 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 para la ciudad de Sullana, se tomó en cuenta el uso de herramientas SIG sobre las curvas de nivel diseñadas anteriormente, obteniendo como resultado la representación digital de la superficie del terreno de la localidad, que cubre un área de 1,588.6 m² (Figura 1).

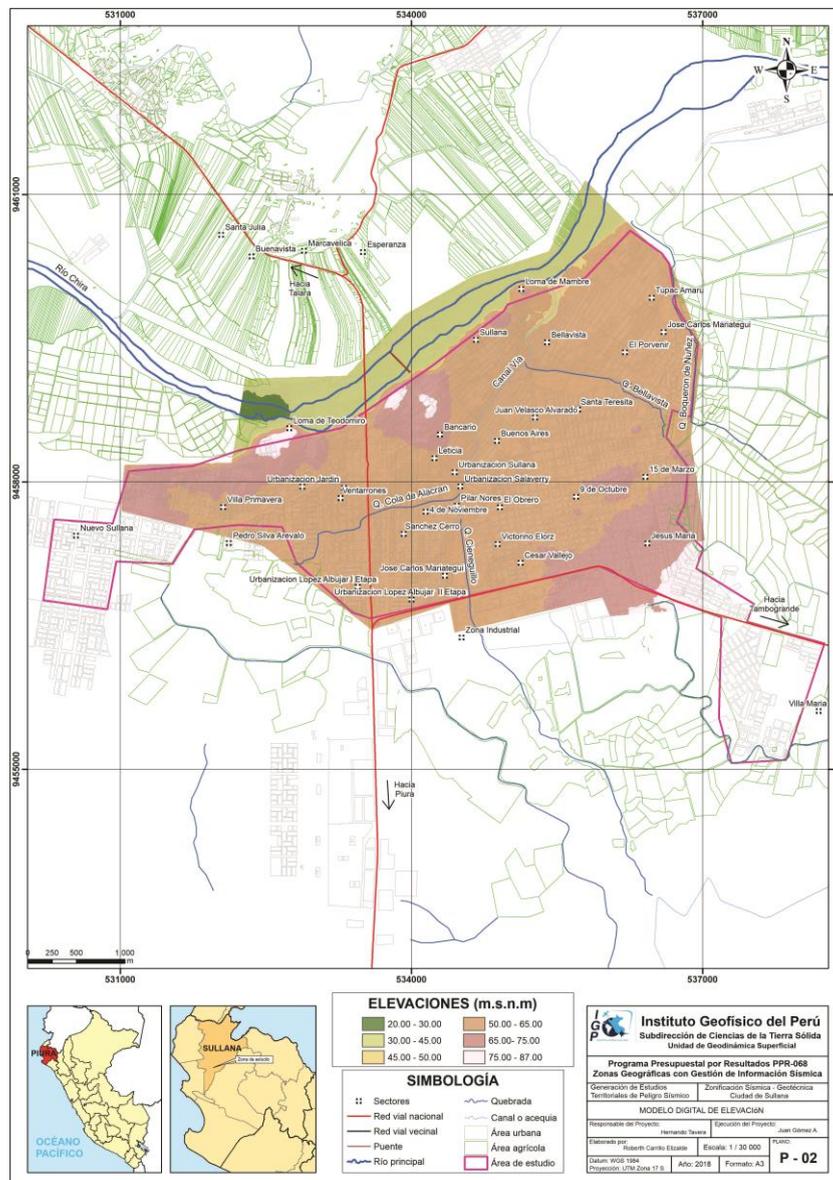


Figura 1: Mapa de modelo digital de elevación de la ciudad de Sullana y alrededores.

En base al MDE elaborado para ciudad de Sullana, se ha reconocido que en las inmediaciones del río Chira y en sus márgenes, el terreno presenta elevaciones menores a los 45 m.s.n.m. El área urbana, en general (Centro cívico, Bellavista, Buenos Aires, Urb. Los Ingenieros y AA.HH. Los Algarrobos, Urb. López Albújar, 9 de octubre y El Obrero), presentan altitudes entre 50 y 65 m.s.n.m. Finalmente, se observan elevaciones superiores a los 65 m.s.n.m en las inmediaciones de la Loma Teodomiro, Loma de Mambré, inmediaciones del hospital y en el extremo sur de la ciudad (Jesús María, Villa María y carretera a Piura).

2.3. Pendientes

Es el ángulo 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 de mapa de pendientes de la ciudad de Sullana fue desarrollado a partir del MDE 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 (Figura 2).

2.3.1. Clasificación del grado de pendientes

Para la clasificación de los rangos de pendientes se usó como base el informe: “Estudio de riesgos geológicos del Perú de Fidel, et. al. (2006), ver Tabla 1:

Tabla 1: 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 parte de la ciudad de Sullana se encuentra asentada sobre relieves llanos (terrazza aluvial y llanura aluvial) que presenta pendientes inferiores a los 5° sin

embargo, en el extremo norte del área urbana (malecón Turicarami), se encuentra un talud o acantilado con pendiente inferior a los 35°.

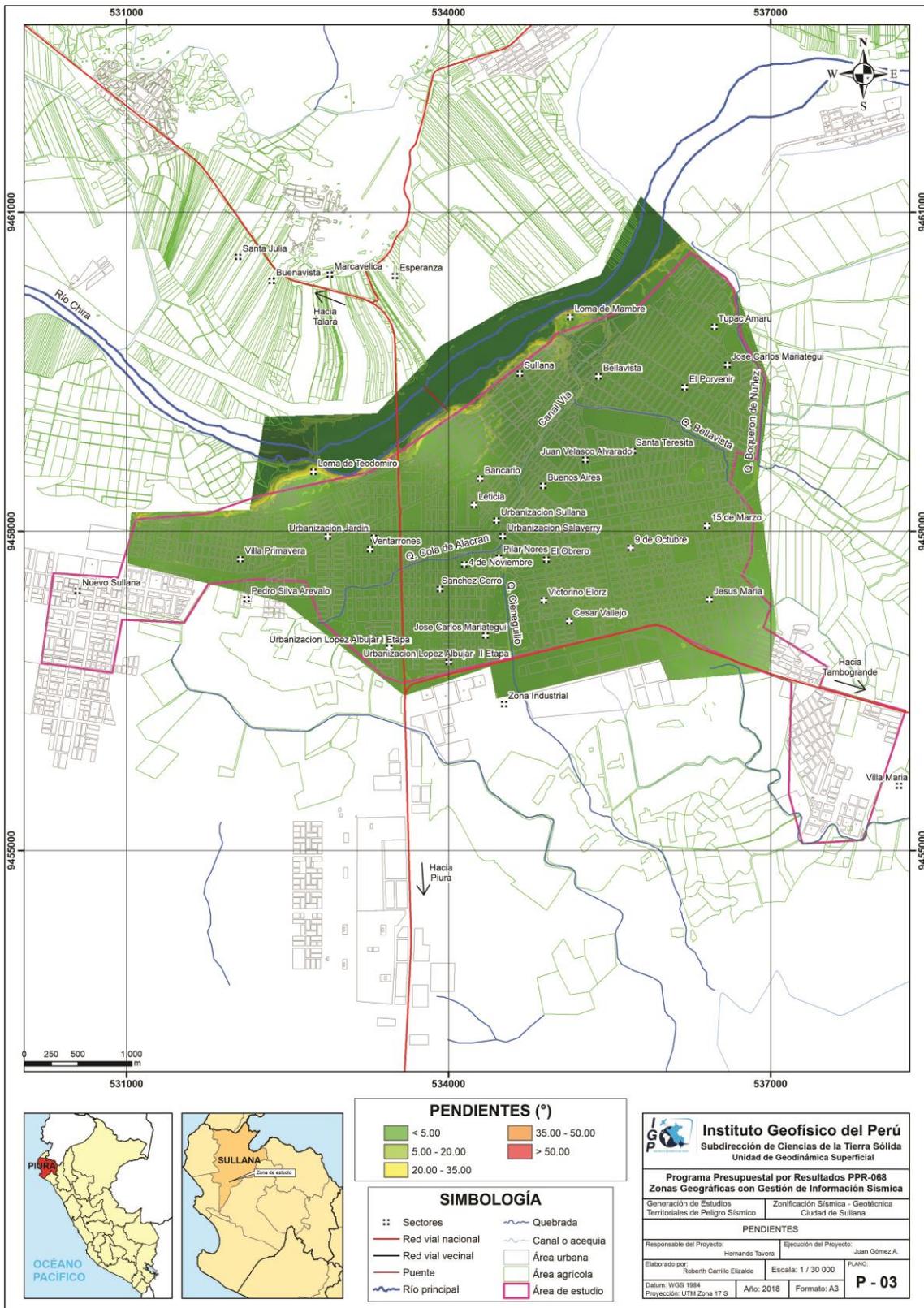


Figura 2: Mapa de pendientes del terreno de la ciudad de Sullana y alrededores.

2.4. Unidades geomorfológicas

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

Características físicas: Las características físicas de la geoforma; 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 tales como el agua, viento, temperatura, entre otros, desencadenan diversos procesos externos tales como: intemperismo, meteorización, erosión, transporte y depositación generando diferentes geoformas, clasificándose de acuerdo a su origen en depositacional, denudacional (erosional). Otros procesos internos como el magmatismo, tectonismo, entre otros, generan geoformas de origen estructural.

En base a las características físicas de las geoformas y su origen, en el distrito de Sullana, se cartografiaron 10 unidades (Figura 3): lecho fluvial, islote, llanura de inundación, terraza fluvio - aluvial, terraza aluvial, cauce aluvial estacional, terraza aluvial, llanura aluvial, acantilado, loma y montaña. Las características físicas de estas unidades se detallan en la tabla 2.

2.4.1. Origen denudacional

Son aquellas geoformas que resultan de la denudación (meteorización y/o erosión) que ocurren sobre relieves emergidos que alcanzan una considerable altitud, bien sea por procesos orogénicos o epirogénicos; así como zonas de depresión o valles. La denudación comprende un conjunto de procesos que determinan la degradación o rebaje de la superficie del terreno.

Los procesos de denudación actúan sobre cualquier tipo de roca que según el origen, estructura y composición de ésta puede acelerar o retardar el desgaste de la misma. Entre las unidades geomorfológicas a considerar se tiene: lecho fluvial, cauce aluvial estacional y loma.

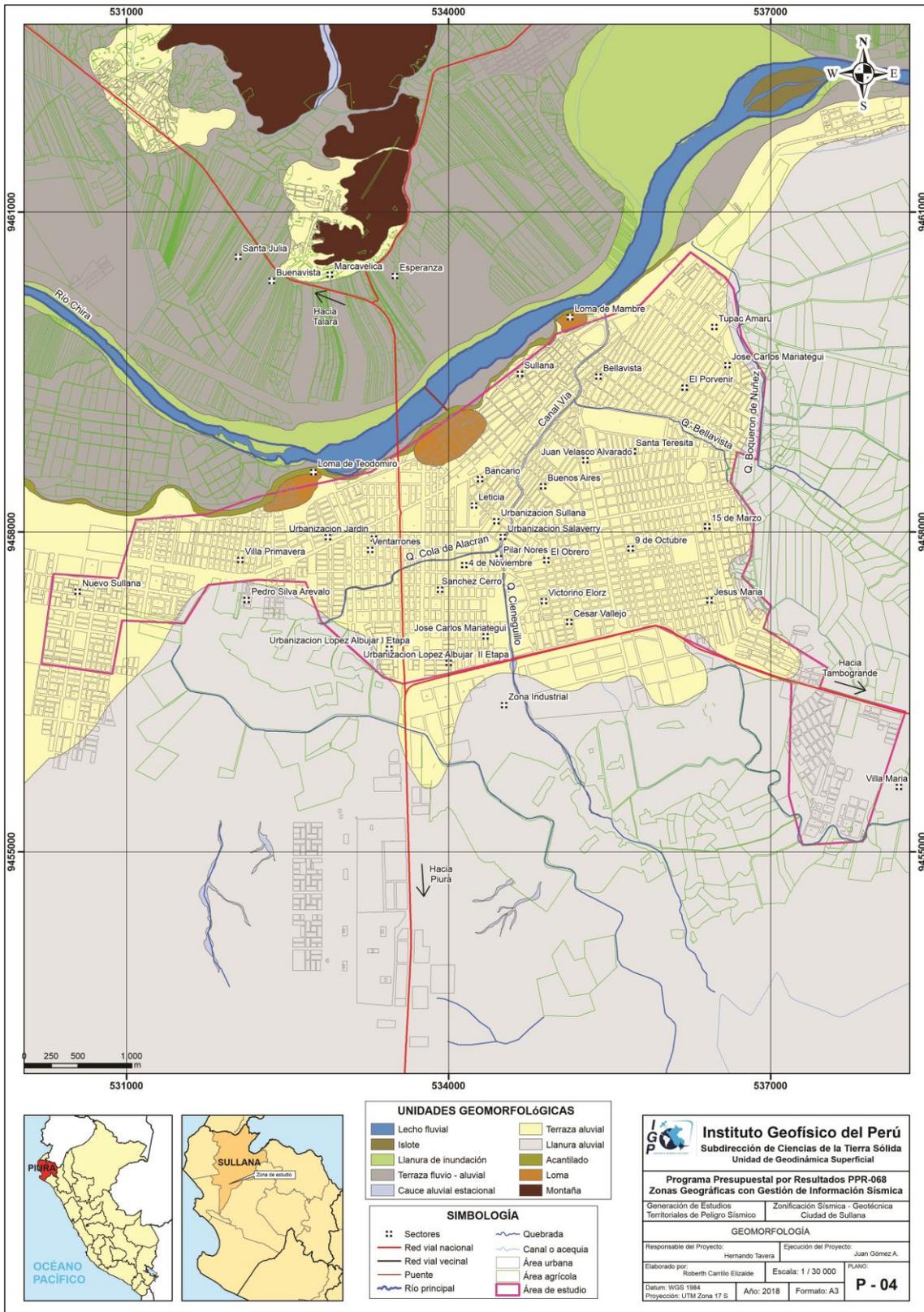


Figura 3: Mapa geomorfológico para la ciudad de Sullana y alrededores.

Tabla 2: Determinación de geoformas en el distrito de Sullana en base a las características físicas y su origen.

GEOMORFOLOGÍA SULLANA			
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		ORIGEN	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA
Pendiente	<5°	Denudacional	Lecho fluvial
Altitud (m.s.n.m)	20 - 45		
Geometría	Regular		
Drenaje	Dendrítico		
Pendiente	<5°		Cauce aluvial estacional
Altitud (m.s.n.m)	60 - 80		
Geometría	Irregular		
Drenaje	Irregular		Loma
Pendiente	> 20°		
Altura	5 - 20 m		
Geometría	Alargada		
Drenaje	Radial		Deposicional
Pendiente	<5°	Islote	
Geometría	Alargado		
Drenaje	Variable		
Pendiente	<5°	Llanura de inundación	
Geometría	Alargada		
Drenaje	Variable		
Pendiente	5° - 20°	Terraza aluvial	
Geometría	Alargada		
Drenaje	Variable		
Pendiente	< 5°	Terraza fluvio - aluvial	
Geometría	Regular		
Drenaje	Paralelo		
Pendiente	< 5°	Llanura aluvial	
Geometría	Alargada		
Drenaje	Variable		
Pendiente	> 20°	Erosional	Acantilado
Geometría	Alargada		
Drenaje	Variable		
Pendiente	> 35°	Tectónico	Montaña
Geometría	Alargada		
Drenaje	Variable		

Lecho fluvial: Es el canal excavado por el flujo de agua de un río y los sedimentos que este transporta durante todo su desarrollo y evolución. La morfología del lecho depende del caudal, la pendiente, el tamaño del sedimento y de lo erosionable que sea el substrato rocoso, es decir, es producto de un equilibrio dinámico entre la carga de sedimentos y su capacidad de transporte.

El lecho fluvial del río Chira se desplaza con dirección noreste – suroeste. En el trayecto que colinda con la ciudad de Sullana, específicamente al margen izquierdo del río, el ancho del cauce llega a medir 218 m. antes de la compuerta ubicada en las inmediaciones de la Loma de Teodomiro y 70 m. aproximadamente después de la presa. Abarca un área de 161.9 ha, que representa el 1.94% del total del área estudiada (Figura 4).



Figura 4: Lecho fluvial del río Chira la ciudad de Sullana y alrededores.

Cauce aluvial estacional: Constituye el cauce de las quebradas que se activan durante los periodos de lluvias. La morfología del lecho depende del caudal, la pendiente, el tamaño del sedimento y de lo erosionable que sea el substrato rocoso; es decir, es producto de un equilibrio dinámico entre la carga de sedimentos y su capacidad de transporte.

Abarca un área de 28.39 ha, que representa el 0.33 % del área de estudio (Figuras 5 y 6). Entre estas unidades geomorfológicas se tienen las quebradas Cola del Alacrán, Cieneguillo, Bellavista y Boquerón de Núñez. Cabe mencionar que las 3 primeras drenan sus aguas al canal Vía (canal asfaltado que pasa por la parte central de la ciudad de Sullana en épocas de lluvia) hasta la desembocadura al río Chira.



Figura 5: Cauce aluvial estacional de la quebrada Cola del Alacrán ubicado en las inmediaciones de la Urb. Jardín I Etapa de la ciudad de Sullana y alrededores.



Figura 6: Cauce aluvial estacional de la quebrada Cieneguillo, ubicado en las inmediaciones de la carretera hacia Tambogrande, durante el periodo de lluvias se activa, inundando zonas aledañas.

Loma: Elevaciones topográficas de altura menor a 100 m. cuyo relieve presenta pendientes menores de 35°, se caracteriza por tener forma alargada. Se encuentra conformada por las lomas Mambré, Teodomiro y sobre la que se asienta el hospital de Sullana. Esta unidad geomorfológica abarca un área de 44.55 ha, que representa el 0.53% del área total (Figura 7).



Figura 7: Loma Teodomi (línea amarilla), ubicada en las inmediaciones de la Urb. Santa Rosa, parte posterior de la base del ejército.

2.4.2.- Origen depositacional

Comprende geoformas resultantes por la depositación de fragmentos o sedimentos originados durante los procesos de erosión de rocas preexistentes en áreas geográficas generalmente de baja pendiente.

Entre las unidades geomorfológicas que se encuentran relacionadas con la dinámica aluvial y fluvial son: islote, llanura de inundación, terraza fluvio – aluvial, terraza aluvial y llanura aluvial.

Islote: Constituye zonas de acumulación de sedimentos en las inmediaciones del cauce del río Chira. Esta unidad se ubica 3.5 km al noroeste de la plaza principal de la ciudad de Sullana, frente a Salitral.

Llanura de inundación: Consiste en una superficie plana que se ubica en ambos márgenes del río Chira y es la zona que comúnmente es inundada durante los periodos de lluvia (enero – abril). En la zona de estudio esta unidad ha sido formada por la acción del fluvial del río Chira, que erosiona, transporta y deposita grandes volúmenes de sedimentos en la parte media y baja de la cuenca.

Esta unidad está conformada por material fluvial (arenas y limos), en la zona de estudio presenta una longitud promedio de 9 km. en el margen derecho del río Chira, desde Salitral hacia aguas abajo. Asimismo, se reconoció que la zona inundable en el margen derecho del río Chira comprende 3.1 km a partir de la Loma Mambré. Esta unidad abarca, en la zona de estudio, un área 348.17 ha, que representa el 4.16 % del total, ver Figura 8.



Figura 8: Llanura de inundación (polígono amarillo) ubicada en el margen izquierdo del río Chira (parte baja de compuertas).

Terraza fluvio – aluvial: Superficie llana y cuyo relieve presenta pendientes menores a 5°. Generalmente, se encuentra conformada por materiales heterogéneos de origen fluvio – aluvial (clastos subangulosos a subredondeados envueltos en una matriz areno-limosa) y capas delgadas de limos.

Sobre esta unidad se asienta el valle del Chira, zona en que se vienen desarrollando actividades agrícolas. Abarca un área de 348.17 ha, que involucra un 4.16 % del total del área en estudio, ver Figura 9.



Figura 9: Terraza fluvio – aluvial (polígono amarillo) que se ubica en el margen derecho del río Chira, sobre esta unidad se asienta el Valle del Chira.

Terraza aluvial: Superficies horizontales o ligeramente inclinadas, cuyo relieve presenta pendientes menores a 7°. Generalmente se encuentra conformada por materiales heterogéneos (clastos subangulosos a subredondeados envueltos en una matriz areno-limosa) y capas delgadas de limos.

Sobre esta unidad se asienta el casco urbano de Sullana y comprende un área de 1852.10 ha, que involucra un 22.15 % del total del área estudiada, (Figura 10).



Figura 10: Terraza aluvial (polígono amarillo) sobre la cual se asienta el casco urbano de la ciudad de Sullana.

Llanura aluvial: Superficie semillana, cuyo relieve presenta pendientes menores a 15°. Generalmente, se encuentra conformada por materiales heterogéneos de origen aluvial (clastos subredondeados envueltos en una matriz areno-limosa) y capas delgadas de limos.

Esta unidad se ubica en el extremo sur de la ciudad y presenta altitudes mayores a 70 m.s.n.m.; comprende la zona industrial, carretera a Tambogrande, Asoc. Adus y sector Villa María. Abarca un área de 3952.36 ha, que involucra un 47.27 % del total del área estudiada, ver Figura 11.



Figura 11: Llanura aluvial (polígono amarillo), ubicada en las inmediaciones del autódromo de Sullana, en el extremo sur de la ciudad de Sullana (carretera hacia Piura).

2.4.3. Origen erosional

Se trata del desgaste de los suelos o rocas aflorantes, controlados por factores como: propiedades del flujo, pendiente, litología, clima, actividad biológica e intervención antrópica.

Acantilado: Esta unidad geomorfológica constituye relieves verticales con pendientes mayores a 35° (desniveles topográficos abruptos), así como geometría y drenaje regular. Se hace mención que, esta unidad abarca 30.21 ha, comprende el 0.36 % del área de estudio y se encuentra en el margen izquierdo del río Chira, ver Figura 12.



Figura 12: Acantilado ubicado en la margen izquierda del río Chira, sobre este se ubica la terraza aluvial sobre la cual se asienta el área urbana de Sullana.

2.4.4. Origen tectónico

La génesis de este tipo de geoforma se encuentra asociada a esfuerzos endógenos (epirogénesis) que actuaron sobre grandes paquetes de rocas o sedimentos de diverso origen, entre las unidades reconocidas en el área de estudio se tiene:

Montaña: Son elevaciones del terreno que constituyen relieves verticales con pendientes mayores a 35° (desniveles topográficos abruptos), así como geometría y drenaje regular. Esta unidad geomorfológica se ubica en el margen derecho del río Chira, inmediaciones de Marcavelica; comprende 242.87 ha y abarca el 20.52 % del área de estudio, ver Figura 13.



Figura 13: Acantilado ubicado en la margen izquierda del río Chira, sobre este se ubica la terraza aluvial sobre la cual se asienta el área urbana de Sullana.

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 (procesos 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 dejan espacios por donde 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 depositada se convierte en suelo. Los procesos químicos son complejos y dependen de los diversos minerales que constituyen las rocas lo que determina también su dureza y fragilidad. Por ejemplo: la sílice (SiO_2) 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 del 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, caída de rocas).

Para entender el comportamiento 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 asienta la zona estudiada.

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: 100, 000. En ésta, se describen las unidades litológicas aflorantes cuyas edades se encuentran desde el Cretáceo Inferior (145 Ma) hasta el Cuaternario Reciente.

3.1.1. Geología histórica

Según, Palacios, (1994), la historia geológica del área de estudio, durante el Paleozoico Inferior se desarrolló en un ambiente de aguas marinas someras y con la depositación de sedimentos de facies pelíticas. Luego, en el Devónico Superior, tiene lugar la tectónica Hercínica que originó procesos de metamorfismo y deformación. A continuación, en el Paleozoico Superior ocurren fallamientos en bloques a nivel regional, dando lugar a cuencas estructurales con aportes de sedimentos marinos y continentales. Seguió de un proceso de transgresión marina hasta el Cretáceo que generó materiales calcáreos, en el Albiano la cuenca es influenciada por procesos de epirogenésis en paralelo con procesos volcánicos.

En la parte final del Cretáceo y comienzos del Terciario, se produjeron procesos epirogénicos que originaron el levantamiento de la cuenca sedimentaria (Los Andes), relacionados a la “Fase Peruana”, debido a ello se generaron regresiones marinas, seguidos de erosión en forma cíclica que permitió la depositación de conglomerados cubiertos por areniscas, limolitas y agilitas.

En el Eoceno Superior, el mar alcanzó su máxima extensión entre Paita y Sullana e ingresando a la cuenca Sechura y en el Oligoceno se produce la transgresión de norte a sur. A fines del Mioceno un nuevo levantamiento reactiva fallas y fracturas ubicadas al noroeste y norte, dando lugar a la regresión del mar y erosión intensa. Nuevamente en el Plioceno los mares ingresan al continente por el norte y sur, depositando una secuencia clástica arcillo-arenosa, proceso que continuó hasta el Plio-Pleistoceno, formándose los tablazos a manera de terrazas.

Finalmente, la región adquiere fisiografía similar a la actual, seguidos durante el Pleistoceno a la actualidad procesos geodinámicos e intensa actividad eólica que

condicionaron la acumulación y sedimentación de materiales detríticos (sedimentos eólicos y fluviales) que originaron depósitos cuaternarios recientes, tales como: depósitos, fluviales, aluviales y eólicos.

3.2. Geología local

La geología local, consistió en el reconocimiento y cartografiado de las unidades litológicas aflorantes en la ciudad de Sullana a escala 1:25,000; que abarcó un área de 81 km² aproximadamente. En la Tabla 3 se describen las unidades geológicas y en la Figura 14 se presenta el mapa de geología local elaborado con los datos obtenidos en campo:

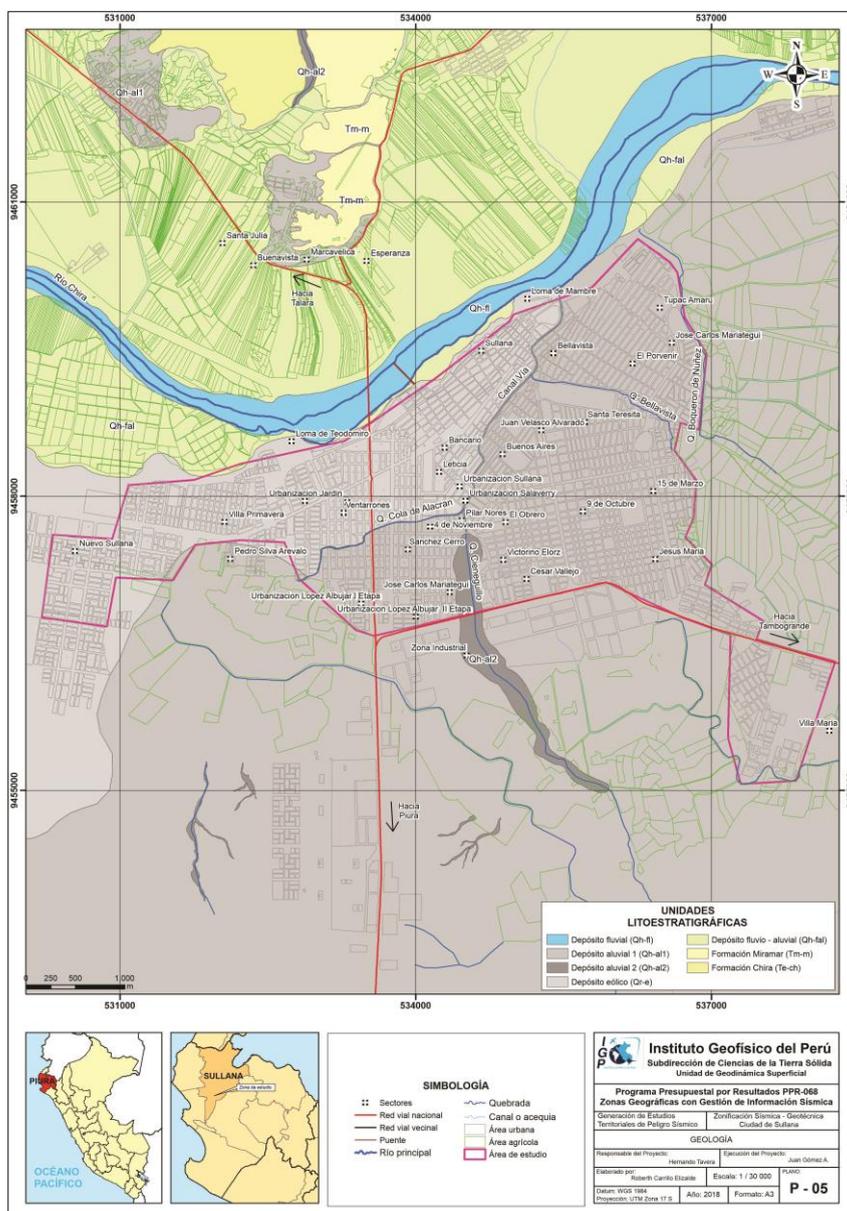


Figura 14: Mapa geológico de la ciudad de Sullana.

Tabla 3: Columna crono-litoestratigráfica de la zona de estudio. Fuente: Palacios, (1989).

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS	SÍMBOLO	LITOLÓGÍA
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	DEPÓSITO FLUVIAL	Qh-fl	GRAVAS REDONDEADAS Y ARENAS CON POCA O NULA PLASTICIDAD
			DEPÓSITO EÓLICO	Qr-e	ARENAS FINAS Y SUELTAS
			DEPÓSITO ALUVIAL 1	Qh-al1	MATERIALES HETEROGENEOS (GRAVAS Y ARENAS)
			DEPÓSITO ALUVIAL 2	Qh-al2	
			DEPÓSITO FLUVIO - ALUVIAL	Qh-fal	MATERIALES HETEROGENEOS (GRAVAS, ARENAS Y LIMOS)
	TERCIARIO	PLIOCENO			
		MIOCENO	FM. MIRAMAR	Tm-m	CONGLOMERADOS MEZCLADO CON ARENISCAS ARCÓNICAS
		EOCENO	FM. CHIRA	Te-ch	LUTITAS MUY DELGADAS, ARENISCAS Y HORIZONTES DE CONGLOMERADOS

3.2.1. Formación Chira (Te-ch)

Constituida por una secuencia de rocas como son lutitas bentónicas, areniscas y horizontes de conglomerados, de colores oscuros a rojizos, debido a los procesos de intemperización. Esta unidad constituye el sustrato del área de estudio, se identificó en el margen derecho del río Chira, en la vía Marcavelica – Querecotillo, Figuras 15 y 16.



Figura 15: Lutitas intercaladas con horizontes finos de bentonitas de la Fm. Chira, ubicadas en el margen derecho del río Chira (3.2 km de la plaza principal de Sullana), en el relleno de la ciudad de Marcavelica.



Figura 16: Bentonitas y areniscas de la Fm. Chira, identificadas en la vía Sullana – Querecotillo.

3.2.2. Formación Miramar (Tm-m)

Constituida por conglomerados con areniscas arcósicas de grano fino y color amarillo, son poco compactas y deleznales; debido a ello son susceptibles a la erosión. Esta unidad fue identificada en el margen izquierdo del río Chira, en la parte baja de la loma de Mambré, ver Figura 17.



Figura 17: Corte ubicado en el margen izquierdo del río Chira (parte baja de loma Mambré), donde se identificaron secuencias de areniscas en la parte inferior, conglomerados en el medio y en la parte superior arenas, pertenecientes a la Fm. Chira.

3.3. Depósitos Cuaternarios

Suprayaciendo al sustrato rocoso conformado por rocas Terciarias, se encuentran los depósitos Cuaternarios de edad Holocena. Entre los cuales, en la zona de estudio predominan los depósitos aluviales y eólicos.

3.3.1. Depósito fluvio – aluvial (Qh-fal)

Están constituidos materiales heterogéneos, tales como arenas con presencia de clastos subredondeados y capas de limos que se encuentran en ambos márgenes de los ríos y en la parte baja de quebradas. Cabe mencionar que, sobre estos tipos de depósitos se asienta el valle del Chira y sobre el cual se vienen desarrollando actividades agrícolas (Figura 18).



Figura 18: Depósitos fluvio – aluviales en el margen izquierdo del río Chira.

3.3.2. Depósitos eólicos (Qh-e)

Están conformados por arenas de grano medio a fino, color gris a beige. Éstos han sido transportados por la acción de los vientos. Se ha identificado que la parte central de la ciudad de Sullana se asienta sobre esta unidad geológica que presenta espesores de 5 m. Además, estos conforman las lomas Teodomiro y Mambré, (Figuras 19 y 20).



Figura 19: Depósitos eólicos en los acantilados que conforman el malecón Turicarami, margen izquierdo del río Chira.



Figura 20: Depósitos eólicos en las inmediaciones de la loma Teodomiro y acantilados ubicados en el margen izquierdo del río Chira.

3.3.3. Depósito aluvial 2 (Qh-al2)

Esta unidad geológica se le conoce como depósitos aluviales recientes, está conformada por materiales heterogéneos (arenas, limos y gravas en menor proporción). Se encuentran cubiertos por materiales eólicos y conforman los cauces de quebradas activas durante el periodo de lluvias (Figura 21).



Figura 21: Depósitos aluviales 2 en el cauce de las quebradas que se ubican en el extremo sur de la ciudad de Sullana, inmediaciones de la carretera Sullana – Piura.

3.3.4. Depósito aluvial 1 (Qh-al1)

Esta unidad geológica se le conoce como depósitos aluviales antiguos, está conformada por materiales heterogéneos (Gravas subredondeadas, arenas y limos). Sobre esta unidad geológica se ubica la zona urbana de la ciudad de Sullana, ver Figura 22.



Figura 22: Depósitos aluviales 1 conformados por mezcla de arenas, limos y arcillas; sobre los cuales se asienta el área urbana de la ciudad de Sullana.

3.3.5. Depósito Fluvial (Qh-fl)

Materiales resultantes de la meteorización y/o erosión, traslado y depositación de rocas preexistentes, transportados por una corriente fluvial permanente, encontrándose depositados en el cauce de los lechos de los ríos existentes en el área estudiada. Esta unidad geológica está conformada por gravas redondeadas y arenas de grano medio a grueso, presentan plasticidad baja y se encuentran a lo largo del cauce del río Chira y en márgenes, ver Figura 23.



Figura 23: Depósitos fluviales ubicados en las inmediaciones del lecho del río Chira, están conformados por gravas y arenas sueltas.

4. 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 producto 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 (Figura 24).

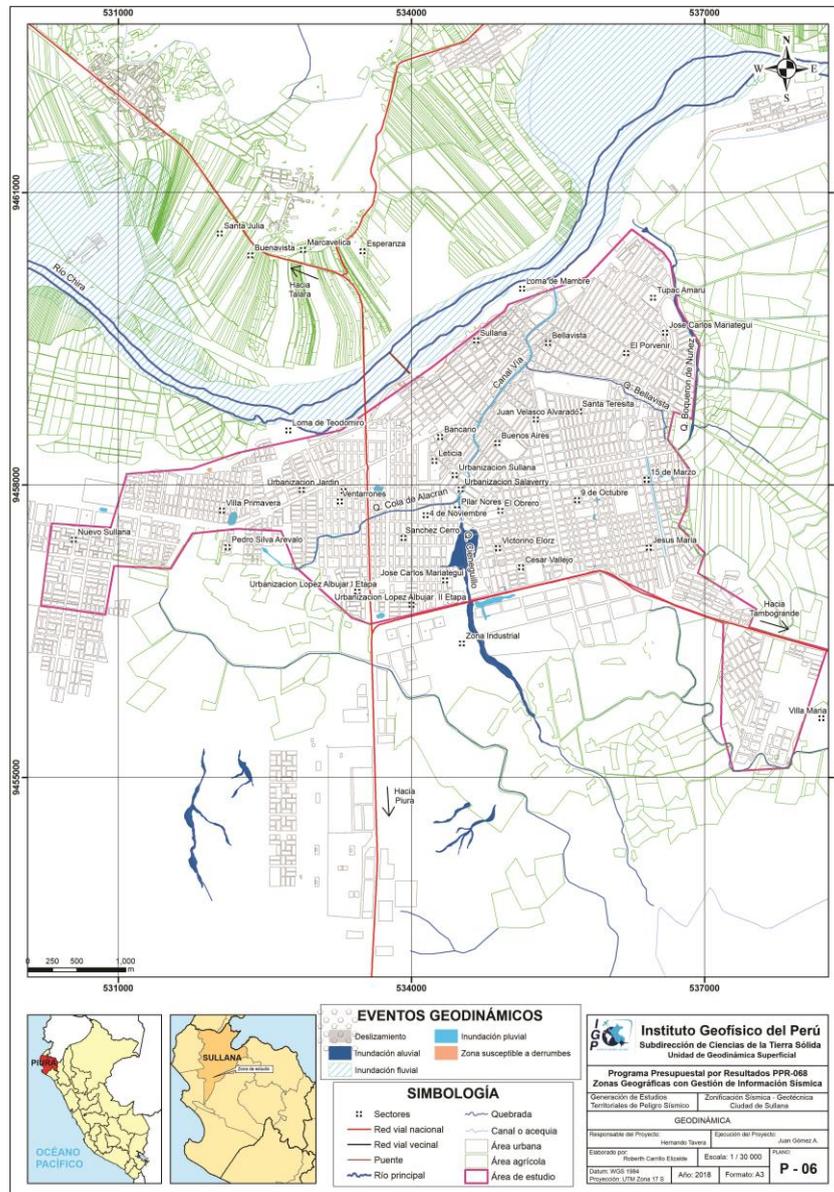


Figura 24: Mapa de geodinámica de la ciudad de Sullana y alrededores.

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, uso del suelo y construcción de vías de comunicación). Por otro lado, tal como se indicó anteriormente existen dos procesos descritos a continuación:

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 25), los cuales se dividen según su origen en: fluvio-aluvial e hidro-gravitacional, descritos a continuación.

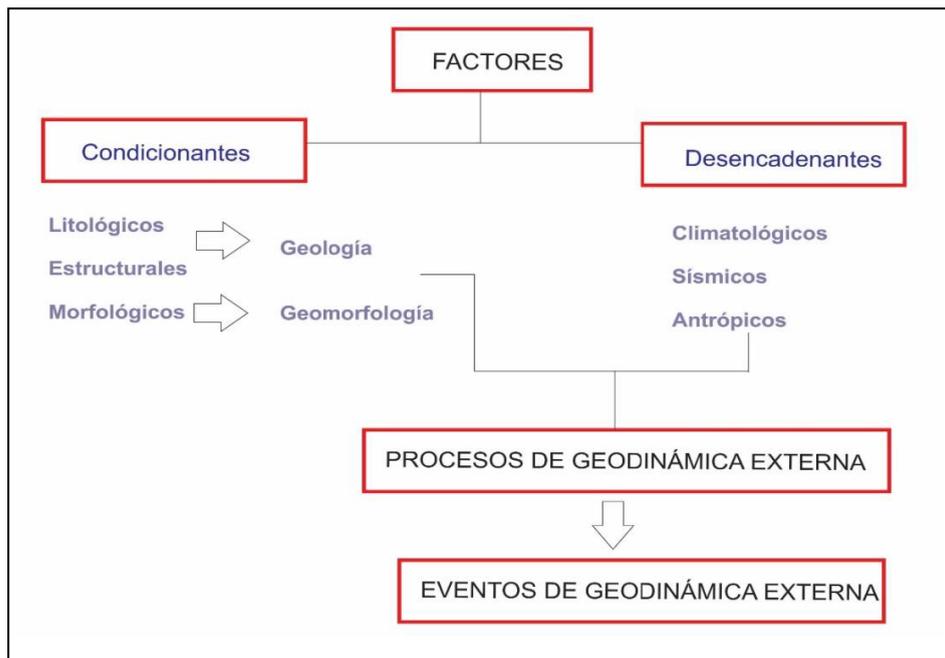


Figura 25: Factores asociados a procesos de geodinámica externa que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos.

- **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 incrementen la acción erosiva y son capaces de producir remoción de los materiales (Brusi, 2013), como flujos de dendritos e inundación. Los eventos geodinámicas originados por procesos pluviales son descritos a continuación:

Flujos de detritos (huaicos): Son 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, ver Figura 26.

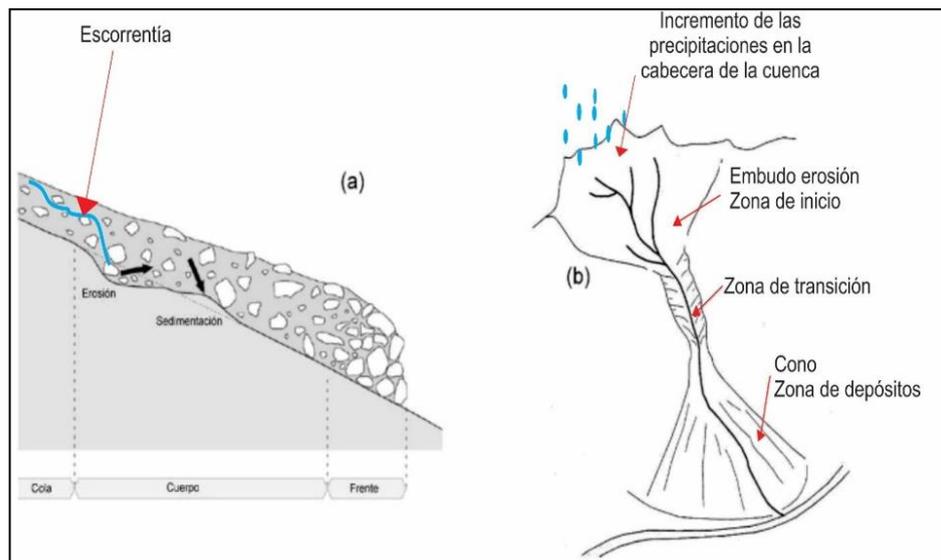


Figura 26: a) Proceso de erosión por las aguas de escorrentía y acumulación de material. b) Vista frontal de la cuenca y desarrollo del evento en cabecera de la cuenca por incremento de las precipitaciones, zona de transición (zona de almacenamiento de material y la depositación del material), modificado del GITS (Grupo de investigación de transportes de sedimentos).

Inundación: Es un flujo relativamente alto que sobrepasa el canal natural por el cual discurre la escorrentía (Chow, 1956, 1994). 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 la superposición de oleaje y las mareas, pero lo más frecuente son las inundaciones en el interior de los continentes, producidas por las aguas de escorrentía superficial (ríos, arroyos y torrentes), es decir, atribuida al incremento brusco del volumen de agua, denominado crecida, (Adaptado de CENEPRED, 2013). Las inundaciones pueden ser consecuencia de varios factores naturales y humanos (Tarbuck, 2005).

Las inundaciones fluviales se producen en valles o llanura de inundación como el resultado del desbordamiento del cauce principal de los ríos en las márgenes del canal o de diques artificiales, pueden intensificarse por factores asociados con la cuenca de drenaje, los canales y su red (Patton, 1988) o a la duración e intensidad de la precipitación, que por lo regular exceden a la capacidad de infiltración del terreno, por ello la escorrentía aumenta rápidamente. Las inundaciones producen la mayor parte de las pérdidas humanas y materiales (Burton et al, 1978).

Cuando las lluvias superan el promedio normal de precipitación (mayor al 50%) de una zona, se le denominan lluvias extraordinarias o tormenta extrema. Estas al desarrollarse generan crecidas causando inundaciones de las áreas circundantes al río, esta anomalía es conocida como un evento hidrometeorológico, ver Figura 27.

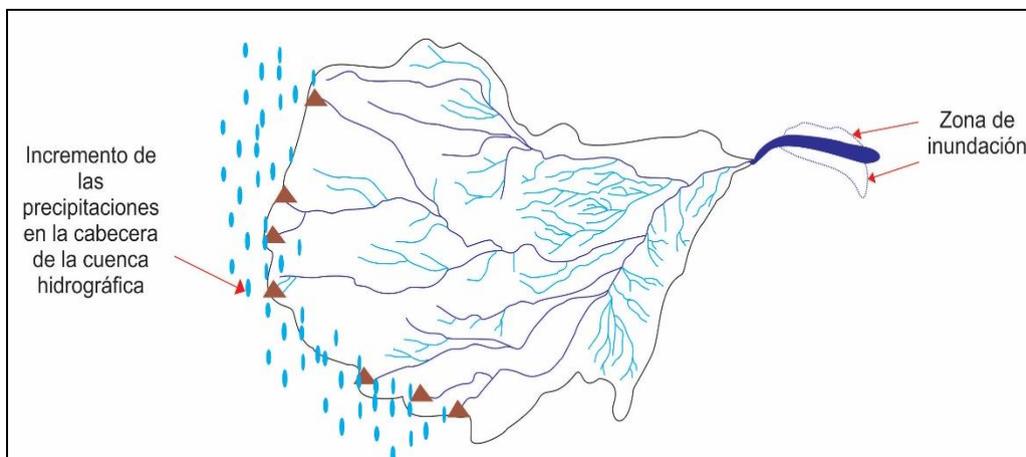


Figura 27: Inundación por incremento de las precipitaciones en la cabecera de la cuenca hidrográfica.

- **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 debajo 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 la caída de roca: la lluvia, la roca fractura, 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. Según su origen, los eventos geodinámicos que afectan a la ciudad de Sullana son:

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, ver Figura 28.

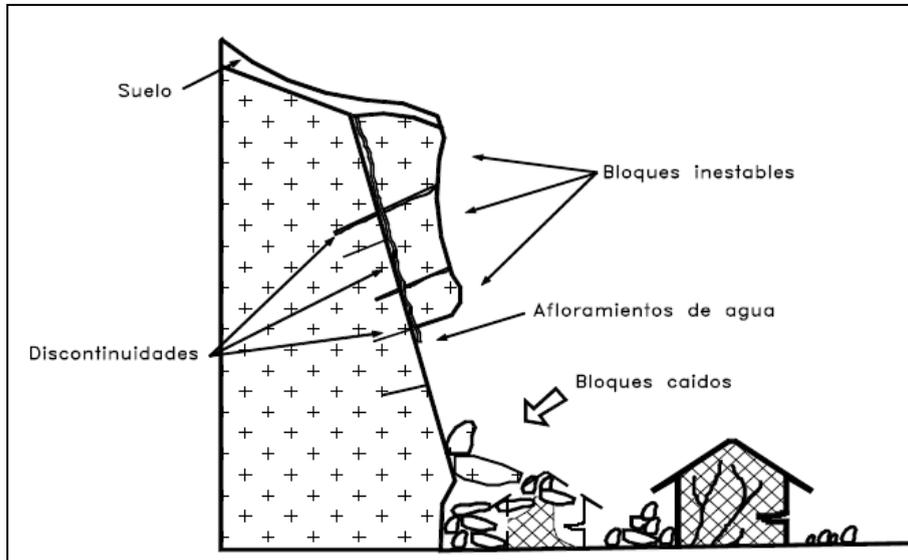


Figura 28: Proceso de caída de rocas. Fuente: Suárez (1998).

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, ver Figura 29. Estos deslizamientos se pueden clasificar en:

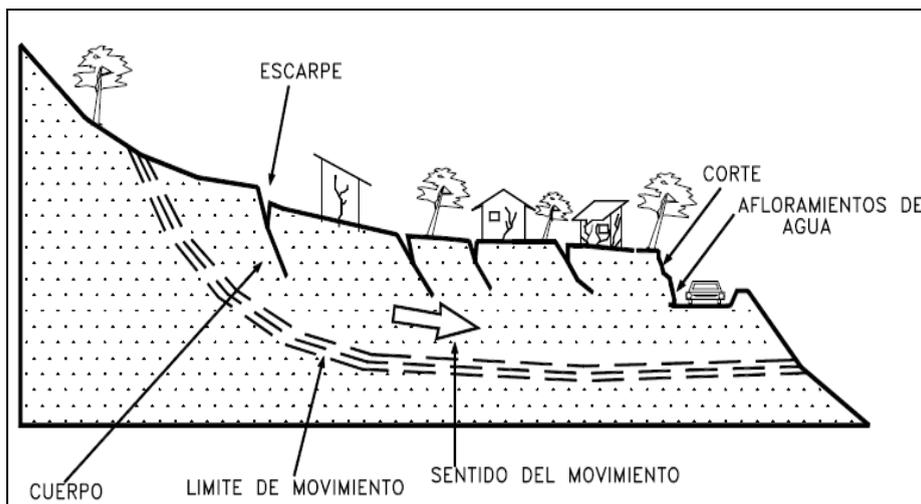


Figura 29: Deslizamiento en laderas (Suárez, 1998).

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 Sullana, existen cuatro tipos de eventos geodinámicos; los cuales según el proceso y factores que intervienen, se han clasificado de la siguiente manera: Inundaciones fluviales e inundaciones pluviales asociadas a las precipitaciones extraordinarias ocurridos en los años 1925, 1972, 1982-1983, 1997-1998 y 2017. Así como, erosión fluvial en el margen izquierdo del río Chira y zonas susceptibles a derrumbes.

4.2.1. Inundación fluvial

Se producen por el desborde del río Chira, principalmente sobre la margen derecha (zonas agrícolas del sector Esperanza, Ignacio Escudero y Amotape) y en menor proporción la llanura de inundación ubicada en el margen izquierdo del río Chira. El área inundable comprende aproximadamente 800 ha, y fue cartografiada en base al trabajo de campo, así como el establecimiento de la franja marginal, realizado por la Autoridad Nacional del Agua – ANA (documento técnico: R.D. N°435-2018-NAN-AAA-JZ-V, con fecha 16.02.18), ver Figura 30.



Figura 30: Zona inundada que se ubica en el margen izquierdo del río Chira, durante el incremento de las precipitaciones (meses diciembre – abril).

4.2.2. Inundación pluvial

Es la acumulación de agua en zonas de depresión o pendiente baja, provenientes de las precipitaciones o por el desborde de los drenes y canales; se originan durante el los meses en los que se presentan las lluvias (diciembre – abril), así como en los eventos hidrometeorológicos extremos (Fenómeno El Niño). Entre los lugares afectados por las inundaciones pluviales se tienen: AA.HH. Villa Primavera – Costado de carretera Sullana a Paita (Calles las Begonias y Los Pinos); las inmediaciones las calles El Cóndor y El Carmen en la Urb. Santa Rosa, el trayecto del canal vía que es usado como vía de acceso (transversales Piura, Tarapacá y Dos de Mayo); la Urb. López Albújar II Etapa (entre la carretera Sullana – Tambogrande y la Av. Champagnat), lugares por donde se ubica el cauce de la quebrada Cola El Alacrán; el cauce de la quebrada Cieneguillo que afecta la carretera Sullana – Tambogrande y las viviendas aledañas hasta su desembocadura en el canal Vía; A.A.H.H El Obrero (Intersección Calles Vargas Machuca y 13 de diciembre – Inmediaciones de colegio San José Obrero); el A.A.H.H 9 de octubre (Carretera Sullana a Tambogrande – Centro de Acopio de ganado, intersección Ca. La Brea con Pasaje Andrés Razuri, Intersección de calles López Albújar y Pariñas – inmediaciones de colegio Divino Maestro, Av. Santa Cruz en intersección con calles Pariñas y Vichayal. Finalmente, en la intersección de la calle Máncora con Av. Circunvalación); en el A.A.H.H 15 de Marzo (calles Augusto B. Leguía y Tomas Arellano); la quebrada Bellavista y el canal San Felipe (Figuras 31, 32, 33, 34 y 35).



Figura 31: Zona inundable ubicada en Villa Primavera – Carretera Sullana Paita (calles Las Begonias y Los Pinos), en la fotografía A se aprecian zonas inundables en el mes de febrero del año 2017 (Fuente: WALAC noticias) y la foto B se delimita el área inundada (polígono amarillo).



Figura 32: Zona inundable en las inmediaciones de la calle El Cóndor, a través del cual discurre el cauce de la Quebrada Cola del Alacrán.



Figura 33: Canal colector de aguas de escorrentía que recorre los A.A.H.H Jesús María y 15 de Marzo ubicado en la calle San Felipe.



Figura 34: Zona inundable en las inmediaciones del centro de acopio de ganado, ubicada en el A.A.H.H 9 de Octubre (carretera Sullana – Tambogrande).



Figura 35: Zona inundable en las inmediaciones del centro de acopio de ganado, ubicada en el A.A.H.H 9 de Octubre (carretera Sullana – Tambogrande).

4.2.3. Inundación aluvial

Es la acumulación de agua en zonas de depresión o pendiente baja, causadas por el desborde de quebradas; se originan durante el los meses en los que se presentan las lluvias (diciembre – abril), así como en los eventos hidrometeorológicos extremos (Fenómeno El Niño). Entre las quebradas que inundan las zonas aledañas, se tienen: La Quebrada Cieneguillo que afecta la carretera Sullana – Tambogrande (inmediaciones de club hípico), la quebrada Boquerón de Núñez que afecta el distrito de Bellavista (inmediaciones de estadio Manuel Coloma) y quebradas ubicadas en el extremo oeste de la ampliación urbana ADUS (carreta Sullana Piura), (Figuras 36 y 37).



Figura 36: Quebrada Cieneguillo, cuyo cauce discurre en dirección sur a norte, inundando parte de la carretera Sullana – Tambogrande. A: Fotografía en épocas de estiaje y B: fotografía en épocas de lluvia, febrero 2017 (Evento Niño Costero).



Figura 37: Inundación aluvial en las inmediaciones de la Quebrada Boquerón de Núñez.

4.2.4. Erosión fluvial

Es la erosión generada por las corrientes de agua que conforman el cauce de los ríos, generalmente se da en ambos márgenes del río. En la ciudad de Sullana, específicamente el margen izquierdo del río Chira se ha reconocido este tipo de evento, erosiona una terraza fluvio – aluvial sobre la cual se desarrollan actividades agrícolas (plantaciones de plátano). La terraza tiene un desnivel de aproximadamente 2.5 a 3.0 m, respecto al cauce del río Chira, ver Figura 38.



Figura 38: Erosión fluvial en el margen izquierdo del río Chira (parte baja de presa reguladora), durante los meses de lluvia (diciembre – abril).

4.2.5. Zonas susceptibles a derrumbes

En las inmediaciones del malecón Turicarami, se han identificado zonas inestables que podrían desprenderse, pendiente abajo y afectar vías de acceso y zonas urbanas. Tal es el caso del acantilado ubicado entre el puente Isaías Garrido (puente Viejo) y la transversal Callao que presenta pendiente entre 20 y 35° y está conformado por materiales inconsolidados y sueltos (arenas eólicas), ver Figura 39.



Figura 39: Acantilado susceptible a la ocurrencia de derrumbes, debido a la pendiente que presenta y el tipo de materiales que lo conforman, a pesar de contar con un muro de contención en el pie de la ladera.

Asimismo, se identificaron zonas de susceptibles a derrumbes en las inmediaciones del Malecón Turicarami, estas se deben principalmente a la deficiencia en el sistema de drenaje (cunetas deterioradas), ocasionando que las aguas de escorrentía filtren hacia el subsuelo, en la parte baja de la ladera, afectando estructuras (veredas, pista y zonas turísticas). Cabe mencionar que, en este sector se realizan actividades recreativas y deportivas, (Figura 40).



Figura 40: Aceras en las inmediaciones del malecón Turicarami deterioradas (elipse roja), debido a que los suelos han sido saturados y erosionados por las aguas de escorrentía que han sido originadas durante el periodo de lluvias y transportados por sistema de drenaje deficiente.

Finalmente, en los taludes ubicados en la parte baja de la plaza Bolognesi se han reconocido zonas inestables con potencial a derrumbarse, Figuras 41 y 42.



Figura 41: Aceras en las inmediaciones del malecón Turicarami deterioradas (elipse roja), debido a que los suelos han sido saturados y erosionados por las aguas de escorrentía que han sido originadas durante el periodo de lluvias y transportados por sistema de drenaje deficiente.



Figura 42: Zona inestable (línea amarilla) en la parte oeste de la plaza Bolognesi, posiblemente desestabilizada por aguas de escorrentía que han sido transportados por tubería antigua (parte baja de ladera).

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 y los límites plásticos, 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 43).

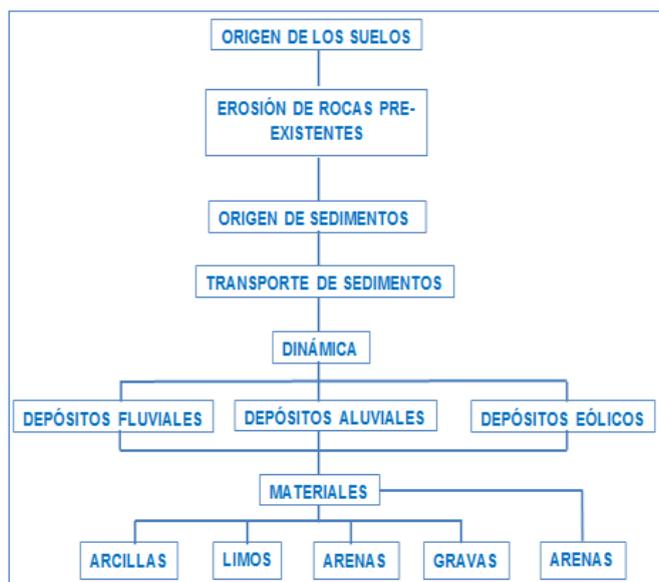


Figura 43: Diagrama del origen de los suelos.

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 (calicatas, auscultaciones, perforaciones, ensayos de DPL, SPT, etc.) y del análisis de suelos en laboratorio. En la ciudad de Sullana, se realizó el estudio geotécnico que consistió en la elaboración de calicatas, densidad de campo, posteos y ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), ver Figura 44.

Asimismo, de las calicatas se extrajeron ocho (08) muestras, que fueron enviadas al laboratorio de suelo, con el fin de realizar ensayos geotécnicos como: granulometría, plasticidad, corte directo y cálculo de la capacidad portante. A continuación, se detallan los mismos.

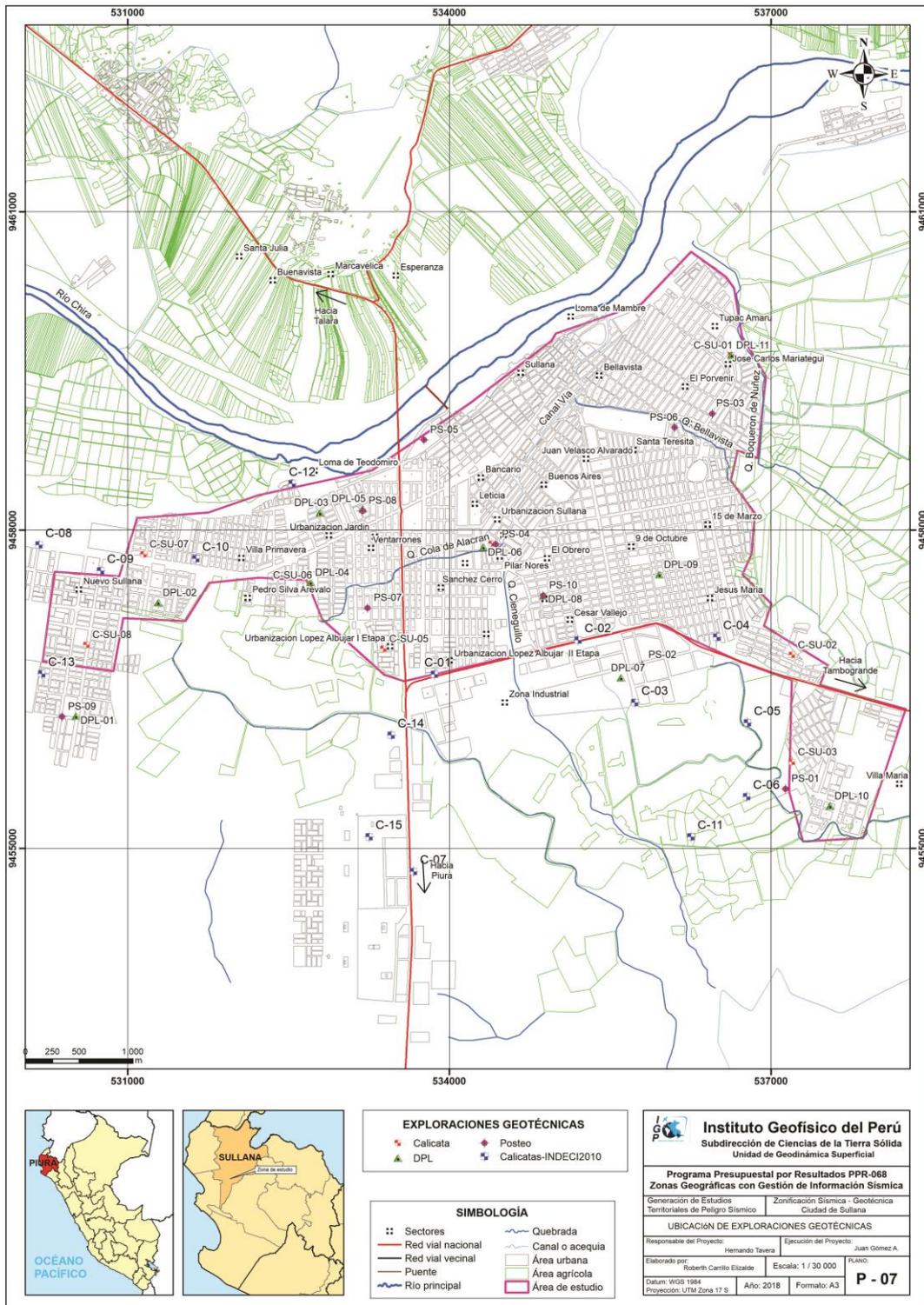


Figura 44: Mapa de ubicación de exploraciones geotécnicas para la ciudad de Sullana y alrededores.

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 del suelo a cierta profundidad (aproximadamente 3.00 m.), a fin de describir los estratos que lo conforman, así como, extraer muestras en bolsas herméticas con capacidad de 5 Kg. en promedio, para la realización de ensayos y análisis (Tabla 4).

Tabla 4: Coordenadas UTM para las calicatas realizadas en la ciudad de Sullana (N.P. = No presenta).

CALICATA	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
C-SU-01	536630	9459647	70	3.20	N.P.
C-SU-02	537195	9456822	96	2.50	N.P.
C-SU-03	537195	9455814	83	3.00	N.P.
C-SU-04	534393	9457873	66	2.50	N.P.
C-SU-05	533385	9456880	71	2.80	3.00
C-SU-06	532700	9457480	71	1.50	N.P.
C-SU-07	531148	9457771	80	2.50	N.P.
C-SU-08	530616	9456917	82	2.50	N.P.

En general, la profundidad de investigación promedio fue de 2.50 m., debido a que se encontraron arenas mal graduadas de consistencia suelta a muy suelta que impedían continuar con la profundización de la excavación, por ejemplo en las calicatas 6, 7 y 8 (C-SU-06, C-SU-07 y C-SU-08).

5.1.1. Densidad del suelo in-situ (Norma ASTM D1556)

Este método permite conocer la densidad o peso unitario de los suelos in situ con cierto grado de compactación natural. Consiste en extraer material del suelo, a través de un orificio de 10 a 12 cm de profundidad, realizado en el interior de la calicata, a fin de obtener una relación entre la masa de éste y el volumen conocido que ocupa la arena calibrada del cono de densidad.

En cada estrato muestreado se debe llevar a cabo un ensayo de densidad de campo, haciendo uso del método del cono de arena, a fin de obtener el grado de compactación o consistencia y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales, en otros casos para obtener el grado de compactación. Esta información es necesaria para desarrollar los ensayos de corte directo, sin embargo, este ensayo no

es aplicable en suelos que contengan cantidad excesiva de roca o materiales gruesos de diámetro mayor a 1 ½ pulgada (38 mm).

A continuación, en la Tabla 5 se presenta los resultados obtenidos para los valores de las densidades para las ocho (08) calicatas elaboradas para el área de estudio. Estos datos fueron obtenidos a través del método del cono de arena, y las fichas se encuentran en los Anexos.

Tabla 5: Resultados obtenidos del ensayo de densidad de campo.

CALICATA	MUESTRA	P.M/P.T (m)	DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm ³)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)
C-SU-01	DC-SU-01	3.20/3.20	2.20	1.98
C-SU-02	DC-SU-02	2.50/2.50	1.96	1.82
C-SU-03	DC-SU-03	3.00/3.00	1.95	1.69
C-SU-04	DC-SU-04	1.10/1.50	1.62	1.59
C-SU-05	DC-SU-05	2.80/2.80	1.71	1.60
C-SU-06	DC-SU-06	0.50/1.50	1.56	1.56
C-SU-07	DC-SU-07	1.80/2.50	1.58	1.48
C-SU-08	DC-SU-08	1.00/2.40	1.48	1.46

Según los resultados obtenidos, los suelos en la ciudad de Sullana presentan rangos de densidad entre 1.48 y 2.20 gr/cm³; y según la Tabla 6, corresponden a arenas pobremente graduadas muy sueltas.

Tabla 6: 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

5.2. Exploraciones con posteadora

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 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. Se hace mención, que la posteadora presenta restricciones en suelos con presencia de gravas y gravillas (la cuchara saca muestra se entrapa en este tipo de suelos).

Estas exploraciones fueron realizadas entre los puntos de las calicatas, tratando de cubrir el área de estudio o en los lugares donde no existía información geotécnica con la finalidad de obtener una mejor zonificación de los suelos de la ciudad de Sullana. A continuación se muestran los resultados obtenidos y ubicación geográfica (Tabla 7).

Tabla 7: Ubicación de posteos y clasificación de suelos SUCS. N.P. = No presenta.

POSTEOS	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	TIPO DE SUELO (SUCS)	NIVEL FREÁTICO A (m)
PS-01	537134	9455561	92	0.40	SM	N.P.
PS-02	535769	9456859	78	1.70	SP	N.P.
PS-03	536452	9459097	75	0.30	SP	N.P.
PS-04	534431	9457866	67	2.50	SP	N.P.
PS-05	533763	9458850	82	3.20	SP	N.P.
PS-06	536105	9456967	68	2.40	SM	1.50
PS-07	533237	9457265	70	2.80	SC	N.P.
PS-08	533191	9458180	74	1.10	SW	N.P.
PS-09	530386	9456240	75	0.60	SP	N.P.
PS-10	534874	9457382	69	0.40	SP	N.P.

En general, las profundidades de investigación varían de acuerdo al tipo de suelo, en las exploraciones superficiales se encontraron materiales granulares como arenas compactas con presencia de gravillas; mientras que, los de mayor profundidad corresponden a suelos finos con cohesión (SM, SC o SP con contenido de humedad). En base a ello se identificó que los suelos, en la ciudad de Sullana presentan compacidad media a baja y están conformados por materiales granulares como arenas, limos y gravas aisladas.

5.3. Ensayo de penetración dinámica ligera - DPL (Norma DIN 4094)

El DPL es un equipo de campo de registro continuo dónde se contabiliza y registra el “N”, que es el número de golpes dados por un martillo de 10 Kg. Este martillo se deja caer por gravedad desde una altura de 0.50 m., medida en la parte superior del tambor de acero, para profundizar tramos cada 10 cm. a través de una punta cónica de 60° que se encuentra en el extremo inferior. Este ensayo permite estimar el ángulo de fricción de suelos específicos, que ayudarán a calcular, mediante fórmulas empíricas, la capacidad portante (resistencia al corte) de los suelos en Kg/cm², además, se puede conocer las propiedades de compacidad de los suelos.

La ventaja del instrumento es que es un equipo muy práctico y se puede transportar fácilmente. Por otro lado, este ensayo es aplicable a terrenos arenosos, areno-arcillosos y limo arenosos, no recomendable a utilizarse en gravas, fragmentos gruesos, conglomerados y terrenos rocosos.

La Tabla 8, indica la ubicación de los ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) realizados en las inmediaciones de la ciudad de Sullana. Asimismo, el número de golpes y el ángulo de fricción interna es calculado en base a los parámetros de compacidad (correlación del valor de N) establecida por Terzaghi y Peck 1973 y densidad relativa según la fórmula de Meyerhof (1956)

$$\Phi = 25^{\circ} + 0.15 * D_r$$

Dónde:

Φ = Ángulo de fricción interna

D_r =Densidad relativa

Tabla 8: Ubicación de ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) y parámetros obtenidos.

DPL	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	NÚMERO DE GOLPES	Ø
DPL-01	530511	9456246	77	2.20	32	36.5
DPL-02	531277	9457315	78	3.10	32	36.5
DPL-03	532788	9458162	74	3.80	23	34.1
DPL-04	532701	9457505	67	3.20	33	36.8
DPL-05	533185	9458200	71	2.90	28	35.5
DPL-06	534311	9457840	66	3.20	28	35.5
DPL-07	535594	9456606	76	1.50	25	34.7
DPL-08	534874	9457382	69	2.30	17	32.4
DPL-09	535952	9457579	76	0.30	45	39.7
DPL-10	537545	9455400	87	0.90	30	36.0
DPL-11	536626	9459648	76	3.10	17	32.4

Finalmente, la profundidad alcanzada a través de la elaboración de estos ensayos permitieron inferir que los suelos de la ciudad de Sullana, en su mayoría, presentan consistencia media a baja (DPL 01,02, 03, 04, 05, 06 y 11); mientras que, los ensayos elaborados en el extremo sureste de la ciudad (DPL 07, 08, 09 y 10), indican suelos de consistencia media a alta, debido a la presencia de suelos granulares arenas con gravas. Las fichas del ensayo DPL se adjuntan en los Anexos.

5.4. Clasificación de suelos SUCS (ASTM D-4827)

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y DPL, realizados en la ciudad de Sullana, y realizados en ensayos granulométricos y de plasticidad, se han identificado 06 (seis) tipos de suelos, que han sido agrupados haciendo uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). En la Figura 45 se muestra el mapa clasificado de suelos y en la Tabla 9 los valores obtenidos para los parámetros físicas que definen cada tipo de suelo.

- Suelos tipo GC: Está constituida por Grava arcillosa cuyo contenido de material fino es del 12.00 %; el contenido de humedad es menor a 8.00 %, y comprenden a constituyen suelos con grado de compactación medio a alto. Los suelos que pertenecen a este tipo, comprenden el 9 % del área de estudio y han sido identificados en las inmediaciones de la Urb. López Albújar I Etapa y en Carretera Sullana a Piura (inmediaciones de la Asoc. De Viviendas ADUS).

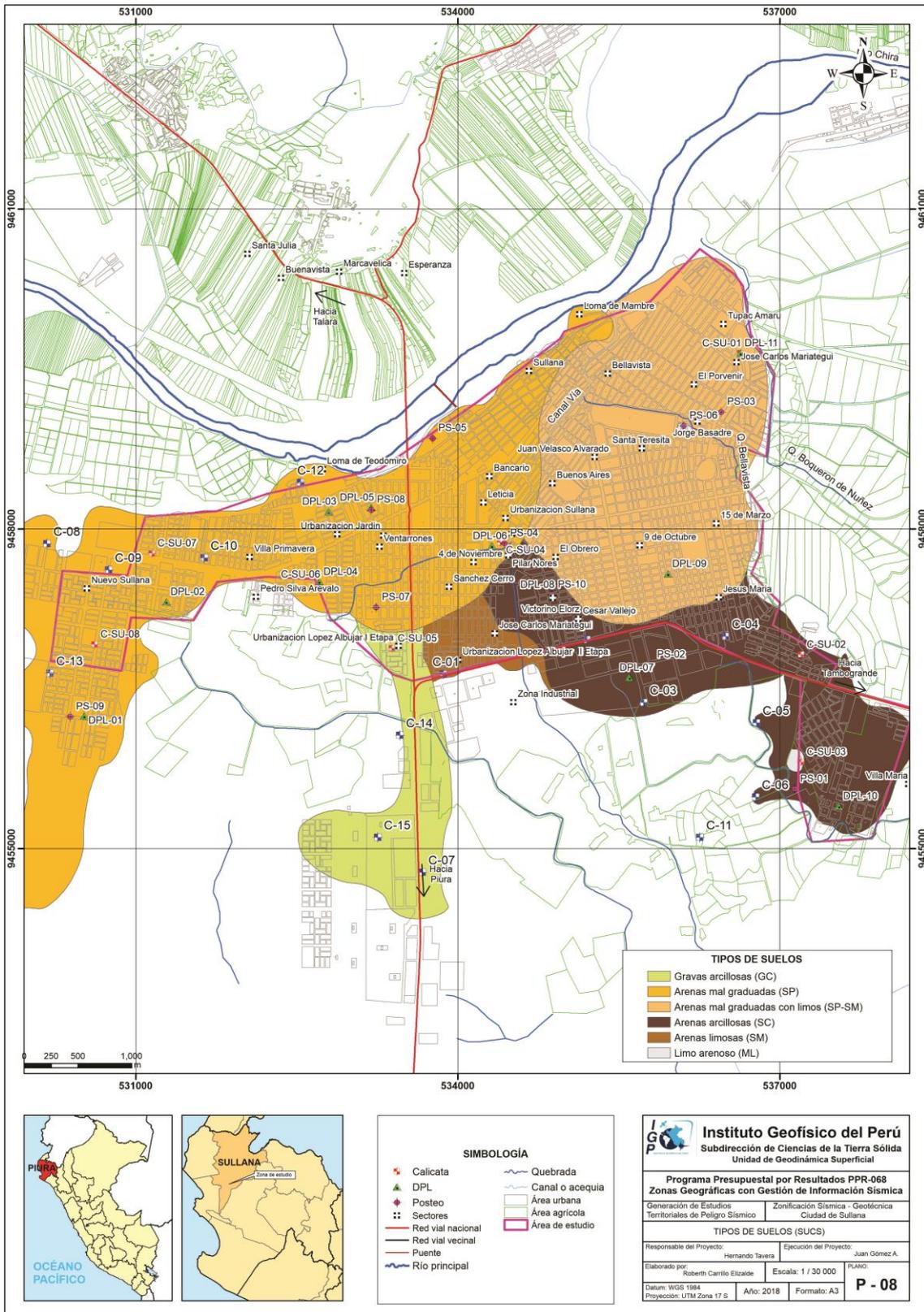


Figura 45: Mapa de tipos de Suelos (SUCS) para la ciudad Sullana y alrededores.

Tabla 9: Clasificación SUCS de los suelos de las ocho (08) calicatas elaboradas en la ciudad de Sullana.

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS % (<0.074 mm)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
*C-SU-01	3.20	N.P	39.20	53.90	6.80	N.P	N.P	N.P	10.40	SP-SM	Arena pobremente graduada con limo
*C-SU-02	2.50	N.P	16.60	58.70	24.70	50.20	36.90	13.30	12.60	SC	Arena arcillosa con grava
*C-SU-03	3.00	N.P	0.00	56.00	44.00	35.20	N.P	N.P	17.00	ML	Limo arenoso
C-SU-04	1.10	N.P	0.00	94.90	5.11	N.P	N.P	N.P	1.83	SP	Arena mal graduada
*C-SU-05	2.80	N.P	57.40	29.20	13.40	41.50	23.80	17.70	11.10	GC	Grava arcillosa
C-SU-06	0.50	N.P	0.00	97.10	2.90	N.P	N.P	N.P	0.23	SP	Arena mal graduada
C-SU-07	1.80	N.P	0.00	98.60	1.40	N.P	N.P	N.P	1.97	SP	Arena mal graduada
C-SU-08	1.00	N.P	0.00	98.3	1.70	N.P	N.P	N.P	1.97	SP	Arena mal graduada

- **Suelos tipo SP:** Están conformados por arenas mal graduadas con material gravoso y contenido de finos en menor proporción, el contenido de humedad es menor a 2.00%, constituyen suelos con grado de compactación medio a bajo,

no presentan plasticidad. Estos suelos comprenden el 41 % del área de estudio y se han identificado en el complejo Amador Agurto, Villa Primavera, Urb. Jardín, Nvo. Horizonte, Nvo. Sullana, Pedro Silva Arévalo y en el casco urbano central de la ciudad de Sullana.

- **Suelos tipo SP – SM:** Están conformados por arenas mal graduadas con presencia de limos, el contenido de humedad es menor a 10 % y constituyen suelos con grado de compactación medio a bajo. Estos suelos comprenden el 28 % del área de estudio y han sido identificados en el extremo Este de la ciudad de Sullana: sectores Bellavista, AAHH 9 de Octubre, AAHH El Obrero, Barrio Buenos Aires, El Porvenir, Santa Teresita, 15 de Marzo y Jesús María.
- **Suelos tipo SC:** Están conformados por arenas arcillosas con presencia de clastos sub-redondeados de gravas, el contenido de humedad es menor a 15 % y constituyen suelos con grado de compactación medio. Estos suelos comprenden el 20 % del área de estudio y han sido identificados en el extremo sur-este de la ciudad de Sullana: sectores Cesar Vallejo, Villa La Paz y Villa María.
- **Suelos tipo SM:** Están conformados por arenas limosas, el contenido de humedad es menor a 15 %, y constituyen suelos con grado de compactación medio. Estos suelos comprenden el 2 % del área de estudio y han sido identificados en el extremo sur de la ciudad de Sullana: sectores José Carlos Mariátegui y Urb. López Albújar I Etapa.
- **Suelos tipo ML:** Están conformados por limos arenosos, el contenido de humedad es menor a 20 %, constituyen suelos con grado de compactación medio. Estos suelos comprenden menos del 1 % del área de estudio y han sido identificados en el extremo este de la ciudad de Sullana: sectores Jorge Basadre y parte de Los Olivos.

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

La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo de 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.

5.5.1. Capacidad de carga admisible ($q_{ad} = \frac{q_u}{F_s}$)

Se define como el esfuerzo máximo que puede ser aplicado a la masa de suelo, de tal forma que se cumplan los requerimientos básicos establecidos por la relación, entre la carga última y un factor de seguridad de 3, a la Norma Técnica peruana para el Diseño de Cimentaciones E.050).

En las Tablas 10 y 11 se describen los resultados de capacidad de carga admisible para los analizados (Figura 46).

Tabla 10: Capacidad de carga admisible para las muestras extraídas en la ciudad de Sullana.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de Corte	Capacidad de carga última (Kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de Corte
*C-SU-01	1.78	0.59	F.G	2.35	0.78	F.G
*C-SU-02	2.43	0.81	F.G	2.91	0.97	F.G
*C-SU-03	5.09	1.70	F.G	6.13	2.04	F.G
C-SU-04	1.40	0.47	F.L	1.97	0.66	F.L
*C-SU-05	2.14	0.71	F.G	2.87	0.96	F.G
C-SU-06	0.81	0.27	F.L	1.15	0.38	F.L
C-SU-07	2.32	0.77	F.L	3.22	1.07	F.L
C-SU-08	1.51	0.50	F.L	2.11	0.70	F.L
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00m			Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00m		

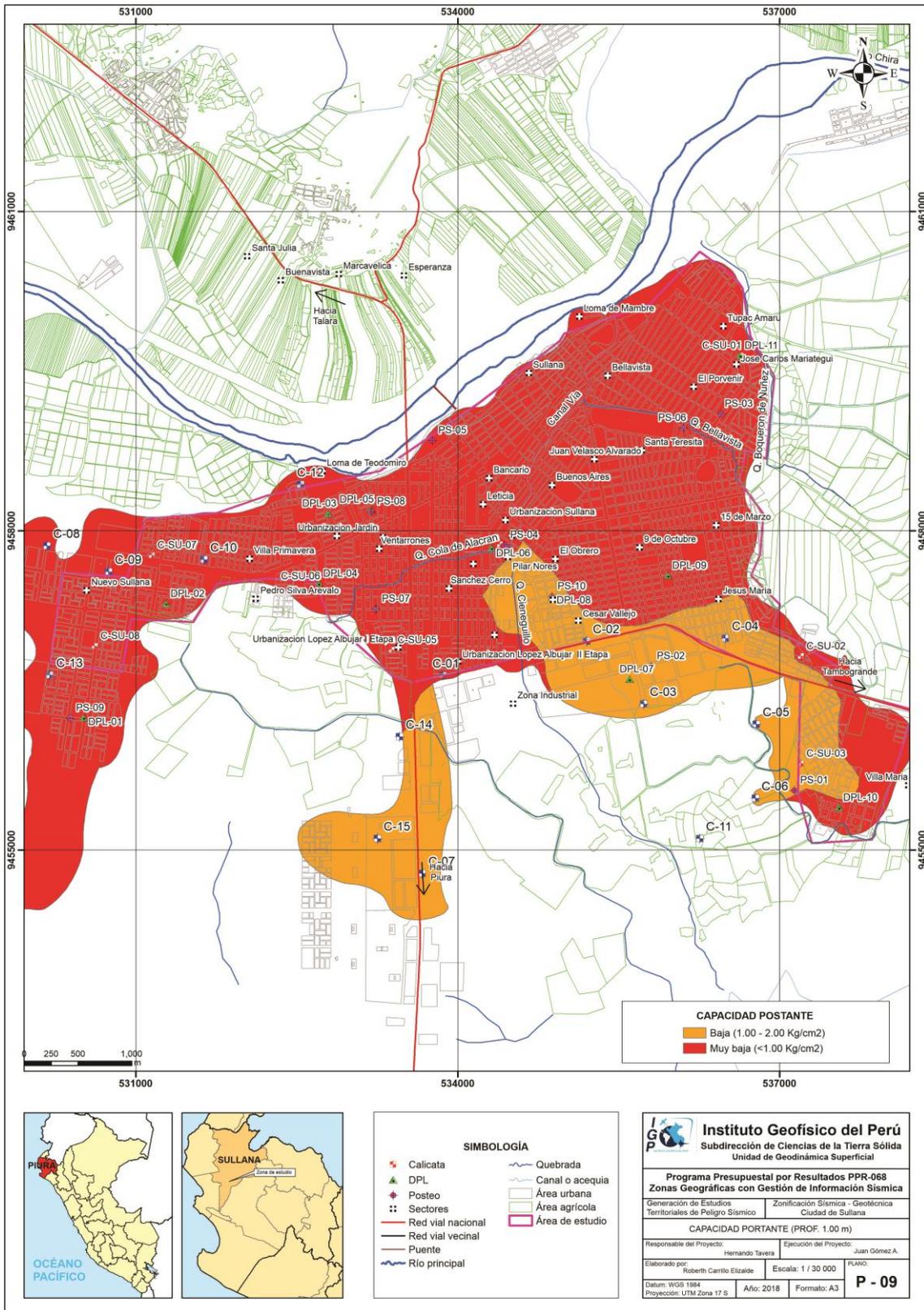


Figura 46: Mapa de capacidad portante para la ciudad de Sullana y alrededores.

Tabla 11: Capacidad de carga admisible en base a los ensayos de DPL en la ciudad de Sullana.

ENSAYO	Capacidad de carga última (kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de corte	Capacidad de carga última (kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de corte
DPL - 01	1.27	0.42	F.L	2.11	0.70	F.L
DPL - 02	1.39	0.46	F.L	2.19	0.73	F.L
DPL - 03	2.74	0.91	F.G	6.26	2.09	F.G
DPL - 04	1.05	0.35	F.L	1.46	0.49	F.L
DPL - 06	1.52	0.51	F.L	1.97	0.66	F.L
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00			Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00		

De acuerdo a resultados obtenidos y considerando los valores de la Tabla 12, se ha determinado que para la profundidad de 1 m, los suelos de cimentación de la zona urbana de la ciudad de Sullana, en su mayoría, presentan capacidad de carga admisible muy baja (menor a 1kg/cm²), salvo para los sectores Cesar Vallejo, El Obrero, Los olivos y Villa, donde los suelos presentan capacidad portante baja.

Tabla 12: Rango de capacidad de carga admisible.

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

Tipos de capacidad de carga admisible

En la ciudad de Sullana se han identificado los siguientes tipos de capacidad de carga admisible:

Capacidad de carga admisible muy baja: Comprende rangos de capacidad de carga admisible menores a 1.00 kg/cm². se encuentran representado suelos arena mal graduada (SP), arena mal graduada con limos (SP-SM), arena limosa (SM) y arena arcillosa (SC), hasta una profundidad de 1.00 m. de profundidad. Se ha identificado en suelos sobre los cuales se asientan el casco urbano central de Sullana, Nvo. Sullana, Villa Primavera, Pedro Silva Arévalo, Urb. Jardín, López Albújar, Sánchez Cerro, Urb.

Sullana, Santa Teresita, Barrio Buenos Aires, 9 de Octubre, Bellavista y El Porvenir. Estas áreas urbanas representan el 78 % del área estudiada en la ciudad de Sullana.

Capacidad de carga admisible baja: Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre 1.00 - 2.00 kg/cm². Se encuentran representados por suelos confinados por grava arcillosa (GC) y arenas arcillosas (SC) con presencia de gravas aisladas: hasta 1.00 m. de profundidad. Se identificaron en los suelos sobre el cual se asientan los siguientes sectores: Asoc. de Viviendas ADUS, parte de Villa María y parte de Cesar Vallejo. Ellas representan el 72 % del área estudiada en la ciudad de Sullana.

6. CONCLUSIONES

- Existen diez unidades geomorfológicas en la ciudad de Sullana: lecho fluvial, islotes, llanura de inundación, terraza fluvio – aluvial, cauce aluvial estacional, terraza aluvial, llanura aluvial, acantilado, loma y montaña. La zona urbana se asienta sobre la unidad terraza aluvial.
- El sustrato rocoso consta de rocas de la Formación Chira, cuyos afloramientos consisten en lutitas y areniscas que se encuentran en el margen derecho del río Chira (Marcavelica) y en la parte baja de la loma de Mambré, al noreste de la ciudad de Piura; mientras que, los depósitos del Cuaternario están conformados por materiales de origen aluvial, fluvial y eólico sobre los cuales se asienta la ciudad de Sullana.
- Los eventos geodinámicos reconocidos en la ciudad de Sullana, son erosión fluvial en el margen izquierdo del río Chira (parte baja de presa), deslizamiento de los taludes ubicados en la parte baja de la plaza Bolognesi, inundaciones aluviales por el desborde de quebradas (Q. Cieneguillo, Q. Cola del Alacrán, Q. Bellavista y Q. Boquerón de Núñez), inundaciones fluviales en mayor proporción en el margen derecho del río Chira, inundación pluvial (estancamiento de agua en zonas de depresión) y zonas susceptibles derrumbes en los ataludes ubicados en el ovalo Turicarami.
- Los tipos de suelos reconocidos en la ciudad de Sullana son: gravas arcillosas (GC), Arenas mal graduadas (SP), arenas mal graduadas con limos (SP-SM), arenas arcillosas (SC), arenas limosas (SM) y limos inorgánicos mezclados con arenas (ML). El subsuelo sobre el cual se asienta el casco urbano de la ciudad de Sullana, está conformado en mayor proporción por arenas mal graduadas (SP).
- Los suelos de la ciudad de Sullana presentan dos tipos de capacidad portante: Muy baja ($< 1.0 \text{ Kg/cm}^2$) que predominan en la mayor parte de la ciudad y ocupan el 78 % del área de estudio y capacidad portante baja ($1.0 - 2.0 \text{ Kg/cm}^2$) en menor proporción (22%)

**CARACTERIZACIÓN SÍSMICA Y GEOFÍSICA
DE LA CIUDAD DE SULLANA**

CONTENIDO

1. METODOLOGÍA

1.1. Razones Espectrales H/V

1.1.1. Adquisición de datos

1.1.2. Procesamiento de datos

1.1.3. Análisis y resultados

1.2. Análisis Multicanal de ondas Superficiales MASW

1.2.1. Adquisición de datos

1.2.2. Procesamiento de datos

1.2.3. Análisis y resultados

1.3. Tomografía de Resistividad Eléctrica ERT

1.3.1. Adquisición de datos

1.3.2. Procesamiento de datos

1.3.3. Análisis y resultados

2. ZONIFICACIÓN DE SUELOS

2.1. Integración de resultados

2.2. Mapa de Zonificación Sísmica

CONCLUSIONES

1. METODOLOGÍA

El estudio de Zonificación Sísmica - Geotécnica para el área urbana de Sullana 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)

El método de razones espectrales (H/V) descrito por Nakamura (1989), permite caracterizar la respuesta dinámica del sitio y estimar la amplificación sísmica. 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 (Figura 1).

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.



Figura 1: Esquema que muestra el registro de vibraciones ambientales.

1.1.1. Adquisición de datos

Los registros de vibración ambiental fueron obtenidos con equipos sísmicos compuestos por un registrador tipo CityShark y sensores de tres componentes tipo Lennartz, ver Figura 2.



Figura 2: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales en Sullana: sensor Lennartz (2N) y registradores CityShark II.

Para la aplicación de esta técnica, sobre el mapa catastral del área urbana de Sullana, se definió la distribución y el número de puntos para el registro de vibraciones ambientales teniendo en cuenta la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio. Cada uno de los puntos de registro de vibración ambiental obtenidos en campo, tienen una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de información para su posterior análisis. En el área urbana de Sullana, se consideró 234 registros de vibración ambiental obtenidos de manera puntual.

En la Figura 3, 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 SU-232 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en SU-77, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud, que al momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en este estudio (Figura 4).

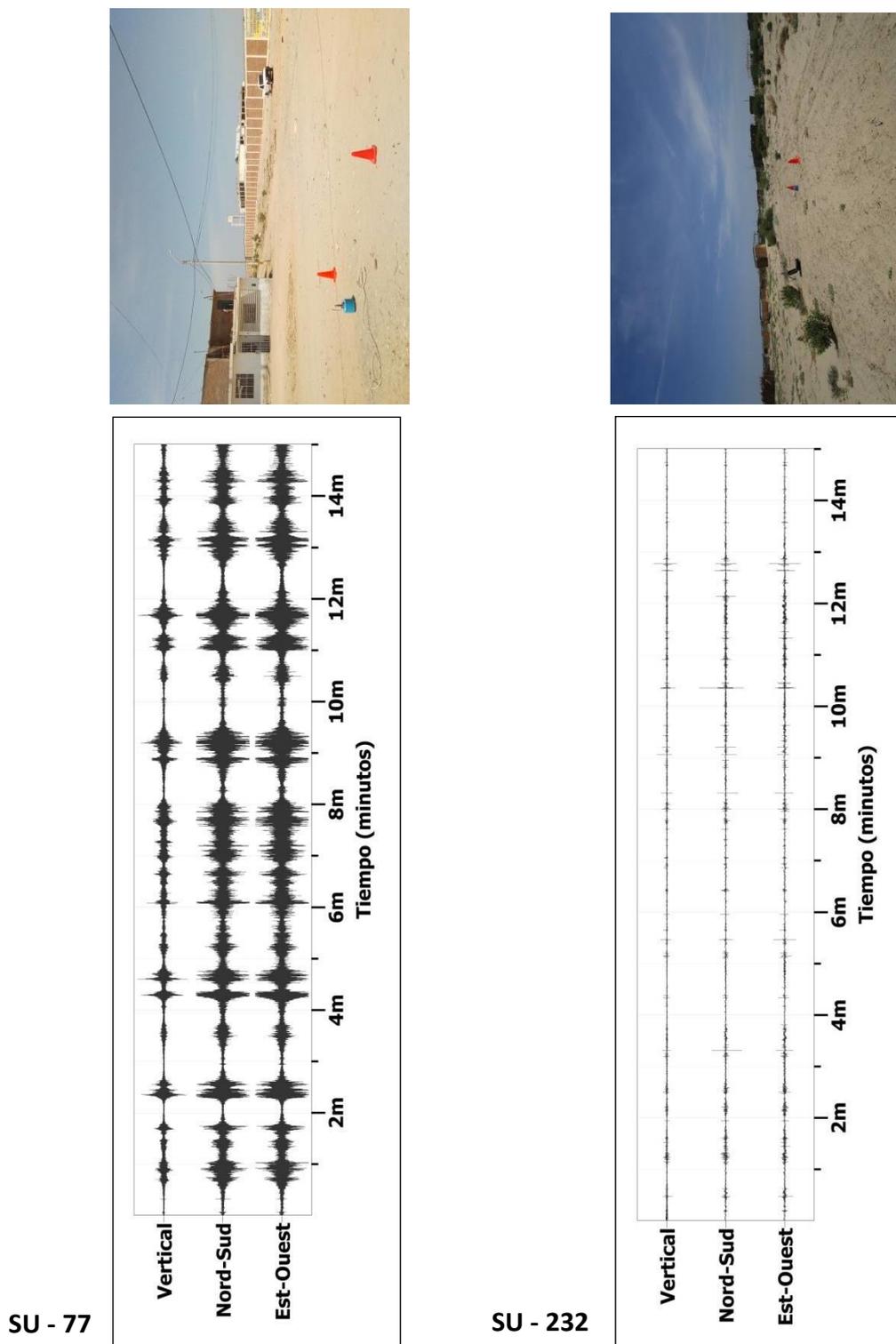


Figura 3: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre una zona con ruido transitorio (SU-77) y otro con ruido de fondo constante (SU-232). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

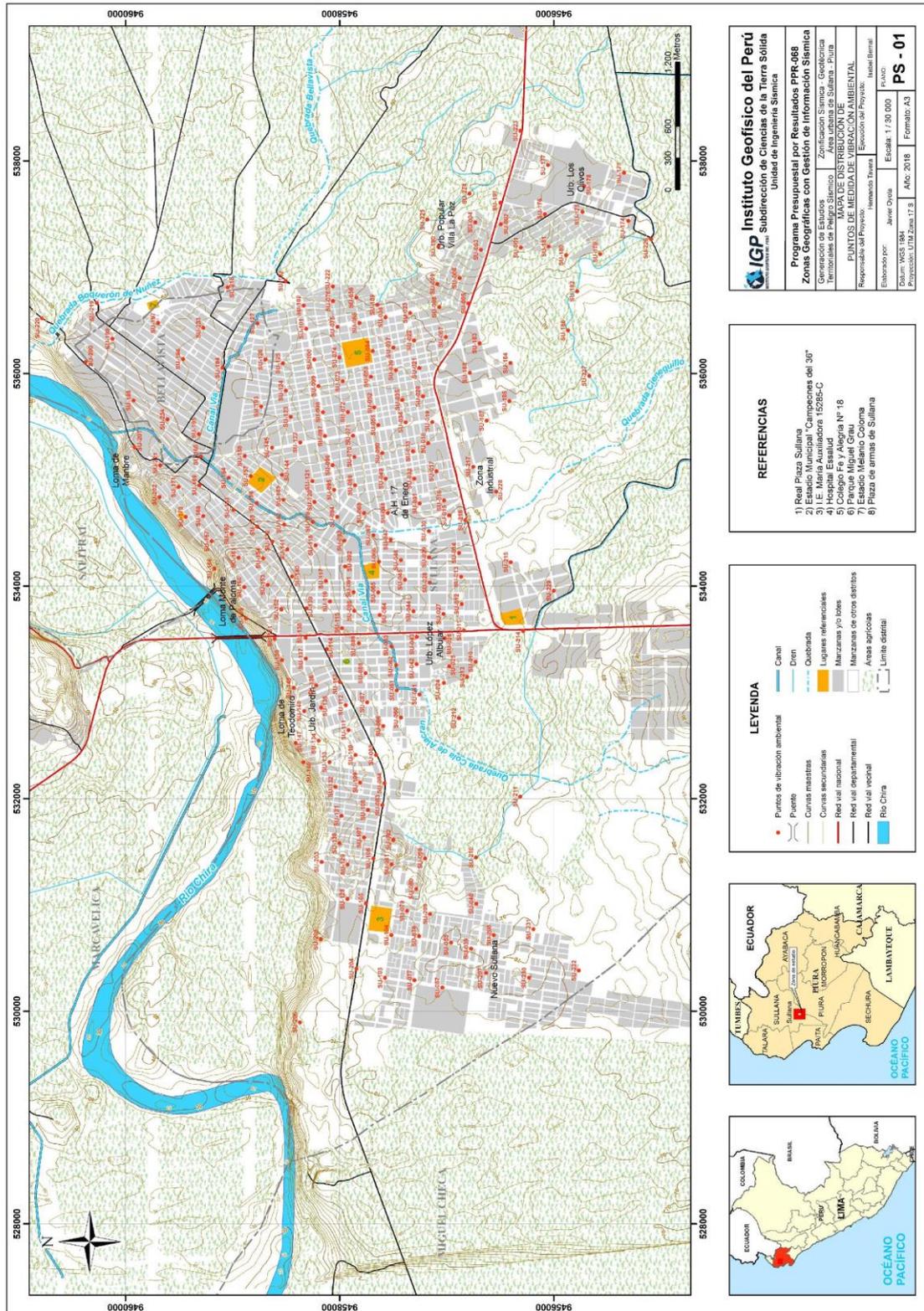


Figura 4: Mapa catastral del área urbana de Sullana y distribución de puntos donde se tomaron los registros de vibración ambiental HV.

1.1.2. Procesamiento de datos.

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).

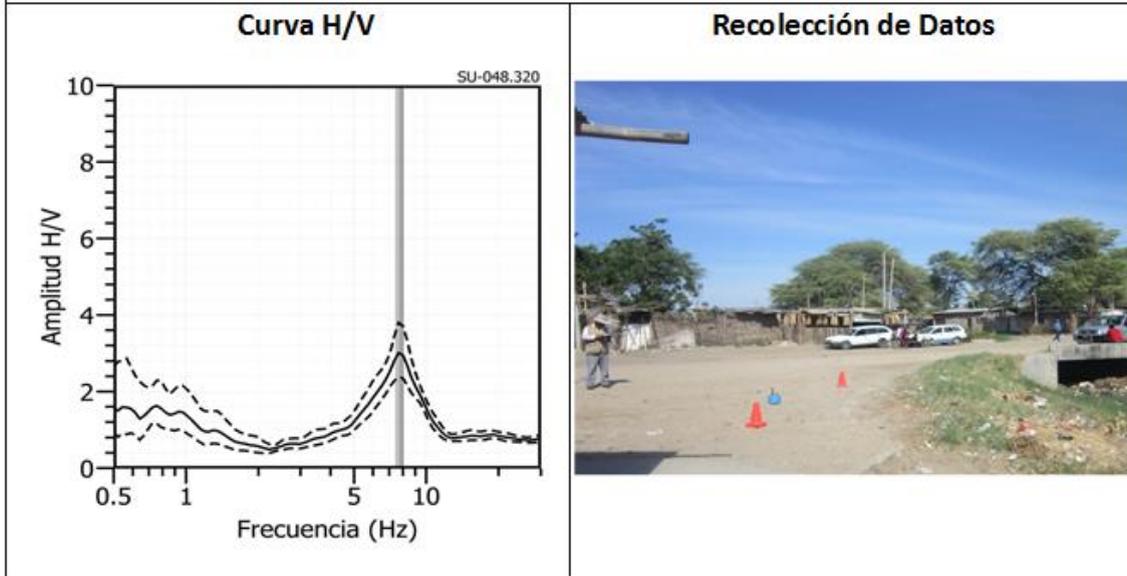
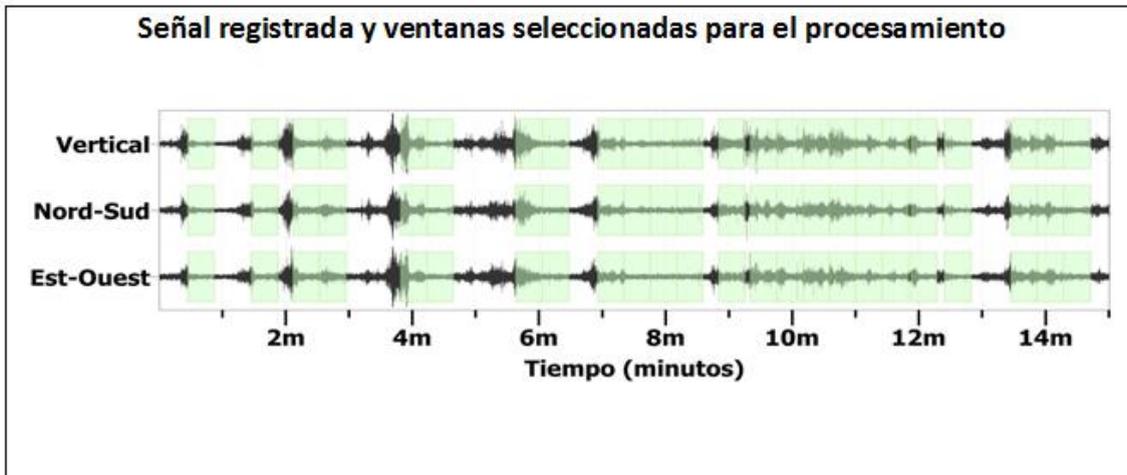
El procesamiento de la información se ha realizado con el programa computacional GEOPSY. En la Figura 5, se muestra un ejemplo del procedimiento seguido para el total de la información obtenida en campo. El primer recuadro presenta la selección de las ventanas de procesamiento para las tres componentes 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 y las bandas grises identifican las frecuencias principales. Finalmente, para la presentación de los resultados, las frecuencias son expresadas en periodos dominantes.

Interpretación: Para la interpretación de los resultados obtenidos con razones espectrales, se dispone de mapas geológicos y geomorfológicos. Para análisis en conjunto se consideró la siguiente: 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, 2006; Bernal, 2006).

Zonificación Sísmica - Geotécnica
ÁREA URBANA DE SULLANA
Frecuencias predominantes del Suelo

SU-48



Interpretación de resultados				
Dudoso	Pico(s) H/V (Hz)	f0	f1	f2
Ningún pico	<input checked="" type="checkbox"/>	-	7.75	-
Observaciones				
Var. azimuthal	Homogénea		Amplitud max. Entre y°	

Figura 5: Ejemplo de la ficha H/V para el punto SU-48 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.

1.1.3. Análisis y resultados

A partir de los valores extraídos de las razones espectrales H/V, se obtienen mapas con la distribución espacial de los valores de frecuencias predominantes. Los resultados obtenidos de las razones espectrales H/V, permitió definir la presencia de dos rangos de frecuencias F_0 ($F \leq 2.0$ Hz) y F_1 ($F > 2.0$ Hz). A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en el área urbana de Sullana.

Frecuencias Predominantes

- **Frecuencia predominante F_0 :** En la Figura 6, se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de F_0 , y en la cual predominan valores entre 0.7 y 1.3 Hz. Estos están presentes principalmente en las Urb. Nuevo Sullana, Urb. El Jardín y algunos puntos en la Urb. Los Olivos, lo que evidencia que los mayores espesores de la capa sedimentaria se da por estos sectores.

En la Figura 7 se muestra ejemplos de razones espectrales para los puntos SU-03(A), SU-178 (E) y SU-179(F), ubicados al sur este por la urb. Los Olivos. Ellos presentan un pico definido con frecuencias de 0.93, 0.69 y 0.70 Hz y amplificaciones de 3.2, 2.7 y 2.6 veces respectivamente. Los resultados muestran la existencia de una capa sedimentaria de gran espesor que se manifiesta en esta zona.

Las razones (H/V) obtenidas para los puntos SU-57(B), SU-80(C) y SU-85(D), ubicados en Nuevo Sullana, y al sur de la IE María Auxiliadora, presentan dos picos de respuesta, siendo el primero de mayor amplitud respecto al segundo. Las frecuencias predominantes oscilan entre 0.80, 0.81 y 0.92 Hz el segundo pico entre 7.74, 7.63 y 7.70 Hz, con amplificaciones mayores a 2. Estos resultados muestran que en esta zona existe una capa sedimentaria de gran espesor.

La presencia de dos picos de frecuencias evidencia mayor complejidad en la respuesta de los suelos, a pesar de presentar baja amplificación.

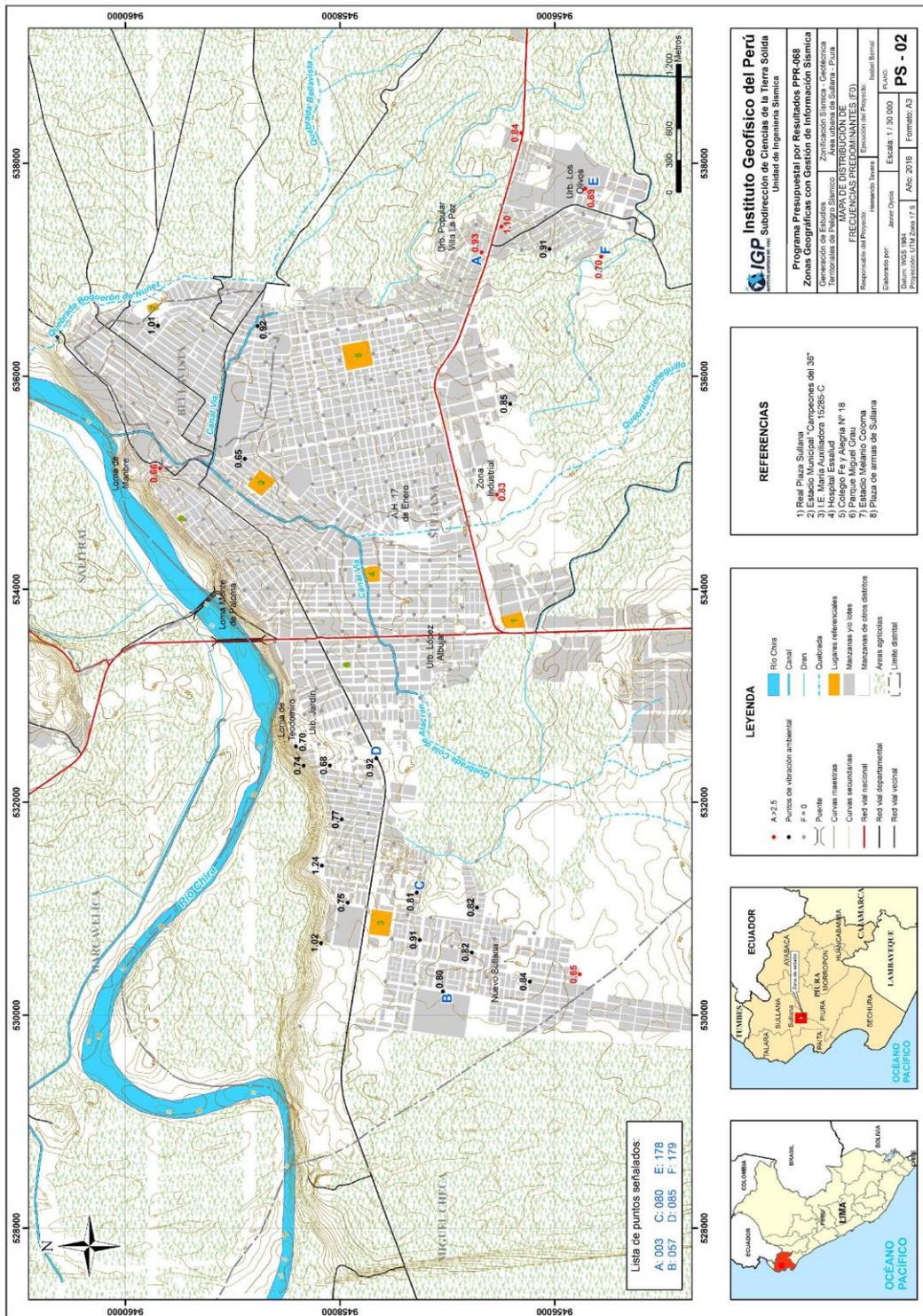
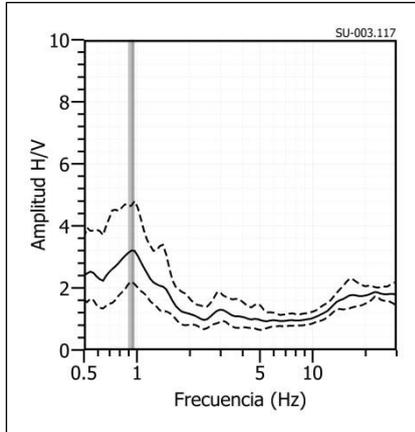
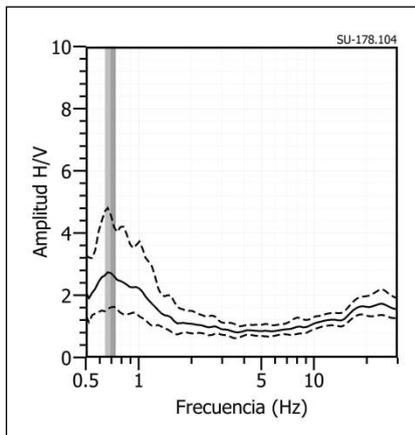


Figura 6: Mapa del área de estudio con la distribución espacial de las frecuencias predominantes F_0 ($F \leq 2.0\text{Hz}$) definidas en cada punto.

SU - 03



SU - 178



SU - 179

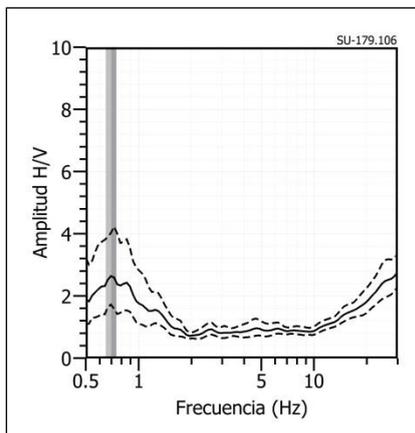
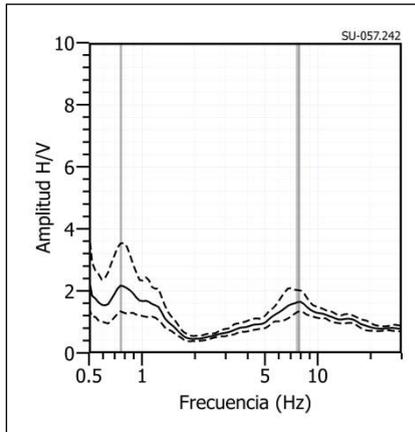
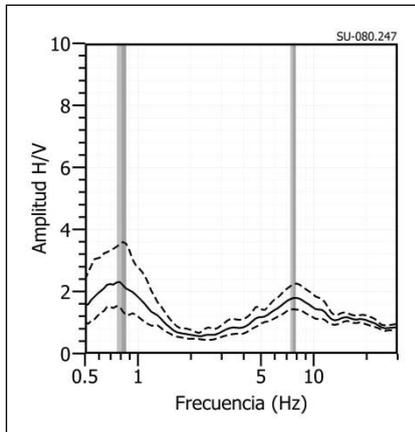


Figura 7: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F \leq 2.0\text{Hz}$): puntos SU-03(A), SU-178 (E) y SU-179(F), ubicados al sur este por la urb. Los Olivios. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SU - 57



SU - 80



SU - 85

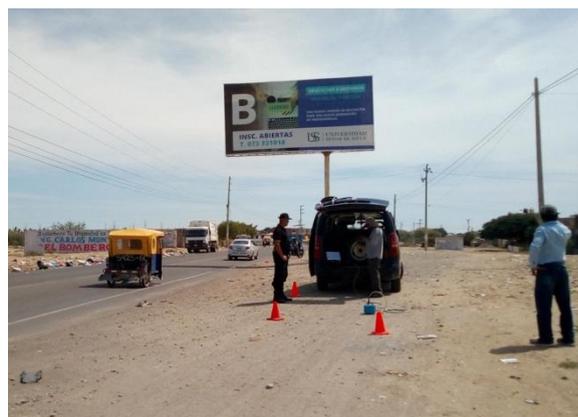
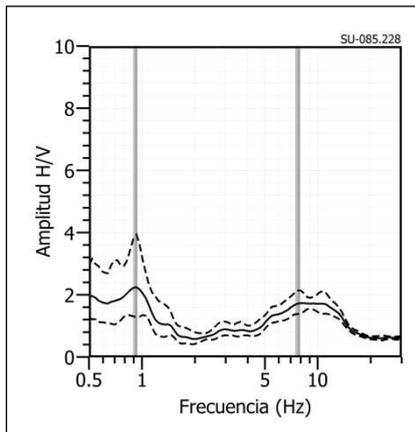


Figura 7: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F \leq 2.0\text{Hz}$). Para los puntos SU-57(B), SU-80(C) y SU-85(D), ubicados en Nueva Sullana, al sur de la IE María Auxiliadora. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

- **Frecuencia predominante F1:** En la Figura 8 se muestra la distribución espacial de las frecuencias predominantes F1 ($F > 2.0\text{Hz}$). En este rango las frecuencias de 2.7 a 20 Hz, están distribuidos de manera uniforme en toda la ciudad. En la Figura 9, se muestra ejemplos de los gráficos de razones espectrales que caracterizan los suelos de esta ciudad para este rango de frecuencias.

Las razones espectrales (H/V) obtenidas para los puntos SU-121(E), SU-131(F) y SU-139(G), ubicados al sur del estadio Campeones del 36, en la urb. Jardín y por el centro de la ciudad, responden a frecuencias de 5.83, 4.89 y 5.11 Hz con amplificaciones de 1.65, 1.75 y 1.35 respectivamente; situaciones similares para los puntos SU-170(I), SU-198(K) y SU-204(L), ubicados en dirección al cauce del río Chira; el primero en la plaza de Armas, el segundo en Bellavista y el tercero por el IE María Auxiliadora, presentan un pico bien definido con frecuencias de 11.67, 10.95 y 11.94 Hz con amplificaciones relativas de 1.50, 1.69 y 2.23 veces. Los resultados indican que existe una capa sedimentaria de poco espesor.

Los puntos SU-17(A), SU-48(C) y SU-164(H), ubicados en el centro de la ciudad, próximos a la quebrada Cieneguillo, responden a frecuencias predominantes de 14.37, 7.75 y 9.93 Hz con amplificaciones mayores a 3 veces. Así mismo, los puntos SU-207(M), SU-211(N) y SU-230(O), ubicados en Nuevo Sullana, responden a frecuencias predominantes de 14.10, 13.13 y 9.34 Hz con amplificaciones de 1.66, 4.30 y 2.88 veces. Estos resultados muestran la existencia de una capa sedimentaria de poco espesor, pero con un comportamiento más flexible que el resto de la ciudad.

Existen además zonas en las cuales los suelos no responden a ninguna, frecuencia como en los puntos SU-26(B), SU-98(D) y SU-173(J), ubicados al norte del centro comercial Real Plaza, cerca de la IE Fe y Alegría, y al sur de la Urb. Los Olivos. Las zonas que presentan esta respuesta, evidencian que los suelos están mejor consolidados y/o compactados en comparación con el resto del área de estudio.

Finalmente, los resultados muestran que en el 82% del área de estudio, los suelos responden a de frecuencias (F1), lo que hace evidente la existencia de una capa sedimentaria superficial de poco espesor, estando los mayores espesores hacia el oeste.

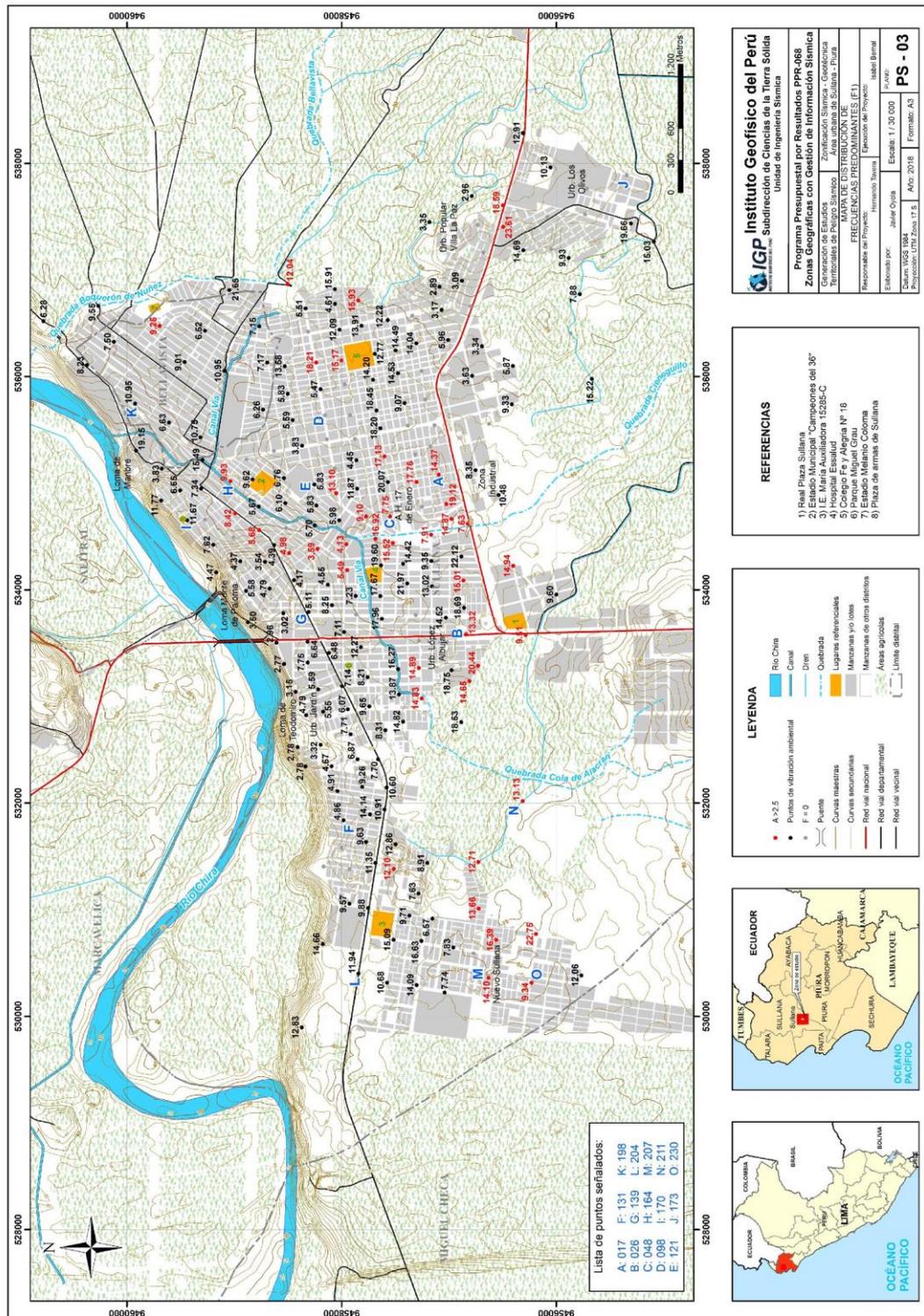
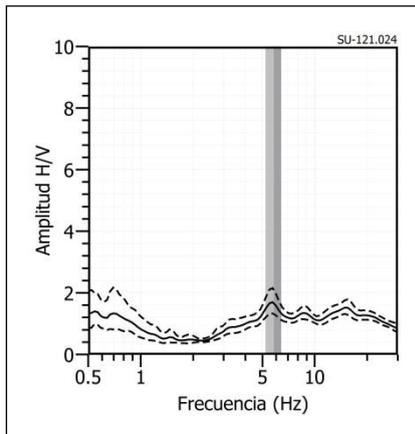
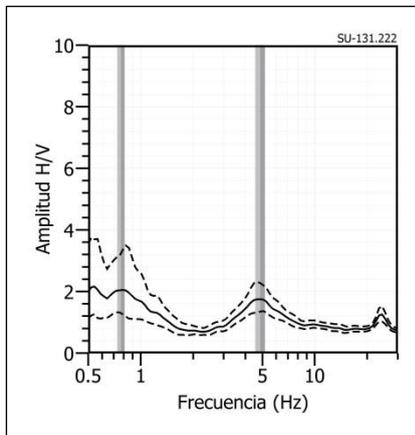


Figura 8: Mapa del área de estudio con la distribución espacial de las frecuencias predominantes F_0 ($F \leq 2.0\text{Hz}$).

SU - 121



SU - 131



SU - 139

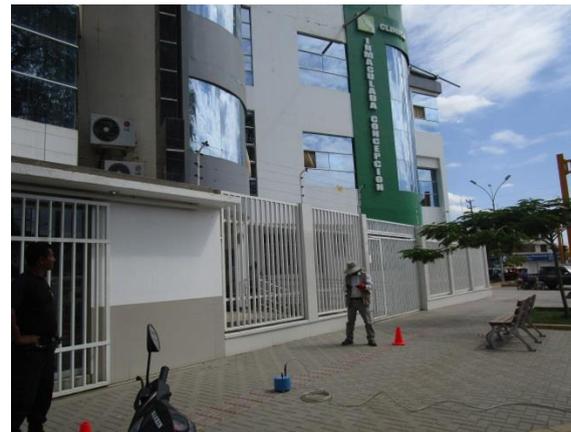
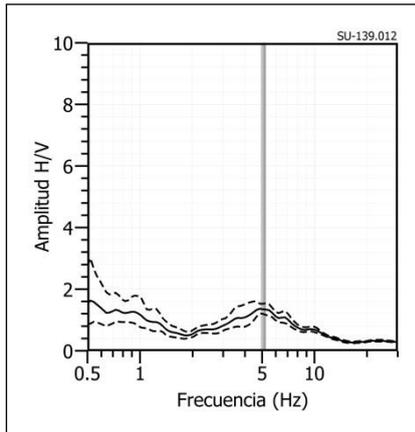
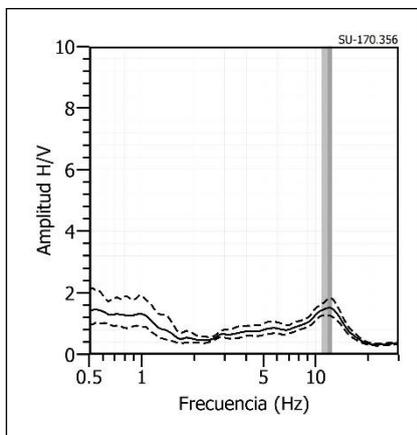
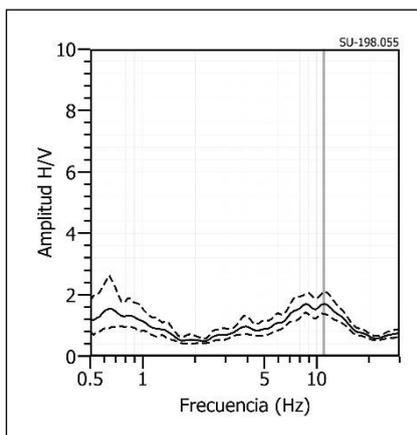


Figura 9: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$). puntos SU-121(E), SU-131(F) y SU-139(G), ubicados el primero por la estación sísmica SULL, el segundo al este de la urb. Jardín y el tercero por el centro de la ciudad. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SU - 170



SU- 198



SU- 204

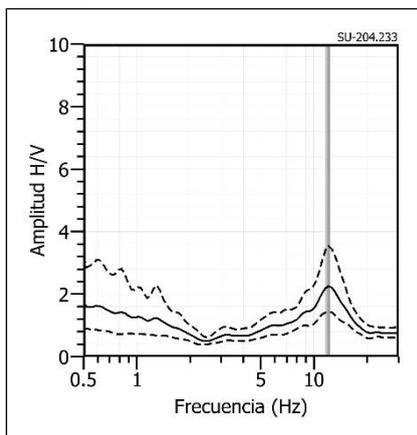
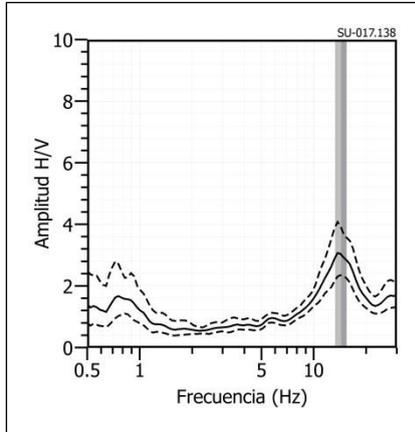
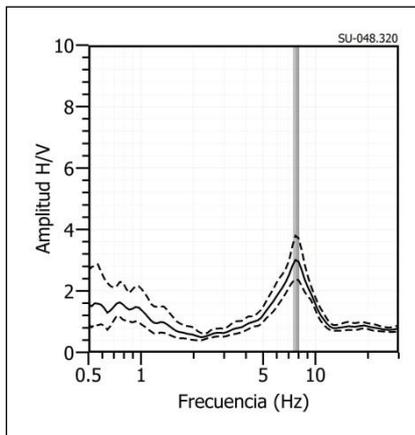


Figura 9: ... Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$). puntos SU-170(I), SU-198(K) y SU-204 (L), ubicados el primero en la plaza de armas, el segundo por Bellavista y el tercero por la IE María Auxiliadora. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SU - 17



SU- 48



SU- 164

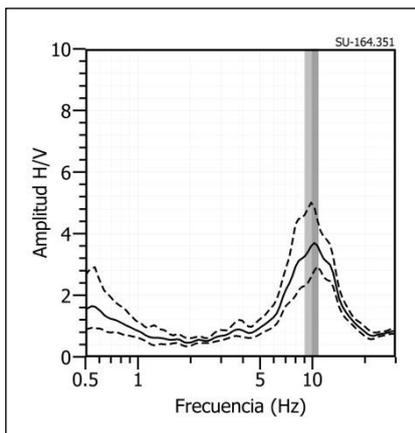
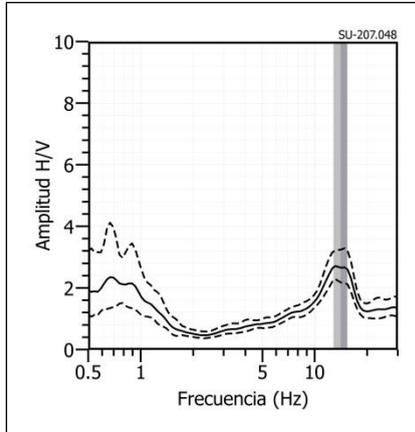
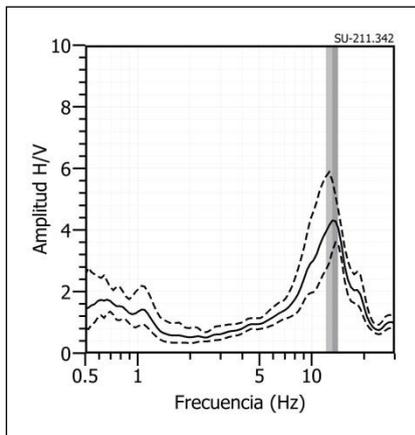


Figura 9: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$). Puntos SU-17(A), SU-48(C) y SU-164(H), ubicados en el centro de la ciudad, próximos a la quebrada Cieneguillo. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SU - 207



SU- 211



SU- 230

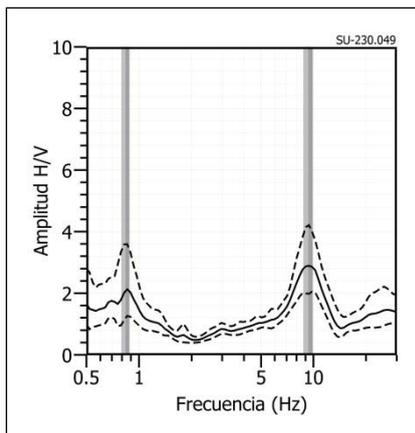
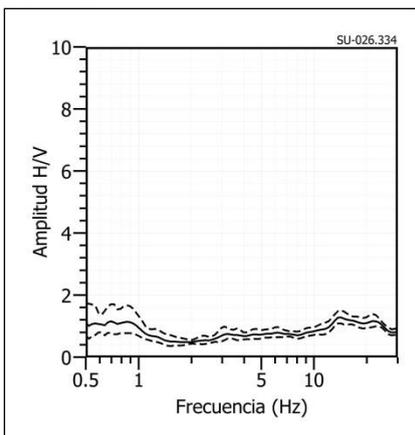
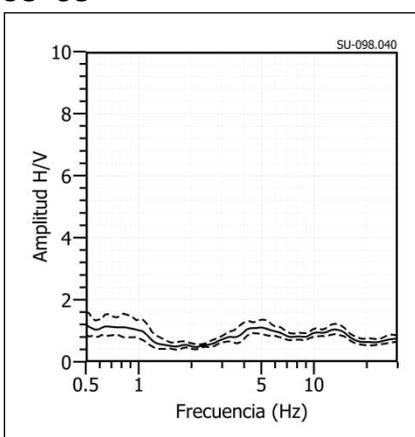


Figura 9: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$). Puntos SU-207(M), SU-211(N) y SU-230(O), ubicados en Nuevo Sullana. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

SU - 26



SU- 98



SU- 173

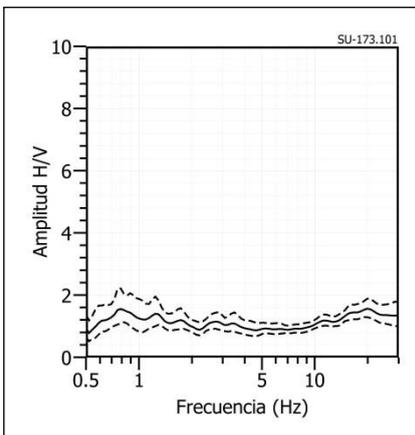


Figura 9: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 2.0\text{Hz}$). Puntos SU-26(B), SU-98(D) y SU-173(J), ubicados el primero al norte del CC. Real Plaza, el segundo ubicado cerca de la IE Fe y Alegría y el tercero por la Urb. Los Olivos. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

El análisis de razones espectrales H/V en el área urbana de Sullana han permitido observar, dos rangos de frecuencias, F0 ($\leq 2.0\text{ Hz}$) y F1 ($> 2.0\text{ Hz}$). El primer rango se presenta de manera puntual en el área de estudio, por las Urb. Nuevo

Sullana, El Jardín y en la Urb. Los Olivos. La frecuencia F1, está presente de manera uniforme en toda la zona estudiada, con amplificaciones mayores a 2.5 veces por el centro de la ciudad, y cerca de la quebrada Cieneguillo. Esto sugiere que los suelos en estas zonas se encuentran menos consolidados respecto al resto del área de estudio.

Los suelos del área urbana de Sullana responden a frecuencias entre 2.0 a 20 Hz, asociados a la presencia de una capa sedimentaria superficial de poco espesor. Sin embargo, al oeste por Nuevo Sullana los suelos responden también a frecuencias menores, lo que evidencia mayores espesores de la capa sedimentaria por estos sectores.

1.2. Análisis Multicanal de ondas Superficiales MASW

El 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 V_s 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 10.

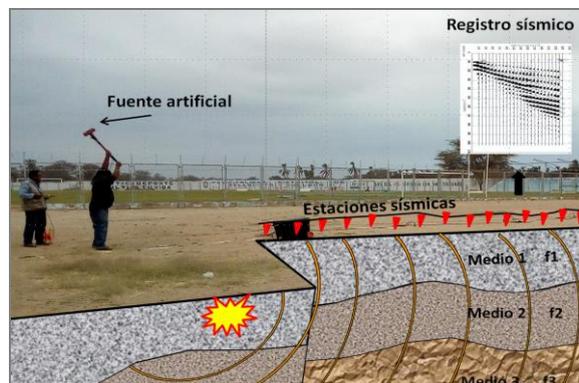


Figura 10: Generación de ondas Rayleigh con fuente artificial y su respectiva curva de dispersión.

La profundidad máxima de investigación (Z_{max}) depende de la longitud de la línea sísmica (D). Usualmente D es más grande que Z_{max} (Park, 2015), es decir: $D=nZ_{max}$, donde ($1 \leq n \leq 3$). Para fines geotécnicos la profundidad máxima de investigación suele estar en el rango de 10-30 m, pero puede variar según el tipo de suelo, la longitud de arreglo sísmico y el tipo de fuente activa utilizada (Park, 2007).

1.2.1. Adquisición de datos

Para el registro de datos se ha utilizado un equipo sísmico (sismómetro) de uso multipropósito, modelo GEODE de Geometrics, y 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, ver Figura 11. Los parámetros de registro, como la geometría del tendido, y el espaciamento entre geófonos, fue variable ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio y su accesibilidad. 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 11: Equipo sísmico para la toma de datos con la técnica MASW en la Urb. Jardín.

En el distrito de Sullana se realizaron 09 arreglos lineales MASW cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 1 y en la Figura 12, el mapa con la distribución espacial de cada una de ellas codificadas como: LS01-SU, LS02-SU,...y LS09-SU.

Tabla 1: Coordenadas y características de los arreglos lineales MASW realizados en Sullana.

Arreglo lineal MASW	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)
LS01-SU	530572	9456422	81	4	92
	530559	9456329	82		
LS02-SU	534651	9457349	71	4	92
	534565	9457324	69		
LS03-SU	532559	9458066	59	4	92
	532648	9458087	62		
LS04-SU	537150	9456780	100	4	84
	537145	9456863	101		
LS05-SU	533373	9457049	74	4	92
	533465	9457052	75		
LS06-SU	535003	9458261	71	3	69
	535065	9458268	69		
LS07-SU	536210	9457972	77	4	92
	536120	9457955	78		
LS08-SU	535251	9459867	58	4	92
	535326	9459922	60		
LS09-SU	536637	9459658	46	4	92
	536723	9459688	49		

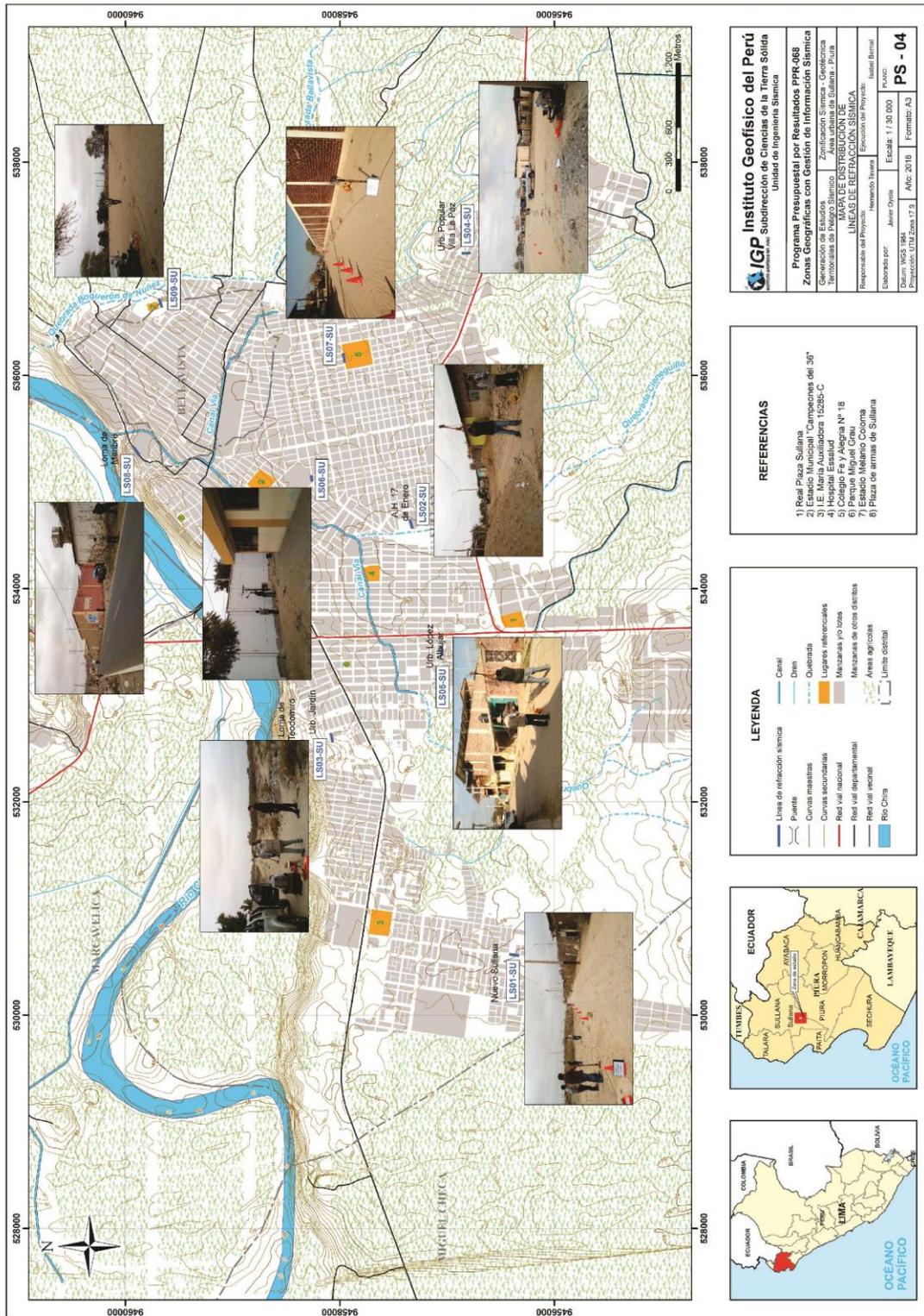


Figura 12: Mapa del área urbana de Sullana y distribución espacial de los arreglos lineales MASW codificadas como: LS01-SU, ..., LS09-SU.

Durante la adquisición de datos se visualiza los sismogramas, a fin de verificar la calidad de la data y el nivel de ruido, tal como se observa en la Figura 13. 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 correlación con la geología local, información que completa la finalidad del estudio.

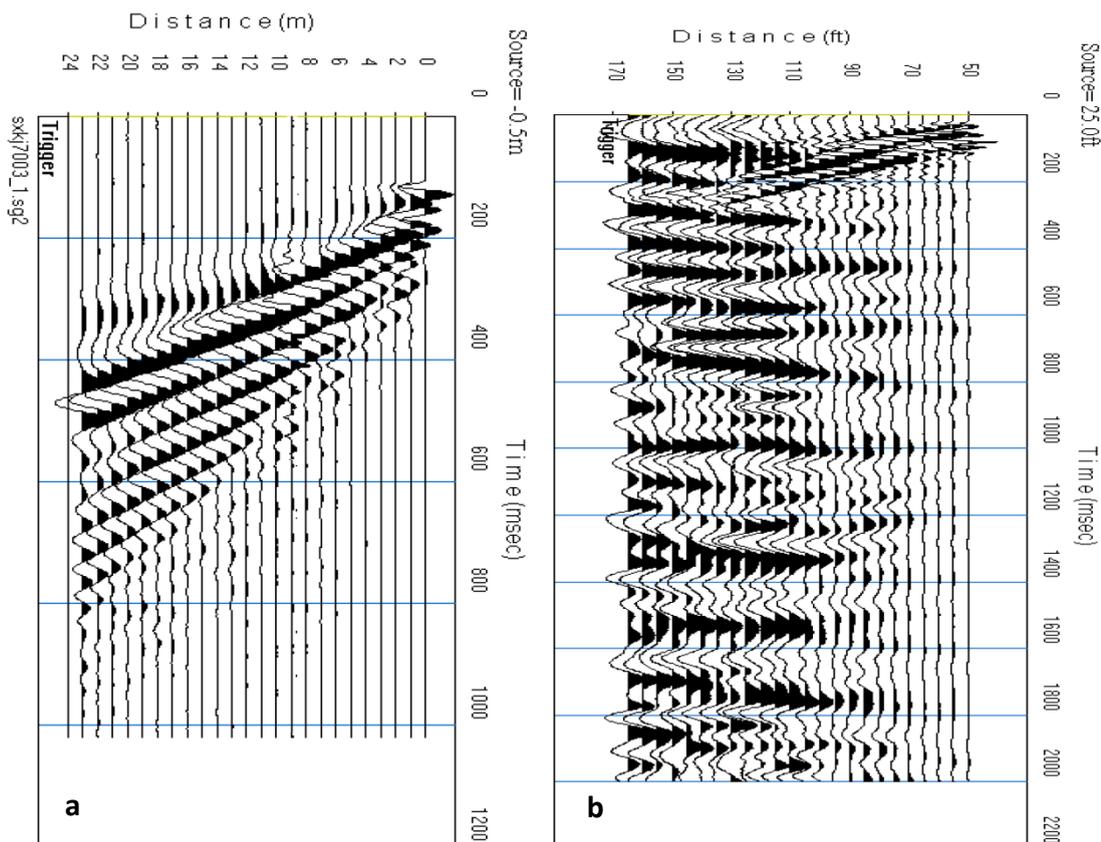


Figura 13: a) Registro sísmico con bajo contenido de ruido ambiental, es decir, alta calidad. b) Registro sísmico con alto contenido de ruido ambiental.

En la Figura 14, se muestra un ejemplo de la disposición del equipo y el registro sísmico obtenido para la línea sísmica LS04-SU, realizada en la urbanización Villa la Paz. 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 3 metros al final de la línea sísmica.

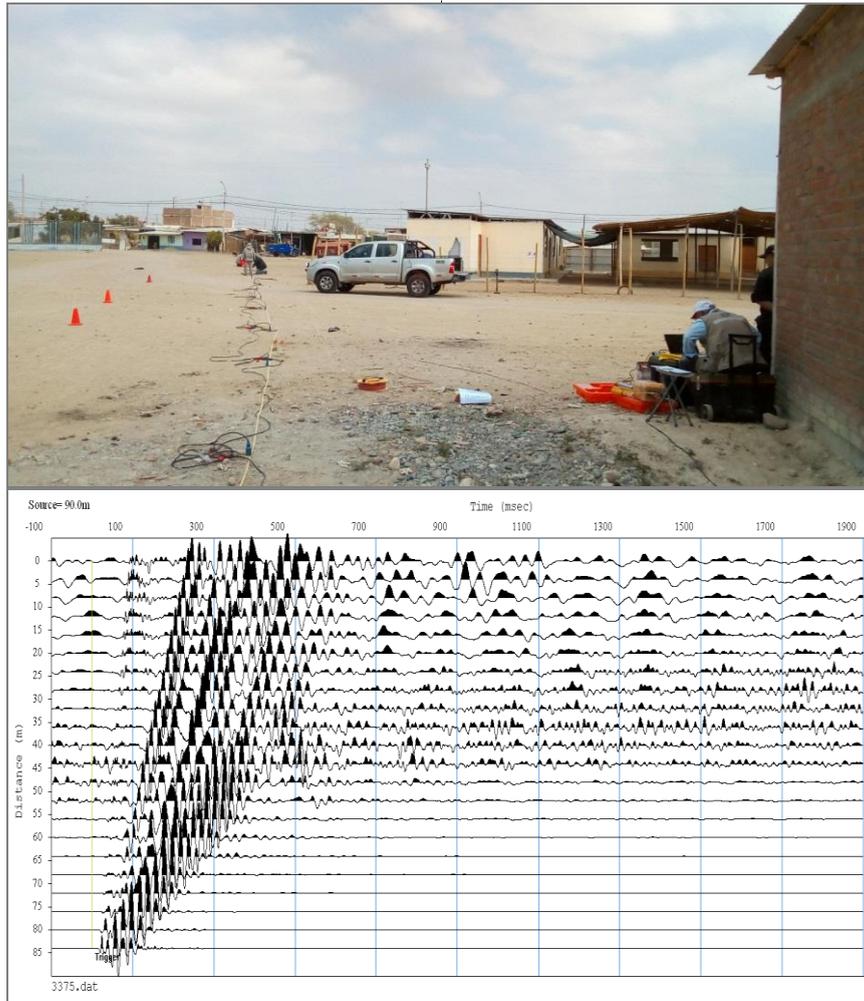


Figura 14. Disposición del equipo de adquisición por el método MASW y su registro sísmico obtenido.

1.2.2 Procesamiento de datos

- **Procesamiento:** Consiste en aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) en los registros sísmicos obtenidos en cada punto de disparo (Reynolds, 2011), lo cual permite la transformación de los datos y 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 arreglo MASW son sometidas de forma individual a un proceso matemático de inversión con el fin de obtener los perfiles Vs en una dimensión (1D), para ello se considera como parámetros de entrada la profundidad (30 m) y el número de capas (15 capas). Finalmente, los perfiles Vs son promediados obteniendo un perfil unidimensional final para cada línea sísmica. Todo este procedimiento permite a través de una línea sísmica obtener un perfil 1D ubicada en la parte media de dicha línea. Los resultados al ser analizados

proporcionan información útil sobre las características físicas del subsuelo (Park, 2014; Roma, 2010; Socco et al., 2008). El procesamiento fue realizado con el programa de computación SeisImager.

En la Figura 15, se muestra un ejemplo de los resultados que se obtiene a partir del arreglo MASW. La imagen de la izquierda muestra la curva de dispersión obtenida y de la derecha, 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 en el dominio de frecuencias 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 muestra una capa sísmica y un semiespacio, donde, el nivel de confiabilidad es de 2 a 30 metros de profundidad.

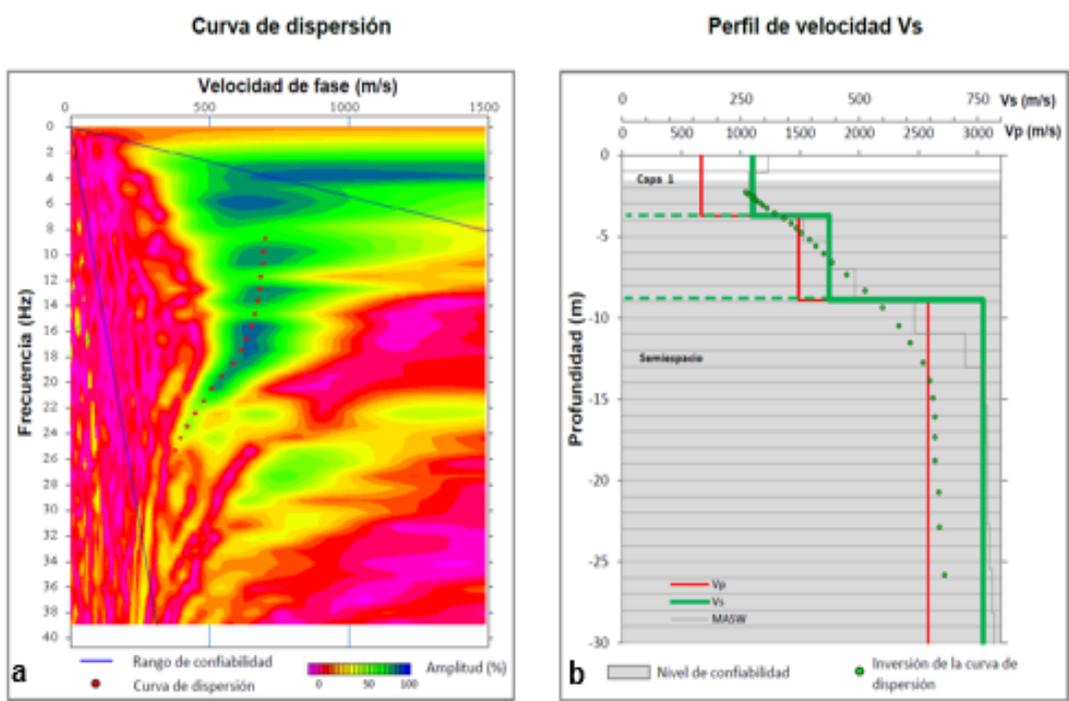


Figura 15: a) Curva de dispersión y b) perfil de velocidad obtenido a partir de la técnica de MASW.

- **Interpretación:** Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en este ítem se considera la clasificación de suelos según la Norma E.030-2018. En este caso, el rango de velocidad de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen a fin de considerar dos clasificaciones adicionales. Asimismo, esta nueva clasificación es representada con colores, para una mejor interpretación de los resultados (Tabla 2).

Tabla 2: Clasificación de perfiles de suelo, a partir de la norma E.030.

Clasificación de los perfiles de Suelo				
N°	Vs	Norma E.030		Descripción
1	< 180 m/s	S ₃	Suelo blando	Suelo blando
2	180 m/s a 350 m/s	S ₂	Suelo medianamente rígido	Suelo moderadamente rígido
3	350 m/s a 500 m/s			Suelo rígido
4	500 m/s a 800 m/s	S ₁	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	S ₀	Roca dura	Roca dura

Finalmente, se realiza la correlación de las capas sísmicas obtenidas con la geología local y con el contenido de humedad o nivel freático, parámetros que influyen en la variación de velocidades de las ondas Vs.

1.2.3. Análisis y resultados

Los modelos de velocidad de propagación (Vs) resultan ser una información muy útil en materia de riesgo sísmico y reconocimiento general, de la estructura y naturaleza del subsuelo.

El procesamiento de los registros sísmicos permitió llegar hasta 30 metros de profundidad en cada línea sísmica. A continuación se describen los resultados obtenidos, agrupados según similitud de velocidad Vs y ubicación.

Perfiles de velocidad de ondas de corte (Vs)

- **Línea sísmica LS01-SU y LS05-SU:** Distribuidos al suroeste del área urbana, ambos en Nuevo Sullana (LS01) y en la Urb. López Albuja (LS05). Ellos indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera, de 4 metros de espesor y velocidades Vs entre 236 a 275 m/s, las cuales sugieren la presencia de suelos moderadamente rígidos; la segunda capa, con velocidades Vs que varían entre 395 a 336 m/s y espesores entre 5 a 7 metros, coherentes con la presencia de suelos rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades Vs > 613 m/s, lo cual sugiere la presencia de suelos muy rígidos.

- **Línea sísmica LS02-SU:** Ubicado en la parte central del área urbana, en el A.H. 17 de Enero (Figura 16). Ella indica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 4 metros de espesor y velocidades V_s de 163 m/s correspondiente a suelos blandos; la segunda, con velocidades V_s de 476 m/s y 10 metros de espesor equivalente a suelos rígidos. El semiespacio, presenta velocidades de $V_s > 883$ m/s corresponde a rocas moderadamente duras.

- **Línea sísmica LS03-SU:** Realizado en la urbanización Jardín, próximo al río Piura (Figura 16). Indica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 2 metros de espesor y velocidades V_s de 208 m/s; la segunda capa, con velocidades V_s de 323 m/s y espesores de 20 metros; ambas capas corresponderían a suelos moderadamente rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades $V_s > 411$ m/s, lo cual sugiere la presencia de suelos muy rígidos.

- **Línea sísmica LS04-SU:** Realizada al este del área urbana, en la urbanización Villa la Paz (ver Figura 16). Indica la presencia de suelos conformados por una capa sísmica de 5 metros de espesor y velocidades V_s de 296 m/s, lo que sugiere la presencia suelo moderadamente rígido. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades $V_s > 458$ m/s que sugiere suelo rígidos.

- **Línea sísmica LS06-SU:** Realizado en la parte central del área urbana en I.E. Carlos Augusto Salaverry (Figura 16). Indica la presencia de suelos conformados por una capa sísmica de 5 metros de espesor y velocidades V_s de 309 m/s, lo que sugiere la existencia de suelos moderadamente rígido. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades $V_s > 697$ m/s, lo que sugiere la presencia de suelos muy rígido.

- **Línea sísmica LS08-SU:** Realizada al norte del área urbana, en el sector Loma de Mambre (Figura 16). Indica la presencia de suelos conformados por una capa sísmica de 5 metros de espesor y velocidades V_s de 423 m/s que sugiere la presencia de suelos rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades $V_s > 619$ m/s, lo que sugiere la existencia suelos muy rígidos.

➤ **Línea sísmica LS07-SU y LS09-SU:** Distribuidos al este del área urbana, en la I.E. Fé y Alegría (LS07) y en el estadio Vella Vista (LS09). Ambas líneas indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera, de 2 a 7 metros de espesor y velocidades Vs entre 224 a 275 m/s que sugieren la existencia de suelos moderadamente rígidos. La segunda capa, con velocidades Vs que varían entre 360 a 425 m/s y espesores entre 7 a 9 metros, y corresponde a suelos rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades Vs > 619 m/s, lo cual sugiere la presencia de suelos muy rígidos.

En la Tabla 3, se resume los valores de velocidades de ondas de corte Vs para los distintos tipos de perfiles de suelo, identificadas para la ciudad de Sullana. En la Figura 16, se presenta los resultados obtenidos para el arreglo sísmico LS01, y para el resto de líneas, ver Anexos.

Tabla 3: Valores de espesor y Vs de los perfiles sísmicos obtenidos para el área urbana de Sullana mediante el arreglo lineal MASW.

Superficie		Profundidad					
Línea Sísmica	N° DE CAPA						VS30 (m/s)
	1		2		Semiespacio		
	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	
LS01-SU	275	4	436	5	762	-	565
LS02-SU	163	5	476	10	883	-	419
LS03-SU	208	2	323	20	511	-	343
LS04-SU	296	5	458	-	-	-	415
LS05-SU	236	4	395	7	613	-	457
LS06-SU	309	5	697	-	-	-	590
LS07-SU	224	2	360	7	737	-	526
LS08-SU	423	5	753	-	-	-	658
LS09-SU	275	7	425	9	619	-	423

	Suelo blando (Vs < 180 m/s)
	Suelo moderadamente rígido (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)
	dura (Vs > 1500 m/s)

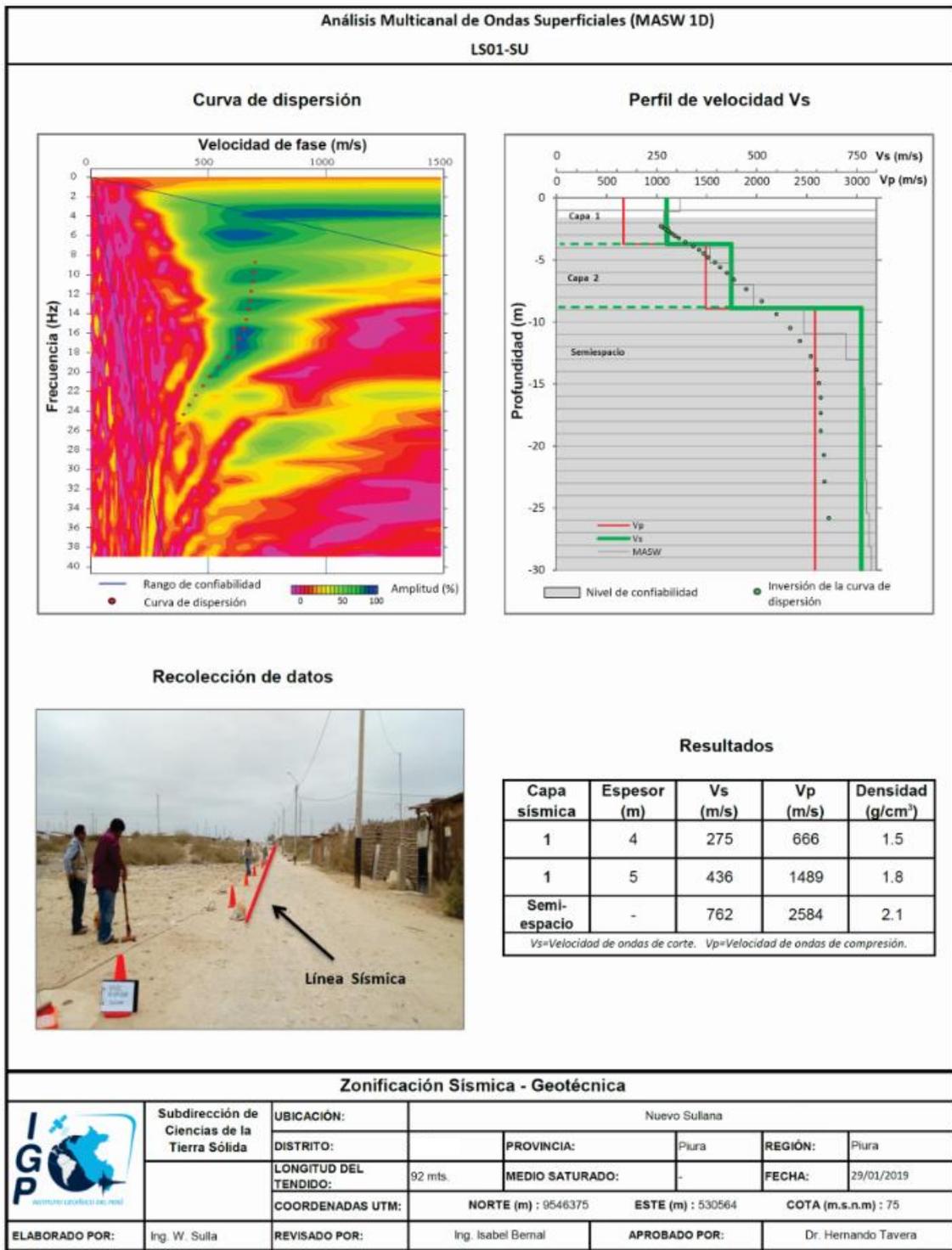


Figura 16. Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo sísmico LS01-SU.

Finalmente, los resultados obtenidos definen la presencia principalmente 2 capas sísmicas y un semiespacio. El análisis de los resultados según cada capa sísmica identificada y su correlación con la geología local, son descritos a continuación:

El área de estudio comprende principalmente el distrito de Sullana y parte del distrito de Bellavista. Ambas se encuentran sobre una superficie llana donde los suelos moderadamente rígidos predominan en superficie. Por debajo, se presentan suelos más compactos cuya rigidez varía de sector en sector y también conforme se incrementa la profundidad, los suelos presentan características de se presentan hasta rocas moderadamente duras. Ver Figura 17.

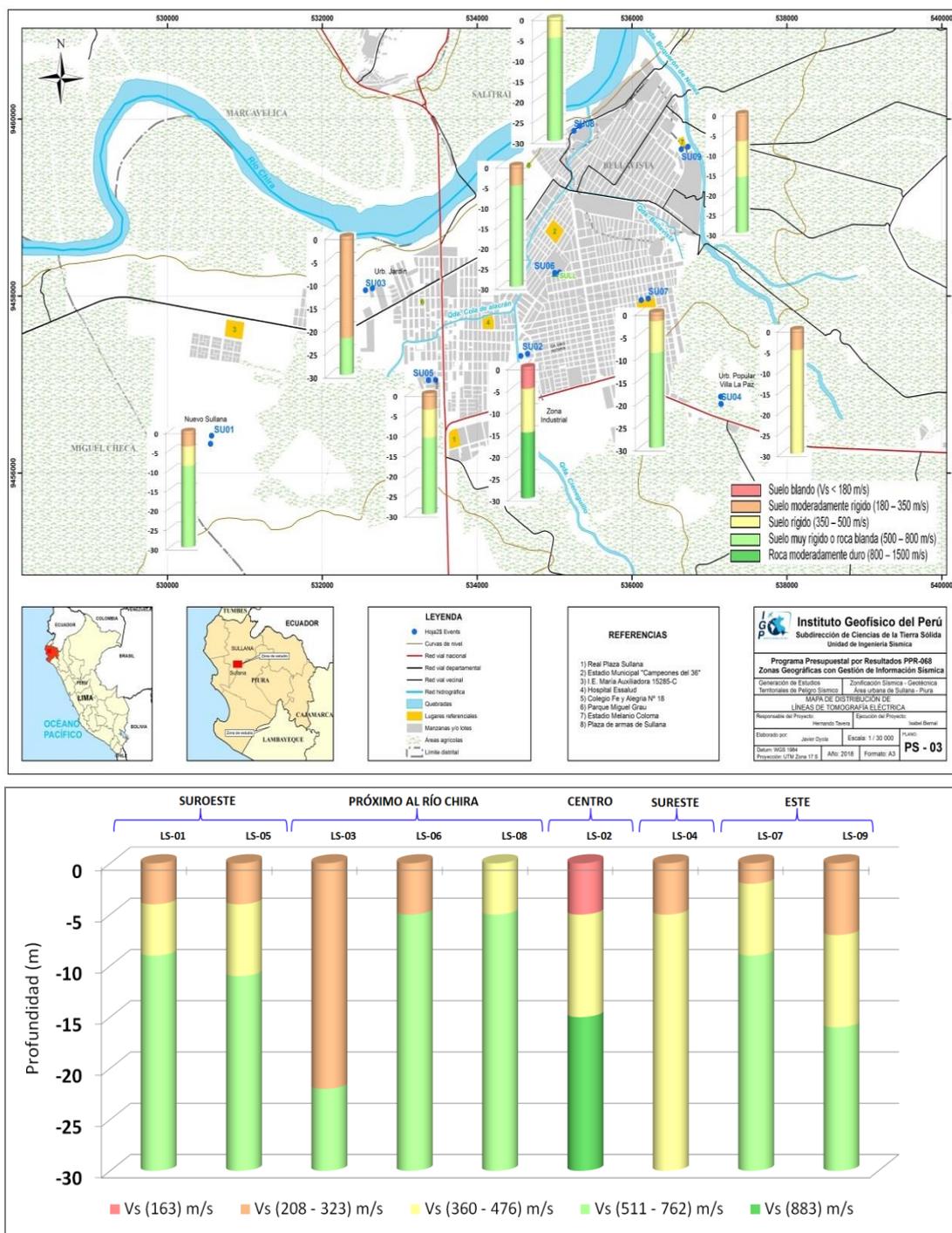


Figura 17: Variación de espesores de los suelos moderadamente rígidos en el área urbana de Sullana.

El espesor de las capas superficiales moderadamente rígidas fluctúan entre los 5 a 22 metros, los de menor espesor se encuentran distribuidos en mayor parte del área de estudio, solo en el sector este (Urb. Jardín – próximo al río Chira), se presentan las capas mayor espesor. De manera puntual, se ha identificado otros tipos de suelo en superficie, suelos rígidos emplazados en el sector de Monte de Mambre (hacia el norte y próximo al río Chira), y los suelos blandos (V_s 163 m/s), emplazados por el A.H. 17 de Enero; en ambos lugares el espesor de capas es de 5 metros. Este último sector se encuentra ubicado próximo a la desembocadura de la quebrada Cieneguillo, donde se concentra y se deposita el agua. Aquí, de acuerdo a lo observado en campo, el presenta humedad, ver Figura 18.



Figura 18: Variación de espesores de los suelos moderadamente rígidos en el área urbana de Piura.

Por debajo del suelo superficial, la rigidez de las capas sísmicas varían. En los sectores próximos al río se identifica la presencia de suelos muy rígidos a poca profundidad (sector Loma de Mambre) y a mayores profundidades en la urb. Jardín. En el resto del área de estudio, se identifica suelos rígidos con espesores del orden de 5, 7 y 10 metros que conforme avanza en dirección sureste (Urb. Villa la Paz) donde el espesor supera los 30 metros de profundidad. Finalmente, a mayor profundidad, se encuentran los suelos muy rígidos.

De acuerdo a la geología local, se observa la presencia de depósitos de eólicos y aluviales que se extienden en la mayor parte del área de estudio (Figura 19) y depósitos fluviales distribuidos mayormente próximos al río Chira. Se presume que ambos depósitos se encuentran emplazados sobre rocas tipo areniscas, las cuales serían consideradas como parte del material más consolidado.



Figura 19: Suelos constituidos de depósitos eólicos emplazados en el sector Nueva Sullana (izquierda) y en la Urb. Jardín (derecha).

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 (Figura 20).

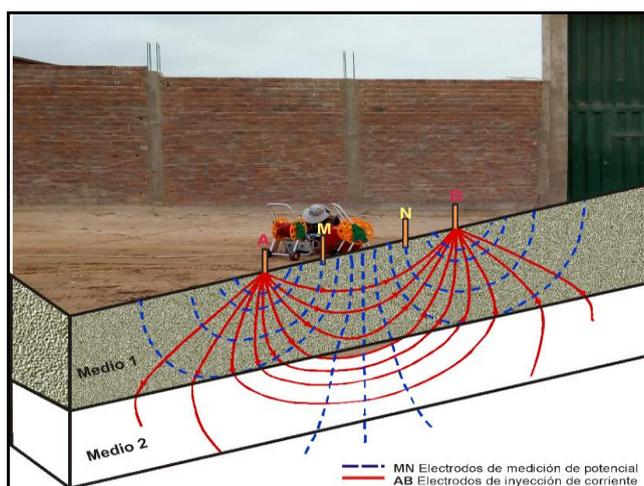


Figura 20. Principio del método de resistividad (LE05-SU).

Para la obtención de valores de resistividad aparente se han realizado líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo. La profundidad de investigación

depende de la separación entre electrodos, y para este estudio, se utilizó una separación de 10 metro, obteniéndose una profundidad de observación máxima de 40 metros. Si se aumenta la distancia entre los electrodos, aumenta la profundidad de alcance, pero disminuye la resolución.

1.3.1 Adquisición de datos

Para el registro de datos se utilizó un equipo de Resistividad / IP Syscal Pro de marca Iris Instruments, cables y accesorios. En Sullana se han realizado 08 líneas de tomografía eléctrica (ver Figura 21), con el dispositivo polo-dipolo y la distribución de 30 electrodos. Para cada línea se consideró un espaciamiento de 10 metros entre cada electrodo, lo cual permitió tener alcances en profundidad en el orden de los 40 metros, sobre un tendido longitudinal que variaba de 190 y 290 metros. Estas longitudes varían de acuerdo a los espacios libres encontrados en el área urbana.

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) realizados en el área urbana de Sullana.

Línea Eléctrica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Longitud total (m)
LE01- SU	530576	9456461	71	10	290
	530529	9456159	71		
LE02- SU	534744	9457359	61	10	190
	534548	9457317	59		
LE03- SU	532638	9458227	70	10	240
	532586	9457978	64		
LE04- SU	537486	9456537	86	10	290
	537782	9456444	82		
LE05- SU	535067	9456574	62	10	290
	534775	9456500	62		
LE06- SU	536654	9459907	61	10	270
	536755	9459641	59		
LE07- SU	536268	9457981	66	10	190
	536070	9457947	68		
LE08- SU	535859	9460139	56	10	190
	535666	9460056	52		

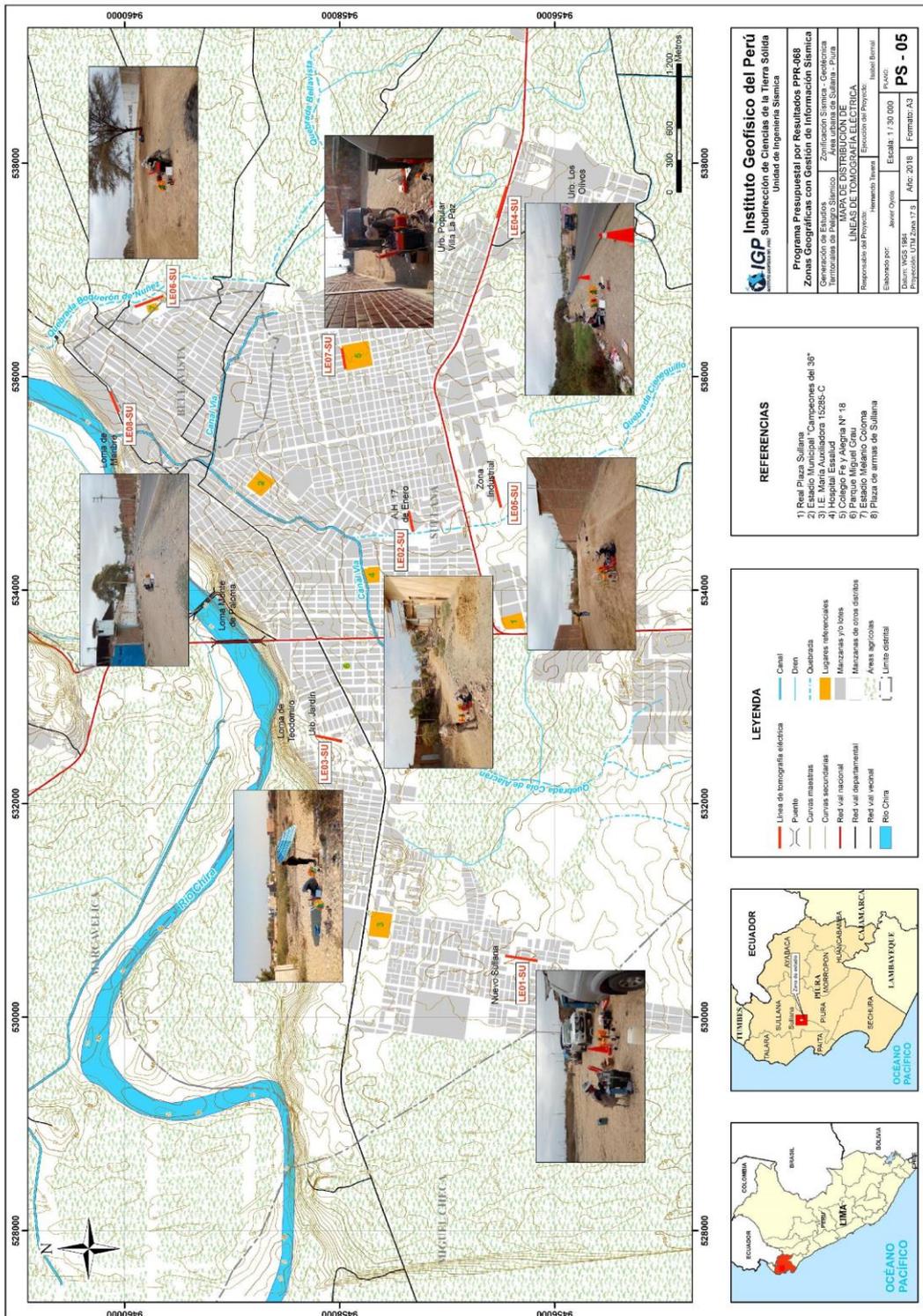


Figura 21. Mapa del área urbana de Sullana y distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica codificadas como: LE01-SU, ... LE08-SU.

La calidad de la señal eléctrica de todos los registros fue evaluada mediante un test de resistencia de contacto entre los electros y el terreno, garantizando la obtención de datos confiables para el procesamiento. Se busca mejorar las imágenes con el uso de filtros que disminuyeran 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 mediante la comparativa de los dos valores de resistividad, siendo los más óptimas aquellos con menores diferencias. En general, 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 Ωm .

En la Figura 22, se muestra la disposición del equipo eléctrico en campo y un ejemplo del análisis preliminar del registro obtenido.

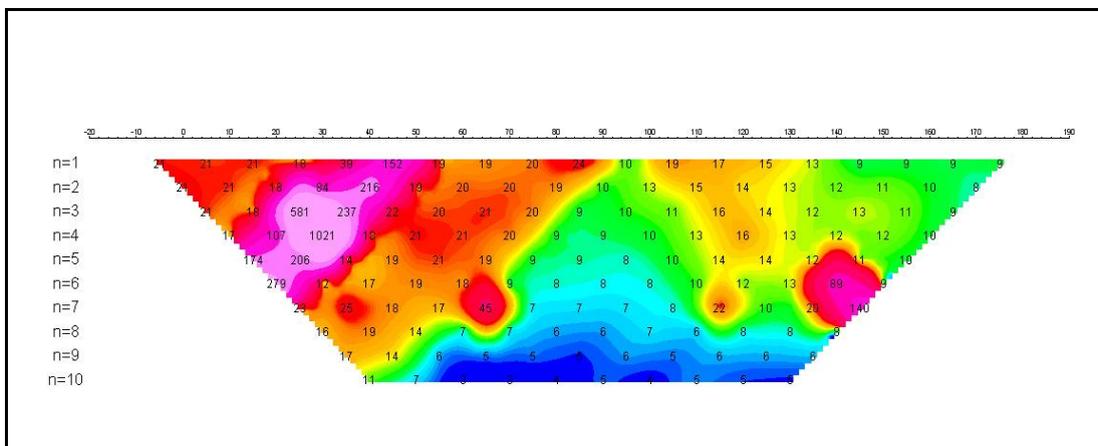


Figura 22: Adquisición de datos de la línea LE07-SU, arriba disposición del equipo de resistividad en el frontis del I.E. Fe y Alegría N° 18, abajo perfil obtenido.

1.3.2 Procesamiento de datos

Procesamiento: 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.

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 el interesado del estudio. Para el procesamiento de la información se ha hecho uso de los algoritmos de inversión DCIP2D y OASIS MONTAJ.

Interpretación: 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.

En la Tabla 5 se describe el rango de resistividades para cada tipo de suelo y sus características se describen a continuación:

Tabla 5: Rango de Resistividades.

Rango de resistividades	ohm.m	Tipo de suelo	
Material muy resistivo	> 1500	Suelo desértico o roca	
Material resistivo	500 a 1500	Suelo seco	
Material medianamente resistivo	100 a 500	Húmedo	
Material bajo resistivo	20 a 100	Parcialmente saturado	
Material muy bajo resistivo	< 20	Saturado y/o presencia de sal	

Dada la estrecha relación que existe entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, es posible definir la ubicación de las áreas de filtración y las zonas saturadas en el 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.

1.3.3. Análisis y resultados

Los valores de resistividad del suelo resultan ser una información muy útil para identificar suelos que presentan alto contenido de humedad y la profundidad del nivel freático. En el área de estudio se realizaron 08 líneas de tomografía eléctrica. Y el procesamiento de los datos permitió observar los suelos hasta una profundidad de 40 metros. A continuación, se describen los resultados obtenidos.

Secciones Geo-eléctricas

A continuación, se describe los resultados obtenidos del análisis de los registros de tomografía eléctrica realizadas en el área urbana de Sullana:

- **Líneas eléctricas LE01-SU y LE03-SU:** realizadas en la Urb. Nuevo Sullana y Urb. Jardín, presentan el predominio de valores medianamente resistivos a muy resistivos. Estos valores se asocian a la presencia de arenas de origen eólico que predominan en la zona. De manera puntual la línea LE01-SU, también presenta valores bajo resistivos ($<100 \Omega.m$), lo cual sugiere la presencia de humedad en el subsuelo (Figura 23).



Figura 23: Vista de la línea eléctrica LE01-SU y LE03-SU.

- **Líneas eléctricas LE02-SU, LE04-SU, LE05-SU y LE07-SU:** realizadas en el A.H. 17 de Enero, Urb. Los Olivos, Zona Industrial y en el frontis del colegio Fe y Alegría respectivamente. En estas líneas los valores predominantes son los muy bajo resistivos ($< 20 \Omega.m$), que se puede deber a la proximidad de las mismas con las Quebradas Cieneguillo, Bellavista; así como a la presencia de terrenos de cultivo. Estas zonas también presentaron problemas de inundación durante los fenómenos El Niño (Figura 24).



Figura 24: Vista de la línea eléctrica LE02-PI, LE04-PI, LE05-PI, LE06-PI, LE09-PI y LE10-PI.



Figura 24: ...Continuación.../ Vista de la línea eléctrica LE02-PI, LE04-PI, LE05-PI, LE06-PI, LE09-PI y LE10-PI.

- **Líneas eléctricas LE06-SU y LE08-SU:** realizadas en el Estadio Municipal Melanio Coloma de Bellavista y en Loma de Mambre. Específicamente, la línea LE06-SU, fue realizada sobre depósitos eólicos, donde predominan los valores bajos resistivos ($<100 \Omega.m$), y que están asociados a la saturación de las arenas debido a la proximidad de la línea con la quebrada Boquerón de Núñez.

En la línea LE08-SU, los valores predominantes van de medianamente resistivos a muy resistivos, y conforme se avanza al suroeste, estos valores desaparecen y aparecen valores bajo a muy bajo resistivos, lo cual podría deberse a su proximidad al canal vía y el río Chira (Figura 25).

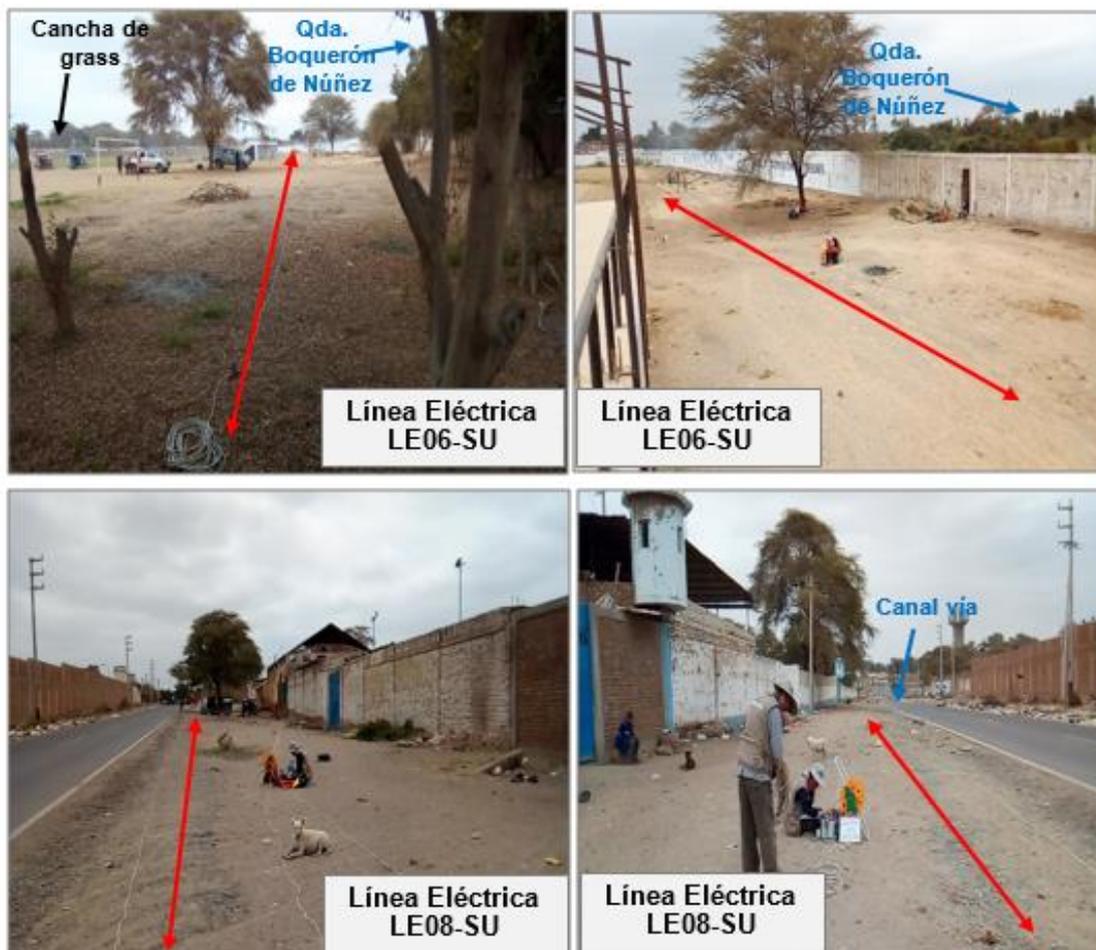


Figura 25. Vista de las líneas eléctrica LE06-SU y LE08-SU.

Geológicamente, el área de estudio se encuentra sobre material cuaternario conformado por depósitos eólicos, aluviales y fluviales; además en algunos sectores podrían conformar acuíferos superficiales libres debido a que están conformados de material no consolidado propenso a almacenar agua subterránea.

En la Tabla 6, se muestra la profundidad de la saturación del medio y en la Figura 26, los resultados obtenidos para la línea LE01–SU. En los Anexos los resultados para las demás líneas restantes.

Tabla 6: Profundidad del medio saturado y material presente en el área urbana de Sullana.

Línea Eléctrica	Profundidad de saturación (m)	Material
LE01-SU	-	Arena mal graduadas
LE02- SU	3	Arena mal graduadas
LE03- SU	-	Arena mal graduadas
LE04- SU	3	Arena mal graduadas
LE05- SU	3	Arena arcillosa, grava arcillosa
LE06- SU	3	Arena mal graduadas
LE07- SU	3	Arena mal graduadas
LE08- SU	-	Arena mal graduadas

De acuerdo a la información analizada, al este del Hospital Essalud predominan los medios saturados debido a la influencia de las quebradas Cieneguillo, Bellavista y Boquerón de Núñez. Contrariamente, al extremo oeste del Hospital, predominan la presencia de suelos son áridos y secos sin capacidad de almacenar agua.

Geológicamente la ciudad de Sullana. Se encuentre sobre suelos del cuaternario conformados por depósitos aluviales, fluviales y eólicos; estos últimos con mayor predominio en el área de estudio. Estos suelos están conformadas por arenas, que por su permeabilidad permiten la formación de acuíferos.

Finalmente, los suelos saturados de la ciudad de Sullana se presentan a partir de 3 metros, de profundidad y puede deberse a la influencia de las diferentes quebradas, drenes que cruzan la ciudad, así como a las zonas de depresión, que durante los fenómenos de El Niño, soportan inundaciones, que se conservan hasta saturar el terreno (Figura 26).

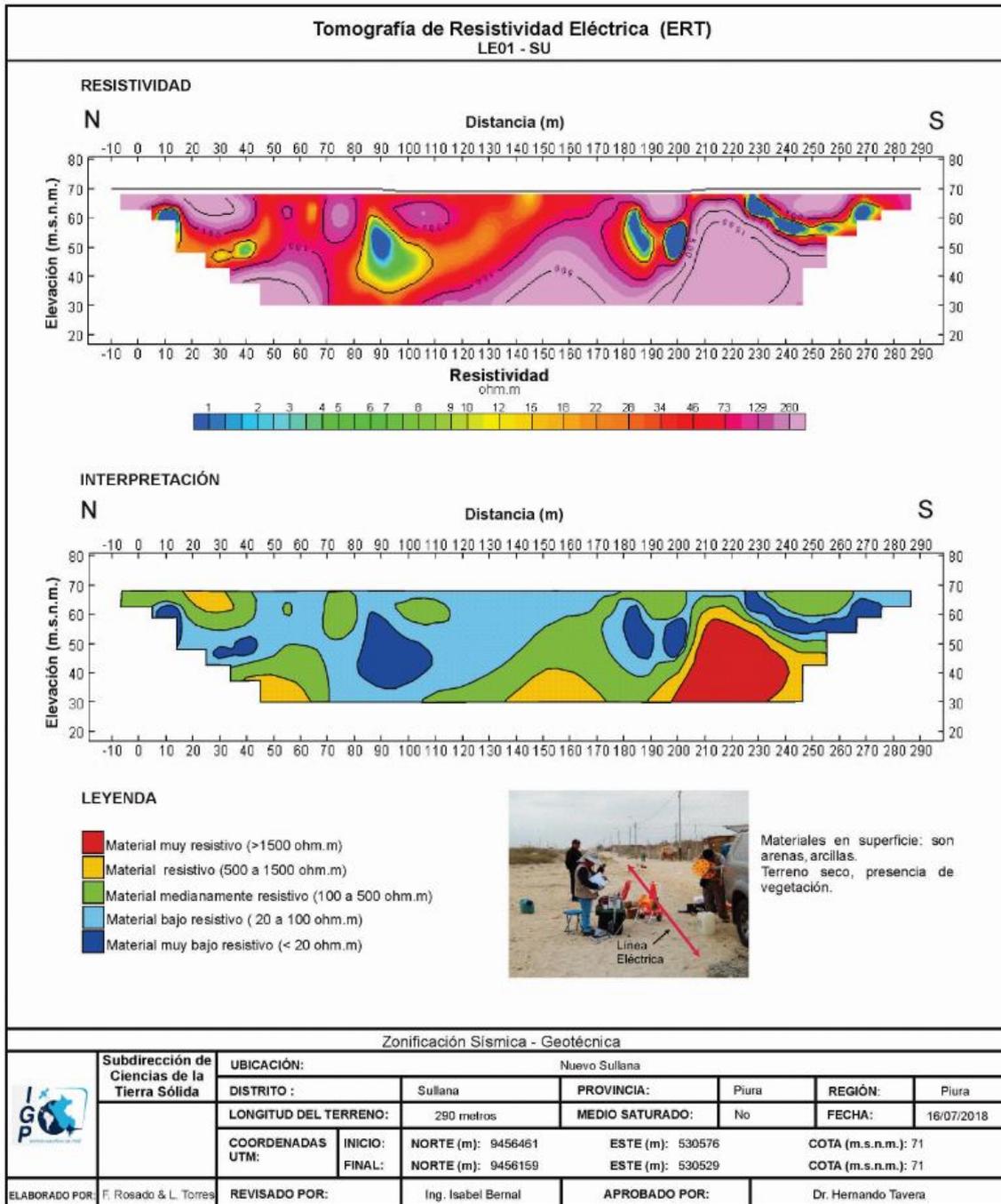


Figura 26: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE01-SU.

2. ZONIFICACIÓN DE SUELOS

El mapa de zonificación sísmica se elabora en función de la integración de los resultados obtenidos de los estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos; complementado con lo indicado en la Norma de Construcción Sismorresistente E.030.

2.1. Integración de resultados

El área urbana de Sullana se encuentra ubicada sobre una superficie predominantemente plana y solo en algunos sectores, es ligeramente ondulada formando lomadas que se emplazan a lo largo de la margen derecha del río Chira. Estas lomadas actúan como barreras ante inundaciones fluviales debido al crecimiento del cauce del río durante las épocas de lluvia; pero que a la vez forman acantilados o barrancos en los cuales pueden generarse procesos de movimiento de masa y afectar a las viviendas que se encuentran sobre las mismas.

Del mismo modo, el área de estudio se encuentran influenciada principalmente por tres cuencas hidrológicas: las quebradas Cola de Alacrán, Cieneguillo y Bellavista. Estas quebradas convergen, en lo que actualmente se le denomina Canal Via para finalmente desembocar en la margen derecha de río Chira. Dichas quebradas en temporada de lluvia se activan trayendo consigo materiales que son depositados a lo largo de su trayecto, de ahí su caracterización geomorfológica actual. Según INDICE y PENUD (2010), el área urbana de Sullana no ha sufrido inundaciones por desborde del río Chira (fluviales) pero si inundaciones pluviales ocurridos en temporadas de lluvias y en condiciones extremas como el del fenómeno El Niño.

- **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 27 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes para el área urbana de Sullana, los cuales han sido separados en dos grupos, en color negro para periodos menores a 0.4 segundos, y en gris para los periodos mayores.

Los periodos dominantes que caracterizan los suelos de Sullana, están relacionados con sus 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 400 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.1 y 0.2 segundos, se la existencia una capa superficial con espesores de mínimos 30 metros. En la zona donde los suelos también responden a periodos largos se estima un espesor de la capa sedimentaria del orden de 60 metros (periodos de 0.8 y 1.5 segundos). La capa superficial de suelos es arenosos considerada como moderadamente rígidos con espesores que varían entre 2 y 5 metros, presentes en todo el área urbana a excepción del sector próximo a la quebrada Cieneguillo (A.H. 17 de Enero). En este último sector, existen arenas y arcillas; es decir, suelos blandos con espesores de hasta 5 metros con alto contenido de humedad según lo observado en superficie y confirmado con los resultados obtenidos en este estudio. INDECI y PENUD (2010) sugieren que esta zona es susceptible a inundaciones pluviales y posibles desbordes de la quebrada Cieneguillo.

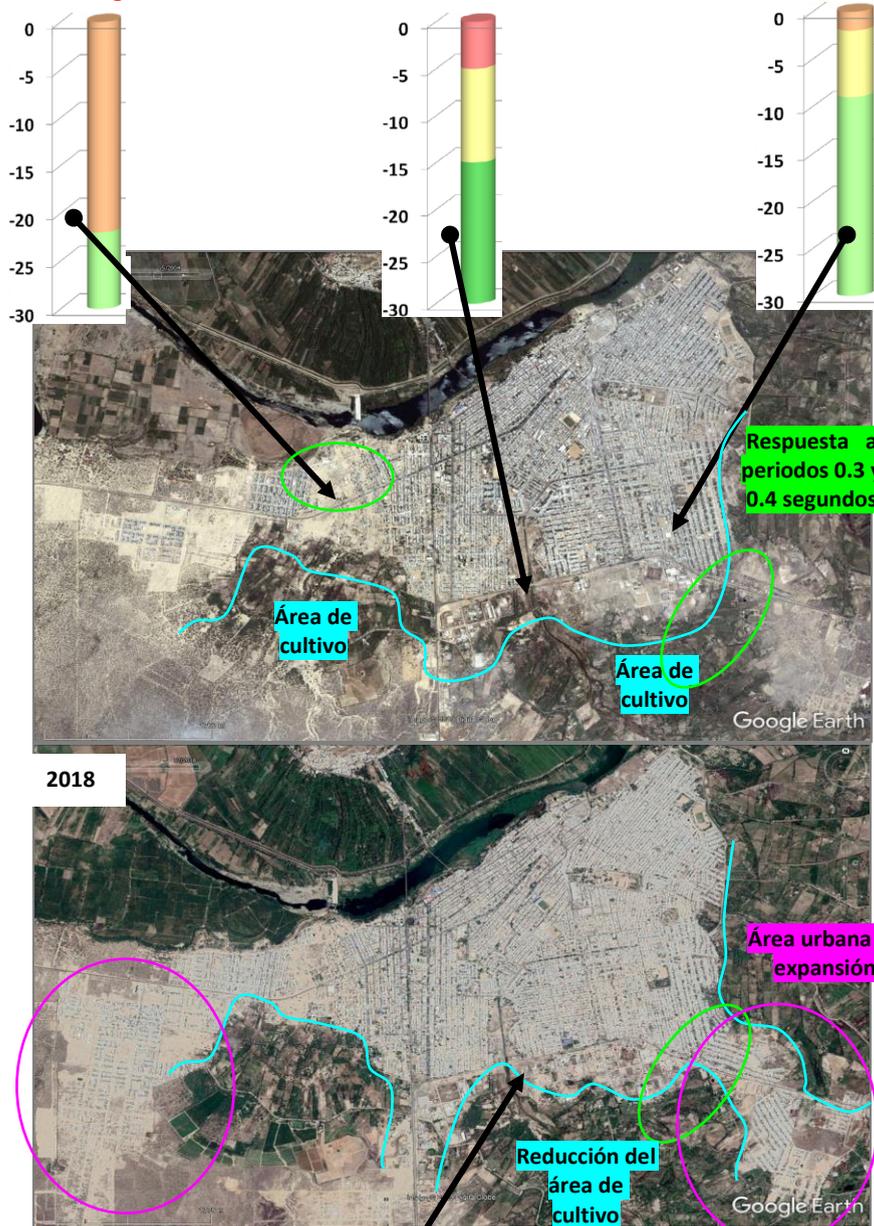
Por otro lado, se identificaron la presencia de suelos con niveles de saturación emplazados en la quebrada Cieneguillo (Hospital Essalud), debido a la influencia de las áreas de cultivo y a la presencia de quebradas que durante las temporadas de lluvia aumenta su cauce, generando inundaciones. Según INDECI y PENUD (2010), en las depresiones ubicadas en el área en mención, el agua pluvial acumulada permite que el suelo se mantenga saturado; además de presentar el nivel freático a una profundidad de 3 metros.

Asimismo, en la Jardín y Loma de Teodomiro se identifica la presencia de arenas sueltas de origen eólico. Por otro lado, en la Urb. Popular Villa la Paz, en años pasados se consideraba como áreas de cultivo, pero actualmente esta considerada como áreas urbanas, tal como se muestra en la Figura 28.

El análisis de amplificación sísmica del suelo es de gran valor, puesto que durante la ocurrencia de un evento sísmico, es el efecto de sitio el de mayor importancia. En la Figura 29 se muestra los periodos predominantes con amplificaciones mayores a 2.5 veces; es decir, los mayores sacudimientos de suelo se presentan principalmente en Nuevo Sullana, entre las quebradas Cola de Alacrán y Cieneguillo; así como por la margen izquierda del Canal Vía. Una de las características que influyen en la amplificación del sacudimiento del suelo, es la presencia del nivel freático y el tipo de suelo; por ejemplo en las márgenes de las quebradas en donde se

identifica la presencia de áreas de cultivo, además de estar constituidos por arenas arcillosas y limosas (depósitos aluviales). Asimismo, en la margen derecha del Canal Vía, las amplificaciones son debido a que el suelo es arenoso y depositados sobre paleocauces a lo largo de los Drenes.

Perfiles de suelo según MASW



Respuesta a periodos 0.3 y 0.4 segundos

Área de cultivo

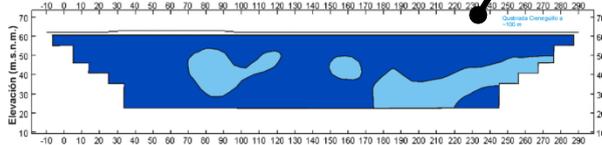
Área de cultivo

2018

Área urbana en expansión

Reducción del área de cultivo

Sección Geo eléctrica



- Material medianamente resistivo (100 a 500 ohm.m)
- Material bajo resistivo (20 a 100 ohm.m)
- Material muy bajo resistivo (< 20 ohm.m)

Los resultados muestran suelos con contenido de humedad

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

Figura 28: Interpretación de resultados obtenidos a partir de ensayos geofísicos.

2.2. Mapa de Zonificación Sísmica

Para el urbana de Sullana, el mapa de Zonificación sísmica-geotécnica, se elabora en función de la integración de los resultados obtenidos de los estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos. Las características dinámicas del suelo y sus propiedades mecánicas, han permitido identificar en el área de estudio, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente E.030, la existencia de suelos de Tipo S1 y S4; los mismos que corresponden a las Zonas I y IV siendo sus características las siguientes:

ZONA I: Considera los suelos más consolidados del área de estudio, constituido por depósitos aluviales, desde el nivel superficial. Solo en los sectores próximos al río Chira (margen izquierda), se identificaron la presencia de depósitos eólicos y pluviales constituidos por arenas y gravas. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte V_s de 240 m/s para la capa superficial y de 680 m/s a la profundidad investigada de 30 metros. El periodo de vibración natural del suelo varía entre 0.1 y 0.2 segundos, tiene un comportamiento medianamente rígido a rígido y es considerado como suelos Tipo S1 según la Norma Sismoresistente peruana. Asimismo, presenta suelos con capacidad de carga admisible menor a 2.0 Kg/cm² hasta un metro de profundidad. Esta zona comprende el 95 % del área de estudio, ver Figura 29.

En la Figura 29, las líneas inclinadas de color negro, delimitan áreas de muy baja amplificación; es decir, suelos muestran mayor consistencia.

Las líneas inclinadas de color naranja indican que los suelos responden a un segundo rango de periodos (0.8 a 1.5 segundos), tal es el caso de Nueva Sullana. Las líneas inclinadas de color amarillo, indican que los suelos responden a periodos entre 0.3 y 0.4 segundos (consideran suelos moderadamente rígidos): Urb. Jardín (Loma de Tedomiro) y Urb. Popular Villa la Paz. Asimismo, las líneas inclinadas de color rojo, delimitan áreas donde los suelos presentan amplificaciones relativas mayores a 2.5 veces; es decir, los mayores sacudimientos durante un evento sísmico se presentará de manera sectorizada en: Nueva Sullana, por las quebradas Cola de Alacrán y Cieneguillo y próximo al Dren Canal Vía.

ZONA IV: Esta zona corresponde a suelos cuyas características físicas y dinámicas son excepcionales; por lo que, su comportamiento comprende a suelos Tipo S4 de la norma sismoresistente peruana, con las siguientes características:

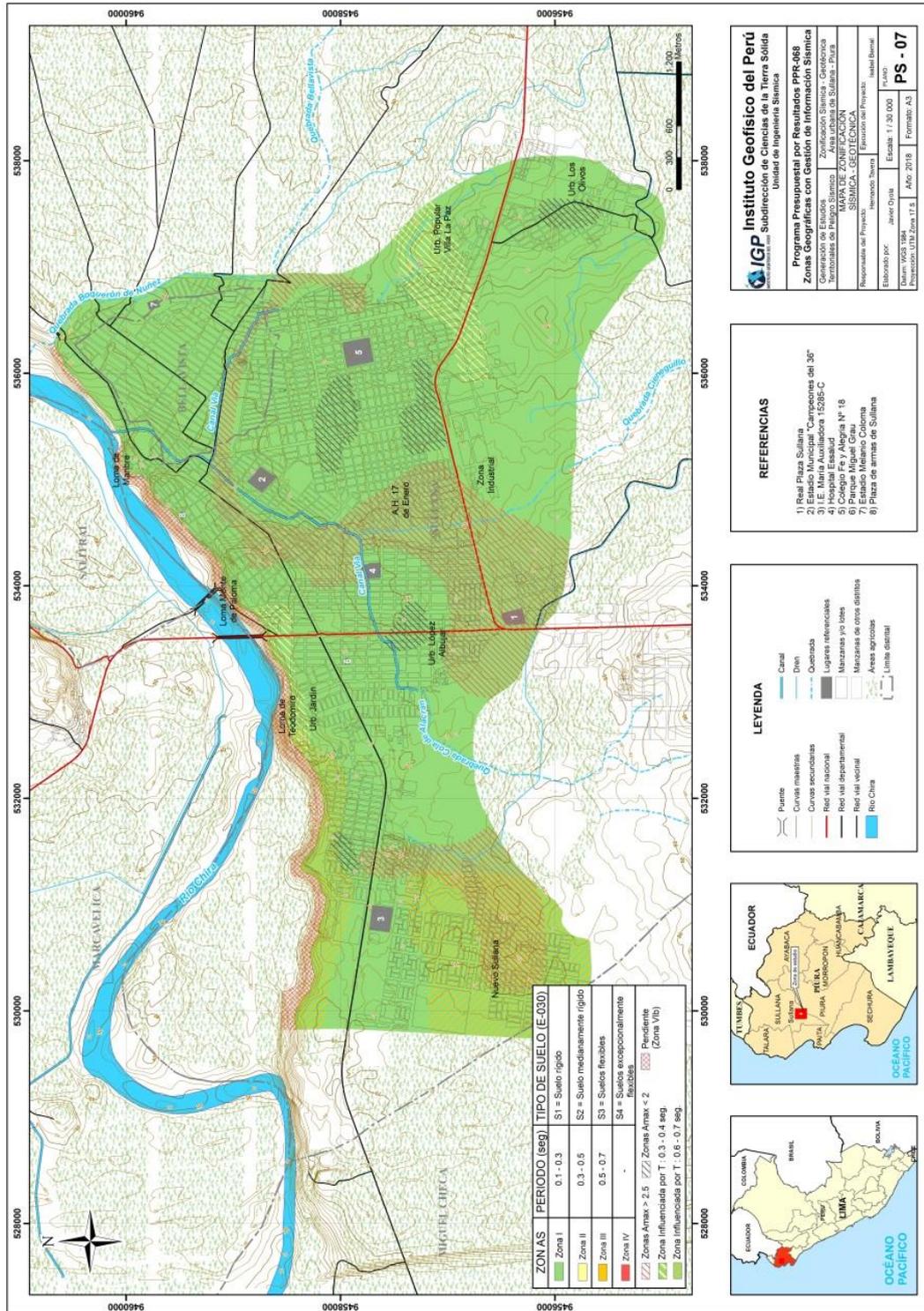


Figura 29: Mapa de Zonificación Sísmica del área urbana de Sullana.

Zona IVb: Corresponde a zonas de topografía irregular, susceptibles a generar derrumbes, además de producirse flujos de detritos. Son aquellos sectores constituidos por suelos constituidos por material inconsolidado y suelto (arenas eólicas), los mismos que se encuentran en la margen izquierda del río Chira. Comprende a las zonas

inestables que presentan pendiente entre 20° a 35° y que podrían deslizarse afectando las vías de acceso y a las zonas urbanas.

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 en 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 que experimente el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

CONCLUSIONES

El estudio de Zonificación Sísmica-Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para el área urbana de Sullana, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos de las razones espectrales H/V, permiten mostrar la misma de un pico de frecuencia bien definido, y que se encuentra en toda el área urbana frecuencias entre 2.7 y 20 Hz. Además, existe de manera puntual áreas con valores de frecuencias menores (0.8 y 1.5 Hz) en Nuevo Sullana y en algunos puntos de la Urb. Los Olivos. Estos valores bajos de frecuencias se asocian a la presencia de depósitos sedimentarios de mayor espesor que dominan las zonas indicadas.
- Los suelos en esta ciudad tienen un comportamiento rígido; sin embargo, próximo al curso de la quebrada Cieneguillo y al sur de nuevo Sullana, existen áreas que presentan amplificaciones relativas mayores a 2.5 veces, lo que evidencia menor consolidación de los suelos.
- De los resultados obtenidos con el método sísmico, en el área de estudio predominan en superficie, suelos moderadamente rígidos (V_s 208 a 323 m/s) con espesores que varían entre 2, y 7 metros en gran parte del área de estudio y de 22 metros, en la urb. Jardín (próximo al río Chira). Por debajo, la rigidez de los suelos varía, siendo los suelos muy rígidos ($V_s > 697$ m/s) próximos al río Chira y los suelos rígidos (V_s 360 a 476 m/s), en el resto del área de estudio. Por debajo de este último y a mayor profundidad, se encuentra los suelos muy rígidos.
- Los valores de velocidad promedio calculados para los primeros 30 metros de profundidad (V_{s30}), según la norma E030-2018, clasifica el área de estudio en dos tipos de suelo, el primero, con rangos de velocidad V_{s30} entre 347 a 457 m/s lo cual sugiere suelos medianamente rígidos emplazados hacia el sur y sureste de Sullana. En el resto del área de estudio, con rango de velocidad V_{s30} entre 526 a 590 m/s sugiere suelo muy rígido.
- El periodo dominante del suelo del área urbana de Sullana varía entre 0.1 y 0.2 segundos, evidenciando la existencia de una capa sedimentaria superficial de poco

espesor, así mismo en las zonas en los cuales los suelos responden a periodos entre 0.8 y 1.5 segundos (Nuevo Sullana), la capa sedimentaria presenta mayores espesores.

- En los sectores de la Zona industrial, Urb. Los Olivos, I.E. Fe y Alegría, A.H. 17 de Enero y el estadio Melanio Coloma de Bellavista, que se encuentran próximos a las quebradas Cieneguillo, Cola de Alacrán y Boquerón de Núñez, se ha identificado la presencia de medios saturados, desde la superficie y la presencia de suelos arenosos, estas que incrementan la posibilidad de la ocurrencia del fenómeno de licuación de suelos ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

- Los resultados obtenidos para el área urbana de Sullana a partir de sus características físicas y dinámicas del suelo, han permitido identificar, de acuerdo a las consideraciones indicadas en la Norma de Construcción Sismorresistente E-030, la existencia de suelos de Tipo S1 y S4.

BIBLIOGRAFÍA

- 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
- 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
- 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. (2006) Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, pag. 130.
- Braja Das, (2011) - Principles of Foundation Engineering, Seven Edition, pág. 139-140.
- 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.
- Chow, V., T., Maidment, D., R., & Mays, L., W., (1994) - Hidrología Aplicada Bogotá, McGrawHill, pág. 584.
- CISMID, (2016) - Densidad de campo. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. Laboratorio Geotécnico.
- CONIDA, (2017) – Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial. Mapa de Estimación de Zonas Inundables.
- Crespo V., C., (2004) - Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 5ta edición.
- Dorbath, L., Cisternas, A., Dorbath, C. (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. Bull. Seismol. Soc. Am., 80 (30), 551-576.
- ENFEN, (2017) - Comisión Multisectorial Encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño".
- Ferrari R; Ramirez V. (1999). Mapa de peligros, plan de usos del suelo y plan de mitigación de los efectos producidos por los desastres en la ciudad de Sullana " INADUR- CEREN y PNUD.
- Flores-Estrella, H., Lomnitz, C. y Yussim S. (2004). "Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC", Geophysics, Vol.

24, N° 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.

Hartzel, S. H. (1992). Site response estimation from earthquake data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 2308-2327

Harvey, A., M., 1987. Patterns of Quaternary aggradational and dissectional landform development in the Almeria region, southeast Spain: a dry-region tectonically-active landscape. *Die Erde* 118, 193-215

Heidelberg Carl Winster Universitat-Shuchhan-Lunc, p. 406.

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, (2017) – Instituto Nacional de Defensa Civil. Estado Situacional de la Emergencia.

Iparraquirre O; Ruiz J. (2015). Levantamiento de información sobre los principales sectores vulnerables ante inundación en la ciudad de Sullana – Piura.

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.

Meyerhof, G., G., (1956) – Penetración Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. *Journal of the Soils Mechanics and Foundations División, ASCE*, Vol 82 N°SM1, Proc. Paper 886, Jan. 1956, pp-19.

Ministerio de Economía y Finanzas, (2017) - Informe de seguimiento y Gestión a la Inversión Pública.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2015) -

<http://renac.mtc.gob.pe/inventariovial/default2.aspx>.

- 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.
- Norma Técnica de edificaciones E.030. 2016. Aprobada por Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA, modificada por Decreto Supremo N° 003-2016-VIVIENDA.
- Orellana, E. (1982). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Pachon et al. (2000) - Implicaciones de la Red de Acelerógrafos de Bogotá en el estudio de Microzonificación Sísmica. INGEOMINAS
- Palacios, O, (1994) - Geología de los cuadrángulos Paita 11-a, Piura11-b, Talara 10-a , Sullana 10-b, Lobitos 9-a, Quebrada Seca 9-b, Zorritos 8-b, Tumbes 8-c y Zarumilla 7-c. Serie A: Carta Geológica Nacional. Boletín N° 54. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico- INGEMMET.
- Palomino L; Mosqueira C. (2010). Estudio Mapa de peligros, plan de usos del suelo ante desastres y medidas de mitigación de la ciudad de Sullana.
- Park, C. B., Miller, R. D. y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves *Geophysics* 64 800-8.
- 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. (2014). MASW for geotechnical site investigation. *The Leading Edge*, 32(6):656-662.
- Park, C.B. (2015). Data acquisition. Retrieved 23 June, 2015, from <http://www.masw.com/DataAcquisition.html>
- Perrone, A., Iannuzzi, A., Lapenna, V., Lorenzo, P., Piscitelli, S., Rizzo, E., and Sdao, F. (2004). Highresolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy), *J. Appl. Geophys.*, 56, 17–29, doi:10.1016/j.jappgeo.2004.03.004
- Pike, R. J., I. S. Evans, and T. Hengl. 2009. *Geomorphometry: A brief Guide*. *Dev. Soil Sci.* 33: 3-30.
- Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2nd ed., 712 pp.
- Roma, V. (2010). Seismic geotechnical site characterization by means of MASW and

ReMi methods. *FastTIMES*, 15(3):16-28.

Roman, F., Jaimes, E., Moreno, M., Cuisano, V., Gallo, M., Yaipen, J. y Flores, M. (2017). Informe de evaluación del riesgo por desastre del río Piura e inundación pluvial en el centro poblado de Castilla, distrito de Castilla, provincia y departamento de Piura. Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. p. 70.

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

Seed HB, Tokimatsu K, Harder LH & Chung R., (1984) - "The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations," Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. EERC 84-15.

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.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), (2018). <http://www.senamhi.gob.pe/>

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.

Sieberg, A. (1930). Los Terremotos en el Perú. Capítulo VI, Geología del Perú de G. Steinmann,

Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 - 1974). *INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 3, 130 p.

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.

Suárez, D., J., (1998) – Estabilidad de Taludes en Tropicales. Instituto de Investigación sobre erosión y deslizamientos. Colombia. Ed. Ingeniería de Suelos Ltda. 550 p.

Tarback, E., D. Lutgens, F., K., (2005) - Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física Pretince Hall. Cap16. 8a edición. 710 pp.

Tavera, H., Agüero, C y Fernández, E. (2016). Catálogo general de isosistas para sismos peruano. Instituto Geofísico del Perú. Pag. 196

Terzaghi, K. Peck, B., G. & Mesri, G., (1948) – Soil mechanics in engineering practice, New York: Wiley.

- 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 Research Board Special report 176. 9-33 p.
- 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.
- Vilchez, et al, (2013) - Riesgo Geológico En La Región Piura. Ingemmet.
- Wyllie, D., C. & Norrish, N., I., (1996). "Stabilization of rock slopes". 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
- Zinck, J. & Valenzuela, C., (1990) – Soil geographic database: structure and application examples. ITC Journal, 1990(3), 270-294

ANEXOS

ANEXO

La información que se detalla está contenida en el CD que se adjunta al presente Informe Técnico. “Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Sullana”.

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

2.- Información Geofísica

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