

## 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 GEOFÍSICA – GEOTÉCNICA DEL ÁREA URBANA DE SAN PEDRO DE COAYLLO

**Instituto Geofísico del Perú**

Presidente Ejecutivo: Dr. Hernando Tavera

Director Científico: Dr. Danny Scipion

**Autores**

Isabel Bernal

*Caracterización Geofísica del área urbana de San Pedro de Coayllo*

Juan Carlos Gomez

*Caracterización Geológica y Geotécnica del área urbana de San Pedro de Coayllo*

Equipo de Evaluación Geológica y Geotécnica: Segundo Ortiz Yovera

Equipo de Evaluación Sísmica y Geofísica: Fabiola Rosado / Henry Salas / Wilfredo Sulla  
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 GEOFÍSICA – GEOTÉCNICA DEL ÁREA URBANA DE SAN PEDRO DE COAYLLO**

**Distrito de San Pedro de Coayllo – Provincia de Cañete – Región Lima**

## RESUMEN

*En el marco del Programa Presupuestal por Resultados N°068: Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres se ejecutó el proyecto “Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica”, el mismo que tuvo como una de sus actividades la “Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico” obteniéndose como resultado final, la Zonificación Geofísica - Geotécnica de las áreas urbanas de las ciudades/localidades de San Pedro de Coayllo (distrito de Coayllo), Chilca (distrito de Chilca), Humay (distrito de Humay), Imperial (distrito de Imperial), Nuevo Imperial (distrito de Nuevo Imperial), Quilamana (distrito de Quilamana), San Antonio (distrito de San Antonio), San Clemente (distrito de San Clemente) y San Luis (distrito de San Luis).*

*Estos estudios permiten conocer el Comportamiento Dinámico de los Suelos a partir de la recolección de datos de campo utilizando técnicas geofísicas, sísmicas, geológicas y geotécnicas.*

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

## ÍNDICE

### **RESUMEN**

### ÍNDICE

### **PARTE 1**

#### 1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Objetivo
- 1.2. Historia
- 1.3. Accesibilidad y clima
- 1.4. Economía

#### 2.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

- 2.1. La Norma Técnica E.030

### **PARTE 2**

Caracterización geológica y geotécnica del área urbana de San Pedro de Coayllo.

### **PARTE 3**

Caracterización geofísica del área urbana de San Pedro de Coayllo.

### **BIBLIOGRAFIA**

**ANEXOS:** Documentos y Anexos se adjuntan en formato digital.

## 1. INTRODUCCIÓN

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

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

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región centro- sur 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 Lima e Ica (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.

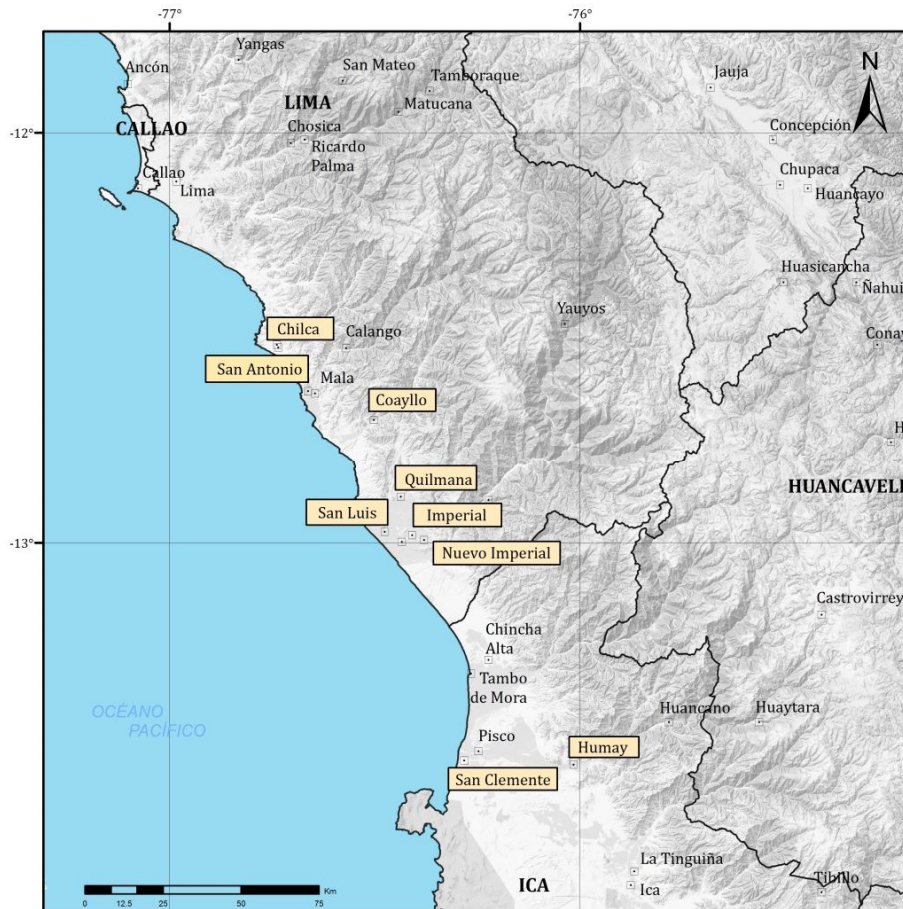


Figura 1: Distribución espacial de los distritos intervenidos en el año 2016.

Los estudios de Zonificación Geofísica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo), permitirán tener mayor conocimiento sobre las características dinámicas del suelo sobre el cual se levantan las ciudades y/o futuras áreas de expansión. Para ello se realiza la aplicación de diferentes metodologías que consideran datos sísmicos, 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 del área urbana de San Pedro de Coayllo debe comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente ([www.acerosarequipa.com](http://www.acerosarequipa.com)):

a.) **Buenos Planos.** Los planos de construcción deben ser hechos por profesionales con pleno conocimiento de las características dinámicas del suelo descritas en los Mapas de Zonificación Geofísica – Geotécnica.

b.) **Buenos Profesionales.** Para la construcción de las viviendas y/o obras de ingeniería se debe contar siempre con la supervisión de ingenieros civiles, arquitectos, etc.

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

Es importante remarcar que los Mapas de Zonificación Geofísica – 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 Geofísica - Geotécnica para el área urbana de San Pedro de Coayllo, distrito de San Pedro de Coayllo, provincia de Cañete, Región de Lima, a partir de la integración de los resultados obtenidos con la aplicación de diferentes métodos sísmicos, geofísicos, geológicos y geotécnicos. Asimismo, es de interés del presente estudio que las autoridades dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del ordenamiento territorial y desarrollo sostenible de la ciudad.

### 1.2. Historia

San Pedro de Coayllo fue creado en los primeros años de la República con la presencia del Libertador José de San Martín, con la división, a partir de entonces, en departamentos, provincias y distritos. Se inicia en la vida republicana como uno de los ocho distritos de la Provincia de Cañete que incluía además; Chilca, Mala, San Vicente, Pacarán, Chíncha Alta, Chíncha Baja y Lunahuaná.

Coayllo, llamada "Tierra de los nísperos" o "Tierra de brujos", es una zona eminentemente turística. En ella se pueden apreciar su antigua iglesia que data de 1594 y que fue restaurada en 1914 (aunque dañada seriamente por el terremoto de 2007), ver Figura 2. También la zona arqueológica de Uquira, con sus palacios, plazas ceremoniales

y una necrópolis ubicada a 3 km del centro del distrito. En ellas se encuentra la representación en piedra, de la popular leyenda de "El Cóndor y la Serpiente" y entre otros.

Hoy en día, San Pedro de Coayllo es una localidad y balneario peruano ubicado en el distrito de Chila, provincia de Cañete, región de Lima (Figura 3). Se encuentra en el margen Occidental y región centro de Perú, a una altitud promedio de 290 m.s.n.m., limita por el Norte con el distrito de Calango, por el Nor-Oeste con Mala, por el Sur con Quilmaná, por el Sur-Oeste con Asia y por el Este con la provincia de Yauyos.

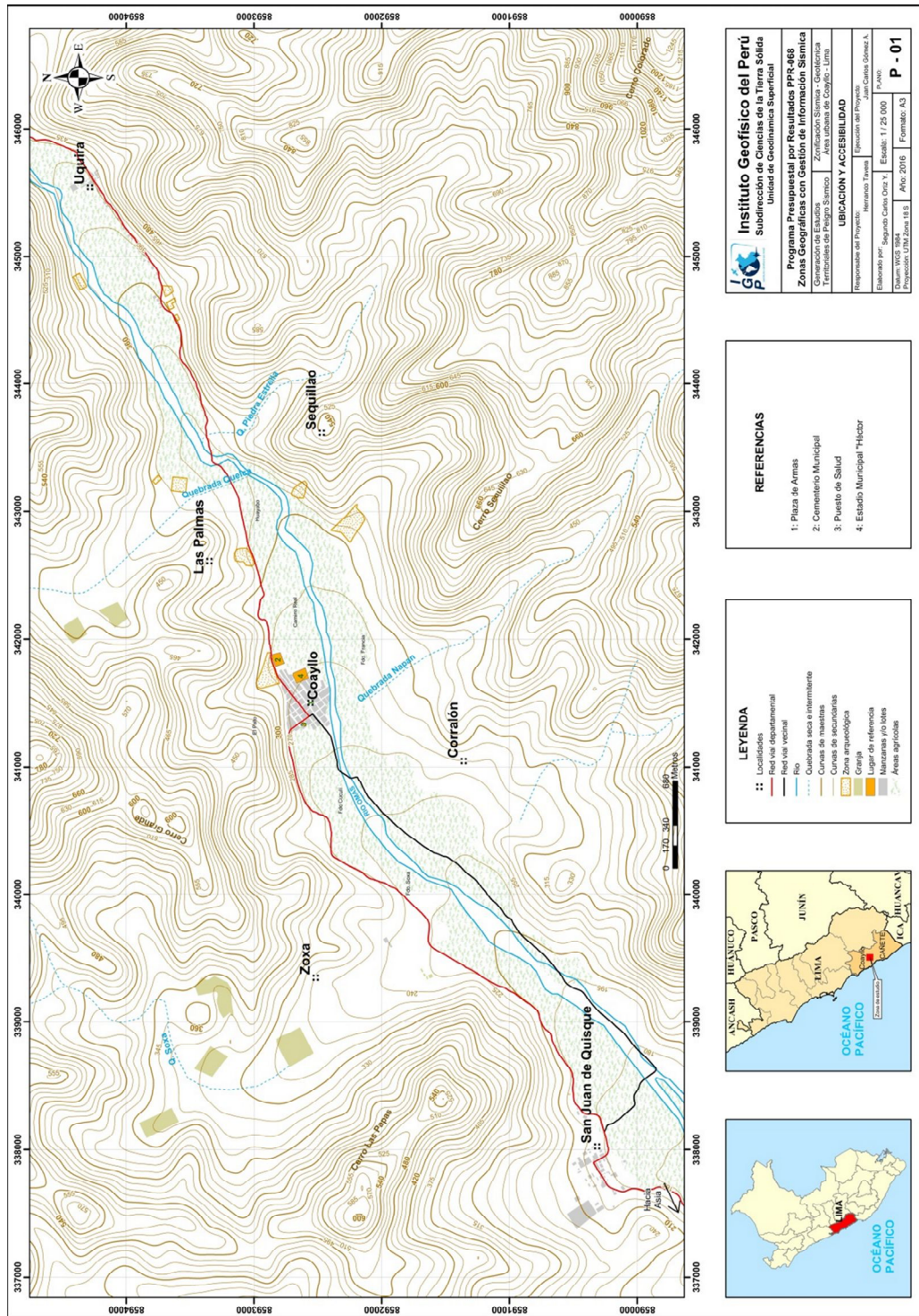
La zona de estudio abarca aproximadamente un área de 53.30 km<sup>2</sup> y esta conformada por los sectores de: Zoxa, San Juan de Quisque, Las Palmas, Coayllo, Sequillao, Uquira, Unchor, Callangas, Huarangal, Canoa, Muralla, La Capilla, Totoral Alto, Totoral Bajo, Omas, Cochahuasi, Copite, Laquis y Huayo.



*Figura 2: Plaza de Armas de la ciudad de San Pedro de Coayllo- Cañete.*

### **1.3. Accesibilidad y Clima**

El acceso al área urbana de San Pedro de Coayllo, se realiza a través de la Carretera Panamericana Sur hasta el distrito de Asia, luego por una vía totalmente asfaltada hacia Coayllo.



**Instituto Geofísico del Perú**  
 Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida  
 Unidad de Geotécnica Superficial

Programa Presupuestal por Resultados PRR-468  
 Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica

Generación de Estudios: Zonificación Sísmica - Geotécnica  
 Temblorales de Páezgo Sarmiento  
 Área Urbana de Coaylo - Lima

**UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD**

Responsable del Proyecto: Ingerente Técnico | Ejecutor del Proyecto: Carlos Gómez A.  
 Elaborado por: Segundo Carlos Ortiz Y. | Escala: 1:25 000  
 Autorización: Resolución UML Zona 18.5 | Año: 2016 | Formato: A3  
 P-01

- REFERENCIAS**
1. Plaza de Armas
  2. Cementerio Municipal
  3. Puesto de Salud
  4. Estado Municipal "Hicbr"

- LEYENDA**
- :: Localidades
  - Red vial departamental
  - Red vial vecinal
  - Dorsales secos e intermiendo
  - Curvas de nivel
  - Zona arqueológica
  - Granja
  - Lugar de referencia
  - Manzanas y/o lotes
  - Área agrícola



Figura 3: Mapa de ubicación geográfica de San Pedro de Coaylo.

Para conocer las condiciones climáticas de San Pedro de Coayllo, se han tomado datos referenciales de la web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La estación meteorológica La Capilla 2 se encuentra ubicada a 22.67 km al NO de Coayllo, en las coordenadas geográficas; Latitud: 12° 31' 18.1", longitud: 76° 29' 35.3" y en cota 442 m.s.n.m. Según la información registrada en esta estación (período 2011 – 2016), Coayllo presenta un clima seco y semi-cálido, con una temperatura media mensual, que durante los meses de verano oscila entre 27.59 °C y 32.85 °C; mientras que, el mes más frío es en agosto con temperaturas de 12.60 °C en promedio, ver Tabla 1 y Figura 4.

Tabla 1: Temperaturas máximas y mínimas medias mensuales (2011-2016), recopilados de la estación meteorológica La Capilla 2 (SENAMHI, 2010). SD Sin datos.

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

#### 1.4. Economía

La principal actividad económica de Coayllo es la agricultura (cultivo de yucas, maíz, entre otros), fruticultura (básicamente la producción de nísperos), así como el comercio y la ganadería (crianza de ganado ovino, vacuno equino, caprino y porcino).



Figura 4: Estación Meteorológica “La Capilla 2”, ubicada a 26.67 km al NE del área urbana de San Pedro de Coaylo.

## 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 Geofísica, geotécnica y el resultado es considerado como una de las herramientas más importantes para minimizar los daños producidos por los sismos. La finalidad es evaluar el comportamiento dinámico de los suelos (CDS), teniendo en cuenta que la intensidad 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.

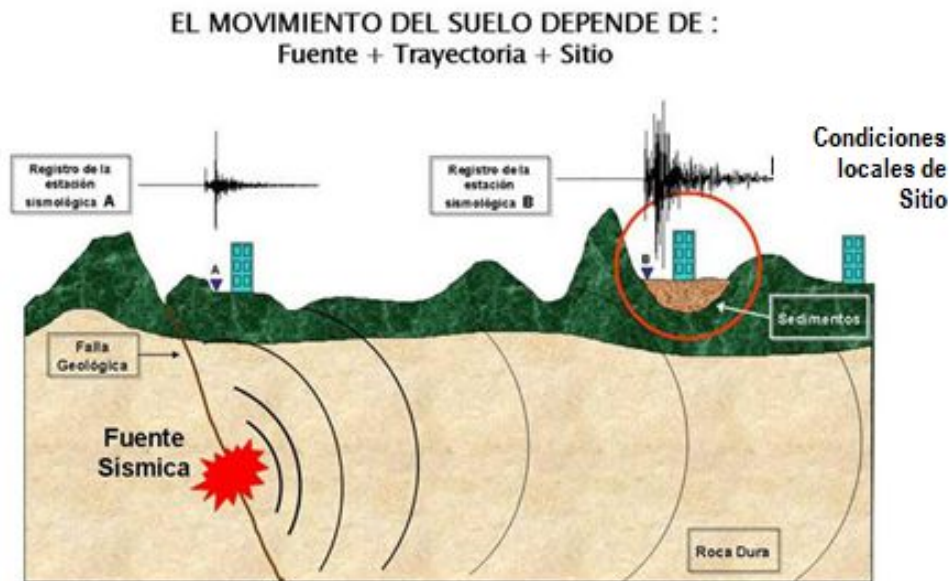


Figura 5: Las condiciones locales de sitio controlan la amplificación del sacudimiento del suelo, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos.

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 Geofísica - Geotécnica que debe constituirse como el documento más importante en las tareas y programas de gestión del riesgo ante la ocurrencia de sismos.

## 2.1. La Norma Técnica E.030

En el Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones, modificada según Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda. Básicamente, esta norma considera los perfiles de suelos en función de sus propiedades mecánicas, 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 estable 5 perfiles (Tabla 2):

- **Perfil Tipo  $S_0$ : Roca Dura**, correspondiente 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<sub>2</sub>: Suelos Intermedios**, son suelos medianamente rígidos, con velocidades de propagación de onda de corte  $V_s$  entre 180 y 500 m/s.
- **Perfil Tipo S<sub>3</sub>: Suelos Blandos**, también denominados suelos flexibles con velocidades de propagación de onda de corte  $V_s$  menor o igual a 180 m/s.
- **Perfil Tipo S<sub>4</sub>: 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).

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

Perfil	$V_{s30}$ (m/s)	Descripción
S <sub>0</sub>	> 1500	Roca dura
S <sub>1</sub>	500 a 1500	Roca o suelo muy rígido
S <sub>2</sub>	180 a 500	Suelo medianamente rígido
S <sub>3</sub>	< 180	Suelo blando
S <sub>4</sub>	Clasificación basada en el EMS	Condiciones Excepcionales

La velocidad de propagación de ondas de corte para los primeros 30 metros ( $V_{s30}$ ) se determina con la siguiente fórmula:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{d_i}{V_{si}} \right)}$$

Dónde:

$d_i$  = espesor de cada uno de los estratos n.

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

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

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

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

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

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

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

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

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA  
PARA EL ÁREA URBANA DE SAN PEDRO DE COAYLLO**

## CONTENIDO

1. METODOLOGÍA
2. GEOMORFOLOGÍA
  - 2.1. Base topográfica
  - 2.2. Modelo digital de terreno
  - 2.3. Pendientes
    - 2.3.1. Clasificación del grado de pendientes
  - 2.4. Unidades geomorfológicas
3. GEOLOGÍA
  - 3.1. Geología regional
    - 3.1.1. Geología histórica
    - 3.1.2. Geología estructural
  - 3.2. Geología local
4. GEODINÁMICA
  - 4.1. Procesos de geodinámica interna
  - 4.2. Procesos de geodinámica externa
    - 4.2.1. Datos de entrada al programa
    - 4.2.2. Resultado de las simulaciones
  - 4.3. Zonas susceptibles a procesos geodinámicos externos
- 5.- ASPECTOS GEOTÉCNICOS
  - 5.1. Exploraciones a cielo abierto (norma ASTM D420)
    - 5.1.1. Descripción de calicatas
  - 5.2. Densidad del suelo in-situ (Norma ASTM D1556)
  - 5.3. Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D1452)
  - 5.4. Ensayos de penetración dinámica ligera (norma DIN 4094)
  - 5.5 Correlación entre “N” DPL- SPT
  - 5.6. Ensayo de corte directo (Norma ASTM D - 3080)
  - 5.7. Capacidad de carga admisible
    - 5.7.1. Carga última
  - 5.8. Clasificación de suelos SUCS

## 1. METODOLOGÍA

Para realizar la caracterización geológica y geotécnica de los suelos en el área urbana de San Pedro de Coayllo, se ha seguido la siguiente metodología:

- ✓ **Gabinete I:** Las actividades realizadas incluyeron la revisión de imágenes satelitales pancromáticas no estereoscópicas (GeoEye-1 del Servidor Digital Globe, 2013, con resolución 0.60 m), con la finalidad de delimitar la zona de estudio. Asimismo, la recopilación de información bibliográfica de la zona a escala regional y local (boletines geológicos, informes técnicos, entre otros).
  
- ✓ **Campo I:** Se realizó el cartografiado de las unidades geomorfológicas y litológicas aflorantes a escala 1: 25 000. Asimismo, se identificó y delimitó los eventos geodinámicos. Paralelo a este trabajo se realizó el levantamiento topográfico a escala 1:15,000.
  
- ✓ **Campo II:** Elaboración de ensayos geotécnicos de acuerdo al siguiente detalle:
  1. Elaboración de calicatas: Para la extracción de muestras, se realizaron 07 calicatas a una profundidad promedio de 3.00 m.
  2. Ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), para determinar la resistencia de los suelos al ser penetrados se elaboraron 08 DPL.
  3. Ejecución de auscultaciones haciendo uso de posteadora, los puntos se distribuyeron en zonas intermedias a la ubicación de las calicatas más próximas, siendo un total de 5 posteos.
  
- ✓ **Laboratorio:** Se realizó el procesamiento de las muestras de suelos, a través de ensayos de laboratorio de granulometría (clasificación SUCS), humedad, densidad y corte directo (capacidad de carga admisible).
  
- ✓ **Gabinete II:** Elaboración del informe técnico correspondiente y que incluye, fichas geotécnicas (calicatas, DPL y posteos), fichas geodinámicas (identificación de zonas susceptibles a movimientos en masa e inundaciones) y planos temáticos a escala 1:25 000.

## 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 el área urbana de San Pedro de Coayllo.

Previamente, en base al levantamiento topográfico y mediante herramientas computacionales (SIG) se ha elaborado los planos: Modelo Digital del Terreno y pendientes, con el fin de delimitar las características geomorfológicas del terreno. Estos mapas fueron verificados y validados durante el trabajo de campo, realizado en San Pedro de Coayllo.

### 2.1. Base topográfica

Se obtuvo a partir de un levantamiento topográfico mediante fotogrametría realizado en el área urbana de San Pedro de Coayllo, abarcó un área de 18 hectáreas (ha). Este trabajo se realizó con el propósito de obtener la representación digital del relieve que conforman las unidades: terrazas, lomas, entre otros.

Para la ejecución del levantamiento topográfico, se utilizó la estación total (marca Nivo 3.C con resolución de 3"), cuyas coordenadas fueron establecidas con una antena y receptor GPS/GNSS de doble frecuencia (ver Tabla 1).

Tabla 1: Punto de control ubicado en un reservorio de agua potable al este de la municipalidad.

BM	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m.s.n.m)	Descripción
BM	341511	8592782	305	Ubicado cerca a un reservorio de agua

Desde el punto de control antes mencionado, se estableció una poligonal cerrada conformada por 8 vértices (Tabla 2), de las cuales se tomaron 207 mediciones (puntos de relleno) que contienen información planimétrica (coordenadas este y norte) y altimétrica (elevación ortométrica); datos que fueron proyectados en el sistema Universal Transversal Mercator (UTM).

Tabla 2: Vértices de la poligonal cerrada.

Descripción	Norte (m)	Este (m)	Altura (m.s.n.m)
Vértice 01	8592782	341511	305
Vértice 02	8592659	341336	274
Vértice 03	8592484	341459	275
Vértice 04	8592620	341618	282
Vértice 05	8592662	341596	282
Vértice 06	8592775	341757	289

La información obtenida fue procesada con un software de Diseño Asistido por Computador (CAD) a fin de obtener un plano topográfico a escala 1:10000 que contiene curvas de nivel (líneas que unen puntos con igual altitud) con resolución espacial de 7.5 m.

## 2.2. Modelo Digital de 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, permiten ser utilizados para realizar mapas de pendientes, acumulación de horas de radiación, parámetros morfométricos, entre otros (Felicísimo, 1994).

Para la elaboración del MDT del área urbana de San Pedro de Coayllo, 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 53.30 km<sup>2</sup>, que corresponden al 9.02% de la superficie distrital (Figura 1).

En base al MDT elaborado para Coayllo, se ha reconocido que la zona urbana se asienta sobre una terraza fluvial, la cual presenta un rango de cotas entre 120 y 320 m.s.n.m. En los alrededores, hacia la parte noreste y sureste del área urbana en

mención, se observan lomas que presentan un desnivel máximo de 135 m con respecto al área urbana. Hacia el extremo norte, sur, este y oeste, se evidencia la zona de montaña con un desnivel máximo de 1210 m con respecto al área urbana.

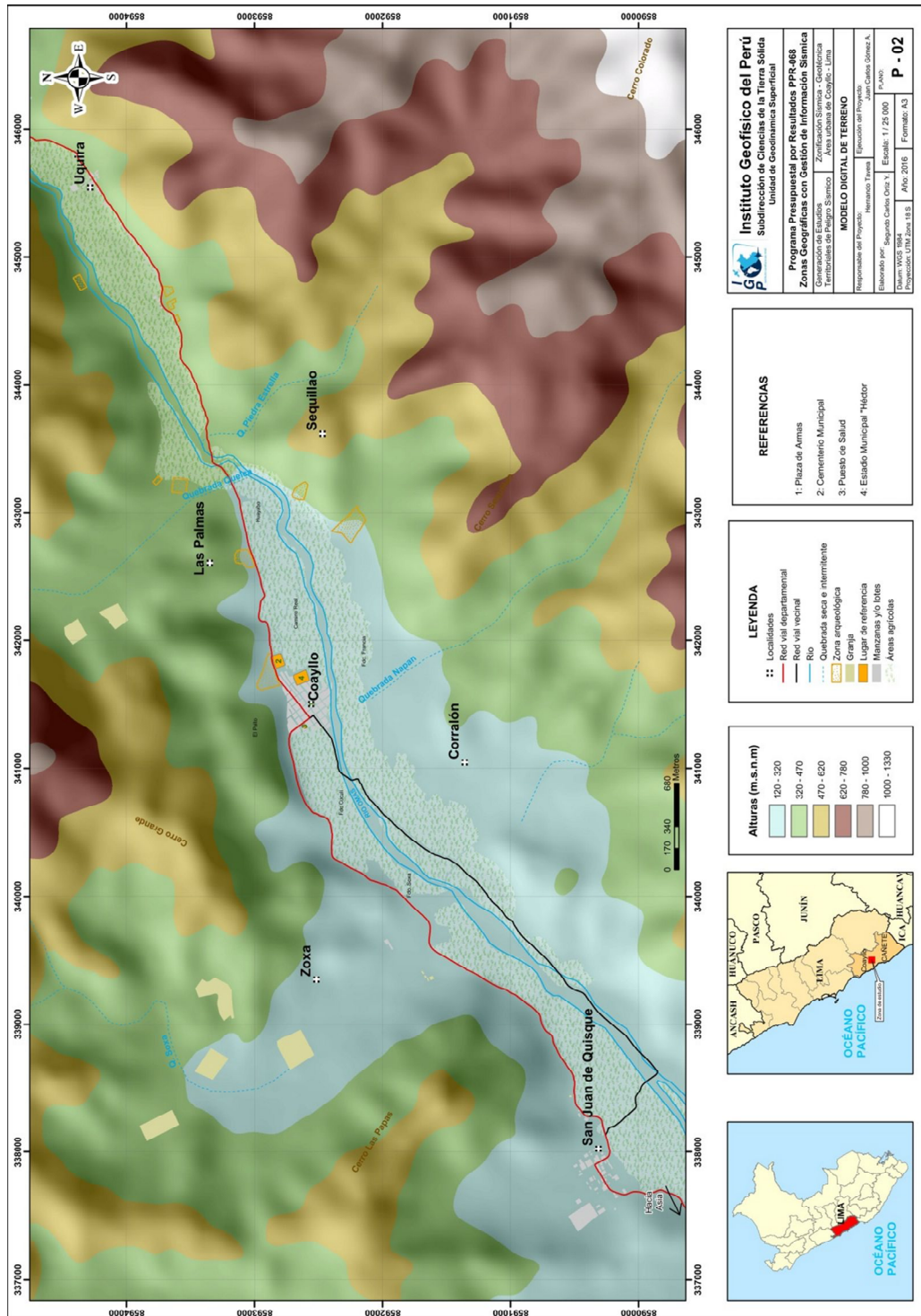


Figura 1: Mapa del modelo digital del terreno para el área urbana de San Pedro de Coayllo y alrededores.

### 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 del mapa de pendientes para el área urbana de San Pedro de Coayllo (Figura 2), fue obtenido a partir del MDE elaborado anteriormente, haciendo uso 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.

#### 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” (Fidel et al., 2006), Tabla 03:

Tabla 3: 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

En el área urbana de San Pedro de Coayllo y los anexos de San Juan de Quisque, Zoxa y Uqira, se encuentran asentadas sobre terrazas que presenta pendientes menores a 5° en promedio y el anexo del Corralón presenta pendientes entre 5 a 10° (Figura 2).

### 2.4. Unidades geomorfológicas

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

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

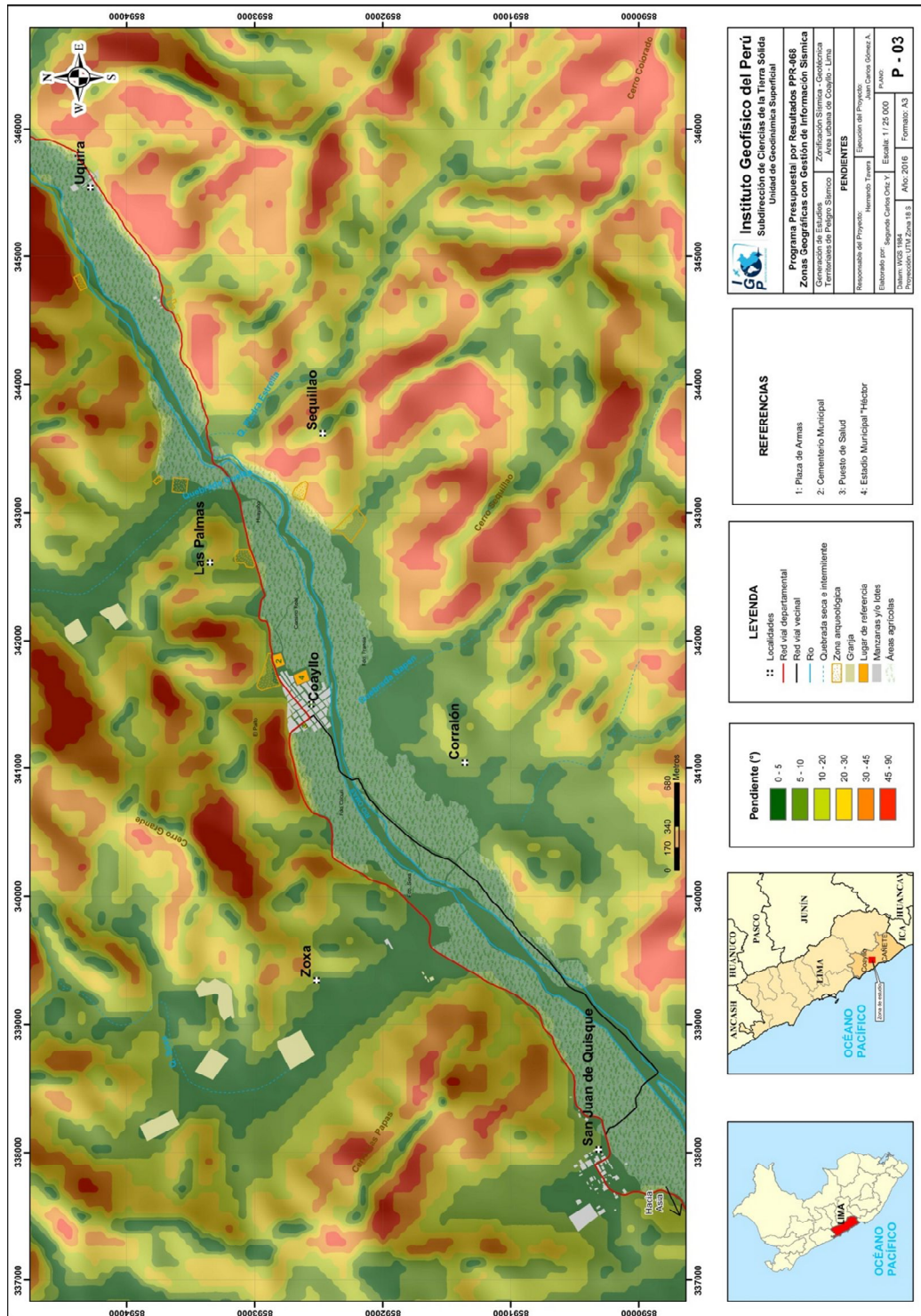


Figura 2: Mapa de pendientes para el área urbana de San Pedro de Coayllo y alcances.

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

Finalmente, en base a las características físicas de las unidades geomorfológicas y su origen, en San Pedro de Coayllo, se cartografiaron cinco unidades: loma, terraza coluvio-aluvial, lecho fluvial, Terraza fluvial y montaña (Tabla 4, Figura 3).

Tabla 4: Descripción de las unidades geomorfológicas, presentes en el área urbana de San Pedro de Coayllo, en base a las características físicas y su origen.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		ORIGEN	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA
Pendiente	<35°	Denudacional	Loma
Altura	<300 m		
Geometría	alargada		
Drenaje	dendrítico		
Pendiente	<5°	Depositacional	Terraza Coluvio-aluvial
Altura	0-100 m		
Geometría	alargada		
Drenaje	irregular		
Pendiente	<5°	Denudacional	Lecho fluvial
Altura	0-100 m		
Geometría	alargada		
Drenaje	rectangular		
Pendiente	<5°	Depositacional	Terraza fluvial
Altura	0-100 m		
Geometría	alargada		
Drenaje	dendrítico		
Pendiente	>30°	Estructural	Montaña
Altura	>400 m		
Geometría	alargada		
Drenaje	dendrítico		

**Lomas:** Esta unidad geomorfológica presenta una pendiente de <35°, altura <300 m, geometría alargada, drenaje dendrítico y de origen denudacional. Abarca el 8.10% de la zona de estudio. Se han identificado lomas en Zoxa, Corralón, Las Palmas y a 1.54 km al sureste del área urbana de San Pedro de Coayllo (Figura 4).

**Terraza coluvio- aluvial:** Esta unidad geomorfológica de origen depositacional, que se forman por el aporte de clastos angulosos a redondeados en matriz arenosa y/o arcillosa, presenta una pendiente <5°, así como una geometría alargada y drenaje irregular. Abarca el 6.60% de la zona de estudio. Actualmente, se encuentran ubicadas en La Yesera, Las Palmas, Zoxa y el Corralón (Figura 5).

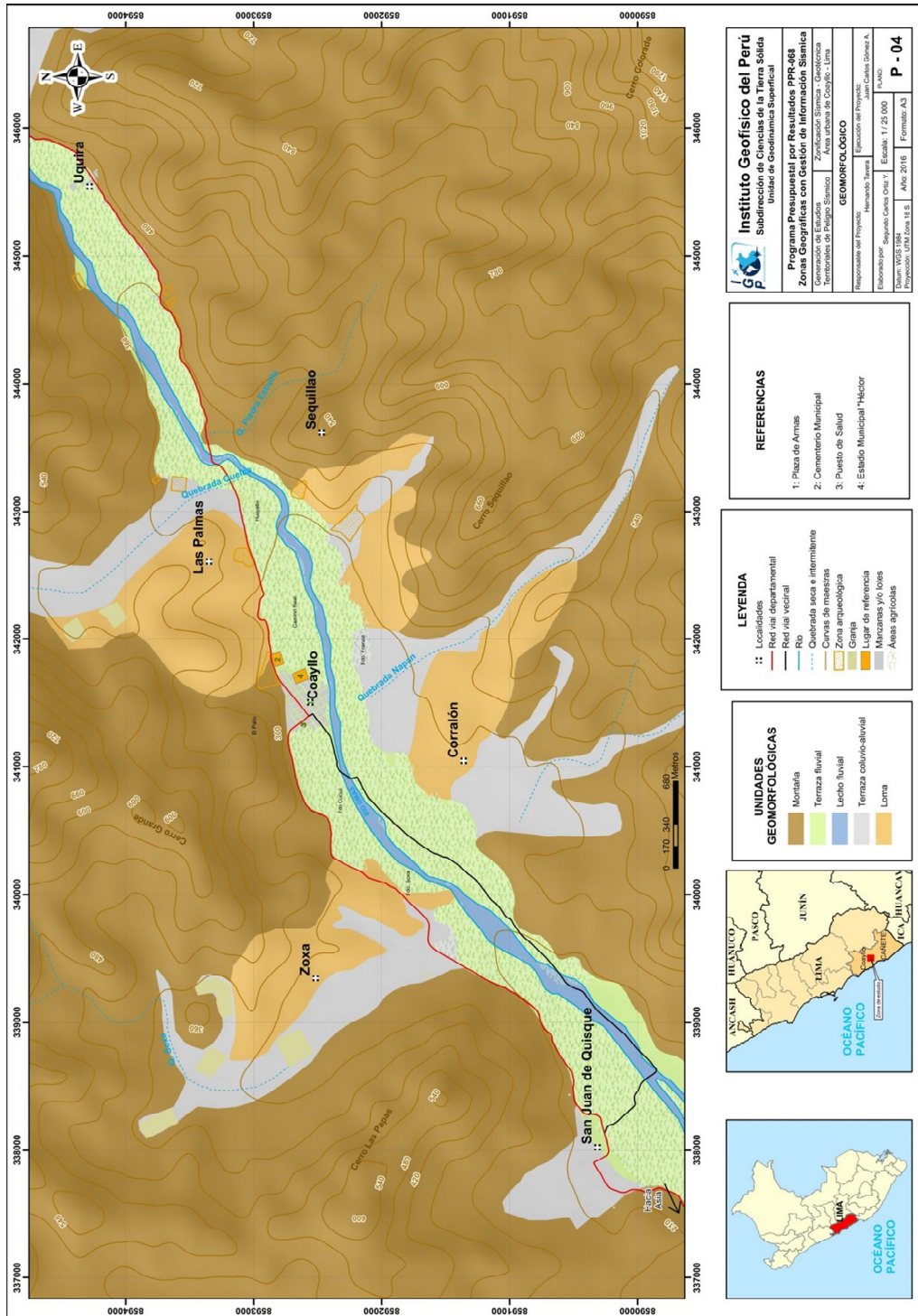


Figura 3: Mapa geomorfológico para el área urbana de San Pedro de Coayllo y alrededores.

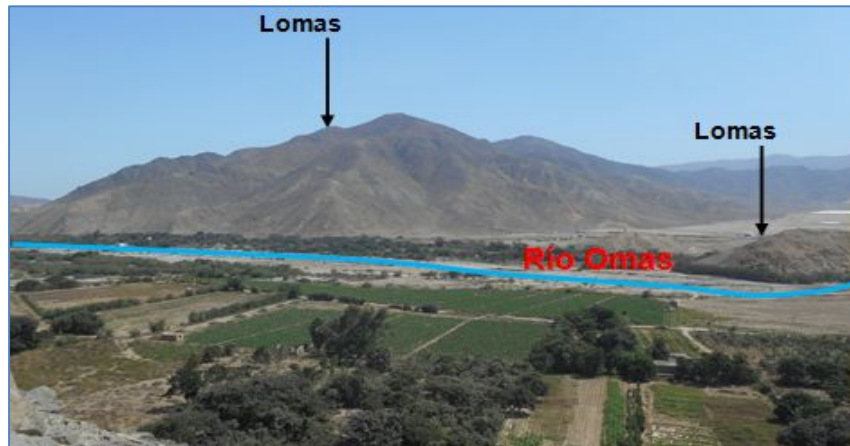


Figura 4: Lomas situadas en el anexo de Zoza (margen izquierda del río Omas).

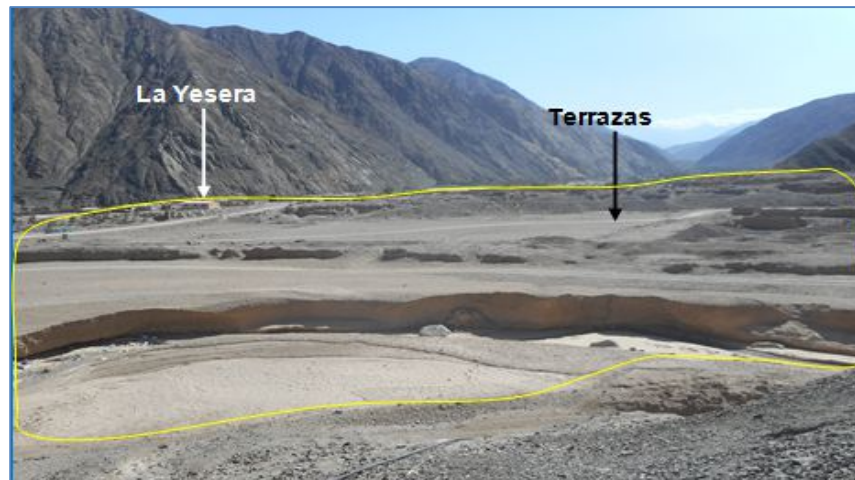


Figura 5: Loma ubicada al este del área urbana de San Pedro de Coayllo.

**Lecho fluvial:** Esta unidad geomorfológica presenta una pendiente  $<5^\circ$ , así como una geometría y drenaje irregular. Esta unidad abarca el 5.60% del área de estudio y corresponde al cauce del río Omas, cuyas aguas se movilizan de noreste a suroeste (Figura 6).

**Terraza fluvial:** Esta unidad geomorfológica de origen Deposicional, presenta una pendiente  $<5^\circ$  con una geometría alargada y un drenaje dendrítico. Abarca el 9.80% de la zona de estudio. Actualmente, sobre esta unidad se asienta la zona urbana de San Pedro de Coayllo (Figura 7).



Figura 6: Lecho fluvial del río Omas, limitada por las terrazas, cuyo salto es de 1.70 m.

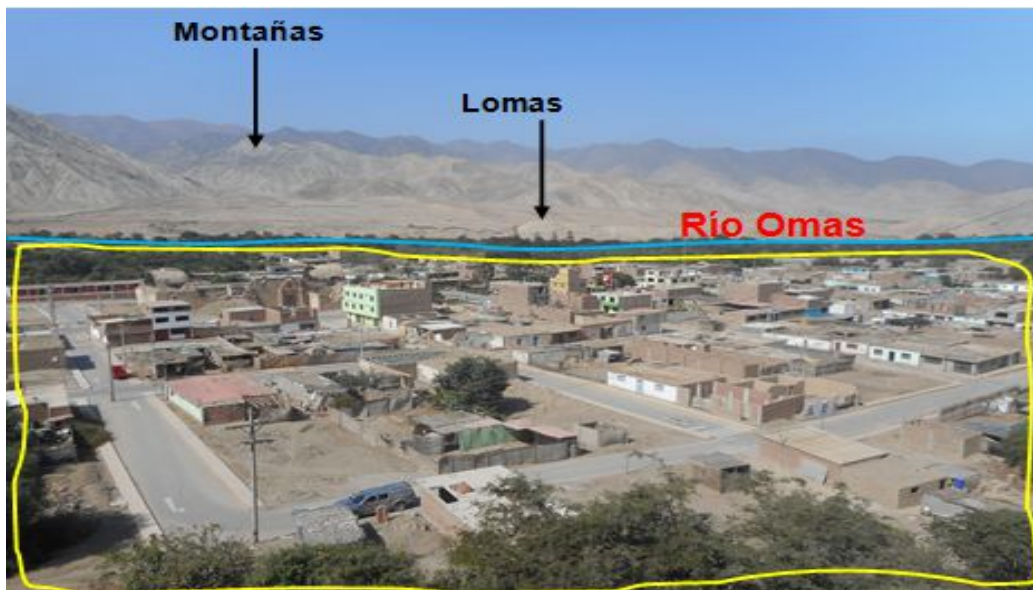
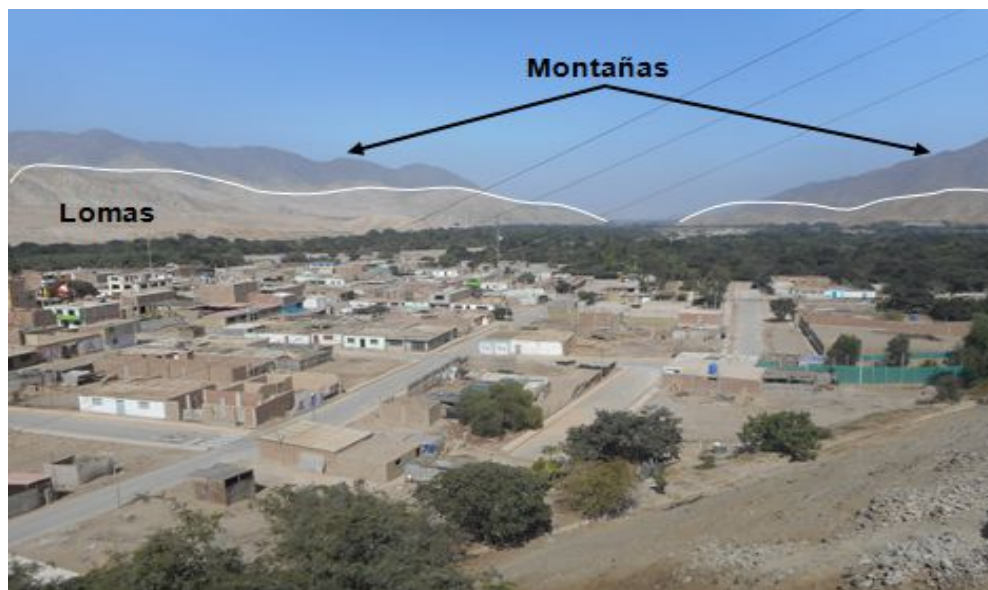


Figura 7: Al margen derecho del río Omas esta el área urbana de San Pedro de Coayllo, sobre una terraza fluvial (líneas amarillas), en la margen izquierda las lomas, de baja altura y hacia el sur las montañas.

**Montañas:** Esta unidad geomorfológica presenta una pendiente de  $>30^\circ$ , altura  $>400$  m, geometría alargada, drenaje dendrítico y es de origen estructural. Abarca el 69.90% de la zona de estudio. Estas geofomas se encuentran bordeando el área urbana de San Pedro de Coayllo, ver Figura 8.



*Figura 8: Las líneas blancas delimitan las lomas y montañas. Las montañas ocupan el mayor porcentaje del área de estudio y se encuentran bordeando al área urbana de San Pedro de Coayllo.*

### 3.-GEOLOGIA

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

El intemperismo asociado a los procesos de meteorización, es básicamente un proceso químico, el agua actúa como disolvente, la remoción de los elementos más pequeños del cuerpo de roca deja espacios, por ende el agua sigue penetrando y acelerando el proceso de desintegración. La roca se vuelve porosa, después, se descompone en fragmentos cada vez más pequeños, hasta que, al ser transportada y 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 naturaleza y fragilidad. Por ejemplo: la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) 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 el suelo, dando como resultado las geoformas que componen el relieve, los factores condicionantes como: litología, pendiente, hidrología, etc; así como, los detonantes: sismos y precipitaciones pluviales ocasionan movimientos en masa (deslizamientos, flujos, caídas de rocas, entre otros).

Para entender el comportamiento dinámico del terreno, es necesario conocer los procesos geológicos externos (meteorización, erosión, transporte y sedimentación) en las rocas y los suelos que provienen de las mismas.

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

### **3.1. Geología regional**

El marco geológico regional de una ciudad es importante para comprender los procesos y eventos geológicos que ocurrieron a gran escala. Es así que, para la zona de estudio, se recopiló la información geológica regional del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2012) a escala 1:50, 000. En ésta, se describen las unidades litológicas aflorantes cuyas edades se encuentran desde el Jurásico Medio (163.5 Ma) hasta el Cuaternario Reciente.

#### **3.1.1. Geología histórica**

Según Salazar (1970), hace 163.5 millones de años, la ciudad de San Pedro de Coayllo, se encontraba en un mar somero con aporte de sedimentos provenientes de zonas de montaña, se relaciona una cuenca deltaica sometida a erupciones submarinas intermitentes. Se le denominó a esta etapa transgresión y volcanismo del Titoniano - Berriasiano, depositándose los sedimentos que darían lugar al Grupo Yura y Formación La Herradura.

Luego, a fines del Valanginiano, tuvo lugar a una ligera subsidencia de las cuencas con el consiguiente avance del mar en sentido regional. La zona costanera está representada por la Formación Pucusana con un conglomerado basal, sobre yaciendo a las formaciones de arcillitas y rocas calcáreas. Pamplona y Atocongo, se desarrollaron en un mar nerítico (zona marítima cercana a la costa).

En el Albiano Superior (100.5 millones de años), surge la última transgresión del mar, denominada transgresión cretácea, donde se depositaron las rocas del Grupo Quilmaná, en el lado Occidental de la cuenca, asociada a la actividad volcánica, representada por cuellos volcánicos y flujos de lava con ocasionales intercalaciones de unidades sedimentarias. Además, las erupciones volcánicas dieron formación a las rocas diorita y granodiorita de la Super-unidad Patap.

Durante el Cretáceo Superior, (97-96 millones de años), surgieron las pulsaciones de rocas intrusivas de la Superunidad Linga, conformadas por rocas de tipo granodioritas y monzogranito, Superunidad Incahuasi, conformadas por rocas tonalitas y la Superunidad Tiabaya, conformada por rocas granodioritas y dioritas.

### 3.1.2. Geología estructural

Los eventos de deformación y metamorfismo produjeron el plegamiento de las estribaciones andinas y fallamientos en bloques evidenciados en esta parte de la costa. A continuación, se detallan las estructuras resultantes de los eventos geológicos.

**Zonas de plegamientos:** La deformación asociada a esfuerzos de compresión y distensión esta manifestada en los plegamientos existentes en la Cordillera Occidental interrumpidos por cuerpos intrusivos que forman parte del Batolito de la Costa. En la zona noroeste de San Pedro de Coayllo existen plegamientos, pero estos no afectan al área de estudio.

**Zonas de fallas:** Las fallas geológicas pueden afectar grandes extensiones de paquetes de rocas y materiales, en algunas ocasiones, cambiando la geomorfología de la zona. En Coayllo no se ha evidenciado ningún tipo de fallas.

### 3.2. Geología local

Las unidades litológicas aflorantes en San Pedro de Coayllo han sido cartografiadas a escala 1:25,000, abarcó un área de 53.30 km<sup>2</sup> aproximadamente (Figura 9). Asimismo, se elaboró una sección geológica A-A', ver Tabla 5.

Tabla 5: Columna cronolitoestratigráfica para de San Pedro de Coayllo.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Depósitos coluvio-aluviales Depósitos fluviales	Superunidad Tiabaya Superunidad Incahuasi Superunidad Linga Superunidad Patap
		MESOZOICO	CRETACEO	
Inferior	Formación La Herradura			
	JRÁSICO		Grupo Yura	

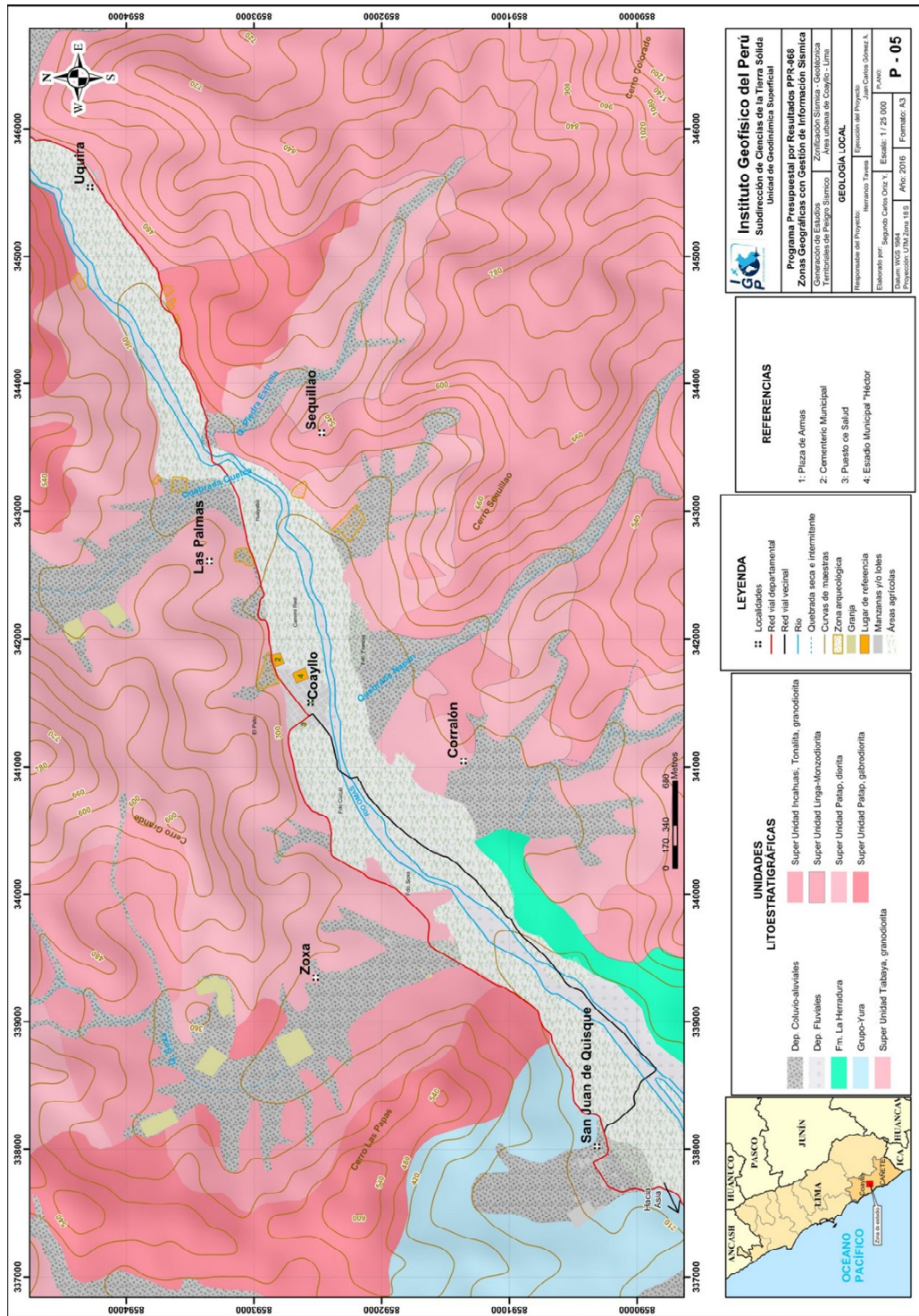


Figura 9: Mapa de la geología local para el área urbana de San Pedro de Coayllo y alrededores.

**Grupo Yura:** El grupo Yura, conforma el basamento rocoso representado por lutitas gris oscuras bien fracturadas, intercaladas con areniscas cuarzosas blancas de grano medio a grueso. Esta unidad litológica Infrayace a las rocas de la Formación La Herradura y aflora en el extremo NO del anexo de San Juan de Quisque (Figura 10).



Figura 10: Afloramiento de rocas del Grupo Yura, conformadas por lutitas gris oscuras intercaladas con arenisca.

**Formación La Herradura:** Se encuentra representada por areniscas de grano medio, intercaladas con lutitas gris visibles en espesores de 15 cm. Esta unidad litológica sobreyace en concordancia sobre el Grupo Yura y afloran en el extremo sureste del área urbana de San Pedro de Coayllo, en la margen derecha del río Omas (Figura 11).



Figura 11: Afloramiento de rocas de la Formación La Herradura, conformadas por intercalaciones de lutitas con arenisca.

### 3.2.3. Depósitos Cuaternarios

Suprayaciendo a las rocas de la formación Coayllo, se encuentran los depósitos Cuaternarios de edad Holocena, principalmente de origen coluvio – aluvial, ver Tabla 6.

Tabla 6: Tipos de depósitos Cuaternarios

Origen	Unidades cronoestratigrafías
Aluvial	Depósitos coluvio-aluvial (Qh-coal)
Fluvial	Depósitos fluviales (Qh-fl)

**Depósitos fluviales:** Materiales resultantes de la meteorización y/o erosión, traslado y depositación de rocas preexistentes, transportados por una corriente fluvial permanente, encontrándose depositados principalmente en el cauce del río Omas. Están conformados por gravas redondeadas, arenas de grano medio a grueso y no presentan plasticidad.

Sobre esta unidad litológica se asienta el área urbana de San Pedro de Coayllo y el anexo Uquira (Figura 12 y 13).



Figura 12: El casco urbano de Coayllo, se asienta sobre estos depósitos fluviales.



Figura 13: Depósitos fluviales, se encuentran a lo largo del río Omas, formando terrazas, sobre esta unidad se asienta el anexo Uquira.

**Depósitos coluvio- aluvial:** Está constituida primordialmente por fragmentos angulares, redondeados y subredondeados, generalmente de tamaño grueso, englobados en una matriz areno-limosa o areno-arcillosa. Afloran principalmente en todas las quebradas presentes en San Pedro de Coayllo. Sobre esta unidad geológica se encuentra asentada los sectores de San Juan de Quisque, Zoxa y La Yesera (Figura 14).



Figura 14: El área urbana del anexo San Juan de Quisque, se encuentra asentada sobre los depósitos coluvio-aluviales (delimitados por las líneas punteadas).

**Rocas intrusivas:** El flanco occidental del área de estudio está representado por un conjunto de intrusiones, cuya composición varía desde gabro a granito. Estas se han intuido desde el Cretáceo inferior (107 Ma) hasta el Cretáceo Superior (80.5 Ma). En el área de estudio, se reconocieron las siguientes unidades de rocas intrusivas:

**Superunidad Patap:** Las litologías comunes son las gabrodioritas y dioritas, muy fracturadas y meteorizadas, que presentan ligera rugosidad, oxidación y afloran en cuerpos separados, distribuidos en toda el área de estudio.

**Superunidad Linga:** Pertenece al Cretáceo Superior (97– 96 Ma) y está representada por el Plutón de Quilmaná, cuya composición litológica son las monzodiorita.

**Superunidad Incahuasi:** Pertenece al Cretáceo Superior (78– 83 Ma), se han identificado a las tonalitas y granodioritas, distribuidas en toda el área de San Pedro Coayllo.

**Superunidad Tiabaya**

Pertenece al Cretáceo Superior (80.5 Ma). Constituye las rocas intrusivas más abundantes de San Pedro de Coayllo, puesto que se presentan cortando a todas las unidades plutónicas, mencionadas anteriormente. Dentro de esta unidad resaltan las granodioritas y dioritas, que afloran en el extremo este, sureste y noroeste del área de estudio.

## **4.-GEODINÁMICA**

Comprende el estudio de todos aquellos agentes y fuerzas internas y externas que actúan en los procesos dinámicos de la Tierra. Se divide en la geodinámica externa donde se estudian los procesos y agentes exógenos que modifican la superficie terrestre y la geodinámica interna que estudia los procesos y agentes endógenos de la estructura interna de la Tierra en base a técnicas geofísicas, estos procesos originan cambios físicos, químicos que se ven reflejados en la superficie de la Tierra.

Es importante estudiar en geodinámica los factores condicionantes (características físicas de un relieve, pendiente, litología, vegetación, estructuras geológicas, etc.) y desencadenantes (agentes de meteorización y erosión que predominan y modelan un relieve, precipitaciones, sismos, etc.) ya que estos factores influyen en el análisis de un evento geodinámico generados por procesos de meteorización y erosión.

### **4.1. Procesos de geodinámica interna**

Son fases sucesivas de un evento geodinámico interno complejo, que origina un cambio o transformaciones físicas y químicas de la estructura interna de la Tierra causados por los agentes internos (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 sísmogénica 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); 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).

Los factores que dan origen a los procesos externos, favorecen a la ocurrencia de los eventos geodinámicos (Figura 15).

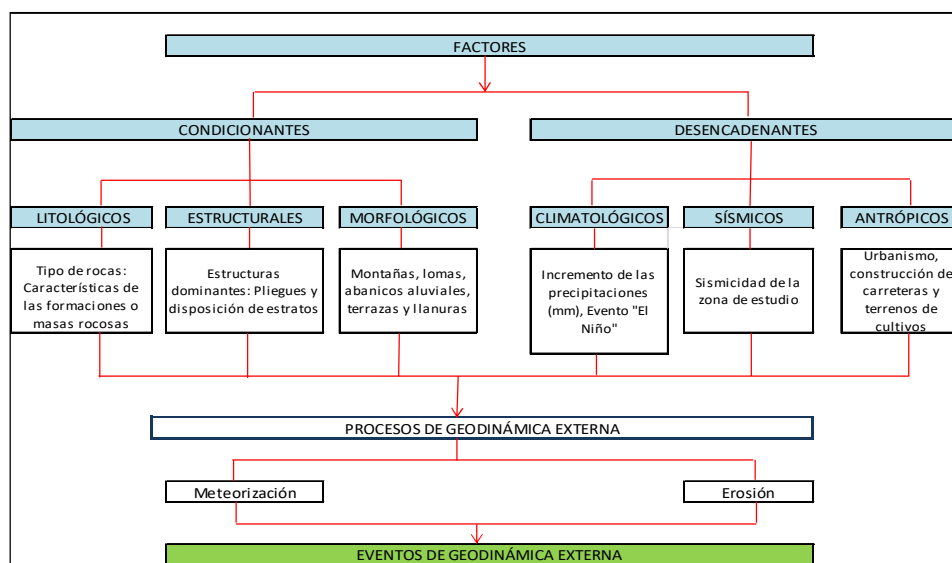


Figura 15: Factores asociados a procesos de geodinámica externa que contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos

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

**Flujos de detritos (huaicos):** 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, los flujos depositan sus materiales en forma de conos de deyección (Figura 16).

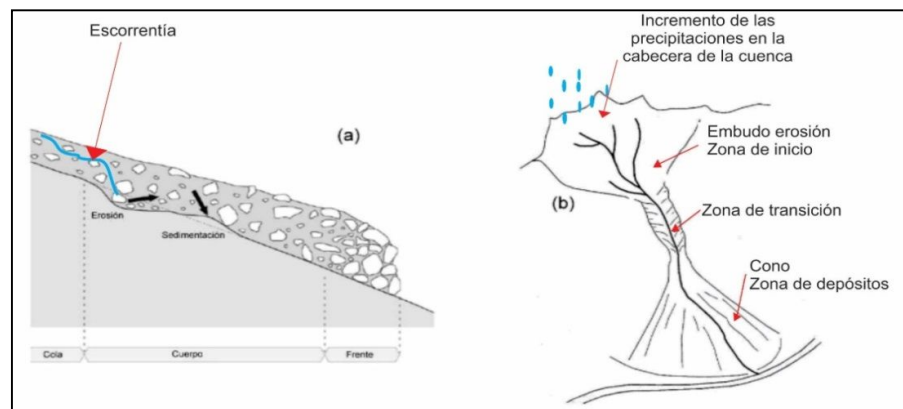


Figura 16: a) Proceso de erosión por las aguas de escorrentía y acumulación de material. b) Vista frontal de la cuenca y desarrollo del evento en cabecera de la cuenca por incremento de las precipitaciones, zona de transición (zona de almacenamiento de material y la deposición del material), modificado del GITS (Grupo de investigación de transportes de sedimentos).

**Inundación:** Es el resultado del comportamiento de la cuenca hidrográfica durante un período de incremento de precipitaciones. Es la ocupación ocasional de terreno por el agua de un río o una quebrada. Puede ocurrir en zonas litorales debido a tsunamis o a la superposición de oleajes y mareas; pero las más frecuentes son las inundaciones en el interior de los continentes, producidas por las aguas de escorrentía superficial (ríos, arroyos y torrentes); es decir, atribuida al incremento brusco del volumen de agua, denominado crecida (Adaptado de CENEPRED, 2013).

Cuando las lluvias superan el promedio normal de precipitación (mayor al 50%) de una zona, se le denominan “lluvias extraordinarias” o tormentas extremas. Estas al

desarrollarse generan crecidas causando inundaciones de las áreas circundantes al río. Esta anomalía es conocida como un evento hidrometeorológico (Figura 17).

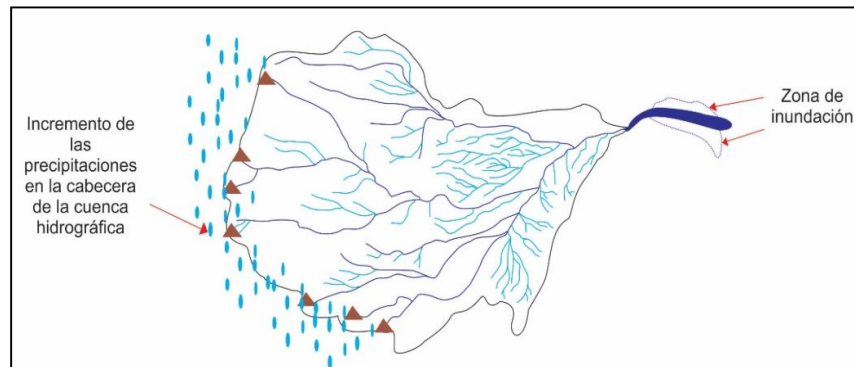


Figura 17: Inundación por incremento de las precipitaciones en la cabecera de la cuenca hidrográfica.

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

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

**Caída de rocas:** Es resultado del debilitamiento de la masa de roca, debido a la fragmentación y a la ausencia de soporte lateral, produciendo un deterioro en la estructura del talud por la acción de la meteorización. En este caso se forman prismas o pequeñas placas con dimensión mínima de 50 mm, que caen por gravedad (Figura 18).

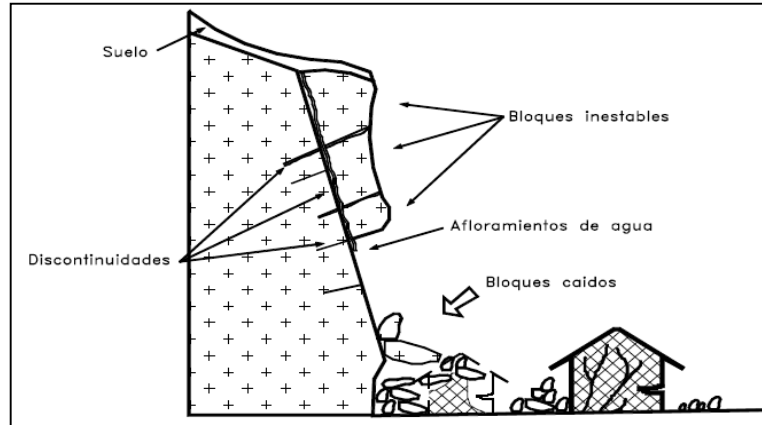


Figura 18: Proceso de caída de rocas. Fuente: Suárez (1998).

**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 (Figura 19). Se clasifican en:

- **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.
- **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.

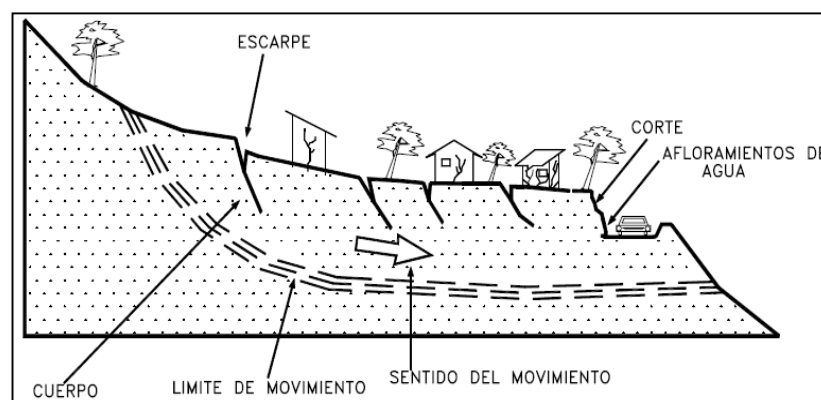


Figura 19: Deslizamiento en laderas (Suárez, 1998).

En San Pedro de Coayllo, existen tres tipos de eventos geodinámicos, que según su proceso y factores que intervienen, son clasificados de la siguiente manera (Figura 20):

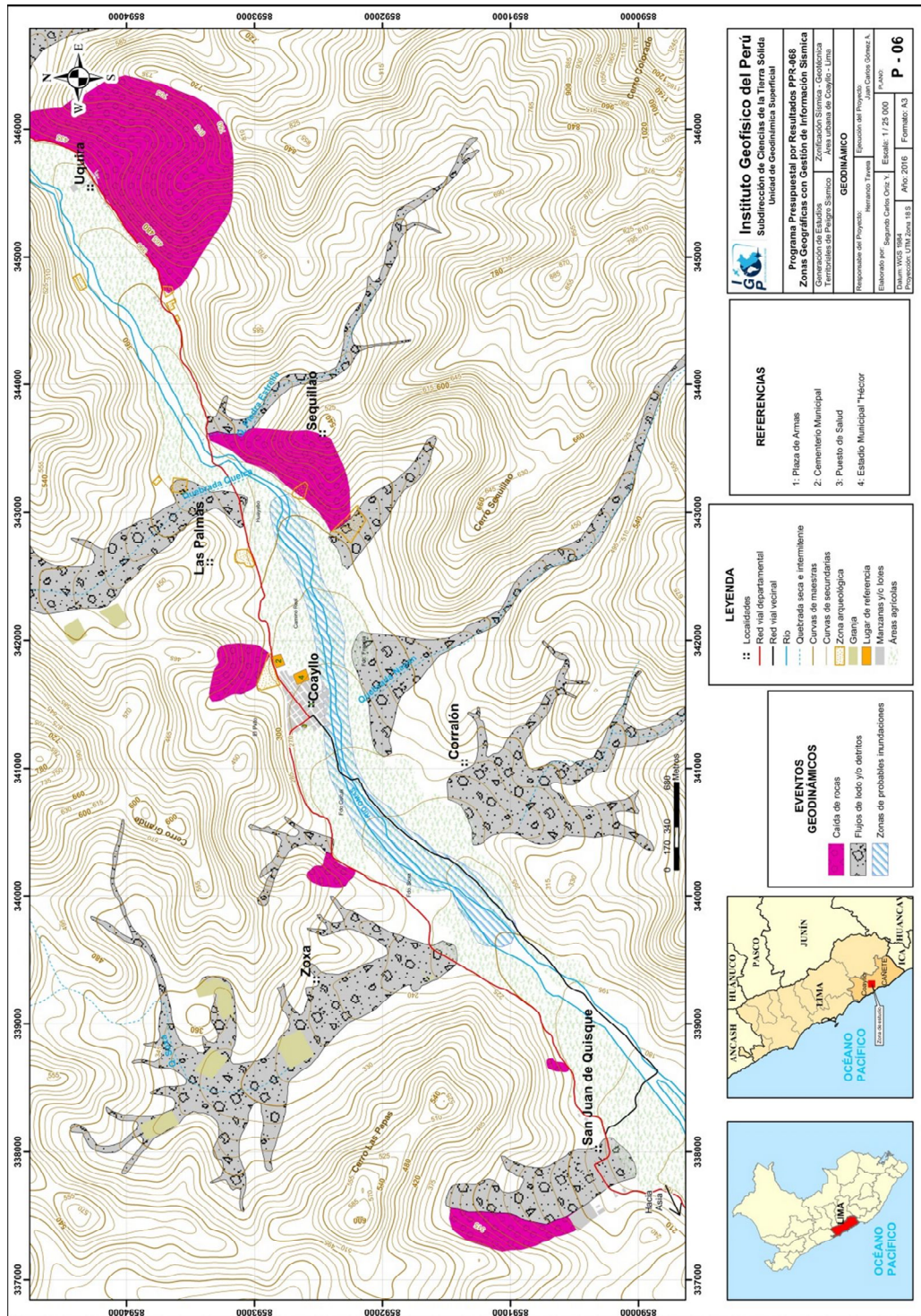


Figura 20: Mapa de eventos geodinámicos para el área urbana de San Pedro de Coayllo y alrededores.

**Caída de rocas:** Desprendimiento de suelo o roca de una ladera muy empinada a lo largo de una superficie en la que poco o ningún desplazamiento cortante se desarrolla. El material desciende en caída libre, saltando o rodando, el movimiento es de muy rápido a extremadamente rápido (Cruden & Varnes, 1996). Este evento se evidencia en los sectores de; San Juan de Quisque, Zoxa, Coayllo, Sequilao y Uquira (Figura 21).



*Figura 21: En Uquira se observan caídas de rocas que afectan la trocha carrozable de Coayllo hacia Omas y algunas viviendas del anexo en mención.*

**Flujos de lodos y/o detritos:** En el área de estudio se han encontrado evidencias de relictos de antiguos flujos de detritos y/o lodos, esto debido a sus características físicas y geográficas de la zona.

Estos flujos se producen repentinamente como resultado de las fuertes precipitaciones en zonas montañosas, situadas en San Juan de Quisque, Zoxa, Corralón, Las Palmas y La Yesera. En el recorrido de éstos se encuentra escasa presencia de vegetación lo cual contribuye a la erosión de las quebradas y de las pampas, así como el mayor grado de infiltración de las aguas de escorrentía. Durante el recorrido de los flujos pueden transportar gravas, cantos rodados y bolonería, cuyos diámetros son menores de 1.20 m (Figura 22).



*Figura 22: Flujo de lodos encontrados en el sector La Yesera.*

**Inundaciones:** Las inundaciones fluviales son causadas por el desbordamiento de los ríos y arroyos. Es atribuida al aumento brusco del volumen de agua, denominado crecida, que es por consecuencia del exceso de lluvias (Adaptado de CENEPRED, 2013).

Cuando las lluvias superan el promedio normal de precipitación (mayor del 50%) de una zona, se le denominan lluvias extraordinarias o tormentas extremas. Estas al desarrollarse generan crecidas causando inundaciones en las áreas circundantes al río. Esta anomalía es conocida como un evento hidrometeorológico extremo.

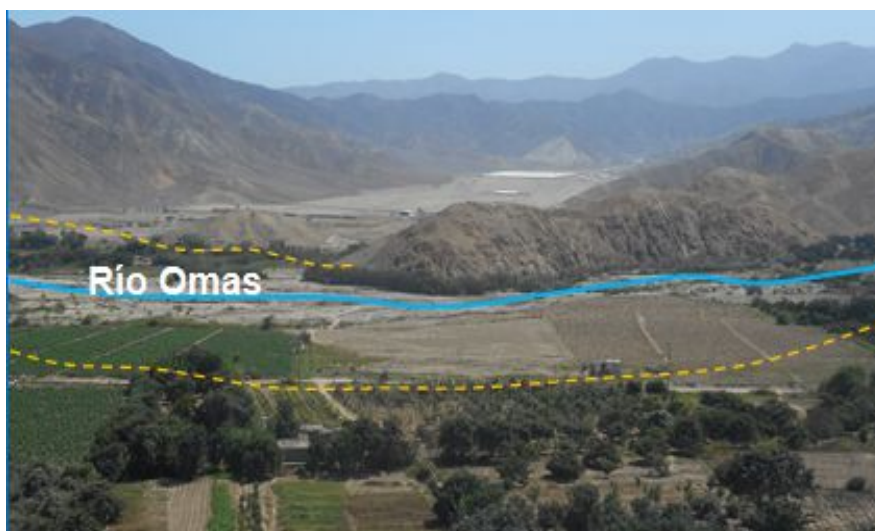
Para estimar las áreas susceptibles a inundarse ante la ocurrencia de estos eventos, es necesario conocer la variación temporal de la cantidad de agua (altura en mm) que cae durante una tormenta extrema en la cuenca estudiada. Este registro de lluvia (lluvia total) es representado a través de un hietograma,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

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

Este hietograma de la lluvia neta es transformado a un hidrograma, que es la representación del caudal como resultado de la caída de agua (escorrentía) a través del tiempo mediante un gráfico de dispersión. Esto se logra utilizando un modelo del sistema hidrológico. Este sistema es una aproximación al sistema real a través de leyes físicas que representan los procesos hidrológicos, en este caso la transformación de lluvia a escorrentía (hietograma a hidrograma). Esta es ingresada a un modelo numérico hidráulico computacional para simular un escenario de un evento hidrometeorológico extremo en el cual se obtendrán las áreas inundables.

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

Este modelo está validado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencia de los Estados Unidos (FEMA); El Cuerpo de Ingenieros del Ejército (Corps), distrito de Sacramento; el Distrito de Control de Inundaciones del Condado de Maricopa (FCDMC), Phoenix Arizona; y entre otras entidades internacionales involucradas en el tema de gestión de riesgo de desastres (Figura 23).



*Figura 23: Ante el incremento de caudal del río Omas, esto generaría desborde del mismo, afectando áreas agrícolas, aledañas al río en mención.*

#### 4.2.3.1. Datos de entrada al programa

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

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

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

En la Figura 24, se muestra de manera esquemática el ingreso necesario en el programa FLO-2D para el modelamiento de los eventos hidrometeorológicos.

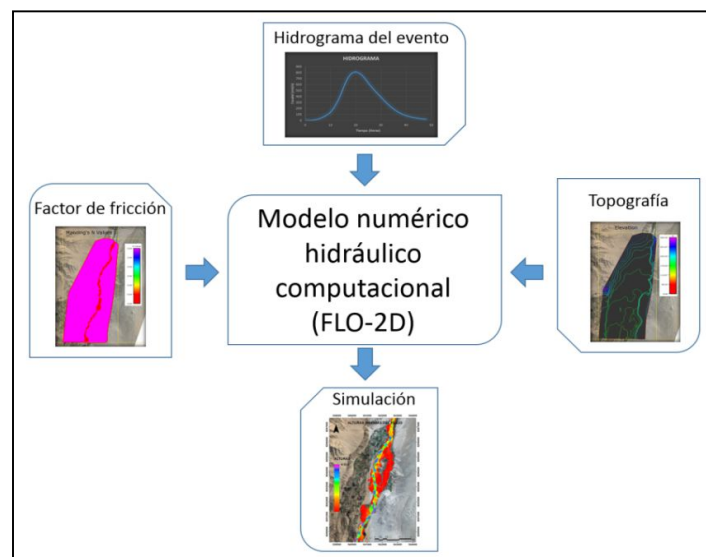


Figura 24: Esquema de datos de entrada al programa FLO-2D.

##### a) Topografía

Para el desarrollo de este estudio se utilizó la información digital del informe de levantamiento batimétrico del río Omas (distrito de Coayllo). Esta información abarca un tramo aproximado de 2 kilómetros del río en mención, 1.3 kilómetros aguas arriba y 0.7 kilómetros aguas abajo. Esta batimetría se complementó extrapolando los puntos hacia las áreas aledañas al río, aproximadamente 250 metros en ambos márgenes.

En la Figura 25, se muestra la comparación entre los puntos de elevación obtenidos en el levantamiento batimétrico (570 puntos) y los puntos extrapolados de la batimetría (2600 puntos) en base a los puntos de control en campo e imágenes satelitales. Los datos de elevación se muestran en puntos de color rojo y el área de modelamiento en un polígono con línea de color verde.

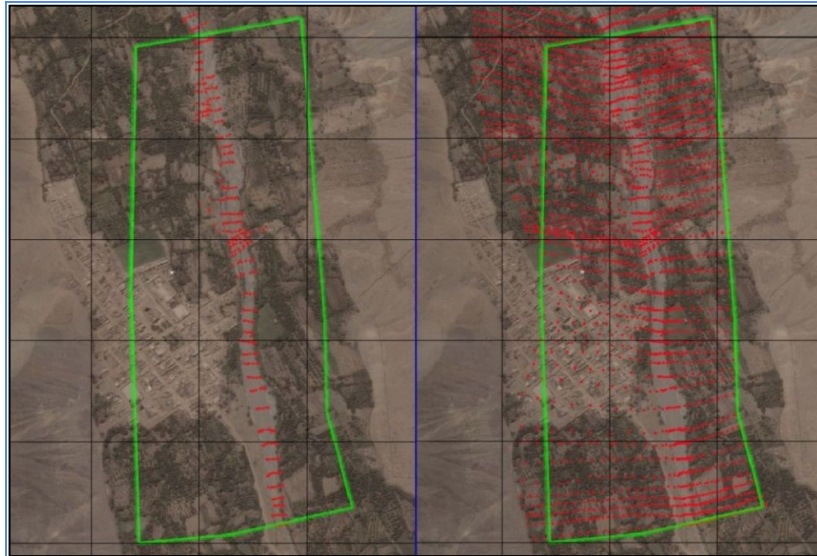


Figura 25: Comparación entre los puntos del levantamiento batimétrico y los puntos extrapolados.

La extrapolación permitió generar un modelo digital del terreno con una resolución de 5 metros, el cual fue ingresado al programa FLO-2D.

En la Figura 26, se presenta el producto final del modelo digital del terreno que se utilizó en la simulación de los escenarios de inundación.

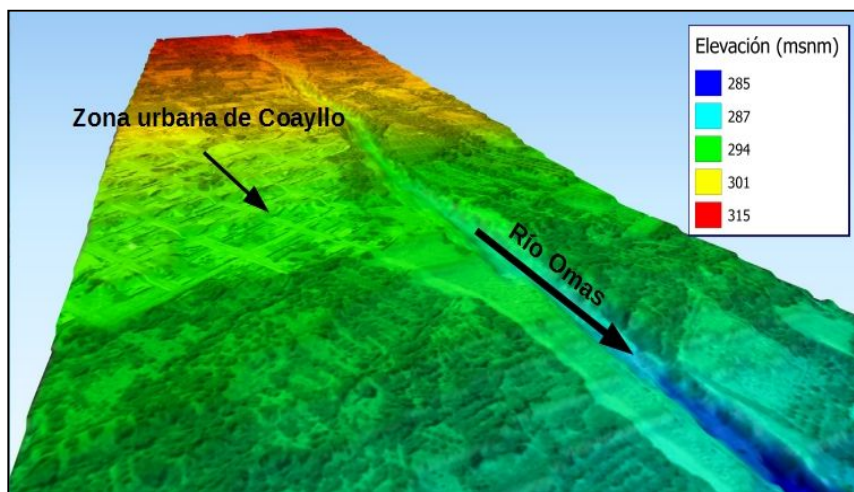


Figura 26: Modelo digital del terreno del río Omas (Coayllo).

El modelo digital del terreno generado fue ingresado al programa FLO-2D para realizar la malla, el cual consiste en dividir el modelo digital del terreno en grillas (cuadros) en el cual el programa calculará las alturas y velocidades del flujo para cada grilla.

En este caso, la resolución de la malla generada fue de 5 metros. Esta resolución fue necesaria debido a la extensión del área de estudio (1.25 Km<sup>2</sup>) y para poder observar la dinámica del flujo (comportamiento del agua) en toda su extensión.

En la Figura 27, se observa una vista ampliada de la malla del modelo digital del terreno con una resolución de 5 metros; esto quiere decir, que por cada 25 m<sup>2</sup> del terreno existe un dato de elevación que representa el relieve del terreno.

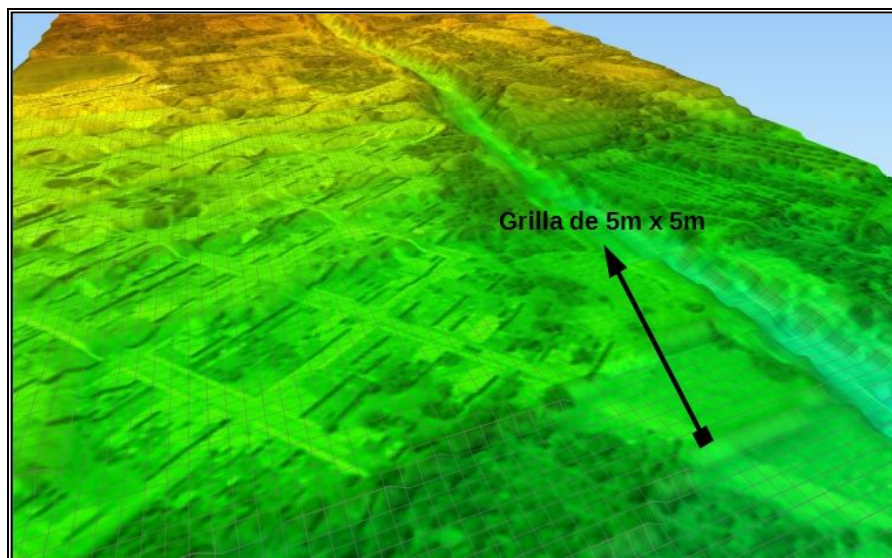


Figura 27: vista ampliada de la malla del modelo digital del terreno del río Omas (Coayllo).

#### **b) Factor de fricción**

El movimiento del fluido en un canal se ve afectado por la fuerza de gravedad, como la fuerza más importante, y la resistencia ocasionada en las fronteras rígidas por la fricción y la naturaleza turbulenta del flujo.

El flujo en un canal natural se aloja dentro de lo que se llama cauce, producido por el movimiento del agua en el paso del tiempo; generalmente su perfil longitudinal es sinuoso, su sección transversal es irregular, y presenta forma y dimensiones que varían continuamente a lo largo del mismo.

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

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

En la práctica “ $n$ ” es función de diferentes variables, y la estimación de un valor adecuado precisa del conocimiento cualitativo y cuidadoso de los factores que más influyen.

La rugosidad del canal proporciona un punto crítico de partida en la selección de “ $n$ ” cuando se realizan estudios de canales naturales para distintos fines, pueden obtenerse fotografías de campo en partes estratégicas para compararlas con las de canales de resistencia conocida, junto con un resumen de los parámetros geométricos e hidráulicos que permitan una definición más adecuada de las condiciones del flujo.

Selección del valor del número de Manning, para la selección del valor del número de Manning en el cauce del río Mala y de las áreas aledañas se utilizó el método de técnicas de campo en superficie de agua por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la tabla de coeficiente de rugosidad de Manning propuesta por Ven Te Chow (1984), respectivamente.

Como resultado se obtuvo que el valor del número de Manning para el cauce del río es de 0.03, para las áreas aledañas es 0.07 y para las zonas urbanas de 0.015. Esto quiere decir que las zonas urbanas ejercen menor fuerza de oposición al movimiento del flujo; que en áreas aledañas y en el cauce del río.

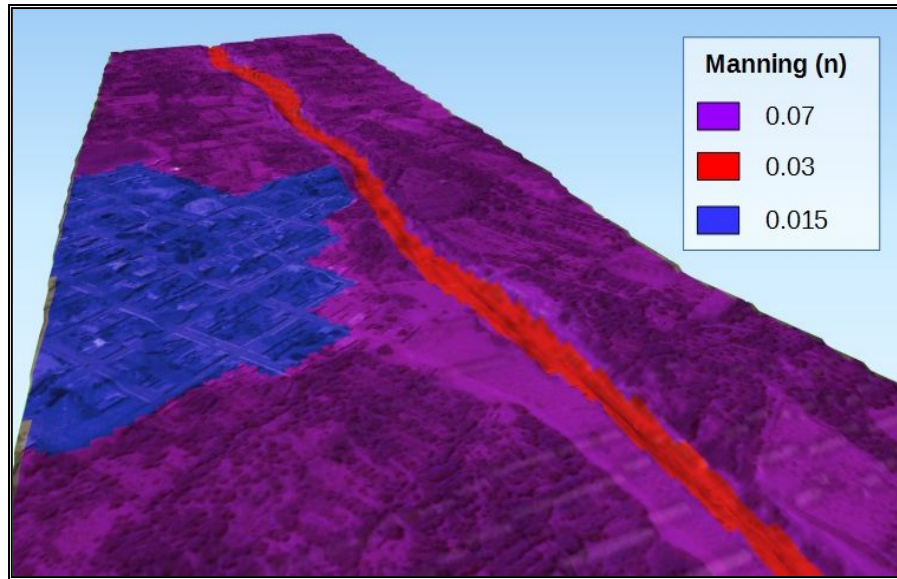


Figura 28: Valores del número de Manning en el río Omas (Coayllo).

### c) Hidrograma de un evento hidrometeorológico

A continuación, se presentan las metodologías utilizadas y los resultados de los cálculos para los eventos hidrometeorológicos simulados:

#### - Evento hidrometeorológico extremo

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

para la estimación de áreas inundables ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos:

- Como dato básico se utilizan las precipitaciones máximas en 24 horas para los años registrados (multianuales), las cuales pasan por un análisis de frecuencias que son validadas a través de una prueba de bondad de ajuste, que consiste en determinar que la correlación de la curva generada y los datos reales se ajuste al nivel mínimo de significancia (0.05) para las distintas distribuciones probabilísticas.
- Determinada la distribución probabilística que más se ajusta al registro de datos, se pronostica una precipitación (mm) para un determinado período de retorno. Con esta altura de precipitación, se procede a realizar el diseño de la tormenta por medio del método de tormentas del Servicio de Conservación del suelo de los Estados Unidos (US-SCS, 1986), con la distribución del tipo I, debido a que este método (calibrado por pruebas empíricas) presenta semejanza del medio geográfico y del clima marítimo del Pacífico, con inviernos húmedos y veranos secos.
- Con la aplicación de este método se obtiene el hietograma de la tormenta de diseño, al cual se le restará el agua infiltrada con el método de Número de curva del SCS (1972), éste es utilizado por la facilidad en el manejo e ingreso de datos. Este modelo se desarrolló en base resultados empíricos de cuencas experimentales en donde relaciona el potencial de infiltración en una cuenca y la infiltración máxima. Obteniendo ecuaciones empíricas con distintos coeficientes para los distintos tipos de suelo y condiciones de humedad.
- Con este nuevo hietograma, será transformado a un hidrograma a través del modelo de hidrograma sintético unitario del SCS (1972), este modelo de hidrograma es uno de los más usados, debido a que el hidrograma generado es similar al que puede esperarse en una cuenca real. Este método fue calibrado con mediciones de caudales en zonas rurales de gran tamaño y en cuencas pequeñas.
- A continuación, en la Figura 29, se presenta un esquema que resume la metodología aplicada para el cálculo del hidrograma de un evento hidrometeorológico extremo.

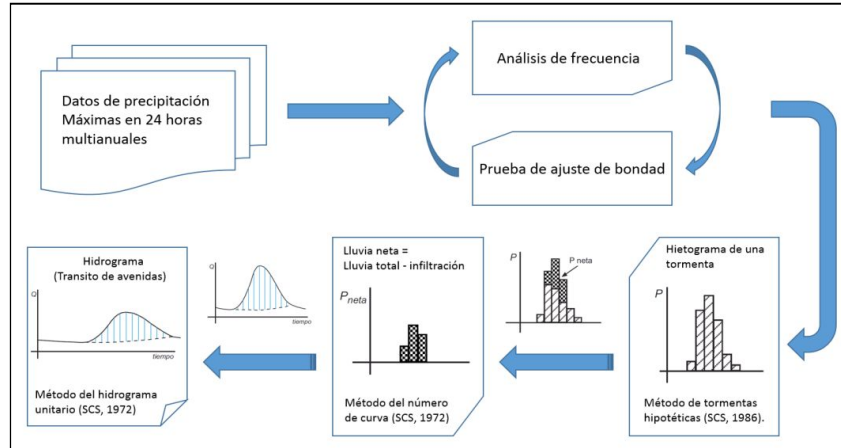


Figura 29: Esquema para el cálculo de un hidrograma de un evento hidrometeorológico extremo.

Para la simulación hidrometeorológica de un evento extremo es necesario conocer los parámetros de la cuenca (área, cota máxima, cota mínima, longitud del curso principal, tiempo de concentración y tiempo de retardo) a partir del punto en donde comenzará la simulación, para ello se delimitó la cuenca del río Omas a partir de un punto de descarga en las coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) 342909.69 m, 8592757.70 m con datum WGS 84 (Sistema Geodésico Mundial 1984), zona 18 sur. A partir de esta delimitación (Figura 30) se obtuvo los parámetros de la cuenca, ver Tabla 7.

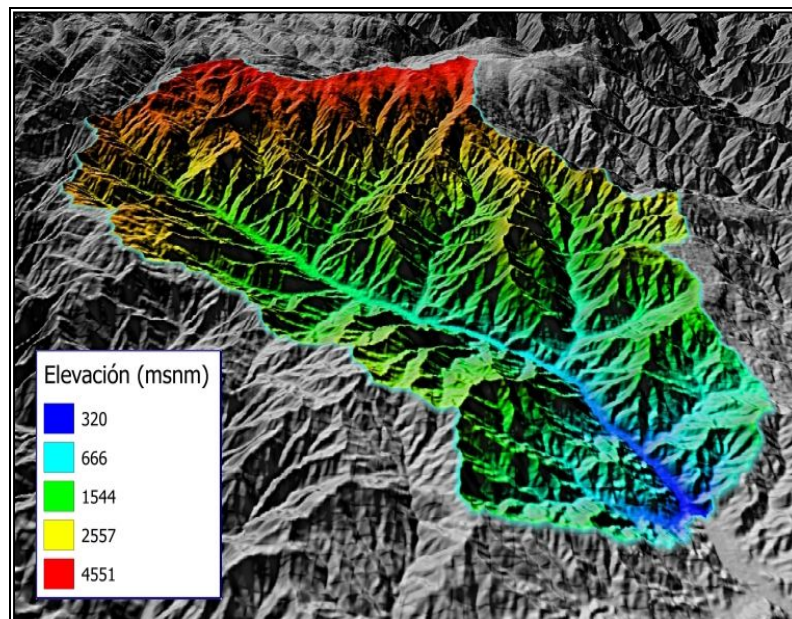


Figura 30: Cuenca delimitada del río Omas.

Tabla 7: Parámetros de la cuenca del río Omas delimitada.

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
<b>SUPERFICIE</b>		
ÁREA	Km.2	1031.60
<b>COTAS</b>		
COTA MÁXIMA	msnm.	4619.85
COTA MÍNIMA	msnm.	308.26
<b>RED HÍDRICA</b>		
LONGITUD DEL CURSO PRINCIPAL	metros	61141.40
<b>PARÁMETROS GENERADOS</b>		
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T <sub>c</sub> )	minutos	262.37
TIEMPO DE RETARDO (T lag)	minutos	157.42

Se utilizó la ecuación de Kirpich del método de California Culverts Praticce (1942) para estimar el tiempo de concentración que fue de 262.37 minutos, el cual es el tiempo en que demora en recorrer una gota de agua desde el punto más alejado de la cuenca hacia el punto de descarga. El tiempo de retardo calculado fue de 157.42 minutos (2 horas con 37 minutos), lo que significa que es el desfase de tiempo entre la precipitación máxima de la tormenta y el caudal máximo que se genera por dicha precipitación.

Con los parámetros calculados de la delimitación de la cuenca del río Omas, se procedió a calcular el hidrograma del evento extremo. Actualmente, la cuenca del río Omas no se encuentra instrumentada con estaciones meteorológicas y no cuenta con estudios hidrológicos, por lo que se aplicó un método empírico para la estimación de caudales máximos, el método de Creager adaptado para el territorio peruano por Wolfgang Trau y Raúl Gutiérrez Yrigoyen. Cabe indicar que este método no considera las pérdidas por infiltración, embalses, usos de agua y otras alteraciones que alteran el curso del agua. Por lo cual, los caudales extraídos para diferentes periodos de retorno son referenciales.

Los caudales obtenidos por el método de Creager fueron de 91.8 m<sup>3</sup>/s y 183.6 m<sup>3</sup>/s para periodos de retorno de 2 y 4 años o probabilidad del 50% y 25% de no excedencia del caudal, respectivamente. Estas probabilidades de no excedencia son relativas al no considerarse los factores externos que modifican el regimen del flujo por la falta de información en esta cuenca, por lo cual se seleccionó periodos de retorno bajos.

Con estos datos de caudales máximos se realizó un artificio para la obtención del hidrograma del evento, debido a que no se cuenta con

información pluviométrica para el cálculo del hietograma de la tormenta. Este artificio consistió en la realización de una iteración, partiendo de un dato de precipitación al azar y este se transforma a un hietograma con el método de tormentas del SCS, y luego es convertido a un hidrograma utilizando el método del Hidrograma Unitario del SCS, en el cual se puede obtener el caudal pico del hidrograma. Este caudal pico deberá ser aproximadamente igual al caudal que se desea simular. Para la facilidad de los cálculos se utilizó el programa Hec-Hms 4.0 el cual contiene todos los métodos descritos anteriormente.

Para el periodo de retorno de 2 años, se obtuvo un caudal de  $91.8 \text{ m}^3/\text{s}$  que es generado por una tormenta de  $2.69 \text{ mm}$  en un área de  $1031.6 \text{ km}^2$ , con una duración de 35 horas y una precipitación máxima de  $0.2 \text{ mm}$ .

En la Figura 31, se muestra el hidrograma (color rojo) e hietograma (color azul) generado para un evento extremo en la cuenca del río Omas.

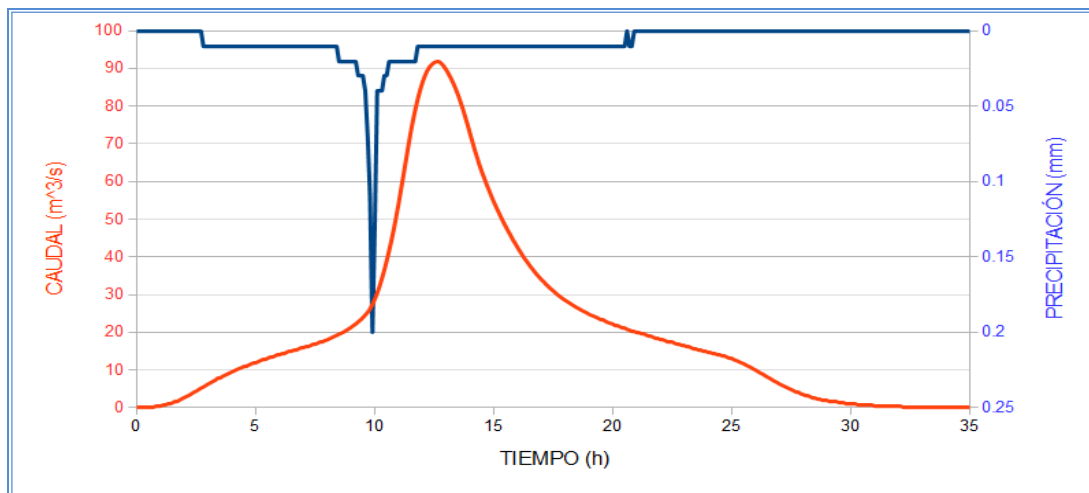


Figura 31: Gráfica del Hidrograma e hietograma de un evento hidrometeorológico extremo con un periodo de retorno de 2 años en el río Omas.

Para el periodo de retorno de 4 años, se obtuvo un caudal de  $183.6 \text{ m}^3/\text{s}$  que es generado por una tormenta  $5.18 \text{ mm}$  en un área de  $1031.6 \text{ km}^2$ , con una duración de 35 horas y una precipitación máxima de  $0.39 \text{ mm}$ .

En la Figura 32, se muestra el hidrograma (color rojo) e hietograma (color azul) generado para un evento extremo en la cuenca del río Omas.

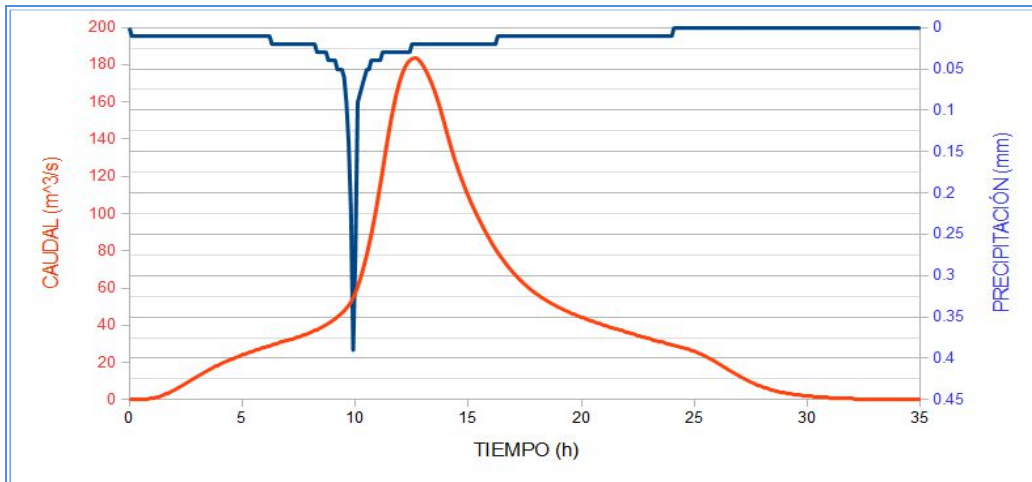


Figura 32: Gráfica del Hidrograma e hietograma de un evento hidrometeorológico extremo con un periodo de retorno de 4 años en el río Omas.

### - Umbral de inundación

El cálculo del hidrograma del umbral de inundación, el cual es el caudal máximo que puede fluir en el cauce del río Omas antes de que ocurra un desbordamiento y provoque una inundación, se realizó con simulaciones de flujo permanente (caudales constantes) menores al máximo calculado del evento extremo, hasta llegar al mínimo caudal que produzca desbordamiento, en este caso el umbral de inundación calculado fue de 30 m<sup>3</sup>/s aproximadamente.

En la Tabla 8, se muestra en resumen los caudales calculados que serán simulados en el programa FLO-2D, los cuales fueron clasificados por escenarios.

Tabla 8: Resumen de caudales calculados del río Omas (Coayllo).

CLASIFICACIÓN	CONDICIONES HIDROLÓGICAS	CAUDAL PICO (m <sup>3</sup> /s)
Escenario I	Periodo de retorno de 2 años	91.80
Escenario II	Periodo de retorno de 4 años	183.60
Escenario III	Umbral de inundación	30.00

#### 4.2.3.2. Resultado de las simulaciones

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

##### a) Escenario I

Simulación de un evento hidrometeorológico extremo para un periodo de retorno de 2 años (probabilidad del 50% de no excedencia) con un caudal máximo de 91.8 m<sup>3</sup>/s. El tiempo de simulación es de 35 horas, con un terreno de resolución de 5 metros. Este caudal máximo es relativo, al no considerarse los factores externos que afectan el régimen del flujo por la falta de información en esta cuenca. En la Figura 33, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante un evento hidrometeorológico extremo. Se aprecia que las zonas inundadas son solo terrenos de cultivos.

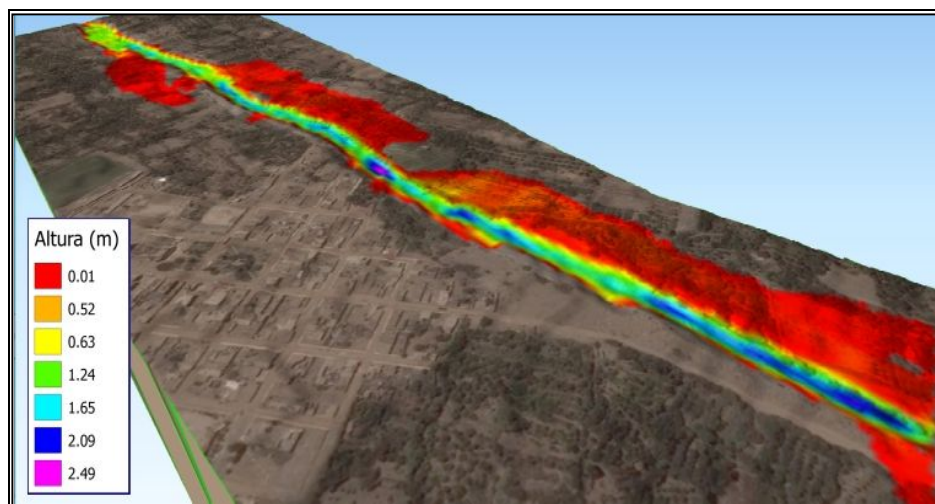


Figura 33: Alturas máximas del flujo para un periodo de retorno de 2 años (91.8 m<sup>3</sup>/s).

Durante el desarrollo del evento extremo el flujo comienza a desbordarse por el margen izquierdo. El cual provoca la inundación de zonas de cultivo. Cuando el flujo se desarrolla hasta su máximo nivel (91.8 m<sup>3</sup>/s) este desborda también por el margen derecho del río, 230 metros aguas arriba de la ciudad de San Pedro de Coayllo. En este escenario se inunda hasta 6 hectáreas.

El flujo llega a alcanzar alturas de hasta 2.50 metros (medidos desde el fondo del río) y en las zonas inundadas las alturas del flujo llegan hasta 0.60 metros, tal como se puede observar en la Figura 34.

Este evento hidrometeorológico de un periodo de retorno de 2 años ( $91.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ), no afecta a las estructuras de la población y las áreas inundadas presentan una altura relativamente baja, por lo cual no causaría efectos negativos en los cultivos.

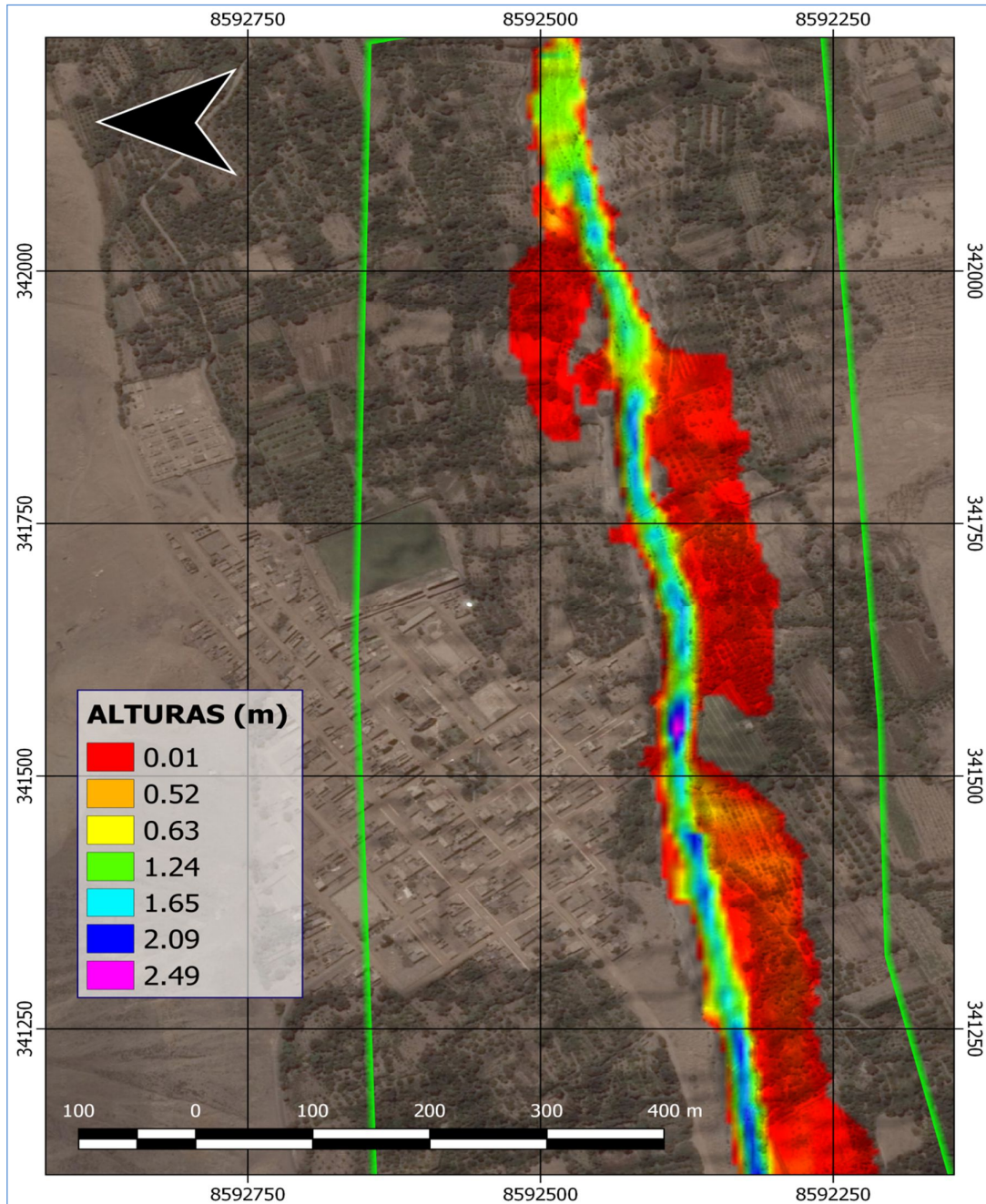


Figura 34: Vista en planta de las alturas máximas del flujo en un evento hidrometeorológico extremo para un periodo de retorno de 2 años ( $91.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

## b) Escenario II

Simulación de un evento hidrometeorológico extremo para un periodo de retorno de 4 años (probabilidad del 25% de no excedencia) con un caudal de 183.6 m<sup>3</sup>/s. El tiempo de simulación es de 35 horas, con un terreno de resolución de 5 metros. Este caudal máximo es relativo, al no considerarse los factores externos que afectan el régimen del flujo por la falta de información en esta cuenca.

En la Figura 35, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante un evento hidrometeorológico extremo. Se aprecia que las zonas inundadas llegan hasta las infraestructuras de la ciudad de San Pedro de Coayllo.

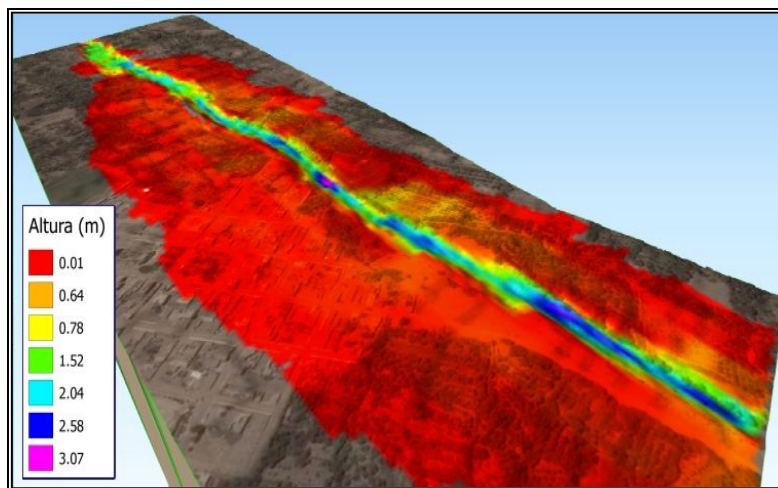


Figura 35: Alturas máximas del flujo para un periodo de retorno de 4 años (183.6 m<sup>3</sup>/s).

Durante el desarrollo del evento extremo el flujo comienza a desbordarse por ambos márgenes. El cual provoca la inundación de zonas de cultivo y en las infraestructuras de la ciudad de San Pedro de Coayllo. Cuando el flujo se desarrolla hasta su máximo nivel (183.6 m<sup>3</sup>/s) se observa que el flujo escurre sobre las áreas de cultivos y en las zonas pobladas, inundando hasta 22 y 5 hectáreas, respectivamente.

El flujo llega alcanzar alturas de hasta 3 metros (medidos desde el fondo del río) y en las zonas inundadas las alturas del flujo llegan hasta 0.35 y 1 metro en las zonas urbanas y de cultivo, respectivamente (Figura 36).

Este evento hidrometeorológico de un periodo de retorno de 4 años (183.6 m<sup>3</sup>/s) llega alcanzar las zonas urbanas; sin embargo, las alturas alcanzadas son bajas para ocasionar algún daño. Esta intensidad del evento si similar a un evento ocurrido hace 15

años en dicho poblado. No es posible realizar una comparación a detalle por la falta de datos registrados en dicho evento.

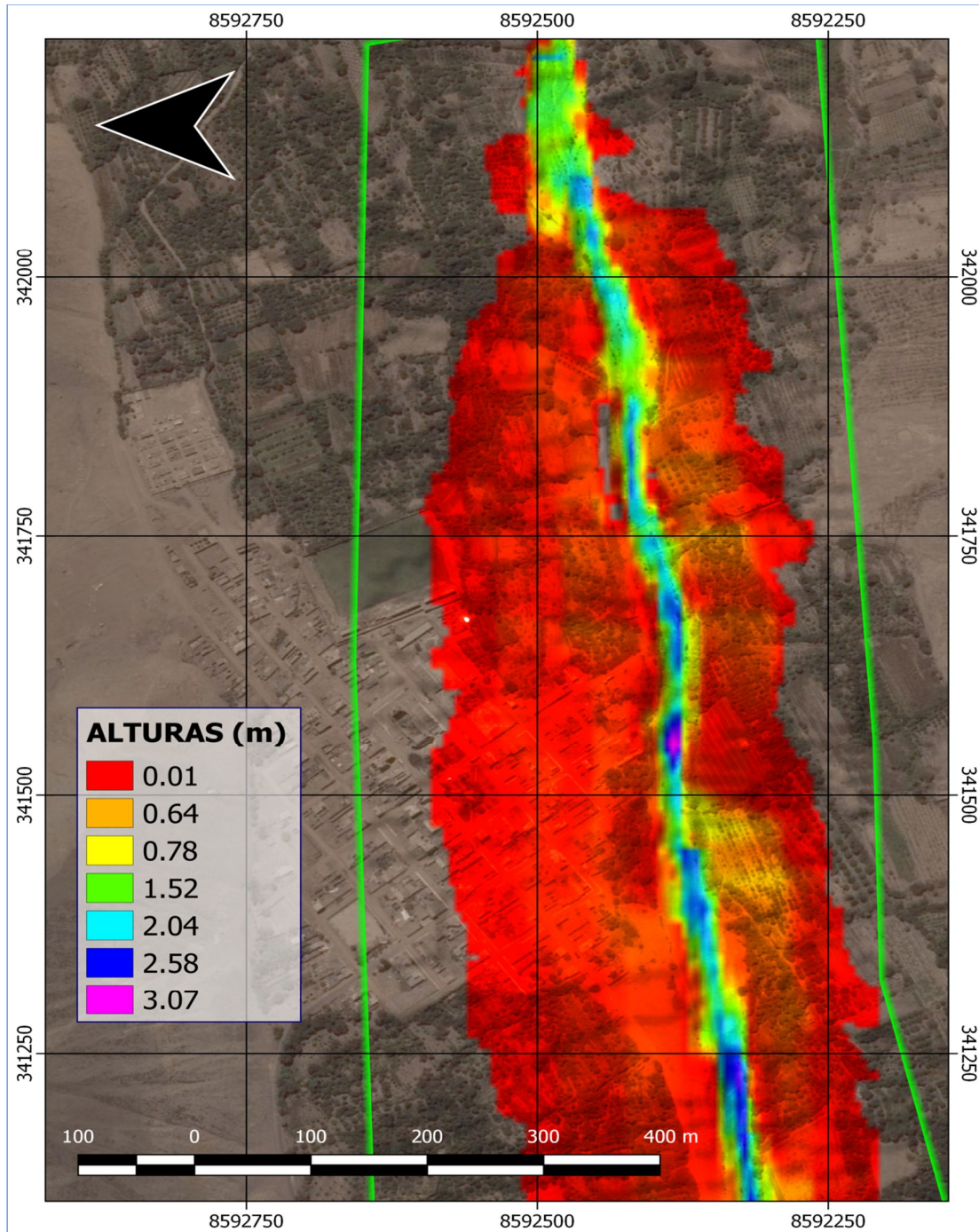


Figura 36: Vista en planta de las alturas máximas del flujo en un evento hidrometeorológico extremo para un periodo de retorno de 4 años ( $183.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

### c) Escenario III

Simulación de un evento hidrometeorológico con un caudal de  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  (umbral de inundación), con tiempo de simulación de 5 horas con una malla con resolución de 5 metros. Este valor es calculado con los datos de batimetría tratados. El caudal puede variar con el ingreso de una batimetría con más detalle.

En la Figura 37, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante la simulación. Se realizó simulaciones con distintos caudales y se observó que para medidas cercanas a  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  el flujo comienza a desbordarse de su cauce, el cual es un indicador para el reconocimiento del umbral de inundación.

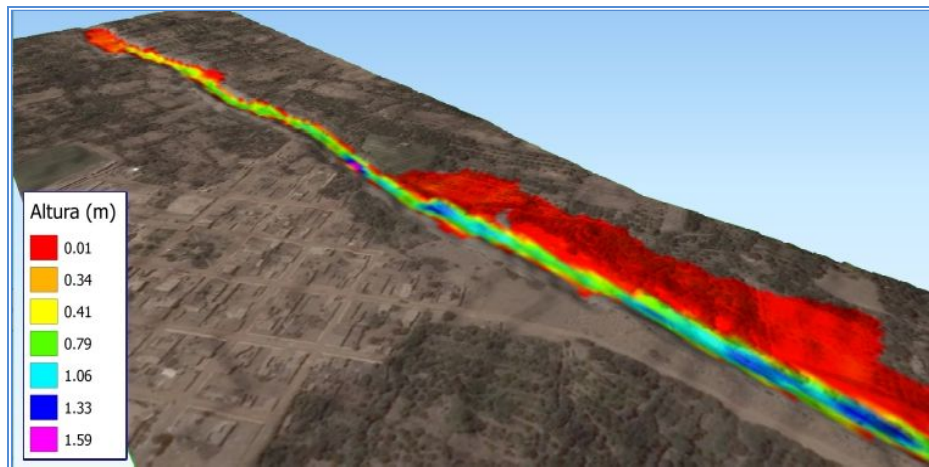


Figura 37: Alturas máximas del flujo para el umbral de inundación ( $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Durante el desarrollo de la simulación con un caudal de  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  (umbral de inundación) el flujo comienza a desbordarse aguas en el margen izquierdo del río. El flujo llega alcanzar alturas de hasta 1.60 metros (medidos desde el fondo del río). En las zonas que empiezan a inundarse las alturas del flujo llegan hasta 0.14 metros, tal como se puede observar en la Figura 38.

#### 4.3. Zonas susceptibles a procesos geodinámicos externos

La susceptibilidad está referida a la probabilidad de que suceda un evento geodinámico durante un período de tiempo en un sitio dado (Hauser, 1985 y 1993; Sepúlveda, 2000). Algunos autores definen como la mayor o menor predisposición a que un proceso geodinámico suceda u ocurra sobre determinado espacio geográfico y tiempo, lo cual depende de los factores: litología, tectonismo, agentes geológicos y actividad humana (taludes de corte). La identificación y delimitación de zonas afectadas

por procesos de geodinámica externa, ha permitido reconocer zonas probables a la ocurrencia de estos, ver Figuras 39 y 40.

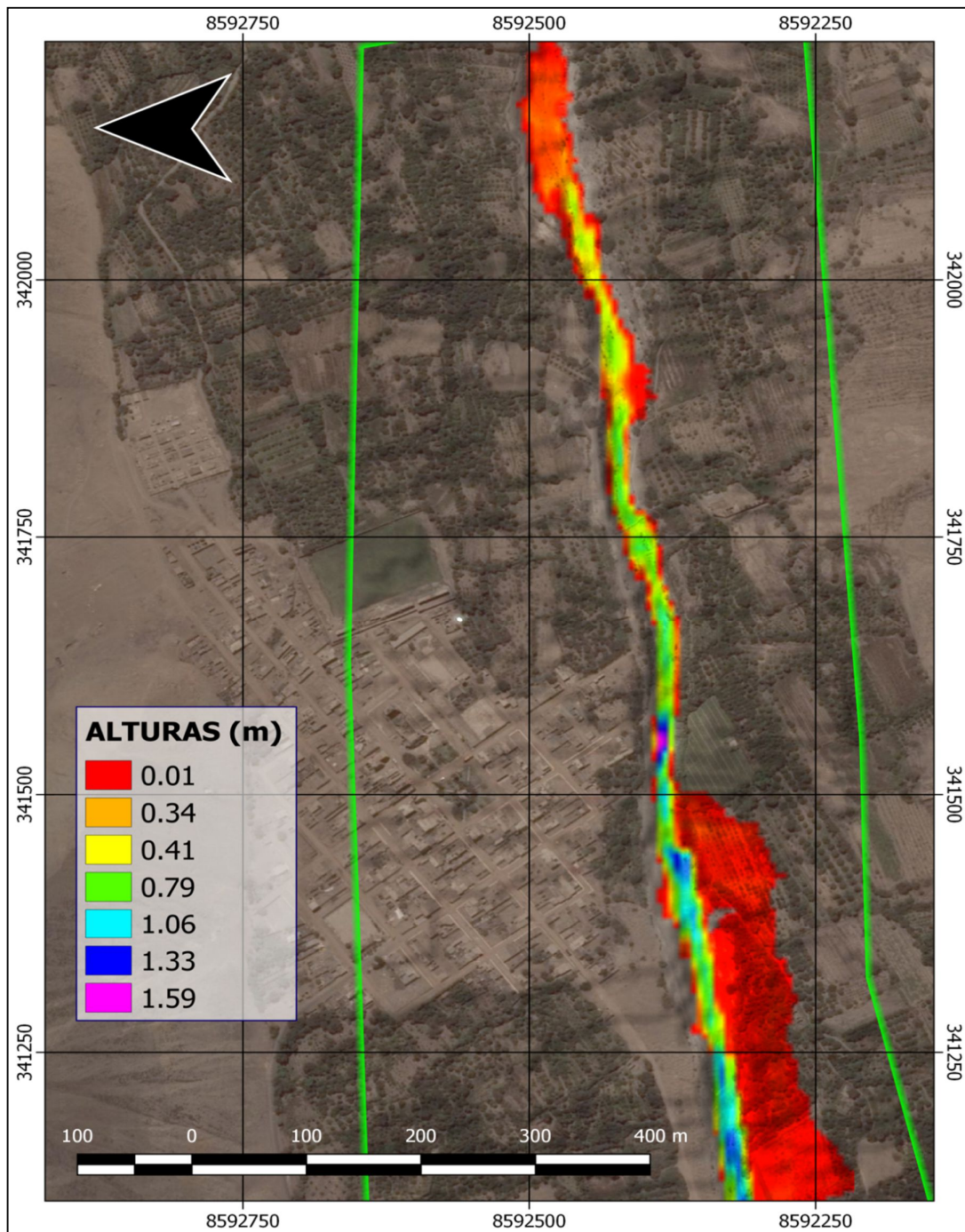


Figura 38: Vista en planta de las alturas máximas del flujo para el umbral de inundación del río Omas (30 m<sup>3</sup>/s) en la zona de Coayllo.



Figura 39: El casco urbano del área urbana de San Pedro de Coayllo es susceptible a caída de rocas, ante la ocurrencia de un sismo.

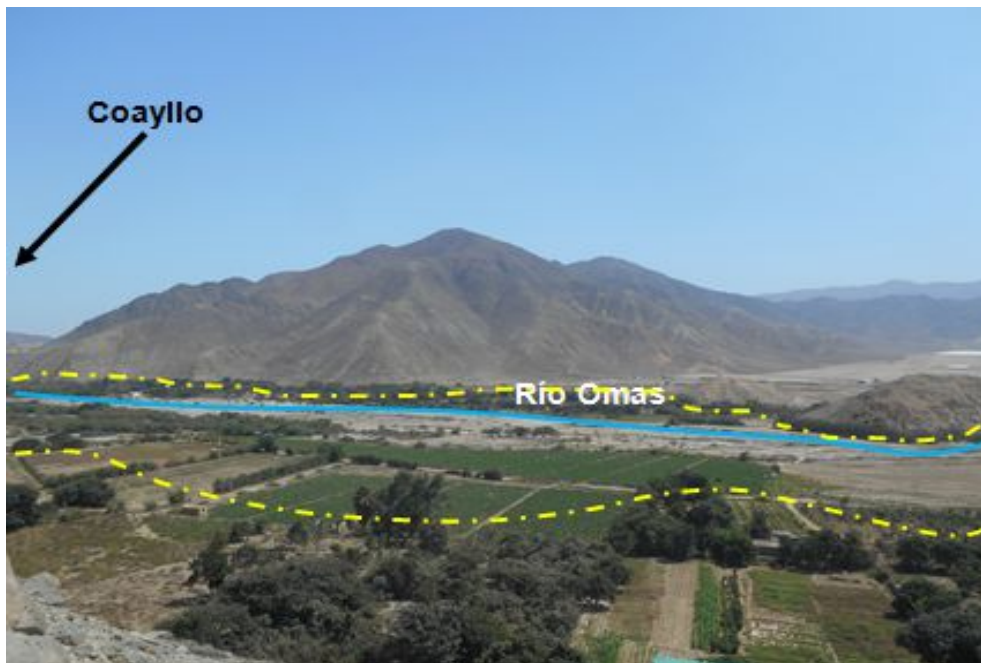


Figura 40: Las áreas de cultivo (delimitados con líneas amarillas) son susceptibles a inundaciones.

La estimación del tipo de evento a suscitarse está en función a los factores y del proceso de origen, ver Tablas 9, 10 y 11.

Tabla 9: Factores y procesos que delimitan las zonas susceptibles a eventos de caída de rocas.

FACTORES						+	ORIGEN DEL PROCESO GEODINÁMICO EXTERNO	=	CAÍDA DE ROCAS
LITOLÓGICOS	ESTRUCTURALES	CLIMATOLÓGICOS	MORFOLÓGICOS	SÍSMICOS	ANTRÓPICOS		ORIGEN DEL PROCESO GEODINÁMICO EXTERNO		
Rocas intrusivas muy fracturadas e intemperizadas	Rocas intrusivas	Incremento de las precipitaciones cuyas escorrentías erosionan las rocas y/o cambios bruscos de temperaturas	Geoforma: lomas y colinas pendiente > 30°	Magnitud > 4	Urbanismo en zonas adyacentes a la trocha carrozable Coayllo-Omas	+	HDRO-GRAVITACIONAL	=	CAÍDA DE ROCAS

Tabla 10: Factores y procesos que delimitan las zonas susceptibles a eventos de flujos de lodos y/o detritos.

FACTORES					+	ORIGEN DEL PROCESO GEODINÁMICO EXTERNO	=	FLUJOS DE DETRITOS Y/O LODOS
LITOLÓGICOS	CLIMATOLÓGICOS	MORFOLÓGICOS	SÍSMICOS	ANTRÓPICOS		ORIGEN DEL PROCESO GEODINÁMICO EXTERNO		
Rocas intemperizadas	Incremento de las precipitaciones cuyas escorrentías erosionan las rocas	Geoforma: lomas y montañas de pendiente > 30°	Magnitud > 4	Urbanismo en zonas adyacentes a la quebrada y áreas rurales	+	FLUVIO-ALUVIAL	=	FLUJOS DE DETRITOS Y/O LODOS

Tabla 11: Factores y procesos que delimitan las zonas susceptibles a eventos del tipo inundaciones.

FACTORES				+	ORIGEN DEL PROCESO GEODINÁMICO EXTERNO	=	INUNDACIÓN
LITOLÓGICOS	CLIMATOLÓGICOS	MORFOLÓGICOS	ANTRÓPICOS		ORIGEN DEL PROCESO GEODINÁMICO EXTERNO		
Depósitos fluviales	Incremento de las precipitaciones	Geoforma: terraza fluvial pendiente < 5°	Urbanismo en zonas adyacentes al río Omas	+	FLUVIO-ALUVIAL	=	INUNDACIÓN
		Río Omas, desnivel 1.70 m, aproximadamente					

Se ha estimado que las zonas susceptibles para movimientos en masa de tipo caída de rocas se encuentran en San Juan de Quisque, Coayllo, Sequilao y la trocha carrozable desde Coayllo hasta Uquira; mientras que, los flujos de detritos y/o lodos se encuentran en los anexos de San Juan de Quisque, Zoxa, Corralón, Sequilao y La Yesera. Finalmente, las inundaciones se presentan desde el puente San Lucas hasta 4.10 km aguas abajo del río Omas (Figura 41).

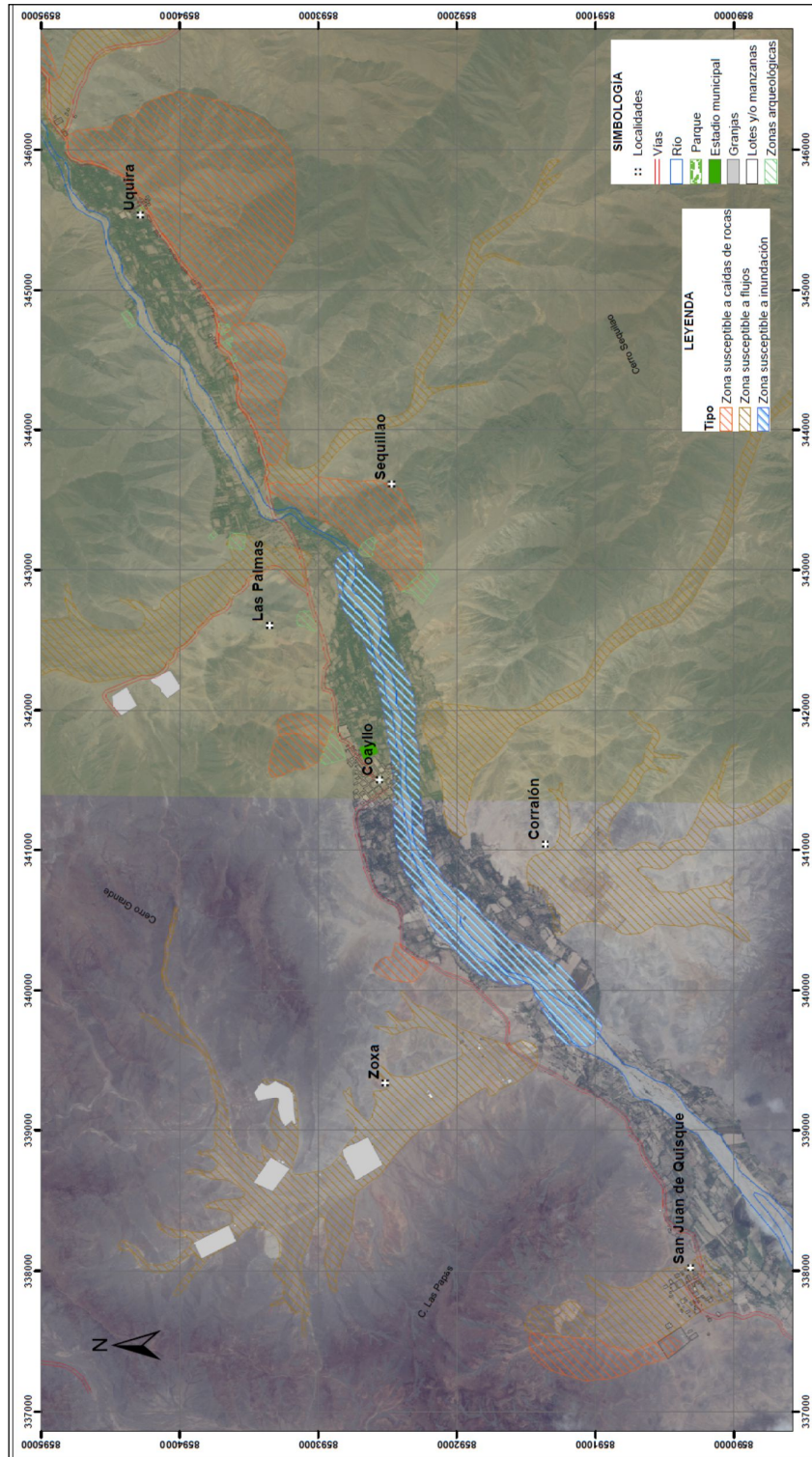


Figura 41: Zonas susceptibles a flujos e inundaciones.

## 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 denominado suelo, que posteriormente han sido transportados y redepositados en las partes bajas de las cuencas hidrográficas, conformando actualmente los suelos 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 físico-mecánicas de los materiales (arcillas, limos, arenas, gravas y clastos) condicionadas por las propiedades litológicas de las rocas pre-existentes y la dinámica con que fueron depositados. En el diagrama de la Figura 42, se indica el origen de los diferentes tipos de suelos.

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



Figura 42: 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, así como, el comportamiento en condiciones estáticas de los suelos y rocas, mediante la aplicación de técnicas de exploración, entre las cuales se tienen: calicatas, perforaciones y ensayos de suelos en laboratorio; a fin de determinar las propiedades físicas de los suelos de cimentación.

En el área urbana de San Pedro de Coayllo, se realizó un estudio geotécnico que consistió en la elaboración de calcatas, densidad de campo, posteos y ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) (Figura 43).

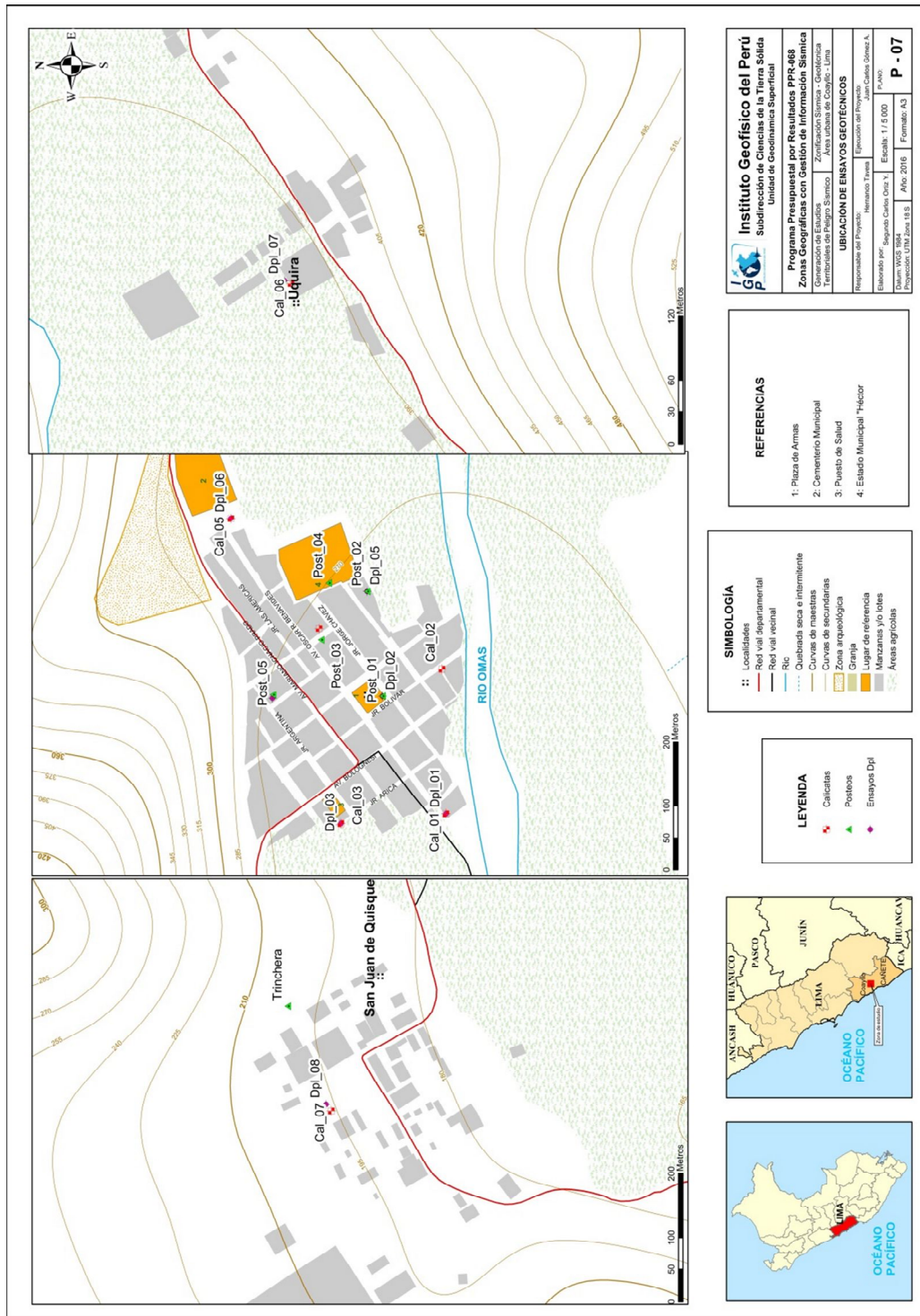


Figura 43: Ubicación de exploraciones geotécnicas, en San Pedro de Coayllo.

Asimismo, de las calicatas se extrajeron siete muestras que fueron enviadas al laboratorio de suelos, con el fin de realizarles ensayos de mecánica de suelos como: granulometría, plasticidad, corte directo y el cálculo de la capacidad de carga admisible, Asimismo, se han realizado las descripciones litológicas de una trinchera (Trinch\_01) ya existente como corte de talud.

## 5.1. Exploraciones a cielo abierto (norma ASTM D420)

Es un método directo que consiste en realizar una excavación en el terreno para la observación del suelo. Estas exploraciones se realizaron hasta profundidades de 3.00 m., a fin de describir los estratos que lo conforman, así como, extraer muestras para la realización de ensayos de suelos y su análisis. Estas calicatas son realizadas con maquinaria (retroexcavadora) o de forma manual.

### 5.1.1 Descripción de calicatas

Una vez terminada la excavación de la calicata, se procede a describir el perfil estratigráfico del subsuelo, para ello se han elaborado 08 fichas de descripción de calicatas, las mismas que se adjuntan en el Anexo de geotecnia. Las excavaciones realizadas se localizan en las siguientes coordenadas UTM (Tabla 12 y Figura 43).

Cabe resaltar que, las ubicaciones de las calicatas se definieron por los siguientes motivos: distribución espacial, áreas libres para elaborarlas y zonas donde se realizaron los ensayos geofísicos. Asimismo, la calicata Cal-07 se trabajó a 1.50 m porque son suelos muy compactos y hay presencia de caliche.

Tabla 12: Ubicación de calicatas

CALICATA	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
Cal - 01	341315	8592435	2 93	2.7	N.P
Cal - 02	341542	8592441	288	3	N.P
Cal - 03	341300	8592599	285	3	N.P
Cal - 04	341605	8592633	293	3	N.P
Cal - 05	341777	8592771	286	3	N.P
Cal - 06	345558	8594288	408	3	N.P
Cal - 07	337813	8590390	236	1.5	N.P
Trinch-01	333977	8590458	219	3.6	N.P

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

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

En 05 exploraciones (estratos muestreados) se realizó un ensayo de densidad de campo haciendo uso del método del cono, a profundidad promedio de 2.50 m., con la finalidad de conocer la compactación y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales, información necesaria para desarrollar los ensayos de corte directo a las muestras de suelo (en su estado inicial).

Sin embargo, en las calicatas Cal-05 y Cal-07 no se desarrolló, debido a que este método no se aplica en suelos que contengan clastos con diámetro superior a 1 ½" (38 mm) o cantidades excesivas de roca, así como suelos sin cohesión y/o suaves (arenas inconsolidadas), para este caso se asumieron valores teóricos de densidad. Los resultados contenidos se muestran en la Tabla 13 y las fichas de densidad que se adjuntan en los Anexos.

El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

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

**Extracción** de las muestras de suelo del agujero elaborado anteriormente y pesado del material extraído.

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

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

Tabla 13: Resultado de densidad in situ.

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HUMEDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
Cal - 01	DC-Cal - 01	2.7	1.71	1.69	2.12
Cal - 02	DC-Cal - 02	1.3	1.59	1.55	9.28
Cal - 03	DC-Cal - 03	3	1.56	1.4	9.63
Cal - 04	DC-Cal - 04	3	1.68	1.58	1.07
Cal - 05	DC-Cal - 05	3	1.69	1.68	9.18
Cal - 06	DC-Cal - 06	3	2.09	1.98	1.02
Cal - 07	DC-Cal - 07	1.5	1.93	1.92	0.58

Los datos mencionados en la Tabla 13, sirven para identificar las condiciones naturales del terreno (compactación y humedad), información necesaria para desarrollar los ensayos de corte directo a las muestras de suelo en su estado inicial (in-situ).

Las densidades mostradas son características de suelos granulares, tales como arenas y gravas y se encuentran dentro del rango establecido por Centro Peruano Japonés de Investigación Sísmicas y Mitigación de Desastres – CISMID (Tabla 14). El contenido de humedad es muy baja, no supera el 2.34%, a excepción de las calicatas Cal-03, Cal-04 y Cal-06 que presentan humedad entre 5.13 al 10.38%, eso debido que, los suelos tienen contenidos de limos, arcillas y corresponden a las zonas cercanas a áreas agrícolas. El bajo contenido de humedad es típico de zonas con climas muy secos y semí-cálidos.

Tabla 14: Valores típicos de densidad de suelos.

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

### 5.3. Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D1452)

Una posteadora es un barredor manual en forma de “T” que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas) hasta profundidades del orden de 6 m. El objetivo es obtener muestras del suelo, que aunque estén trituradas y completamente alteradas, son muy útiles para identificar y describir los tipos de suelos y contenido de humedad. En general, la posteadora presenta restricciones en suelos con presencia de gravas y gravillas (la cuchara de muestreo se entrapa con este tipo de suelos).

En el área urbana de San Pedro de Coayllo se ha realizado 5 ensayos con posteadora manual, llegando hasta una profundidad entre 1.70 m a 3.20 m. En general, el procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

Con la posteadora se penetra el subsuelo, desde la superficie de tal manera que, se gira manualmente el equipo ejerciendo presión sobre el suelo, a medida que va incrementando la profundidad, se van conectando y añadiendo las varillas de 1 m. de extensión para la obtención de muestras con las cucharas acopladas en el extremo (Tabla 15). Estas exploraciones fueron distribuidas entre las calicatas, en lugares donde no existía información geotécnica, a fin de lograr una mejor caracterización de los suelos del área urbana de San Pedro de Coayllo. A continuación, se muestra los resultados obtenidos:

Tabla 15: Ubicación de Posteos y clasificación de suelos SUCS.

POSTEOS	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	TIPO DE SUELO (SUCS)	NIVEL FREÁTICO A (m)
Post - 01	341499	8592534	295	1.7	SP	N.P
Post - 02	341663	8592558	300	2.6	SM	N.P
Post - 03	341587	8592630	296	2.5	SM	N.P
Post - 04	341676	8592618	297	2.4	SP	N.P
Post - 05	341501	8592705	292	2.7	SM	N.P

### 5.4. Ensayos de penetración dinámica ligera (norma DIN 4094)

El DPL, es un equipo de campo de registro continuo en base al número de golpes dados por un martillo de 10 Kg (N), en la parte superior del tambor de acero. Se pretende profundizar tramos de la varilla mediante una punta cónica de 60° que se encuentra en el extremo inferior. Este tipo de ensayo es aplicable en terrenos arenosos, areno-arcillosos y

limos arenosos. Esta técnica no es recomendable a utilizarse en gravas, fragmentos gruesos, conglomerados y terrenos rocosos.

Este ensayo permite estimar el ángulo de fricción de suelos específicos, y los valores obtenidos, ayudarán a calcular, mediante fórmulas empíricas, la capacidad portante (resistencia al corte) de los suelos en Kg/cm<sup>2</sup>, además de las propiedades de compacidad de los suelos. Los ensayos de DPL fueron realizados en las inmediaciones de una o dos calicatas a fin de conocer la resistencia al corte de los distintos estratos, sobretodo donde los suelos son conocidos.

El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

- **Ubicación de ensayos:** Se distribuyeron generalmente al costado y en puntos intermedios a algunas de las calicatas, con el objetivo de tener mayor información de la resistencia del suelo en el área estudiada.
- **Ensamble de equipo:** Consiste en conectar los accesorios del equipo. La punta cónica va al final de la varilla de penetración, esta se une a la guía que contiene el yunque, posteriormente se ajusta las uniones y finalmente, se empieza a hincar el suelo con la caída libre del martillo (acción de la gravedad).
- **Proceso de toma de datos:** Se debe registrar el número de golpes por cada 10 cm que la varilla penetra el suelo. Este procedimiento se sigue hasta que el suelo ofrezca resistencia (no exceder los 45 golpes de acuerdo a norma técnica).

En la Tabla 16, se indica la ubicación de los ensayos DPL en el área urbana de San Pedro de Coayllo, la profundidad alcanzada y los datos obtenidos del ensayo (número de golpes y ángulo de fricción). La profundidad alcanzada varía entre 0.90 y 1.20, nivel en el cual se calculará los parámetros geotécnicos (ángulo de fricción y cohesión) para conocer la capacidad portante de los suelos (admisible). Las fichas de los ensayos, se adjuntan en los Anexos.

En los ensayos DPL (Tabla 15), se ha logrado alcanzar una profundidad máxima de 3.00 m y mínima de 0.22 m, debido a la presencia de materiales granulares, conformados por gravas y arenas de grano grueso, con alta resistencia a la penetración.

Tabla 16: Ubicación de los ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) y parámetro obtenidos.

ENSAYO N°	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	# DE GOLPES	$\Phi$
DPL-01	341315	8592435	293	0.27	55	42.5
DPL-02	341499	8592534	171	1.52	45	39.7
DPL-03	341300	8592599	182	3.00	16	32
DPL-04	341496	8592706	186	3.00	44	39.5
DPL-05	341663	8592558	175	2.55	45	39.7
DPL-06	341777	8592771	191	0.74	55	42.5
DPL-07	345561	8594294	132	1.99	55	42.5
DPL-08	337823	8590398	176	0.22	55	42.5

## 5.5. Correlación N° DPL – SPT / Capacidad portante

### A) Correlación entre el “N” del DPL y “N” del SPT (ASTM D1586)

El ensayo DPL no cuenta con correcciones normadas para la obtención del ángulo de fricción interna, es por ello que; los valores obtenidos del número de golpes (NDPL), fueron correlacionados con el número de golpes del ensayo de penetración estándar (NSPT), para determinar el ángulo de fricción interna corregido y posteriormente, calcular la capacidad de carga admisible.

Para la correlación, se consideró las características del terreno (compacidad, resistencia y deformabilidad), y la fórmula empírica que relaciona el peso del martillo, la altura de caída del martillo, el área de la punta cónica, el espesor de la hinca y el número de golpes obtenidos con el DPL:

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

Dónde:

N1= Número de golpes equivalente en SPT

N2= Número de golpes, DPL

W1= Peso del martillo del DPL

W2= Peso del martillo SPT

H1= Altura de caída de DPL

H2= Altura de caída del SPT

A1= Área de la punta cónica del DPL

A2= Área de la punta cónica del SPT

e1= Espesor de la hincal del DPL

e2= Espesor de la hincal del SPT

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

### B) Cálculo del ángulo de fricción interna a partir del “N” SPT

Para determinar el ángulo de fricción interna de los suelos de cimentación, existen diversas fórmulas empíricas propuestas y para el caso del área urbana de San Pedro de Coayllo, se empleó la relación experimental propuesta por Osaki (1959), siendo esta la más usada internacionalmente por sus resultados conservadores, ver Tabla 17.

Tabla 17: Cálculo del ángulo de fricción interno, usando valores del SPT.

PROF. (m)	Nspt (golpes)	$\phi'_{spt}$			
		Dumhan	Osaki (1959)	Muromachi (1974)	Hatanaka y Uchida (1996)
0.00-0.30	11.85	36.9	30.4	32.1	35.4
0.30-0.60	11.37	36.7	30.1	31.8	35.1
0.60-0.90	10.4	36.2	29.4	31.3	34.4
0.90-1.20	8.47	35.1	28	30.2	33
1.20-1.50	4.84	32.6	24.8	27.7	29.8
1.50-1.80	7.02	34.2	26.8	29.3	31.8
1.80-2.10	8.95	35.4	28.4	30.5	33.4
2.10-2.40	5.81	33.3	25.8	28.4	30.8

Finalmente, en los anexos se adjunta las fichas y resúmenes de cada uno de los ensayos realizado en campo, ver Figura 44.

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

La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo corte de una muestra de suelo sometida a fatigas y/o deformaciones (esfuerzos verticales y horizontales) que simulen la que existe o existiría en el terreno producto de la aplicación de una carga. Esta resistencia al corte en los suelos se debe a dos componentes: la

cohesión (comportamiento plástico que presentan las partículas finas de una muestra) y el ángulo de fricción interna (rozamiento que existe en las partículas granulares).

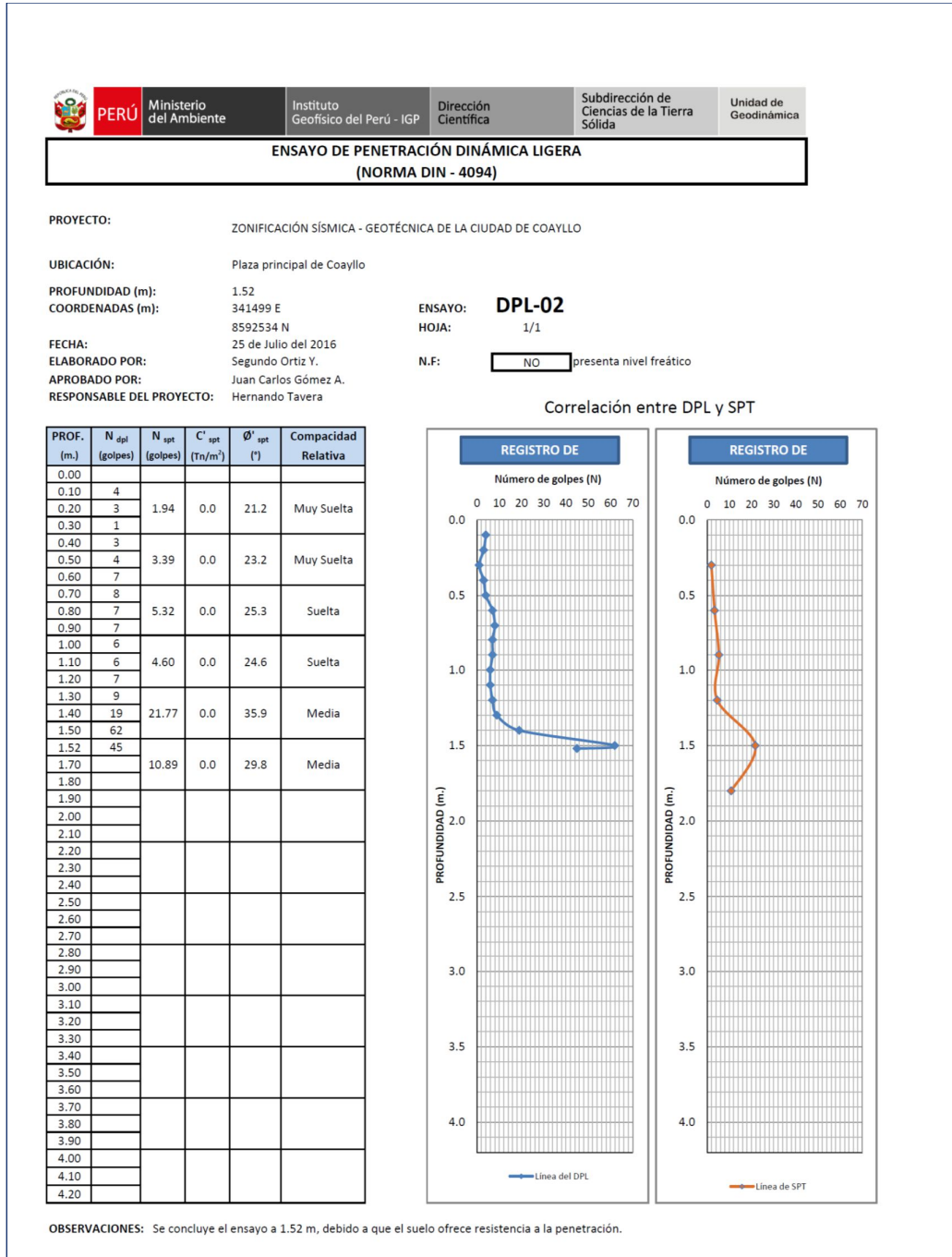


Figura 44: Diagrama de correlación entre el número de golpes del DPL y el número de golpes del SPT, y cálculo del ángulo de fricción interna corregido.

Para conocer la 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, luego se aplica una carga vertical de confinamiento ( $P_v$ ) y una carga horizontal ( $P_h$ ) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra. En la Tabla 18 se muestra los resultados obtenidos para cada ensayo.

Tabla 18: Valores obtenidos del ensayo de corte directo.

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo ( $^{\circ}$ )	Cohesión aparente del suelo ( $\text{kg/cm}^2$ )	Densidad natural ( $\text{gr/cm}^3$ )
C - 01	32	0.01	1.71
C - 02	35	0.01	1.59
C - 03	21.38	0.06	1.71
C - 04	33	0.02	1.68
C - 05	31	NP	1.69
C - 06	34	NP	2.09
C - 07	38.11	0.02	1.93

De los resultados obtenidos se evidencia que los suelos presentan cohesión baja; es decir, que tienen consistencia muy blanda a blanda; mientras que, los valores del ángulo de fricción interna superan los  $31^{\circ}$ , característicos para los suelos granulares de poca cohesión. Una excepción es la Cal-03 que presenta un ángulo de fricción interna de  $21.38^{\circ}$  típico de suelos compuesto por limos inorgánicos con alto contenido de arena (48.10%).

### 5.7. 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 y se encuentra establecido por la relación entre la carga última y un factor de seguridad de 3, esto de acuerdo a la Norma Técnica Peruana para el diseño de Cimentaciones E.050.

### 5.7.1 Carga última (qu)

Para determinar la carga última, se usaron los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo y  $N_{SPT}$  (ángulo de fricción y la cohesión), así como la fórmula de Terzaghi (1943), según sea el suelo a ensayar (Tabla 13):

Fórmula para falla por corte general:

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

Fórmula para falla por corte local:

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

$C$ : cohesión

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

$N_c, N_q, N_\gamma$ : Factores de carga.

Tabla 19: Factores de carga (Modificado por Terzaghi)  
(Das, 2007).

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

Luego, en base a los resultados obtenidos para la carga última ( $q_u$ ) se calculó la capacidad admisible de los suelos a una profundidad de cimentación de 1.00 m y ancho de zapata de 1.00 m. Asimismo, para una profundidad de cimentación de 1.50 m y ancho de zapata de 1.00 m. Los resultados de capacidad de carga admisible obtenidos para los suelos analizados se presentan en la Tabla 20 y 21 (Figura 26).

Tabla 20: Capacidad de carga admisible para las muestras de suelo extraídas en la ciudad de San Pedro de Coayllo.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Kg/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga última (Kg/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )
Cal - 01	7.61	2.54	10.05	3.35
Cal - 02	10.38	3.59	14.07	4.69
Cal- 03	3.11	1.04	3.84	1.28
Cal - 04	9.06	3.02	11.77	3.92
Cal - 05	6.19	2.06	8.32	2.77
Cal - 06	11.6	3.87	15.42	5.14
<b>Cal - 07</b>	<b>19.29</b>	<b>6.43</b>	<b>25.32</b>	<b>8.44</b>
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00		Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00	

Tabla 21: Capacidad de carga admisible obtenido en base a los ensayos de DPL en el área urbana de San Pedro de Coayllo.

ENSAYO	Capacidad de carga última (kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga última (kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )
DPL – 02	3.29	1.1	4.5	1.5
DPL – 03	6.78	2.26	8.47	2.82
DPL – 04	14.52	4.84	19.04	6.35
DPL – 05	11.46	3.82	15.14	5.05
DPL - 07	13.36	4.45	17.64	5.88
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00		Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00	

Tabla 22: Rangos de capacidad de carga admisible.

Capacidad Carga Admisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	DENOMINACION
< 1.0	MUY BAJA
1.0 - 2.0	BAJA
2.0 - 3.0	MEDIA
> 3.0	ALTA

De acuerdo a los resultados obtenidos y tomando en cuenta los valores de la

Tabla 22, se ha determinado que la zona urbana de San Pedro de Coayllo, presenta suelos con la siguiente capacidad de carga admisible (Figura 45):

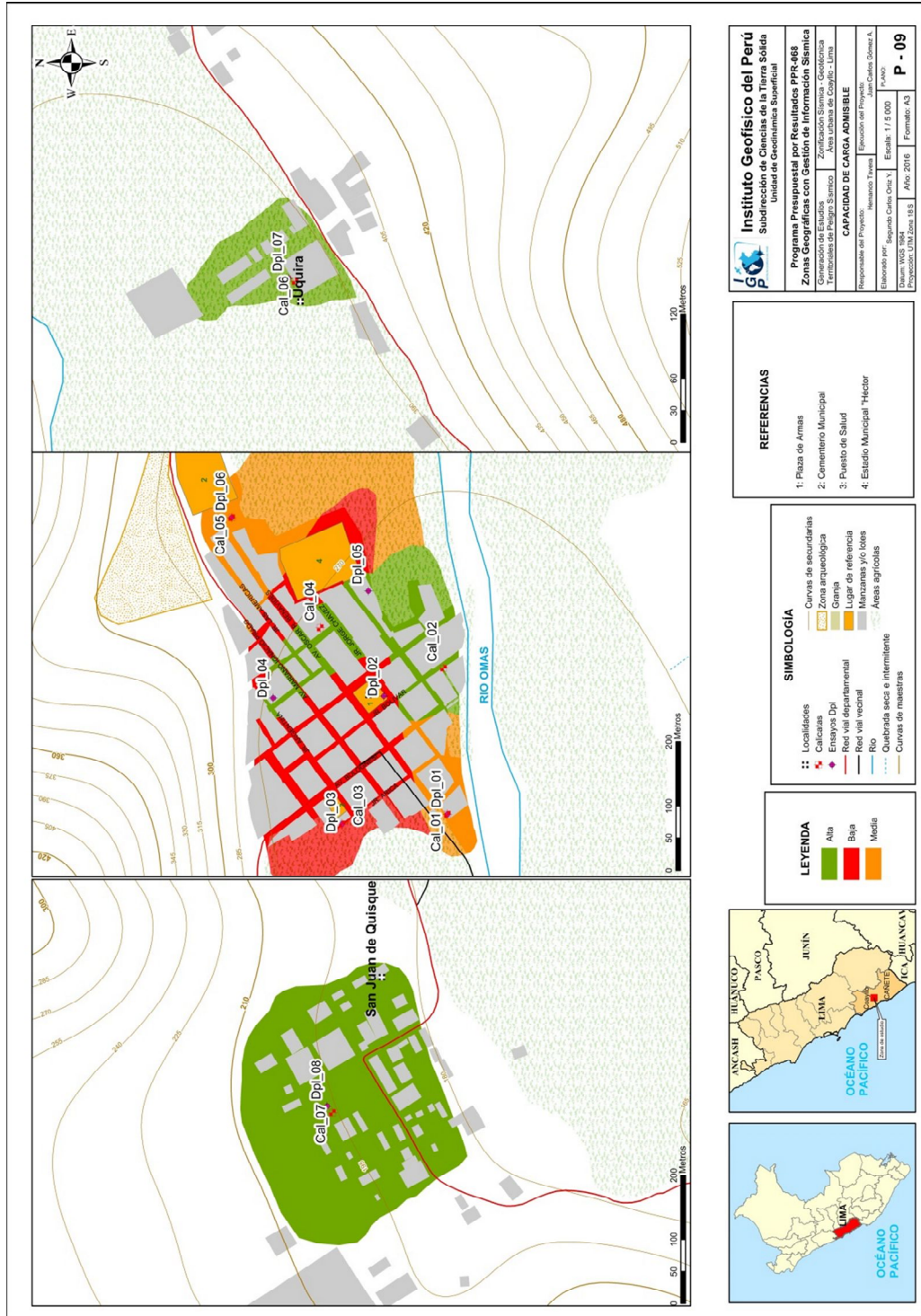


Figura 45: Mapa de capacidad de carga admisible para el área urbana de San Pedro de Coayllo.

**Capacidad de carga admisible Muy baja:** Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre 1.00- 2.00 kg/cm<sup>2</sup>, correspondiente a suelos sueltos a medianamente compactos. Abarca el 26% del área de estudio y sobre estos se encuentra asentado parte del casco urbano de San Pedro de Coayllo.

**Capacidad de carga admisible media:** Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre 2.00- 3.00 kg/cm<sup>2</sup>, corresponden a suelos moderadamente compactos. Representa el 24% del área de estudio y considera la parte noreste, sureste y suroeste de la plaza principal de San Pedro de Coayllo.

**Capacidad de carga admisible alta:** Comprende rangos de capacidad de carga admisible mayores a 3.00 kg/cm<sup>2</sup>, corresponden a suelos compactos. Representa el 50% del área de estudio y sobre estos suelos se sitúan los anexos San Juan de Quisque, Uquira y parte del caso urbano de San Pedro de Coayllo.

#### 5.8. Clasificación de suelos, SUCS (ASTM D-4827)

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos, y los resultados obtenidos con los ensayos granulométricos y de plasticidad, se ha identificado 3 tipos de suelos que han sido agrupados haciendo uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), ver Tabla 22 y Figura 46.

**Suelos tipo SW – SM:** Están conformados por arenas bien graduadas con alto porcentaje de limos, siendo el contenido de humedad de 5.13%, por lo cual se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es baja. Son suelos de compactación media y no presentan plasticidad. Estos suelos han sido identificados en el anexo Uquira y representan el 3% del área estudiada.

**Suelo tipo SP:** Están conformados por arenas mal graduadas, con un contenido de humedad de 2.00% a 5.00%, por ello se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es muy baja. Son suelos de compactación media y no presentan plasticidad. Estos suelos representan el 18% del área estudiada y considera parte del casco urbano de San Pedro de Coayllo.

Tabla 23: Clasificación SUCS de los suelos para la ciudad de San Pedro de Coayllo.

CALICATA	PROF (m)	INF (m)	GRAVAS (>4.76)	ARENAS (>0.074mm, <4.76mm)	FIOS % (<0.074)	UNIFORMIDAD	CURVATURA	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	SUCS	DEMINIACIÓ II
Cal-01	2.7	NP	47.2	50.7	2.08	19.68	0.33	-	-	-	1.2	GP	Gravas mal graduada
Cal-02	3	NP	43.2	43.8	4.71	43.65	0.52	-	-	-	2.34	GP	Grava mal graduada
Cal-03	3	NP	0	48.1	51.9	-	-	22.5	18.8	3.7	11.3	ML	Limo arenosas de baja compresibilidad
Cal-04	3	NP	3.3	64.6	32.11	-	-	37.6	28.1	9.5	6.04	SM	Arena limosa
Cal-05	3	NP	13.5	80.9	5.56	10.91	1.24	-	-	-	0.65	SW-SM	Arena bien graduada con limos y gravas
Cal-06	3	NP	4.5	90.8	4.73	10	1.35	-	-	-	5.13	SW	Arena bien graduada
Cal-07	1.5	NP	57.4	35	7.6	83.3	6.31	NP	NP	NP	1.4	GP-GM	Grava limo-arenosa mal graduada

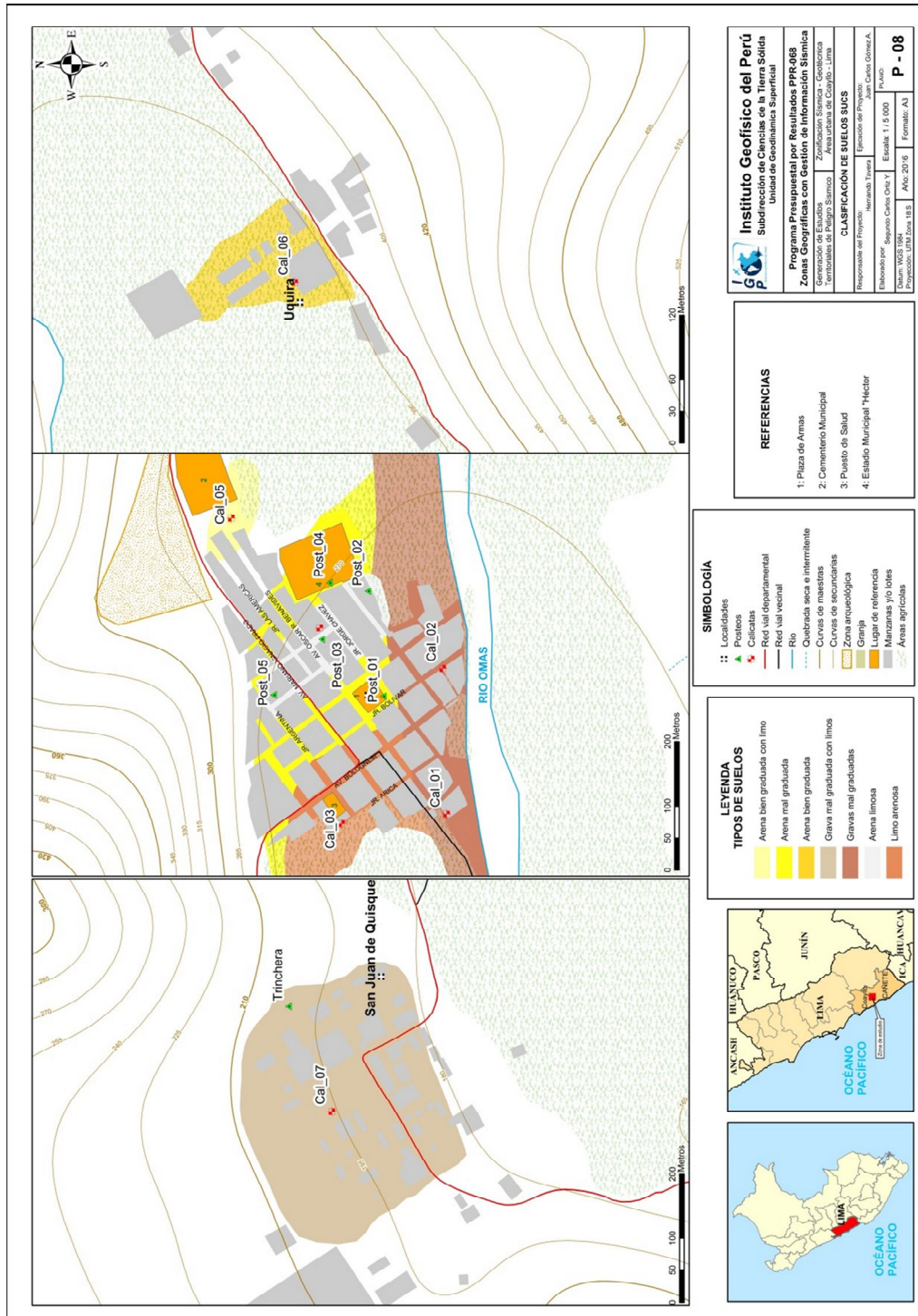


Figura 46: Mapa de tipos de suelos para el área urbana de San Pedro de Coayllo.

**Suelos tipo SW** Están conformados por arenas bien graduadas con el contenido de humedad de 5.13%. Se consideran suelos de compactación media y no presentan plasticidad. Ocupan el 3% de los suelos del área de estudio y han sido identificados en extremo noreste de Quilmaná (a 15 m del cementerio general).

**Suelos tipo GP – GM:** Están conformados por gravas mal graduadas en matriz areno-limosa (41.8%), siendo su contenido de humedad de 0.62%. Se consideran suelos de compactación alta y no presentan plasticidad. Ocupan el 32% de los suelos y han sido identificados en el anexo de San Juan de Quisque.

**Suelos tipo GP:** Están conformados por gravas mal graduadas en matriz arenosa de grano medio a grueso. Contienen clastos redondeados a subredondeados con diámetros máximos de 12". El contenido de humedad es de 1.20% a 2.34%, y se consideran como suelos de compactación, no presentan plasticidad. En Coayllo ocupan el 26% de los suelos y han sido identificados en las calicatas 01 y 02, ubicadas en la margen izquierda del río Omas hasta el jirón Daniel Alcides Carrión.

**Suelos tipo SM:** Están conformados por arenas limosas, siendo el contenido de humedad de 6.40%, correspondiente a suelos con capacidad de retención (permeabilidad) baja. Se consideran suelos de compactación medio y no presentan plasticidad. Estos suelos representan el 7% del área de estudio y se han identificado en la calicata 04, abarcando parte del casco urbano.

**Suelos tipo ML:** Están conformados por limos inorgánicos, siendo el contenido de humedad de 10.38%, correspondiente a suelos con capacidad de retención (permeabilidad) moderada. Presentan un índice plástico de 3.70%. Estos suelos representan el 11% del área de estudio y se han identificado en la calicata 03, ubicada en la parte trasera de la posta médica de San Pedro de Coayllo.

**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA  
DEL ÁREA URBANA DE SAN PEDRO DE COAYLLO**

## CONTENIDO

### 1. METODOLOGÍA

- 1.1. Razones espectrales (H/V)
- 1.2. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)
- 1.3. Tomografía eléctrica (ERT)

### 2. ADQUISICIÓN DE DATOS

### 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

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

### 4. ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA

- 4.1. Mapa de Zonificación Geofísica

### CONCLUSIONES

## 1. METODOLOGÍA

El estudio de Zonificación Geofísica - Geotécnica para el área urbana de San Pedro de Coayllo, se ha realizado considerando información geofísica, geológica, geotécnica 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. 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.

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

- ✓ Los registros de vibración ambiental son tratados por ventanas de 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de forma aleatoria diversos tramos de señal sin la presencia de ruidos transitorios.
- ✓ Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto.
- ✓ Los espectros horizontales de la señal se dividieron entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promediaron estos para cada punto de observación considerando su respectiva desviación estándar.
- ✓ Se procedió a identificar la frecuencia predominante considerando, un rango de interés que fluctúa entre 0.5 a 20 Hz y picos/rangos con amplificaciones relativas de al menos 2 veces (se considera la amplitud de “1” como punto de referencia).

En la Figura 1, se muestra un ejemplo 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, las bandas grises identifican las frecuencias principales. Finalmente, para la presentación de los resultados, las frecuencias son expresadas en periodos dominantes.

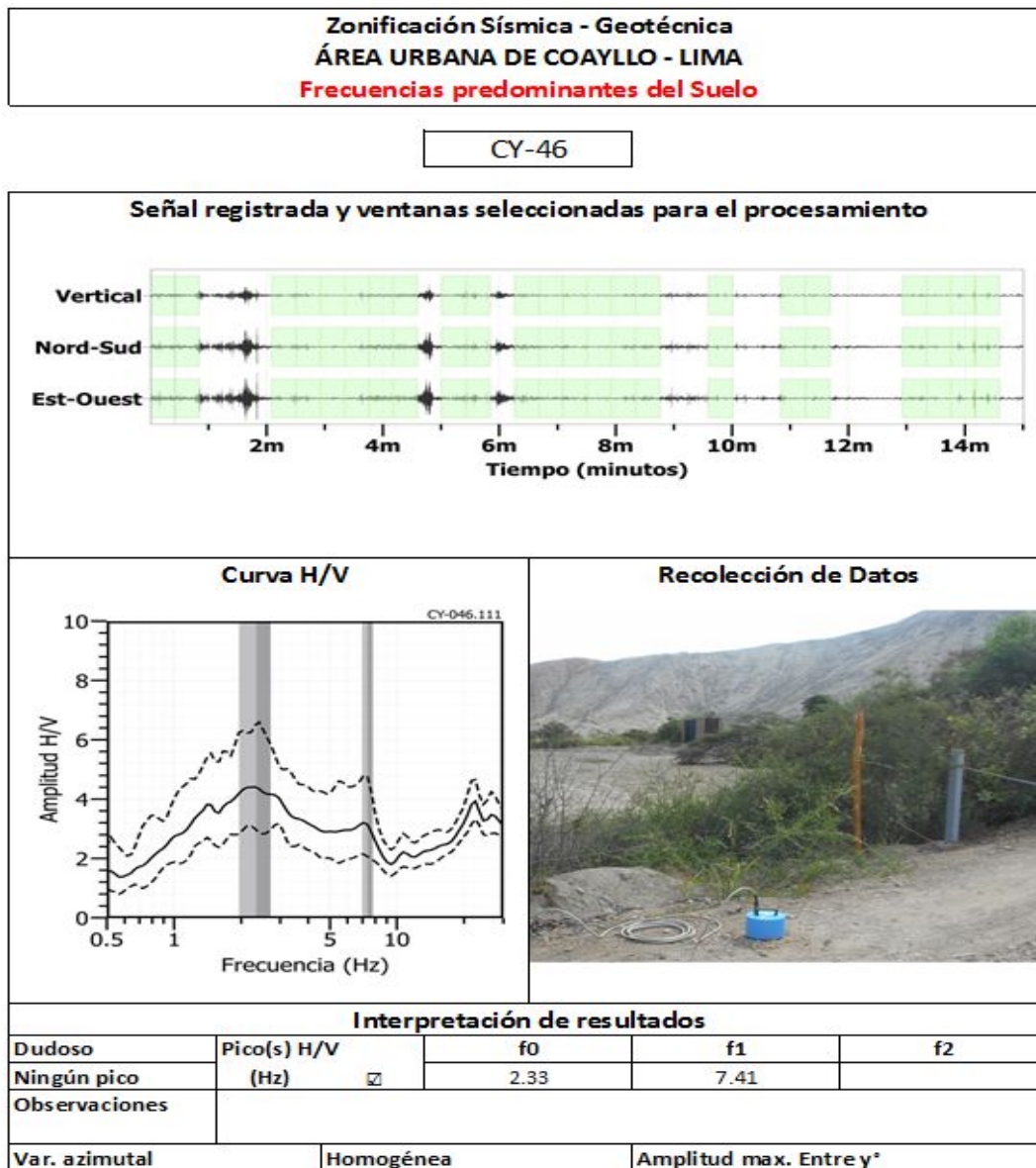


Figura 1: Ejemplo de la ficha H/V para el punto CY -46 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua y Abajo; resultados.

- **Interpretación:** Para la interpretación de los resultados se dispone de mapas geológicos y geotécnicos a fin de correlacionar resultados obtenidos para el análisis de la información, se debe considerar: 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). Asimismo, se evalúa la correspondencia de los parámetros físicos-dinámicos encontrados con los aspectos geológicos y geotécnicos que dominan a la zona de estudio. La Figura 1 muestra como ejemplo, un registro de vibración ambiental (CY-46).

## 1.2.- Análisis Multicanal de ondas Superficiales (MASW)

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

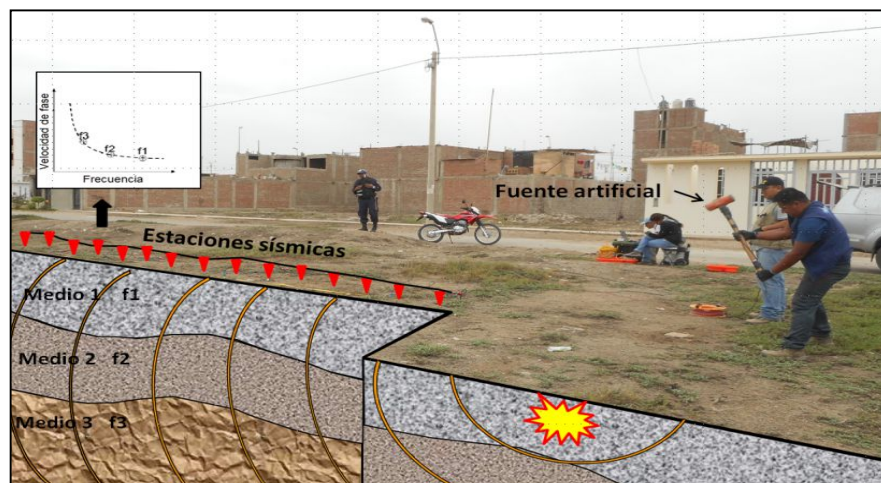


Figura 2: Generación de ondas Rayleigh con fuente artificial y su respectiva curva de dispersión.

- **Procesamiento:** Consiste en aplicar la rápida Transformada de Fourier (FFT) en los registros sísmicos obtenidos para cada punto de disparo (Reynolds, 2011), lo cual permite realizar la transformación de los datos en series de tiempo, dando como resultado una imagen de dispersión que relaciona la velocidad de fase de las ondas

superficiales con la frecuencia. Una vez obtenidas las curvas de dispersión pertenecientes a un mismo perfil MASW, son sometidas de forma individual a un proceso matemático de inversión con el fin de obtener los perfiles Vs en una dimensión (1D) (Park, 2014; Roma, 2010; Socco et al., 2008).

En la Figura 3, se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos aplicando esta técnica en un punto ubicado próximo a la Hacienda Palmar. La imagen de la izquierda muestra la curva de dispersión obtenida y a 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 representan la inversión de la curva de dispersión del dominio de frecuencia a profundidad. Esta curva permite verificar el nivel de confiabilidad o la profundidad mínima y máxima de investigación (área sombreada), en este caso; el perfil presenta una capa sísmica y un semiespacio, donde, el nivel de confiabilidad va de 2 a 30 metros de profundidad.

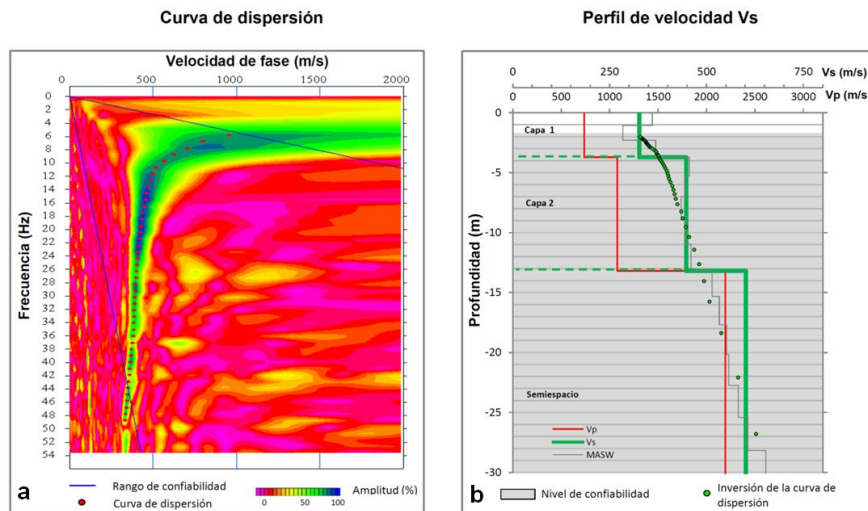


Figura 3: a) Curva de dispersión y b) perfil de velocidad obtenido a partir del ensayo realizado en la hacienda Palmar.

**- Interpretación:** Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en este ítem se considera la clasificación de suelos según la Norma E.030, la misma que considera la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte para los 30 metros superiores (Vs30). En este caso, las velocidades de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen y se colocan según la Tabla 1, para un mejor análisis de la distribución de este parámetro.

Tabla 1: Clasificación de perfiles de suelo considerando la norma E.030.

Clasificación de los perfiles de Suelo				
N°	Vs	Norma E.030	Descripción	
1	< 180 m/s	Suelo blando	Suelo blando	
2	180 m/s a 350 m/s	Suelo rígido	Suelo medianamente rígido	
3	350 m/s a 500 m/s		Suelo rígido	
4	500 m/s a 800 m/s	Roca o suelo muy rígido	Suelo muy rígido	
5	800 m/s a 1500 m/s		Roca fracturada	
6	> 1500 m/s	Roca dura	Roca dura	

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

### 1.3. Tomografía 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 distribución de los valores de la resistividad del subsuelo a fin de definir o delimitar los diferentes estratos con mayor o menor contenido de agua, sales y 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 se medirá la diferencia de potencial eléctrica  $\Delta V$  entre esos dos puntos (Figura 4). Para este estudio se consideró el dispositivo polo-dipolo.

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

valores de resistividad y su configuración en el subsuelo, incluyendo la corrección por topografía.

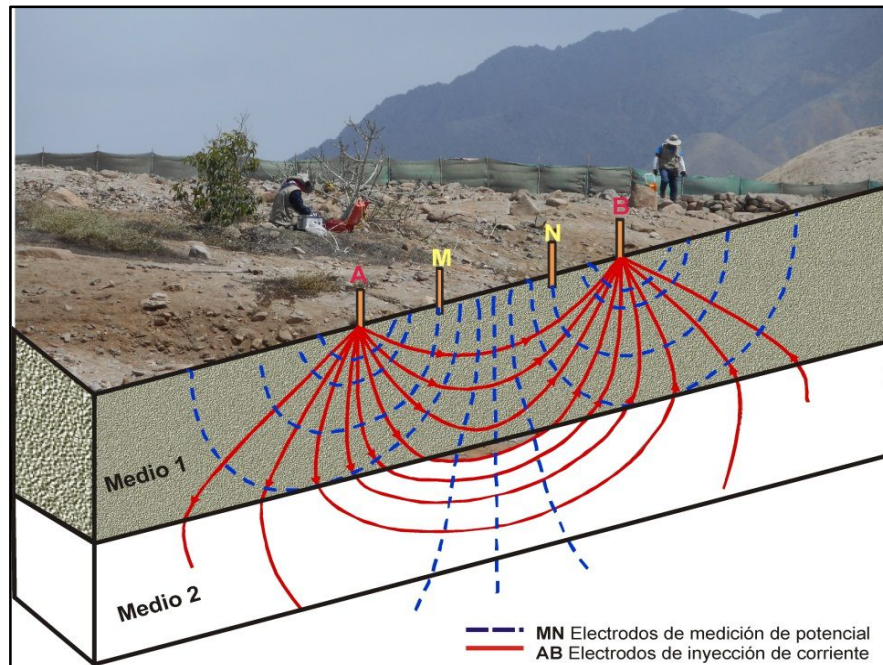


Figura 4: Principio del método de resistividad (LE01-BR), modificado de Orellana, E. (1982).

Finalmente, los resultados son presentados mediante sección de resistividad 2D que relacionan la distancia y profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo. En secciones se identificó e interpreto los detalles sobre 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 la investigación.

- **Interpretación:** Se 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, 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. Así mismo, se puede considerar dentro de este grupo a los suelos orgánicos, arcillosos, limosos y aquellos con contenido de carbón, los cuales se comportan como buenos conductores de corriente.

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

Para el presente estudio el rango de resistividades a considerarse se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Rango de resistividades en suelos.

<b>Rango de resistividades</b>	<b>ohm.m</b>	<b>Tipo de suelo</b>	
Material muy alto resistivo	> 1500	Más competente	
Material alto resistivo	500 a 1500		
Material resistivo o resistividad moderada	100 a 500		
Material bajo resistivo	20 a 100		
Material muy bajo resistivo	< 20	Blandos / saturados	

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

## 2. ADQUISICIÓN DE DATOS

En este estudio se ha realizado la aplicación de métodos sísmicos y geofísicos. Como la técnica de razones espectrales (H/V) que utiliza registros de vibración ambiental, arreglos sísmicos lineales (MASW), métodos eléctricos (ERT), para conocer la distribución de velocidades de ondas y la resistividad del suelo. A continuación se describe brevemente la toma de datos.

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



*Figura 5: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales en San Pedro de Coayllo: sensor Lennartz (2N) y registrador CityShark II.*

En San Pedro de Coayllo se consideró registros de vibración ambiental obtenidos de manera puntual en 56 puntos, distribuidos según la Figura 6. La distribución de los puntos donde se registran vibraciones ambientales, fue realizada sobre el mapa catastral y teniendo en cuenta la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio. En cada punto, se registró datos por un periodo de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de datos para su posterior análisis.

En la Figura 7, se muestra la disposición del equipo sísmico al momento del registro de información, además de ejemplos de señales de vibración ambiental. La señal registrada en el punto CY-37A presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en CY-24, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud, que al momento de su análisis fueron filtrados, a fin de no alterar los resultados.

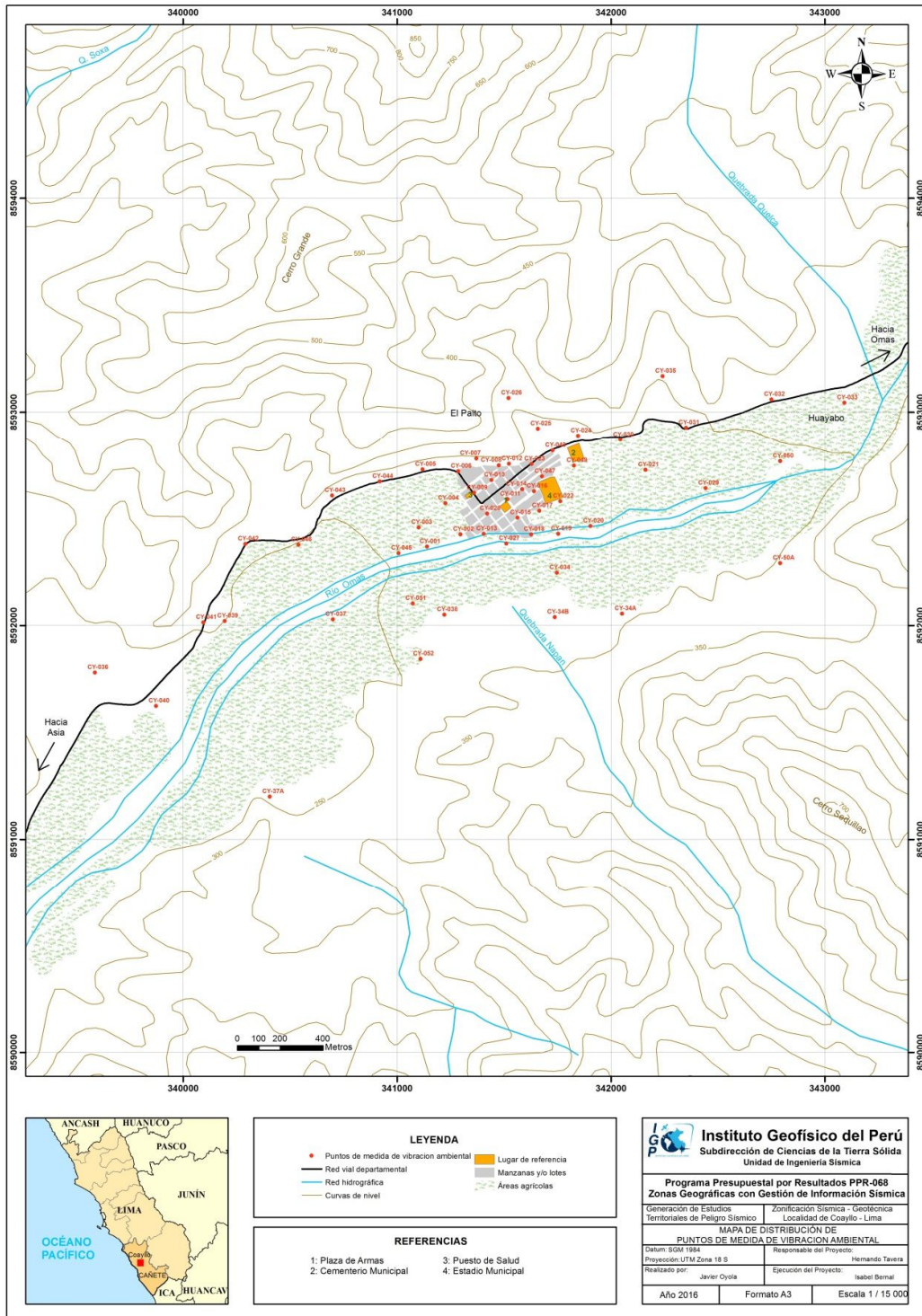


Figura 6: Mapa catastral del área urbana de San Pedro de Coayllo y la distribución de puntos de registros de vibración ambiental.

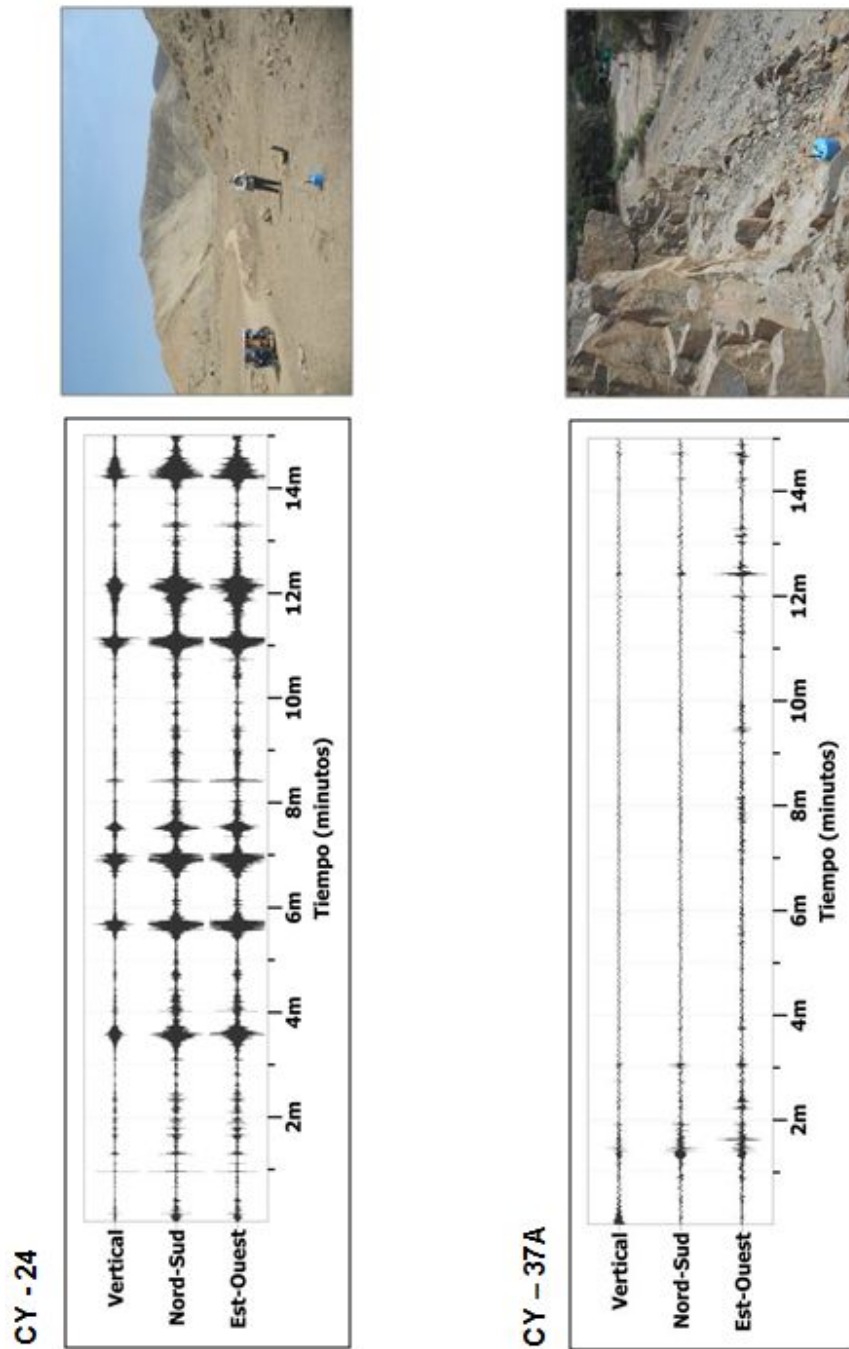


Figura 7: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales y registros de vibración ambiental, obtenidos sobre un punto con ruido transitorio (CY-24) y otro con ruido de fondo constante (CY-37A).

En San Pedro de Coayllo se realizaron 7 arreglos sísmicos y en la Figura 8, se presenta el mapa con la distribución espacial de las líneas sísmicas codificadas como: LS01-CY, ..., LS07-CY; mientras que en Tabla 3 las coordenadas de cada línea.

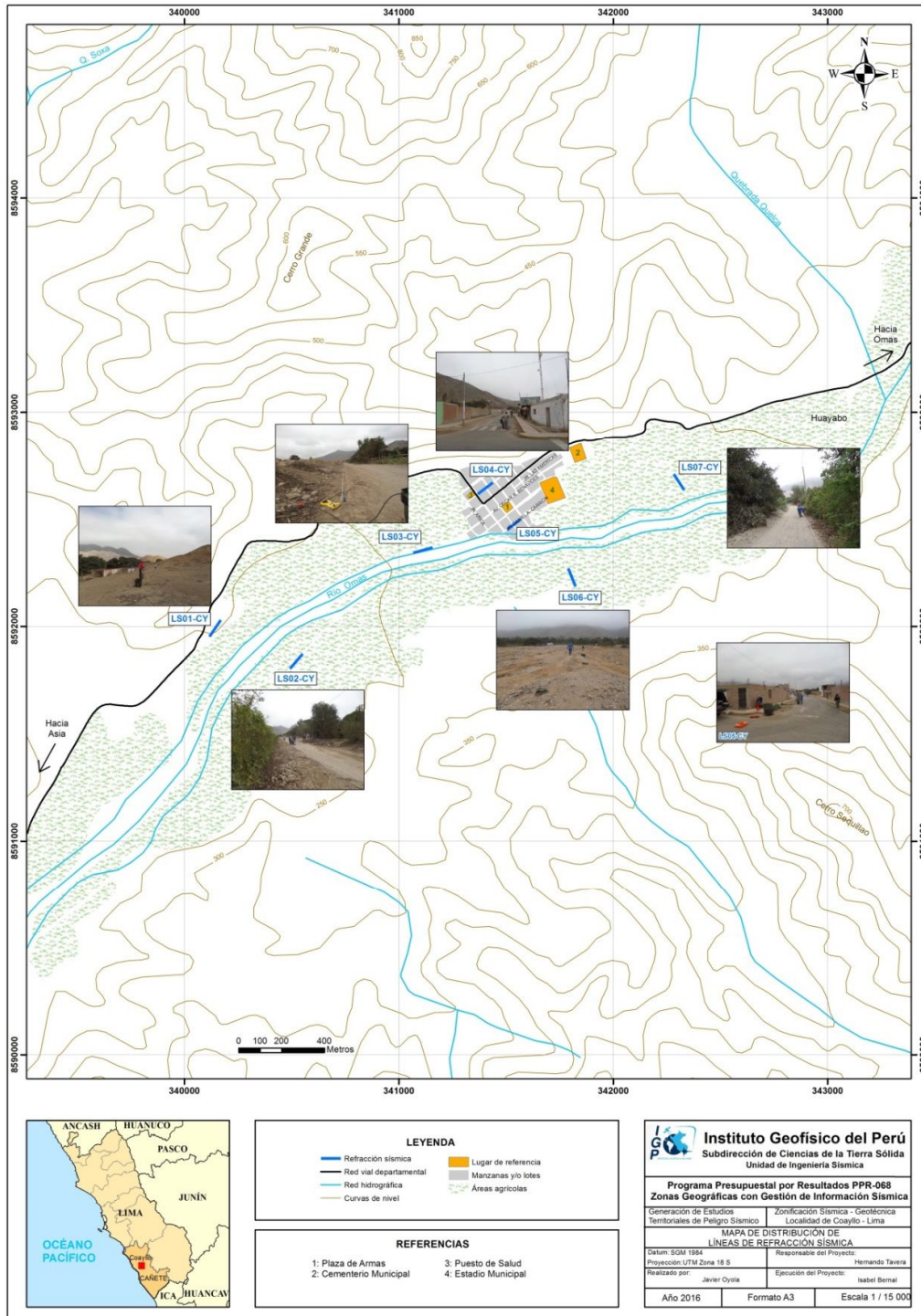


Figura 8: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las líneas sísmicas codificadas como: LS01-CY, ..., LS07-CY.

**Tabla 3:** Coordenadas y características de las Líneas Sísmicas.

Línea Sísmica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)
LS01-CY	340169	8592029	276	4	92
	340117	8591952	275		
LS02-CY	340552	8591872	268	4	92
	340492	8591803	266		
LS03-CY	341157	8592366	289	4	92
	341067	8592342	287		
LS04-CY	341368	8592615	295	4	88
	341439	8592669	296		
LS05-CY	341505	8592450	294	3.5	80.5
	341568	8592499	296		
LS06-CY	341824	8592186	313	4	92
	341790	8592270	307		
LS07-CY	342282	8592708	318	4	92
	342331	8592633	318		

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

La profundidad máxima de investigación depende de la geometría del tendido, espaciamento entre geófonos y la fuente activa, pudiendo variar entre los 10-30 m, según las características litológicas de los suelos y el espacio para realizar los arreglos considerando que se trabaja en zonas urbanas. Asimismo, para evaluar la calidad de los datos registrados y el nivel de ruido (Figura 10), se verifica la relación señal/ruido mediante un apilamiento de señales (en cada punto de disparo se registran varios golpes y es acumulado al anterior), considerando los registros obtenidos con cuatro a cinco golpes en cada punto “shot”, así como el procesamiento preliminar de los datos.



Figura 9: Equipo sísmico para la toma de datos de MASW realizado en el Jirón Daniel A. Carrión.

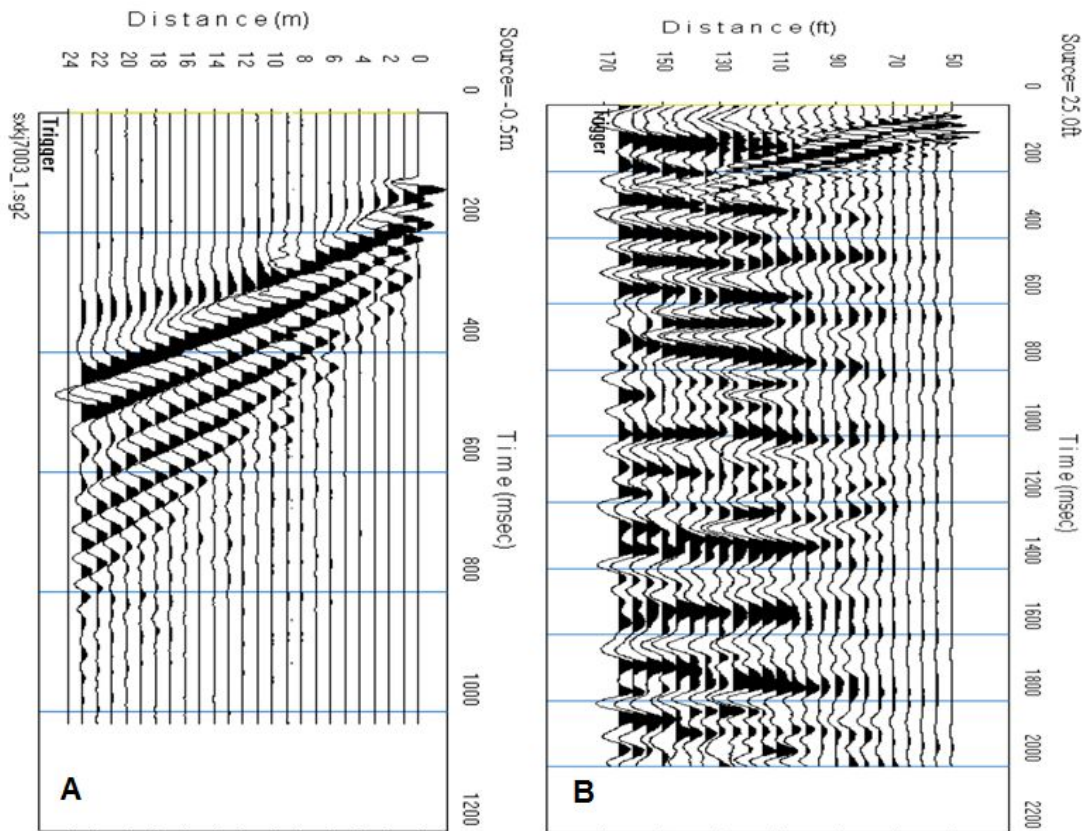


Figura 10: a) Registro sísmico con bajo contenido de ruido ambiental y b) Registro sísmico con alto contenido de ruido ambiental.

En la Figura 11, como ejemplo se muestra la disposición del equipo y el registro sísmico obtenido para la línea sísmica LS06-CY, ubicado en Fundo Francia. El sismograma contiene las señales sísmicas con presencia de ruido ambiental bajo.

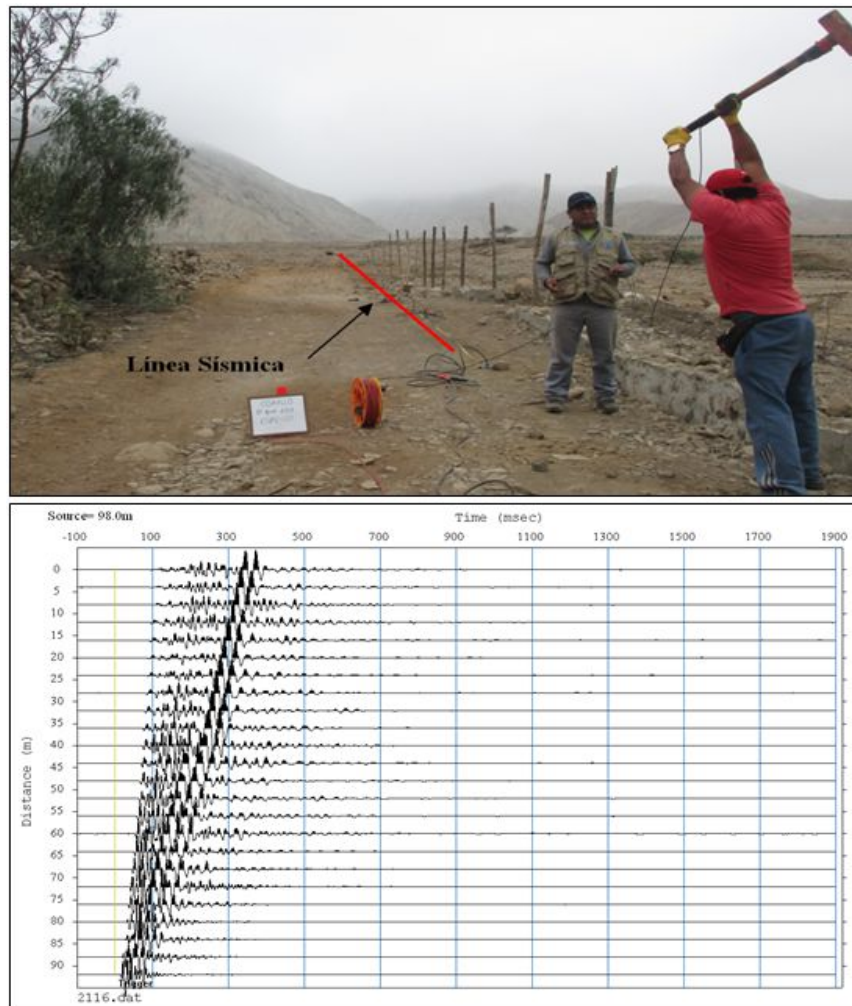


Figura 11: Disposición del equipo de adquisición por el método de MASW y el registro sísmico obtenido.

-Tomografía eléctrica: se realizaron 5 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y la distribución de 30 electrodos (Figura 12). Para las líneas se consideró un espaciamiento que variaba entre 10 y 6 metros para cada electrodo sobre un tendido longitudinal que variaba entre 290 y 180 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de los 39 y 29 metros.

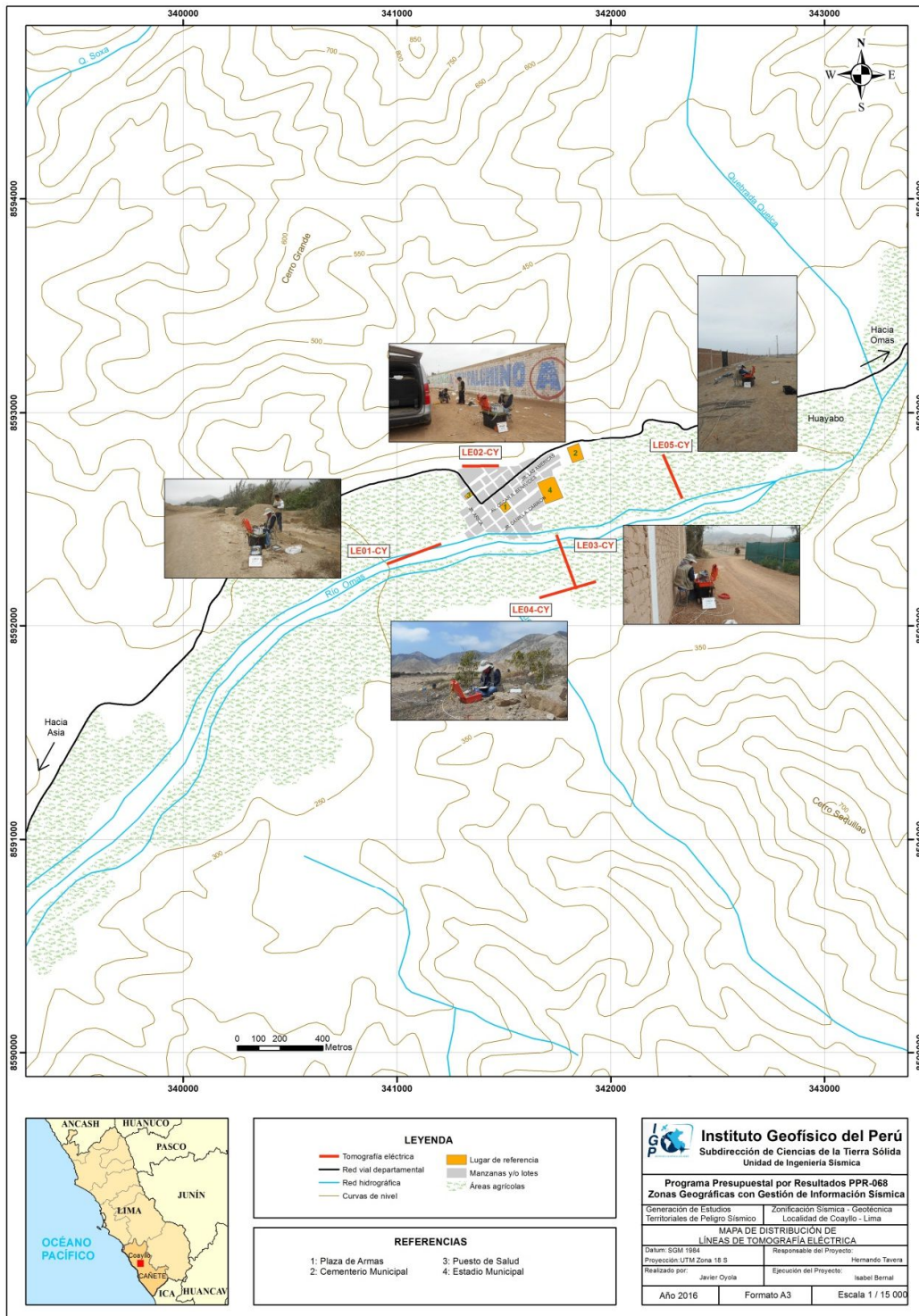


Figura 12: Mapa del área urbana de San Pedro de Coayllo y la distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica codificadas como: LE01-CY, ..., LE05-CY.

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

Tabla 4: Coordenadas de las Líneas eléctricas (LE) realizadas en el área de estudio.

Línea Eléctrica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Longitud total (m)
LE01-CY	341219	8592386	288	10	290
	340954	8592290	282		
LE02-CY	341483	8592749	295	6	180
	341304	8592747	301		
LE03- CY	341742	8592432	298	10	290
	341839	8592171	308		
LE04- CY	341938	8592208	311	10	290
	341666	8592130	311		
LE05- CY	342244	8592806	313	10	240
	342334	8592595	313		

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

- ✓ 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  $\Omega$ m.

Para el procesamiento de la información recolectada se ha hecho uso de los algoritmos de inversión DCIP2D y OASIS MONTAJ. En la Figura 13, se muestra la disposición de equipo eléctrico en campo y un ejemplo de la distribución de valores de resistividad en profundidad.

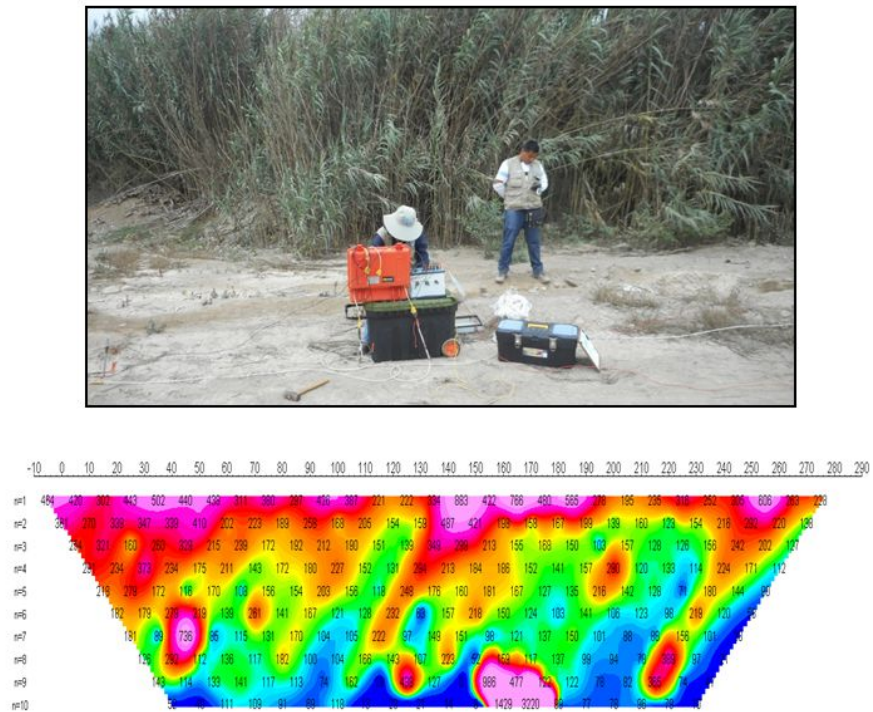


Figura 13: Disposición del equipo de adquisición por la técnica de ERT (LE01-CY) y el registro eléctrico obtenido en campo.

### 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

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

#### 3.1. Estudio Sísmico con la técnica de H/V

Esta información permite obtener espectros de Fourier para las tres componentes de registro de vibración ambiental de 56 puntos. La relación espectral de las componentes horizontales con la vertical permite conocer las frecuencias y/o periodos dominantes de vibración natural del suelo y en algunos casos, la amplificación sísmica relativa para cada punto.

**.- Frecuencias predominantes F<sub>0</sub>:** En la Figura 14, se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de F<sub>0</sub>, con valores entre 1.2 y 2.9 Hz. Los valores más altos se concentran hacia el extremo Oeste y Sur de la Plaza de Armas, mientras que las mayores amplificaciones se presentan en los puntos ubicados próximos al río Omas. Los valores menores a 2 Hz tienden a ubicarse hacia los extremos NE y NO del área de estudio y hacia el extremo NO de la Plaza de Armas, no se identifica frecuencias predominantes.

En la Figura 15, se muestra ejemplos de razones espectrales para los puntos CY-01 (A), CY-19 (B) y CY-27 (E), ubicados próximos al río Omas, con el predominio de frecuencias a 2.4, 2.5 y 3.0Hz; y amplificaciones máximas de hasta 6 veces. En los ejemplos de razones espectrales para los puntos CY-24 (C), CY-25 (D) y CY-47 (F), ubicados los dos primeros puntos en la zona arqueológica, al norte del Cementerio Municipal y el tercero al norte del Estadio Municipal “Héctor”, sobresalen dos picos de frecuencias, el primero fluctúa entre 1.2 y 1.6 Hz; y el segundo entre 4.5 y 6.0Hz, con amplificaciones de hasta 5 veces. Estos valores evidencian que los suelos son muy complejos debido a su menor consistencia.

En general, son pocos los puntos donde predominan sólo F<sub>0</sub>, ya que en la mayoría de puntos sobresalen dos picos.

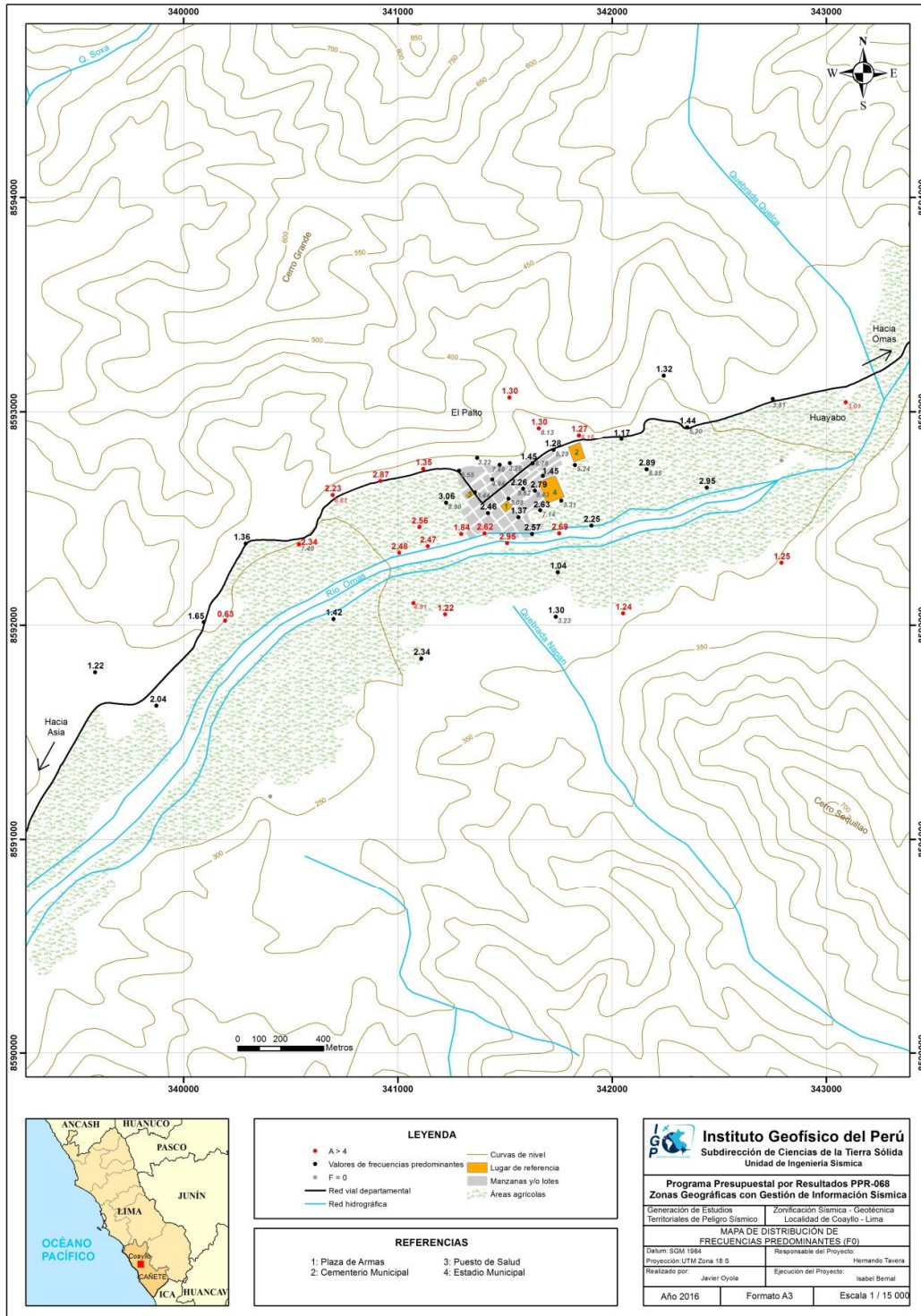
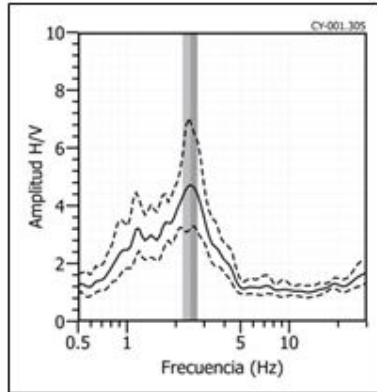
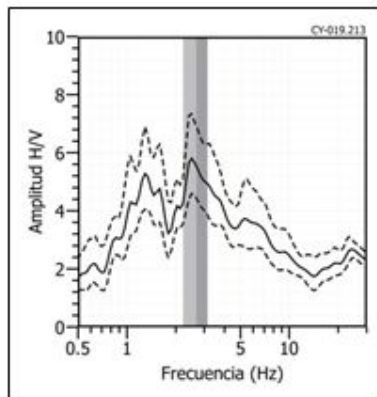


Figura 14: Mapa del área de estudio con la distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_0$  ( $F < 3.0\text{Hz}$ ). Las letras indican la ubicación de los gráficos considerados como los más representativos y son mostrados en la Figura 15.

**CY - 01**



**CY - 19**



**CY - 27**

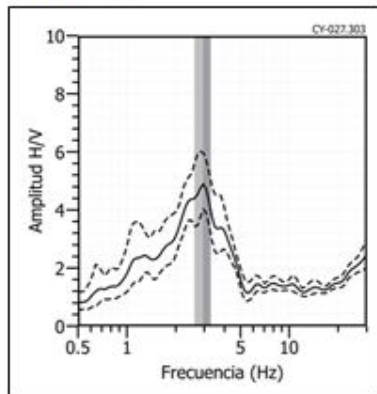
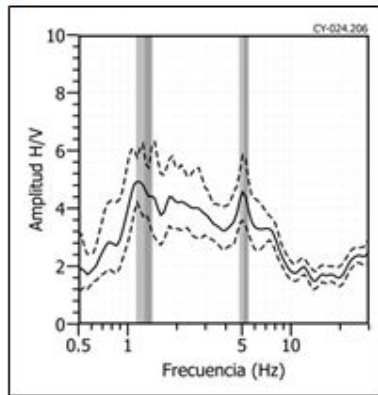
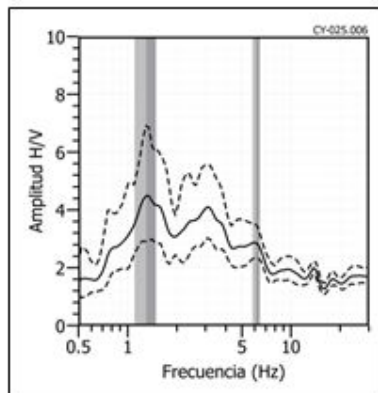


Figura 15: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F < 3.0\text{Hz}$ ): Puntos CY-01 (A), CY-19 (B) y CY-27 (E), ubicados próximos al río Omas. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**CY - 24**



**CY - 25**



**CY - 47**

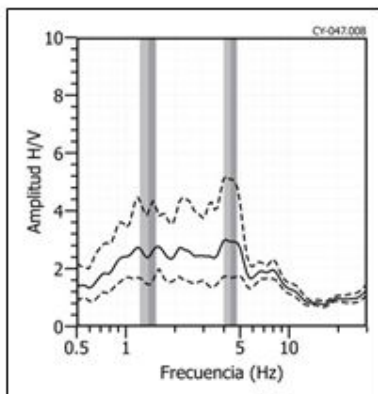


Figura 15: ... Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F < 3.0\text{Hz}$ ): Puntos CY-24 (C), CY-25 (D) y CY-47 (F), los dos primeros ubicados en la zona arqueológica, al norte del Cementerio Municipal y el tercero al norte del Estadio Municipal "Héctor". Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**.- Frecuencias predominantes F1:** En la Figura 16, se muestra la distribución espacial de las frecuencias predominantes F1 ( $F \geq 3.0 \text{ Hz}$ ), con el predominio de frecuencias entre 3.0 y 9.0 Hz. F1 se distribuye principalmente en el extremo Norte y Este de la Plaza de Armas, con valores mayores hacia las cotas mayores (más de los 270 m.s.n.m.). Los valores para frecuencias entre 3.0 y 5.0 Hz se concentran próximos a la carretera que cruza el área de estudio. Asimismo, conforme se tiende hacia el río Omas, este rango de frecuencias no es predominante.

En la Figura 17, se muestra ejemplos de razones espectrales característicos para los puntos CY-06 (A), CY-10 (B) y CY-49 (K), ubicados los dos primeros al NO de la zona céntrica del área urbana y el tercero, próximo al Cementerio Municipal, sobresale un pico de frecuencia que fluctúan entre 5.0 y 7.0 Hz con amplificaciones de hasta 4 veces. A diferencia de lo observado, en los puntos CY-11 (C), CY-15 (D) y CY-28 (E), ubicados próximos a la Plaza de Armas, sobresalen dos picos o una banda de frecuencias que fluctúan entre 2.8-3.6 Hz, 1.5-3.1 Hz y para el tercero, dos picos a 1.6 y 11 Hz con amplificaciones de hasta 2.5 veces.

En los puntos CY-43 (H), CY-47 (I) y CY-48 (J), ubicados en el extremo Norte del área de estudio sobre la cota 285 m.s.n.m., sobresalen dos picos de frecuencia que fluctúan entre 1.5-2.2 Hz y 4.5-7.0 Hz con amplificaciones de hasta 7 veces CY-43 y de 4 veces en los dos siguientes. Los puntos CY-29 (F), CY-31 (G) y CY-50 (L), ubicados en el extremo Este del área de estudio, muestran similar forma pero presentan mínimas amplificaciones. La presencia de dos picos de frecuencias evidencia la mayor complejidad en la respuesta de los suelos a pesar de presentar baja amplificación.

### **Interpretación**

La distribución espacial de los valores de frecuencias predominantes en el área urbana de San Pedro de Coayllo, permite definir la presencia de rangos de frecuencias: F0 ( $F < 3.0 \text{ Hz}$ ) y F1 ( $F \geq 3.0 \text{ Hz}$ ). Se ha obtenido que en varios puntos de medición sobresalen dos picos de frecuencias con bajas amplificaciones en la zona céntrica y extremo Norte del área urbana, los que sugieren la presencia de suelos más compactos en comparación con las zonas donde se tienen mayores amplificaciones que delimitan los suelos más flexibles ubicados principalmente hacia los Fundos Soxa y Cuculí, así como al Sur de la Plaza de Armas próximo al río Omas.

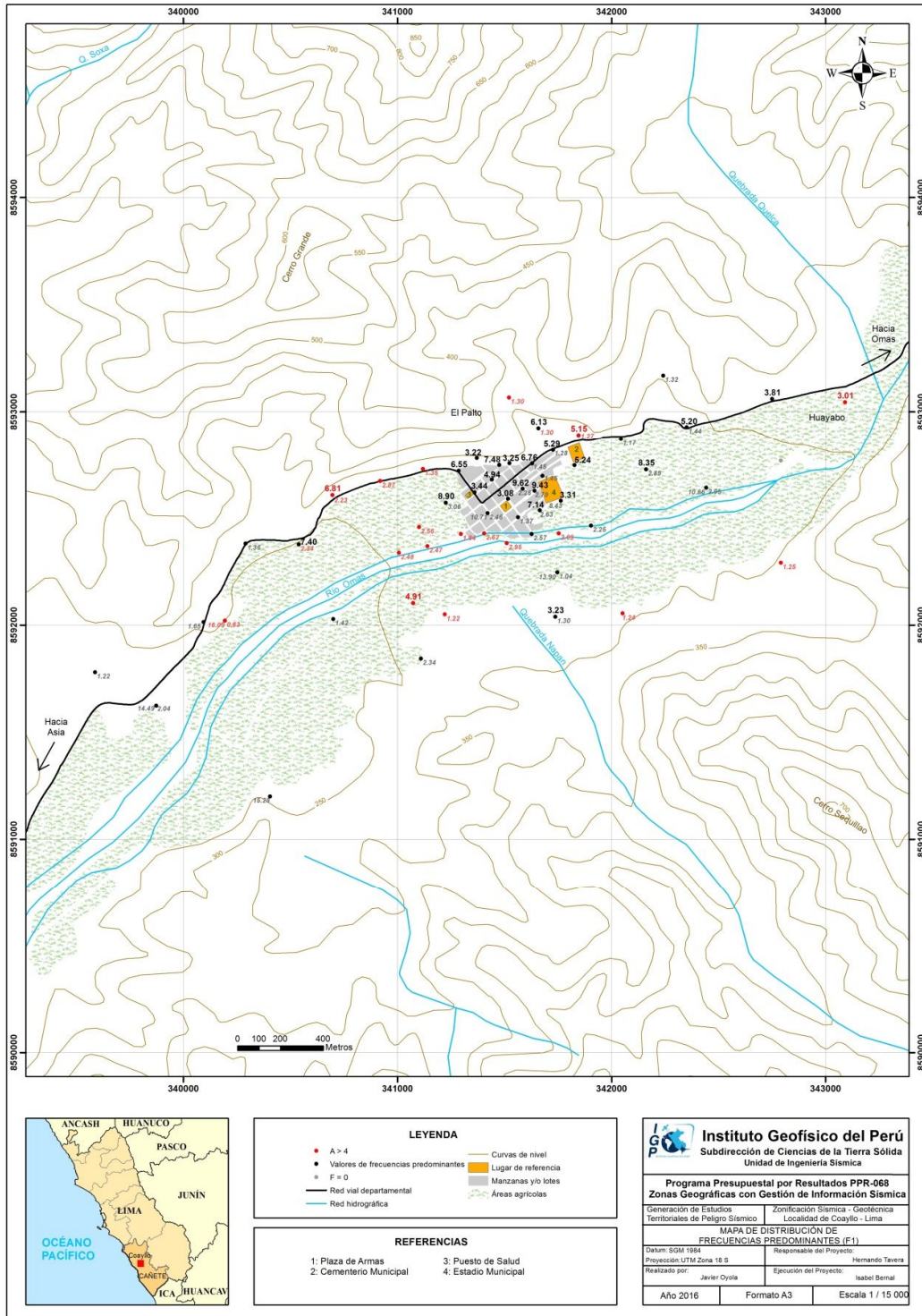
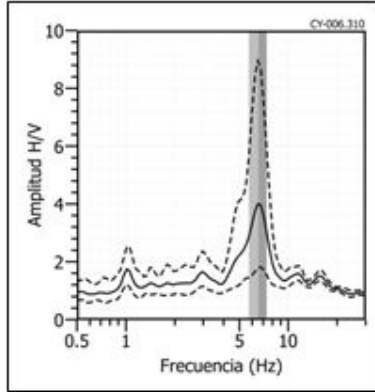
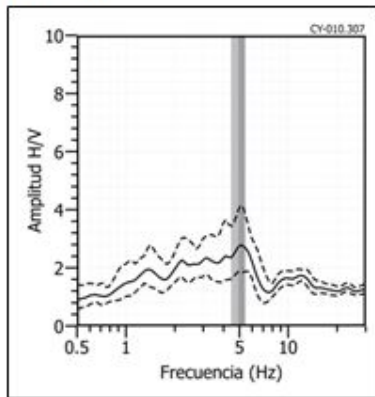


Figura 16: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_1$  ( $F \geq 3.0\text{Hz}$ ). Las letras indican la ubicación de los gráficos que se están considerando en la Figura 24 como característicos de este rango.

**CY - 06**



**CY - 10**



**CY - 49**

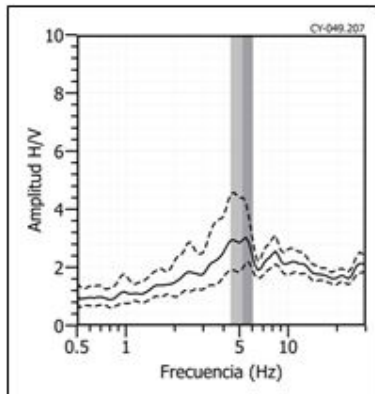
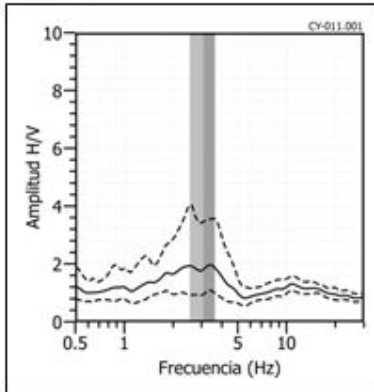
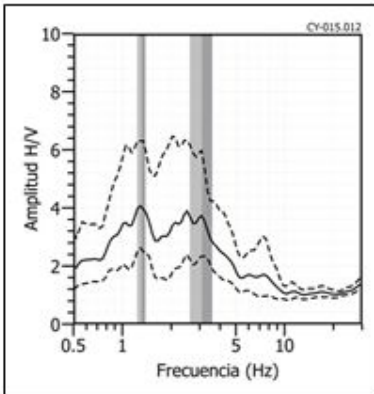


Figura 17: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F \geq 3.0\text{Hz}$ ). Puntos CY-06 (A), CY-10 (B) y CY-49 (K), ubicados en el extremo NO de la zona céntrica del área urbana y el tercero, próximo al Cementerio Municipal. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**CY - 11**



**CY - 15**



**CY - 28**

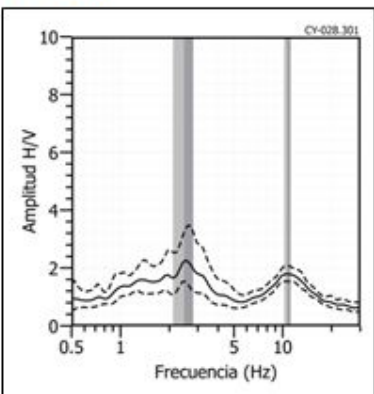
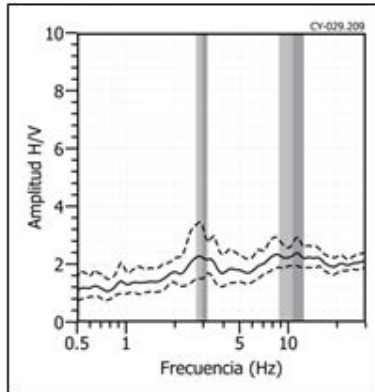
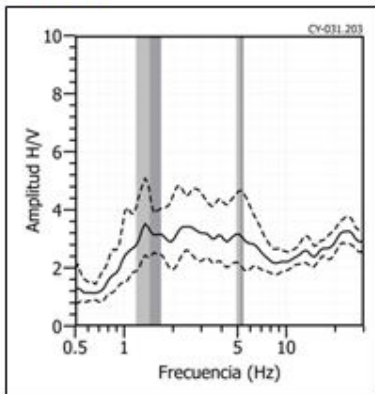


Figura 17: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F \geq 3.0\text{Hz}$ ). Puntos CY-11 (C), CY-15 (D) y CY-28 (E), ubicados próximos a la Plaza de Armas. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**CY - 29**



**CY - 31**



**CY - 50**

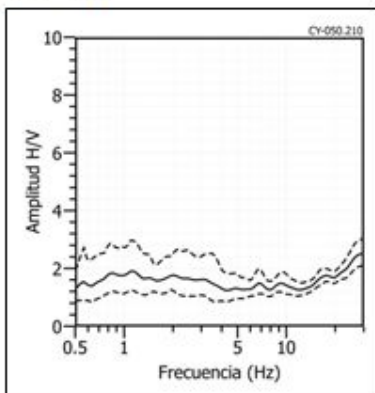
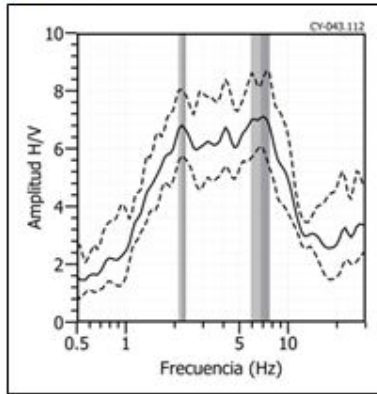
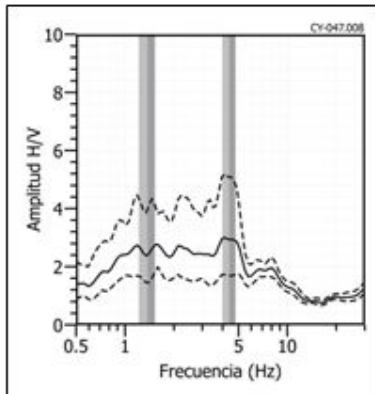


Figura 17: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F \geq 3.0\text{Hz}$ ). Puntos CY-29 (F), CY-31 (G) y CY-50 (L), ubicados en el extremo Este del área de estudio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**CY - 43**



**CY - 47**



**CY - 48**

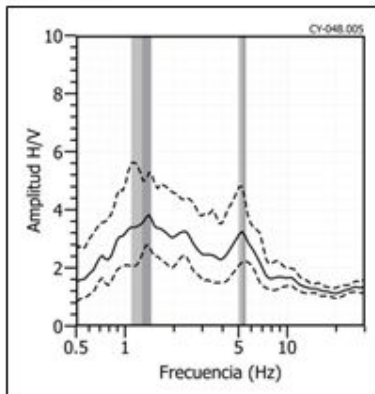


Figura 17: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F \geq 3.0$ Hz). Puntos CY-43 (H), CY-47 (I) y CY-48 (J), ubicados en el extremo Norte del área sobre la cota de 285 m.s.n.m. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

Para  $F_0$ , predomina valores entre 1.2 y 2.9 Hz, concentrándose más altos hacia el extremo Sur y Oeste de la Plaza de Armas y con amplificaciones de hasta 5 veces en los puntos ubicados próximos al río Omas. Para  $F_1$  predominan frecuencias de entre 3.0 y 9.0 Hz, distribuyéndose principalmente en el extremo Norte y Este de la Plaza de Armas y valores mayores hacia las cotas mayores (más de los 270m.s.n.m.). Los valores entre 3.0 y 5.0 Hz se concentran próximos a la carretera que cruza el área de estudio. Asimismo, conforme se tiende hacia el río Omas este rango no está presente.

### 3.2. Estudio Sísmico con la Técnica de MASW

Los modelos de velocidad de propagación de ondas ( $V_s$ ) proporcionan información muy útil para reconocimiento de la estructura y naturaleza del subsuelo. En general, el procesamiento de datos permitió llegar desde profundidades mínimas que varían de 2 a 3 metros hasta los 30 metros para cada línea sísmica. A continuación, se describe los resultados obtenidos agrupados según la velocidad  $V_s$  en el perfil sísmico y ubicación (Figura 8):

**Línea sísmica LS01-CY:** Realizado en el Fundo Soxa indica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 5 metros de espesor y velocidad  $V_s$  de 294 m/s que sugieren la presencia de suelos medianamente rígidos. La segunda, con velocidad de 552 m/s y 13 metros de espesor es considerado como suelo muy rígido. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 1058$  m/s.

**Líneas sísmicas LS02-CY y LS04-CY:** Realizadas en el Fundo Corralón y en el Jr. Argentina, indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 4 metros de espesor y velocidades  $V_s$  de 281 a 327 m/s que sugieren la presencia de suelos medianamente rígidos. La segunda capa, con velocidades entre 401 a 448 m/s y espesor de 9 metros es considerado como suelo rígido. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 532$  m/s.

**Líneas sísmicas LS03-CY, LS05-CY y LS06-CY:** Realizadas cerca del río Omas, altura del fundo Cuculí (LS03), en el jirón Daniel Alcides Carrión (LS05) y en la entrada del fundo Francia (LS06), ver Figura 8. Indican la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 9 a 15 metros de espesor y velocidades  $V_s$  entre 355 a 406 m/s, lo que sugieren la presencia de suelos rígidos. La segunda capa presente solo en la línea LS05, presenta velocidades  $V_s$  de 505 m/s y espesor de 14 metros correspondiente a

suelos muy rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio, presenta velocidades  $V_s > 510$  m/s indicando la presencia de suelos muy rígidos.






**Línea sísmica LS07-CY:** Realizado en el pasaje denominado Camino Real (Figura 8). Indica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera con velocidades  $V_s$  de 170 m/s y 4 metros de espesor que sugiere la presencia de suelos blandos. La segunda, con velocidades  $V_s$  de 324 m/s y espesor de 9 metros corresponde a suelos rígidos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 526$  m/s que sugiere suelo muy rígido.

En la Tabla 5, se resume los valores de velocidades de ondas de corte  $V_s$  para los distintos tipos de perfiles de suelo. En la Figura 18 se presenta los resultados para la línea sísmica LS01 y para las líneas LS02 a LS07, ver Anexos.

Tabla 5: Valores de espesor y  $V_s$  para las líneas sísmicas realizados en San Pedro de Coayllo.

Superficie		Profundidad					
Línea Sísmica	N° DE CAPA						VS30 (m/s)
	1		2		Semiespacio		
	$V_s$ (m/s)	Esp. (m)	$V_s$ (m/s)	Esp. (m)	$V_s$ (m/s)	Esp. (m)	
LS01-CY	294	5	552	13	1058	-	553
LS02-CY	327	4	448	9	602	-	484
LS03-CY	394	15	540	-	-	-	439
LS04-CY	281	4	401	9	532	-	435
LS05-CY	406	9	505	14	706	-	491
LS06-CY	355	9	510	-	-	-	450
LS07-CY	170	4	324	9	526	-	360

	Suelo blando ( $V_s < 180$ m/s)
	Suelo medianamente rígido (180 – 350 m/s)
	Suelo rígido (350 – 500 m/s)
	Suelo muy rígido (500 – 800 m/s)
	Roca moderadamente duro (800 – 1500 m/s)

### Interpretación

Finalmente, los resultados obtenidos definen la presencia de 2 capas sísmicas y su correlación con la geología permite considerar que en los fundos Soxa y Corralón (Figura 8) existen suelos moderadamente rígidos ( $V_s$  294 a 327 m/s) con una primera capa de 4 a 5 metros de espesor que suprayace a otra compuesta por suelos rígidos a muy rígidos ( $V_s$  448 a 602 m/s). A niveles más profundos y conforme se avanza a la ladera del cerro (fundo Soxa) aparecen rocas moderadamente duras ( $V_s$  552 a 1058 m/s), ver Figura 19a. A diferencia de la zona central (área urbana, fundo Cuculi y Francia), donde predominan suelos rígidos para la primera capa ( $V_s$  355 a 406 m/s) de 9 a 15 metros de espesor

correspondiente a suelos muy rígidos en profundidad ( $V_s$  505 a 706 m/s). En el sector próximo al centro de Salud, aparecen suelos moderadamente rígidos ( $V_s$  281 m/s) que suprayacen a suelos rígidos a muy rígidos en profundidad ( $V_s$  401 a 532 m/s).

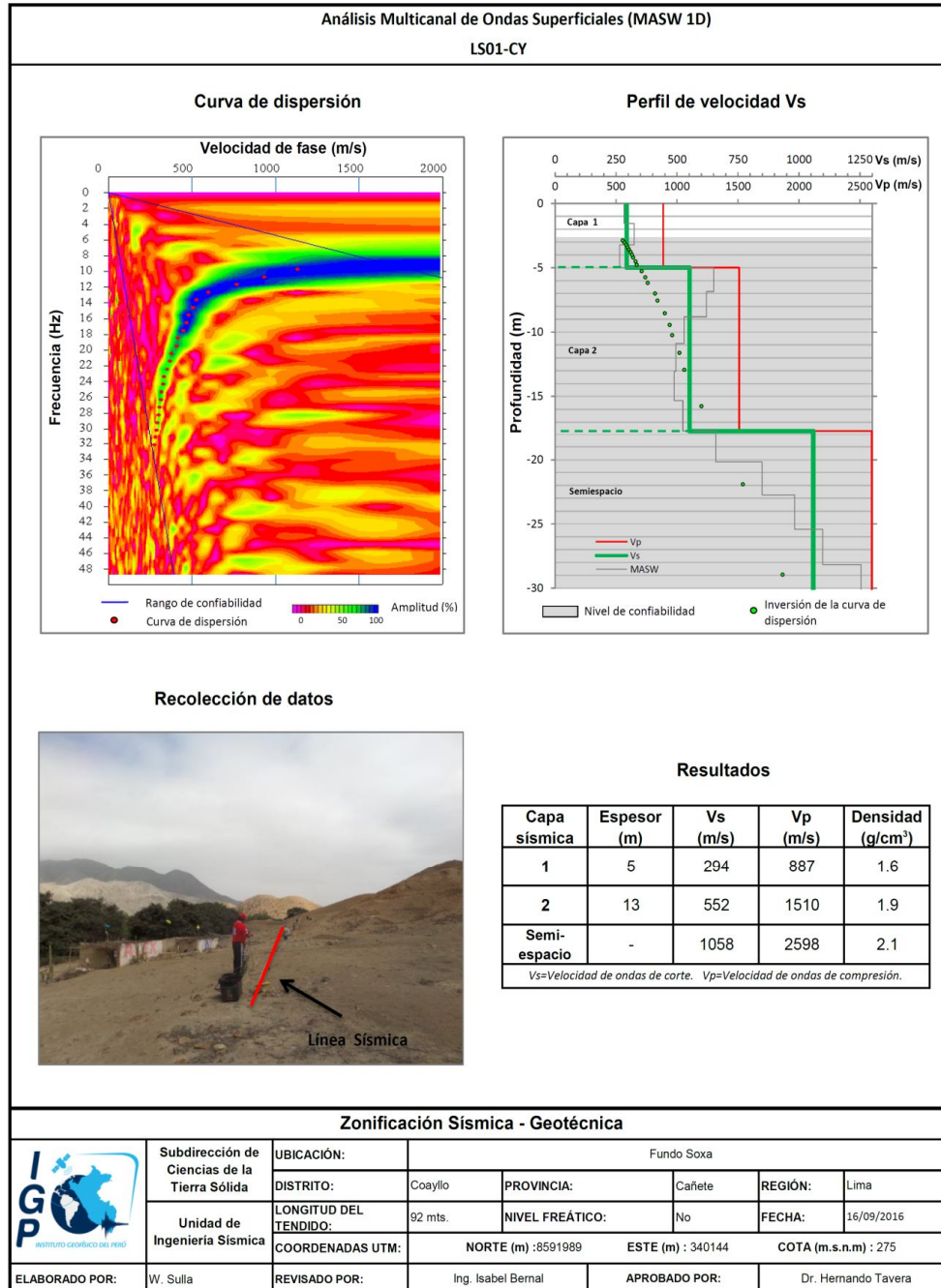


Figura 18: Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo LS01-CY.

Asimismo, en la zona este (Camino Real) se identifica la presencia de suelos blandos para la primera capa (Vs 170 m/s) de hasta 4 metros de espesor que suprayace a suelos rígidos a muy rígidos en profundidad (Vs 324 a 526 m/s); es decir, suelos superficiales menos consolidados debido a la existencia de áreas de cultivo, tal como se muestra en la Figura 19b.

Según la geológica, los perfiles de suelo corresponden a depósitos aluviales provenientes de las laderas de los cerros y a los materiales pluviales depositados en forma de terrazas, ambos depósitos constituyen espesores mayores de los 30 metros en la parte central paralelo al río Omas (Figura 8).



Figura 19: Ensayo sísmico realizado en Coayllo: a) capa superficial constituida por suelo moderadamente duro (LS01-CY) y b) suelo blando (LS07-CY).

### 3.3.- Periodos Dominantes

Para presentar los resultados finales obtenidos con la técnica de 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 20 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes para el área urbana de San Pedro de Coayllo, los cuales han sido separados en dos grupos, en color negro para periodos menores a 0.3 segundos y en negro los periodos mayores.

Los suelos de San Pedro de Coayllo responden a periodos de 0.1 a 0.3 segundos, principalmente hacia el extremo NO de la zona céntrica y hacia su extremo Este, además de este rango de periodos, los suelos muestran sensibilidad a 0.3 y 0.7 segundos, pero

con bajas amplificaciones. A diferencia de lo observado, hacia el extremo Oeste del área de estudio, sobre los Fundos Soxa y Cuculí, y al Sur de la Plaza de Armas, los suelos presentan sensibilidad a periodos mayores a los 0.4 segundos con amplificaciones mayores a las 4 veces y sobre la zona arqueológica, hasta 6 veces a periodos de 0.2 y 0.8 segundos.

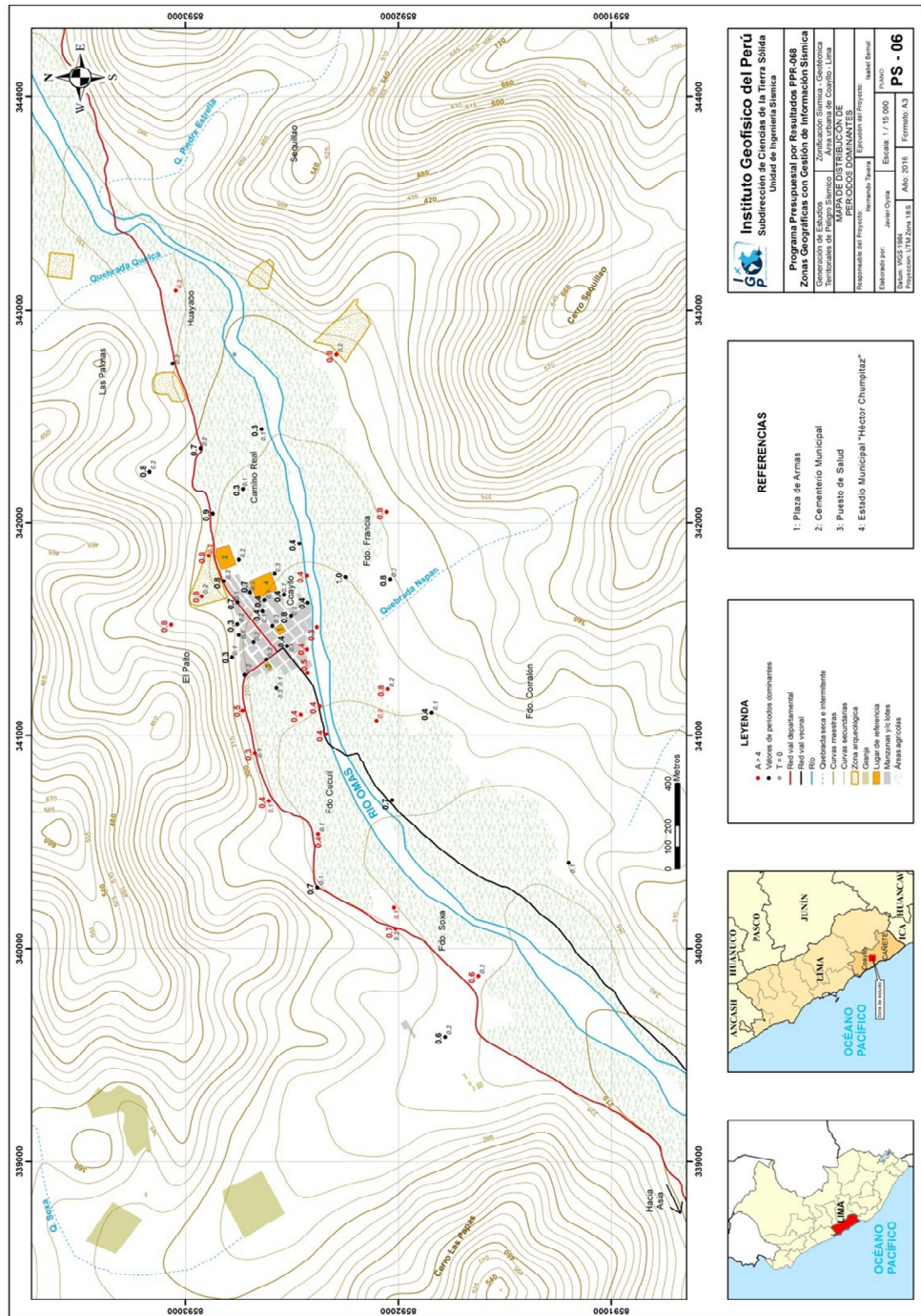


Figura 20: Mapa de la distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de Coayllo están relacionados con las condiciones físico-dinámicas a través de la relación  $T_0=4H/V_s$ , donde  $T_0$  es el periodo dominante,  $H$  el espesor del estrato y  $V_s$  es la velocidad de onda de corte. Asumiendo velocidades de 280 m/s y 500 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.1 y 0.4 segundos, se estima la existencia de una capa superficial con espesor del orden de 5 metros próximos a los cerros y de 50 metros, cerca del río Omas.

En el área urbana de Coayllo, la distribución espacial de los periodos mayores a 0.4 segundos sugiere la presencia, en el subsuelo, de una capa profunda de gran espesor y los periodos menores, una capa superficial de menor espesor, donde la primera influye moderadamente sobre la segunda. Por otro lado, si los valores de 0.4 y 0.8 segundos con altas amplificaciones se distribuyen principalmente al extremo Oeste del área urbana de Coayllo y sugieren que los suelos son más flexibles en comparación con el resto del área de estudio.

### **3.4. Estudios de Tomografía eléctrica (ERT)**

A continuación, se describe los resultados obtenidos de las líneas de tomografía eléctrica realizados en el área urbana de San Pedro de Coayllo:

**Líneas eléctricas LE01-CY, LE02-CY, LE03-CY y LE04-CY**, fueron realizadas sobre depósitos aluviales. Presentan dos horizontes geoeléctricos, el primero conformado, desde la superficie, por material medianamente resistivo que envuelve a materiales resistivos a muy resistivos; mientras que, el segundo está conformado por material conductivo. La línea LE01-CY (parte superior), fue realizada paralela al río Omas y la línea LE03-CY perpendicular al río. La línea LE02-CY se realizó en las faldas del cerro Grande (Figura 21).

**Línea eléctrica LE05-CY** realizada en el sector de Camino Real, presenta dos horizontes, el primero compuesto por material medianamente resistivo que envuelve materiales resistivos y el segundo horizonte, conductivo (Figura 22).

En San Pedro de Coayllo predominan materiales medianamente resistivos que van en la escala de baja a alta resistividad, excepto la línea que se encuentra al este de la Plaza de Armas, donde los valores van de bajos resistivos a resistivos. La presencia en la zona de roca se correlaciona con los valores resistivos a muy resistivos.



Figura 21: Parte superior línea LE01-CY, parte inferior línea LE02-CY.



Figura 22: Vista superficial de la línea LE05-CY.

## Interpretación

De acuerdo a los datos analizados, en la zona céntrica de Coayllo predominan en superficies de materiales medianamente resistivos, ver Tabla 6. Al Norte de la Plaza de Armas de Coayllo (LE02-CY, Figura 12), conforme se tiende hacia las faldas del cerro, no se observa la presencia de niveles freáticos, y en los sectores de los Fundos Cuculí, Francia y Camino Real (LE01-CY, LE03-CY, LE04-CY y LE05-CY) ubicadas próximas del río Omas y sobre terrenos de cultivo, el nivel freático está presente a partir de los 25 metros de profundidad. Geológicamente, Coayllo está asentado sobre depósitos aluviales, y cuyo acuífero está conformado principalmente por rellenos aluviales cuaternarios. Litológicamente, está conformado por gravas, arenas finas a gruesas, delimitadas en sus flancos derecho e izquierdo, por afloramientos rocosos con cobertura eólica. Finalmente, 25 metros de profundidad tenemos el nivel freático de la ciudad de San Pedro de Coayllo.

En la Figura 23 se presenta el resultado obtenido para la línea LE01-CY y en los anexos, el resultado para las otras líneas; asimismo en la Tabla 6, se ha clasificado los suelos de acuerdo a los rangos de resistividades indicados en la Tabla 4, desde materiales muy bajos resistivos hasta muy resistivos.

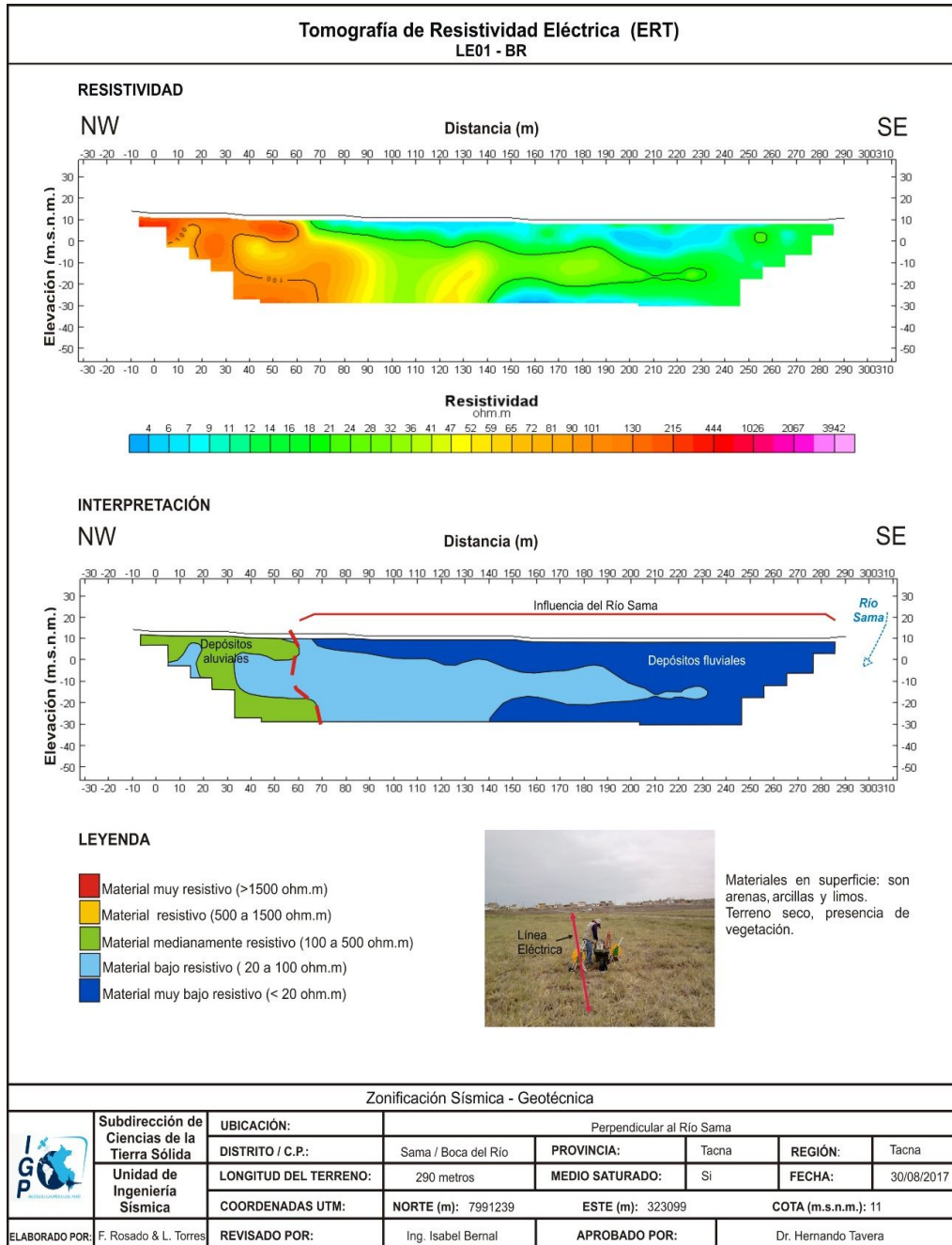


Figura 23: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE01-C

Tabla 6: Valores de resistividad obtenidos para el área de estudio.

Líneas Eléctricas	Orientación	Profundidad de alcance (m)	Horizonte geoelectrico	Resistividad ( $\Omega.m$ )	Nivel freático (m)
LE01-CY	EW	39	1	100 - 2620	25 m
			2	< 100	
LE02-CY	EW	18	1	100 - 500 500 - 2620	
			2	< 100	
LE03-CY	NS	39	1	100 - 500 500 - 2620	30 m
			2	< 100	
LE04-CY	EW	39	1	100 - 500 500 - 2620	25 m
			2	< 100	
LE05-CY	NS	39	1	100 - 500	30 m
			2	20 - 100	

## 4. ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA - GEOTÉCNICA

El mapa de microZonificación Geofísica se elabora en función de la integración de los resultados obtenidos con los estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos. Las características dinámicas del suelo y sus propiedades mecánicas, han permitido identificar en el área de estudio y de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente E.030, la existencia de suelos de Tipo S1, S2 y S4, que corresponden a suelos rígidos, medianamente rígidos y excepcionales respectivamente.

### 4.1. Mapa de Zonificación Geofísica

Para el área urbana de San Pedro de Coayllo se propone la siguiente Zonificación Geofísica – Geotécnica (Figura 24):

.- **ZONA I:** Conformada por estratos de grava coluvial que se encuentran a nivel superficial y cubiertos por depósitos de material fino (arenas finas) con espesores de 5 a 10 metros. Este suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos. Considerando velocidades de ondas de corte de 360 y 500 m/s, en Coayllo, hay dominio de suelos Tipo S1 según la Norma Sismorresistente Peruana. Dentro de esta zona, con líneas en rojo, se delimita áreas donde se presentan las máximas amplificaciones evidenciando que los suelos son menos consistentes.

**ZONA II:** En la zona se incluye las áreas de terrenos conformados por estratos superficiales de suelos granulares finos a gruesos con espesores que varían entre 10 y 50 m., subyaciendo a estos estratos se tiene grava. Estos suelos tienen un comportamiento medianamente rígido y con periodos de vibración natural que varían entre 0.3 y 0.5 segundos. Presentan velocidades de ondas de corte de 280 y 360 m/s, correspondiendo a suelos Tipo S2 según la Norma Sismorresistente Peruana, presentan capacidad de carga admisible de 1.0-2.0 Kg/cm<sup>2</sup>.

**ZONA III:** Esta zona corresponde a suelos Tipo S3, los cuales no fueron identificados en la zona de estudio.

**ZONA IV:** Zona constituida por áreas puntuales como es la zona arqueológica, donde se registran grandes amplificaciones debido a que esta conformada por depósitos de rellenos sueltos, suelos removidos y otros. Además, en esta zona se consideran al cauce del río Omas, donde se depositan principalmente materiales finos con diferente

grado de consolidación. Se considera, que en esta zona los suelos presentan comportamiento dinámico incierto, por lo que requieren realizar estudios específicos.

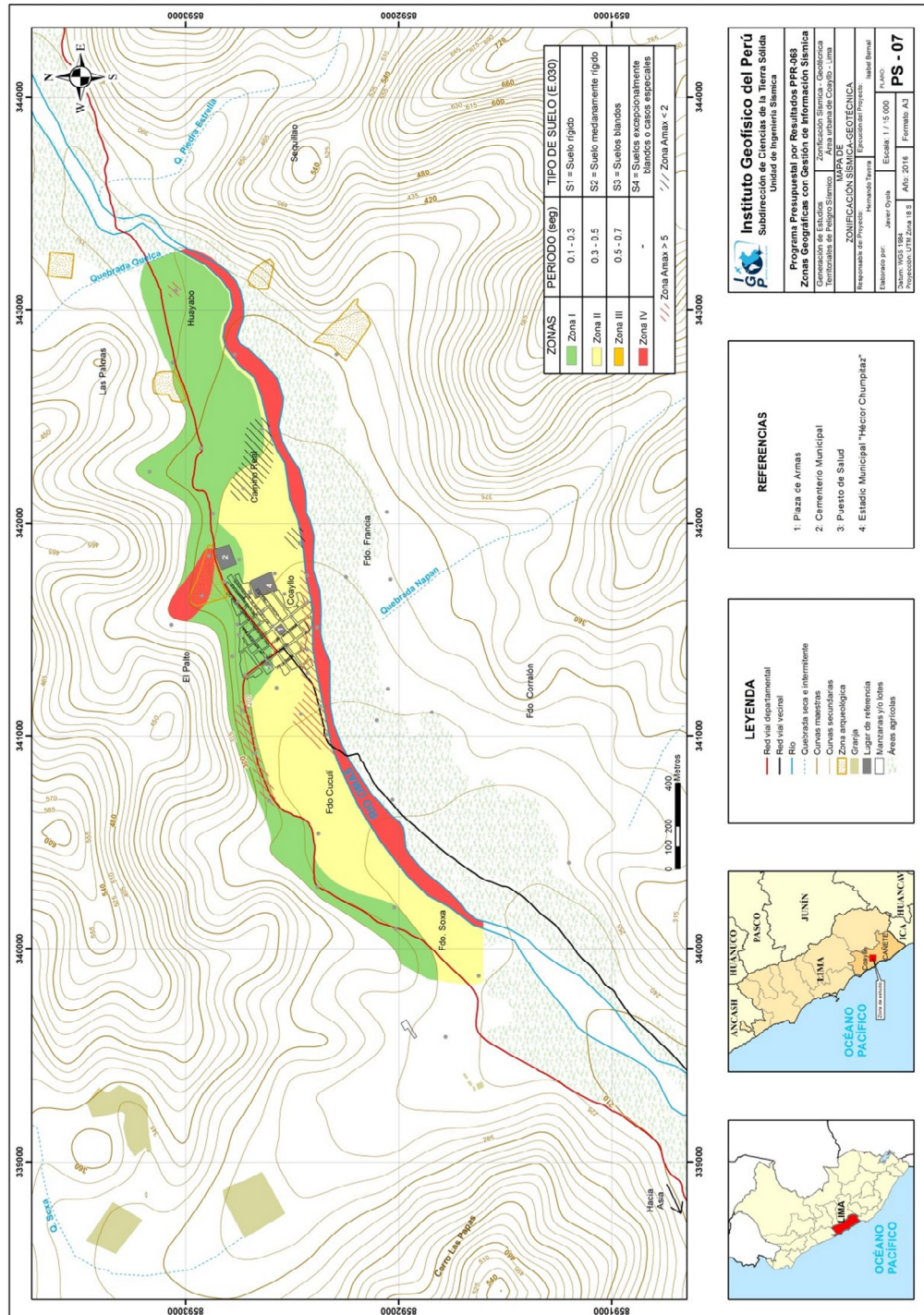


Figura 24: Mapa de Zonificación Geofísica para el área urbana de San Pedro de Coayllo.

## CONCLUSIONES

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

- Se delimitaron 5 unidades geomorfológicas: Montaña (69.90%), terraza fluvial (9.80), lecho fluvial (5.60%), terraza coluvio-aluvial (6.60%) y lomas (8.10%). El casco urbano de San Pedro de Coayllo se asienta sobre terraza fluvial. Los materiales que conforman el subsuelo del área de estudio corresponden a depósitos fluviales (gravas, arenas y arcillas) con espesores de entre 24 a 60 m. El substrato rocoso lo constituyen rocas tipo lutitas gris intercaladas con areniscas del Grupo Yura. También, existe un conjunto de intrusiones pertenecientes a las Super unidades de Patap, Linga, Incahuasi y Tiabaya.
- Se han identificado tres tipos de eventos geodinámicos: caída de rocas, flujo de detritos y/o de lodos e inundaciones. La primera, se evidencia en los sectores de San Juan de Quisque, Zoxa, Sequilao y Uqira. La segunda, en caso de reactivarse afectarían las zonas de San Juan de Quisque, Zoxa, Corralón, Las Palmas y La Yesera. Finalmente, ante la ocurrencia de precipitaciones, se incrementa el caudal del río Omas ocasionando desbordes e inundaciones, afectando áreas agrícolas y parte del casco urbano.
- Ante la ocurrencia de un evento hidrometeorológico extremo con periodos de retorno de 2 (91.8 m<sup>3</sup>/s) y 4 (183.6 m<sup>3</sup>/s) años; el río Omas llegaría a inundar 6 y 27 hectáreas inundadas con alturas de 2.5 y 3 metros.
- Se han identificado siete tipos de suelos: Arenas bien graduadas con limos (SW-SM) identificadas en el anexo Uqira, arenas mal graduadas (SP), arenas bien graduadas (SW), gravas mal graduadas limosas (GP-GM), gravas mal graduadas (GP), arenas limosas (SM) y limos inorgánicos (ML).
- El 50% de los suelos presentan capacidad de carga admisible alta (>3.0 kg/cm<sup>2</sup>): Anexos San Juan de Quisque, Uqira y parte del casco urbano de la ciudad. Carga admisible media (2.0 – 3.00 kg/cm<sup>2</sup>): parte noreste, sureste y suroeste de la plaza principal de Coayllo. Capacidad de carga admisible baja (1.0 – 2.00 kg/cm<sup>2</sup>): parte del casco urbano de San Pedro de Coayllo.

- A nivel superficial, no se ha evidenciado presencia de niveles freáticos.
- Los suelos son parte de 2 capas sísmicas y un semiespacio. Hacia el fundo Soxa y fundo Corralón (extremo SO) se identifica suelos moderadamente rígidos con Vs 294 a 327 m/s y con 4 a 5 metros de espesor que se asientan sobre suelos rígidos a muy rígidos con Vs 448 a 602 m/s. A diferencia de la zona central, en el área urbana, fundo Cuculi y Francia se tiene el predominio de suelos rígidos para la primera capa (Vs 355 a 406 m/s) de 9 a 15 metros de espesor a suelos muy rígidos en profundidad (Vs 505 a 706 m/s). En la zona Camino Real existen suelos blandos para la primera capa (Vs 170 m/s) de hasta 4 metros de espesor que suprayace a suelos rígidos a muy rígidos en profundidad (Vs 324 a 526 m/s); es decir, suelos superficiales menos consolidados debido a la existencia de áreas de cultivo.
- Los suelos de San Pedro de Coayllo responden a periodos de 0.1 a 0.3 segundos, principalmente hacia el extremo NO de la zona céntrica y hacia su extremo Este. Además de este rango de periodos, los suelos muestran sensibilidad de periodos de 0.3 y 0.7 segundos, pero con bajas amplificaciones. Hacia el extremo Oeste del área de estudio, sobre el Fundo Soxa, Fundo Cuculí y al Sur de la Plaza de Armas, los suelos presentan sensibilidad a periodos mayores a los 0.4 segundos con amplificaciones mayores a las 4 veces, y sobre la zona arqueológica en amplificaciones son de hasta 6 veces a periodos de 0.2 y 0.8 segundos. Los periodos dominantes que caracterizan los suelos de Coayllo están relacionados con las condiciones físico-dinámicas a través de la relación  $T_0=4H/V_s$ . Asumiendo velocidades de 280 m/s y 500 m/s para las ondas de corte (Vs) y periodos de 0.1 y 0.4 segundos, se estima la existencia de una capa superficial con espesores de 5 metros próximos a cerros y hasta 50 metros, próximos al río Omas.
- En la zona céntrica de Coayllo predominan en superficie, materiales medianamente resistivos. Al Norte de la plaza de Coayllo (LE02-CY), conforme se tiende hacia las faldas del cerro, no se observa nivel freático. Contrariamente, cerca del río Omas y sobre terrenos de cultivo, el nivel freático se encuentra a partir de los 20 a 25 metros de profundidad.
- Los resultados obtenidos para el área urbana de San Pedro de Coayllo han permitido identificar, según las características dinámicas del suelo, sus

propiedades mecánicas y el procedimiento establecido en la Norma E.030, la existencia de Tres (3) zonas sísmicas correspondientes a suelos Tipo S1, S2 y S4, que corresponde a suelos rígidos, medianamente rígidos y excepcionales, respectivamente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alva H., Jorge E., Diseño de Cimentaciones.
- Atala A., César A., (2011). Estudio Experimental sobre Correlaciones en Suelos Granulares Finos (Arenas) Compactados, Usando Equipos de Penetración.
- Braja Das (2007): Principles of Foundation Engineering, seven edition, pág. 133-180.
- Crespo V., Carlos (2004). Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Quinta edición.
- Beláustegui, S. (1999). Pendientes del Terreno y Fundamentos del Caudal Máximo No Erosivo. Hoja técnica N° 07. Buenos Aires – Argentina, 4 p.
- Busset, M., (1995). Geología del Cuadrángulo de Casma, Hoja 19g (Boletín N°59-Carta Geológica Nacional-INGEMMET).
- Cahill & Isacks, (1992) - Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. Journal Geophys. Res., 97, 17503-17529.
- Craig, A.K., & Shimada, I. (1986) – El Niño flood deposits at Batan Grande, northern Perú.
- Cruden, D. M. (1991). A Simple definition of a landslide: Bulletin of the International Association of Engineering Geology.
- Felicísimo, M. (1994). Modelo digitales de terreno, Oviedo-España: Pentalfa. 222 p. ISBN: 84-7848-475-2 p.
- Ferradas, P. (2000). Las aguas del cielo y de la tierra. Perú.
- Fidel, L., Zavala, B., Núñez, S., Valenzuela, G. (2006) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 4. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 29. 383 p.
- Garrido G., Alonso A., (2011). Análisis de Variación del Índice de Penetración Dinámico (N10) por Influencia de la Precipitación en Taludes de Campo.
- 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 transportes de sedimentos.
- Gutiérrez, M. (2008) - Geomorfología. Edit. Pearson/Prentice Hall, Madrid, 898 p. ISBN 97884832-23895.
- Harvey, J. C., (1987) – Geology for geotechnical engineers (Cambridge University Press), 5p y 13p.
- Hürlimann, M., (2011). Ingeniería Geológica. UPC.

- Hutchinson, J. N. (1968). Mass Movement. In the Enciclopedia of Geomorphology (Fairbridge, R.W., ed., Reinhold Book Corp., New York), pp. 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.), págs. 1, 3-35. Rotterdam: Balkema.
- Imágenes satelitales obtenidas de: <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/>
- INDECI (2008). Mapa de peligros. Ciudades sostenibles PNUD
- Instituto Nacional de Estadística e Informática, IX Censo Nacional de población y VI de vivienda. Lima, 2007.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. IX Censo Nacional de población y IV de vivienda. Lima, 1993.
- Klauer A., El Niño – La Niña: El fenómeno oceánico atmosférico del pacífico sur.
- Macharé, J., Benavente, C., Audin., Laurence. (2008) – Síntesis descriptiva del mapa neotectónico [Boletín C-40].
- Mas-Pla, J., & Bach-Plaza, J., (2008) –Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica. ISB: 978-84-96742-37-6. Documenta Universitaria. Girona (España).
- Máximo Villón Béjar, (2002). “Hidrología”. Primera edición, Editorial Taller de publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Naranjo A., Hector & Dranichnikov T. (2012). Cálculo de la capacidad portante basado en geofísica y método convencional: El caso del puente sobre el río Maicito.
- Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quaterly Report Railway Tech. Res. Inst., 30-1, 25-30.
- Lavell, A. (1996). Sobre la Gestión del Riesgo: apuntes hacia una definición. España.
- Loke, M.H. (2004). Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys.
- Orellana, E. (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- O'Brien J.S. (2009). FLO-2D User's Manual, Versión 2009, Nutrioso, Arizona. Página web: <http://www.flo-2d.com>.
- Park, C.B. (2015). Data acquisition. Retrieved 23 June, 2015, from <http://www.masw.com/DataAcquisition.html>
- Park, C.B. (2014). MASW for geotechnical site investigation. The Leading Edge,

32(6):656-662.

- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) active and passive methods. *The Leading Edge*, 26 (1), 60–64.
- Park, C. B., Miller, R. D. y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves *Geophysics* 64 800-8.
- 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.
- Salazar H. & Landa C., (1993) - Geología de los cuadrángulos de Mala, Lunahuaná, Tupe, Conayca, Tantara y Castrovirreyna 26-j, 26-k, 26-i, 26-m, 27-k, 27-i, 27-m – (Boletín A 44).
- Suárez, D., J., (1998) – Estabilidad de Taludes en Tropicales. Instituto de Investigación sobre erosión y deslizamientos. Colombia. Ed. Ingeniería de Suelos Ltda. 550 p.
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand y G. Richard, (2006). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till Res* 83, 173-193
- SESAME European research project WP12 – Deliverable D23.12: (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation.
- Socco, L.V., Boiero, D., Comina, C., Foti, S., y Wis\_en, R. (2008). Seismic characterization of an Alpine site. *Near Surface Geophysics*, 6(4):255-267.
- Tavera, H. & Buforn, E. (2001) - Source Mechanism of Earthquake in Peru. *Journal of Seismology*, en prensa.
- Tavera, H. (2014). Escenario sísmico en base a la intensidad máxima esperada en un probable sismo frente a la zona costera de Lima.
- Tarback, E., D. Lutgens, F., K., (2005) *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física* Pretince Hall. Cap16. 8a edición. 710 pp.
- Tejada, G. (1994) - *Vocabulario de Geomorfología*. Ediciones AKAL. 184 p.
- Terzaghi Karl, Peck, Ralph & Mesri Gholamresa (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, third edition.
- Terzaghi K., & Peck R., B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Jhon Wiley, New York.
- Trau, W., Gutierrez Y., R. [1979]. *Análisis regional de las avenidas en ríos del Perú*.

- USGS. “Técnicas de campo en superficie”, <http://water.usgs.gov/nrp/index.php>.
- Varnes, D.J. (1958). Landslide types and processes in Eckel E.B., ed., *Landslides and Engineering Practice*, Highway Research Board Special Report 29, NAS-NRC Publication 544, Washington, D.C., p. 20 — 47p.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes, en Schuster R.L., y Krizek R.J., ed, *Landslides analysis and control: Washington D. C*, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 176, p. 9–33.
- Ven Te Chow, David Maidment y Larry Mays, (1994), “Hidrología aplicada”. MacGRAW-HILL INTERAMERICANA. Santa Fé de Bogotá, Colombia.
- Villón Béjar, Máximo. (2002). *Hidrología*. Primera edición, Editorial Taller de publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Villota, H. (1991) - *Geomorfología de relieves montañosos, colinados y ondulados*. IGAC. Santa Fé, Colombia. 212 p.
- Wells, L.E. (1987). Holocene history of the El Niño phenomenon as recorded in flood sediments of northern coastal Perú.
- Zinck, J. (1988) - *Physiography and soils*. Lecture notes. Enschede, The Netherlands: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Zinck, J. & Valenzuela, C. (1990) - *Soil geographic database: structure and application examples*. ITC Journal, 1990(3), 270-294.
- <http://renac.mtc.gob.pe/inventariovial/default2.aspx>.

## ANEXOS

La información que se detalla en el presente Informe Técnico: “Zonificación Geofísica – Geotécnica del área urbana de San Pedro de Coayllo” son presentados en formato digital.

### 1.- Información Geológica Geotécnica:

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

### 2.- Información Geofísica

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