



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú



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

### ESTUDIO DE ZONIFICACIÓN SISMO-GEOTÉCNICA DEL DISTRITO DE QUERECOTILLO



Lima - Perú

2020

## **ESTUDIO DE ZONIFICACIÓN SISMO-GEOTÉCNICA DEL DISTRITO DE QUERECOTILLO**

**Provincia de Sullana - Departamento de Piura  
(Características dinámicas del suelo)**

### **Responsable del Proyecto**

Dr. Hernando Tavera

### **Desarrollo del Proyecto**

Dra. Isabel Bernal Esquíá

MSc. Juan Carlos Gómez Avalos

### **Personal Participante**

Juan Carlos Villegas Lanza	Liliana Torres Velarde
Segundo Ortiz Yovera	Jesús Huarachi Berroa
Mariana Vivanco Manrique	Kelly Pari Rondón
Pilar Vivanco López	Wilfredo Sulla Huilca
Héctor Lavado Sánchez	Javier Oyola Coral
Gustavo Namay Poncca	José Millones Jáuregui
Henry Salas Vásquez	Manuel Medina Gonzales

### **Apoyo Técnico**

Marisol Enríquez Huamán  
Esther Campos Córdova  
Augusto Cárdenas Ausejo  
Roberth Yupanqui Zelada



## RESUMEN EJECUTIVO

*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 actividades la “Caracterización Geomorfológica, Geológica, Geodinámica y Geotécnica” y “Generación de Estudios Territoriales de Peligros Sísmicos” obteniéndose como resultado final, mapas temáticos (geomorfología, geología, geodinámica, tipos de suelos y capacidad portante y zonificación sísmica) del área urbana del distrito de Querecotillo, Provincia de Sullana y Departamento de Piura. El estudio permite conocer el Comportamiento Físico y Dinámico del Suelo a partir de la recolección de información y aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos.*

*Los resultados obtenidos en el distrito de Querecotillo han permitido identificar la existencia de seis (6) tipos de suelos que corresponden a: grava mal graduada (GP), arena limosa (SM), arena pobremente graduada (SP), arcillas inorgánicas (CL), limos inorgánicos con arenas y limos (MH) y limos inorgánicos (ML), que presentan capacidad portante muy baja (< 1.00 kg/cm<sup>2</sup>).*

*Los resultados obtenidos para el área urbana de Querecotillo han permitido identificar, considerando lo indicado en la Norma sismorresistente E.030, la existencia de dos (2) zonas correspondientes a suelos Tipos S1 y S2 que comprenden a suelos rígidos y medianamente rígidos. Aproximadamente el 95 % del área de estudio presenta suelos que responden a periodos que varían entre 0.3 y 0.5 segundos. Las amplificaciones relativas mayores a 3 veces se identifican hacia el extremo sureste (próximo al río Chira), en los AA.HH. Vichayal, San Fernando, Plaza de Armas, Campamento Mayor Alfredo Novoa Cava y hacia el sureste, en sectores próximos a terrenos de cultivo. En estos sectores, los resultados sugieren la presencia de suelos superficiales de baja consistencia con alto grado de humedad.*

*El Mapa de Zonificación Geofísica - Geotécnica para el área urbana de Querecotillo se constituye como información primaria a ser utilizada por ingenieros civiles y arquitectos para el diseño y construcción de estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio. Asimismo, como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.*



**CONTENIDO**

RESUMEN EJECUTIVO .....	3
CONTENIDO .....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. OBJETIVOS.....	9
2.1 Objetivo general.....	9
2.2 Objetivo específico .....	9
3. METODOLOGÍA.....	9
4. ANTECEDENTES .....	10
4.1 Recopilación de la información .....	10
5.- ASPECTOS GENERALES.....	14
5.1. Ubicación y accesibilidad .....	14
5.2 Población .....	16
5.3 Clima.....	16
5.4. Hidrografía .....	17
6. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA, GEOLÓGICA Y GEODINÁMICA.....	18
6.1 Geomorfología .....	19
6.1.1 Modelo digital de elevación (MDE) .....	19
6.1.2 Pendientes.....	20
6.1.2.1 Clasificación del grado de pendientes .....	20
6.1.3 Unidades geomorfológicas.....	20
6.2 Geología .....	25
6.2.1 Geología Local.....	25
6.2.1.1 Formación Miramar (Tm-mi).....	26
6.2.1.2 Depósitos Cuaternarios.....	28
6.2.1.2.1 Depósitos aluviales (Qh-al).....	28
6.3 Geodinámica Superficial.....	28
6.3.1 Inundación.....	29
6.3.2 Elementos expuestos .....	31
7. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA.....	32
7.1 Exploraciones a cielo abierto (calicatas, norma ASTM 420).....	34
7.1.1 Densidad del suelo in-situ (Norma ASTM D1556).....	34
7.2. Exploraciones con posteadora manual.....	35



7.3. Ensayo de penetración dinámica ligera-LDPT (norma DIN 4094) .....	36
7.4 Resultados de los ensayos de laboratorio .....	38
7.4.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) en la ciudad de Querecotillo .....	38
7.5 Ensayo de corte directo (Norma ASTM D - 3080) .....	41
7.5.1 Capacidad de carga portante .....	41
7.5.1.1 Tipos de capacidad de carga portante .....	43
8. DISCUSIONES .....	43
SEGUNDA PARTE: GEOFÍSICA Y ZONIFICACIÓN SISMO-GEOTÉCNICA .....	44
1.- INTRODUCCIÓN .....	44
1.1.- Objetivos .....	45
1.2.- Área de estudio .....	46
1.2.1.- Antecedentes .....	48
1.3.- Condiciones locales de Sitio .....	49
1.4.- Zonificación, Norma Técnica E.030 .....	50
2.- METODOLOGÍA Y DATOS .....	53
2.1.- Método de Razones Espectrales (H/V) .....	53
2.1.1.- Procesamiento y análisis .....	57
2.2.- Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) .....	57
2.2.1.- Procesamiento y análisis .....	60
2.3.- Método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) .....	61
2.3.1.- Procesamiento y análisis .....	64
3.- RESULTADOS .....	65
3.1.- Razones espectrales (H/V) .....	65
3.1.1.- Frecuencias Predominantes .....	65
3.1.2.- Periodos dominantes .....	69
3.2.- Perfiles de MASW .....	71
3.3.- Perfiles de Tomografía Eléctrica .....	74
4. ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA DE LOS SUELOS .....	78
4.1. Integración de resultados .....	78
4.2. Mapa de Zonificación Geofísica .....	81
9. CONCLUSIONES .....	84
10. RECOMENDACIONES .....	86
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87



## RELACIÓN DE FIGURAS

- Figura 01: Mapa de suelos del distrito de Querecotillo, según clasificación natural Soil Taxonomy. Fuente: CENEPRED 2017.
- Figura 02: Mapa de geología regional del cuadrángulo de Sullana, el área de estudio se ubica en el rectángulo en rojo, Fuente: INGEMMET, 1994.
- Figura 03: Imagen del distrito de Querecotillo del año 2019 (setiembre) obtenida de la ortofoto realizada con RPAS.
- Figura 04: Estación meteorológica Mallares ubicada a 10 km al oeste de Querecotillo
- Figura 05: Ubicación del área de estudio respecto a la cuenca hidrográfica del río Chira
- Figura 06: Zona de sembrío (polígono azul) inundada por el aumento de caudal en el río Chira a causa de la ocurrencia del evento Niño en el año 2017 (marzo), la zona fue demarcada según relato de pobladores.
- Figura 07: Delimitación de elementos expuestos ante la ocurrencia de inundaciones en la localidad de Querecotillo.
- Figura 08: Formación de suelos, (Adaptado de Gonzáles de Vallejo, 2002)

## RELACIÓN DE CUADROS

- Cuadro 01: Registro de precipitaciones en el distrito de Querecotillo periodo 1980-2019, los recuadros en azul representan los eventos Niños.
- Cuadro 02: Determinación de geoformas en la ciudad de Querecotillo en base a sus características físicas y su origen
- Cuadro 03: Área de cultivo expuesta ante eventos de origen natural
- Cuadro 04: Ubicación de calicatas
- Cuadro 05: Resultado de densidades in – situ
- Cuadro 06: Ubicación de posteos y clasificación de suelos SUCS
- Cuadro 07: Ubicación de ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) y parámetros obtenidos
- Cuadro 08: Clasificación SUCS de los suelos de las ocho (08) calicatas elaboradas en la ciudad de Querecotillo
- Cuadro 09: Capacidad de carga portante de las muestras extraídas en la ciudad de Querecotillo
- Cuadro 10: Capacidad de carga portante (Criterio de falla general y local) en base al ángulo de fricción corregido del N del DPL vs SPT y cohesión obtenida del ensayo de corte directo.

## RELACIÓN DE TABLAS

- Tabla 01: Rangos de pendientes del terreno

## RELACIÓN DE ANEXOS

### ANEXO 01: Perfiles Sísmicos MASW

### ANEXO 02: Perfiles de Tomografía Eléctrica ERT

### ANEXO 01: LEVANTAMIENTO FOTOGRAFAMÉTRICO



**ANEXO 02: ANÁLISIS DE ELEMENTOS EXPUESTOS**

- Cuadros de aspectos socioeconómicos y condiciones de vulnerabilidad.

**ANEXO 03: PLANOS**

- P-01 Ubicación y accesibilidad
- P-02 Modelo digital de elevaciones
- P-03 Pendientes
- P-04 Geomorfología
- P-05 Geología
- P-06 Geodinámica
- P-07 Geotecnia
- P-08 Tipos de suelos
- P-09 Capacidad portante

**ANEXO 04: MODELADO DE INUNDACIONES**

**ANEXOS 05: GEOTECNIA**

- Correlación N° DPL – SPT / Capacidad portante
- Fichas geotécnicas
- Fichas de logueo de calicatas
- Fichas de densidad de campo
- Fichas de ensayos de penetración dinámica ligera-DPL
- Ficha de logueo de posteos
- Fichas de análisis granulométrico
- Fichas de correlación DPL-SPT
- Fichas de cálculo de carga portante



## 1. INTRODUCCIÓN

La Caracterización Geológica Geotécnica del distrito de Querecotillo se desarrolló como parte del informe de Zonificación Sísmica Geotécnica del distrito en mención (dinámica de los suelos de cimentación), para ello se realizó el cartografiado geológico, geomorfológico y geodinámico en el distrito de Querecotillo a escala 1:15 000 en un área de 2011 hectáreas (ha) (área urbana y agrícola), apoyados en imágenes obtenidas mediante el uso del Sistema de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) del área de estudio, lo que permitió obtener curvas de nivel con equidistancia de 5 m. Así mismo, se realizó la zonificación de los suelos apoyados en ensayos geotécnicos con la finalidad de determinar las propiedades físico-mecánica de los suelos, estos consistieron en exploraciones a cielo abierto (calicatas), ensayos de densidad de campo in situ, ensayos de Penetración Dinámica Ligera (DPL) y auscultaciones con posteadora manual (escala 1: 15 000).

Los estudios en conjunto citados anteriormente permiten identificar zonas susceptibles ante la ocurrencia de eventos naturales tales como movimientos en masa (huaycos, deslizamientos, caída de rocas, entre otros) e inundaciones generadas por fenómenos hidrometeorológicos (precipitaciones extremas “Niño costero”) que puedan afectar la seguridad física del distrito en mención.

La información proporcionada en el presente informe servirá como material de apoyo a las instituciones de primera línea (gobiernos regionales, municipalidades, entre otros) para ejecutar las medidas correctivas en apoyo a la Gestión del Riesgo de Desastres.



## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Realizar la zonificación de suelos con sus respectivas capacidades portantes en base a sus características físico-mecánicas obtenidas de los ensayos de laboratorio y determinar las áreas expuestas a peligros por eventos geodinámicos presentes en la ciudad de Querecotillo, con el fin de contribuir al desarrollo y planificación urbana preventiva en la ejecución de proyectos futuros.

### 2.2 Objetivo específico

Realizar el cartografiado geológico, geomorfológico, geodinámico y ensayos geotécnicos en la ciudad de Querecotillo a escala 1:15 000.

Determinar las propiedades físico-mecánicas de los suelos de la ciudad de Querecotillo (centro urbano y área de expansión urbana), en laboratorio y calcular sus respectivas capacidades portantes para realizar los mapas de tipos de suelos y capacidad portante a escala 1:15 000.

## 3. METODOLOGÍA

Para realizar el estudio geológico-geotécnico de Querecotillo se dividió en 2 fases: gabinete y campo, que se describen a continuación:

#### *Gabinete:*

Las actividades realizadas incluyeron la revisión de imágenes satelitales *WorldView-2* con resolución 0.5 m del servidor *Digital Globe* (2010) con la finalidad de delimitar la zona de estudio, así como la recopilación de información geológica regional y local existente (boletines geológicos, informes técnicos, entre otros).

#### *Campo:*

Cartografiado geológico, geomorfológico, geodinámico a escala 1:15000, para lo cual se utilizó la ortofoto del área de estudio obtenida, a través del RPAS (Anexo 01).

Se realizaron exploraciones geotécnicas que incluye la ejecución de 8 calicatas, 5 densidades de campo, 12 DPL y 11 auscultaciones manuales (posteos). Así mismo, las muestras



extraídas fueron analizadas en el laboratorio de mecánica de suelos para determinar la humedad natural, límites de Atterberg, granulometría y corte directo a fin de obtener parámetros de cohesión y ángulo de fricción de los suelos que sirven para el cálculo de la capacidad portante.

Finalmente, la información recopilada en gabinete, así como la obtenida en el campo y los resultados de laboratorio se procesó y analizó para la elaboración del presente informe.

## 4. ANTECEDENTES

En este capítulo se ha realizado la recopilación de informes técnicos que describen la ocurrencia de eventos naturales (inundaciones, deslizamientos, huaycos, sismos, entre otros) que afectaron la seguridad física del distrito en mención, del mismo modo se ha realizado la recopilación técnica de informes de suelos e información geológica regional del área de estudio, datos que serán discutidos en el Capítulo 8 junto con los resultados obtenidos en el presente informe.

### 4.1 Recopilación de la información

- **INFORME N° 855-21/12/2017 / COEN-INDECI (Informe N° 62)**, en la evaluación de daños señala:

En el periodo lluvioso del 2017 (ocurrencia del Evento El Niño) se registraron 38 viviendas colapsadas, 267 viviendas afectadas, 103 personas damnificadas, 1 208 personas afectadas, 7 km de caminos rurales destruidos y 2 km de caminos rurales afectados en el distrito de Querecotillo.

- **CENEPRED -INFORME DE EVALUACIÓN DE RIESGO POR INUNDACIÓN PLUVIAL EN EL CENTRO POBLADO DE QUERECOTILLO, DISTRITO DE QUERECOTILLO, PROVINCIA DE SULLANA, DEPARTAMENTO DE PIURA (diciembre 2017):**

El informe describe el nivel de peligro “Muy Alto” por inundación pluvial en el centro poblado de Querecotillo y riesgo “Alto” en el distrito en mención, determinando para el año 2017 un periodo lluvioso “Extremadamente Lluvioso” (El Niño Costero 2017), siendo el dato máximo registrado de 164.6 mm el 29 de marzo de 2017 (precipitación máxima diaria).

Diferencia 5 tipos de suelos, Figura 01, en base a la clasificación natural Soil Taxonomy (2006):

- -Fluvisol: suelos provenientes de depósitos aluviales (épocas de crecientes), ubicados en las terrazas bajas adyacentes de los ríos, que forman un terreno de



Estudio de Zonificación Sismo-geotécnica del distrito de Querecotillo

pendiente plana a ligeramente inclinadas, suelos tipo Tio Paira (TP), Chira (Chr), Palo Verde (PV) y Guayaquil

- Leptosol: suelos conformados a partir de rocas areniscas, derivados de caliza y volcánicas, presentan pendientes inclinadas y de composición pedregosa. El suelo característico es Máncora (MA-R)
- Arenosol: suelos originados de material arenoso, permeables con escasa capacidad para retener agua, suelo denominado Cerezal (Ce)

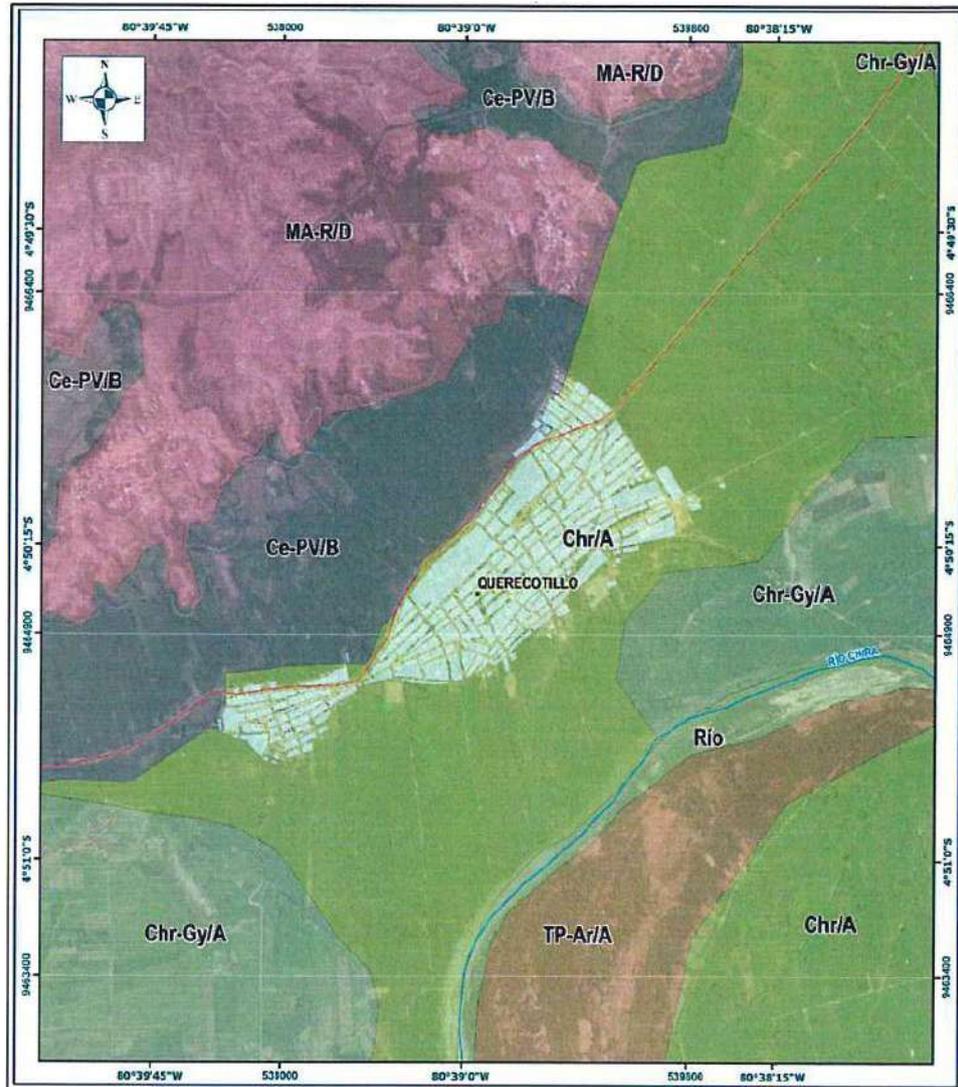


Figura 01: Mapa de suelos del distrito de Querecotillo, según clasificación natural Soil Taxonomy. Fuente: CENEPRED 2017.

- **HISTORIAS DE LOS SISMOS MÁS NOTABLES OCURRIDOS EN EL PERÚ (1513-1974), primera edición digital, noviembre 2012.**

9 de diciembre de 1970

Terremoto en el noroeste del Perú. En el área de Querecotillo en terraza fluvial y aluvial se formó un sistema de grietas en echelón, de longitud de 500 m con aberturas de 0.30 m y saltos de 0.25 m. Se notó efusión de arena formando sumideros de 0.60-1.00 m de diámetro. Cerca al caserío La Huaca se agrietó el suelo, brotando arena y lodo. En Tumbes cerca al Puerto Cura, en las terrazas fluviales, se observó efusión de aguas negras acompañadas de arena que salieron a la superficie, a través de grietas (Taype, 1971). La máxima intensidad de este sismo fue de IX MM y su magnitud fue de  $M_s = 7.1$ .

- **PALACIOS, O, (1994) GEOLOGÍA DE LOS CUADRÁNGULOS PAITA 11-A, PIURA 11-B, TALARA 10-A, SULLANA 10-B, LOBITOS 9-A, QUEBRADA SECA 9-B, ZORRITOS 8-B, TUMBES 8-C Y ZARUMILLA 7-C. SERIE A: CARTA GEOLÓGICA NACIONAL. BOLETÍN N° 54. GEOLOGÍA – INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO-INGEMMET**

En el boletín se describen las unidades litológicas aflorantes a escala 100, 000 en el área de estudio, cuyas edades son del Mioceno y Cuaternario Reciente, donde describe que están conformados por rocas sedimentarias (areniscas y conglomerados) y depósitos aluviales conformados por conglomerados, arenas, arcillas. Figura 02



**Figura 02: Mapa de geología regional del cuadrángulo de Sullana, el área de estudio se ubica en el rectángulo en rojo. Fuente: INGEMMET, 1994.**



## 5.- ASPECTOS GENERALES

En este capítulo se describe la ubicación, datos de población, clima e hidrografía del área de estudio.

### 5.1. Ubicación y accesibilidad

Querecotillo es uno de los ocho distritos que conforman la provincia de Sullana, en la región de Piura, se ubica entre las coordenadas UTM 538934E y 9465040 N, a una altura de 53 m s. n. m Figura 03.

Límites:

Norte: distrito de Marcavelica y distrito de Lancones

Sur: centro poblado Montenegro

Este: distrito de Lancones

Oeste: distrito de Marcavelica y Salitral

El área de estudio en el distrito de Querecotillo abarcó 1985 hectáreas (ha), de las cuales 110 ha corresponden a la urbana y el restante a zonas de cultivo.

La accesibilidad al distrito de Querecotillo desde la ciudad de Lima por vía terrestre se realiza, a través de la carretera Panamericana Norte Vía Sullana, para luego dirigirse por la auxiliar Panamericana Norte Carretera 1N, en un recorrido aproximado de 1041 km en un tiempo de 16 horas. Vía aérea se realiza desde el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (Lima-Callao) con destino a la ciudad de Piura, en un tiempo de 1h 30 min, para luego hacer el traslado vía terrestre usando la carretera Panamericana norte hasta Sullana y luego la auxiliar Panamericana Norte Carretera 1N, en un tiempo de 40 min.

La información socioeconómica del distrito de Querecotillo se encuentra descrita en el Anexo 01.



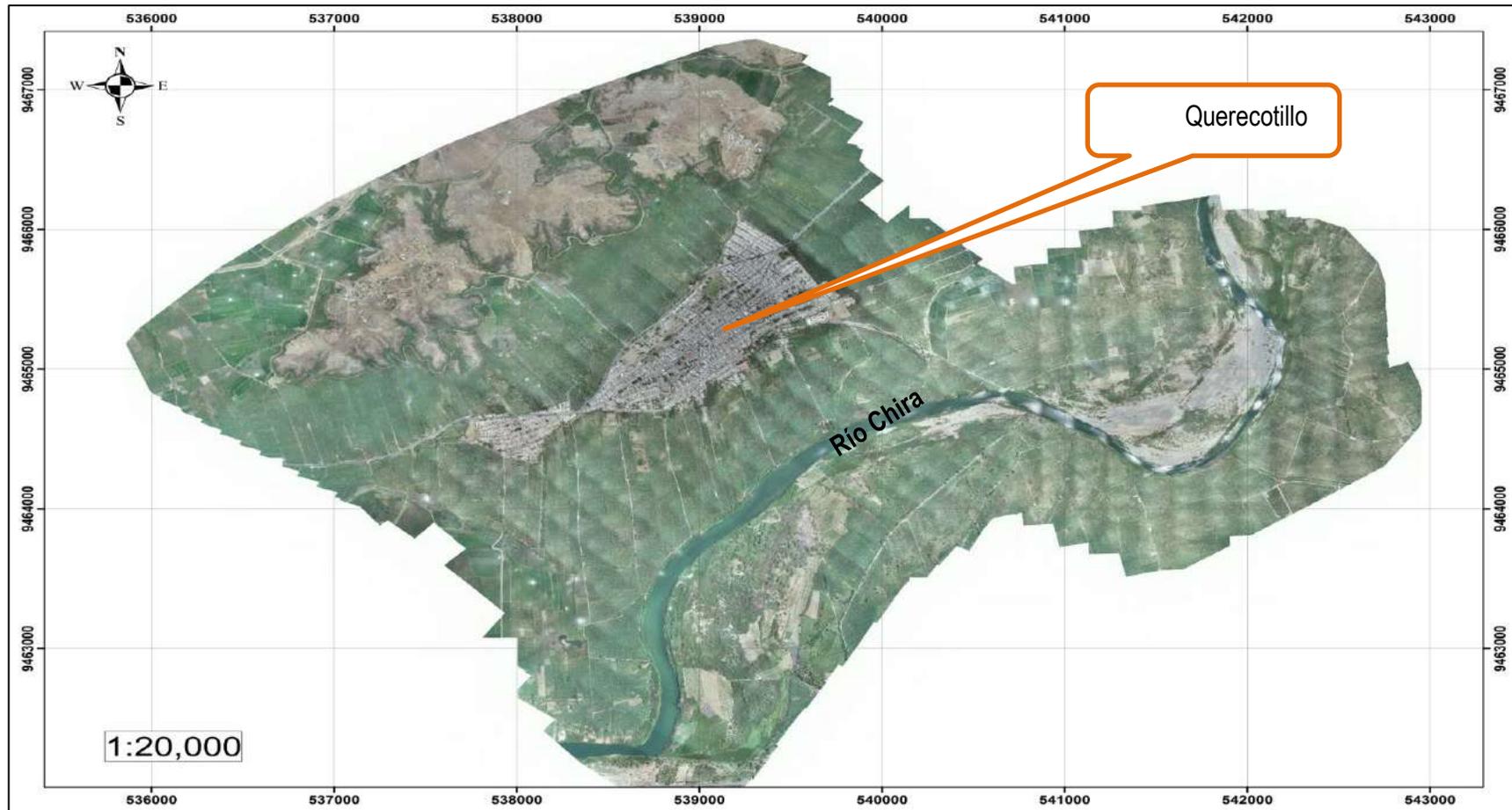


Figura 03: Imagen del distrito de Querecotillo del año 2019 (setiembre) obtenida de la ortofoto realizada con RPAS.



## 5.2 Población

Querecotillo se encuentra habitado por 26 395 personas (INEI, 2017), que representa el 8.5% del total de habitantes establecidos en el distrito del mismo nombre (311 454 hab).

La población infantil en el distrito de Querecotillo es de 7 685 y personas con discapacidad se contabilizaron 2 811, el total de la cifra de población vulnerable ante la ocurrencia de algún evento de origen natural (inundaciones, sismos) es de 10 496 que corresponde al 40 % de la población.

## 5.3 Clima

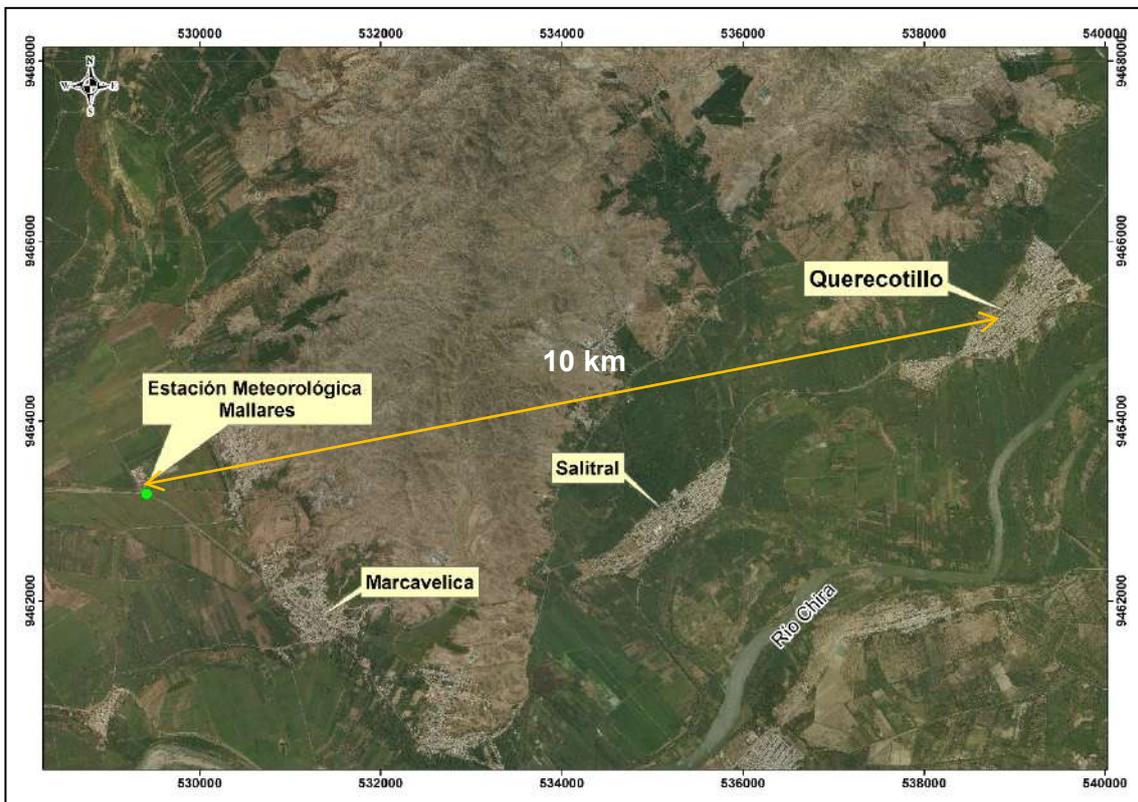
Para determinar las condiciones climáticas en el distrito de Querecotillo se han tomado los datos referenciales de la web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) de la estación Meteorológica Mallares, ubicada en la provincia de Sullana en el distrito de Marcavelica en las coordenadas geográficas; Latitud: 4° 51' 20.67", Longitud: 80° 44' 8" y cota 44 m s.n.m. (Figura 04). De la información registrada en la estación (periodo 1982-2019) la ciudad presenta un clima árido cálido y húmedo con lluvias no tan importantes en gran parte del año, con una temperatura máxima de 34.1 °C y en invierno (junio-octubre) presenta una temperatura mínima de 17.1 °C. Durante los eventos El Niño la temperatura puede aumentar de 2 °C a 4°C y las precipitaciones superan los 100 mm diarios (Cuadro 01).

**Cuadro 1: Registro de precipitaciones en el distrito de Querecotillo periodo 1980-2019, los recuadros en azul representan a los eventos El Niño**

Año	Precipitación máxima diaria registrada (mm)	Año	Precipitación máxima diaria registrada (mm)
1980	27.5	2000	19.7
1981	9.6	2001	62.5
1982	11.5	2002	47.1
1983	148.1	2003	12.9
1984	47.3	2004	7.3
1985	5.1	2005	6.1
1986	4.7	2006	25.8
1987	64	2007	8.4
1988	15.7	2008	79
1989	31.2	2009	22.1
1990	2.6	2010	70.4



1991	15.4	2011	14.4
1992	100.4	2012	56
1993	0.9	2013	59
1994	11.7	2014	S.D
1995	1.8	2015	S.D
1996	2	2016	S.D
1997	85.8	2017	129.3
1998	201	2018	13.6
1999	64.8	2019	8.3



**Figura 04: Estación meteorológica Mallares ubicada a 10 km al oeste de Querecotillo**

#### 5.4. Hidrografía

El área de estudio está ubicada en la baja de la cuenca del río Chira, que forma parte de la cuenca Catamayo – Chira y que está constituida por territorio ecuatoriano y peruano, respectivamente. Asimismo, tiene una extensión de 10 678.91 km<sup>2</sup> y está ubicada entre las coordenadas 03° 40' 28" y 05° 07' 06" de latitud Sur y 80° 46' 11" y 79° 07' 52" de longitud Oeste. El principal sistema de drenaje en la ciudad de Querecotillo es el río Chira, que presenta forma semi-meándrico y discurre y fluye en dirección este-oeste para desembocar en el océano Pacífico (Figura 05).



El área urbana de Querecotillo se ubica a la margen derecha del río Chira, el caudal del mismo está regulado por el reservorio de Poechos. En la ocurrencia de los eventos El Niño en los años 1988 y 1998 el caudal registrado fue de 4000 m<sup>3</sup> y 6000 m<sup>3</sup>, respectivamente, lo que ocasionó inundaciones en la parte baja del valle afectando a los poblados de Miguel Checa, Ignacio Escudero y Viviate, ubicados a 20 km aguas abajo del distrito de Querecotillo. En el año 2017, en el distrito de Querecotillo, la zona de sembrío de banano orgánico fue afectada por la inundación producto del desborde del río Chira en el mes de marzo, la estación hidrológica La Ardilla registró un caudal aproximado de 3000 m<sup>3</sup>/s.

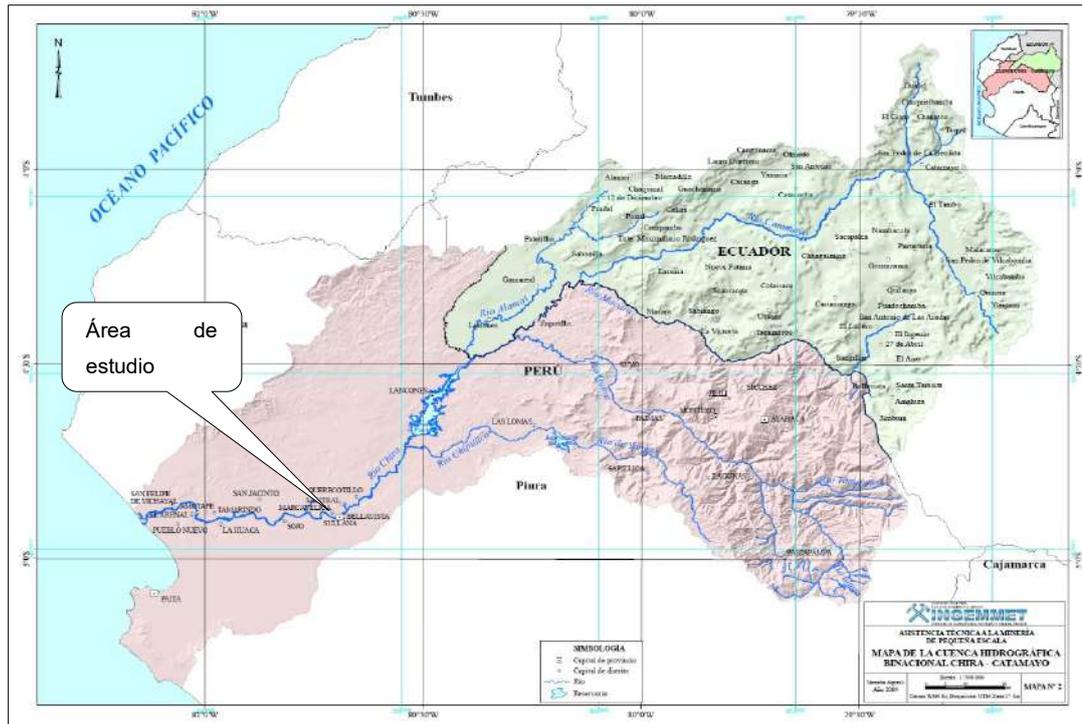


Figura 05: Ubicación del área de estudio respecto a la cuenca hidrográfica del río Chira

## 6. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA, GEOLÓGICA Y GEODINÁMICA

En este capítulo se describen las geoformas, unidades litoestratigráficas identificadas en el área de estudio, así mismo, se identifican zonas que fueron o pueden ser afectadas por eventos geodinámicos tales como movimientos en masa (flujos, deslizamientos, entre otros) e inundaciones. Finalmente se realiza un modelado de inundaciones para determinar el caudal de inundación e identificar qué áreas pueden ser afectadas ante dicho evento.



## 6.1 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; las segundas, como desencadenantes de una continua denudación que tiende a rebajar el relieve originado, estos últimos llamados procesos de geodinámica externa se agrupan en la cadena meteorización-erosión, transporte y sedimentación (Gutiérrez, 2008). El estudio de la geodinámica externa se efectúa en un sistema proceso respuesta, siendo el primero el agente creador (origen) y el segundo la geoforma resultante.

El término geoforma es un concepto genérico que designa todos los tipos de formas de relieve independientemente de su origen y dimensión (Zinck, 1988; Zinck & Valenzuela, 1990).

En este capítulo se describen las características físicas de las geoformas existentes en la ciudad de Querecotillo, en relación a su origen. Previamente, para la digitalización del plano geomorfológico se han elaborado los planos Modelo Digital de Elevación (MDE) y Pendientes (Planos P-02 y P-03) mediante herramientas computacionales SIG, que permiten caracterizar y delimitar las unidades geomorfológicas del terreno (geoformas), éstas fueron verificadas y validadas durante el trabajo de campo en la ciudad de Querecotillo (Plano P-04).

### 6.1.1 Modelo digital de elevación (MDE)

Los MDE son representaciones gráficas de la superficie del terreno, conformados 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, (Felícísimo, 1994).

Para la elaboración del MDE de la ciudad de Querecotillo se tomó en cuenta el uso de herramientas SIG sobre las curvas de nivel obtenidas a partir de la ortofoto, obteniendo como resultado la representación digital de la superficie del terreno de la localidad.

En base al MDE elaborado de la ciudad de Querecotillo, se ha reconocido que hacia el noroeste en los sectores de Cabo Verde Alto y Santa Elena Alto se ubican las mayores elevaciones entre 80 y 95 m.s.n.m., la parte central urbana se asienta sobre los 64 m.s.n.m., mientras que hacia el río Chira las altitudes varían entre los 50 a 58 m.s.n.m.



## 6.1.2 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, pues mientras más pronunciada sea la pendiente la velocidad del agua de escorrentía será mayor, no permitiendo la infiltración del agua en el suelo (Belaústegui, 1999).

El diseño de mapa de pendientes de la ciudad de Querecotillo desarrollado a partir del MDE, elaborado anteriormente, haciendo usos de herramientas de geoprocésamiento (área de influencia, construcción de modelos, análisis espacial, etc.) para diferenciar gráficamente los ángulos de inclinación del relieve en el área de estudio.

### 6.1.2.1 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, 2006), Tabla 01:

**Tabla 01: Rangos de pendientes del terreno**

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

**Fuente: Fidel et al., (2006)**

La mayor parte de la ciudad de Querecotillo se encuentra asentada sobre una terraza con pendientes menores <5°, sin embargo, hacia el noroeste del centro urbano en el sector de Cabo Verde Alto y Santa Elena Alto se observan relieves con pendientes de 20° a 35°.

## 6.1.3 Unidades geomorfológicas

Estas geoformas están compuestas por materiales que presentan una génesis propia que explica la dinámica de cómo se formaron y características físicas que conforman un relieve (forma, altura, pendiente, drenaje, textura de vegetación, color, etc.) que las diferencian entre sí.

En conclusión, las geoformas son generadas por procesos geodinámicos de tipo endógeno (internos) y exógenos (externos) que dan lugar a relieves positivos y negativos.



## A. Características físicas

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

## B. Procesos

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

En base a las características físicas de las geoformas y su origen, en la ciudad de Querecotillo se cartografiaron 4 geoformas como lecho fluvial, llanura de inundación, lomas y terrazas (Cuadro 02 y Plano P-04).

**Cuadro 02: Determinación de geoformas en la ciudad de Querecotillo en base a sus características físicas y su origen**

GEOMORFOLOGÍA PATRON			
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		PROCESO	GEOFORMA
Pendiente	<5°	Denunacional	Lecho fluvial
Geometría	alargada		
Drenaje	rectangula		
Pendiente	<35°		Loma
Altura	<300 m		
Geometría	alargada		
Drenaje	dendrítico	Depositacional	Llanura de inundación
Pendiente	<5°		
Geometría	alargada		
Drenaje	paralelo		Terraza
Pendiente	<5°		
Geometría	alargada		
Drenaje	paralelo		

Fuente: Instituto Geofísico del Perú (IGP) 2019



**6.1.3.1 Lecho fluvial.** Es un área de relieve menor a 5° con pendiente suave, de origen depositacional con geometría alargada y drenaje rectangular del régimen fluvial constante del río Chira. En la margen izquierda y derecha de esta geoforma se realizan las actividades agrícolas de sembrío y cultivo de banano de exportación (Foto 01).



Foto 01: Lecho fluvial del río Chira en el distrito de Querecotillo.

**6.1.3.2 Loma.** Es un área de relieve semi ondulado en la parte alta con pendiente suave (< a 35°), de origen depositacional con geometría alargada y drenaje dendrítico activados en épocas de precipitaciones extremas (evento El Niño).

Esta geoforma se ubica al noroeste del centro urbano de Querecotillo, donde se asientan en los sectores de Cabo verde Alto y Santa Elena Alto, poco urbanizadas. (Foto 02).



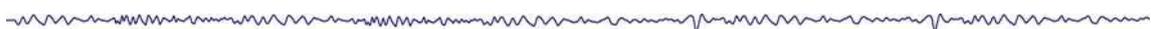


Foto 02: Geoforma lomas en el distrito de Querecotillo.

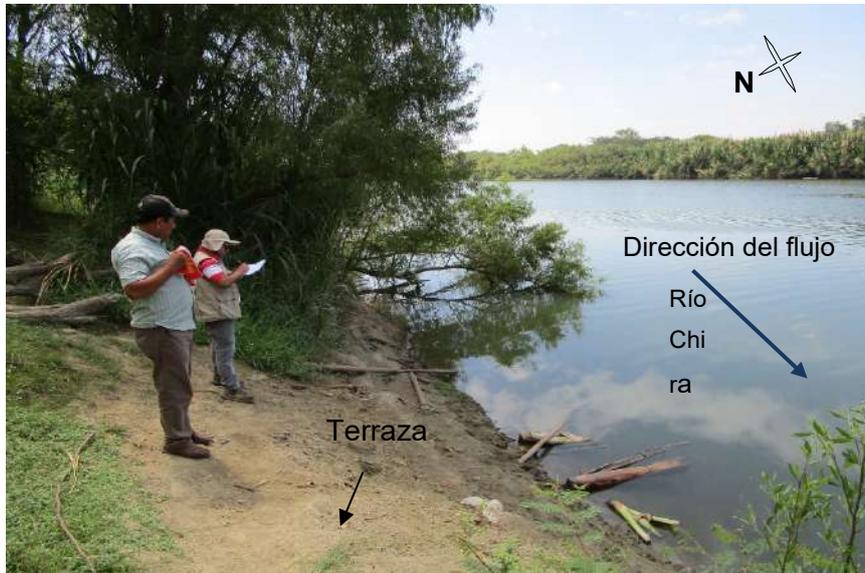
**6.1.3.3 Llanura de inundación.** Geoforma con pendiente menor a  $5^\circ$  y de relieve plano, de origen depositacional generado por la dinámica del río Chira (aumento y descenso del caudal). Esta unidad se ha reconocido en la margen izquierda del río en mención (Foto 03).



Foto 03: Llanura de inundación ubicada en la margen izquierda del río Chira, que corresponde al distrito de Sullana-Bellavista.



**6.1.3.4 Terrazas.** En Querecotillo se han identificado 2 terrazas; la primera, corresponde a la zona contigua a la margen derecha del río Chira, donde se desarrolla la actividad agrícola (sembrío de banano orgánico de exportación) (Foto 04); la segunda, con desnivel de aproximadamente de cinco metros respecto a la primera donde se asienta el casco urbano de Querecotillo (Foto 05). Ambas presentan pendientes menores a  $5^\circ$  y de geometría alargada.



**Foto 04:** Terraza 1, se ubica en la margen derecha del río Chira, en evento El Niño (precipitaciones extremas) es afectado por inundaciones.



**Foto 05:** Terraza 2, sobre esta geoforma se asienta el casco urbano de Querecotillo y presenta un desnivel de 5 m con respecto a la terraza 1.



## 6.2 Geología

La geología es la ciencia que estudia la Tierra, los materiales que la componen, las estructuras y los procesos que actúan sobre y debajo de la superficie a lo largo de millones de años desde su origen hasta la actualidad. La litología, como parte de la geología, estudia las características físicas de las rocas y depósitos que constituyen una formación geológica, es decir, una unidad litoestratigráficas. Los tipos de rocas han sido originados por procesos internos (tectónica de placas, ascenso de magma, etc.), así como 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, luego se descompone en fragmentos cada vez más pequeños 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; por ello es importante conocer los tipos de rocas y sus características físicas (Harvey, 1987). Estos procesos de meteorización modelan, tanto la roca como el suelo, dando como resultado las geoformas que componen el relieve, los factores condicionantes como la litología, pendiente, hidrología, etc; así como, los detonantes como los sismos y precipitaciones pluviales ocasionan movimientos en masa (deslizamientos, flujos, caídas de rocas).

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

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

### 6.2.1 Geología Local

La zona de estudio está conformada por rocas sedimentarias de la Formación Miramar y depósitos aluviales (Figura 15, Plano 05) descritos a continuación:



ERA TEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	SÍMBOLO	LITOLÓGÍA
CENOZOICA	CUATERNARIO	RECIENTE	Depósitos aluviales	Qr-al	Conformado por cantos rodados, arenas, limos , arcillas
	TERCIARIO	MIOCENO	Formación Miramar	Tm-mi	Constituida por secuencias de areniscas arcosicas con conglomerados con matriz arenas y lentes de arcillas

Figura 03: Columna cronolitoestratigráfica de la zona de estudio.

### 6.2.1.1 Formación Miramar (Tm-mi)

Conformada por secuencias de areniscas poco compactas con conglomerados que presentan matriz arenosa-arcillosa con lentes de lutitas, en superficie los materiales en mención están cubiertos por arenas de grano grueso producto de la erosión de la roca (arenisca) y conglomerados.

La Formación Miramar aflora en la geoforma descrita como lomas, identificados en los sectores Cabo verde Alto y Santa Helena Alta (Foto 06, 07 y 08).

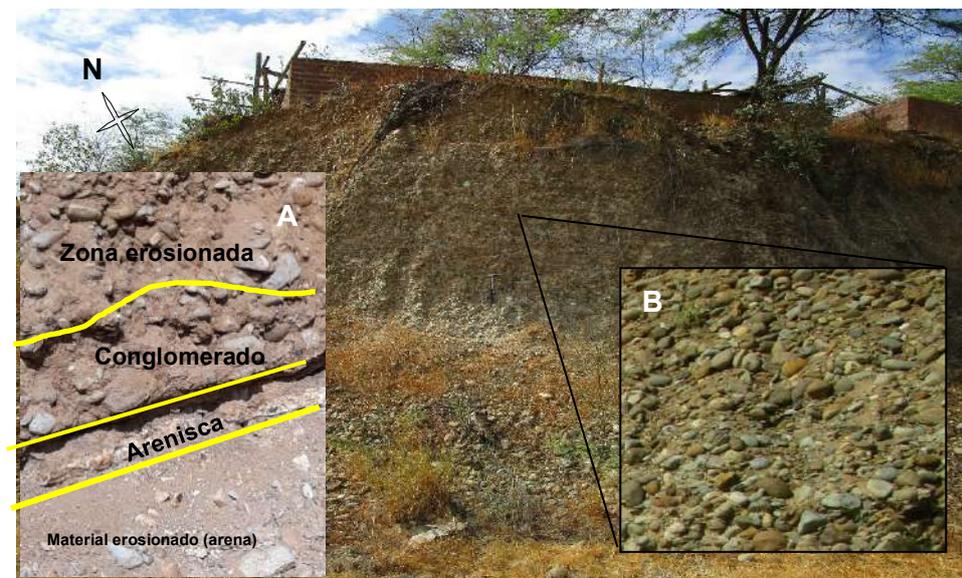


Foto 06: Conglomerados de la formación Miramar ubicados en el distrito de Querecotillo en el sector Santa Elena Alta. (A) Secuencia de conglomerados y areniscas, (B) conglomerados en matriz areno limosa.





Foto 07: Conglomerados en matriz areno limosa de la formación Miramar ubicados en el distrito de Querecotillo entre los sectores Cabo Verde Alto y Santa Elena Alta.



Foto 08: Areniscas de la formación Miramar que afloran en el distrito de Querecotillo en el sector Cabo Verde Alto.



### 6.2.1.2 Depósitos Cuaternarios

Suprayaciendo al sustrato rocoso conformado por rocas marino sedimentaria se encuentran los depósitos cuaternarios de edad Holocena. En la zona de estudio se han delimitado los depósitos aluviales, eólicos y marinos.

#### 6.2.1.2.1 Depósitos aluviales (Qh-al)

Conformados por arenas, limos, con lentes de arcillas que fueron transportados y depositados por la dinámica del río Chira, siendo recientes los que se ubican en ambos márgenes del río en mención y los antiguos los más distales, estos materiales se han reconocido en la geoforma terraza (Foto 09).

Sobre este tipo de materiales se asienta el casco urbano de Querecotillo.



Foto 09: Intercalación de limos y arenas ubicados en la terraza donde se asienta el casco urbano de Querecotillo.

### 6.3 Geodinámica Superficial

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



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

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

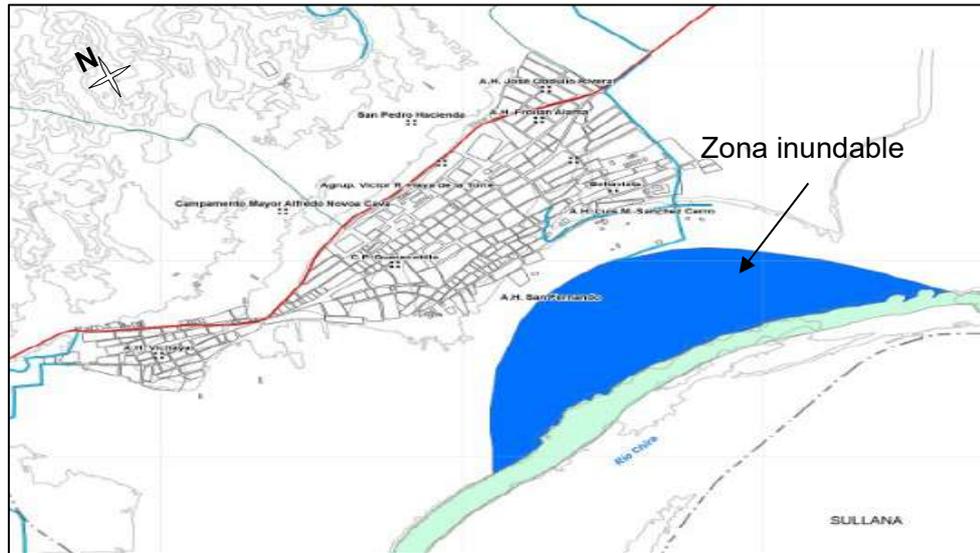
En la ciudad de Querecotillo se ha identificado un tipo de evento geodinámico (Plano 06):

**6.3.1 Inundación.** Producido por el desborde del río Chira en épocas de precipitaciones extremas en la ocurrencia del evento El Niño, cabe mencionar que el caudal del río en mención es controlado por la presa Sullana.

En el año 2017 se produjo el evento El Niño (precipitaciones extremas en el norte del Perú), que aumentó el caudal del río Chira aproximadamente a 3 000 m<sup>3</sup>/seg, registrado en la estación hidrológica La Ardilla que supero al 395 % el caudal habitual (sin evento El Niño), la presa Sullana descargo para el 22 de marzo de 2017 a las 16:00 hrs un caudal registrado de 2 768 m<sup>3</sup>/seg, que causó la inundación de zonas de sembrío de banano, entre otros en Querecotillo y otros distritos, (Figura 06). Fuente: SENAMHI.

Como medida de emergencia ante la inundación en el 2017 (marzo) en el distrito de Querecotillo se optó por la colocación de diques de material acopiado (desechos antrópicos). (Foto 10).





**Figura 06:** Zona de sembrío (polígono azul) inundada por el aumento de caudal en el río Chira a causa de la ocurrencia del evento El Niño en el año 2017 (marzo), la zona fue demarcada según relato de pobladores.



**Foto 10:** Dique construido (marzo 2017) con altura aproximada de 3 metros para evitar la inundación por el aumento del caudal del río Chira como medida de emergencia en el distrito de Querecotillo



En el distrito de Querecotillo se ha realizado el modelo de inundaciones, donde se ha determinado los umbrales de precipitación y caudales que generarían el desborde del río Chira y qué zonas se verían afectados en el distrito en mención (Anexo 04).

En el sector de Cabo Verde Alto, en el año 2017, el campo deportivo de la Institución Educativa N° 15081 fue afectada por inundaciones pluviales a causa de las precipitaciones excepcionales por la ocurrencia del evento El Niño 2017 (Foto 11).



**Foto 11: Zona de inundación pluvial (polígono en color celeste) en el sector Cabo Verde Alto.**

### 6.3.2 Elementos expuestos

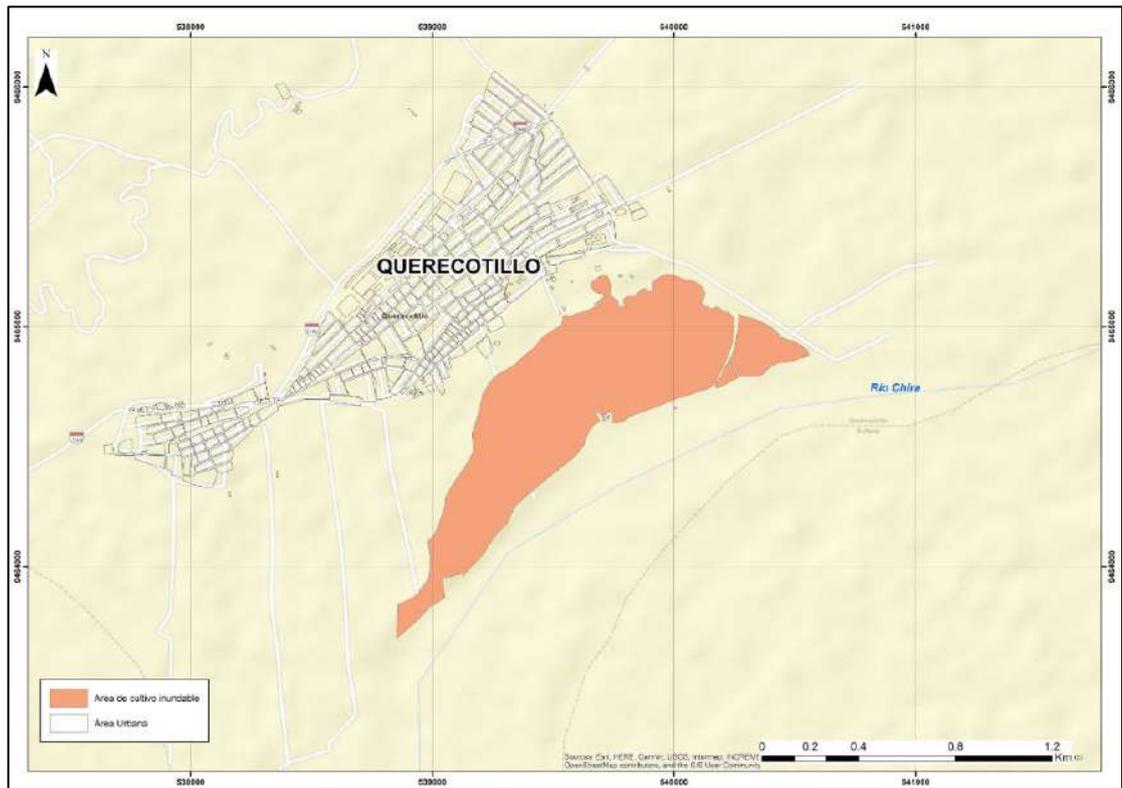
En el área de estudio del distrito de Querecotillo se encuentran los elementos expuestos a nivel económico susceptibles ante el impacto del peligro por ocurrencia de inundaciones del río Chira, delimitado en el capítulo de geodinámica. La información cuantitativa de estos elementos, son estimaciones resultantes de la relación entre el área de influencia del peligro en mención y la ocupación del sector urbano.

**Cuadro 03: Área de cultivo expuesta ante eventos de origen natural**

Evento geodinámico	Hectáreas
Inundaciones	70

Haciendo uso de la superposición del área de influencia de los eventos geodinámicos con el área urbana de la localidad, se reconoció que la infraestructura de interés económico expuesto al evento citado es el área de cultivo (Figura 07).





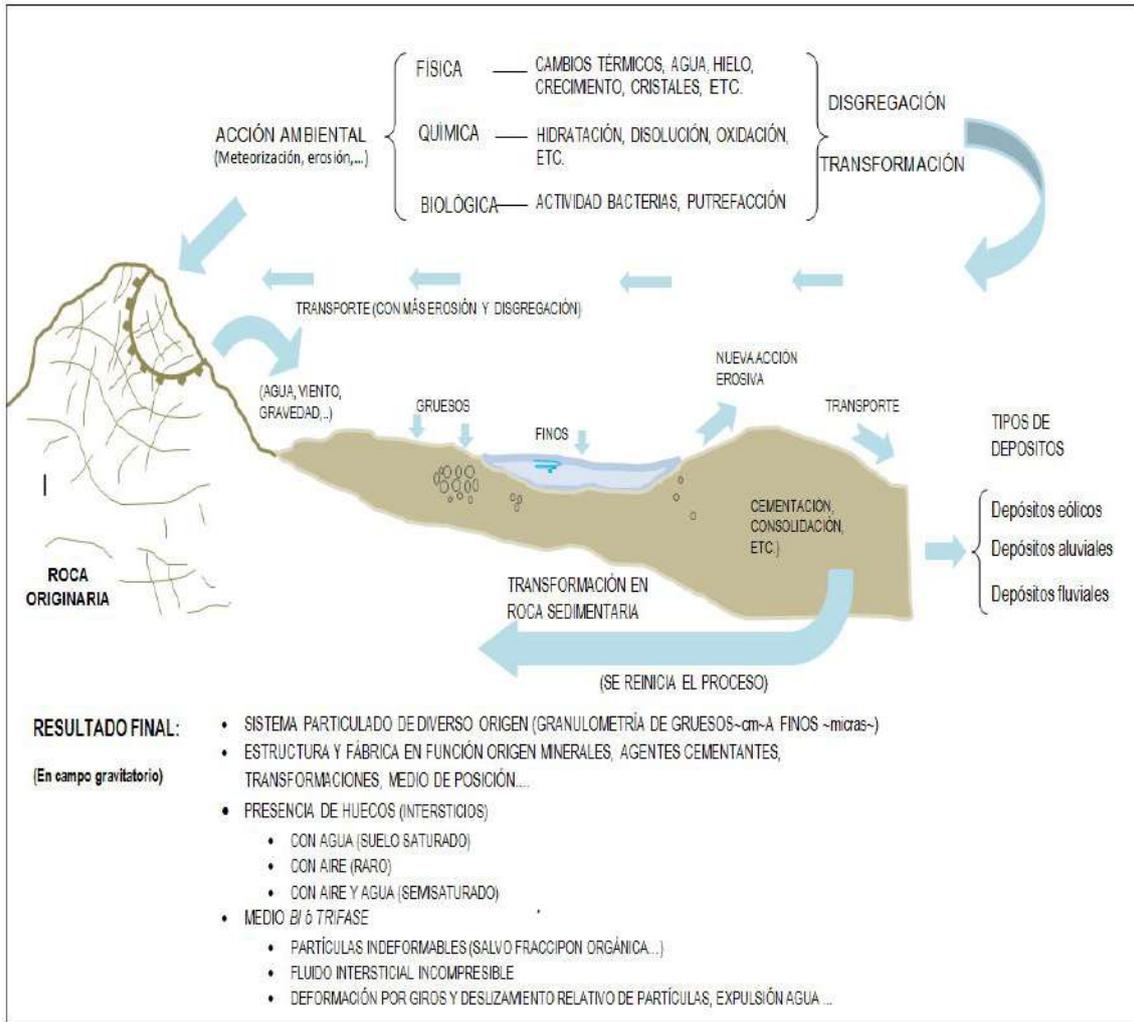
**Figura 07: Delimitación de elementos expuestos ante la ocurrencia de inundaciones en la localidad de Querecotillo.**

## 7. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Los suelos son materiales no consolidados conformados por minerales, materia orgánica, agua y aire entre sus poros; generados a partir de la alteración de la roca madre por agentes atmosféricos mediante procesos de meteorización y erosión hasta formar una cobertura de variado espesor de sedimentos, que posteriormente fueron transportados y depositados en las partes bajas de las cuencas hidrográficas, sobre las cuales se asientan las áreas urbanas.

En el diagrama líneas abajo se indica el origen de los suelos (Figura 08).





**Figura 08: Formación de suelos, (Adaptado de Gonzáles de Vallejo, 2002)**

La geotecnia es la rama de la geología aplicada a la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de cimentación antes mencionados, en condiciones estáticas mediante la aplicación de técnicas de exploración: calicatas, auscultaciones, perforaciones, ensayos de DPL, SPT, etc.); por ello, la clasificación del suelo es de suma importancia para la elaboración de modelos geotécnicos y el diseño de cimentaciones en un terreno específico.

Para la zonificación geotécnica en suelos se hizo uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) a partir de las características granulométricas, la carta de plasticidad de Casagrande, tipo de depósito, consistencia o densidad relativa, permeabilidad y parámetros de resistencia (capacidad de carga portante de los materiales).

En la ciudad de Querecotillo se realizó un estudio geotécnico que consistió en la elaboración de 8 calicatas, 5 densidades de campo, 11 posteos y 12 ensayos de penetración dinámica ligera



(DPL), indicados en el Plano P-07. Las 8 muestras extraídas se analizaron en el laboratorio de mecánica de suelos del IGP y para validar los resultados 3 muestras representativas se enviaron a un laboratorio certificado, con la finalidad de determinar la composición granulométrica, plasticidad, corte directo y realizar el cálculo de la capacidad portante de los suelos de cimentación.

A continuación se detallan las técnicas de exploración geotécnica:

### 7.1 Exploraciones a cielo abierto (calicatas, norma ASTM 420)

Es un método de exploración directo que consiste en realizar una excavación en el terreno para la observación y descripción del suelo. Estas exploraciones se realizaron aproximadamente a 3 m de profundidad a fin de describir los estratos que lo conforman (anexo de geotecnia - fichas de descripción), así como, extraer muestras disturbadas las cuales fueron identificadas y almacenadas en bolsas herméticas con capacidad de 5 kg aproximadamente. Las excavaciones realizadas se localizan en las siguientes coordenadas UTM (Cuadro 04 y Plano P-07).

**Cuadro 04: Ubicación de calicatas**

CÓDIGO DE CALICATA	COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
	ESTE (m)	NORTE (m)			
CQT-01	537727	9464554	45 m	2.70	N.P.
CQT-02	538514	9464681	45 m	1.30	1.1 m
CQT-03	539020	9464723	44 m	1.60	1.4 m
CQT-04	539442	9465126	50 m	1.60	1.4 m
CQT-05	539734	9465404	45 m	2.70	N.P.
CQT-06	538611	9465166	47 m	2.70	N.P.
CQT-07	539090	9465453	47 m	2.70	N.P.
CQT-08	537368	9465727	67 m	2.00	N.P.

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

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



condiciones naturales, en otros casos para obtener el grado de compactación. Esta información es necesaria para desarrollar los ensayos de corte directo, sin embargo, este ensayo no es aplicable en suelos que contengan clastos o materiales gruesos de diámetro mayor a 1 ½ pulgada (38 mm).

En el Cuadro 05 se presentan los resultados de las densidades in situ de las 8 calicatas y la ficha de densidad está adjunta en los Anexos de Geotecnia.

**Cuadro 05: Resultado de densidades in - situ**

CÓDIGO DE CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
CQT-01	DC-QT- 01	2.60	1.66	1.45	12.72
CQT-02	DC-QT- 02	1.10	--	--	15.21
CQT-03	DC-QT- 03	1.40	--	--	9.57
CQT-04	DC-QT- 04	1.40	--	--	14.04
CQT-05	DC-QT- 05	2.60	1.26	1.22	2.54
CQT-06	DC-QT- 06	2.60	1.71	1.60	6.66
CQT-07	DC-QT- 07	2.60	1.42	1.35	4.80
CQT-08	DC-QT- 08	1.80	1.35	1.21	9.82

A partir de los resultados obtenidos en el ensayo de densidad de campo y laboratorio, los suelos de cimentación en la ciudad de Querecotillo presentan rangos de densidad entre 1.26 y 1.71 g/cm<sup>3</sup>, para suelo húmedo; y entre 1.21 y 1.60 g/cm<sup>3</sup>, para suelo seco; es decir, los materiales identificados en las calicatas corresponden a arenas y arcillas, de acuerdo a la referencia de la Tabla A – Anexo Geotecnia.

## 7.2. Exploraciones con posteadora manual

Se define posteadora como un barredor manual en forma de “T” que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas) hasta una profundidad de 5 a 6 m a fin de obtener muestras del suelo. En cada una de las perforaciones se llevó a cabo una detallada descripción de los tipos de suelos encontrados, si bien es cierto, las muestras extraídas se obtienen trituradas y completamente alteradas, sin embargo, permiten conocer el tipo de suelo y contenido de humedad que presenta. Una de las restricciones para la ejecución de este ensayo es la presencia de gravas y gravillas (la cuchara saca muestra se entrampan con este tipo de suelos).



La distribución de las exploraciones se efectuó entre los puntos de las calicatas con la finalidad de abarcar toda el área de estudio y así obtener una mejor zonificación de los suelos de la ciudad de Querecotillo. La ubicación y resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 06, mientras que el registro de perforaciones se describe en el Anexo de Geotecnia.

**Cuadro 06: Ubicación de postes y clasificación de suelos SUCS**

CÓDIGO DE POSTEO	COORDENADAS UTM		ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD (m)	TIPO DE SUELO	NIVEL FREÁTICO (m)
	ESTE (m)	NORTE (m)				
POST-01	537750	9464681	56 m	1.50	ML	0.50
POST-02	537982	9464395	53 m	1.00	SM	N.P.
POST-03	538134	9464492	54 m	2.70	SP y SM	N.P
POST-04	538759	9464630	45 m	1.50	SC y CL	1.10
POST-05	538871	9465447	56 m	0.35	SM	N.P
POST-06	539181	9464943	46 m	0.60	SP	N.P
POST-07	539602	9465439	60 m	1.60	SM y CH	N.P
POST-08	539319	9465563	55 m	2.80	SM y SP	N.P
POST-09	539198	9466127	46 m	1.60	SM y CL	1.00
POST-10	538706	9466700	68 m	2.20	SM y SP	N.P
POST – 11	537929	9465623	65 m	1.00	SC	N.P

### 7.3. Ensayo de penetración dinámica ligera-LDPT (norma DIN 4094)

El DPL es un equipo de campo de registro continuo dónde se contabiliza y registra el “N”, que es el número de golpes dados por un martillo de 10 Kg, el cual se deja caer por gravedad desde una altura de 0.50 m (medida desde la parte superior del tambor de acero) para hincar una varilla de acero de 1.0 m de longitud, en cuyo extremo inferior se encuentra una punta cónica de 60°. Este proceso se repite para profundizar tramos de 10 cm con la finalidad de estimar el ángulo de fricción de suelos específicos, que ayudarán a calcular mediante fórmulas empíricas la capacidad portante (resistencia al corte) de los suelos de cimentación en Kg/cm<sup>2</sup>, además, se puede tener las propiedades de compacidad de los suelos.



La ventaja del instrumento es ser un equipo muy práctico y de fácil transportación, sin embargo, se restringe su aplicación a terrenos arenosos, areno-arcillosos y limo-arenosos, no recomendables a utilizarse en gravas, fragmentos gruesos, conglomerados y terrenos rocosos. Por otro lado, los ensayos de DPL deben ubicarse a inmediaciones de una o dos calicatas donde se tienen suelos conocidos con la finalidad de conocer la resistencia al corte de los distintos estratos. La ficha del ensayo se adjunta en el Anexo de Geotecnia.

En el Cuadro 07 se indica la ubicación de los ensayos de Penetración Dinámica Ligera (DPL) realizados en las inmediaciones de la ciudad de Querecotillo, registrándose el número de golpes y el ángulo de fricción interna calculado en base a los parámetros de compacidad y densidad relativa según la fórmula de Meyerhof (1956).

$$\Phi = 25^\circ + 0.15 * Dr$$

Dónde:

$\Phi$  = Ángulo de fricción interna

Dr = Densidad relativa

**Cuadro 07: Ubicación de ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) y parámetros obtenidos**

CÓDIGO DE DPL	COORDENADAS UTM		ELEV. (m.s.n.m.)	PROF. (m)	N° DE GOLPES	$\Phi$
	ESTE (m)	NORTE (m)				
DPL-01	537727	9464554	45	2.80	7	28.9
DPL-02	538275	9464598	57	2.80	8	29.3
DPL-03	538514	9464681	45	1.80	4	27.6
DPL-04	539020	9464723	44	2.80	4	27.6
DPL-05	539442	9465126	45	2.60	2	26.8
DPL-06	539786	9465366	50	2.80	11	30.4
DPL-07	539090	9465453	40	2.80	3	27.2
DPL-08	538611	9465166	40	2.80	9	29.6
DPL-09	537368	9465727	70	0.90	25	34.7
DPL-10	538810	9466484	66	0.20	45	39.7
DPL-11	539081	9466654	57	2.30	10	30
DPL-12	539244	9466447	62	0.20	45	39.7



La compacidad relativa y consistencia de suelos se infiere a partir de la Tabla B del Anexo Geotecnia. Según los parámetros obtenidos se establece que en 9 de los ensayos se alcanzó una profundidad mayor a 1 m y en 2 DPL solo se penetró 0.20 m debido a la presencia de materiales granulares constituidos por clastos angulosos o subangulosos de diámetro superior a 1 ½". Por otro lado, los suelos identificados en los DPL 1, 2, 3, 4 y 8 presentan compacidad baja y se ubican en la parte suroeste de la ciudad de Querecotillo, los suelos con compacidad muy baja están ubicados al sureste de la ciudad en mención en inmediaciones de la calle San Fernando y más al sur de ésta, mientras que los de compacidad media identificados en los DPL 6, 9 y 11 se localizan al oeste y al noroeste de la ciudad, principalmente en las nuevas zonas de expansión urbana delimitadas al noroeste.

#### **7.4 Resultados de los ensayos de laboratorio**

Los ensayos practicados a las muestras se realizaron en base a las normas establecidas por la *American Society for Testing Materials* (ASTM), cuyos resultados se describen a continuación:

##### **7.4.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) en la ciudad de Querecotillo**

El Sistema SUCS abarca suelos granulares y finos, diferenciados por la cantidad de material que pasa la malla N° 200 (Juárez & Rico, 2005), mientras que entre los granulares se encuentran dos grupos como gravas y arenas, separadas con la malla N° 4.

En base a la información geotécnica recopilada de estudios anteriores, así como, de los resultados de las exploraciones (calicatas, posteos y DPL) realizados en la ciudad de Querecotillo, y de los ensayos de laboratorio de Mecánica de Suelos (granulometría y límites Atterberg) efectuados a las muestras extraídas, descritos en el Anexo de Geotecnia - Resultados de Laboratorio, se han identificado 6 tipos de suelos (Cuadro 08 y Plano P-08).

##### **- Suelo tipo GP**

Grava mal graduada que se caracteriza porque no retiene agua debido a los espacios existentes entre partículas (huecos intersticiales). Constituidos por suelos de baja compacidad. Se identificó en el posteo 11 y aproximadamente abarcan el 22% del área de trabajo.



- **Suelo tipo SP**

Arena mal graduada, predominan el diámetro promedio de 0.015 mm grano fino, constituida por suelos de compacidad media a alta. Abarcan aproximadamente el 32% del área de estudio y se identificaron en los posteos 06, 08 y 10.

- **Suelo tipo SM**

Arena limosa con contenido de humedad entre 2 y 13 %, constituidas por suelos de compacidad media a baja. Abarcan el 13 %, aproximadamente, del área de estudio y se identificó en las calicatas CQT-01, 05 y 06, así como en los posteos 3 y 5.

- **Suelo tipo ML**

Limos inorgánicos que presentan plasticidad baja a media, con contenido de humedad entre 6.66 % y 15.21 %, constituyen suelos de compacidad baja. Abarcan el 12 % de la zona de estudio y se identificaron en la calicata CQT-02, 03 y 07, así como en el posteo 01.

- **Suelo tipo CL**

Arcillas inorgánicas de plasticidad media, con contenido de humedad de 14.04 %, constituyen suelos de compacidad media a baja. Abarcan el 13 % de la zona de estudio. Se identificó cerca a la quebrada La Ballena, en la calicata CTQ- 04, así también en los posteos 02, 04, 07 y 09.

- **Suelo tipo MH**

Limos inorgánicos, de alta plasticidad, con contenido de humedad de 9.82 %, constituyen suelos de compacidad media a alta. Abarcan el 8 % de la zona de estudio y se identificó en la calicata CTQ- 08.



**Cuadro 08: Clasificación SUCS de los suelos de las ocho (8) calicatas elaboradas en la ciudad de Querecotillo**

CÓDIGO DE CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	PRESENCIA DE AGUA		GRANULOMETRÍA (%)			LÍMITES ATTERBERG (%)			CLASIFICACIÓN SUCS	DESCRIPCIÓN
		NIVEL FREÁTICO A (m)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	GRAVAS (>4.76 mm)	ARENAS (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS (<0.074 mm)	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	ÍNDICE PLÁSTICO		
CQT - 01	2.70	N.P	12.72	1.2	77.6	21.21	33.00	N.P	N.P	SM	Arena limosa
CQT - 02	1.30	1.10	15.21	1.0	17.9	81.14	35.50	29.30	6.20	ML	Limo inorgánico
CQT - 03	1.60	1.40	9.57	1.7	23.5	74.80	44.00	N.P	N.P	ML	Limo inorgánico
CQT - 04	1.60	1.20	14.04	0	2.30	97.70	32.06	22.56	9.50	CL	Arcilla inorgánica
CQT - 05	2.70	N.P	2.54	3.3	66.2	30.52	36.50	N.P	N.P	SM	Arena limosa
CQT - 06	2.70	N.P	6.66	6.5	59.2	34.31	28.00	N.P	N.P	SM	Arena limosa
CQT - 07	2.70	N.P	4.80	--	4.15	95.85	28.22	22.93	5.29	ML	Limo inorgánico
CQT - 08	2.00	N.P	9.82	--	6.95	93.05	66.15	36.54	29.61	MH	Limo inorgánico

Donde: N.P. = No presenta



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

Este ensayo permite determinar la resistencia al esfuerzo cortante 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).

Los valores finales de la capacidad portante de los suelos en la ciudad de Querecotillo están basados en los datos del laboratorio de Mecánica de Suelos (Anexo de Geotecnia - Resultados de Laboratorio), corroborados con datos teóricos de los parámetros de ángulo de fricción y cohesión de Terzaghi e información de DPL realizados en campo, haciendo uso de las fórmulas de falla general o local según el tipo de suelo.

### 7.5.1 Capacidad de carga portante ( $q_{ad} = \frac{q_u}{F_s}$ )

Es la máxima presión ejercida por una cimentación transmitida a un suelo sin que se produzcan asentamientos excesivos, es decir, que la presión de la cimentación no sea mayor a la admisible, manteniendo el mismo factor de seguridad especificado en la Norma E 0.50 de diseño de cimentación.

Los resultados de capacidad de carga portante de las 8 muestras de suelos extraídas en la ciudad de Querecotillo se presentan en el Cuadro 09.

**Cuadro 09: Capacidad de carga portante de las muestras extraídas en la ciudad de Querecotillo**

CÓDIGO DE MUESTRA	Capacidad de carga última (kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga portante (Kg/cm <sup>2</sup> )
CQT - 01	1.95	0.65
CQT - 02	2.43	0.81
CQT - 03	2.44	0.81
CQT - 04	2.73	0.91
CQT - 05	1.48	0.49
CQT - 06	2.01	0.67
CQT - 07	2.42	0.81
CQT - 08	2.96	0.99



DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m y ancho:1.00
----------------------------	----------------------------------

**Fuente: Anexo de Geotecnia. Datos del ensayo de DPL y SPT corregidos y datos de Terzaghi, Dónde: F.G: Falla General, FL: Falla Local**

Según los valores del ángulo de fricción corregido a partir de la correlación del "N" del DPL en función al del SPT y los datos de cohesión de los suelos obtenidos, mediante el corte directo realizado en el laboratorio de Mecánica de Suelos, se determinó las capacidades portantes de los suelos investigados solo para los DPL que alcanzaron una profundidad de cimentación de 1 m (Cuadro 10).

**Cuadro 10: Capacidad de carga portante (Criterio de falla general y local) en base al ángulo de fricción corregido del N del DPL vs SPT y cohesión obtenida del ensayo de corte directo.**

CÓDIGO DE DPL	Capacidad de carga última (kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de carga portante(Kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de corte
DPL-01	2.30	0.77	Falla general
DPL-02	3.59	1.20	Local
DPL-03	3.17	1.06	Local
DPL-04	5.44	1.81	Falla general
DPL-05	3.67	1.22	Local
DPL-06	2.35	0.78	Falla general
DPL-07	3.40	1.13	Local
DPL-08	3.19	1.06	Falla general
DPL-11	2.92	0.97	Falla general
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1 m y ancho:1 m		

De los resultados citados anteriormente, y tomando en cuenta la Tabla D – Anexo Geotecnia, se ha determinado que la zona urbana de la ciudad de Querecotillo en su mayoría ha sido construida con cimentaciones de 1 m de profundidad. Ante ello se ha clasificado los suelos con la siguiente capacidad de carga portante.



### 7.5.1.1 Tipos de capacidad de carga portante

En la localidad de Querecotillo se han identificado los siguientes tipos de capacidad de carga portante:

#### **A) Capacidad de carga portante muy baja**

Comprende rangos de capacidad de carga portante menores a 1 kg/cm<sup>2</sup>, se encuentra representado por el tipo de suelo arena limosa (SM), limos inorgánicos (ML), arcillas de baja plasticidad (CL) y limos de alta plasticidad (MH), hasta una profundidad de 1 m. Representan el 100% de los suelos de cimentación de la ciudad de Querecotillo.

## 8. DISCUSIONES

Estudios regionales (geología del cuadrángulo de Sullana 10 b, a escala 1: 100,000) describe a la Formación Miramar constituida por secuencias de conglomerados con areniscas para el distrito de Querecotillo, el cartografiado realizado a escala local de 1: 15 000 en el distrito en mención, en el sector Cabo Verde Alto se han reconocido estratos de lutitas erosionados, además de intercalaciones de conglomerados con areniscas, de forma que, el presente informe contribuye a complementar información no registrada a escalas generales.



## SEGUNDA PARTE: GEOFÍSICA Y ZONIFICACIÓN SISMOGEOTÉCNICA

### 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 2019 el Proyecto “**Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica**” y como parte del mismo, las Unidades de Ingeniería Sísmica y Geodinámica Superficial de 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 los siguientes distritos:

**La Arena**, distrito La Arena, provincia y departamento de Piura.

**La Unión**, distrito La Unión, provincia y departamento de Piura.

**Morropón**, capital del distrito y provincia de Morropón, departamento de Piura.

**Máncora**, distrito de Máncora, provincia de Talara, departamento de Piura.

**Talara**, distrito de Pariñas, provincia de Talara, departamento de Piura.

**Querecotillo**, distrito de Querecotillo, provincia de Sullana, departamento de Piura.

**Las Lomas**, distrito Las Lomas, provincia y departamento de Piura.

**Tambo Grande**, distrito de Tambo Grande, provincia y departamento de Piura.

De acuerdo con la historia sísmica del Perú, la región norte ha sido afectada en varias oportunidades por eventos sísmicos de variada magnitud que han generado altos niveles de sacudimiento del suelo, puesta en evidencia con los daños observados post-sismo en el departamento de Piura (Silgado, 1978; Tavera et al. 2016). Al ser los sismos cíclicos, es de esperarse que, en el futuro las mismas ciudades y/o áreas urbanas sean afectadas por nuevos eventos sísmicos con la misma o mayor intensidad. Entonces, no es tan importante el tamaño del sismo, sino la intensidad del sacudimiento del suelo, la educación de la población y la calidad de las construcciones.

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 información sísmica, tsunamis, geofísica, geológica, geodinámica, geomorfológica y geotécnica. 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 adecuadas para cada tipo de suelo.

Finalmente, 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.- Objetivos

El principal objetivo del presente estudio es obtener el Mapa de Zonificación Geofísica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para el urbana del distrito de Querecotillo, provincia de Sullana y departamento de Piura, ver Figura 1. Asimismo, es de interés que las autoridades locales y regionales dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo de desastres ante la ocurrencia de sismos, lo cual conlleva a mejorar la calidad de vida de sus pobladores, así como proyectar hacia el futuro una adecuada expansión urbana.



Figura 1. Vista panorámica de la Plaza de Armas y la Catedral del área urbana de Querecotillo.



## 1.2.- Área de estudio

El ámbito de estudio corresponde al área urbana del distrito de Querecotillo, se encuentra al norte de la zona occidental del Perú y forma parte de los 8 distritos de la provincia de Sullana, departamento de Piura, ver Figura 2. Situado en el extremo norte del sector central del departamento de Piura, a una altitud promedio de 65 m.s.n.m., limita por el Norte con el distrito de Lancones, al Sur el distrito Salitral, al Este el distrito de Marcavelica de la provincia de Sullana y al Oeste con el río Chira.

El cartografiado y mapa base para este estudio es de 1:10000, tiene un área total de 2.7 km<sup>2</sup> y la población beneficiada con el presente estudio es de 26,395 habitantes (INEI, 2017).

Según la historia sísmica en Piura, en los años 1814, 1912, 1953, 1963 y 2014 (documentado por Silgado, 1978, Sieberg, 1930 y Tavera, 2016), estos distritos fueron afectados por sismos de gran magnitud que sacudieron los suelos con gran intensidad y como consecuencia causó daños materiales y personales en diversas localidades de esta región.



Estudio de Zonificación Sismo-geotécnica del distrito de Querecotillo



Figura 2. Ubicación del área de estudio.

### 1.2.1.- Antecedentes

La historia sísmica del Perú ha mostrado que su borde occidental presenta un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos y de acuerdo a su magnitud, muchos de ellos han producido daños importantes en ciudades y localidades distribuidas cerca de la zona costera. La ocurrencia de efectos secundarios como asentamientos, licuación de suelos, derrumbes, caídas de roca y tsunamis propiciaron el incremento de pérdidas humanas y materiales en el área epicentral (Silgado, 1978; Dorbath et al., 1990; Tavera y Buforn, 2001).

Por otro lado, a partir de los años 80, muchas de las ciudades costeras han soportado procesos continuos de migración por la población proveniente de las provincias del interior del país y, debido a la falta de un adecuado ordenamiento territorial, la población inmigrante ha ocupado áreas de alto riesgo ante la ocurrencia de peligros como los sismos, tsunamis, deslizamientos y otros efectos secundarios. A estas condiciones se suma el hecho de que las viviendas fueron construidas de manera inadecuada, sin tener en cuenta lo establecido en la norma E.030 de Diseño Sismorresistente. Asimismo, en algunas ciudades las viviendas se asientan en laderas de cerros, riveras de ríos, cauces de quebradas secas y zonas de terrazas inundables, incrementando su riesgo sísmico.

A partir del año 2012 y dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres”, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) viene realizando estudios de Zonificación Geofísica-Geotécnica para las diferentes áreas urbanas que se encuentran ubicadas en su mayoría a lo largo de la costa del Perú.

Para el área urbana de Querecotillo, se ha recopilado estudios anteriores referentes a la geología, geotécnica, sísmica y geofísica realizados por diversos investigadores e instituciones. Entre los principales documentos técnicos consultados, se tiene:

En el 2017, CENEPRED realiza el estudio “**Informe de evaluación de riesgo por inundación pluvial en el CC.PP. de Querecotillo, distrito de Querecotillo, provincia de Sullana, Departamento de Piura**”, en este sector identificaron depósitos aluviales recientes compuestos por fragmentos heterogéneos de boloneras, gravas, arenas, limos y arcillas, que conforman llanuras antiguas y/o niveles de terrazas adyacentes a los valles del río Chira; y la formación Miramar, compuesta por areniscas, de grano fino color amarillo con limolitas, poco compactas. Se encuentra caracterizada por tener una pendiente suave de 0° a 5°. Las lluvias intensas durante el “Niño Costero 2017”, categorizó a Querecotillo como extremadamente lluvioso donde en el mapa de peligro por inundación pluvial zonifica al área urbana como muy alto.

En el 2016, PRASDES, IDEAM, INAMHI, SENAMHI, CIIFEN, SYKE, FMI, IRD y FORMIN.FINLAND.FI, presentan el estudio “**Implementación de Sistema de Alerta Temprana (SAT) ante inundaciones en el distrito de Querecotillo (cuenca Catamayo-Chira)**”, indican



que el año 1970, el distrito de Querecotillo fue remecido por un terremoto de 8.9 grados, dejándolo completamente destruido. En 1983 y 1998, las lluvias torrenciales y las inundaciones provocadas por el fenómeno de El Niño cubren gran parte del área urbana, centros poblados y terrenos de cultivo. De acuerdo a la litología el 50% cuenta con suelos con gran contenido de arcillas de textura fina, la zona de emplazamiento de Querecotillo corresponde a suelos arenosos de origen fluvial de textura gruesa que favorecen a la infiltración. En este estudio se obtiene el mapa local de riesgo de inundaciones, en el cual identifican que más del 80% de área urbana llegará a inundarse ante la ocurrencia de periodos con fuertes precipitaciones.

En el 2014, el IGP mediante el proyecto de cooperación con el Banco Mundial presenta el estudio **“Re-evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú”**, considerando que el Perú se encuentra en una región altamente sísmica se realiza el estudio de peligro sísmico con bases sísmicas actualizadas. Se definen nuevas fuentes sismogénicas y se genera los mapas de aceleración horizontal (PGA), los resultados muestran que Querecotillo presenta aceleraciones de hasta 405 gals para un periodo de retorno de 500 años.

En 1980 el ANA presenta el estudio **“Inventario y evaluación nacional de aguas subterráneas Cuenca del Río Chira”**, en los depósitos aluviales del río Chira se puede inferir que las etapas de deposición y erosión de sedimentos que han dado lugar a la construcción y socavamiento en forma alternada, y esta unidad debe tener una potencia considerable del total de los depósitos aluviales. Con estudios de Sondaje Eléctrico Vertical (SEV) en sectores del distrito de Querecotillo existe un horizonte resistente superficial del orden de 10 a 15 metros desde superficie, luego se presentaría un acuífero permeable conformado por arenas, limos y arcillas. Además, la profundidad del techo del substrato impermeable para el horizonte acuífero profundo, puede estimarse de entre 30 a 50 metros, distrito de Querecotillo, aguas debajo de Querecotillo se observan resistividades muy bajas, a consecuencia del agua salobre y a depósitos de sedimentos finos encontrándose en algunos sectores a partir de 3 a 5 metros.

### 1.3.- 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 físicas y dinámicas del suelo. Estos controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en superficie después de ocurrido un evento sísmico.

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de zonificación sísmica-geotécnica y el resultado es considerado como una de las herramientas más importantes para minimizar los daños producidos por los sismos. 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, 2006; 2018).

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

#### **1.4.- Zonificación, Norma Técnica E.030**

En el Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar lo establecido por la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones, modificada según Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda. Básicamente, esta norma considera los perfiles de suelos en función de sus propiedades físicas, tomando en cuenta la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte, o alternativamente, para suelos granulares, considera el promedio ponderado de los  $N_{60}$  obtenidos mediante un ensayo de penetración estándar (SPT), o el promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada  $S_u$  para suelos cohesivos. Se establece 5 perfiles:

- **Perfil Tipo  $S_0$ : Roca Dura**, corresponde a las rocas sanas con velocidades de propagación de ondas de corte ( $V_s$ ) mayor a 1500 m/s.
- **Perfil Tipo  $S_1$ : Roca o Suelos Muy Rígidos**, a este tipo corresponden rocas con diferentes grados de fracturación, de macizos homogéneos y los suelos muy rígidos con velocidades de propagación de onda de corte  $V_s$ , entre 500 y 1500 m/s.
- **Perfil Tipo  $S_2$ : Suelos Intermedios**, son suelos medianamente rígidos, con velocidades de propagación de onda de corte  $V_s$  entre 180 y 500 m/s.
- **Perfil Tipo  $S_3$ : Suelos Blandos**, corresponden suelos flexibles con velocidades de propagación de onda de corte  $V_s$  menor o igual a 180 m/s.
- **Perfil Tipo  $S_4$ : 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 1: 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)

Para este estudio, la Zonificación Geofísica - Geotécnica de las áreas urbanas se realiza en función de las características mecánicas, físicas y dinámicas de los suelos que conforman el terreno de cimentación del área de estudio y de las consideraciones dadas por la Norma E.030. En tal sentido y de acuerdo a los estudios realizados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), se establece la existencia de 4 zonas cuyas características son:

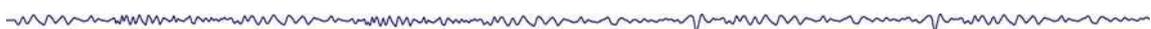
**ZONA I:** Comprende a suelos Tipo S1, cuyo periodo predominante varía entre 0.1 y 0.3 segundos.

**ZONA II:** Comprende a suelos Tipo S2 y el dominio de periodos entre 0.3 y 0.5 segundos.

**ZONA III:** Comprende a suelos Tipo S3, cuyos periodos predominantes son de 0.5 y 0.7 segundos.

**ZONA IV:** Comprende a suelos Tipo S4 (condiciones excepcionales) y está conformada por:

**-Zona IVa:** Depósitos eólicos, fluviales, marinos y/o suelos pantanosos.



**-Zona IVb:** Zonas de topografía irregular, susceptibles a generar derrumbe, flujos detríticos.

**-Zona IVc:** Depósitos de relleno sueltos, desmontes heterogéneos, rellenos sanitarios.

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, el 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.



## 2.- METODOLOGÍA Y DATOS

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

### 2.1.- Método de Razones Espectrales (H/V)

El método de razones espectrales (H/V) fue propuesto por Nakamura (1989) para caracterizar la respuesta dinámica del suelo y en algunos casos, estimar su amplificación, ante la sollicitación sísmica. El método hace uso de registros de vibración ambiental que contienen información sobre las características físicas de los suelos en sus 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 a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

La adquisición de datos en campo se realizó durante 1 día del mes de marzo del 2019. Durante este periodo se recolectaron 60 registros de vibración ambiental utilizando sensores Lennartz y registradores CityShark II (Figura 3). Los puntos de adquisición de datos se distribuyen espacialmente formando una grilla de puntos en el área urbana y zonas de expansión, con intervalos de 200 metros en promedio. Cada registro de vibración ambiental, tiene una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de datos para su posterior análisis.

En la Figura 4, se muestra la disposición del equipo sísmico durante el registro de información, además de ejemplos de registros de vibración ambiental para sus tres componentes (vertical, E-O y N-S).

Para aplicar la técnica de razones espectrales H/V, se calcula la Transformada Rápida de Fourier para cada componente de registro a fin de obtener los cocientes espectrales y relacionar ambas componentes horizontales con la vertical (E-O/V; N-S/V). Finalmente, en cada espectro se procede a identificar la frecuencia predominante, para ello se considera picos y/o rangos con amplificaciones relativas de al menos 2 veces y que fluctúe en el rango de interés entre 0.5 a 20 Hz (Figura 5).



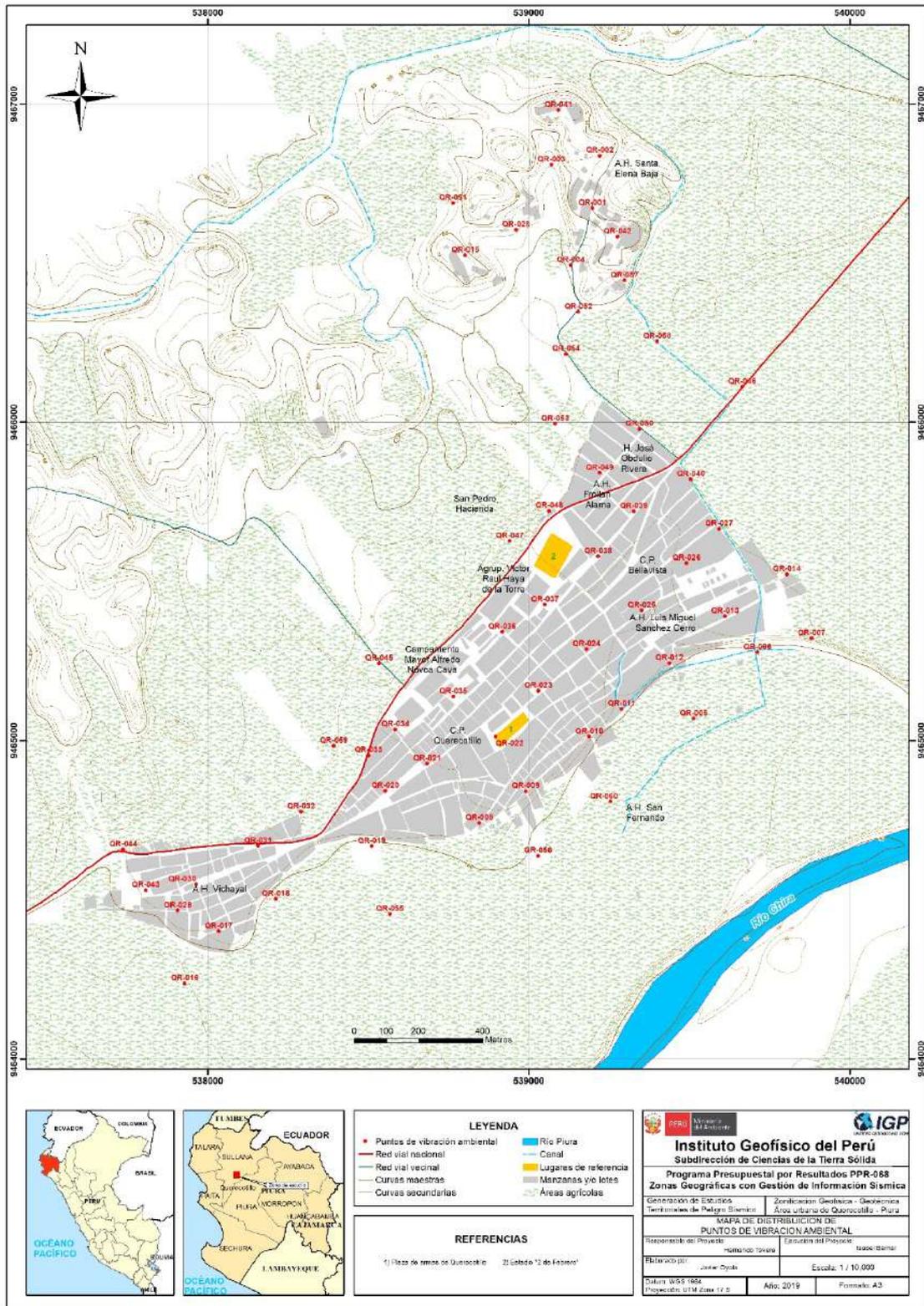
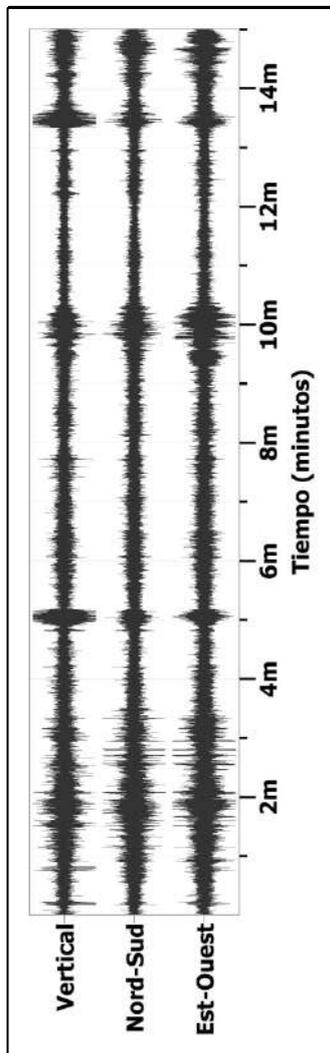


Figura 3. Distribución espacial de los puntos de registros de vibración ambiental del área urbana de Querecotillo.



QR - 19



QR - 49

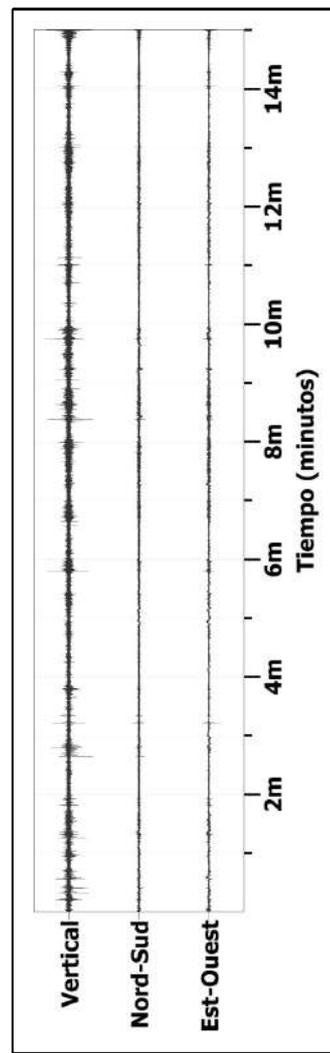
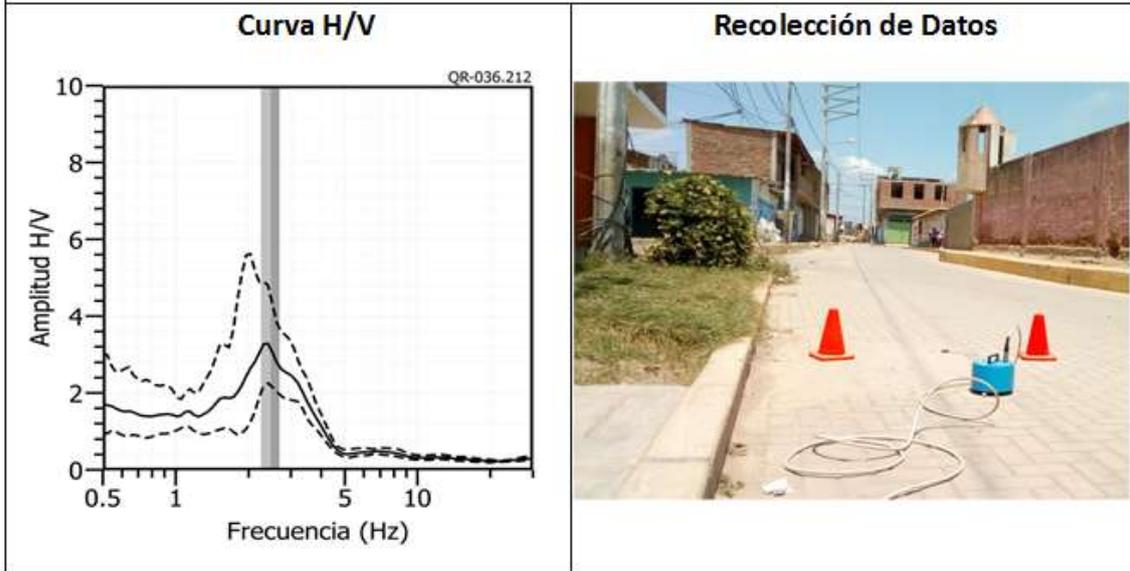
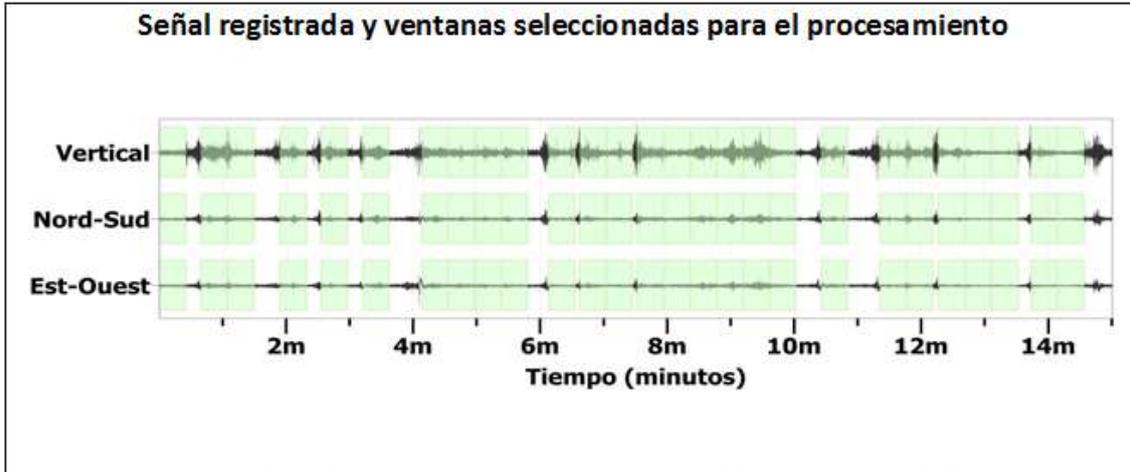


Figura 4. Disposición del equipo sísmico para la adquisición de los registros de vibración ambiental. Ejemplos de registros obtenidos sobre una zona con ruido transitorio (QR-19) y otro con ruido de fondo constante (QR-49). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.



**Zonificación Sísmica - Geotécnica**  
**ÁREA URBANA DE QUERCOTILLO**  
**Frecuencias predominantes del Suelo**

QR-36



Interpretación de resultados				
Dudoso	Pico(s) H/V (Hz)	f0	f1	f2
Ningún pico	<input checked="" type="checkbox"/>	2.47	-	-
Observaciones				
Var. azimutal	Homogénea		Amplitud max. Entre y°	

Figura 5. Ejemplo de la ficha H/V para el punto QR-36 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 líneas discontinuas y Abajo resultados.



### 2.1.1.- Procesamiento y análisis

Para el análisis de la información sísmica se debe considerar los siguientes criterios: 1) Las frecuencias predominantes menores a 1.0 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).

En la Figura 5, se muestra un ejemplo del análisis, procesamiento y resultados obtenidos para el punto QR-36. El registro es sectorizado en ventanas de 20 segundos y analizado individualmente, para luego obtener el promedio espectral para las curvas, y así identificar el rango de las frecuencias y/o periodos predominantes, que caracterizan al suelo bajo el punto de observación. También es visible el factor de amplificación del suelo ante la incidencia de las ondas sísmicas.

### 2.2.- Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

El método sísmico de MASW permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto, conocer los espesores de las capas y la velocidad de propagación de las ondas de corte (Vs) en el subsuelo. Este método permite analizar la dispersión de ondas superficiales (ondas Rayleigh) generadas por una fuente de energía impulsiva y registrada por arreglos lineales de estaciones sísmicas.

Para el registro de datos, según la técnica MASW se sigue el procedimiento y se utiliza un equipo sísmico 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 utiliza un martillo de 20 lb. Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido y el espaciamiento entre geófonos, fueron variables ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio y de la accesibilidad a los puntos seleccionados.

En el área urbana de Querecotillo se realizaron 05 líneas MASW codificadas como LS01-QR y LS05-QR (ver Tabla 2). La distribución espacial de estas líneas se muestra en la Figura 6. Durante los trabajos de campo, los datos y/o sismogramas eran visualizados a fin de verificar su calidad de registro y los niveles de ruido de fondo. En la Figura 7, se muestra como ejemplo el registro obtenido considerando un golpe de martillo a 3 metros al final del arreglo lineal.



Tabla 2. Coordenadas y características de los arreglos lineales MASW realizados en Querecotillo.

Arreglo lineal MASW	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)
LS01-QR	539154	9466886	85	4	92
	539121	9466974	85		
LS02- QR	538827	9465160	68	4	92
	538761	9465100	68		
LS03- QR	539234	9464873	57	4	92
	539205	9464964	58		
LS04- QR	539487	9465655	63	4	92
	539560	9465711	63		
LS05- QR	538111	9464564	65	4	92
	538029	9464523	66		



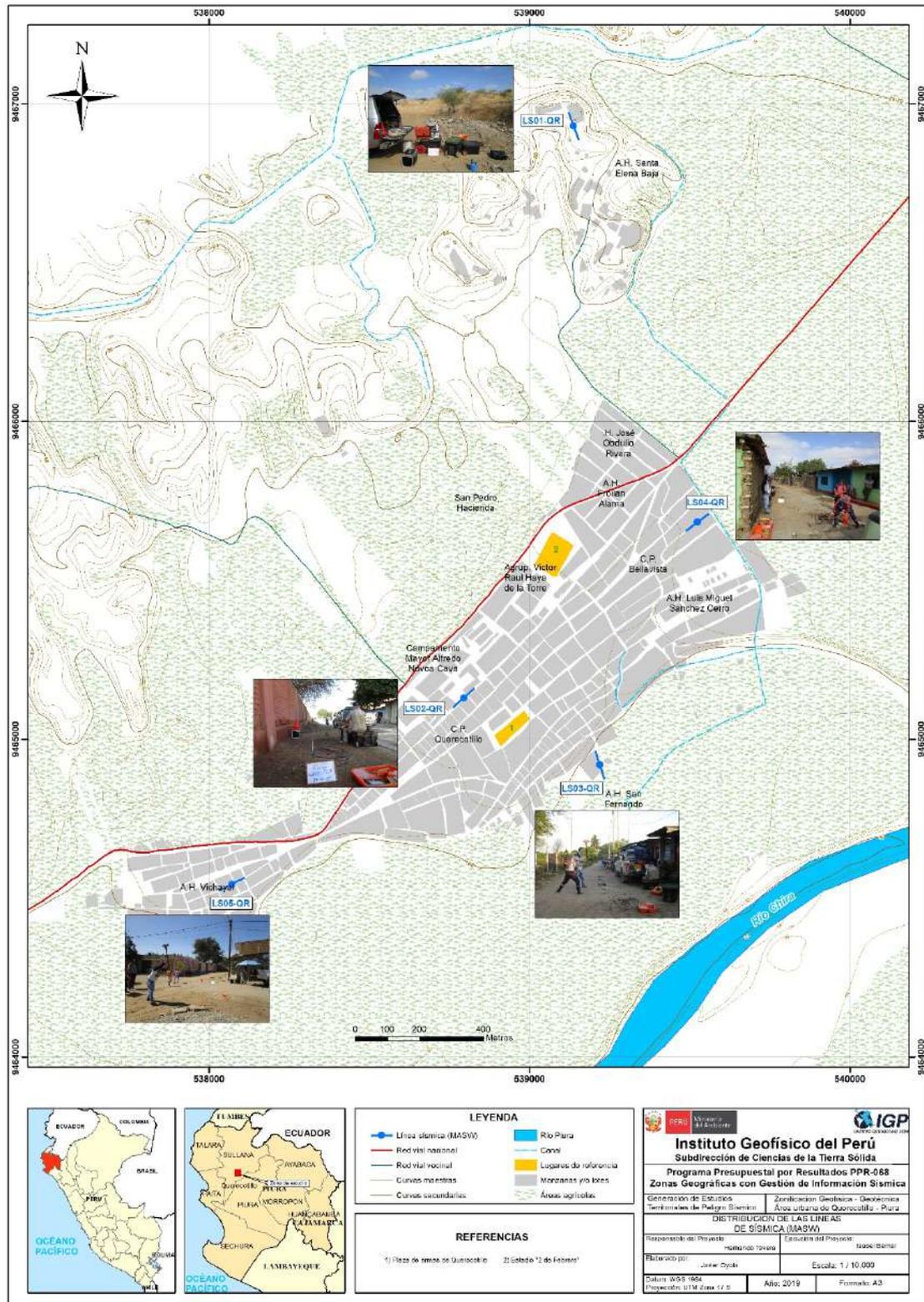
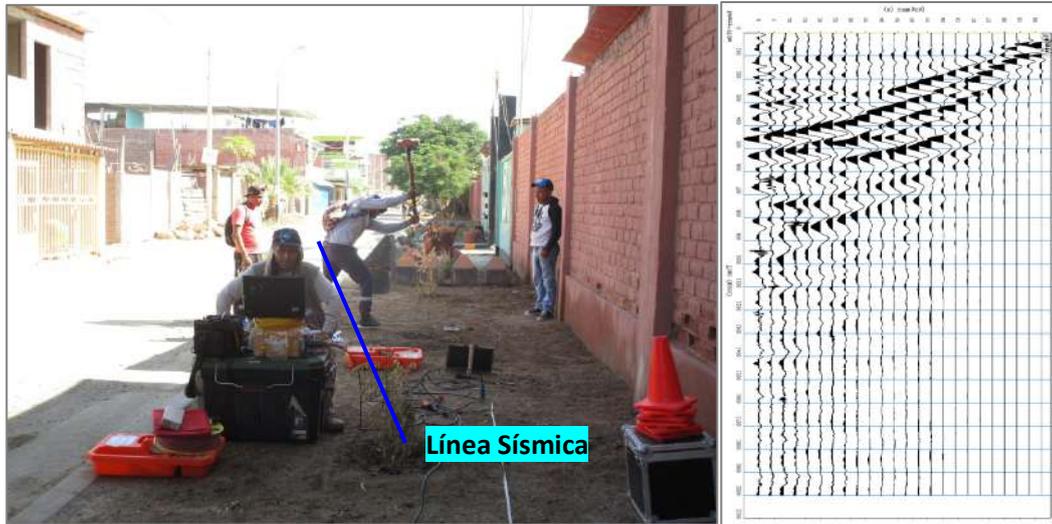


Figura 6. Distribución espacial de los ensayos MASW codificadas como LS01-QR, ..., LS05-QR en el área urbana de Querecotillo.



**Figura 7. Disposición del equipo para la adquisición del registro sísmico.**

### 2.2.1.- Procesamiento y análisis

Se procedió a aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) a los registros sísmicos obtenidos para cada punto de disparo (Reynolds, 2011), para luego tener como resultado, la imagen de dispersión de ondas que relaciona la velocidad de fase de las ondas superficiales con la frecuencia. Una vez obtenidas las curvas de dispersión, son sometidas de forma individual a un proceso de inversión, a fin de obtener los perfiles de velocidad  $V_s$  en una dimensión (1D), tal como se muestra en la Figura 8.

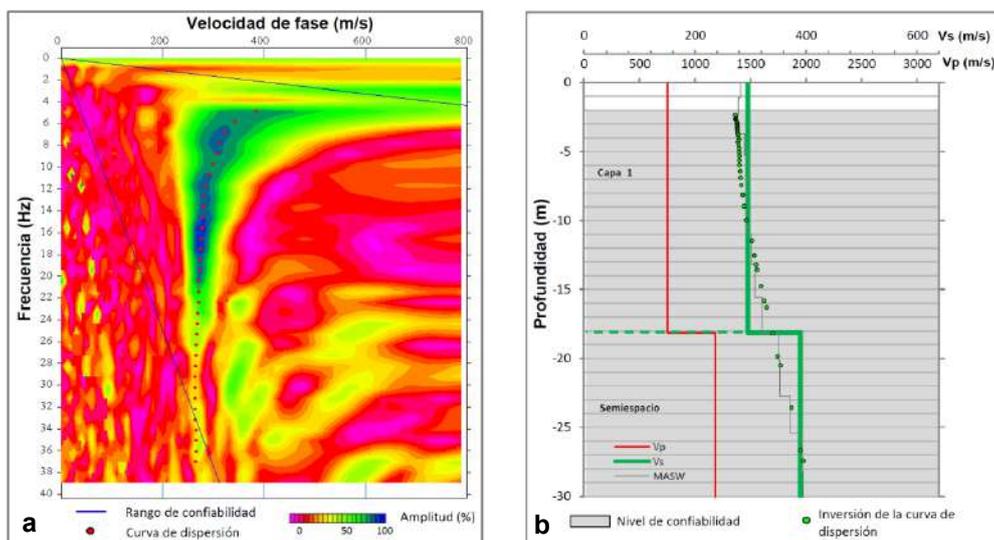


Figura 8. a) Curva de dispersión y b) perfil de velocidad obtenido a partir del ensayo MASW.

Para su análisis, se considera la clasificación de suelos según la Norma E.030 (2018). En este caso, el rango de velocidades para los perfiles de suelo S1 y S2, se subdividen a fin de considerar dos clasificaciones adicionales, ver Tabla 3. Asimismo, los valores obtenidos son representados con colores a fin de facilitar su interpretación.

Tabla 3. Clasificación de perfiles de suelo, según la norma E.030.

Clasificación de los perfiles de Suelo				
N°	Vs	Norma E.030		Descripción
1	< 180 m/s	S <sub>3</sub>	Suelo blando	Suelo blando
2	180 m/s a 350 m/s	S <sub>2</sub>	Suelo medianamente rígido	Suelo moderadamente rígido
3	350 m/s a 500 m/s			Suelo rígido
4	500 m/s a 800 m/s	S <sub>1</sub>	Roca o suelo muy rígido	Suelo muy rígido o roca blanda
5	800 m/s a 1500 m/s			Roca moderadamente dura
6	> 1500 m/s	S <sub>0</sub>	Roca dura	Roca dura

### 2.3.- Método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

El ensayo de ERT permite determinar las variaciones de resistividad y conductividad eléctrica en las rocas y suelos para conocer su grado de saturación. En general, los materiales que conforman el subsuelo muestran ciertos rangos de resistividad ( $\rho$ ) al paso de la corriente eléctrica, y que pone en evidencia el contenido de agua, de sales disueltas en las fracturas de las rocas o en la porosidad del suelo.

Los datos recolectados en campo corresponden al registro de valores de resistividad obtenidos en 04 líneas de ERT distribuidas en la zona de estudio, tal como se observa en la Figura 9. El instrumental utilizado en campo corresponde a un Equipo de Resistividad / IP Syscal Pro de marca Iris Instruments. En la Tabla 4, se detalla las características de las líneas de ERT realizadas en la localidad de Querecotillo. Para la instalación de los equipos y los tendidos de los cables para la adquisición de los datos, en algunos sectores se tuvieron limitaciones de acceso y de espacio.

Tabla 4: Coordenadas y características del ensayo ERT realizados en Querecotillo.



Estudio de Zonificación Sismo-geotécnica del distrito de Querecotillo

Línea Eléctrica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Longitud total (m)
LE01-QR	538994	9466934	82	10	290
	539102	9466664	77		
LE02- QR	538719	9465278	68	10	260
	538549	9465071	67		
LE03- QR	539197	9465023	66	10	260
	538991	9464843	68		
LE04- QR	539567	9465711	71	10	160
	539433	9465608	68		



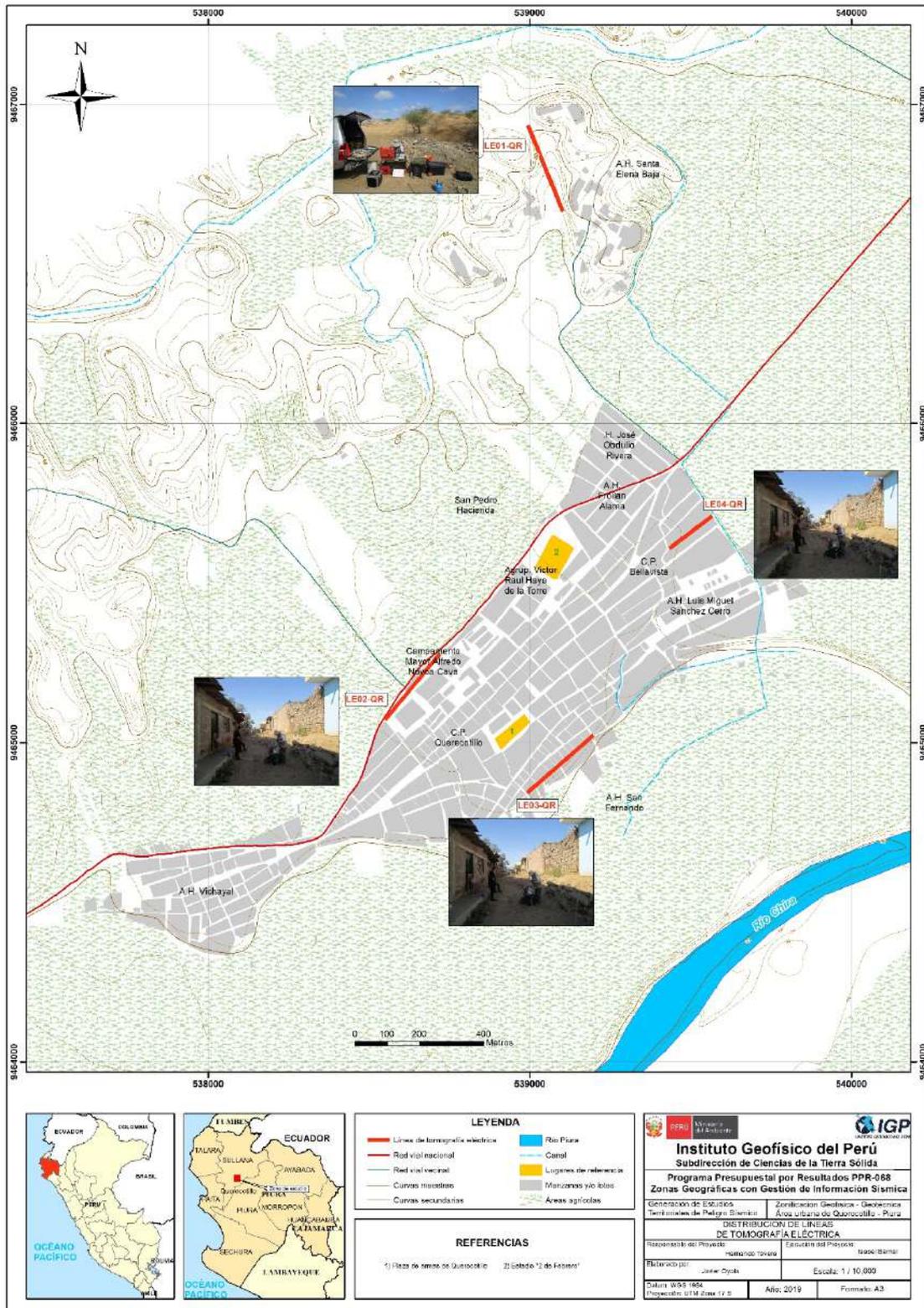


Figura 9. Distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica codificadas como LE01-QR, ... LE04-QR en el área urbana de Querecotillo.

### 2.3.1.- Procesamiento y análisis

Para realizar el procesamiento de los datos recolectados en campo, se selecciona aquellos con ausencia de ruidos que puedan alterar los resultados a obtenerse. Seguidamente, son corregidos por efectos de topografía usando algoritmos de inversión de datos geoelectricos y de procesamiento de imágenes.

Para el análisis de los resultados se debe tener en cuenta que son varios los factores que influyen en las características de los suelos (grado de saturación, porosidad y forma del poro, salinidad del fluido, tipo y composición de la roca, temperatura y procesos geológicos que afectan a los materiales); es decir, el incremento de fluidos en el terreno se verá reflejado por una disminución en los valores de resistividad. En la Tabla 5, se presentan algunos valores de Resistividad relacionados a los distintos tipos de suelos y rocas.

**Tabla 5. Valores de resistividad de suelos y rocas presentes en la naturaleza (UNC, 2000).**

Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000 $\Omega\text{m}$
Basamento. Roca fracturada	1500-5000 $\Omega\text{m}$
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000 $\Omega\text{m}$
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	50-100 $\Omega\text{m}$
Gravas parcialmente saturadas	500-2000 $\Omega\text{m}$
Gravas saturadas	300-500 $\Omega\text{m}$
Arenas parcialmente saturadas	400-700 $\Omega\text{m}$
Arenas saturadas	100-200 $\Omega\text{m}$
Limos parcialmente saturados	100-200 $\Omega\text{m}$
Limos saturados	20-100 $\Omega\text{m}$
Limos saturados con agua salada	5-15 $\Omega\text{m}$
Arcillas parcialmente saturadas	20-40 $\Omega\text{m}$
Arcillas saturadas	5-20 $\Omega\text{m}$
Arcillas saturadas con agua salada	1-10 $\Omega\text{m}$
Ceniza volcánica seca	1000-2000 $\Omega\text{m}$
Ceniza volcánica húmeda	300-1000 $\Omega\text{m}$
Ceniza volcánica saturada	100-300 $\Omega\text{m}$



### 3.- RESULTADOS

La correlación de los resultados obtenidos con el procesamiento y análisis de los datos recolectados en campo y la aplicación de diversos métodos geofísicos, ha permitido llegar a los siguientes resultados:

#### 3.1.- Razones espectrales (H/V)

En el área urbana de Querecotillo, los suelos responden principalmente a frecuencias ( $F_0$ ) mayores a 1.8 Hz, con diferentes amplificaciones. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en el área urbana de Querecotillo.

##### 3.1.1.- Frecuencias Predominantes

**- La frecuencia predominante  $F_0$ , según la Figura 10, fluctúa principalmente entre 1.8 a 4.4 Hz, distribuyéndose de manera uniforme en el área de estudio.**

En la Figura 11, se muestra ejemplos de razones espectrales característicos para los puntos QR-22(D), QR-47(F) y QR-53(G), realizados en la zona céntrica y hacia el norte del área urbana, próximos a la plaza de armas, por el estadio Dos de Febrero y A.H. José Obdulio Rivera, donde se identifica un pico a frecuencias de **3.4, 3.1 y 3.0 Hz**, con amplificaciones de 3.6, 2.7 y 3.1 veces respectivamente. Y para el extremo Sur y SE del área urbana, las razones (H/V) obtenidas para los puntos QR-12(B), QR-55(H) y QR-60(I), ubicados próximos a los AA. HH. San Fernando y Luis Miguel Sánchez Cerro, donde sobresale un pico a **2.1, 2.3 y 3.2 Hz** con amplificaciones de 4.2, 4.8 y 5.4 veces respectivamente. Estos resultados permiten observar un ligero incremento del valor de frecuencias, hacia el extremo norte del área de estudio, con un factor de amplificación menor respecto a lo observado hacia su extremo Sur con dirección al río Chira, evidenciando que los suelos son un poco más consistentes hacia el extremo norte del área de estudio.

Asimismo, en los puntos QR-01(A), QR-15(C) y QR-28(E) realizados en el extremo norte del área urbana de Querecotillo, por el A.H. Santa Elena Baja, donde no sobresale ningún pico de frecuencia. En el punto E, sobresale un pico a altas frecuencias (30 Hz) asociado a un efecto local de la actividad de la población. En general, se evidencia en este sector la presencia de suelos consistentes.

Los valores bajos de frecuencia se asocian a estratos del suelo de gran espesor y los factores de amplificación mayores a 3 veces, sugieren que estos suelos presentan baja consistencia.



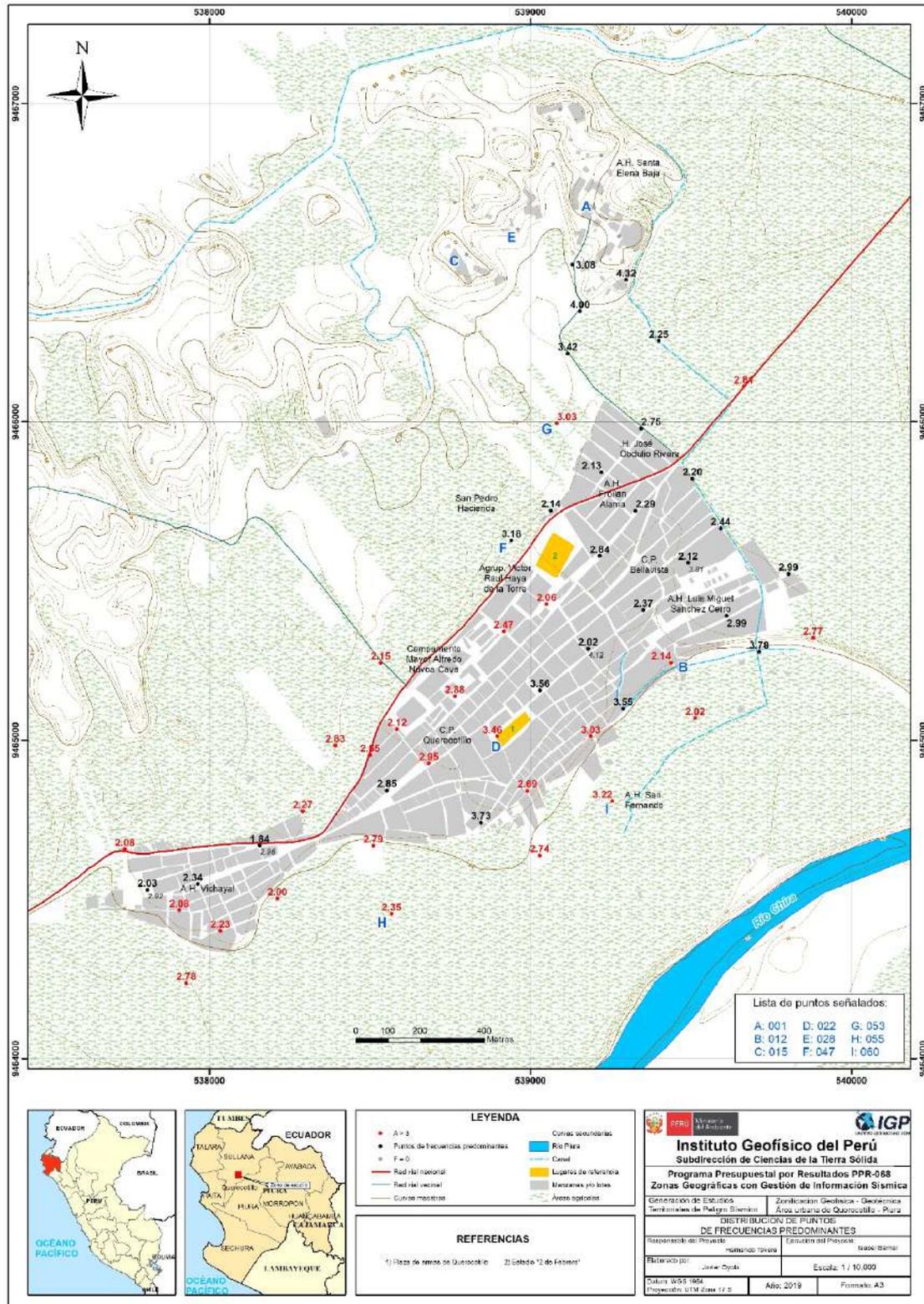
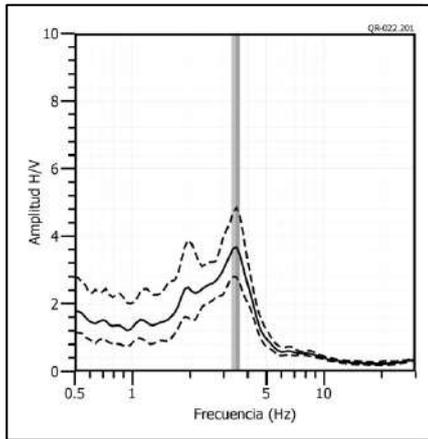
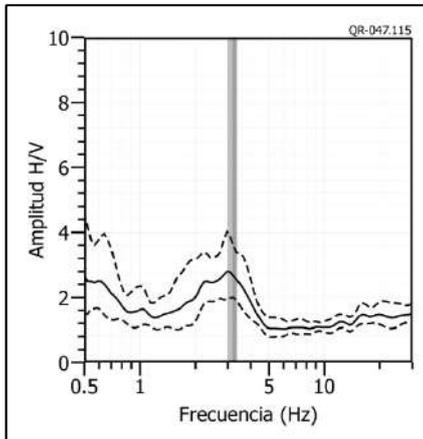


Figura 10. Distribución espacial de las frecuencias predominantes (Fo). Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 3 veces. Las letras corresponden a los puntos cuyas razones espectrales son analizadas en el informe.

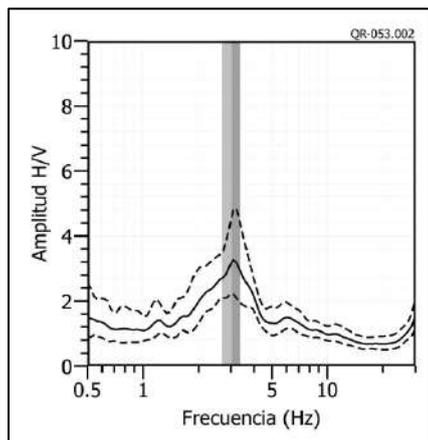
QR - 22



**QR - 47**



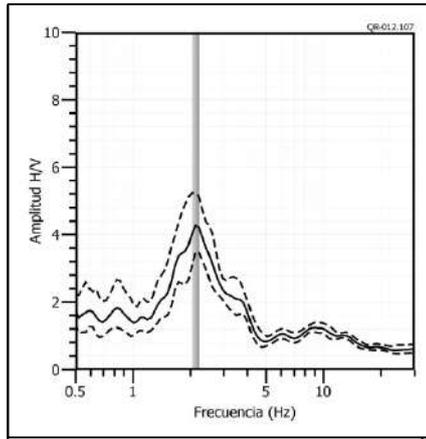
**QR - 53**



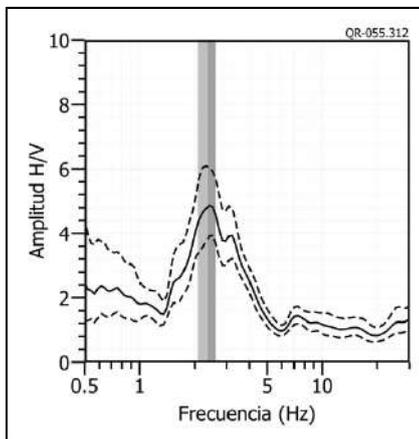
**Figura 11. Ejemplos de razones espectrales (H/V): Para los puntos QR-22(D), QR-47(F) y QR-53(G), realizados próximo a la Plaza de Armas, por el Estadio Dos de Febrero por el A.H. José Obdulio Rivera. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.**



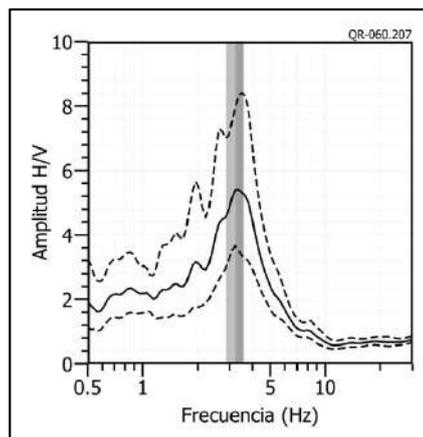
**QR - 12**



**QR - 55**

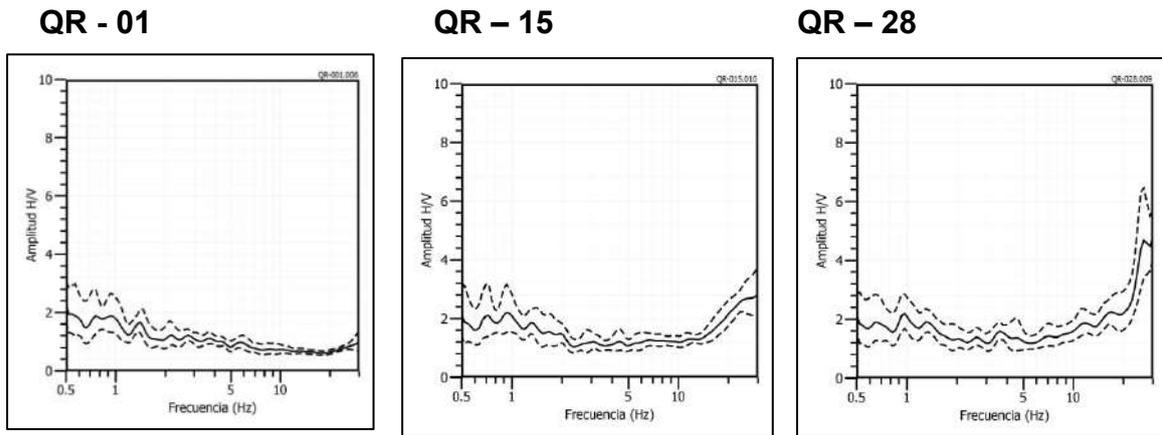


**QR - 60**



**Figura 11. ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V): Para los puntos QR-12(B), QR-55(H) y QR-60(I), ubicados en el extremo sur y este del área urbana, por el A. H. San Fernando. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.**





**Figura 11. ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V): Para los puntos QR-01(A), QR-15(C) y QR-28(E), ubicados en el extremo norte del área urbana, por el A. H. Santa Elena Baja. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.**

### 3.1.2.- Periodos dominantes

Los valores de frecuencias fueron transformados a periodos dominantes a fin de construir el mapa de isoperiodos. En la Figura 12, se muestra la distribución espacial de los periodos ( $T_0$ ) de respuesta del suelo que varían entre 0.3 y 0.5 segundos, los valores en rojo corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 3 veces y los puntos en gris corresponden a puntos donde no sobresalió ningún periodo. Los periodos de 0.3 segundos se distribuyen en gran parte del área urbana. Y los periodos de 0.4 a 0.5 segundos se identifican principalmente hacia el sureste, próximos a terrenos de cultivo incrementando el contenido de humedad. Asimismo, las mayores amplificaciones se presentan hacia el extremo sureste del área de estudio en dirección al río Chira, ver Figura 12. A diferencia de lo observado hacia el extremo norte (A.H. Santa Elena Baja) donde no sobresale ningún periodo, evidenciando la presencia de suelos de mayor consistencia a diferencia del resto del área de estudio.

Los periodos dominantes se encuentran relacionados con las condiciones físicas del suelo, 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 340 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.3 y 0.4 segundos, se estima una capa superficial con espesores de entre 28 y 34 metros. Los resultados de este análisis sugieren que la capa superficial del suelo presenta mayor espesor hacia el extremo suroeste (A.H. Vichayal) y al sureste, conforme se dirige al río Chira.



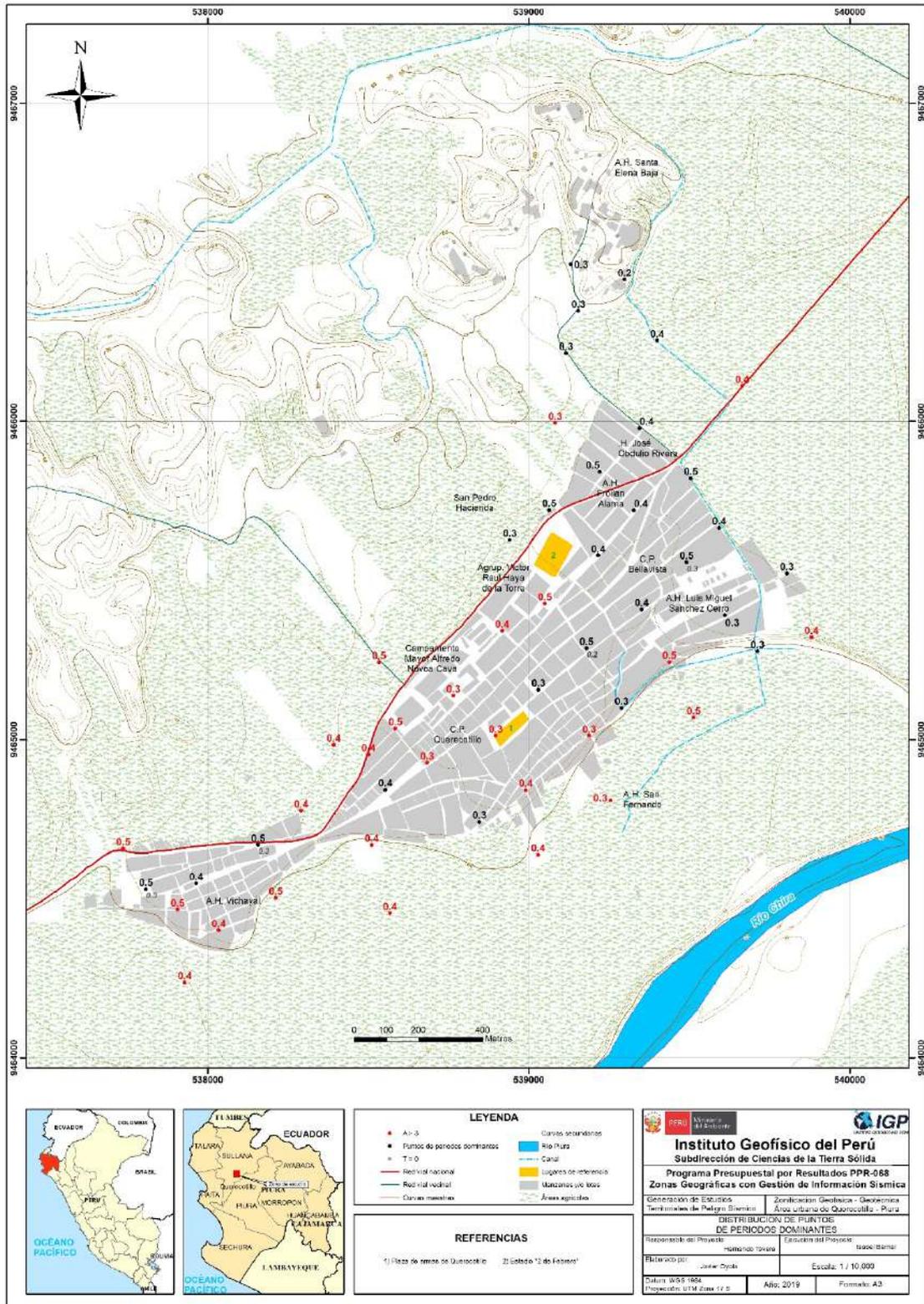


Figura 12. Mapa de la distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

### 3.2.- Perfiles de MASW

En el área de estudio se realizaron 05 líneas sísmicas aplicando la técnica MASW a fin de identificar velocidades de ondas de corte  $V_s$  confiables hasta los 30 metros de profundidad. En la Figura 6, se presenta el mapa con la ubicación de las líneas y en la Figura 13, los resultados obtenidos para la línea LS01-QR. Para el resto de los perfiles, ver Anexo I.

**Línea sísmica LS01-QR:** Ubicada al norte del área urbana de Querecotillo; en el A.H. Santa Elena Baja. Se identifica una capa sísmica de 18 metros de espesor, con velocidad  $V_s$  entre 295 m/s correspondiendo a suelos moderadamente rígidos. El semi-espacio presenta velocidades  $V_s > 390$  m/s, considera a suelo rígido.

**Línea sísmica LS02-QR:** Ubicada en el cercado del área urbana; frente al campamento Mayor Alfredo Navoa Caba. Se identifica dos capas sísmicas: la primera de 11 metros de espesor con velocidad  $V_s$  de 193 m/s, la segunda de 12 metros y velocidad  $V_s$  de 313 m/s, ambas capas definen la existencia de suelo moderadamente rígido a rígido en el semi-espacio con velocidades  $V_s > 467$  m/s.

**Líneas sísmicas LS03-QR y LS04-QR:** Ubicadas hacia el sureste de Querecotillo, en el A.H. San Fernando y C.P. Bellavista. Se identifica dos capas sísmicas: la primera de 7 metros de espesor con velocidad  $V_s$  entre 138 a 171 m/s, la segunda capa, de 11 a 18 metros de espesor con  $V_s$  de entre 251 a 310 m/s, ambas corresponden a suelo blando a moderadamente rígido. El semi-espacio presenta velocidades  $V_s > 435$  m/s, corresponde a suelo rígido.

**Línea sísmica LS05-QR:** Ubicada al suroeste de Querecotillo, en el A.H. Vichayal. Se identifica una capa sísmica de 15 metros de espesor, con velocidad  $V_s$  de 193 m/s que, junto con el semi-espacio el cual presenta velocidades  $V_s > 425$  m/s, corresponde a suelo moderadamente rígido.

En la Tabla 6, se muestra el resumen de la información obtenida, la velocidad de ondas de corte  $V_s$ , su espesor y la velocidad  $V_{s30}$ .



Tabla 6. Valores de espesor y Vs de los perfiles sísmicos obtenidos para el área de estudio.

Superficie <span style="float: right;">→ Profundidad</span>							
Línea Sísmica	N° DE CAPA						
	1		2		Semiespacio		VS30 (m/s)
	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	
LS01-QR	295	18	390	-	-	-	322
LS02-QR	193	11	313	12	467	-	263
LS03-QR	138	7	310	18	437	-	247
LS04-QR	171	7	251	11	435	-	258
LS05-QR	193	15	341	-	-	-	236

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



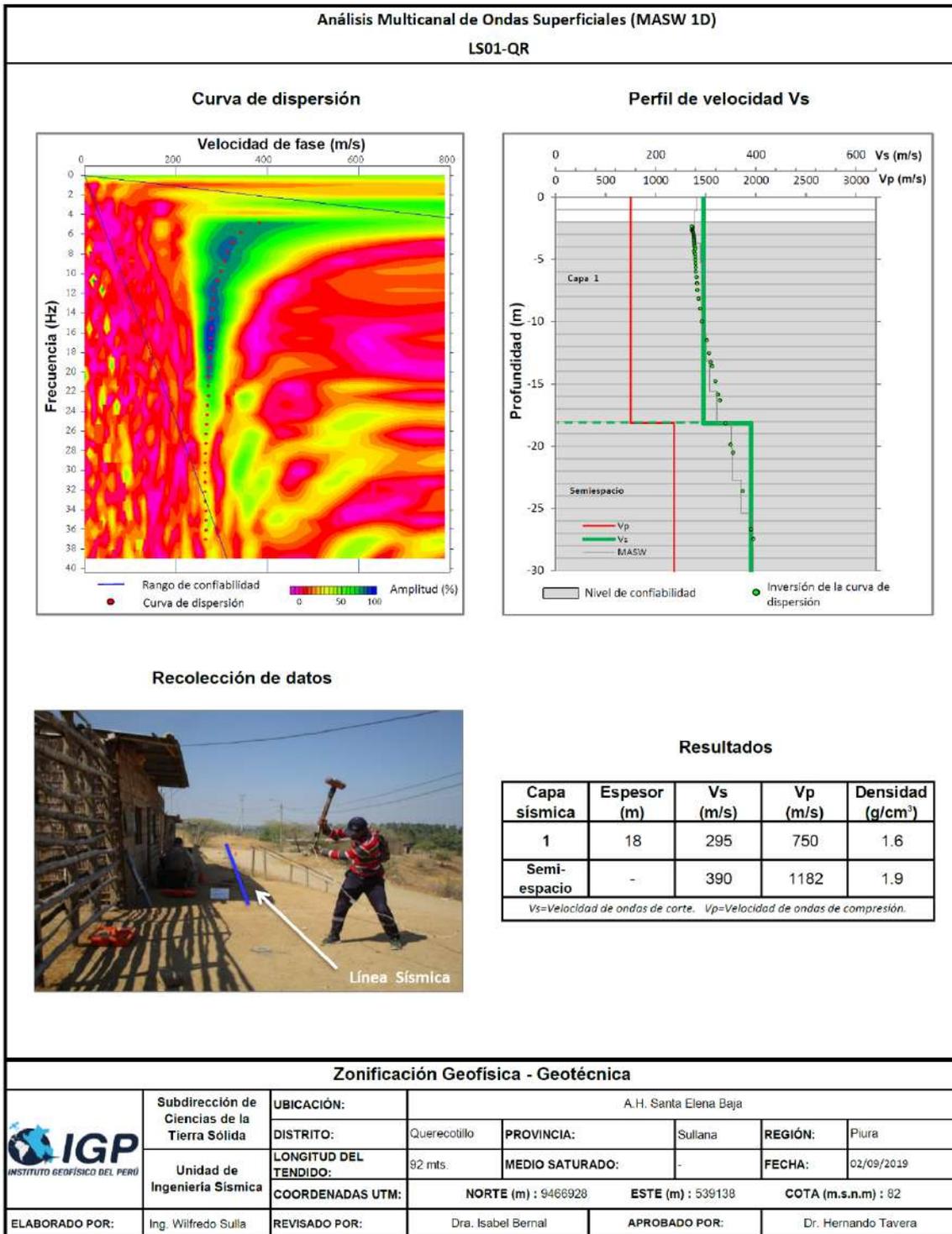


Figura 13. Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo lineal LS01-QR.



Según los resultados sugieren el predominio de suelos moderadamente rígidos en superficie con espesores que varían entre 18 metros hacia el norte (A.H. Santa Elena Baja) y conforme se dirige hacia el suroeste (A.H. Vichayal) llegan a superar la profundidad investigada. Los suelos de mayor espesor se encuentran hacia el suroeste y próximos al río Chira y los menores, en dirección a las estribaciones de la cordillera. De forma sectorizada, hacia este (A.H. San Fernando, C.P. Bellavista), se identifica suelos blandos en superficie de 7 metros de espesor depositados sobre el suelo moderadamente rígido (Figura 14), esto puede ser debido a que se encuentran próximos a terrenos de cultivo.



Figura 14. Lugares ubicados al sureste de Querecotillo, cuyos suelos son blandos en superficie

### 3.3.- Perfiles de Tomografía Eléctrica

Se realizaron 04 líneas de tomografía eléctrica en el área urbana La Unión a fin de conocer el grado de saturación del suelo mediante los valores de resistividad. En la Figura 9, se presenta el mapa con la ubicación de las líneas, en las Figuras 15 y 16, imágenes con la disposición de las diferentes líneas y en la Figura 17, los resultados obtenidos para la línea LE01-QR. Para el resto de los perfiles, ver Anexo II.

La línea **LE01-QR** ubicada en el extremo norte del área de estudio, por el A.H. Santa Elena Baja. Se identifica el predominio de valores muy bajo resistivos ( $<20 \Omega.m$ ), indica la presencia de alto contenido de humedad, cuyo suelo se componen de arcillas y arenas limosas, por la influencia de los canales de regadío, el Dren y la presencia de terrenos de cultivo (Figura 15).



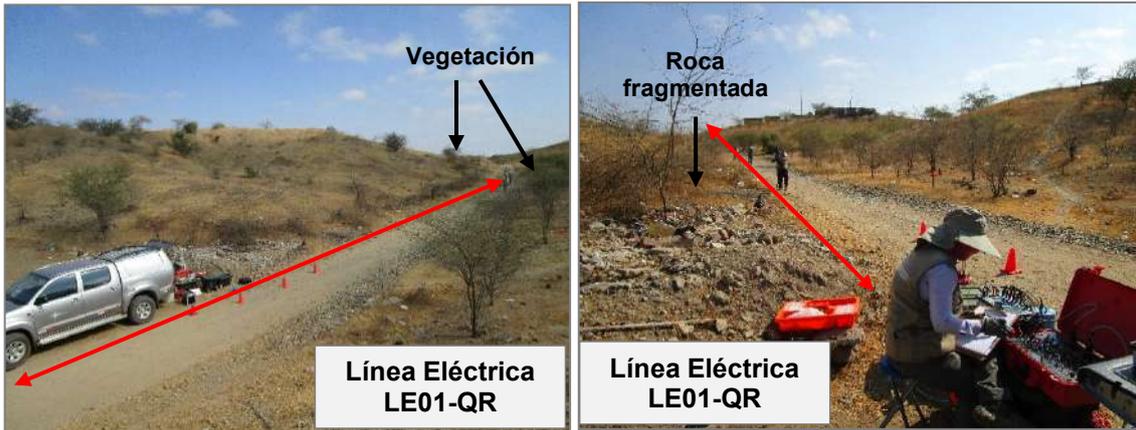


Figura 15. Vista de la línea eléctrica LE01-QR.

En estas líneas **LE02-QR**, **LE03-QR** y **LE04-QR**, ubicadas al oeste, este y noreste de la Plaza de Armas de Querecotillo, por el Campamento Mayor Alfredo Novoa Cava, próximo al A.H. San Fernando y al C.P. Bellavista. Se identifican valores bajo resistivos a muy bajo resistivos ( $<100 \Omega.m$ ) desde la superficie, asociado a la presencia de humedad en el subsuelo y por la influencia de los canales de regadío, el río Chira y los terrenos de cultivo de alrededor. Las líneas **LE02-QR** y **LE03-QR**, se asocian a material acarreado por inundaciones, cuyos suelos están compuestos por bolones, gravas, arenas, limos y arcillas, presentando moderado contenido de humedad por la actividad del río Chira y los valores medianamente resistivos (100 a 500  $\Omega.m$ ) asociados a bolones de depósitos aluviales, ver Figura 16.



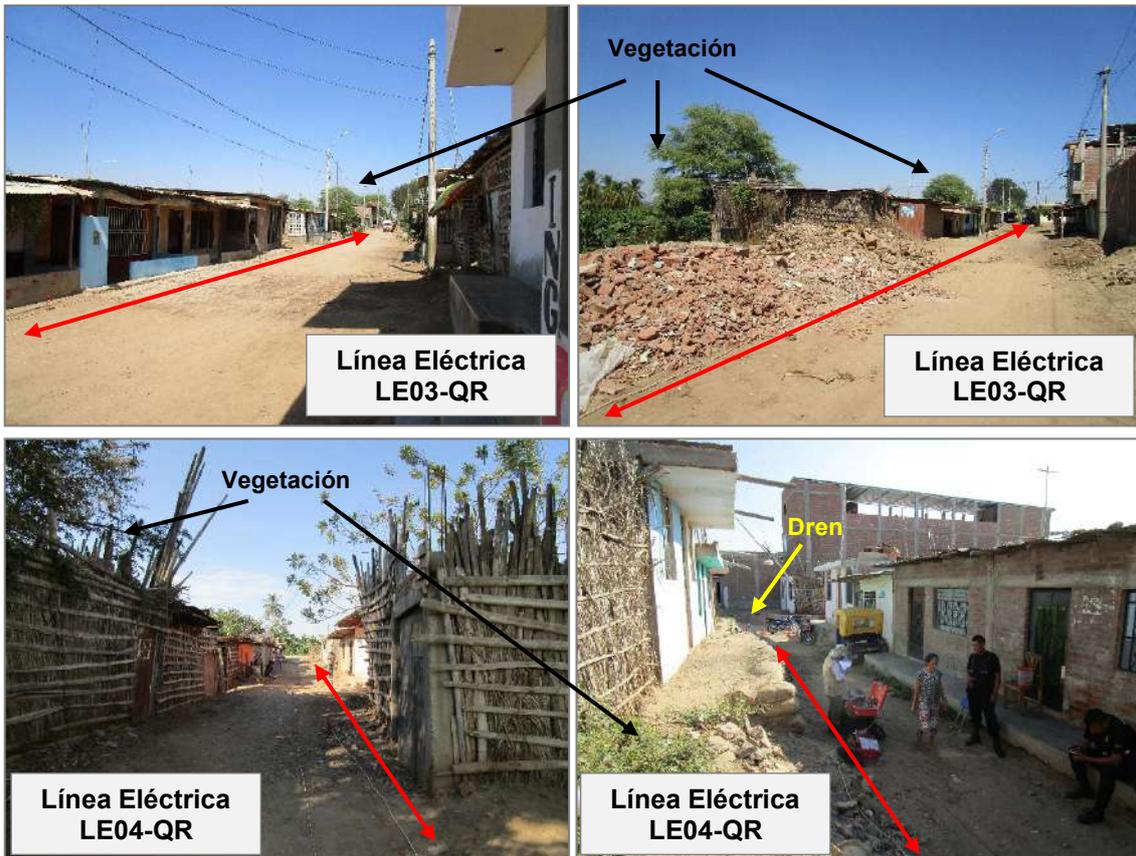
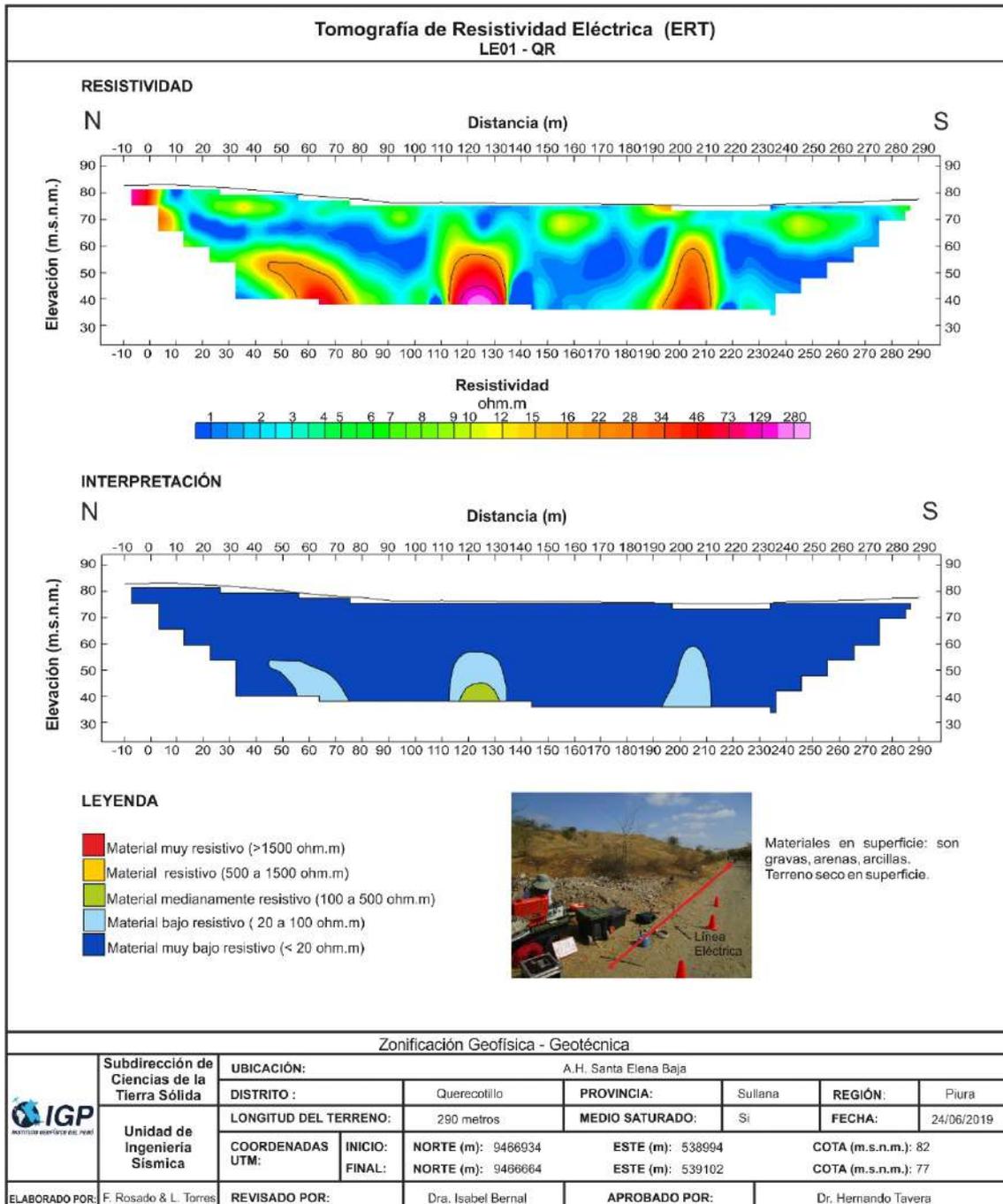


Figura 16. Vista de la línea eléctrica LE02-QR, LE03- QR y LE04- QR.





**Figura 17. Resultado de tomografía de resistividad eléctrica para la línea LE01-QR.**

Hacia el extremo sur del área de estudio, los cortes geoelectricos evidencian la presencia de suelos saturados a niveles superficiales (3 a 5 metros), debido a la influencia de los canales de regadío, terrenos de cultivo, además de la presencia de zonas inundables que tienen difícil drenaje y por encontrarse próximo al río Chira.

Y hacia el extremo norte (en el sector del A.H. Santa Elena Baja), la existencia de dren y canales favorecen que el medio saturado se encuentre a más de 5 metros de profundidad. El



suelo está caracterizado por arenas y limosa no consolidadas que permiten el almacenamiento del agua.

## 4. ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA DE LOS SUELOS

El mapa de zonificación Geofísica se realiza considerando la correlación de la información generada con la aplicación de las técnicas geofísicas y geotécnicas; así como, con los aspectos geológicos, geomorfológicos y geodinámicos que presenta la zona en estudio. Finalmente, con base en estos resultados y la información contenida en la Norma Técnica E.030 de Diseño Sismorresistente, se delimita zonas cuyos suelos presenten similares características físicas y dinámicas.

### 4.1. Integración de resultados

El área urbana de Querecotillo se encuentra a una altura promedio de 65 m.s.n.m., presenta una superficie plana cuya pendiente es baja a moderada, pero hacia el norte se identifica lomadas que son parte de las estribaciones andinas, condiciones geomorfológicas que influyen en los resultados.

En general el suelo responde a periodos de entre 0.3 y 0.5 segundos, donde los mayores valores se distribuyen principalmente hacia el A.H. Vichayal (extremo SE del área de estudio). De acuerdo con el análisis sísmico, en la zona céntrica en superficie predomina suelos moderadamente rígidos ( $V_s = 193$  a  $341$  m/s) con espesores de más de 25 metros y hacia A.H. San Fernando y Luis Miguel Sánchez Carrión, en superficie predominan suelos de blandos a modernamente rígidos ( $V_s = 170$  a  $250$  m/s) con espesores que supera los 18 metros. En la Figura 18 se observa la correlación geofísica, en los puntos ubicados hacia el sureste (punto “a”) y norte (punto “b”) del área de estudio, observándose la correspondencia entre los periodos bajos y los estratos de menor espesor (A.H. Santa Elena Baja).

En el área de estudio hay un predominio de suelos saturados desde niveles próximos a la superficie, principalmente hacia el sureste, debido a la influencia de los canales de regadío y de encontrarse próximo al río Chira. Asimismo, se identifica alto grado de humedad en los suelos areno limosos, en el A.H. Santa Elena Baja por la influencia de los canales de regadío. Estos sectores llegan a inundarse durante el periodo de lluvias intensas y/o el Fenómeno de El Niño.

Las amplificaciones máximas relativas, en el área de estudio, alcanzan valores de hasta 3 veces, evidenciando que los suelos menos consistentes y con alto nivel freático, se presentan en sectores del Campamento Mayor Alfredo Novoa Cava, los AA.HH. Vichayal y San Fernando.



En general, el suelo al estar constituido de arenas, limos y acillas, sumado a la existencia de saturación a nivel superficial y a la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud próximo a esta región, aumenta la probabilidad de generarse mayores amplificaciones (grandes sacudimientos) y procesos de licuación, principalmente al suroeste y sureste del área de estudio. Por lo cual es necesario e indispensable que esta información sea considerada como base para nuevos proyectos de la GRD y en la toma de decisiones.



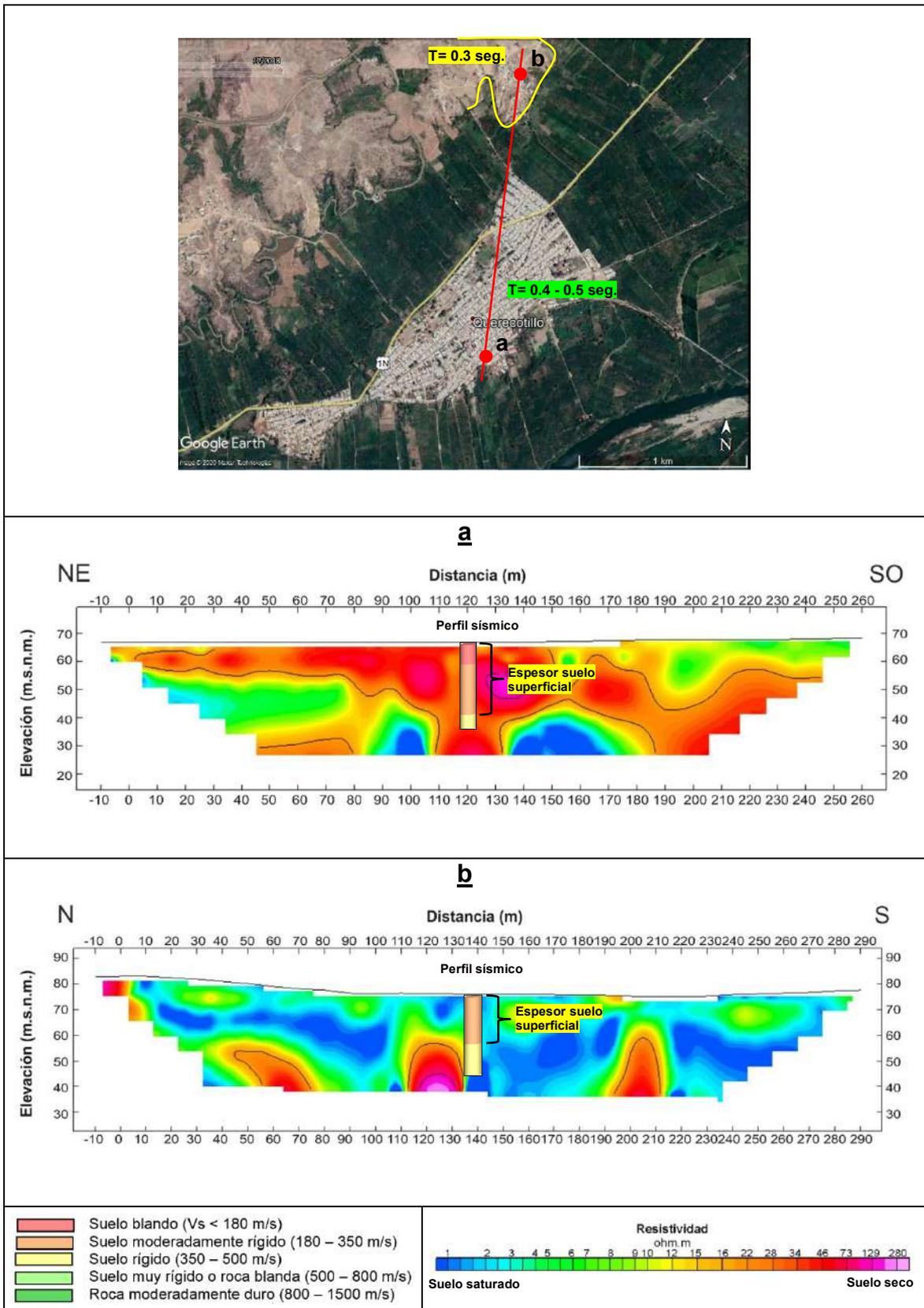


Figura 18. Correlación de los ensayos geofísicos, periodos dominantes, tipo de suelo y grado de saturación.



## 4.2. Mapa de Zonificación Geofísica

El mapa de Zonificación Geofísica - Geotécnica para el área urbana de Querecotillo, se elabora en función de la integración de los resultados obtenidos del análisis geofísico y geotécnico. Las características dinámicas del suelo y sus propiedades mecánicas han permitido identificar en el área de estudio, considerando lo indicado en la Norma Técnica de Construcción Sismorresistente E.030, la existencia de suelos de Tipo S1 y S2. Estos tipos de suelo corresponden a las Zonas I y II respectivamente, donde predominan periodos de 0.3 y 0.5 segundos.

Para el área urbana de Querecotillo, se propone la siguiente zonificación Geofísica - Geotécnica (Figura 19).

**- ZONA I:** Considera suelos constituidos por material arenoso limoso, conglomerados y conchuelas distribuidos a nivel superficial. Esta zona presenta, suelos con velocidades de ondas de corte  $V_s$  de 295 m/s en promedio para la capa superficial y de hasta 400 m/s a la profundidad investigada de 30 metros y periodos de vibración natural  $\leq 0.3$ , ambos definen la existencia de suelos Tipo S1, que tienen un comportamiento rígido (NTE.030). Los suelos presentan moderada saturación y una capacidad de carga admisible de entre 1.0 a 2.0 Kg/cm<sup>2</sup> hasta un metro de profundidad. Esta zona comprende el 5 % del área de estudio y se ubica al norte de Querecotillo (A.H. Santa Elena Baja).

Las líneas inclinadas en negro, en la Figura 19, delimitan áreas de muy baja amplificación, sugiere que los suelos presentan mayor consistencia

**- ZONA II:** Considera suelos constituidos por estratos de arenas, limos y arcillas (depósito aluvial). Presenta velocidades de ondas de corte  $V_s$  de 173 m/s en promedio para la capa superficial y de hasta 467 m/s a la profundidad investigada de 30 metros, y periodos de vibración natural que varía entre 0.3 y 0.5 segundos, ambos definen la existencia de suelos Tipo S2, cuyo comportamiento es medianamente rígido (NTE.030). Los suelos presentan alto grado de saturación y una capacidad de carga admisible de entre 1.0 a 2.0 Kg/cm<sup>2</sup> hasta un metro de profundidad. Esta zona comprende gran parte del área urbana de Querecotillo (A.H. Vichayal, A.H. San Fernando, Plaza de Armas, C.P. Bellavista, entre otros).

Las líneas inclinadas en rojo delimitan áreas donde los suelos presentan amplificaciones relativas mayores a 3 veces, sugiriendo que el mayor sacudimiento del suelo a la ocurrencia de un sismo se presentará en sectores del A.H. Vichayal, A.H. San Fernando, Plaza de Armas, Campamento Mayor Alfredo Novoa Cava y hacia el sureste, en sectores próximos a terrenos de cultivo.



Asimismo, en la Figura 19 se delimita con una línea discontinua, los sectores con inundación pluvial y fluvial originada por el fenómeno El Niño en el año 2017. Estos sectores se ubican en el extremo sureste del área urbana de Querecotillo, las mismas que, además se caracterizan por presentar las cotas más bajas por encontrarse próximos al río Chira.

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



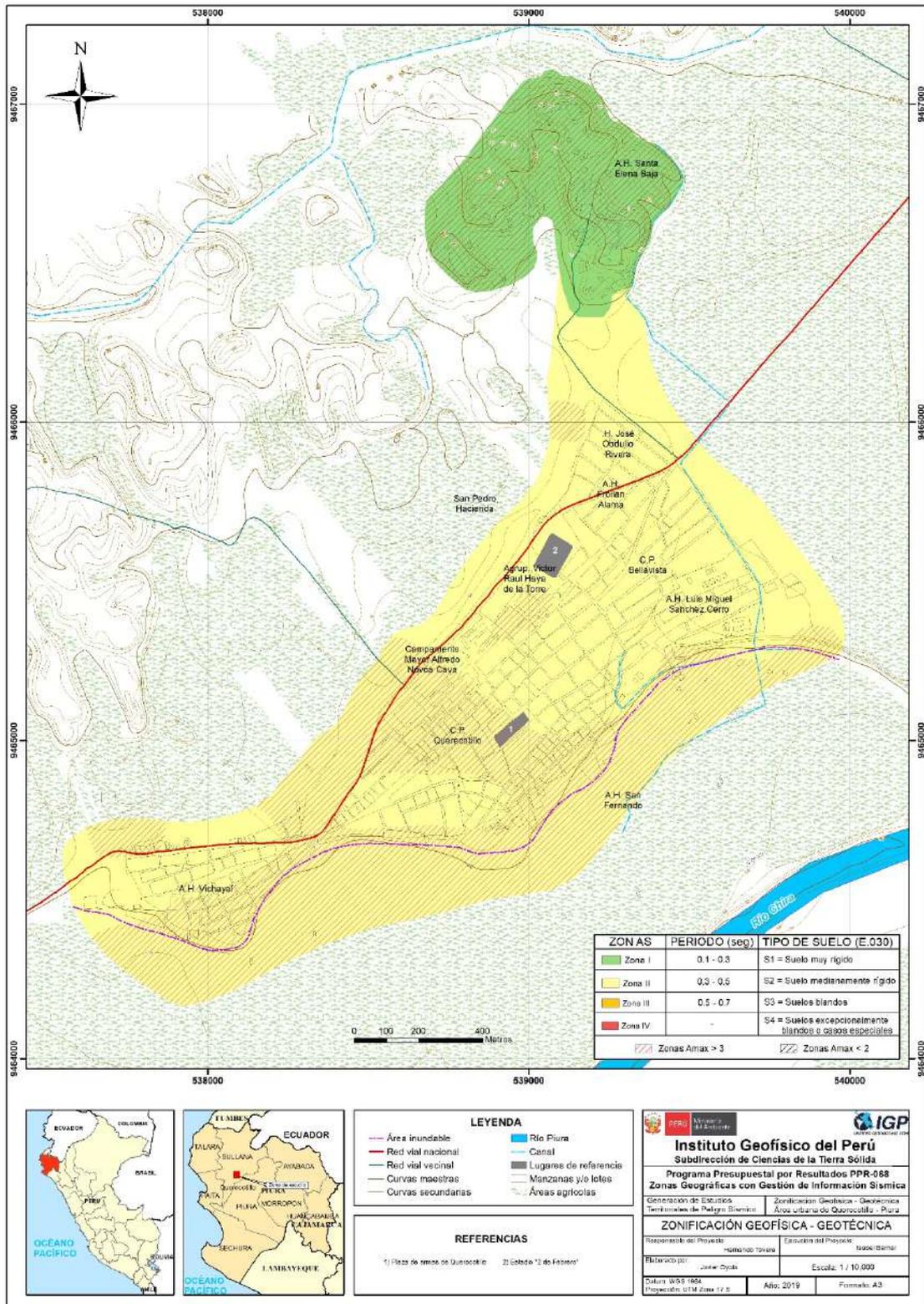


Figura 20. Mapa de Zonificación Geofísica – Geotécnica del área urbana de Querecotillo.

## 9. CONCLUSIONES

- Querecotillo se caracteriza por presentar cuatro unidades geomorfológicas como son: lecho fluvial, llanura de inundación, terrazas y lomas. Las tres primeras en mención están conformadas por materiales aluviales (arenas, limos, arcillas) sobre los cuales se asienta el casco urbano de Querecotillo, mientras que, rocas tipo areniscas con intercalación de conglomerados en matriz arenosa limosa arcillosa poco consolidados afloran en los sectores de Santa Elena Alta y Cabo Verde Alto asentados en la unidad geomorfológica lomas, este último es afectado por inundaciones pluviales por falta de estructuras de drenaje. El evento geodinámico que causó daños en el distrito de Querecotillo son las inundaciones fluviales en la margen derecha del río Chira, ocasionadas por el desborde del río en mención a causa del evento El Niño (precipitaciones extremas) en el año 2017 (marzo) que afectó importantes zonas de sembrío de banano de exportación.
- En base a los resultados de los ensayos geotécnicos y del laboratorio de suelos se ha determinado que los tipos de suelos presentes en la ciudad de Querecotillo son seis (6), entre los que se tienen: grava mal graduada (GP), arena limosa (SM), arena mal graduada (SP), arcillas inorgánicas (CL), limos inorgánicos con limos y arenas (MH) y limos inorgánicos (ML), los suelos citados anteriormente presentan capacidad de carga portante muy baja ( $< 1.00 \text{ kg/cm}^2$ )
- Los suelos del distrito de Querecotillo responden principalmente a frecuencias de entre 1.8 y 4.4 Hz con amplificaciones de hasta 4 veces, principalmente hacia el extremo sureste del área urbana con dirección al río Chira, A.H. Vichayal, A.H. San Fernando, Plaza de Armas, Campamento Mayor Alfredo Novoa Cava y hacia el sureste, en sectores próximos a terrenos de cultivo. En general, estos resultados sugieren la presencia de suelos de menor consistencia en estos sectores.
- El periodo dominante del suelo ( $T_0$ ) varían entre 0.3 a 0.5 segundos. Mediante la relación  $T_0=4H/V_s$ , y asumiendo velocidades de 280 m/s y 340 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.3 y 0.4 segundos, se estima una capa superficial con espesores de entre 28 y 34 metros. Los resultados de este análisis sugieren que la capa superficial del suelo presenta mayor espesor hacia el extremo Sur del área urbana de Querecotillo.
- De los resultados obtenidos con el método sísmico, en el área de estudio predominan en superficie suelos moderadamente rígidos ( $V_s$  193 a 295 m/s) con espesor de 18 metros hacia el norte (A.H. Santa Elena Baja), que conforme se



tiende hacia el suroeste y sureste (A.H. Vichayal y A.H. San Fernando) este supera los 30 metros de espesor. Por debajo, presenta suelos rígidos ( $V_s > 390$  m/s).

- Los valores de velocidad promedio calculados para los primeros 30 metros de profundidad ( $V_{s30}$ ), según la norma E030-2018, presentan rangos de velocidad  $V_{s30}$  de entre 247 a 322 m/s lo cual sugiere la presencia de suelos medianamente rígidos emplazados en toda el área de estudio.
- Hacia el sur del área urbana de Querecotillo, se identifica suelos saturados desde niveles próximos a la superficie (3 a 5 metros) debido a su proximidad a los canales de regadío y al río Chira. Mientras que, hacia el norte (en el sector del A.H. Santa Elena Baja) se identifica sectores con moderado grado de humedad, asociado a su proximidad a canales de regadío. El suelo está caracterizado por arenas, limos y arcillas no consolidadas que permiten el almacenamiento del agua.
- Los resultados obtenidos para el área urbana de Querecotillo a partir de sus características físicas y dinámicas del suelo, han permitido identificar, de acuerdo con las consideraciones indicadas en la Norma de Construcción Sismorresistente E.030, la existencia de suelos de Tipo S1 y S2.



## 10. RECOMENDACIONES

- Mejorar la construcción de diques ubicados en el margen derecho del río Chira, en la zona de sembríos de bananos colocados en el 2017 (marzo), de tal forma que impida el ingreso del flujo hídrico por aumento de caudal y no afecte la zona de sembríos.
- Implementar una red de drenajes en los sectores de Cabo Verde Alto y Santa Elena Alta para mitigar los daños generados por las inundaciones pluviales, así mismo, se debe llevar un control de descolmatación de drenajes construidos en el caso urbano de Querecotillo.
- Tener en cuenta las características físico mecánicas de los suelos en Querecotillo, debido a que están conformados por arenas, arcillas y limos con capacidad portante muy baja en especial los que presentan a nivel freático superficial, puesto que, podrían generar licuación de suelos ante la ocurrencia de un sismo y generar asentamientos de las estructuras físicas.



## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. (1980). Inventario y evaluación nacional de aguas subterráneas Cuenca del río Chira. Pag. 79.
- Bard, P-Y. (1995) Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues, In Proc. 10 European Conf. Earth. Eng., ed. Duma, Balkema, Rotterdam, 305-323
- Bard, P-Y y SESAME (2004) The SESAME project: an overview and main results. 13 World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 16, 2004 Paper No. 2207
- Beresnev, I.A., K.L. Wen, and Y.T. Yeh 1995a, "Nonlinear Soil Amplification: It's Corroboration in Taiwan. Bull, Seism. Soc. Am., Vol. 85, pp. 496-515
- Bernal, I. (2006) Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, México. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, pág. 130.
- Bernal, I., Tavera, H., Sulla, W., Arredondo, L., & Oyola, J. (2018). Geomorphology characterization of Ica basin and its influence on the dynamic response of soils for urban seismic hazards in Ica, Peru. International Journal of Geophysics, 2018, article ID 9434251, 12. <https://doi.org/10.1155/2018/9434251>
- Braja Das, (2011) - Principles of Foundation Engineering, Seven Edition, pág. 139-140.
- Brusi, D., et al (2013) - Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. ISSN: 1132-9157. Pág. 181-194.
- Cahill & Isacks (1992) - Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. Journal Geophys. Res., 97, 17503-17529.
- CENEPRED. (2017). Informe de evaluación de riesgo por inundación pluvial en el centro poblado de Querecotillo, distrito de Querecotillo, provincia de Sullana departamento de Piura. Pag. 59.
- CENEPRED, (2017) - Informe De Evaluación De Riesgo Por Inundación Pluvial En El Centro Poblado De Querecotillo, Distrito De Querecotillo, Provincia De Sullana, Departamento De Piura
- COEN-INDECI (Informe N° 62), 2017-INFORME N° 855-21/12/2017



- CISMID, (2016) - Densidad de campo. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. Laboratorio Geotécnico.
- Crespo V., C., (2004) - Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 5ta edición.
- Diario El Comercio, (2015) – Máncora pierde el 70% de su humedal debido a invasiones
- Dorbath, L., Cisternas, A., Dorbath, C. (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. Bull. Seismol. Soc. Am., 80 (30), 551-576.
- Flores-Estrella, H., Lomnitz, C. y Yussim S. (2004). "Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC", Geophysics, Vol. 24, N° 3, 438-445
- Gasulla, M.; Jordana, J.; Pallás, R.; Torrents, J.M. (1998). Subsurface resistivity measurements using square waveforms. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 47(1): 74-77.
- GITS-Grupo de Investigación de Transporte de Sedimentos.
- Harvey, A., M., 1987. Patterns of Quaternary aggradational and dissectional landform development in the Almeria region, southeast Spain: a dry-region tectonically-active landscape. Die Erde 118, 193-215.
- Hartzel, S. H. (1992). Site response estimation from earthquake data. Bull. Seism. Soc. Am. 82, 2308-2327
- Howie D., & Sy, (2003) - A method for correlating large penetration test (LPT) to standard penetration test (SPT) blow counts.
- Hutchinson, J., N., (1988) - General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides, (Ed: Bonnard, C.). 1, 3-35 p. Rotterdam: Balkema.
- INEI. (2007). Censo Nacional 2007: XI de Población y VI Vivienda. Lima- Perú. INE Recuperado de <http://censos.inei.gob.pe/cpv2007/tabulados/#>
- INEI (2017). Censo Nacional 2017: XII de Población, VII Vivienda y III de comunidades indígenas. Lima- Perú. Inei. Recuperado de <http://censos.inei.gob.pe/cpv2017/tabulados/#>
- Juárez, E., y Rico, A. (2005) - Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Segunda Edición. Limusa S.A. México D.F.



- Jica (Agencia de Cooperación Internacional Japonesa- Ministerio de Agricultura, (2012) Hidrología de Máximas avenidas del río Chira, Apéndice - 5
- Lermo, J. and Chavez-Garcia, F.J. (1993). Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios with Only One Station. Bulletin of the Seismological Society of America, 83, 1574-1594.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a). Are microtremors useful in site response evaluation?, Bull. Seism. Soc. Am. 84, 1350-1364 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994b). Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records, Soil. Dyn. & Earthq. Eng. 13, 413-423 pp.
- Loke, M.H. (2004). Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys.
- Meyerhof, G., G., (1956) – Penetración Test and Bearing Capacity of Cohesioneless Soils. Journal of the Soils Mechanics and Foundations División, ASCE, Vol 82 N°SM1, Proc. Paper 886, Jan. 1956, pp-19.
- Ministerio de Economía y Finanzas, (2017) - Informe de seguimiento y Gestión a la Inversión Pública.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2015) - <http://renac.mtc.gob.pe/inventariovial/default2.aspx>. Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quaterly Report Railway Tech. Res. Inst., 30-1, 25-30.
- Norma Técnica de edificaciones E.030. 2018. Aprobada por Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA, modificada por Decreto Supremo N° 003-2016-VIVIENDA.
- Orellana, E. (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Palacios, O, (1994) - Geología de los cuadrángulos Paita 11-a, Piura11-b, Talara 10-a , Sullana 10-b, Lobitos 9-a, Quebrada Seca 9-b, Zorritos 8-b, Tumbes 8-c y Zarumilla 7-c. Serie A: Carta Geológica Nacional. Boletín N° 54. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico- INGEMMET.
- Park, C.B. (2015). Data acquisition. Retrieved 23 June, 2015, from <http://www.masw.com/DataAcquisition.html>
- Park, C.B. (2014). MASW for geotechnical site investigation. The Leading Edge, 32(6):656-662.



- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *The Leading Edge*, 26 (1), 60–64.
- Park, C. B., Miller, R. D. y Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves *Geophysics* 64 800-8.
- Perrone, A., Iannuzzi, A., Lapenna, V., Lorenzo, P., Piscitelli, S., Rizzo, E., and Sdao, F. (2004). Highresolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy), *J. Appl. Geophys.*, 5 56, 17–29, doi:10.1016/j.jappgeo.2004.03.004
- Pike, R. J., I. S. Evans, and T. Hengl. 2009. *Geomorphometry: A brief Guide*. *Dev. Soil Sci.* 33: 3-30.
- PRASDES y CIIFEN. (2016). Implementación de Sistema de Alerta Temprana (SAT) en las cuencas binacionales Suches –Titicaca y Catamayo – Chira. Pag. 44.
- Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2nd ed., 712 pp.
- Rivera, P., A., (2013) - Proyecto: Mejoramiento y ampliación del parque Grau del balneario de Máncora, provincia de Talara, departamento de Piura, estudio de Preinversión a nivel de perfil. Municipalidad Distrital de Máncora.
- 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.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), (2018). <http://www.senamhi.gob.pe/>
- Sieberg, A. (1930). Los Terremotos en el Perú. Capítulo VI, *Geología del Perú* de G. Steinmann, Heidelberg Carl Winster Universitat-Shuchhan-Lunc, p. 406.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 -1974). INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 3, 130 p.
- Silgado, E (1978) Historia de sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974) primera edición digital, noviembre 2012.

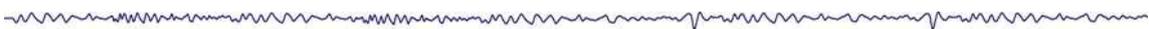


- Suárez, D., J., (1998) – Estabilidad de Taludes en Tropicales. Instituto de Investigación sobre erosión y deslizamientos. Colombia. Ed. Ingeniería de Suelos Ltda. 550 p.
- Tarbuck, E., D. Lutgens, F., K., (2005) - Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física Pretince Hall. Cap16. 8a edición. 710 pp. Tavera, H., Bernal, I., Condori, C., Ordaz, M., Zeballos, A. y Ishizawa, O. (2014) Re-evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú. Instituto Geofísico del Perú. P. 91.
- Tavera, H. y Buforn, E. (2001). Source Mechanism of Earthquakes in Perú, Journal of Seismology, 5, 519-539.
- Tavera, H., Agüero, C y Fernández, E. (2016). Catálogo general de isosistas para sismos peruano. Instituto Geofísico del Perú. Pag. 196
- Terzaghi, K. Peck, B., G. & Mesri, G., (1948) – Soil mechanics in engineering practice, New York: Wiley.
- Varnes, D.J., (1958) - Landslide types and processes in Eckel E.B., ed., Landslides and Engineering Practice, Highway Research Board Special Report 29, NAS-NRC Publication 544, Washington, D.C. 20-47 p.
- Varnes, D. J., (1978) - Slope Movement: Types and Proceses. In Scuster R. L. y Krizek, R. J., ed. Landslides analysis and control: Washington, D. C. National Academy Press, Transportation Research Board Special report 176. 9-33 p.
- Wyllie, D., C. & Norrish, N., I., (1996). “Stabilization of rock slopes”. Landslides investigation and mitigation. Special report 247. Transportation Research Board. National research council, pp. 474-504.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: Geophysics, 64, 691–700.
- Zinck, J. & Valenzuela, C., (1990) – Soil geographic database: structure and application examples. ITC Journal, 1990(3), 270-294.



## **ANEXO I**

### **Perfiles Sísmicos MASW**



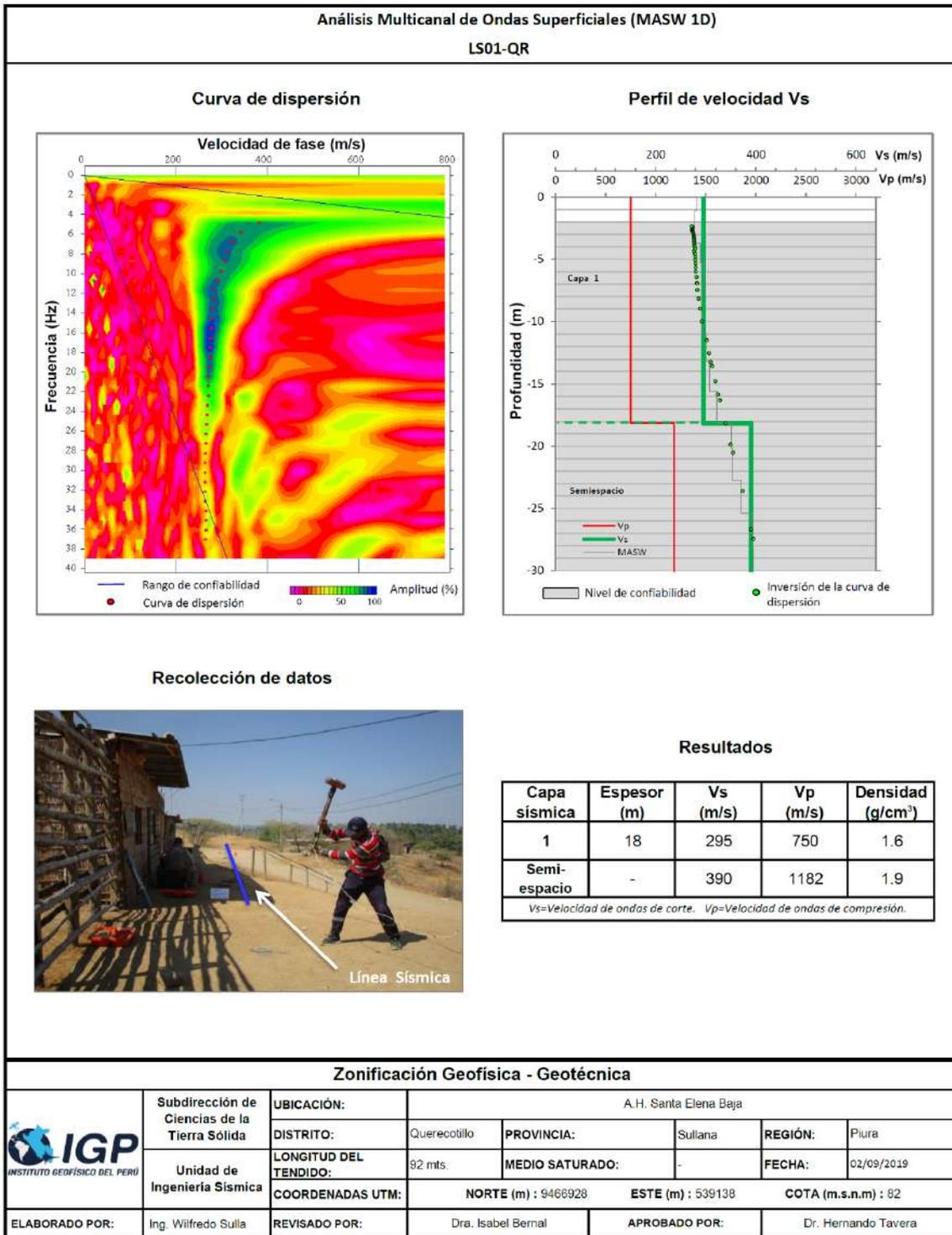


Figura 13. Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo sísmico LS01-QR.



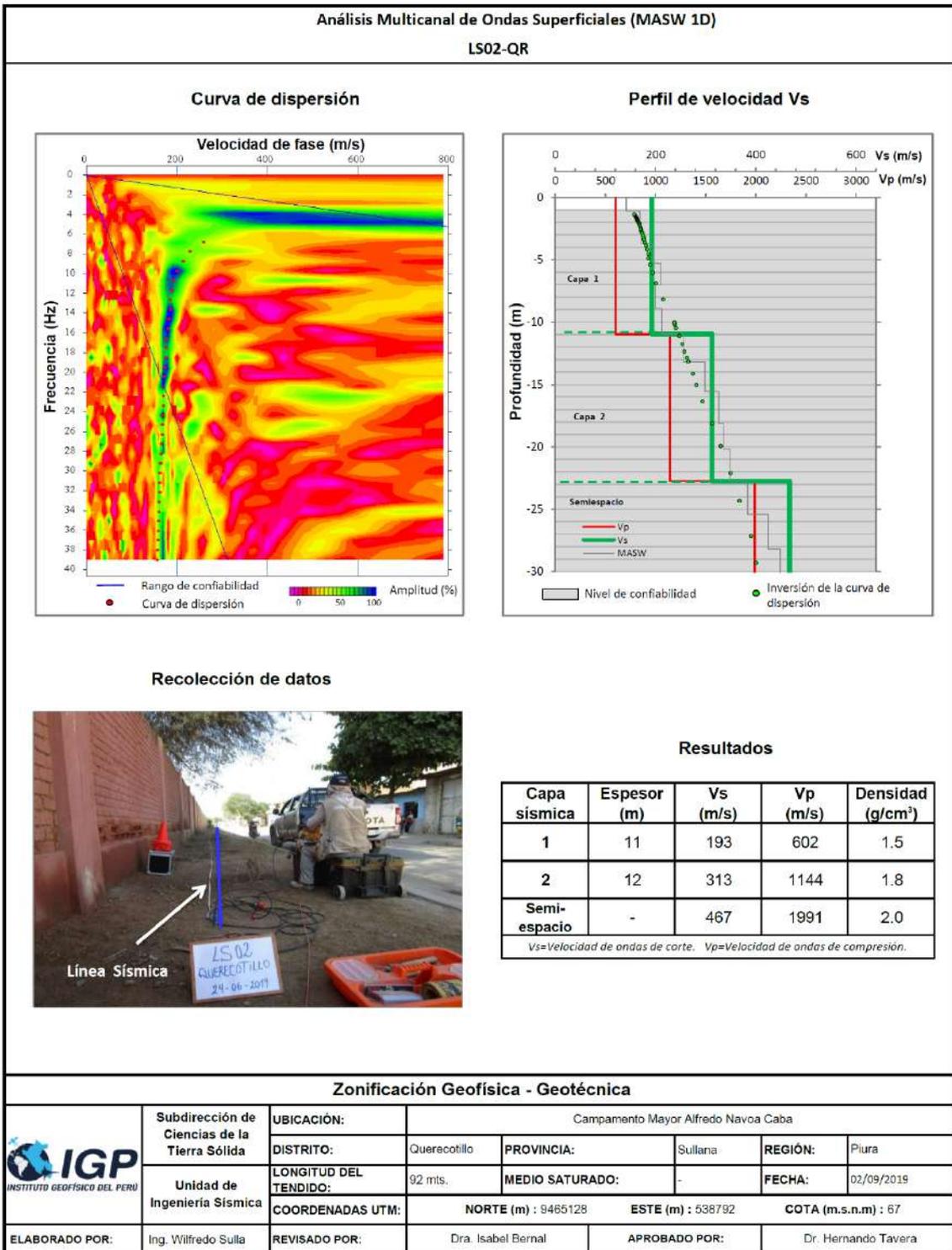


Figura 13. ...Continuación.../ Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo sísmico

LS02-QR.



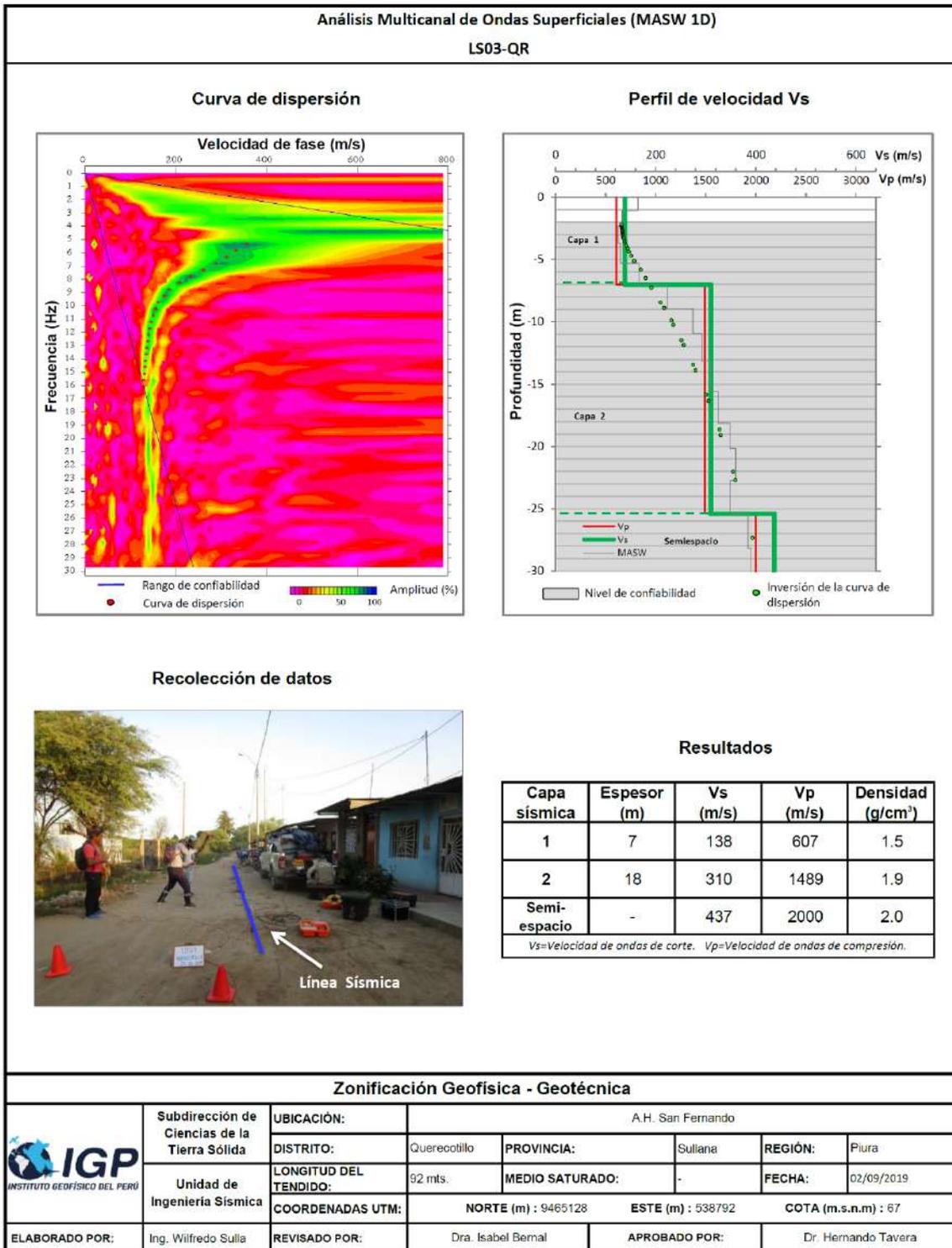


Figura 13. ...Continuación.../ Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo sísmico

LS03-QR.



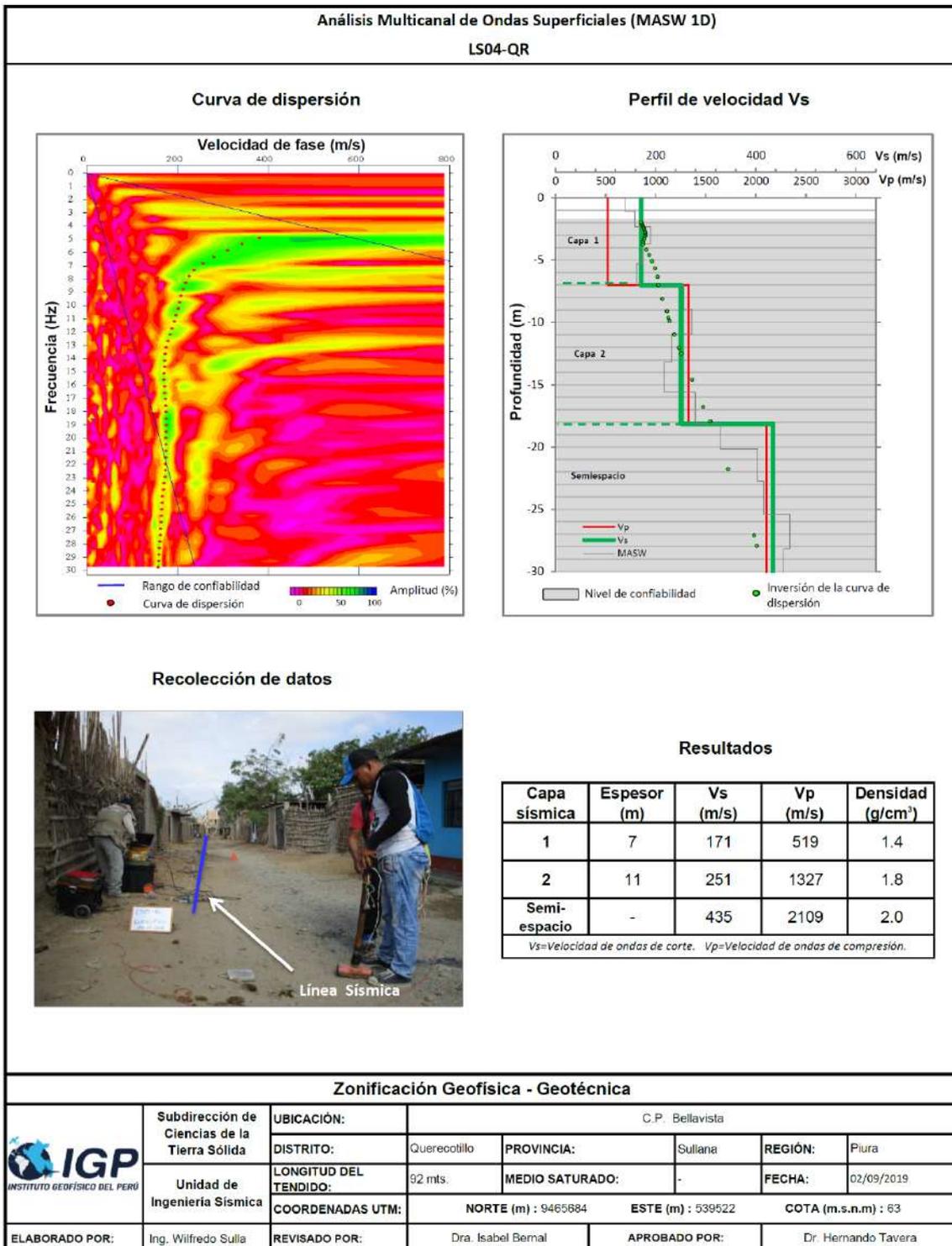


Figura 13. ...Continuación.../ Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo sísmico

LS04-QR.



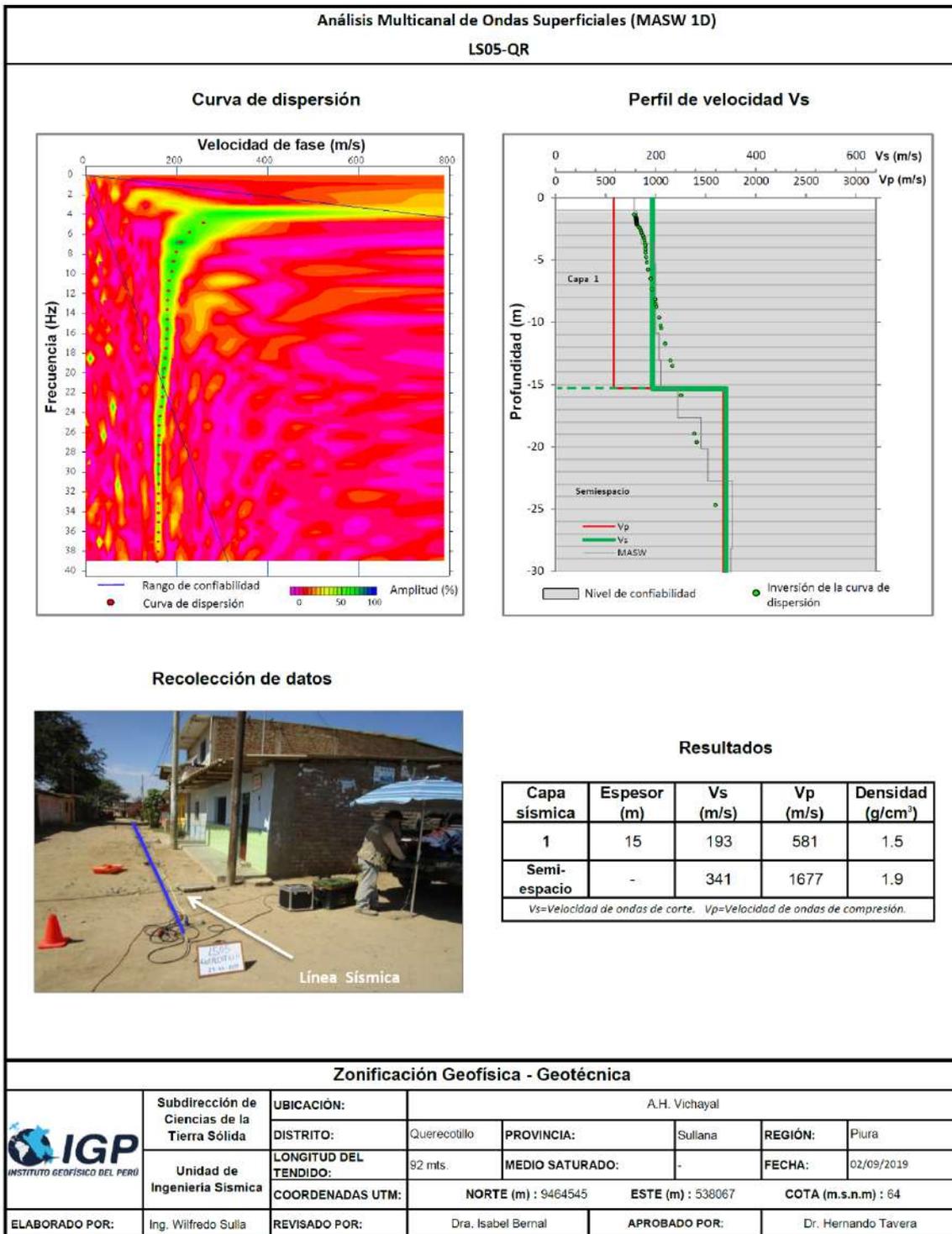


Figura 13. ...Continuación.../ Resultados obtenidos con el método MASW para el arreglo sísmico

LS05-QR.



## **ANEXO II**

### **Perfiles de Tomografía Eléctrica ERT**



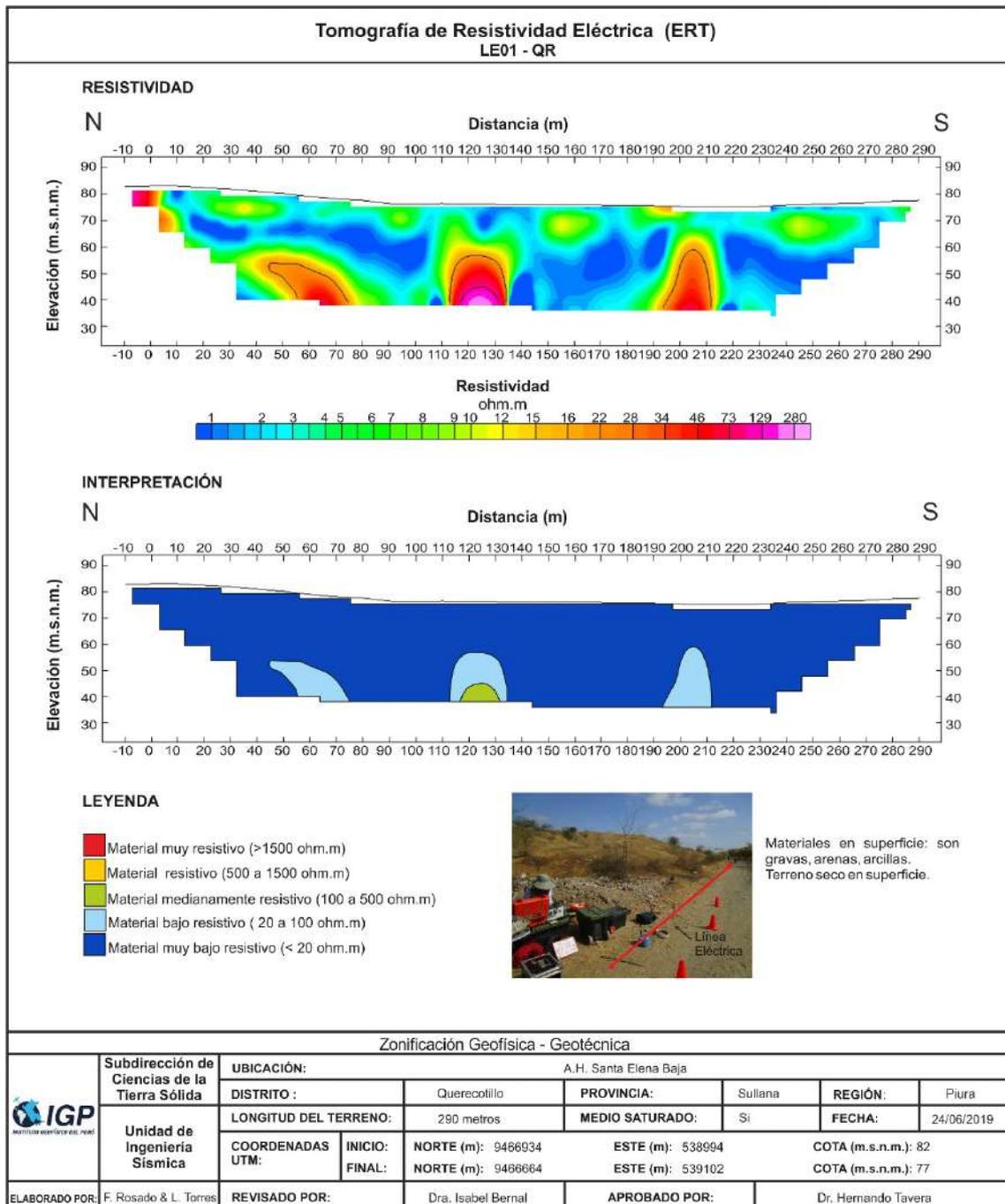


Figura 18. Resultado de tomografía de resistividad eléctrica para la línea LE01-QR.



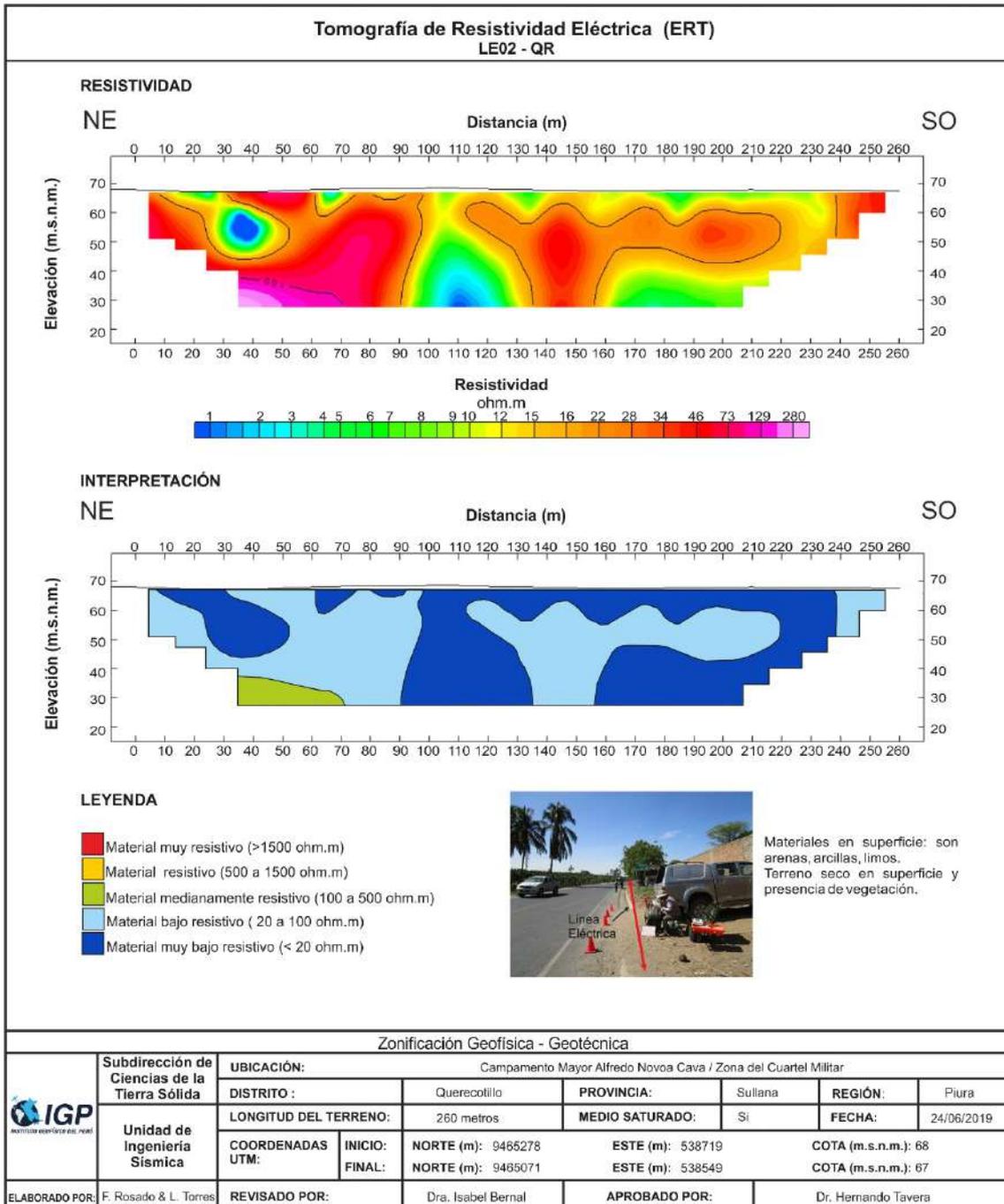
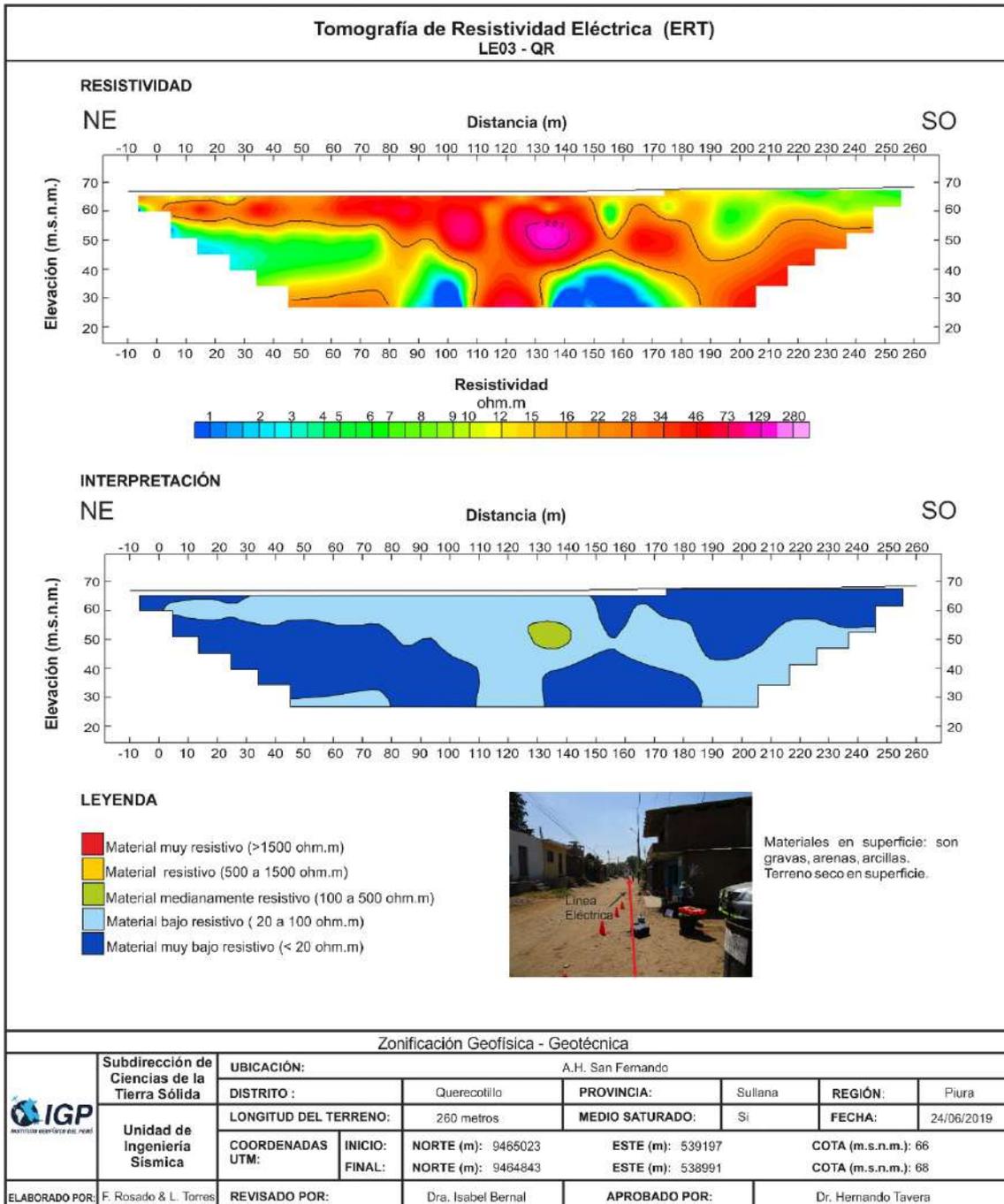


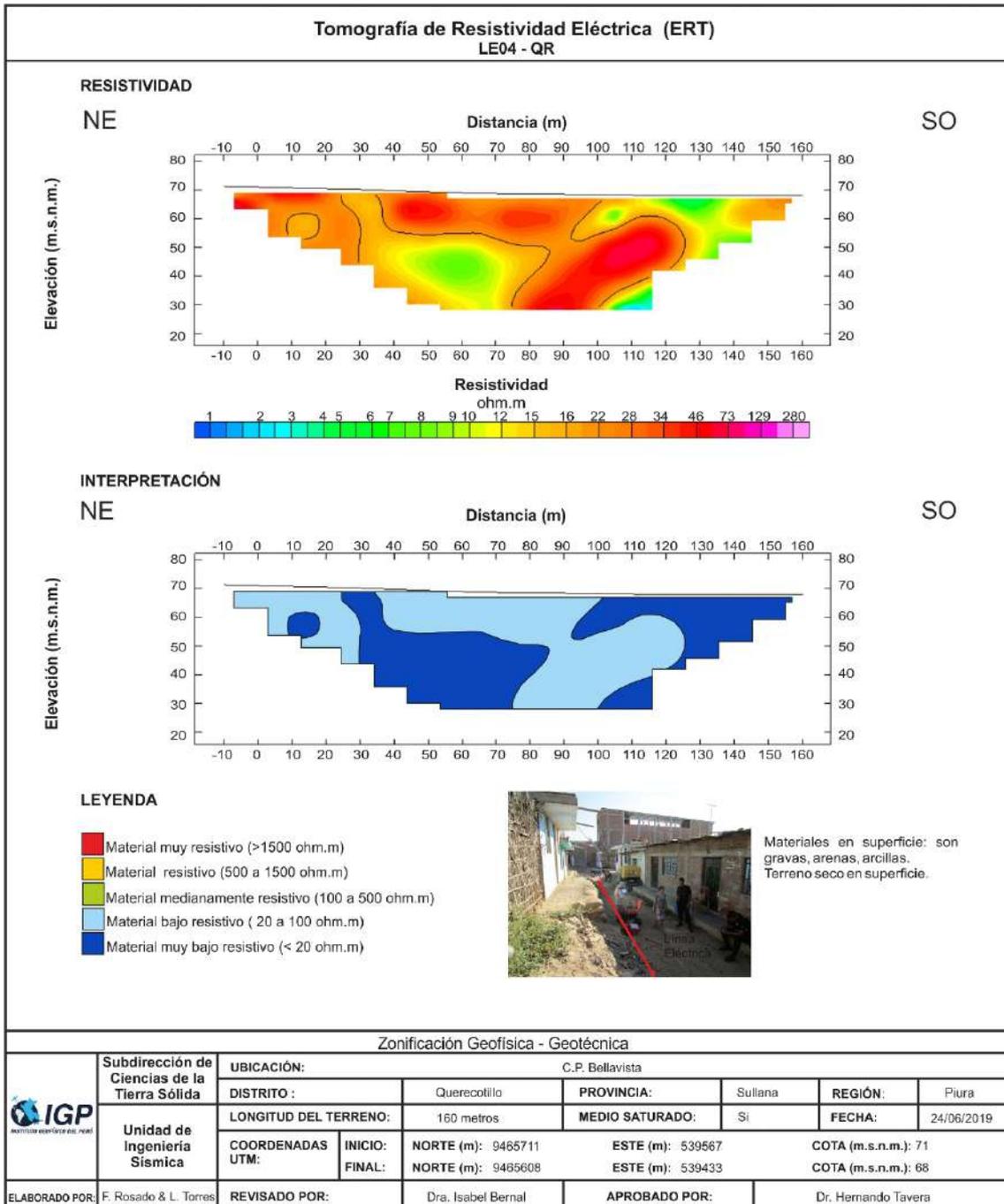
Figura 18. ...Continuación.../ Resultado de tomografía de resistividad eléctrica para la línea LE02-QR.





**Figura 18. ...Continuación.../ Resultado de tomografía de resistividad eléctrica para la línea LE03-QR.**





**Figura 18. ...Continuación.../ Resultado de tomografía de resistividad eléctrica para la línea LE04-QR.**