



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ESTUDIO GEOFÍSICO – GEOTÉCNICO DE LOS SUELOS EN CENTROS POBLADOS DE LA REGIÓN PIURA Y SU APOORTE A LA GRD C.P. LA HUACA

Informe Técnico N°006-2024/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Enero, 2024

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Director Ciencias de la Tierra Sólida: Juan Carlos Gómez

Informe Técnico

Estudio geofísico – geotécnico de los suelos en centros poblados de la Región Piura y su aporte a la gestión del riesgo de desastres – C.P. La Huaca.

Autores

Isabel Bernal, Kelly Pari, Hernando Tavera, Juan Carlos Gómez

Participantes:

Evaluación Geofísica: Kelly Pari / Isabel Bernal / Fabiola Rosado / Wilfredo Sulla / Liliana Torres / Luz Arredondo/ Jorge Salas.

Cartografía: Javier Oyola.

Evaluación Geodinámica–Geotécnica: Roberth Carrillo/ Segundo Ortiz/ Juan Carlos Gómez/ Juan Carlos Villegas /Keiko Moroccoire / Oscar Balladares.

Apoyo técnico: Jesús Huarachi.

Apoyo logístico: Robert Yupanqui / Augusto Cárdenas.

Apoyo administrativo: Marisol Enríquez / Susana Huaccachi

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz 169 Mayorazgo

Teléfono: 51-1-3172300

**ESTUDIO GEOFÍSICO – GEOTÉCNICO DE LOS SUELOS EN CENTROS
POBLADOS DE LA REGIÓN PIURA Y SU APORTE A LA GESTIÓN DEL RIESGO
DE DESASTRES
– C. P. LA HUACA –**

Lima – Perú
Enero – 2024

CONTENIDO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

- 1.1. Objetivos
- 1.2. Área de estudio
- 1.3. Marco teórico
- 1.4. Estudios anteriores

2. GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y GEOTÉCNIA

- 2.1. Geología local
- 2.2. Geomorfología
 - 2.2.1. Levantamiento topográfico – fotogrametría
 - 2.2.2. Unidades geomorfológicas
- 2.3. Geodinámica
- 2.4. Geotecnia

3. EVALUACIÓN GEOFÍSICA

- 3.1. Metodología
 - 3.1.1. Razones espectrales (H/V)
 - 3.1.2. Ondas superficiales y microtremores
 - 3.1.3. Tomografía eléctrica
- 3.2. Adquisición de datos
- 3.3. Resultados
 - 3.3.1. Frecuencias predominantes
 - 3.3.2. Perfiles sísmicos
 - 3.3.3. Secciones geoeléctricas
- 3.4. Integración de resultados

4. ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA–GEOTÉCNICA

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

Anexo 1: Información topográfica
 Ortomosaico
 Curvas de nivel

Anexo 2: Información geofísica
 Perfiles sísmicos
 Secciones geoelectricas

RESUMEN

En este estudio se analiza y evalúa las características físicas y dinámicas de los suelos del Centro Poblado La Huaca – Región Piura, a partir de la aplicación de métodos geofísicos y geotécnicos. Los resultados obtenidos evidencian la presencia de suelos blandos a medianamente rígidos (suelos aluviales con velocidades V_{s30} : 220–236 m/s) formando capas de 40 metros en dirección norte (plaza de La Huaca) y de 50 metros en dirección sur y sureste (estadio Municipal y parque La Cultura), con alto contenido de humedad. Los suelos responden principalmente a periodos largos de vibración (>0.5 segundos) y presentan a profundidades de 1.0 y 1.5 metros, capacidades de carga admisible Muy Baja <1.0 Kg/cm².

En el C.P. La Huaca predominan Suelos Tipo S3 que corresponden a suelos intermedios, con la presencia de una capa delgada de suelos blandos a nivel superficial. A la ocurrencia de un sismo de moderada a mayor magnitud, estos suelos pueden experimentar niveles altos de sacudimiento, debido a que en superficie, se tiene suelos blandos con alto contenido de humedad.

1. INTRODUCCIÓN

Por su ubicación geográfica, el Perú es un país altamente sísmico debido a que en su borde occidental se desarrolla el proceso de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana a velocidades del orden de 6–8 cm/año (Norabuena et al, 1999; Villegas et al, 2016). En este contexto, la región norte ha sido afectada por eventos sísmicos de variada magnitud que han generado altos niveles de sacudimiento del suelo, puesta en evidencia con los daños observados post-sismo (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, tal como ocurrió en la provincia de Sullana el 30 de julio del 2021 con un sismo de magnitud M6.1 (IGP, 2021) que sacudió los suelos en un radio de 250 km tomando como referencia el epicentro del sismo.

Después de ocurrido el sismo de Sullana, la evaluación de los daños mostro que ellos fueron mayores en las ciudades y localidades de Piura, Sullana, Paita, Chulucanas y Colán, debido principalmente a la presencia de suelos blandos y/o con efectos de sitio, llegando a corroborar que las características físicas del subsuelo influyen directamente en el comportamiento dinámico del suelo sobre el cual se levantan las ciudades y/o futuras áreas de expansión. En este sentido, resulta de vital importancia conocer la composición geológica de los

suelos y su comportamiento dinámico a la ocurrencia de sismos y ello, es posible con la aplicación de métodos geofísicos. Estos métodos permiten conocer, por ejemplo, el contenido de humedad, espesores y velocidades de las ondas de corte (V_s) en las capas que conforman su subsuelo y a su vez, los resultados obtenidos pueden ser correlacionados con los aspectos geo-ambientales de la zona de estudio. El suelo condiciona el diseño y la construcción de viviendas y estructuras apropiadas para cada tipo de suelo.

En este contexto, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y la Región Piura, mediante la firma de un convenio acuerdan realizar el estudio Geofísico-Geotécnico de los suelos en el Centro Poblado La Huaca (provincia de Paita, región Piura) y cuyos resultados contribuirán a la Gestión del Riesgo de Desastres ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud y sus efectos asociados.

1.1.- Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo conocer los parámetros físicos de la estructura del suelo y su comportamiento dinámico ante la ocurrencia de sismos, a fin de generar el Mapa de Zonificación Geofísica – Geotécnica para el C.P. La Huaca, ubicado en el distrito La Huaca, provincia de Paita en la región Piura. Mediante el uso de diferentes métodos geofísicos, geológicos y geotécnicos que en conjunto, permitirán determinar los diferentes parámetros físicos y dinámicos del

suelo (velocidades, espesores, resistividad, periodos de respuesta, amplificaciones, capacidad portante y otros). Los resultados de este estudio deben ser considerados por las autoridades locales como insumo para gestión del riesgo, a fin de realizar una adecuada planificación territorial y expansión urbana.

1.2.– Área de estudio

El centro poblado La Huaca se ubica en la región norte del Perú, en el distrito de La Huaca, provincia de Paita en el departamento de Piura (Figura 1), en las coordenadas geográficas latitud 4.91°S y longitud 80.96°O, a una elevación media de 25 m.s.n.m. Asimismo, tiene una población de 4387 habitantes (INEI, 2017) y su superficie se caracteriza por presentar un relieve llano ubicado a una distancia promedio de 600 metros al sur del cauce del río Chira. Los fenómenos naturales que afectan directamente a esta población son los sismos y las intensas precipitaciones que pueden generar altos niveles de sacudimiento del suelo e inundaciones, que causarían daños a la población.

1.3.– Marco teórico

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 y actualizada



Figura 1. Centro poblado La Huaca.

según Resolución Ministerial N° 355–2018–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 estudios de mecánica de suelos (EMS). A continuación, se describen los parámetros empleados para clasificar los perfiles de suelos en la Tabla 1.

1.3.– Marco teórico

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 y actualizada según Resolución Ministerial N° 355–2018–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 estudios de mecánica de suelos (EMS). A continuación, se describen los parámetros empleados para clasificar los perfiles de suelos en la Tabla 1.

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).

Tabla 1. Clasificación de los perfiles de suelos considerando lo establecido en la Norma Técnica E.030 (2018) y su adaptación al área de estudio.

NORMA E.030 (2018)			ADAPTACIÓN DE LA NORMA E.030 AL ÁREA DE ESTUDIO				
Perfil	Velocidad - Vs30 -	Tipos de suelos	Perfil	Velocidad- Vs30 -	Periodos To (s)	Tipos de suelos	Zonas
S0	>1500 m/s	Roca dura	S0	>1500 m/s	-	Roca dura	---
S1	500 a 1500 m/s	Suelos muy rígidos	S1	500 a 1500 m/s	0.1-0.2	Suelos muy rígidos	Zona I
S2	180 a 500 m/s	Suelos intermedios	S2	350 a 500 m/s	0.2-0.4	Suelos rígidos	Zona II
			S3	180 a 350 m/s	0.5-0.7	Suelos intermedios - (medianament e rígidos)	Zona III
S3	<180	Suelos blandos	S4	<180 m/s	>0.7	Suelos blandos	Zona IV
S4	Condición basada en EMS	Condiciones Excepcionales	S5	Condición basada en EMS		Suelos inestables por su composición	Zona V
						Suelos inestables por topografía	
Zonas con factor de amplificación relativa ≥ 2.5 veces							

Para este estudio, la Zonificación Geofísica – Geotécnica de las ciudades 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. De acuerdo con los estudios realizados por el Instituto Geofísico del Perú

(IGP), el rango de velocidad de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen, a fin de analizar con mayor detalle las velocidades de ondas de corte que caracterizan a los suelos identificados en la zona de estudio, en ese sentido se establece la existencia de 5 zonas cuyas características se muestran en la Tabla 1.

1.4.– Estudios anteriores

La información relevante y disponible sobre los estudios de fenómenos naturales y sus efectos asociados en la región Piura y en el centro poblado de La Huaca, fue consultada de las siguientes fuentes:

Alfaro et al. (2014): Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). El estudio detalla el cálculo de umbrales de precipitación usando datos de la red de estaciones meteorológicas del SENAMHI para el periodo 1964 – 2014 y de la estación meteorológica La Esperanza que se ubica a 10.80 km al noreste del área de estudio. De acuerdo con los datos meteorológicos de dicha estación, las precipitaciones en el área de estudio se presentan entre el periodo diciembre – abril, siendo el registro histórico máximo de precipitaciones el día 24 de mayo de 1983 con valores de 134.80 mm/día.

Laboratorio de mecánica de suelos del Gobierno Regional de Piura (2022): El estudio de mecánica de suelos se realizó con fines de

cimentación para el proyecto: "Elaboración de los estudios de evaluación de riesgo de desastres – EVAR para la formulación del plan regional integral de reconstrucción ante el sismo de 30 de julio del 2021".

Según el estudio, se han realizado cuatro (4) calicatas en el área urbana del distrito de La Huaca con profundidades máximas de 3.0 metros; posteriormente se realizaron ensayos de mecánica de suelos (contenido de humedad del suelo, análisis granulométrico, límites líquido y plástico, proctor modificado, corte directo y sales solubles totales) y cuyos resultados han permitido identificar, según la clasificación SUCS, que en el área urbana de La Huaca, los suelos están compuestos por arena mal gradada con limo y arena mal gradada. Asimismo, los parámetros geotécnicos obtenidos mediante el ensayo de corte directo indican que el ángulo de fricción de los suelos presenta valores entre 19° y 21°, así como, cohesión de 0.00 a 0.05. Según el estudio geotécnico, la capacidad portante en La Huaca presenta capacidad de carga admisible muy baja (< a 1.00 kg/cm²).

2. GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y GEOTÉCNIA

2.1. Geología local

El análisis de la geología regional ha sido desarrollado en base a información consolidada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 1999) a escala 100,000 (Cuadrángulo Geológico de Sullana – hoja 10–b); mientras que, para la geología local se ha hecho uso de información recolectada directamente en campo para el presente estudio. De acuerdo a estos resultados, se ha logrado identificar las siguientes unidades geológicas:

Depósitos aluviales (Q–al): Unidad geológica que se encuentra conformada por materiales heterogéneos como gravas, arenas y limos que fueron transportados por flujos de agua a través de quebradas y torrenteras hasta ser depositados en zonas de baja pendiente. Sobre esta unidad se asienta el área urbana del centro poblado de La Huaca (Figura 2).

Depósitos eólicos (Q–e): Están conformados por arenas de grano medio a fino, color gris a beige que han sido transportados por la acción de los vientos. Se ha identificado en el lado oeste y sureste del área urbana de La Huaca (Figura 3).



Figura 2. Sobre estos depósitos aluviales se encuentra asentada toda el área urbana del C.P. La Huaca.



Figura 3. Depósitos eólicos que afloran en el sector oeste y sureste de la plaza principal de La Huaca.

Las unidades geológicas antes descritas han sido cartografiadas en campo y representadas en el mapa geológico de la Figura 4.

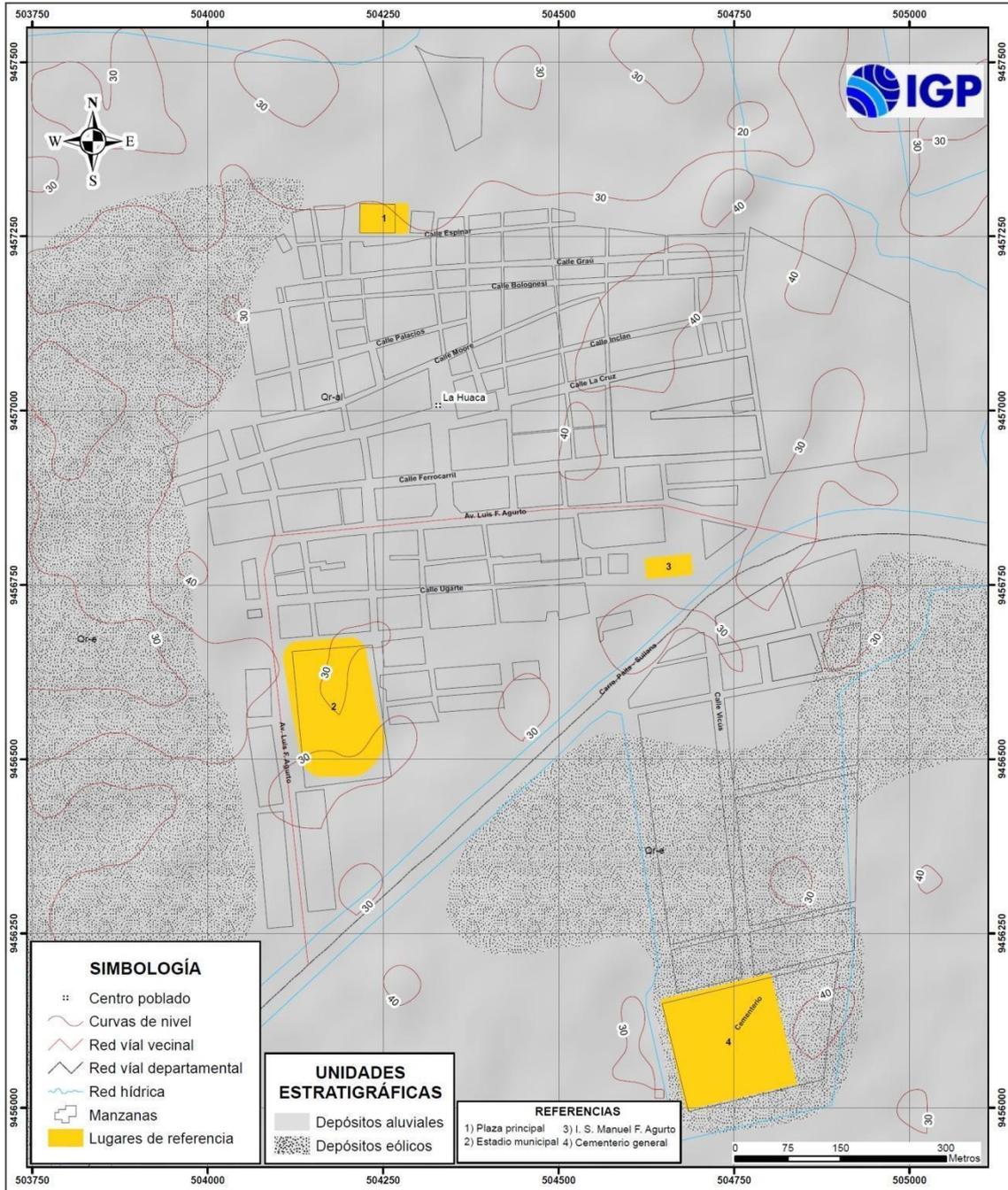


Figura 4. Mapa geológico del área urbana de centro poblado de La Huaca.

2.2.– Geomorfología

La geomorfología estudia las diferentes formas del relieve de la superficie terrestre (geoformas) y los procesos que las generan. A continuación, se presenta el levantamiento topográfico del área de estudio identificando las elevaciones y pendiente del terreno y se describe las unidades geomorfológicas identificadas en el área urbana del C.P. La Huaca en base a sus características físicas y los procesos que las han originado.

2.2.1.– Levantamiento Topográfico

Para el CP La Huaca, se realizó el levantamiento topográfico en alta resolución mediante fotogrametría aérea con un dron modelo Phantom 4 Pro V2.0 y mediciones GNSS (sistema global de navegación por satélites), lo cual ha permitido generar la siguiente información:

- Modelo digital de superficie (MDS) y de terreno (MDT): Ambos con una resolución espacial de 20 cm/pixel, los cuales indican que el área de mayor elevación (20 a 29 m.s.n.m.) se encuentra en la zona centro y sur comprendiendo el casco urbano de La Huaca y áreas de cultivo, mientras que la zona de menor elevación (13 a 19 m.s.n.m.) se distribuye al centro y norte abarcando áreas de cultivo y cauce del río Chira (Figura 5).

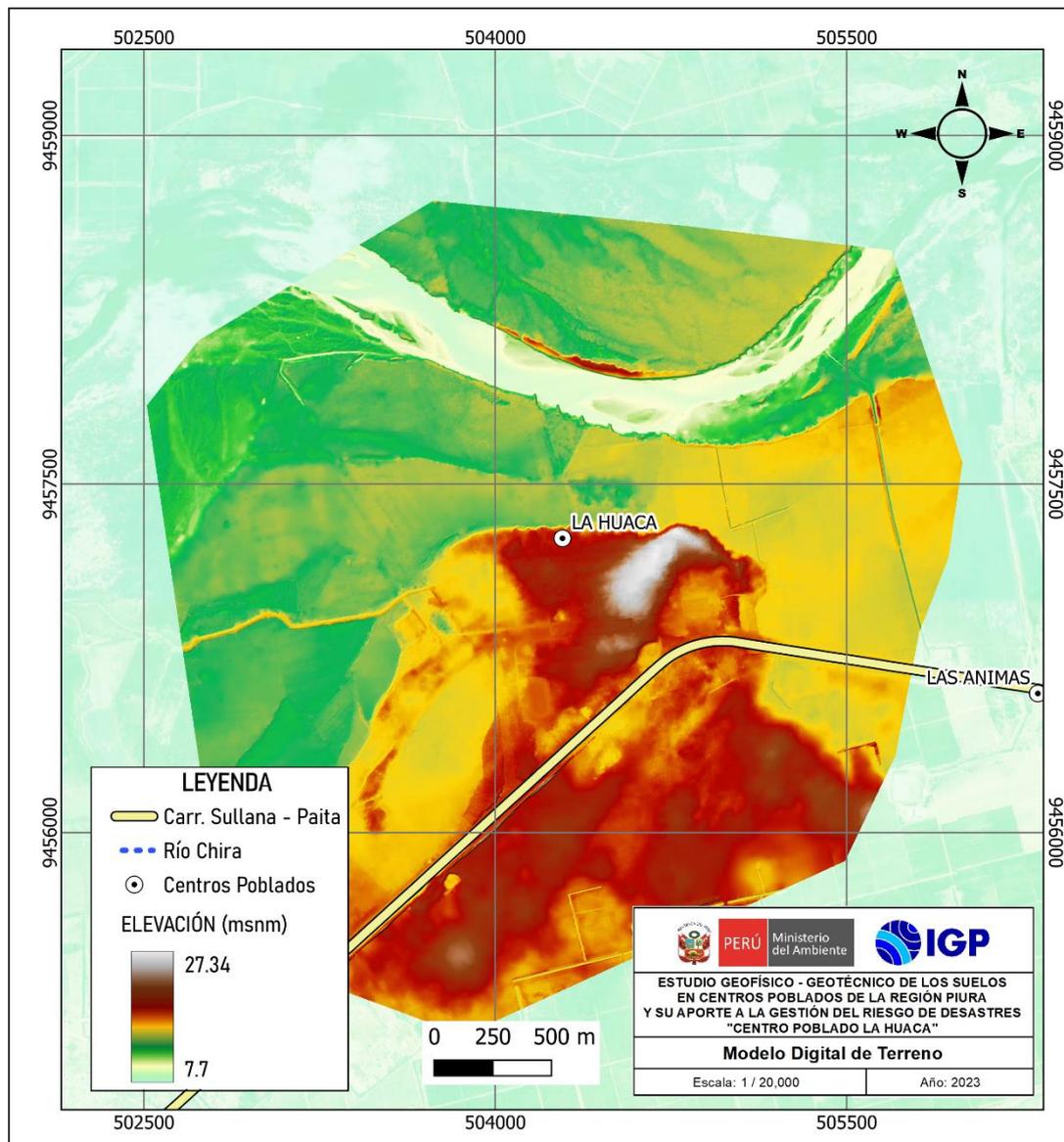


Figura 5. Modelo digital de terreno del C.P. La Huaca.

- Ortomosaico: se ha generado a partir de la unión de 1,815 mosaicos que han sido corregidos por distorsiones ocasionados por el relieve y los objetos presentes en La Huaca. La imagen permite identificar las áreas de cultivo identificadas abarcan un área aproximada de 581 ha, el casco urbano 107 ha y el cauce

del río Chira 53 ha, estas zonas representan el 42%, 19% y 5% del área total respectivamente.

- Mapa de curvas de nivel: A partir del Modelo Digital del Terreno, se ha generado un mapa de curvas de nivel para el C.P. La Huaca con un intervalo de 2 metros a escala 1: 5000. Los resultados muestran elevaciones máximas en la zona centro sur comprendiendo el casco urbano de La Huaca y áreas de cultivo.

En el Anexo 1, se presenta para el CP La Huaca el mapa de ortomosaico y de curvas de nivel con intervalos de 2 metros.

2.2.2.– Unidades Geomorfológicas

Las principales unidades geomorfológicas identificadas en La Huaca en base a sus características físicas y los procesos que las han originado son las siguientes:

Terraza aluvial 2: Consiste en una superficie llana o planicie antigua de origen aluvial, más o menos extenso y continúa, con ligeras ondulaciones y depresiones que tiene un desnivel de entre 4 a 8 metros con relación con el lecho fluvial. Sobre esta unidad se asienta el área urbana del C.P. La Huaca (Figura 6).



Figura 6. Sobre esta terraza aluvial 2 se asienta el área urbana del C.P La Huaca, presenta ligeras ondulaciones y depresiones.

Terraza aluvial 1: Las terrazas aluviales son plataformas, más o menos extensas y continuas que tiene un desnivel de 2 a 5 metros con respecto a la llanura de inundación. Esta unidad geomorfológica es de origen depositacional, presenta una pendiente $< 10^\circ$, así como una geometría irregular y drenaje variable (Figura 7).

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

cuenca. Está conformada por material fluvial (arenas) y ha sido identificada a 200 metros al norte de la plaza principal de La Huaca.



Figura 7. Límite (línea roja) entre las terrazas aluviales 1 y 2, la 2 es la más antigua y sobre esta geoforma se asienta al área urbana del C.P. La Huaca.

Colina: Se refiere a superficies elevadas cuya base presenta forma redondeada, presenta pendientes menores a 20° de inclinación. Se sitúan a 410 metros y 1.10 km al sureste de la plaza principal de La Huaca (Figura 8).

Llanura Costera: Se define como una superficie llana o ligeramente ondulada con pendientes menores a 15° de inclinación y que presenta un desnivel topográfico de 10 metros respecto a la zona urbana. Se encuentra conformada por materiales heterogéneos de

origen aluvial y desde esta geoforma, las aguas de escorrentía pluvial discurren hacia la zona urbana del C.P. La Huaca (Figura 9).



Figura 8. Colina situada a 300 metros al sureste de la plaza principal de La Huaca.



Figura 9. Llanura Costera situada a 1 km al sureste de la plaza principal del C.P. La Huaca.

Finalmente, en la Figura 10 se presenta el mapa de geomorfología del área urbana del C.P. La Huaca, elaborado con la información recolectada en campo.

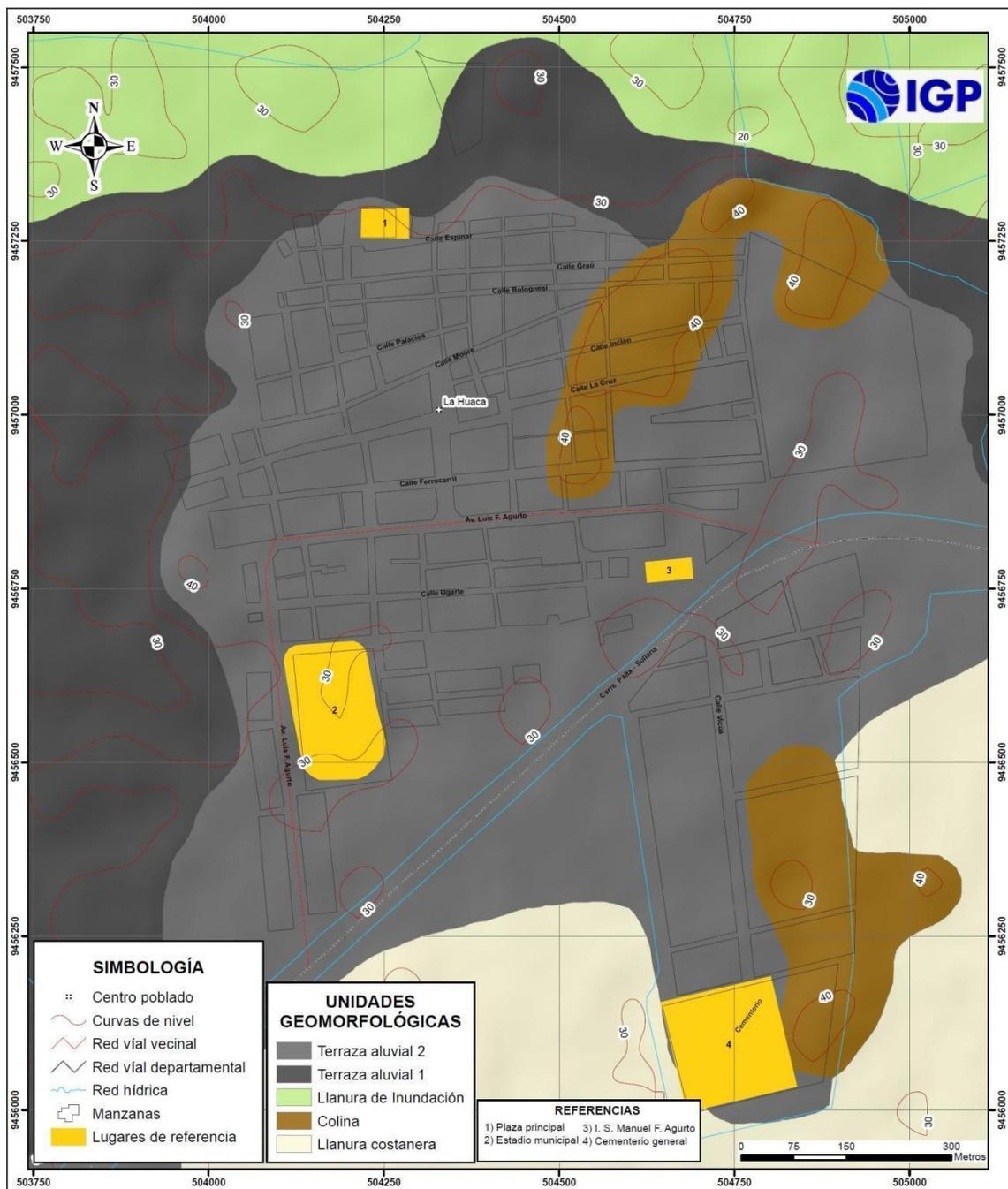


Figura 10. Mapa geomorfológico del área urbana del C.P. La Huaca, donde la población se asienta principalmente sobre una terraza aluvial antigua.

2.3.– Geodinámica

La Geodinámica estudia los fenómenos geológicos que provocan modificaciones en la superficie terrestre producto de la interacción de procesos geológicos (internos y externos) que originan cambios físicos, químicos y/o morfológicos que alteran y modifican el relieve actual. Durante los trabajos de campo, en el área urbana del centro poblado La Huaca, se identificaron los siguientes eventos geodinámicos:

Inundaciones pluviales: Evento geodinámico que resulta de la acumulación de las aguas provenientes de las precipitaciones pluviales en las partes bajas o de menor pendiente (depresiones). En general, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días.

Las zonas fueron identificadas y delimitadas con ayuda de la coordinadora de Defensa Civil y pobladores de la zona, los mismos que fueron reconocidos en las inmediaciones Pampa La Gallina, cerca del PRONOEI La Huaca, Cancha deportiva La Huaca, por el Instituto Superior Luis F. Agurto, por el colegio Manuel Pio Zúñiga, por la intersección de la Panamericana Norte con Calle Vicús, a pocos metros del Cementerio General y por el estadio municipal de La Huaca, debido a la acumulación y evacuación de las aguas en la parte baja de los techos de las viviendas, ya que no cuentan con un sistema

de drenaje perimetral y evacua las aguas hacía la calle, pudiendo afectar a las viviendas aledañas (Figuras 11 al 15).

Arenamiento eólico: La ausencia o escasa precipitación es uno de los principales factores de avance de las arenas. Los vientos erosionan, transportan y depositan las partículas de arena en áreas secas, donde el suelo no es retenido por la vegetación, favorecen la migración y acumulación de arena en forma de mantos, médanos y dunas (Villota, 2005). Estos depósitos de arenas de grano medio a fino se han identificado en el sector Pampa La Gallina (a 300 metros al oeste de la plaza principal), parte posterior del estadio municipal (a 800 metros al sur de la plaza principal) y por el colegio Manuel Pio Zúñiga (a 860 metros al sureste de la plaza principal), (Figura 16 y 17).

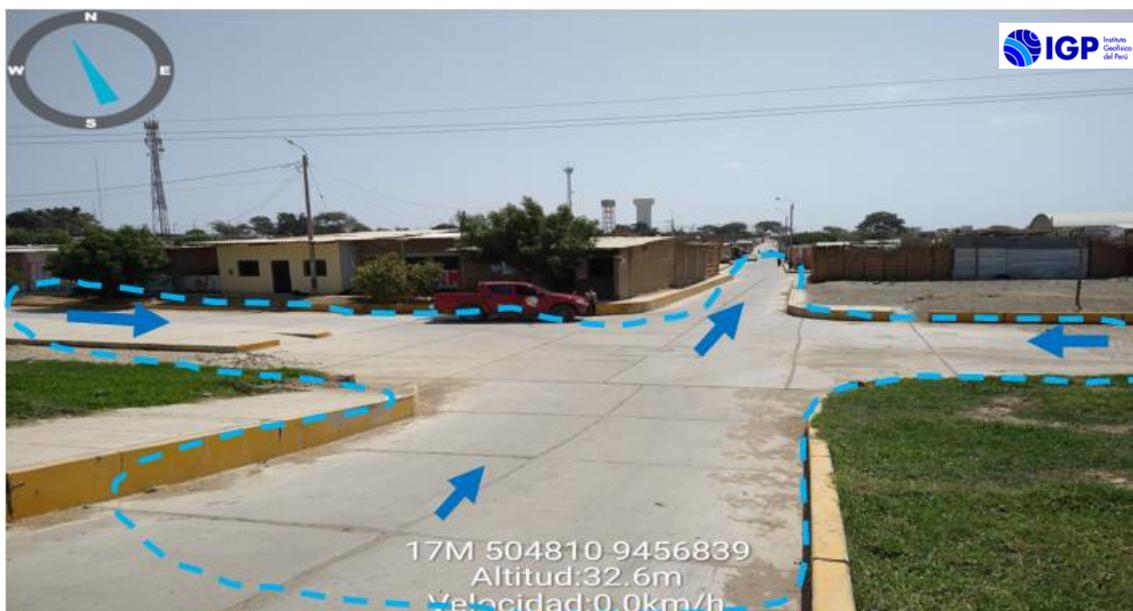


Figura 11. Áreas afectadas (polígono celeste) por inundaciones pluviales (escorrentías superficiales) en épocas de precipitaciones, esto ocurre en la entrada al C.P. La Huaca.



Figura 12. Área afectada por inundaciones pluviales en la entrada a La Huaca, durante la lluvia ligera ocurrida el 13-06-2022, se puede apreciar la acumulación de agua en una zona de depresión, que afecta a las viviendas aledañas a la zona de acumulación.

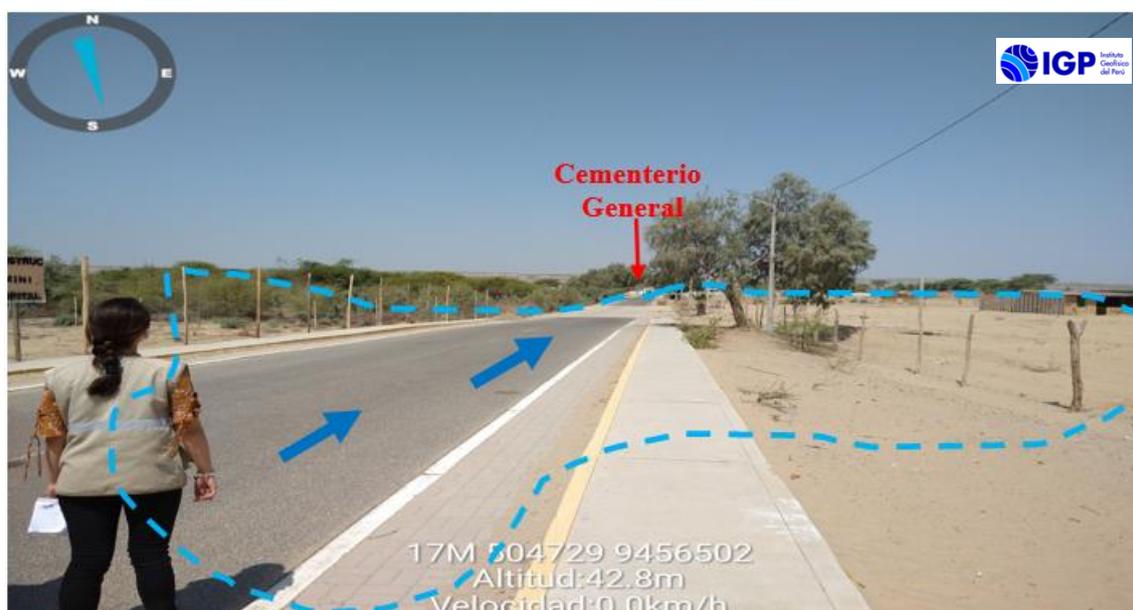


Figura 13. Área afectada (polígono celeste) por inundaciones pluviales debido a la deficiencia de drenaje pluvial para la evacuación de las aguas que discurren por la calle Vicús en dirección al cementerio general de La Huaca.



Figura 14. Área afectada (polígono celeste) por inundaciones pluviales en el sector Pampa La Gallina, que afecta viviendas aledañas y el PRONOEI La Huaca



Figura 15. Área afectada (polígono celeste) por inundaciones pluviales en las inmediaciones del Instituto Superior Luis F. Agurto.



Figura 16. Depósitos de arenas de grano medio a fino ubicados a 860 metros al sureste de la plaza principal de La Huaca.



Figura 17. Depósitos de arenas de grano medio a fino ubicados a 800 metros al sur de la plaza principal de La Huaca.

Finalmente, se cartografía y genera el mapa geodinámico para el área urbana del centro poblado La Huaca (Figura 18).

2.4.– Geotecnia

Con la finalidad de obtener la información geotécnica de los suelos de cimentación en el área urbana de La Huaca, en coordinación con el Gobierno Regional de Piura, se ejecutaron exploraciones a cielo abierto (calicatas), análisis químico y cortes directos para la estimación de la capacidad de carga de los suelos.

Exploraciones a cielo abierto (calicatas, norma ASTM 420): Es un método de exploración directa que consiste en realizar una excavación en el terreno para la observación directa del suelo. En el área de estudio se realizaron cuatro calicatas con profundidades de exploración de 3.0 metros, para describir los estratos que la conforman, así como extraer muestras en bolsas herméticas con capacidad de 5 kg. La ubicación de las calicatas se muestra en la Tabla 2.

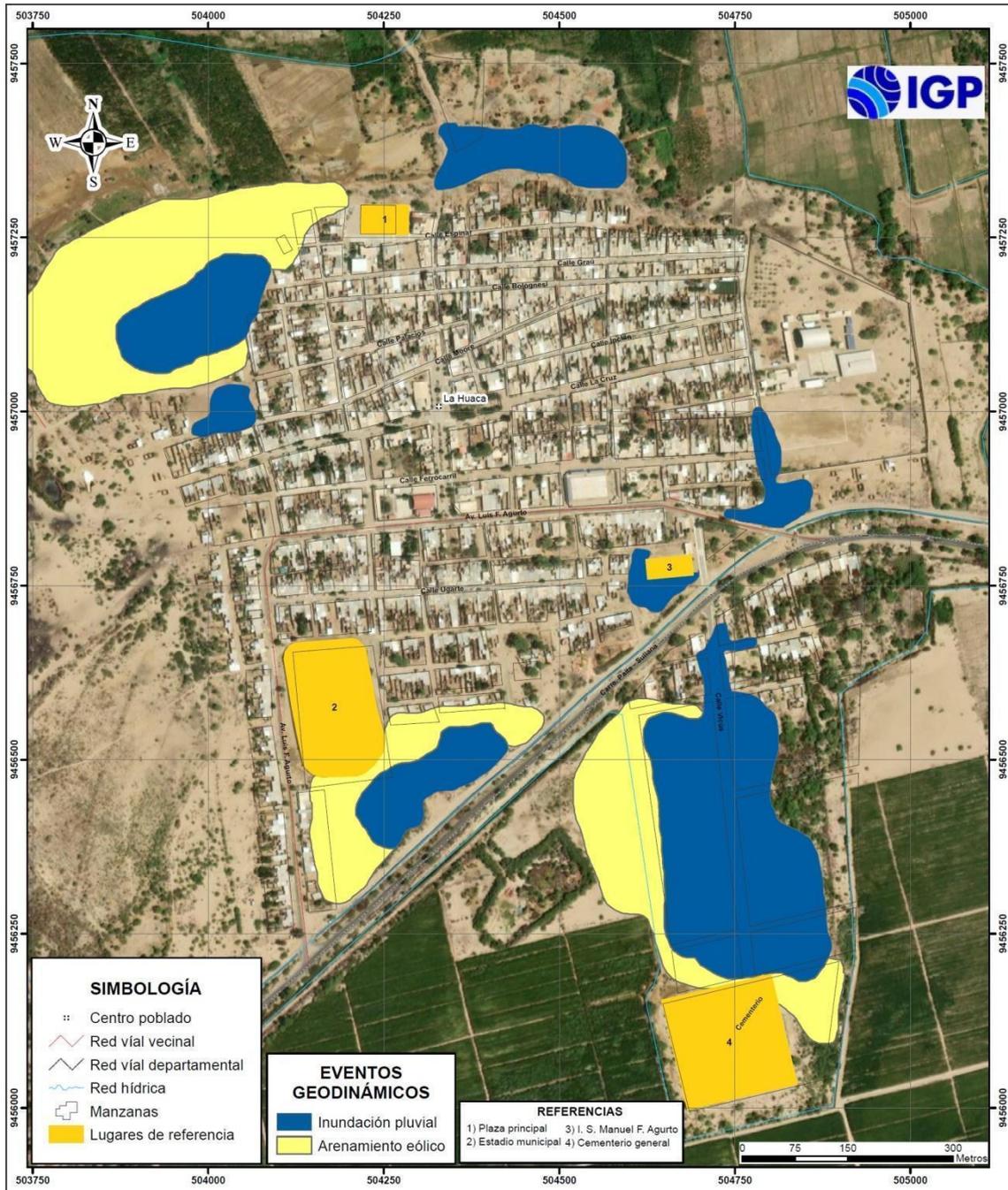


Figura 18. Mapa geodinámico de La Huaca se aprecian delimitando las áreas susceptibles a inundaciones pluviales y el arenamiento eólico.

Tabla 2. Ubicación de calicatas.

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREATICO A (m)
LH - 01	504378	9457340	3.00	NP
LH - 02	504039	9456856	3.00	NP
LH - 03	504628	9456771	2.30	2.30
LH - 04	504260	9456508	2.30	2.30

Fuente: Gobierno Regional de Piura. NP= No presenta.

Clasificación de suelos SUCS en el área urbana de La Huaca: En base a la información recolectada de las calicatas y los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos y de plasticidad realizados por el Gobierno Regional de Piura, se han identificado 03 tipos de suelos, los mismos que han sido agrupados haciendo uso del Sistema de Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y cuyos resultados son (Figura 19 y Tabla 3):

- **Suelos tipo SP - SM:** Arena mal gradada con limos, con contenido de humedad de entre 2.10 - 2.60 %, constituyen suelos de compacidad muy suelta a suelta, no presentan plasticidad (debido a la escasa presencia de material fino). Presentan densidades naturales de entre 1.099 hasta 1.412 gr/cm³. Abarcan el 91% del área urbana del C.P. La Huaca.

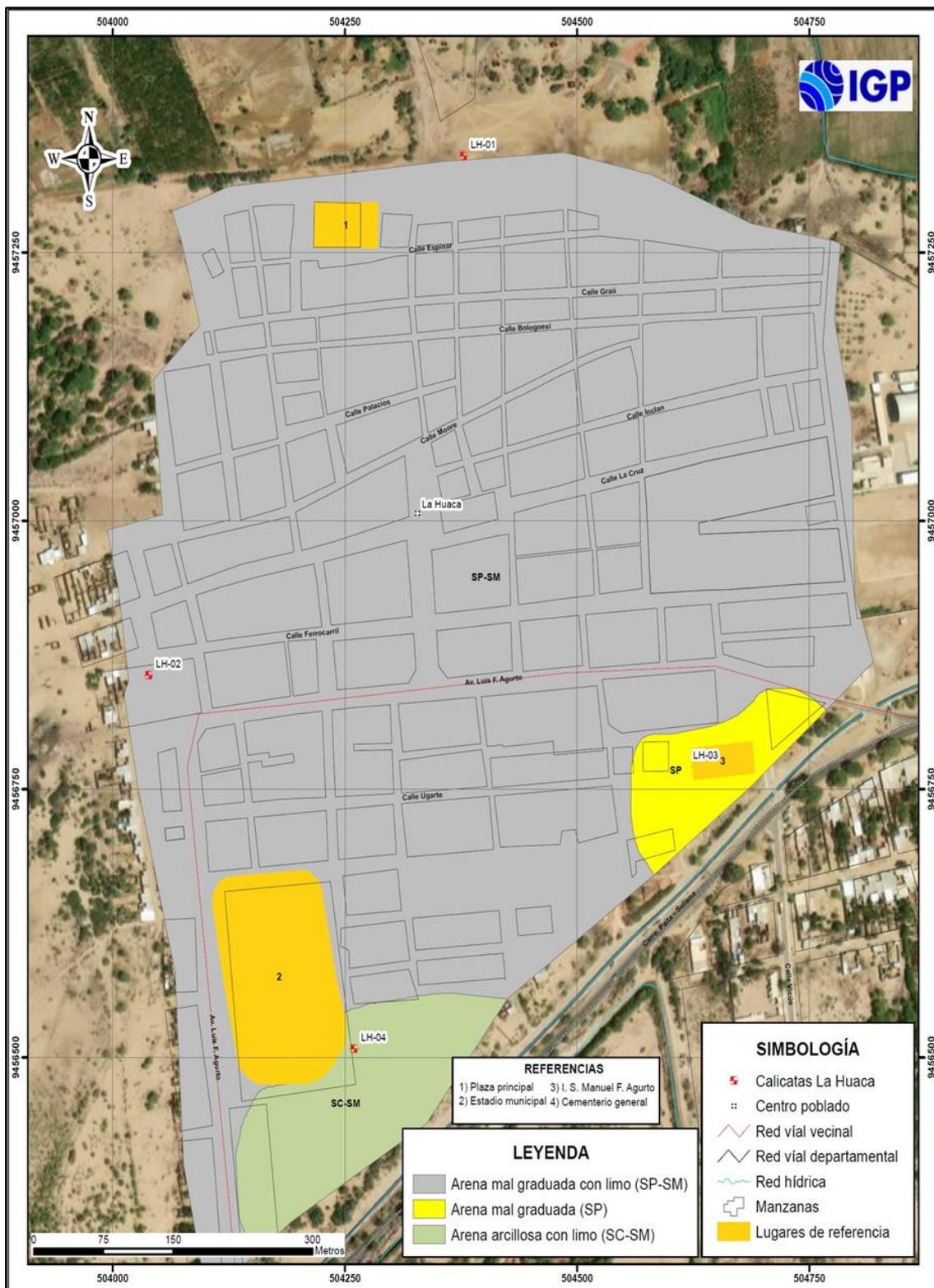


Figura 19. Mapa de clasificación SUCS de suelos en el área urbana de La Huaca.

- **Suelos tipo SC – SM:** Están conformados por arenas arcillosas con limo, de humedad alta (28%), constituyen suelos de compacidad media, presenta baja plasticidad (7) y densidad natural de 1.058 gr/cm³. Este tipo de suelos abarca el 6% del área urbana del C.P. La Huaca y ha sido identificado en la calicata 4, situada en la parte posterior del estadio Municipal de La Huaca.
- **Suelos Tipo SP:** Están conformados por arenas mal gradadas, de humedad alta (26.30%), constituyen suelos de compacidad muy suelta a suelta, no presentan plasticidad (debido a la escasa presencia de material fino). Presenta densidad natural de 1.20 gr/cm³. Abarcan el 3% del área de estudio y ha sido identificado en la calicata 3, situada en la prolongación calle Ugarte.

En la Tabla 3 se establece el resumen de los tipos de suelos existentes en el área urbana de CP La Huaca.

Tabla 3. Clasificación SUCS de los suelos de las 4 calicatas elaboradas en el área urbana de CP La Huaca.

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS % (<0.074 mm)	LÍMITE LIQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
LH - 01	3.00	N.P.	0.00	90.00	10.00	-	-	-	2.60	SP - SM	Arena mal gradada con limo
LH - 02	3.00	N.P.	0.00	93.10	6.90	-	-	-	2.10	SP - SM	Arena mal gradada con limo
LH - 03	2.30	2.30	0.00	98.80	1.20	-	-	-	26.30	SP	Arena mal gradada
LH - 04	2.30	2.30	0.00	63.30	36.70	28	21	7	28.00	SC - SM	Arena arcillosa con limo

Fuente: Gobierno Regional de Piura. NP= No presenta

Análisis químico de suelos: Con el fin de determinar el contenido de sales solubles en suelos, el Gobierno Regional de Piura realizó ensayos de análisis químico a las 4 muestras extraídas de las cuatro calicatas. Los resultados obtenidos indican lo siguiente:

- Calicata LH 01, muestra 1.356%,
- Calicata LH 02, muestra 0.158%,
- Calicata LH 03, muestra 0,031% y
- Calicata LH 04, muestra 0.733%.

Considerando estos resultados y haciendo la comparativa con los límites permisibles de agresividad del suelo al concreto (Tabla 4), se determina que las calicatas LH 02 y LH 03 se encuentran dentro de límite permisible; sin embargo, las calicatas LH 01 y LH 04 van desde fuertemente a extremadamente salino; por lo tanto, se requieren tomar precauciones para protección de estructuras.

Ensayo de corte directo (Norma ASTM D – 3080): La finalidad del ensayo de corte directo es determinar la resistencia al esfuerzo de corte de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones (esfuerzos verticales y horizontales) que simula que existe o existirá en el terreno producto de la aplicación de carga. Esta resistencia al corte de los suelos se debe a dos componentes: la cohesión (comportamiento plástico que presentan las partículas finas) y el

ángulo de fricción interna (rozamiento que existe en las partículas granulares).

Tabla 4. Límites permisibles de agresividad del suelo al concreto.

Presencia en el Suelo de:	p.p.m.	Grado de Alteración ppm	Observaciones
*Sulfatos	0-1000	Leve	Ocasiona un ataque químico directo a las estructuras de concreto
	1000-2000	Moderado	
	2000-20 000	Severo	
	>20 000	Muy Severo	
**Cloruros	> 600	Perjudicial	Ocasiona problemas de corrosión de armaduras o elementos metálicos.
	> 1000		
	> 1500		
**Sales Soluble totales	>5 000	Perjudicial	Ocasiona problemas de pérdida de resistencia mecánica por problema de lixiviación

Fuente: Reglamento Nacional de Construcción, NTE E060 Concreto Armado.

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

Los parámetros geotécnicos obtenidos de los ensayos de corte directo que fueron realizados en el laboratorio de mecánica de suelos del Gobierno Regional de Piura a las muestras de suelos extraídas en el C.P. La Huaca se presenta en el Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros geotécnicos obtenidos de las muestras tomadas en el área urbana de La Huaca (Fuente: Gobierno Regional de Piura)

CALICATA	LH-1	LH-2	LH-3	LH-4
ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	20	21	20	19
COHESIÓN	0.05	0.00	0.00	0.00

La Tabla 5 indica que, los suelos del C.P. de La Huaca presentan ángulos de fricción entre 19 y 21°, así mismo, solo en la calicata LH 01 presentan cohesión de 0.05 kg/cm².

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

Carga última (Qult.): Es la presión última por unidad de área de la cimentación soportada por el suelo, en exceso de la presión causada por el suelo alrededor al nivel de la cimentación (Amézquita, J. et al, 2012). Para determinar la carga última se usaron los resultados de los ensayos de corte directo (ángulo de fricción y la cohesión), datos que se usarán con la fórmula de corte general (suelos granulares densos y cohesivos de consistencia rígida) y local (suelos granulares sueltos y

cohesivos de consistencia media a semidura) de Terzaghi (1943), a través de las siguientes expresiones:

Fórmula para falla por corte general

$$q_u = cN_c S_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma$$

Fórmula para falla por corte local

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

Dónde: C= cohesión, q= carga ($x * D_f$) y N_c , N_q , N_γ : Factores de carga, ver Tabla 6.

Luego, en base a los resultados de la carga última (Qult.) se calculó la capacidad de carga admisible de los suelos para una profundidad de cimentación de 1.0 metro y ancho de zapata de 1.0 metro, así como también para profundidad de cimentación de 1.50 metros y ancho de zapata de 1.00 metro. Los resultados de capacidad de carga admisible de suelos analizados se presentan en los Tabla 7.

Tabla 6. Factores de cohesión, carga y volumétricos. Modificado por Terzaghi.

TERZAGHI (según Kumbhojkar, 1993)				Modificado por TERZAGHI			
Ángulo Fi	Nc	Nq	Ng	Ángulo Fi	Nc	Nq	Ng
0	5.7	1	0	0	5.7	1	0
1	6	1.1	0.01	1	5.9	1.07	0.005
2	6.3	1.22	0.04	2	6.1	1.14	0.02
3	6.62	1.35	0.06	3	6.3	1.22	0.04
4	6.97	1.49	0.1	4	6.51	1.3	0.055
5	7.34	1.64	0.14	5	6.74	1.39	0.074
6	7.73	1.81	0.2	6	6.97	1.49	0.1
7	8.15	2	0.27	7	7.22	1.59	0.128
8	8.6	2.21	0.35	8	7.47	1.7	0.16
9	9.09	2.44	0.44	9	7.74	1.82	0.2
10	9.61	2.69	0.56	10	8.02	1.94	0.24
11	10.16	2.98	0.69	11	8.32	2.08	0.3
12	10.76	3.29	0.85	12	8.63	2.22	0.35
13	11.41	3.69	1.04	13	8.96	2.38	0.42
14	12.11	4.02	1.26	14	9.31	2.55	0.48
15	12.86	4.45	1.52	15	9.67	2.73	0.57
16	13.68	4.92	1.82	16	10.06	2.92	0.67
17	14.6	5.45	2.18	17	10.47	3.13	0.76
18	15.12	6.04	2.59	18	10.9	3.36	0.88
19	16.56	6.7	3.07	19	11.36	3.61	1.03
20	17.69	7.44	3.64	20	11.85	3.88	1.12
21	18.92	8.26	4.31	21	12.37	4.17	1.35
22	20.27	9.19	5.09	22	12.92	4.48	1.55
23	21.75	10.23	6	23	13.51	4.82	1.74
24	23.36	11.4	7.08	24	14.14	5.2	1.97
25	25.13	12.72	8.34	25	14.8	5.6	2.25
26	27.09	14.21	9.84	26	15.53	6.05	2.59
27	29.24	15.9	11.6	27	16.3	6.54	2.88
28	31.61	17.81	13.7	28	17.13	7.07	3.29
29	34.24	19.98	16.18	29	18.03	7.66	3.76
30	37.16	22.46	19.13	30	18.99	8.31	4.39
31	40.41	25.28	22.65	31	20.03	9.03	4.83
32	44.04	28.52	26.87	32	21.16	9.82	5.51
33	48.09	32.23	31.94	33	22.39	10.69	6.32
34	52.64	36.5	38.04	34	23.72	11.67	7.22
35	57.75	41.44	45.41	35	25.18	12.75	8.35
36	63.53	47.16	54.36	36	26.77	13.97	9.41
37	70.01	53.8	65.27	37	28.51	15.32	10.9
38	77.5	61.55	78.61	38	30.43	16.85	12.75
39	85.97	70.61	95.03	39	32.53	18.56	14.71
40	95.66	81.27	115.31	40	34.87	20.5	17.22
41	106.81	93.85	140.51	41	37.45	22.7	19.75
42	119.67	108.75	171.99	42	40.33	25.21	22.5
43	134.58	126.5	211.56	43	43.54	28.06	26.25
44	151.95	147.74	261.6	44	47.13	31.34	30.4
45	172.28	173.28	325.34	45	51.17	35.11	36
46	196.22	204.19	407.11	46	55.73	39.48	41.7
47	224.55	241.8	512.84	47	60.91	44.45	49.3
48	258.28	287.85	650.67	48	66.8	50.46	59.25
49	298.71	344.63	831.99	49	73.55	57.41	71.45
50	347.5	415.14	1072.8	50	81.31	65.6	85.75

Fuente: Braja Das, 2011.

Tabla 7. Capacidad de carga admisible de las muestras extraídas en el C.P. de La Huaca.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de Corte	Capacidad de carga última (Kg/cm ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)	Tipo de Corte
LH-01	1.36	0.45	F.L	1.71	0.57	F.L
LH-02	1.68	0.56	F.L	2.05	0.68	F.L
LH-03	1.40	0.47	F.L	1.94	0.65	F.L
LH-04	1.16	0.39	F.L	1.60	0.53	F.L
DIMENSIONES DE CIMENTACIÓN	Profundidad: 1.00 m ancho:1.00m (Zapata Cuadrada)			Profundidad: 1.50 m y ancho:1.00m (Zapata cuadrada)		

Fuente: Gobierno Regional de Piura, 2022. Dónde: F.L.= Falla local.

De los resultados citados anteriormente y tomando en cuenta la Tabla 8, se ha determinado que para la profundidad de 1 y 1.5 metros, los suelos de cimentación del área urbana de La Huaca presentan capacidad de carga admisible muy baja (menor a 1.00 kg/cm²), (Figura 20).

Tabla 8. Rango de capacidad de carga admisible.

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

Fuente: IGP, 2018.

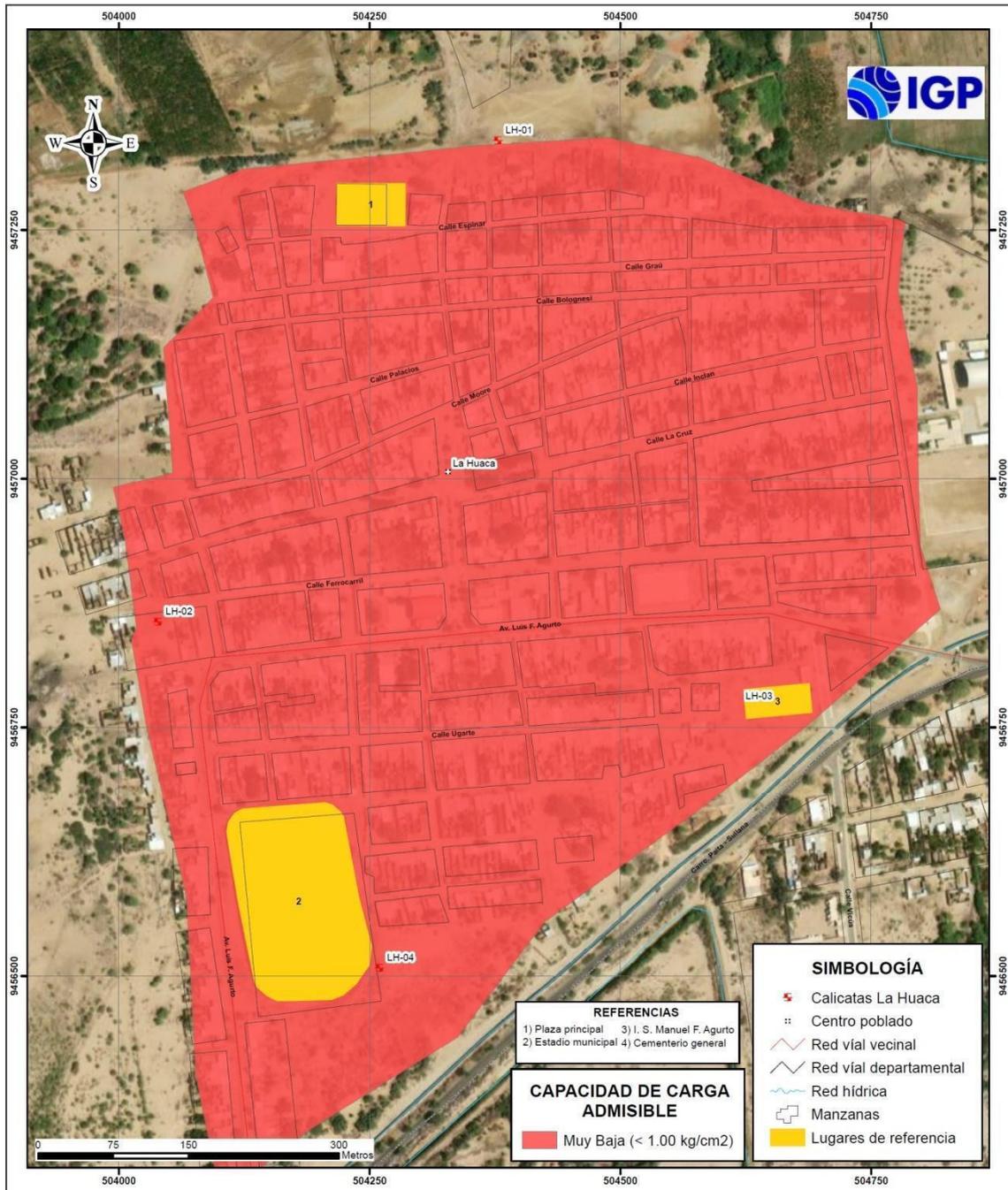


Figura 20. Mapa de capacidad de carga admisible de los suelos de cimentación del C.P. La Huaca, para una profundidad de cimentación de 1.0 metro y ancho de zapata de 1.0 metro.

3.– EVALUACIÓN GEOFÍSICA

A fin de conocer los diferentes parámetros físicos que controlan el comportamiento dinámico de la estructura del suelo en el área urbana de La Huaca, se procede a aplicar diferentes métodos geofísicos, cuyos resultados se correlacionan entre sí y con los aspectos geo-ambientales de la zona de estudio.

3.1.– Metodología

La metodología seguida consiste en la aplicación de tres métodos geofísicos: razones espectrales (H/V) a partir de registros de vibración ambiental, perfiles sísmicos obtenidos mediante el análisis multicanal de ondas superficiales y microtremores (MASW y MAM) y tomografía eléctrica. A continuación, se describe cada método.

3.1.1.– Razones espectrales (H/V). El método de razones espectrales (h/v) fue propuesto por nakamura (1989) para caracterizar la respuesta dinámica del suelo a partir del periodo de respuesta 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 los tipos de suelos, espesor, geometría y composición litológica, condicionan, la amplificación de las ondas sísmicas.

En la Figura 21, se muestra un ejemplo del proceso de análisis seguido usando como dato de entrada el registro de vibración ambiental (LH-13) obtenido en campo. El primer recuadro presenta la selección de las ventanas de procesamiento para las tres componentes de la señal registrada (Vertical, N-S y E-O), seguidamente la curva H/V, en la cual la curva continua negra es el promedio del cociente H/V; mientras que, las curvas discontinuas son la desviación estándar, las bandas grises identifican las frecuencias principales. Finalmente, para la presentación de los resultados, las frecuencias son expresadas en periodos dominantes.

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

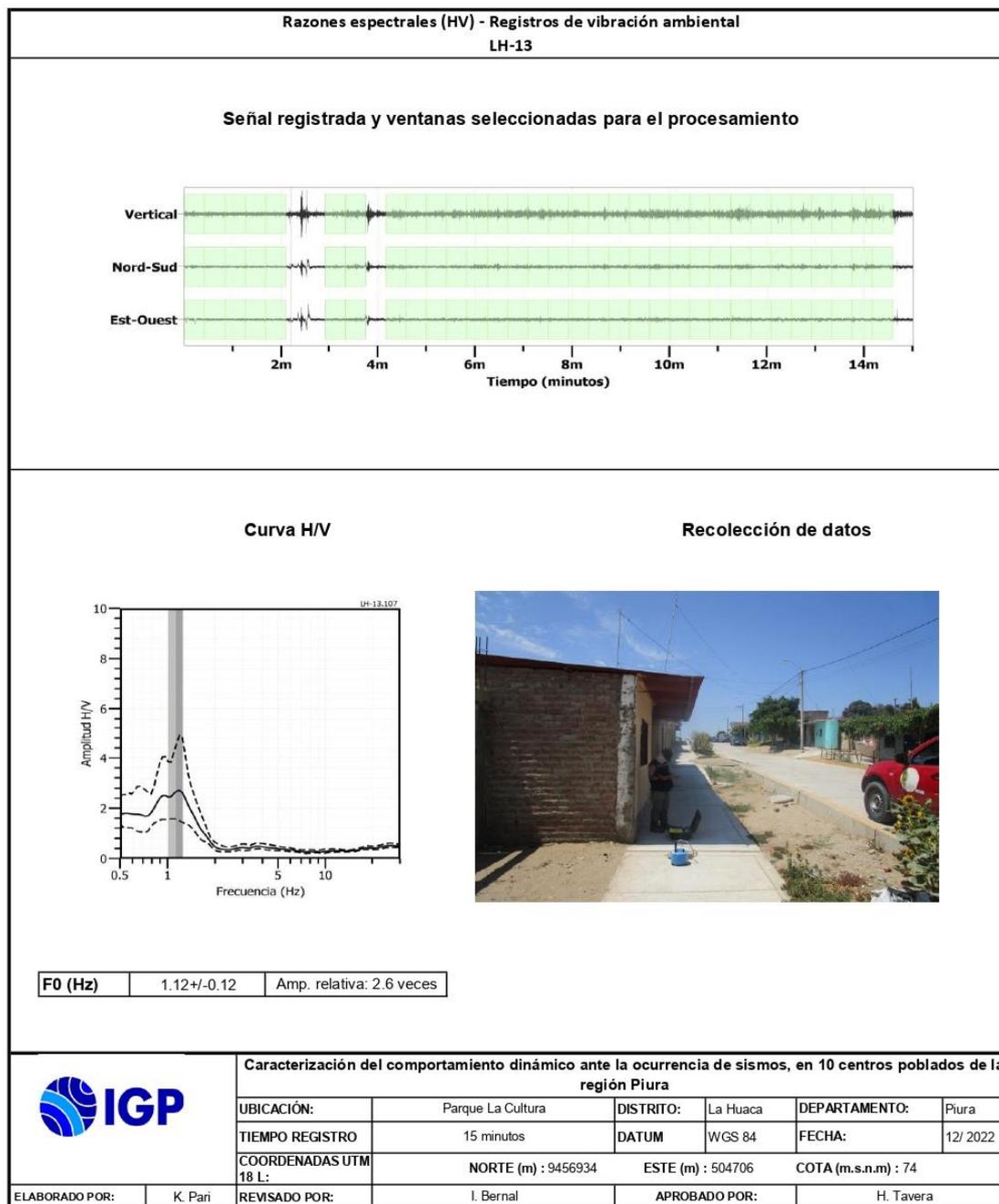


Figura 21. Resultados obtenidos con el método de razones espectrales (H/V) para el punto LH-13. Arriba, la señal registrada y abajo la curva promedio de las razones espectrales (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en líneas discontinuas. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

3.1.2.- Ondas superficiales y microtemores. El análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) es un método indirecto y permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto; es decir,

permite conocer la velocidad de propagación de las ondas de corte (V_s) en el subsuelo, a partir del análisis de la dispersión de ondas superficiales (ondas Rayleigh), generados por una fuente de energía impulsiva y registrada por arreglos lineales de estaciones sísmicas.

El ensayo de Análisis Multicanal de Microtremores (MAM) o Sísmica de Microtremores (Louie, 2001), es método complementario al MASW, que al utilizar registros de microtremores permite investigar a mayores profundidades. En este caso no existe fuente sísmica y solo consiste en el registro de la vibración del suelo generada por la actividad humana. La combinación con el método de MASW permite obtener información a niveles superficiales y en profundidad.

Los datos sísmicos recolectados en campo fueron procesados con el programa de computación SeisImager y en su procedimiento, se aplicó la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener la curva de dispersión que relaciona la velocidad de fase de las ondas superficiales con la frecuencia (Reynolds, 2011). Seguidamente, cada curva de dispersión perteneciente a un mismo arreglo (MASW y MAM), fue sometida a un proceso de inversión a fin de obtener los perfiles V_s en una dimensión (1D) para el punto central de la línea, ver Figura 22.

Para el análisis de los resultados obtenidos, se considera la clasificación de suelos propuesta por la Norma E.030 Diseño

Sismorresistente (2018). En este caso, el rango de velocidad de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen a fin de considerar dos clasificaciones adicionales, tal como se describe en la Tabla 9.

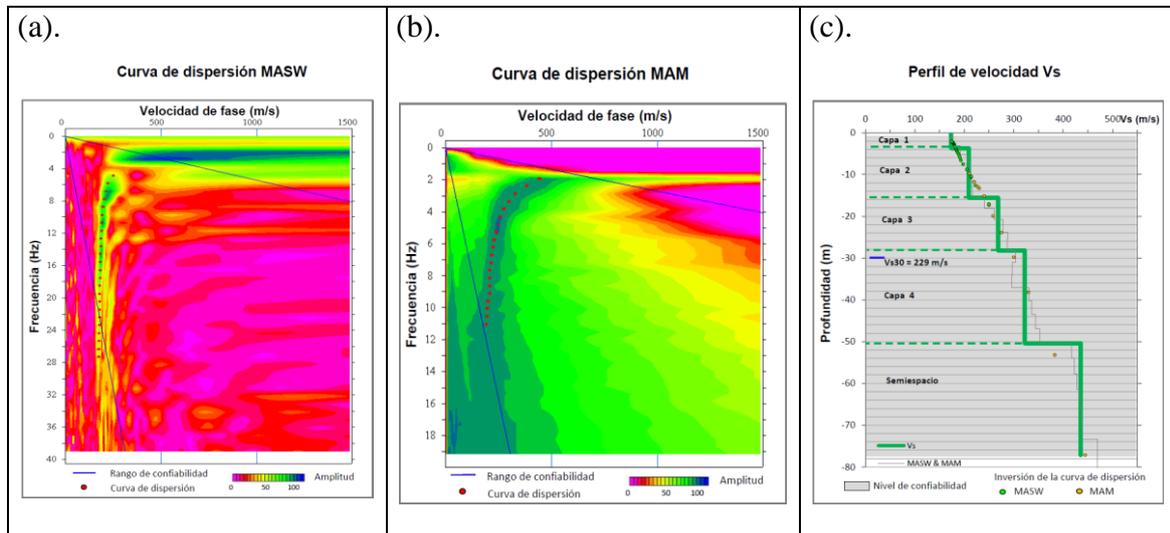


Figura 22. Curvas de dispersión obtenidos a partir de las técnicas MASW (a) y MAM (b) y perfil de velocidad obtenido a partir de la combinación de ambos ensayos (c).

Tabla 9. Clasificación de perfiles de suelo para la zona de estudio.

Clasificación de los perfiles de Suelo			
N°	Vs (m/s)	Tipos de suelo	
1	< 180	Suelo blando	S4
2	180 a 350	Suelo intermedio (medianamente rígido)	S3
3	350 a 500	Suelo rígido	S2
4	500 a 800	Suelo muy rígido	S1
5	800 a 1500	Roca	S0
6	> 1500		

3.1.3.– Tomografía eléctrica: Es un método geofísico, que mediante la inyección de corriente eléctrica al terreno, permite determinar las

variaciones de resistividad y conductividad eléctrica de las rocas y suelos. En general, los materiales que conforman el subsuelo muestran ciertos rangos de valores de resistividad (Tabla 10) que dependen de su composición y su contenido de agua o de sales disueltas y presentes en las fracturas de las rocas o en la porosidad del suelo, ellas responderían de manera anómala al paso de la corriente eléctrica. El método de Tomografía Eléctrica es una técnica multielectródica, y su base teórica de su funcionamiento es análoga al de los métodos convencionales de resistividad (tetraelectródica). Actualmente, existen diferentes dispositivos eléctricos para la toma de datos en campo y en el presente estudio, se usó el dispositivo Polo–Dipolo.

Tabla 10. Valores representativos de resistividad (Loke et al, 2012).

Material	Resistividad
Suelo artificial	50–100
Arena suelta	500–5000
Grava	50–104
Arcilla	1–100
Rocas ígneas	107–1000
Granito	106–1000
Basalto	107–1000
Esquisto	20–104
Conglomerados	104–1000
Areniscas	10–8000
Lutita	20–1000
Limolita	70–8000
Caliza	100–105
Agua dulce	10–100
Agua de mar	0.25

3.2.- Adquisición de datos

En el área urbana del centro poblado La Huaca, se ha recolectado en campo un total de 30 registros de vibración ambiental en puntos distribuidas de manera equidistante, tal como se observa en la Figura 23. Asimismo, se ha considerado datos obtenidos sobre cuatro líneas de arreglos sísmicos y de tres líneas de tomografía eléctrica.

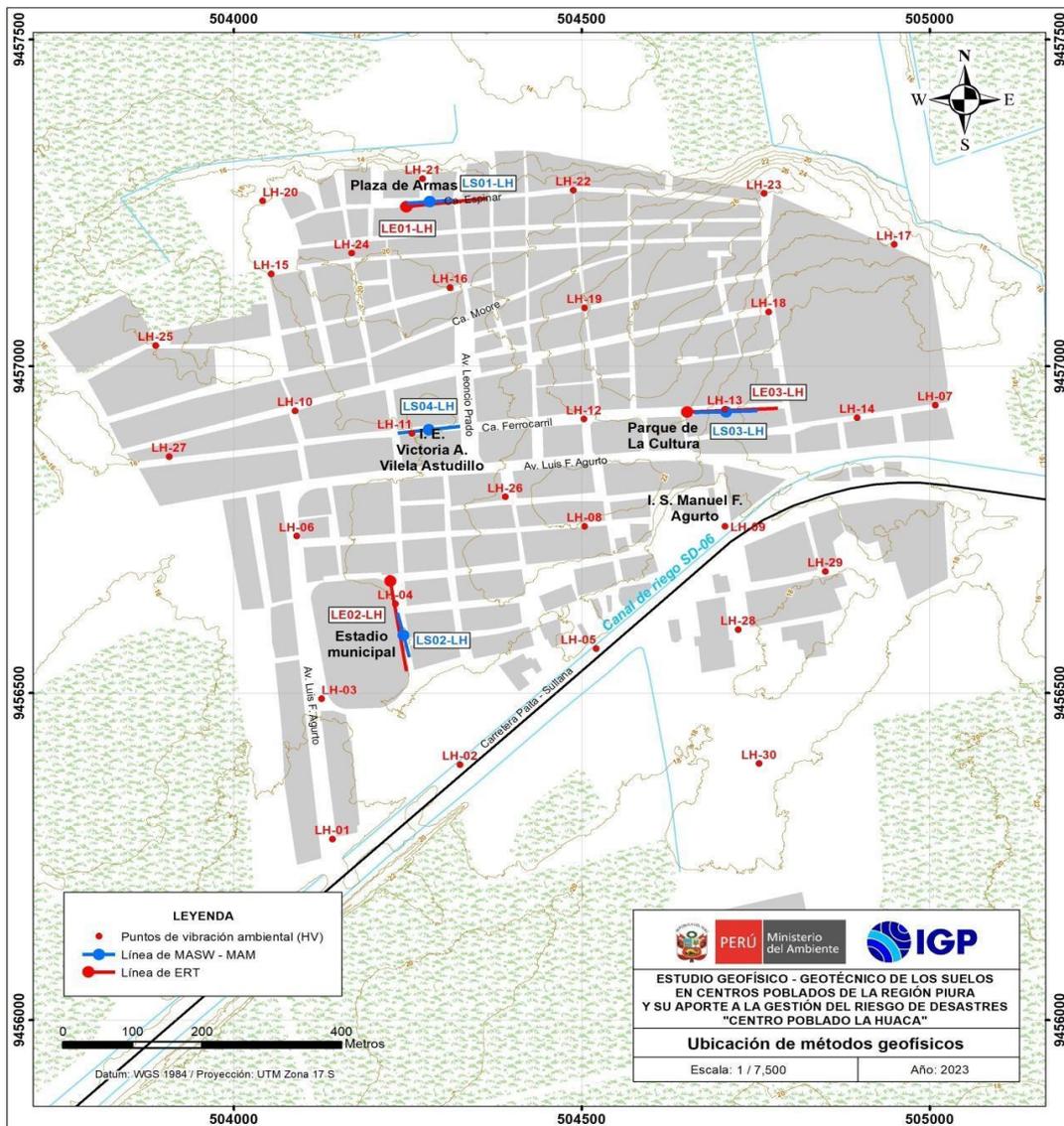


Figura 23. Distribución espacial de los puntos y líneas de adquisición de datos geofísicos en el C.P. La Huaca.

Registros de vibración ambiental: Para la adquisición de estos registros, se utilizaron sensores Lennartz y registradores CityShark II (Figura 24). Cada registro presenta una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de datos para su posterior análisis. En la Figura 25, se muestra ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos en el punto LH-22, ubicado cerca de la Plaza de Armas. Aquí se observa que la señal es estable; es decir, no está muy perturbada en comparación con la señal de LH-05 que presenta algunos saltos y/o picos de señal debido a que dicho punto, está ubicado cerca de la carretera Sullana–Paita.



Figura 24. Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensor Lennartz (2N) y registradores CityShark II.

Líneas sísmicas: Para la adquisición de los registros sísmicos se utilizó un equipo sísmico multipropósito, modelo GEODE (Geometrics) de 24 sensores o geófonos de baja frecuencia (4.5 Hz) y un muestreo

de 4000Hz (0.25 ms). Como fuente para generar las ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs (Figura 26).

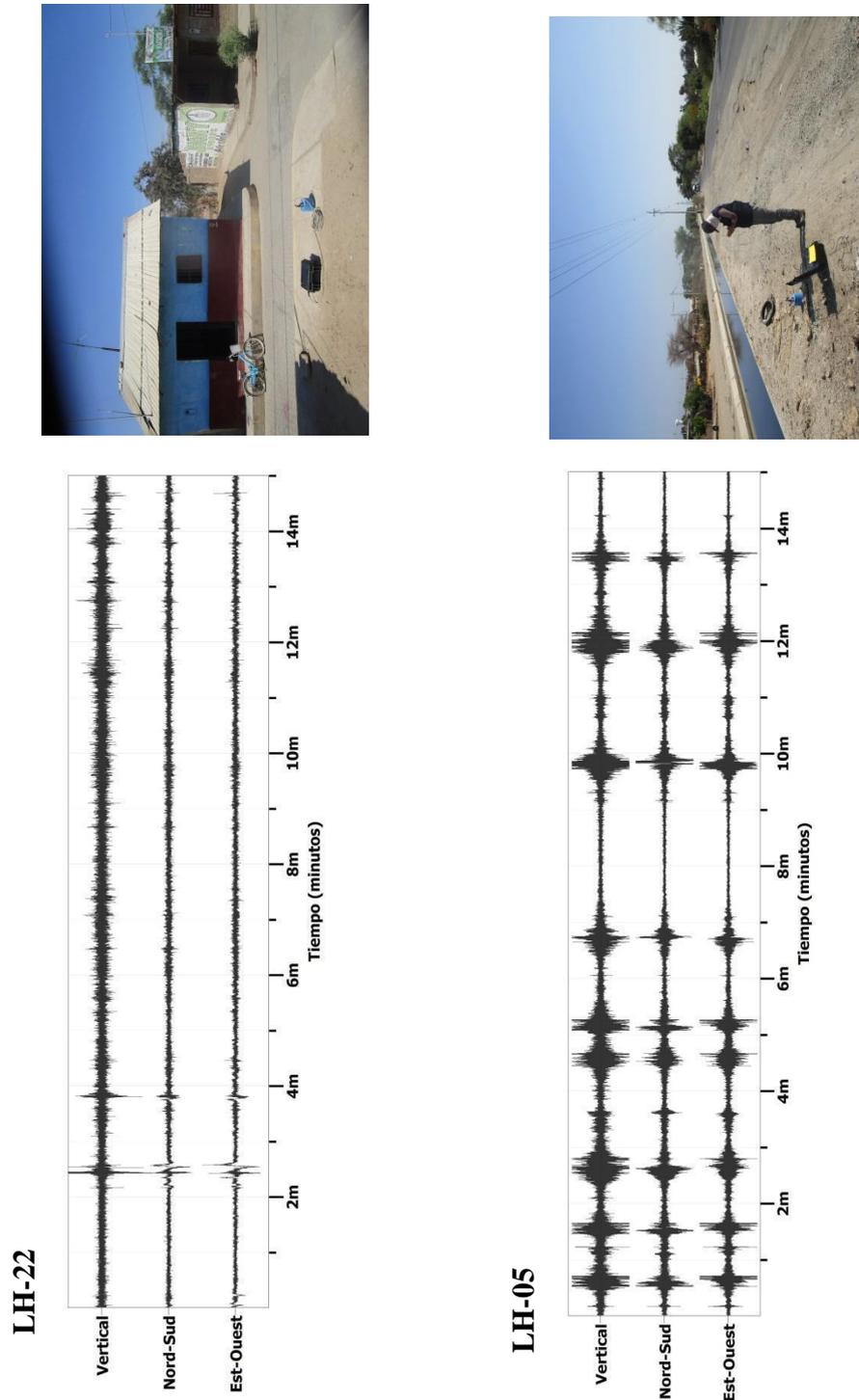


Figura 25. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos en los puntos LH-05 Y LH-22, ubicados sobre diferentes tipos de suelos. Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

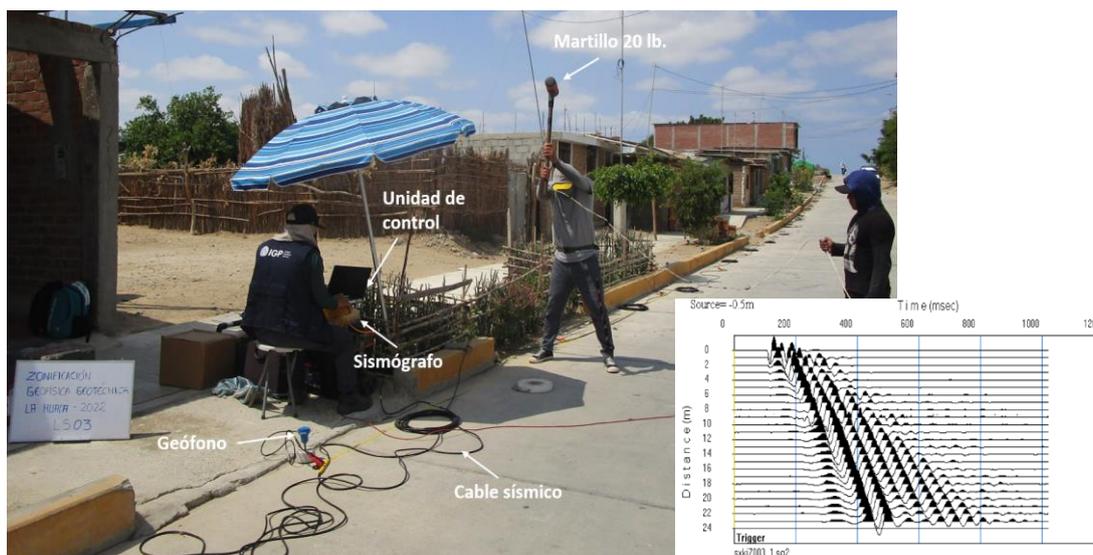


Figura 26. Disposición del equipo para la adquisición de registros sísmicos – MASW.

La distribución de las 4 líneas se presenta en la Figura 23 y los parámetros utilizados para el registro de los datos se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11. Coordenadas y características de las líneas sísmicas

Línea Sísmica	Coordenadas UTM – WGS84		Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)	
	Este (m)	Norte (m)				
LA HUACA						
1	LS01-LH	504280	9457250	31	3	69
2	LS02-LH	504241	9456589	23	3	69
3	LS03-LH	504661	9456929	34	4	92
4	LS04-LH	504282	9456903	28	4	92

Tomografía eléctrica: Para la adquisición de los datos de resistividad se utilizó el equipo de Resistividad/IP Syscal Pro de marca Iris Instruments (Figura 27) y accesorios (cables multipolar, electrodos, combas, etc.). La distribución de las 3 líneas se presenta en la Figura 23 y los parámetros utilizados para el registro de los datos de resistividad se detallan en la Tabla 12.



Figura 27. Disposición del equipo para la adquisición de datos de resistividad.

3.3.– Resultados

3.3.1. Frecuencias predominantes

Los suelos del C.P. La Huaca, responden a bajas frecuencias $F \leq 2.0$ Hz con amplificaciones mayores a 2.5 veces en casi toda el área de estudio, situación que sugiere la presencia de suelos homogéneos de

gran espesor y menor consistencia a nivel superficial. A fin de evaluar el comportamiento dinámico del suelo en el área, se analiza de manera conjunta la información obtenida en cada gráfico de razones espectrales (H/V).

Tabla 12. Coordenadas y características de las líneas de tomografía eléctricas.

Línea Sísmica	Coordenadas UTM - WGS84		Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Longitud total (m)	
	Este (m)	Norte (m)				
LA HUACA						
1	LE01-LH	504239	9457243	32	10	130
		504364	9457257	33		
2	LE02-LH	504223	9456680	30	10	150
		504248	9456533	28		
3	LE03-LH	504642	9456929	38	10	150
		504781	9456935	34		

– **Frecuencias predominantes, Fo:** En la Figura 28 se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de frecuencias Fo y de acuerdo con los resultados, se tiene el predominio de valores entre 0.9 a 1.2 Hz (0.8–1.0 segundos). Estos valores se presentan de manera uniforme en el área de estudio y las mayores amplificaciones del suelo se presentarían principalmente en la zona central del centro poblado. Asimismo, se identifica la presencia de un pico de frecuencia bien definido entre 1 a 1.20 Hz y amplificaciones de hasta 3.5 veces.

Estos valores bajos de frecuencia estarían asociados a la presencia de una capa sedimentaria de gran espesor.

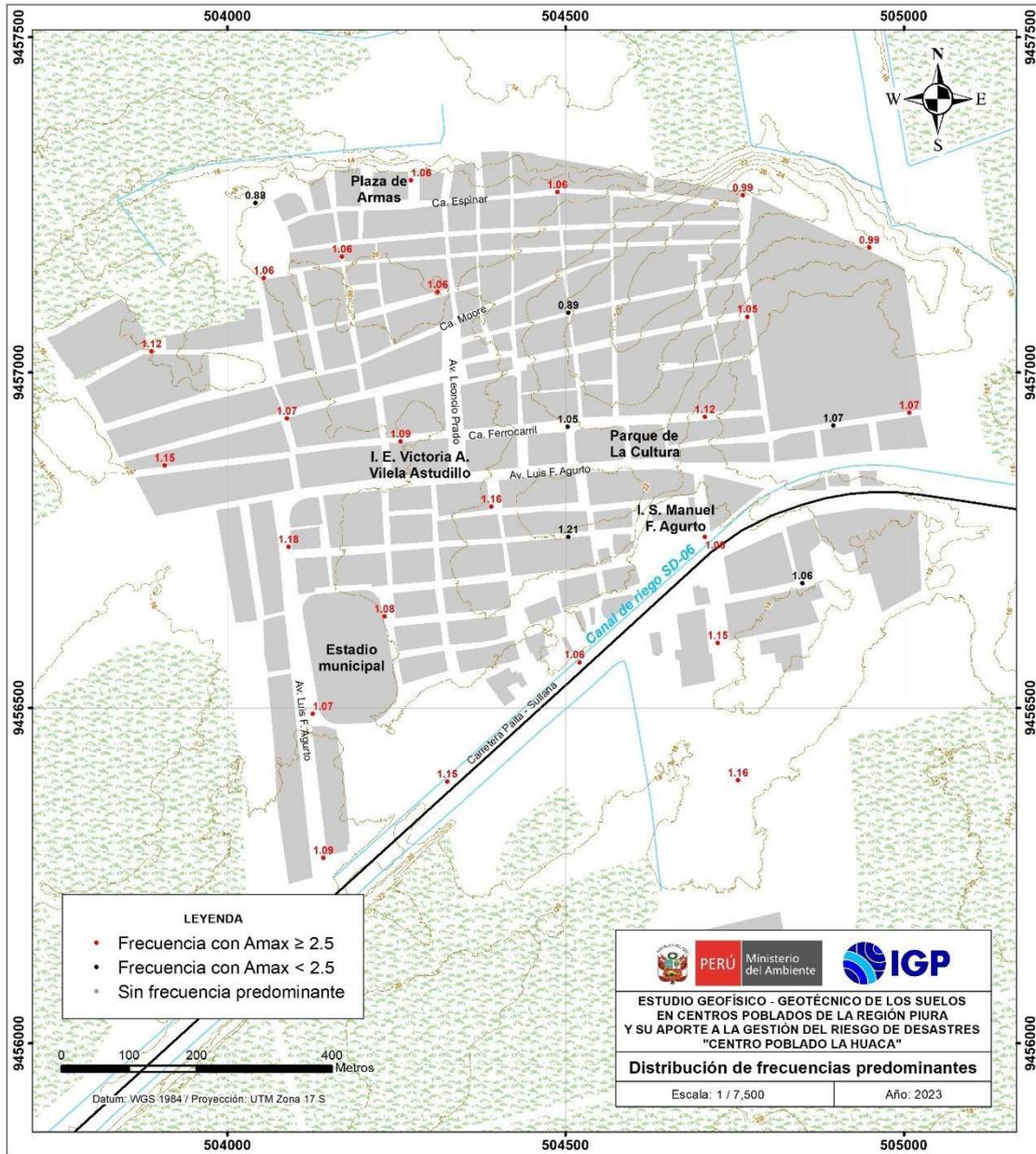


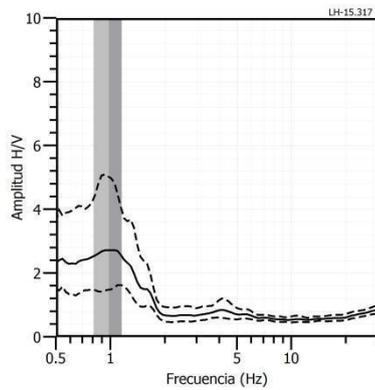
Figura 28. Distribución espacial de las frecuencias F_0 ($F < 2.0\text{Hz}$). Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 2.5 veces.

En la Figura 29 se muestra ejemplos de razones espectrales (H/V) característicos para el área de estudio y corresponden a los puntos LH-15, LH-24 y LH-27, ubicados al oeste del centro poblado. En todos se observa la existencia de un pico bien definido con frecuencias de 1.06, 1.06 y 1.15 Hz; y amplificaciones de 2.7, 2.7 y 2.6 veces respectivamente. Asimismo, en los puntos LH-10, LH-11 y LH-16, ubicados en el centro del distrito, responden a frecuencias de 1.07, 1.09 y 1.06 Hz con amplificaciones de 3.1, 3.3 y 3.1 veces, (Figura 30). En general, estos resultados evidencian que los suelos en el C.P. La Huaca, son homogéneos.

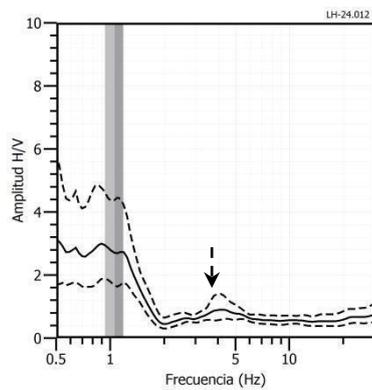
Interpretación

El análisis de las razones espectrales H/V en el área de estudio ha permitido observar que los suelos del área urbana de La Huaca responden a un único pico de frecuencia que fluctúa entre 0.9 a 1.2 Hz, evidenciando la existencia de suelos cuya respuesta dinámica ante la ocurrencia de un sismo, es similar en toda el área de estudio con diferentes amplificaciones relativas, sugiriendo la presencia de suelos homogéneos. Sin embargo, hacia el extremo Norte del área de estudio (inmediaciones de la plaza de armas), se puede observar que los suelos muestran sensibilidad a frecuencias de entre 4.2 a 4.5 Hz pero con muy bajas amplificaciones evidenciando la presencia de material heterogéneo a nivel superficial.

LH-15



LH-24



LH-27

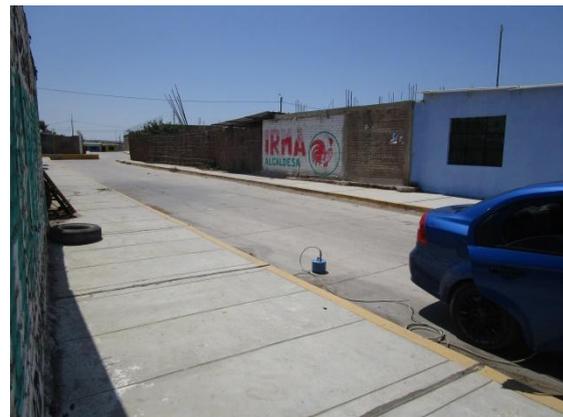
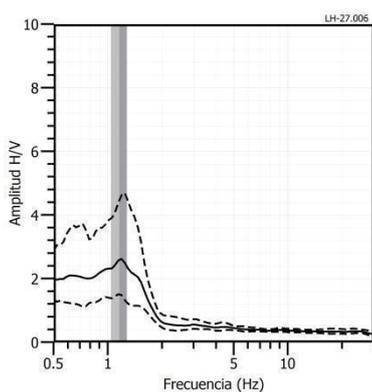
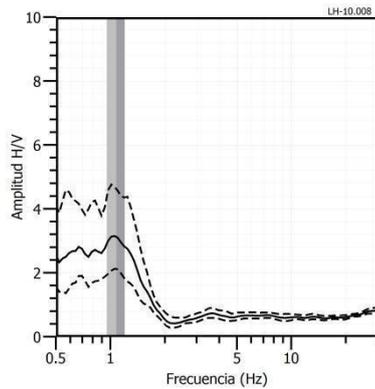
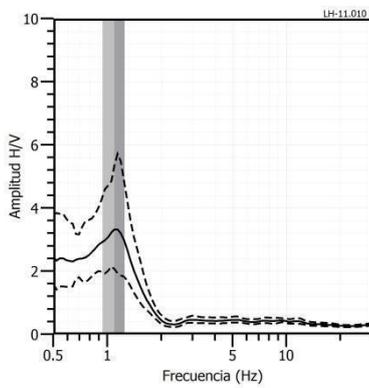


Figura 29. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 2.0$ Hz): Para los puntos LH-15, LH-24 y LH-27, ubicados en la zona oeste del centro poblado. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

LH-10



LH-11



LH-16

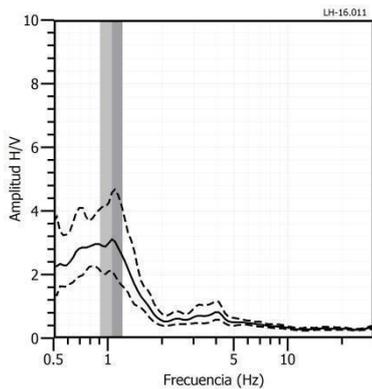


Figura 30. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F0 (F<2.0Hz): Para los puntos LH-10, LH-11 y LH-16, ubicados en la zona central del centro poblado, por la I.E. Victoria Vilela Astudillo. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

– **Periodos dominantes:** A partir de las frecuencias predominantes, se obtiene los periodos de respuesta del suelo y su distribución se muestra en la Figura 31. En este caso, en el área de estudio los suelos responden a un rango de periodos bien definido con valores de 0.8 a 1.1 segundos, con amplificaciones máximas relativas de hasta 3.5 veces, evidenciando la presencia de suelos poco compactos.

3.3.2.–Perfiles sísmicos

A continuación, se describen las características observadas en los perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s) obtenidos con los métodos sísmicos MASW – MAM. En la Figura 32, se presenta el perfil sísmico obtenido para la línea LS01–LH y en el Anexo 2, para las líneas restantes.

Línea sísmica LS01–LH: Realizada en la calle Espinar, ubicada por la Plaza de Armas La Huaca, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 68 metros. Este perfil permite identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 11 metros de espesor y velocidades V_s de 207 m/s junto a la segunda capa de 26 metros de espesor y velocidades V_s de 267 m/s; ambas capas corresponden a suelos intermedios (medianamente rígidos). La tercera capa, con 13 metros de espesor y velocidades de 378 m/s que

junto al semiespacio, con velocidad $V_s > 435$ m/s, corresponden a suelos rígidos.

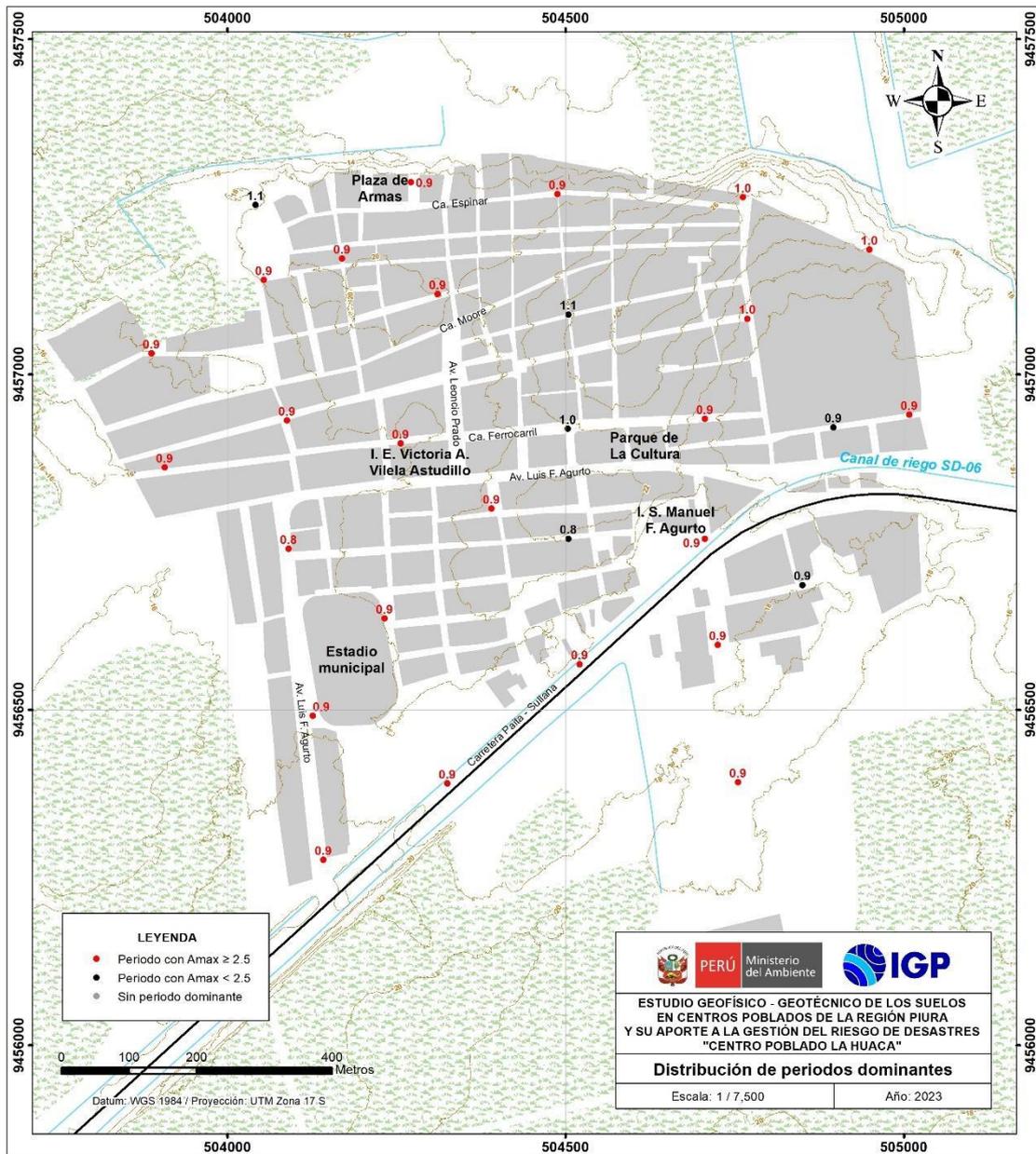


Figura 31. Distribución espacial de periodos dominantes del suelo para el C.P. La Huaca. Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 2.5 veces.

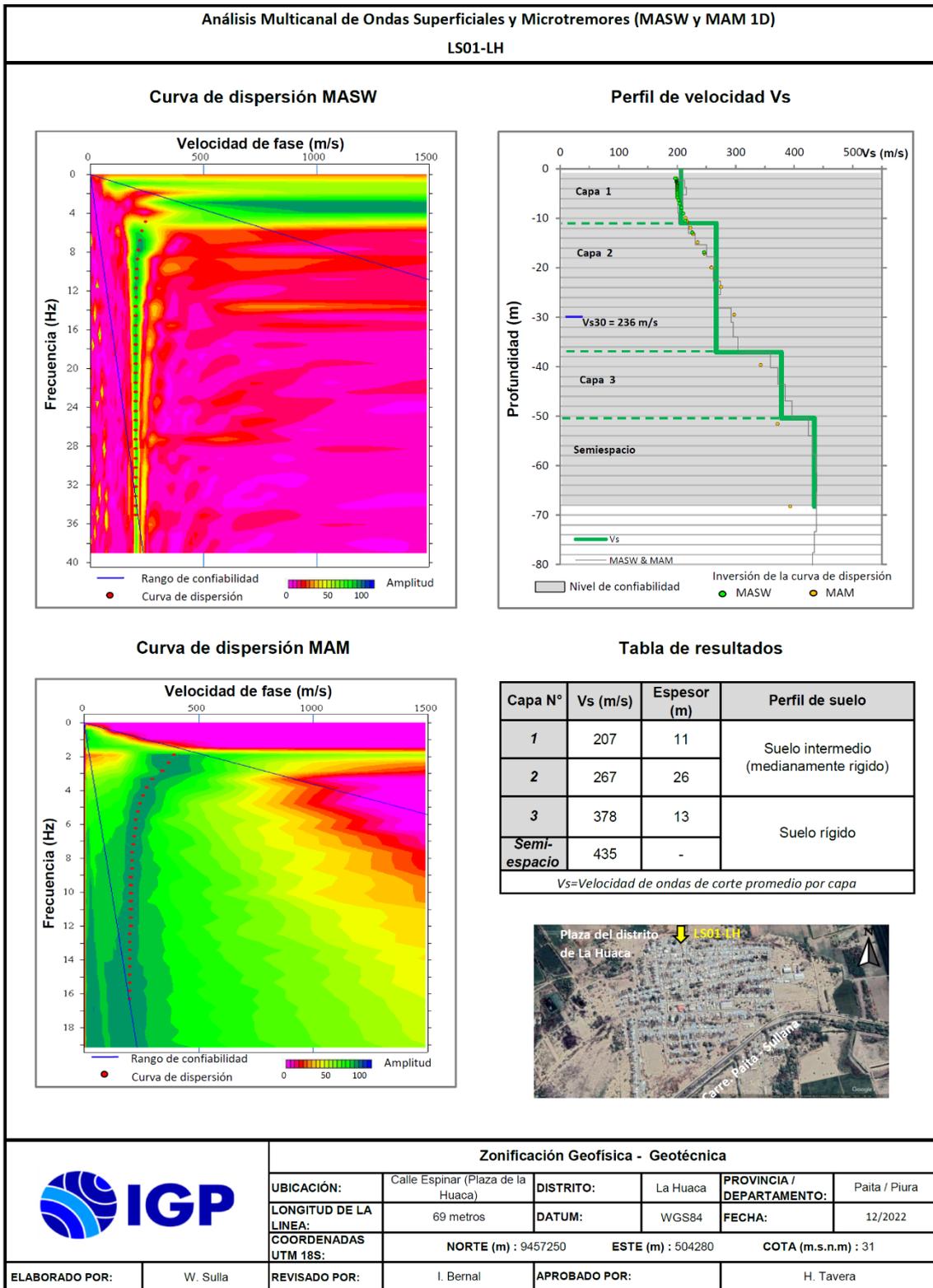


Figura 32. Resultados obtenidos con el ensayo MASW y MAM para la línea sísmica LS01-LH.

Línea sísmica LS02–LH: Ubicada al costado del estadio Municipal, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 72 metros. Este perfil permite identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidades V_s de 159 m/s correspondiente a suelos blandos, la segunda capa de 9 metros de espesor y velocidades V_s de 208 m/s que junto a la tercera capa, de 30 metros de espesor y velocidades V_s de 253 m/s, corresponden a capas de suelos intermedios (medianamente rígidos). El semiespacio, con velocidad $V_s > 402$ m/s, sugiere la presencia de suelos rígidos.

Línea sísmica LS03–LH: Realizada en la calle Ferrocarril, parque La Cultura, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 78 metros. Este perfil permite identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidades V_s de 174 m/s correspondiendo a suelos blandos; la segunda capa de 12 metros de espesor y velocidades V_s de 209 m/s que junto a la tercera capa de 35 metros de espesor y velocidades V_s de 301 m/s, corresponden a suelos intermedios (medianamente rígidos). El semiespacio, con velocidades $V_s > 436$ m/s, sugiere la existencia de suelos rígidos.

Línea sísmica LS04–LH: Realizada en la calle Ferrocarril, ubicada por la I.E. Victoria Vilela Astudillo, siendo la profundidad de resolución promedio del perfil de 72 metros. Este perfil permite identificar la

existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 4 metros de espesor y velocidades V_s de 180 m/s que corresponden a suelos blandos; la segunda capa de 12 metros de espesor y velocidades V_s de 222 m/s que junto a la tercera capa de 31 metros de espesor y velocidades V_s de 285 m/s, corresponden a suelos intermedios (medianamente rígidos). El semiespacio, con velocidades $V_s > 408$ m/s, sugiere la presencia de suelos rígidos.

En la Tabla 13, se resume los valores de velocidad de ondas de corte (V_s) para cada uno de los perfiles de suelo obtenidos en el área de estudio.

Tabla 13. Valores de espesor y V_s de los perfiles sísmicos obtenidos para el área de estudio.

Superficie	▼ Profundidad								
Línea Sísmica	N° DE CAPA								VS30 (m/s)
	1		2		3		Semiespacio		
	V_s (m/s)	Esp. (m)	V_s (m/s)	Esp. (m)	V_s (m/s)	Esp. (m)	V_s (m/s)	Esp. (m)	
LS01-LH	207	11	267	26	378	13	435	-	236
LS02-LH	159	4	208	9	253	30	402	-	221
LS03-LH	174	4	209	12	301	35	436	-	229
LS04-LH	180	4	222	12	285	31	408	-	236

 Suelo blando ($V_s < 180$ m/s)
 Suelo intermedio - medianamente rígido (180 – 350 m/s)
 Suelo rígido (350 – 500 m/s)
 Suelo muy rígido (500 – 800 m/s)
 Roca moderadamente dura a dura (> 800 m/s)

Interpretación

En el área urbana de La Huaca, se ha identificado una capa superficial de suelo blando ($V_s=159$ a 180 m/s) de 4 metros de espesor, que cubre al suelo medianamente rígido ($V_s=207$ a 301 m/s), correspondiente a una capa intermedia de 37 a 46 metros de espesor.

En conjunto, los espesores de los suelos blandos y medianamente rígidos van de 40 metros en dirección norte, por la plaza de La Huaca, y de 50 metros en dirección sur y sureste, por el estadio Municipal y parque La Cultura (carretera Paita – Sullana), ver Figura 33.

3.3.3.– Secciones geoelectricas

A continuación, se describen las características observadas en las secciones geoelectricas con resolución de hasta los 40 metros de profundidad. En la Figura 34, se presenta la sección obtenida para la línea LE01–LH y en el Anexo 2, para las secciones restantes

–**Sección geoelectrica LE01–LH:** Realizada en la calle Espinar (Plaza de La Huaca) sobre una longitud de 130 metros y en dirección O–E. En esta sección se presentan dos horizontes geoelectricos. El primer horizonte, con moderado contenido de humedad (80 a 300 Ohm–m) a lo largo de toda la sección, con espesores que varían entre 5 y 10

metros, presentándose el mayor espesor a la altura de la plaza de La Huaca.

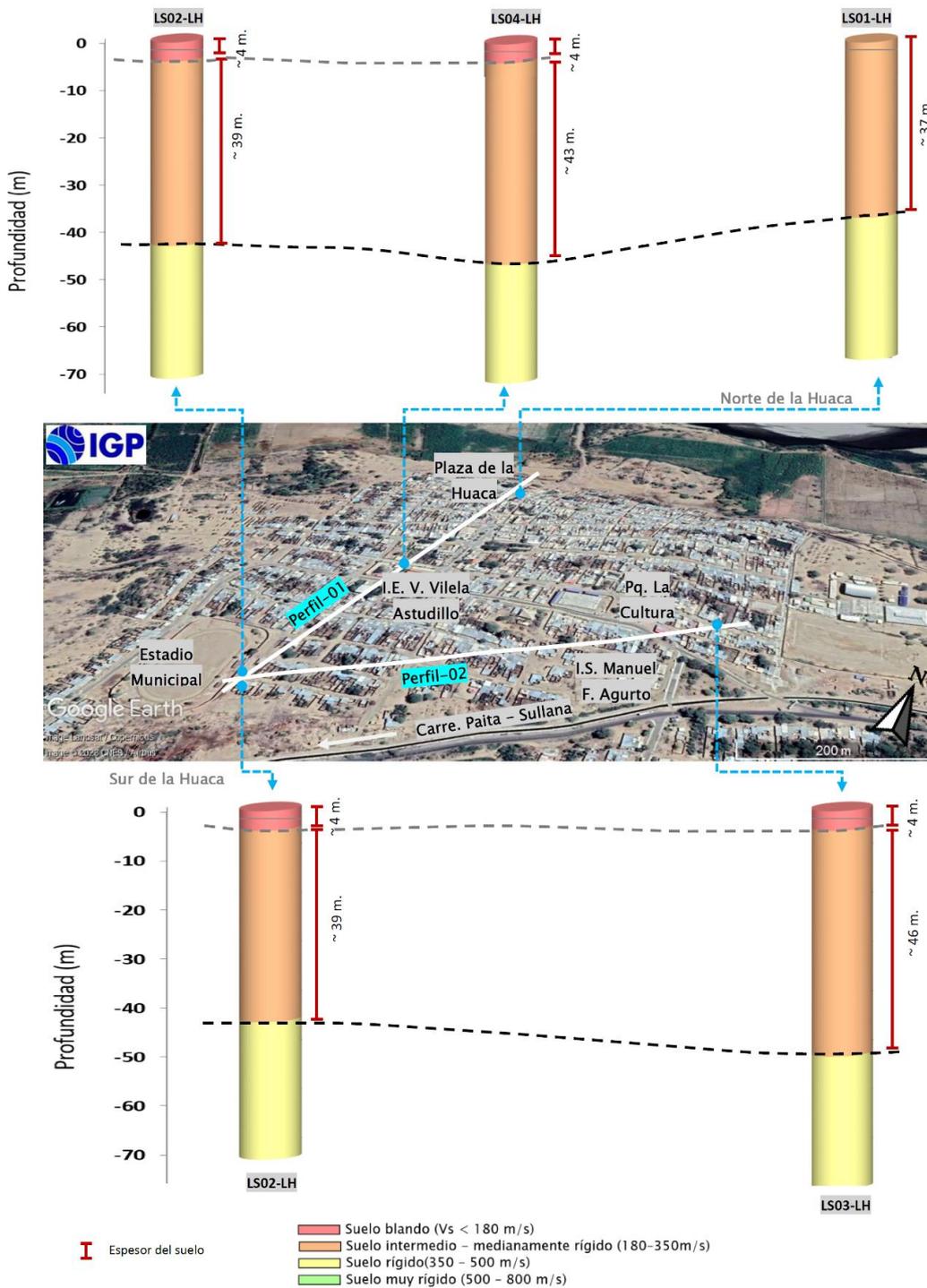


Figura 33. Resultados de MASW y MAM ubicados a lo largo del perfil 1 (LS02-LH – LS04-LH y LS01-LH) y perfil 2 (LS02-LH y LS03-LH) sobre la imagen satelital.

El segundo horizonte, también se presenta a lo largo de toda la sección con alto contenido de humedad ($< 80 \text{ Ohm-m}$) y espesores de hasta 40 metros a la altura de la Municipalidad. Además, en este horizonte se presenta una zona anómala que tiene una mayor concentración de humedad y espesores de hasta 10 metros a la altura de la Municipalidad, por otro lado, en profundidad se presenta una zona anómala que tiene menor concentración de humedad (delimitado con líneas plomas) en el extremo oeste de la sección.

3.3.3.– Secciones geoelectricas

A continuación, se describen las características observadas en las secciones geoelectricas con resolución de hasta los 40 metros de profundidad. En la Figura 34, se presenta la sección obtenida para la línea LE01–LH y en el Anexo 2, para las secciones restantes

–Sección geoelectrica LE01–LH: Realizada en la calle Espinar (Plaza de La Huaca) sobre una longitud de 130 metros y en dirección O–E. En esta sección se presentan dos horizontes geoelectricos. El primer horizonte, con moderado contenido de humedad (80 a 300 Ohm-m) a lo largo de toda la sección, con espesores que varían entre 5 y 10 metros, presentándose el mayor espesor a la altura de la plaza de La Huaca. El segundo horizonte, también se presenta a lo largo de toda la sección con alto contenido de humedad ($< 80 \text{ Ohm-m}$) y espesores de hasta 40 metros a la altura de la Municipalidad. Además, en este

horizonte se presenta una zona anómala que tiene una mayor concentración de humedad y espesores de hasta 10 metros a la altura de la Municipalidad, por otro lado, en profundidad se presenta una zona anómala que tiene menor concentración de humedad (delimitado con líneas plomas) en el extremo oeste de la sección.

–Sección geoelectrica LE02–LH: Realizada en el estadio Municipal sobre una longitud de 150 metros y en dirección N–S. En esta sección predominan los suelos con alto contenido de humedad ($< 80 \text{ Ohm-m}$), debido a la presencia de material aluvial con alto contenido de humedad. Además, se presenta una anomalía que tiene una mayor concentración de humedad, con espesores de hasta 12 metros. También, se presentan tres anomalías con menor concentración de humedad (delimitado con líneas plomas), dos a nivel superficial desde la altura de la calle Junín y una anomalía en profundidad formando un horizonte a lo largo de la base de la sección.

–Sección geoelectrica LE03–LH: Realizada en la calle Ferrocarril (parque La Cultura) sobre una longitud de 150 metros y en dirección O–E. En esta sección se presentan dos horizontes geoelectricos. El primer horizonte, con moderado contenido de humedad ($80 \text{ a } 300 \text{ Ohm-m}$) a lo largo de toda la sección, con espesores que varían entre 2 y 10 metros, presentándose el mayor espesor a la altura del parque La Cultura. El segundo horizonte, también se presenta a lo largo de toda la sección con alto contenido de humedad ($< 80 \text{ Ohm-m}$) y

espesores de hasta 40 metros. Además, en este horizonte se presenta una anomalía con mayor concentración de humedad y espesor de hasta 15 metros, también en profundidad se tiene una anomalía con menor concentración de humedad (delimitado con líneas plomas).

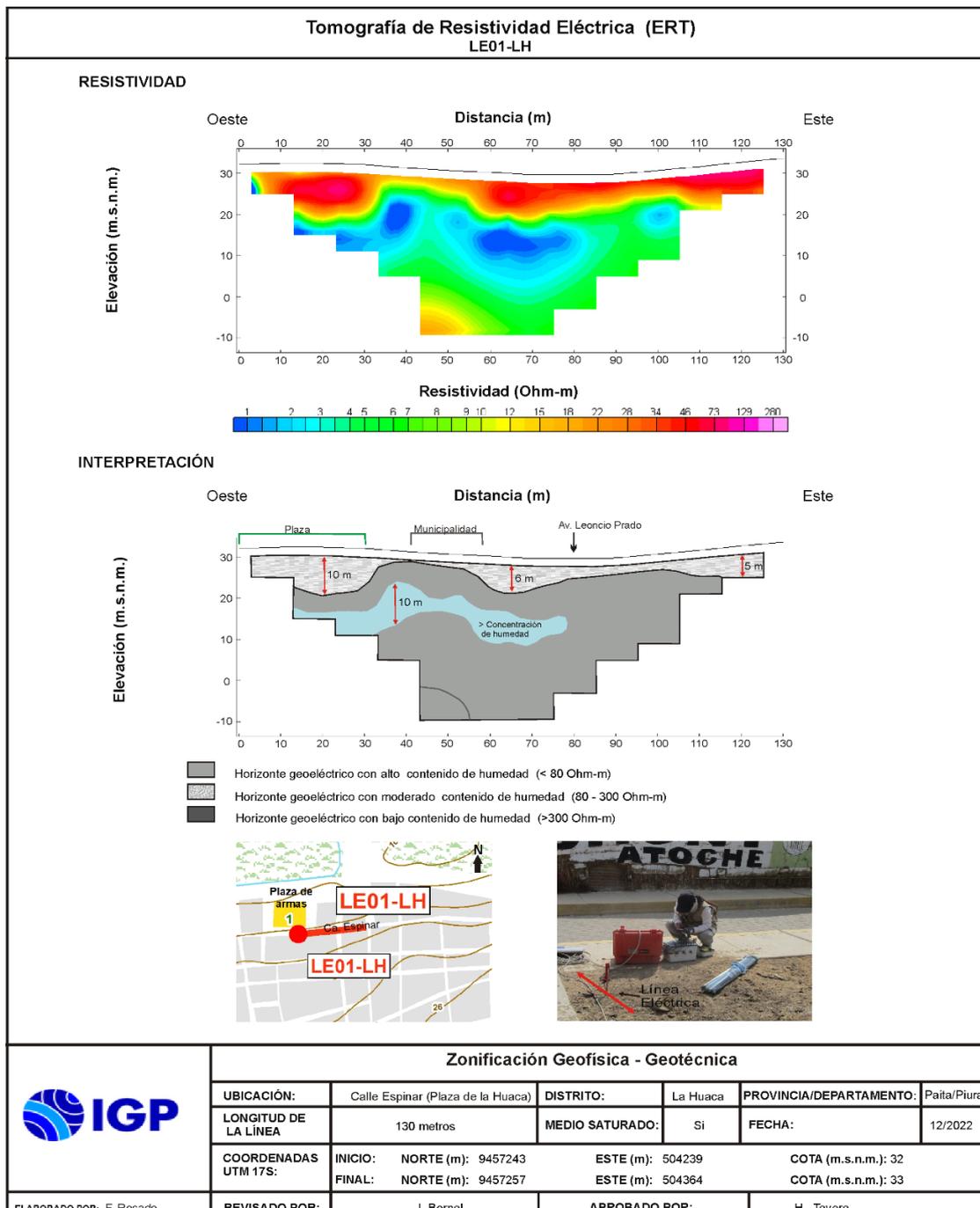


Figura 34. Resultado de tomografía eléctrica para la línea LE01-LH.

En el área urbana de La Huaca, se ha identificado la presencia de capas con suelos húmedos y/o saturados con las siguientes características:

- Hacia el extremo sur y sureste de la plaza (estadio Municipal y parque La Cultura respectivamente), se ha identificado la presencia de dos horizontes, el primer horizonte con moderado contenido de humedad (80 a 300 Ohm-m), este horizonte conforme se avanza al oeste va desapareciendo. El segundo horizonte, con alto contenido de humedad (< 80 Ohm-m) y espesores de entre 15 a 30 metros, los mayores espesores se presentan en las inmediaciones del estadio Municipal (Figura 35).
- Hacia el norte (calle Espinar), se ha identificado la presencia de dos horizontes, el primero con espesores de 5 a 10 metros. El segundo horizonte, a lo largo de toda la sección presenta alto contenido de humedad (< 80 Ohm-m) y espesores de hasta 30 metros.

3.4.- Integración de resultados

El área urbana de La Huaca se emplaza sobre una terraza aluvial antigua plana con ligeras ondulaciones y zonas de baja pendiente que se consideran como áreas de inundación pluvial. Los parámetros físicos del suelo, muestran las siguientes características:

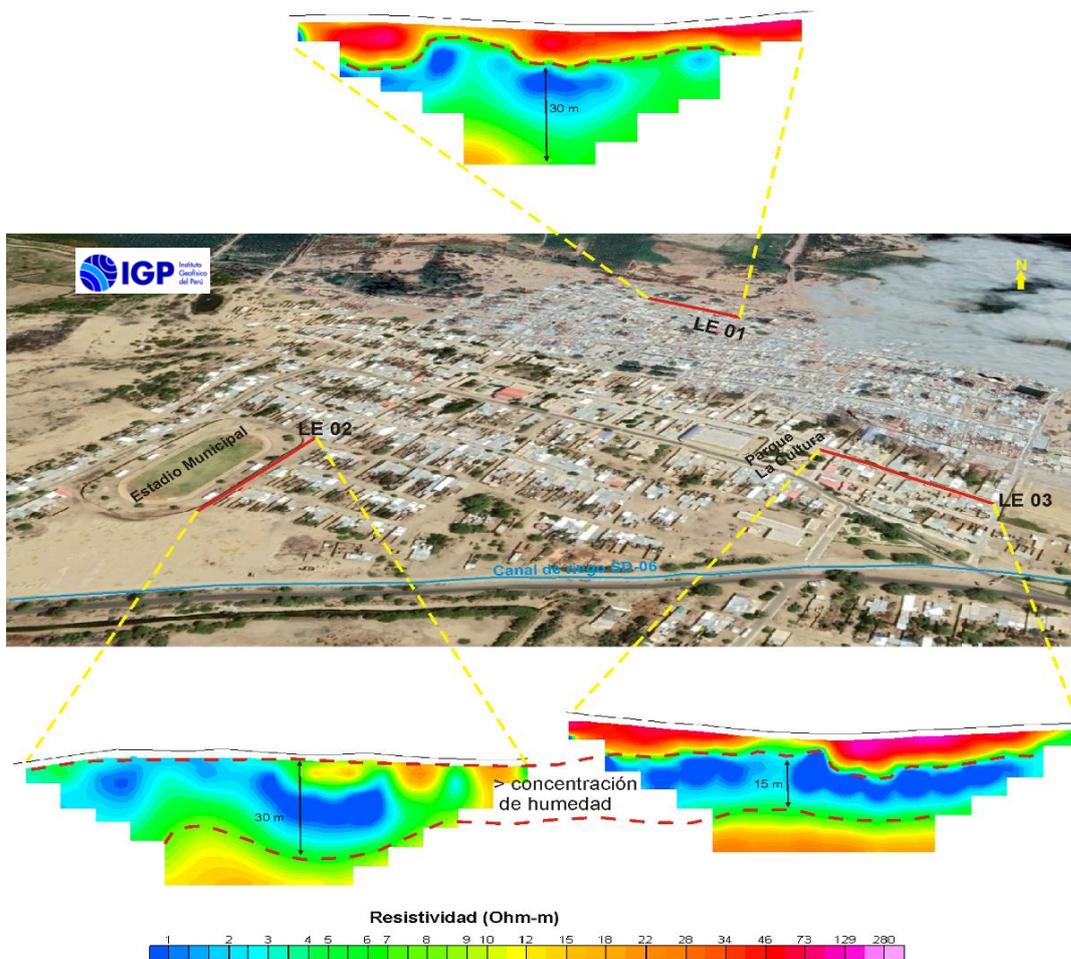


Figura 35: Ubicación y orientación de las líneas de tomografía eléctrica, realizadas al norte (LE01–LH) y al sur (LE02–LH y LE03–LH) del área de estudio. Las líneas interlineadas amarillas indican la orientación de las secciones y las líneas interlineadas rojas indican la presencia del acuífero.

Los suelos del área urbana de La Huaca responden predominantemente a periodos largos que fluctúan entre 0.8 y 1.1 segundos, mostrando una baja sensibilidad a periodos de 0.2 segundos hacia su extremo norte (zonas próximas a la Plaza de Armas).

Los resultados obtenidos con los métodos geofísicos permiten evidenciar que los suelos están conformados por capas superficiales de suelos blandos a medianamente rígidos con espesores que varían de 40 metros en dirección norte, por la plaza de La Huaca a 50 metros en dirección sur y sureste, por el estadio Municipal y parque La Cultura (carretera Paita – Sullana) y velocidades de ondas de corte V_{s30} que varía entre 220 y 236 m/s, correspondiendo a suelos Tipo S3; es decir suelos intermedios.

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 220 m/s y 236 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.8 segundos, se estima la existencia de una capa sedimentaria con espesores de entre 44 y 50 metros. Estos espesores se correlacionan con los modelos de velocidad obtenidos con los arreglos sísmicos. Asimismo, estos suelos presentan alto contenidos de humedad (el cual se encuentra desde los 3 metros de profundidad), incrementando la complejidad del comportamiento dinámico de los suelos ante sismos (Figura 32).

Estas condiciones, evidencian que el C.P. La Huaca se encuentra ubicada en una zona que presenta de moderado a alto peligro por sismo, debido a que sus suelos experimentarían altos niveles de sacudimiento (a periodos largos) ante la ocurrencia de sismos,

sumados a la probabilidad de que se generen procesos de licuación
suelos, que afectarían directamente a los elementos expuesto en su
superficie.

4.- ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA – GEOTÉCNICA DE LOS SUELOS

El mapa de Zonificación geofísica–geotécnica para el C.P. de La Huaca, se elabora en función de la integración de los resultados de los estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos, delimitando zonas cuyos suelos presentan características de respuesta similares ante la ocurrencia de sismos. Asimismo, las características dinámicas del suelo y sus propiedades mecánicas han permitido identificar en el área de estudio, de acuerdo a la adaptación de la clasificación de los perfiles del suelos indicados en la Norma de Construcción Sismorresistente E.030, la existencia de suelos Tipo S3; es decir, suelos intermedios – medianamente rígidos que responden a periodos de 0.8 a 1.0 segundos con amplificaciones moderadas.

Para el área urbana de La Huaca, se propone la siguiente Zonificación Geofísica–Geotécnica (Figura 36).

–**ZONA I y II:** Conformadas por suelos muy rígidos y rígidos respectivamente, no fueron identificados en el área de estudio.

– **ZONA III:** Suelos intermedios (medianamente rígidos), conformado por depósitos aluviales constituidos por arena arcillosa con limo con espesores de 40 a 50 metros; con velocidades de ondas de corte V_s de 159 m/s para la capa superficial y de hasta 250 m/s a la profundidad de 30 metros. El periodo de vibración natural del suelo

varía entre 0.8 a 1.0 segundos con amplificaciones relativas de hasta 3.5 veces. Presenta un alto contenido de humedad y en la zona céntrica, se identifica nivel freático superficial a 2.3 metros de profundidad. A profundidades de 1.5 metros los suelos presentan capacidad de carga admisible Muy Baja $<1.0 \text{ Kg/cm}^2$. Estas características corresponden a Suelos Tipo S3, que corresponde a suelos intermedios y/o medianamente rígidos.

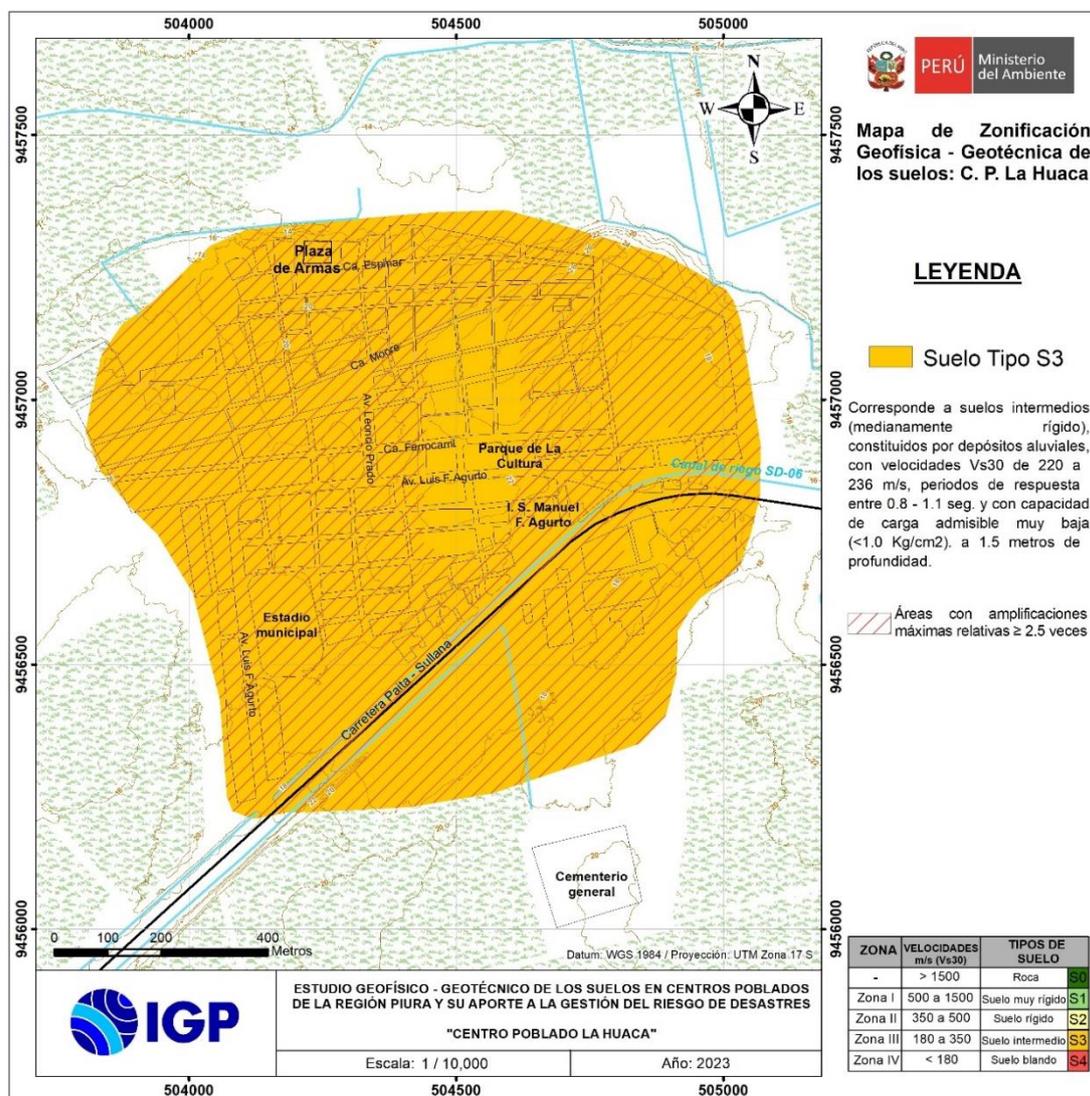


Figura 36. Mapa de zonificación geofísica-geotécnica de los suelos del C.P. La Huaca. Las líneas inclinadas en rojo delimitan zonas con mayor amplificación.

CONCLUSIONES

El análisis y evaluación geofísica – geotécnica de los suelos del C.P. La Huaca ubicada en el distrito de La Huaca, provincia de Paita – Piura, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Los eventos geodinámicos identificados en el área urbana de La Huaca son las inundaciones pluviales y el arenamiento eólico. Las inundaciones pluviales afectan las inmediaciones de los sectores Pampa La Gallina, PRONOEI La Huaca, Instituto Superior Luis F. Agurto, colegio Manuel Pio Zúñiga, Intersección Panamericana Norte con calle Vicús, cementerio general y estadio Municipal La Huaca. En estas zonas se observa la acumulación de aguas pluviales y la falta de drenaje pluvial.
- En el área urbana de La Huaca se identifica tres tipos de suelos: arena mal gradada con limos (SP–SM) que ocupan el 91% del área de estudio; arenas arcillosas con limos (SC–SM) que ocupan el 6% y arenas mal gradadas (SP) ocupan el 3% del área de estudio.
- Se ha determinado que a una profundidad de 1.0 y 1.5 metros, los suelos de cimentación de La Huaca presentan capacidad de carga admisible muy baja, menor a 1.00 kg/cm².

- Según el comportamiento dinámico, los suelos del C.P. La Huaca responden a un rango de periodos entre 0.8 – 1.1 segundos con amplificaciones máximas relativas de hasta 3.5 veces, evidenciando la presencia de suelos de gran espesor y que a nivel superficial, presentan baja consistencia. Asimismo, en zonas donde los suelos presentan bajas amplificaciones, sus periodos son de 2.5 segundos. Estos resultados evidencian un mayor riesgo para edificaciones y/o infraestructuras por la posibilidad de que experimenten un fenómeno de resonancia suelos–estructura.
- Los resultados permiten identificar que, los suelos en el área urbana de La Huaca están diferenciados en 3 capas sísmicas y un semi–espacio. Los suelos blandos corresponden a la primera capa con espesores de 4 metros ($V_s = 159$ a 180 m/s); en la segunda y tercera capa predominan suelos medianamente rígidos ($V_s = 207$ a 301 m/s) y con espesores entre 37 y 46 metros. En el área de estudio, se obtuvo velocidades de ondas de corte V_{s30} que fluctúan entre 221 y 236 m/s, correspondiendo a suelos medianamente rígidos.
- Los suelos del área de estudio presentan alto contenido de humedad a profundidades que fluctúa entre 2 y 40 metros. Los suelos entre el parque La Cultura y el estadio Municipal

presentan niveles freáticos a partir de los 2.3 metros de profundidad.

- De acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente E.030, las características físicas y dinámicas del suelo en el área urbana de La Huaca, corresponde a suelos Tipo S3; es decir, suelos intermedios y/o medianamente rígidos.
- A la ocurrencia de un sismo de moderada a mayor magnitud, los suelos del C.P. La Huaca pueden experimentar niveles altos de sacudimiento, por la presencia de suelos blandos con altos niveles de humedad a nivel superficial.

REFERENCIAS

- Alfaro et al. (2014). Estimación de umbrales de precipitaciones extremas para la emisión de avisos meteorológicos, Boletín Técnico SENAMHI, pp135.
- Amézquita-Jiménez, J., Jalixto-Cuyo, R., Pampas-Quiroga, J., (2012), Teorías de capacidad de carga y sus limitaciones en suelos compresibles.
- Bernal, I., (2006), “Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, México”, Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Braja Das, (2011) – Principles of Foundation Engineering, Seven Edition, pág. 139–140.
- Gobierno Regional de Piura – Laboratorio de mecánica de suelos (2022). Estudio de mecánica de suelos con fines de cimentación para el proyecto: "Elaboración de los estudios de evaluación de riesgo de desastres – EVAR para la formulación del plan regional integral de reconstrucción ante el sismo de 30 de julio del 2021.
- Instituto Geofísico del Perú, (2021): Sismo de Sullana del 30 de julio del 2021 (M6.1) – Aspectos sismo tectónicos.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017): Directorio nacional de centros poblados. Censos nacionales 2017 XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas.
- INGEMMET, (1999), Cuadrángulo geológico de Sullana hoja 10–b.

Louie, J. (2001). Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays. Bulletin of the Seismological Society of America. Pg. 20. DOI: 10.1785/0120000098

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

Nakamura Y., (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtrem or on the ground surface, Quaterly Report of the Railway Technology Research Institute, 30, 25-30.

Norabuena, E, Dixon, T., Stein, S. (1999). Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific Plate Motions

Norma Técnica de edificaciones E.030. 2018. Aprobada por resolución ministerial N°355-2018-VIVIENDA.

Norma Técnica de suelos y cimentaciones E.050. 2018. Aprobada por decreto supremo N° 011-2006-VIVIENDA.

Norma Técnica de edificaciones E.060 concreto armado 2009. Aprobada por decreto supremo N°015-2004-VIVIENDA.

Reynolds, J.M. (2011). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2nd ed., 712 pp.

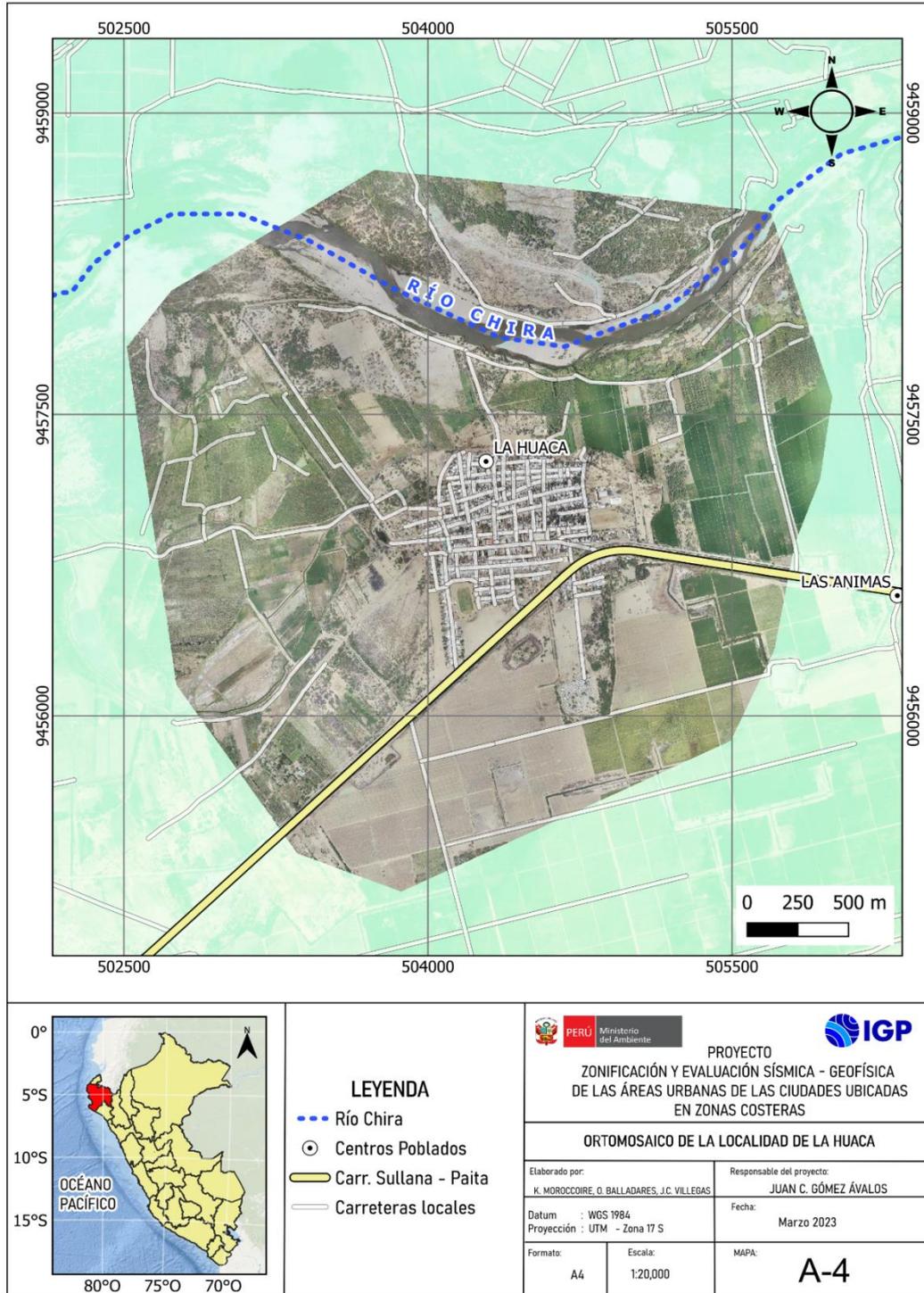
SESAME, (2004): Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation, European Commission – Research General Directorate Project No.EVG1-CT-2000-00026 SESAME, report D23.12.

- 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.
- Tavera, H., Agüero, C y Fernández, E. (2016). Catálogo general de isosistas para sismos peruano. Instituto Geofísico del Perú.
- Terzaghi, K. Peck, B., G. & Mesri, G., (1948) – Soil mechanics in engineering practice, New York: Wiley
- Villegas–Lanza, JC., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire–Chira, J., Nocquet, J–M. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. JGR, 10.1002/2016JB013080
- Villota H, (2005). Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. Segunda edición.

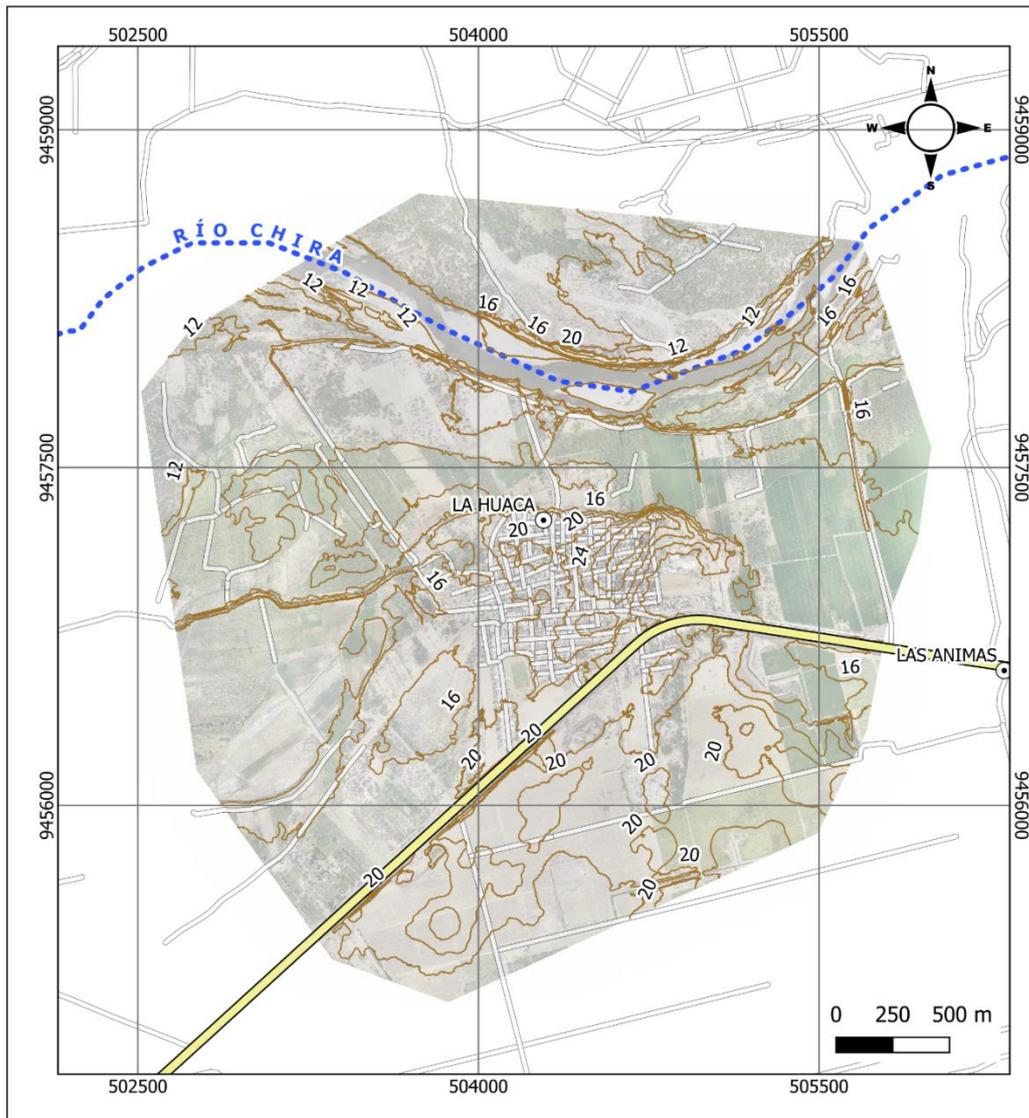
ANEXOS 1

Información topográfica

Ortomosaico



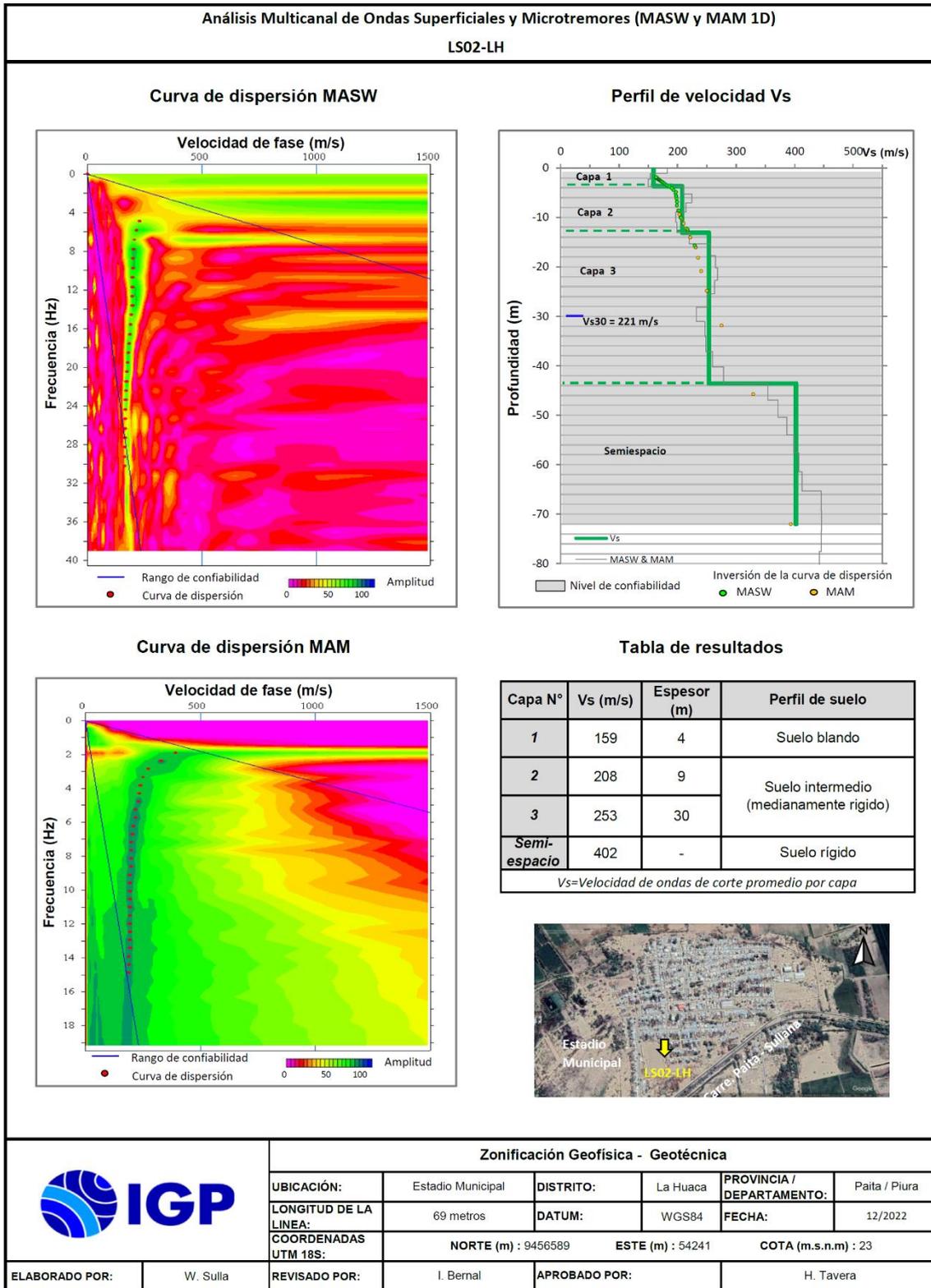
Curvas de nivel

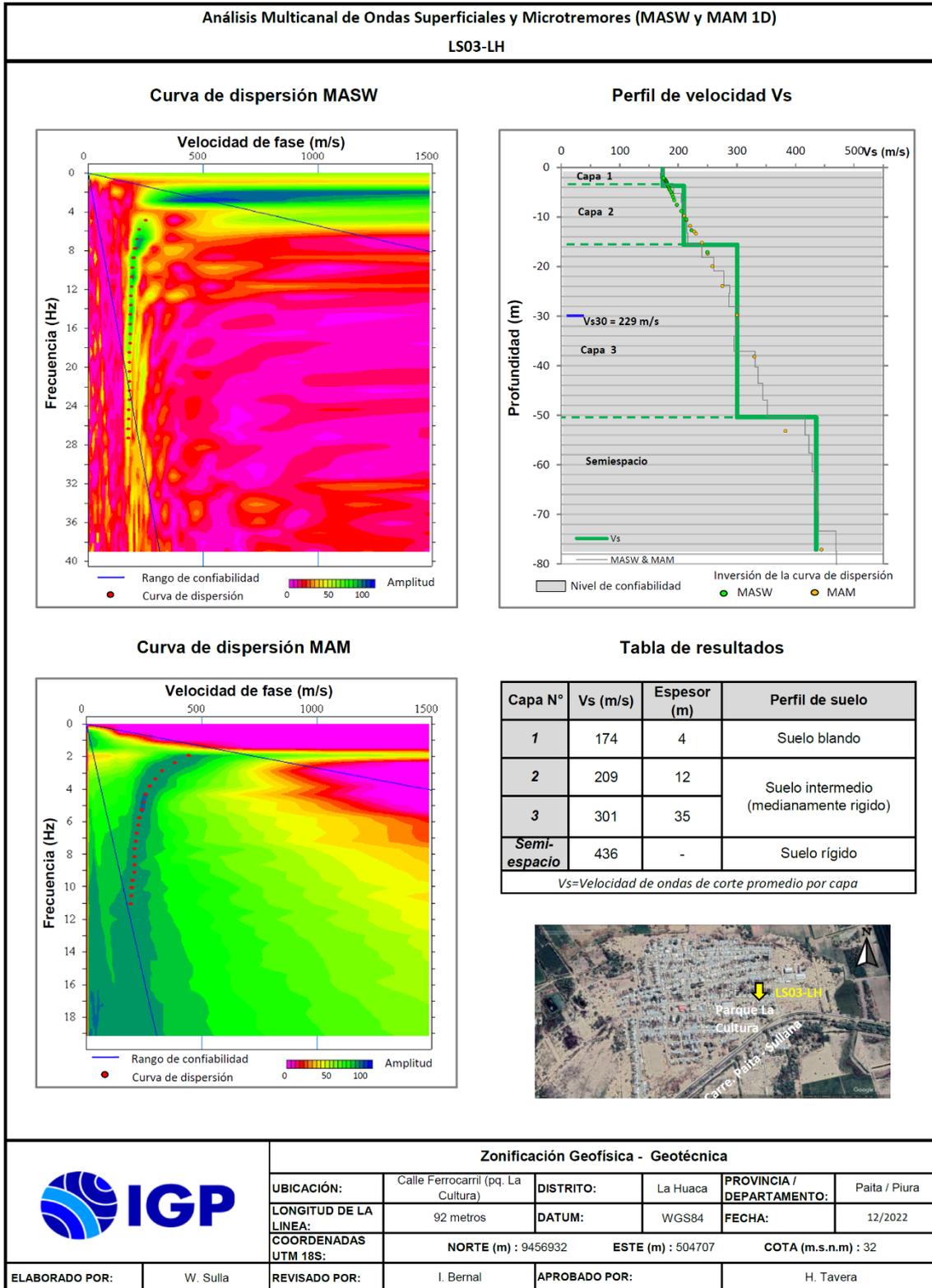


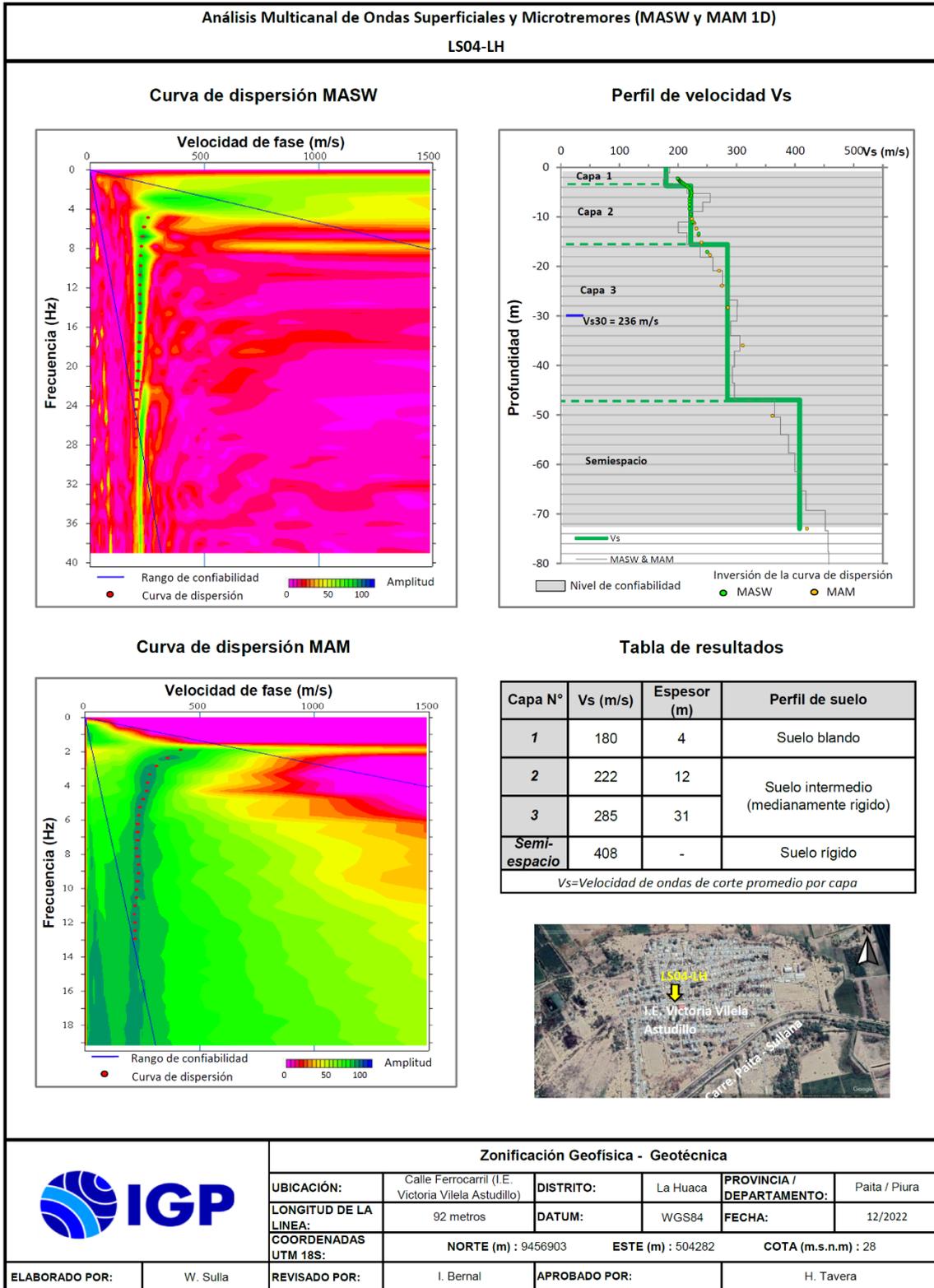
ANEXOS 2

Información geofísica

Perfiles sísmicos MASW - MAM







Secciones de tomografía eléctrica

