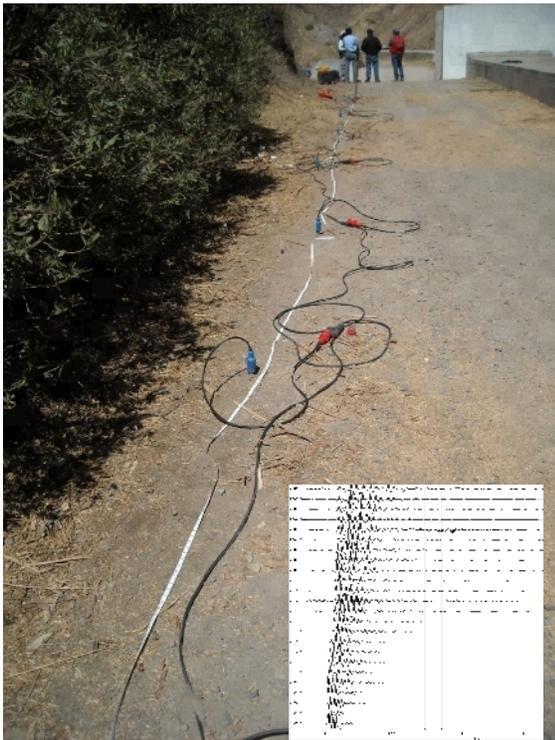




INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ



EVALUACIÓN DEL PELIGRO GEODINÁMICO, SÍSMICO Y GEOFÍSICO EN EL CERRO PUCRUCHACRA

Lima - Perú
2012

EVALUACION DEL PELIGRO GEODINAMICO, SÍSMICO Y GEOFISICO EN EL CERRO PUCRUCHACRA

Responsable del Proyecto: Dr. Hernando Tavera

Ejecución del Proyecto:

- Isabel Bernal
- Juan Carlos Gomez
- Hernando Tavera
- Bertrand Guillier
- Eliana Vizcarra
- Bilha Herrera
- Carlos Centurión
- Henry Salas
- Patricia Guardia
- Rider Navarro
- Joseph Flores
- Yonathan Bustamante

RESUMEN EJECUTIVO

La ladera del Cerro Pucruhacra que forma parte del flanco derecho del valle del río Rimac, a la altura del km 92 – km 93 de la Carretera Central y aledaña a la localidad de San Mateo.

En el presente estudio se ha procedido a analizar y evaluar el comportamiento geodinámico, sísmico y geofísico en el Cerro Pucruhacra a fin de conocer su estabilidad física, obteniéndose los siguientes resultados

La evaluación geodinámica, sísmica y geofísica realizada en la ladera del Cerro Pucruhacra ha permitido estimar para la capa sedimentaria no consolidada espesores variables entre 18 y 25 metros, definiendo un volumen de material susceptible a algún tipo de deslizamiento (movimiento en masa) de 1.5 millones de metros cúbicos.

En la ladera del Cerro Pucruhacra la estabilidad de la capa sedimentaria es crítica (coeficiente de seguridad menor a 1.0), siendo el material con mayor potencial a deslizarse (movimiento en masa) equivalente a volúmenes de aproximadamente 50 y 28 mil metros cúbicos para las Zonas Sur y Norte respectivamente.

En el área de estudio existen elementos detonadores naturales (sismos y lluvias) y antrópicos (regadíos) que facilitarían el desarrollo de cualquier proceso dinámico activo.

Se recomienda tomar las medidas de mitigación bajo la premisa de que el deslizamiento de 50 mil o 28 mil metros cúbicos es muy probable.

INDICE

RESUMEN EJECUTIVO

- 1.- INTRODUCCION
 - 2.- ANTECEDENTES
 - 3.- OBJETIVOS
 - 4.- ASPECTOS GEODINAMICOS
 - 4.1.- Geología
 - 4.2.- Geomorfología
 - 4.3.- Geodinámica
 - 4.4.- Geotecnia
 - 5.- SISMOLOGIA
 - 5.1.- Peligro Sísmico
 - 5.2.- Monitoreo Sísmico
 - 6.- GEOFISICA
 - 6.1.- Método H/V
 - 6.2.- Método Espectro de amplitud
 - 6.3.- Método MASW
 - 6.4.- Tomografía Eléctrica
 - 6.5.- Hidrología
 - 7.- ANALISIS DE ESTABILIDAD
- CONCLUSIONES
- REFERENCIAS

1.- INTRODUCCION

En agosto del 2011, la ladera del Cerro Pucruchacra que forma parte del flanco derecho del valle del río Rimac (Figura 1), a la altura del km 92 – km 93 de la Carretera Central y aledaña a la localidad de San Mateo, se produjo un deslizamiento de tierra que interrumpió el tránsito vehicular y por ende, las comunicaciones por una lapso de tiempo de hasta 2 días. En diciembre del mismo año, los trabajos de campo realizados por INGEMMET evidenciaron la presencia de un gran número de grietas de diversas longitudes y dimensiones de abertura, distribuidos a diferentes niveles de altura, y que en conjunto describían la inestabilidad de la ladera.

Posterior a estos sucesos, se han realizados diversos estudios geológicos, geodinámicos y geofísicos a cargo de instituciones como INGEMMET y la Sociedad Minera Corona, proponiendo diversas hipótesis sobre la fuente de origen del deslizamiento ocurrido en agosto-2011 y de la presencia de fisuras sobre la ladera. Posteriormente, INDECI junto a representantes de los diversos ministerios e instituciones inherentes al tema de gestión de riesgo, participan en reuniones de análisis, evaluación y coordinación sobre las acciones a tomar como medidas preventivas ante la posible amenaza de presentarse un deslizamiento de mayor volumen al ocurrido en agosto-2011.



Figura 1.- Vista panorámica del Cerro Pucruchacra, Distrito de San Mateo.

En las reuniones antes indicadas, así como en el Consejo de Ministros, la participación inicial del Instituto Geofísico del Perú, fue para presentar la propuesta de un estudio integral que considere el “*Monitoreo del Peligro Geodinámico, Sísmico y Geofísico del Cerro Pucruhacra*”. Además, como medidas preventivas se indicó que deben tomar acciones inmediatas como la construcción de una carretera auxiliar, la suspensión de todo sistema de regadío y la evacuación de la población que se encuentra en zonas de riesgo.

El presente estudio ha sido realizado en base a la información disponible en los documentos técnicos que fueron elaborados por las instituciones involucradas en el D.S. N° 101-2012-PCM, emergencia del Cerro Pucruhacra, de acuerdo a las condiciones geológicas y geodinámicas de la ladera Este del Cerro Pucruhacra. Por ejemplo, los 2 informes técnicos elaborados por INGEMMET (Informe N°A6493 de agosto del 2011 y el N°A6575 de setiembre del 2011) y otros 2, elaborados por la Consultora SVS INGENIEROS S.A.C. (Proyecto N°. 1-C-116-009 del mes de mayo del 2011 y el Proyecto N°. 1-C-116-011 del mes de noviembre del 2011). Esta información fue complementada con la obtenida de los trabajos de campo realizados en los meses de agosto y setiembre del presente año y que son descritos en el presente informe.

Para los estudios sísmicos no se contó con información disponible y para los estudios geofísicos se considero los informes de SVS INGENIEROS S.A.C antes indicados y los de Arce Geofísicos. En ambos casos, la información fue ampliada y otros obtenida por primera vez mediante la instalación de instrumental y la ejecución de trabajos de campo realizados durante los meses de agosto y setiembre del 2012 con personal profesional y equipamiento adecuado para la toma de datos, tal como se describe en las secciones 4 y 5 del presente informe. Posteriormente, se realizó el análisis y evaluación de la información recolectada a fin de preparar el presente Informe Técnico.

2.- ANTECEDENTES

En el último año, en la ladera del Cerro Pucruchacra se ha registrado la ocurrencia de procesos dinámicos como deslizamientos a poca escala y la aparición de grietas de diferente longitud y orientación, todos puestos en evidencia y reportados en informes técnicos por INDECI, INGEMMET, SVS INGENIEROS y el Gobierno Regional de Lima. Durante el periodo de lluvias del año 2011 (Enero-Marzo) se incrementó el número de grietas en superficie hasta producirse en agosto del mismo año el deslizamiento del extremo inferior de la ladera provocando el bloqueo de la Carretera Central y el inicio de las acciones preventivas por parte de las instituciones inherentes a la emergencia presentada. Después de haberse producido el deslizamiento, el Gobierno Central declaró en emergencia la situación física del Cerro Pucruchacra, estando latente el riesgo de producirse deslizamientos de mayor escala.

En el informe “Estudio Geotécnico de la Ladera de Pucruchacra” emitido por SVS Ingenieros S.A.C por encargo de la Compañía Minero Corona, se indica que la ladera de Pucruchacra presenta dos zonas geotectónicas bien diferenciadas por su morfología y composición litológica, las llamadas, Zona Sur y Zona Norte. La Zona Sur tiene una superficie uniforme constituida predominantemente por suelo granular; mientras que, la Zona Norte presenta una superficie escalonada compuesta por arena arcillosa. El análisis de estabilidad y las características de grietas indican que la ladera en la Zona Norte presenta estabilidad precaria pudiendo colapsar y la Zona Sur, estaría afectada por desprendimientos de suelo activo, con inminente probabilidad de deslizarse. Asimismo, el volumen del material que podría deslizarse en la zona llamada “el cobertizo” (Zona Norte) ha sido estimado en 370,000m³. También se indica que el canal y el túnel aductor de la Central Hidroeléctrica de Huanchor, por el tipo de construcción y geometría, no estarían produciendo filtraciones y por lo tanto, no tienen influencia en el comportamiento dinámico de la ladera. Finalmente, en el informe se indica que los fenómenos geodinámicos activos no representan un peligro para las estructuras de la Central Hidroeléctrica Huanchor ubicadas en la Zona Norte y los procesos geodinámicos activos presentes en la Zona Sur, tienen su fuente de origen en la actividad de regadío que realizan los agricultores en la parte alta de la ladera.

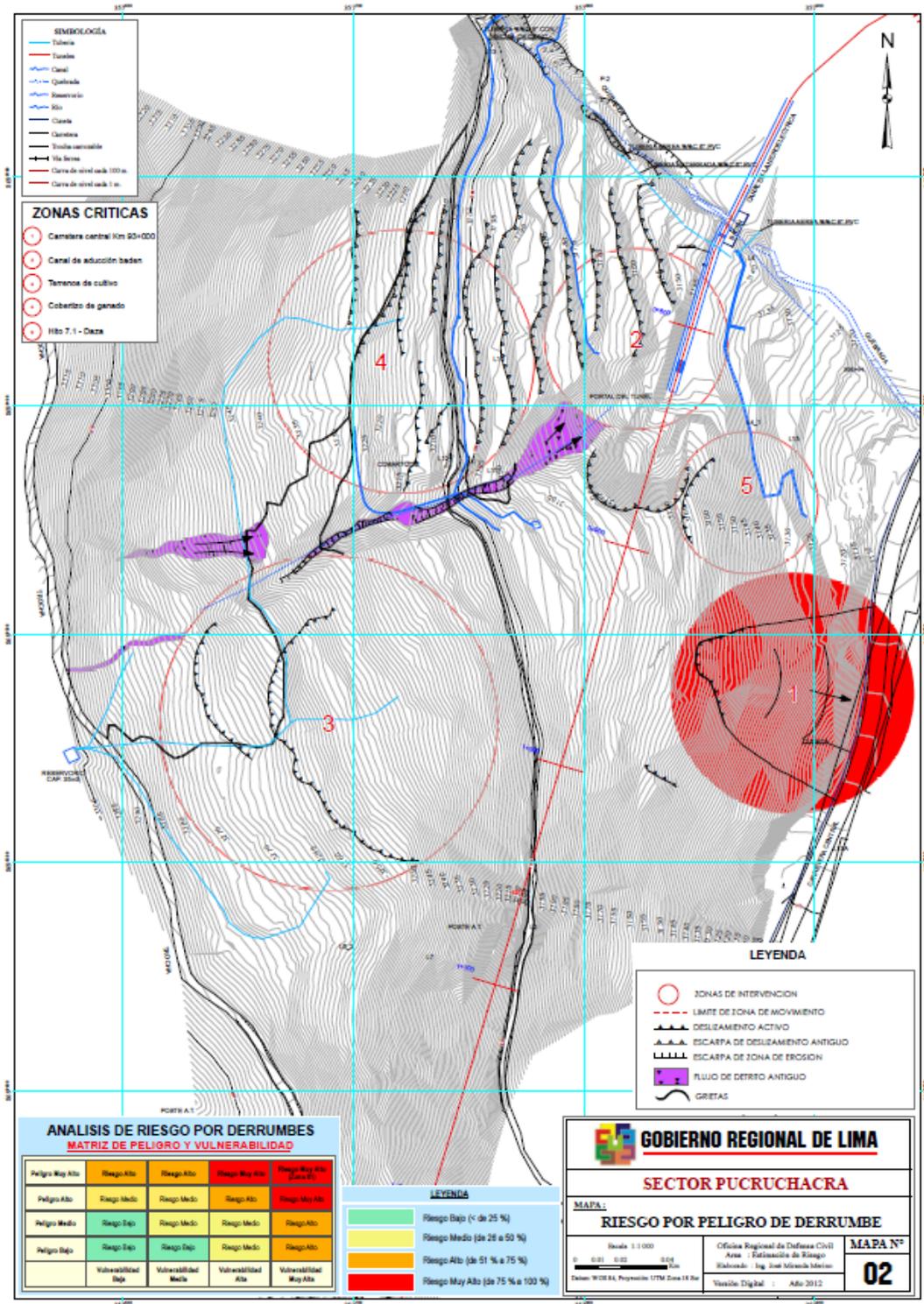


Figura 2.- Mapa de la ladera del Cerro de Pucruchacra sobre el cual se indica con círculos la presencia de las 5 zonas críticas identificadas por el Gobierno Regional de Lima (GRL). Ver Anexo.

En el informe “Deslizamiento de Tierras en el Cerro Pucruchacra” realizado por INGENMET, se indica que la ladera de dicha unidad esta formada por materiales de un antiguo deslizamiento que esta en proceso de reactivación, siendo su detonante la filtración de aguas provenientes de las labores de regadío que se realiza en las parte altas del cerro. Por otro lado, informes provenientes del Gobierno Regional de Lima (GRL), identifican en la ladera del Cerro Pucruchacra la presencia de 5 zonas criticas (Figura 2) con peligro inminente: Zona 1, sobre la zona de deslizamiento reciente (agosto, 2011) y que movilizo un volumen de 63000 m³; Zona 2, comprendida entre el portal de entrada al canal aductor y el badén en donde se está dando empuje al terreno para generarse ligeros desplazamientos milimétricos; Zona 3, en la parte alta de la Zona Sur donde se presentan agrietamientos con asentamientos a lo largo de 200 metros con claros desplazamientos verticales y horizontales de 0.7 y 0.5 m respectivamente; Zona 4, en la parte alta de la Zona Norte con agrietamientos a lo largo de 80 metros con desplazamientos verticales y horizontales de hasta 1.5 y 0.5m respectivamente y finalmente, la Zona 5, ubicada al norte de la Zona 1, donde se están presentando agrietamientos y asentamientos que pueden generar deslizamientos que afectarían a las viviendas ubicadas en la parte baja de la ladera del cerro, así como a la Carretera Central.

Otro de los estudios que proporciona información geofísica son los ejecutados por Arce Geofísicos (Estudio N°966-11, setiembre, 2011) a partir de secciones de refracción sísmica y en los cuales, se determinaron las velocidades de la onda P (Vp) a fin de diferenciar las siguientes estructuras a partir de sus propiedades elásticas. El estudio permitió identificar la presencia de una capa superficial constituida por sedimentos no consolidados o roca muy alterada con velocidades Vp en el rango de 400 – 600 m/s, teniendo en su base, material removible con velocidad de 1000 m/s. La existencia de un horizonte intermedio conformado por rocas alteradas con velocidades del orden de 1000 a 1600 m/s, y finalmente, en la parte más profunda la presencia de roca firme con velocidades 1600 a 3000 m/s y a mayor profundidad, roca competente con velocidad de la onda P mayor a 3000 m/s.

Por otro lado, en reciente presentación oral realizada por los representantes de la Minera Corona en INDECI sobre las conclusiones del monitoreo del desplazamiento de la ladera del Cerro Pucruchacra, sugieren que en la parte alta de la Zona Sur (Zona 3 según GRL) se producen desplazamientos de 1.5mm/día; mientras que, en la parte baja de la misma zona, los desplazamientos son del orden de 0.7mm/día. En la parte

baja de la Zona Norte, los desplazamientos serían del orden de 0.3mm/día (Figura 3). De acuerdo al diferencial observado, se indica que la parte alta de la Zona Sur, presenta mayor inestabilidad. Posteriormente, en una nueva presentación a cargo de la misma empresa en el local de INDECI (31/10/12), se indica que en los últimos meses los desplazamientos presentan valores más estables, del orden de 0.7 mm/día en toda el área de estudio. Es importante que estos parámetros continúen siendo evaluados.

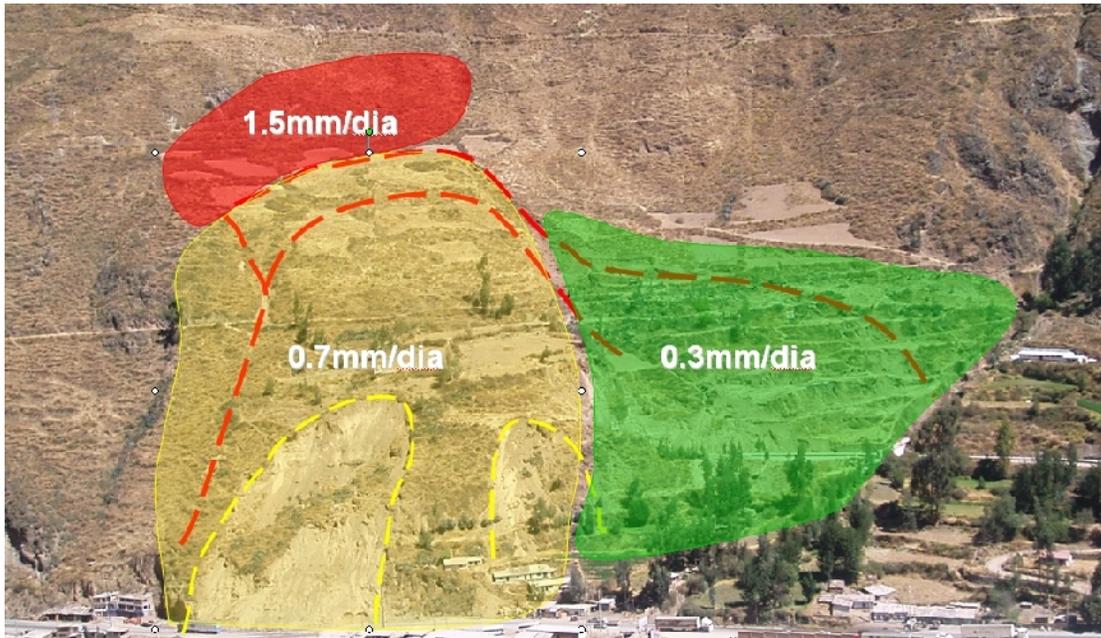


Figura 3.- Imagen de la ladera del Cerro de Pucruchacra (Fuente, presentación oral de Minera Corona) indicando las áreas en la cuales se ha identificado la velocidad de desplazamiento de la masa sedimentaria.

3.- OBJETIVOS

El objetivo general del presente estudio es analizar y evaluar el comportamiento geodinámico, sísmico y geofísico a fin de conocer la estabilidad física de la ladera Este del Cerro Pucruyacra. Para el cumplimiento de este objetivo se ha revisado toda la bibliografía disponible a la fecha y realizado trabajos de campo e instalación de equipos para la recolección de data y registro de parámetros geofísicos complementarios.

4.- ASPECTOS GEODINAMICOS

En este capítulo se procede a describir las características geodinámicas de la ladera Este del Cerro Pucruchacra basado en información disponible sobre la cartografía geológica, geomorfológica y geodinámica (INGEMMET y SVS INGENIEROS S.A.C.), complementada con trabajos de campo realizados en agosto y setiembre del presente año.

4.1.- Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos de la zona de estudio han sido descritos por Fidel et al, (2006) e indican como rasgo característico, que en el sector, el relieve presenta en una sección transversal, la típica forma de una "V" y un fondo angosto limitado por cadenas montañosas de moderada a fuerte pendiente, ver Figura 4. La ladera Este del Cerro Pucruchacra está comprendida entre las cotas 3000 y 3300 m.s.n.m. con una superficie irregular debido a la presencia de andenes y parcelas agrícolas con pendientes promedio de 25° a 35°, lográndose diferenciar la existencia de laderas cóncavas (parte media superior) y convexas (al pie de la ladera, depósitos coluviales). En la ladera existen depósitos coluviales originados por un antiguo deslizamiento, con un ancho de 400 x 500 m de largo y 20 m de espesor aproximadamente. En este sector se presenta un cierre de valle generado y controlado por depósitos coluviales que han descendido de las laderas del margen derecho, formando una terraza de 20 m de altura en la parte baja de la antigua Carretera Central.

En el área de estudio se ha identificado la existencia de tres unidades geomorfológicas relacionadas a 3 rangos de pendientes identificados en un modelo de elevación digital (MDE) que fue construido utilizando el software ARGIS y cuyo detalle se muestra en la Tabla 1. En base al análisis de pendientes, las características de estas unidades son:

Tabla 1.- Rangos de pendientes identificados en el Cerro Pucruchacra

Unidad Geomorfológica	Pendiente
Terrazas	0° - 25°
Ladera de pendiente media	25° - 35°
Ladera empinada	> 35°

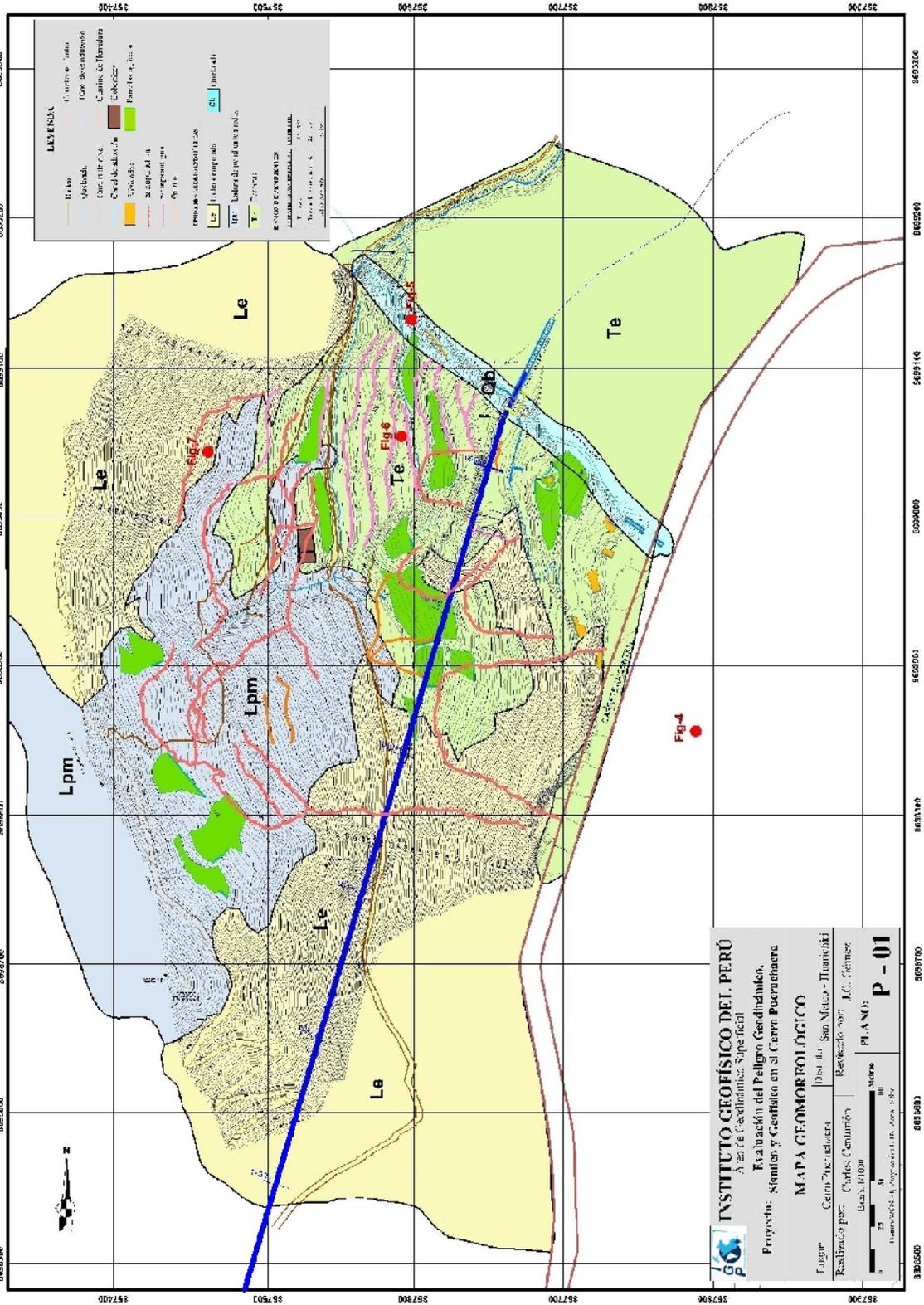


Figura 4: Mapa geomorfológico para el Cerro Pucruchacra. Ver Anexo.

.-Quebradas: Esta unidad geomorfológica comprende la quebrada Chahuatupe ubicada entre las cotas 3100 y 3260 m.s.n.m., en donde se emplaza un canal de concreto que permanece seco la mayor parte del año, discurriendo agua solo en épocas de fuertes precipitaciones en el sector andino. La pendiente es mayor a 25° , Figura 5.



Figura 5: Cabecera de la Quebrada Chahuatupe, que presenta una pendiente mayor a 25° (Figura 4)



Figura 6: Terrazas en la parte media de la ladera del Cerro Pucruchacra, las cuales se utilizan en labores agrícolas (Figura 4)

.- **Terrazas:** Se han formado por la acumulación de depósitos coluviales y aluviales producto de un deslizamiento antiguo que ha modificado la topografía de la ladera del Cerro Pucruhacra entre las cotas 3100 y 3220 m.s.n.m, Esta unidad presenta un rango de pendientes entre los 0° y 25° . Las zonas deslizadas con pendientes menores a 25° son utilizadas como parcelas agrícolas, Figura 6.

.- **Ladera empinada y de pendiente media:** Las laderas empinadas se localizan en la parte alta del Cerro Pucruhacra entre las cotas 3220 y 3350 m.s.n.m. y en el sector del deslizamiento activo que llega hasta la Carretera Central. En el primer caso, las pendientes son mayores a 35° ; mientras que, en el segundo las pendientes están entre 25° y 35° , estando estas zonas ubicadas en la parte central de la ladera, Figura 7.



Figura 7: Parte alta de la ladera Pucruhacra con pendientes mayores a 35° (Figura 4)

En la Figura 8, se presenta una vista panorámica de la ladera del Cerro Pucruhacra en la cual se puede observar los diferentes tipos de pendientes presentes en su ladera.



Figura 8: Vista panorámica de la ladera del cerro Pucruhacra en la cual se diferencian zonas de pendientes altas en rojo, pendientes medias en azul y terrazas de color amarillo

4.2.- LITOLOGÍA

La ladera Este del Cerro Pucruhacra se emplaza sobre la unidad lito-estratigráfica denominada Grupo Rímac compuesta por rocas volcánico-sedimentarias, instruidas por un cuerpo pórfido monzonítico cubierto por depósitos superficiales no consolidados del Cuaternario (depósitos aluviales, coluviales y proluviales principalmente), tal como se muestra en la Figura 9.

Las principales características de la columna lito-estratigráfica de la zona son:

.- Grupo Rímac: Está conformado por una secuencia de derrames lávicos y rocas piroclásticas de composición andesítica del Paleógeno. La andesita se presenta de dos formas: al sur de la ladera, en las inmediaciones de una torre de transmisión eléctrica, tiene una coloración gris amarillento debido a las alteraciones hidrotermales, además de estar moderadamente meteorizada e intensamente fracturada, y en la parte alta de la Quebrada Chahuatupe se presenta de color verde grisáceo oscuro, muy duras, levemente meteorizadas con patinas de óxido y moderadamente fracturada, ver Figura 10.

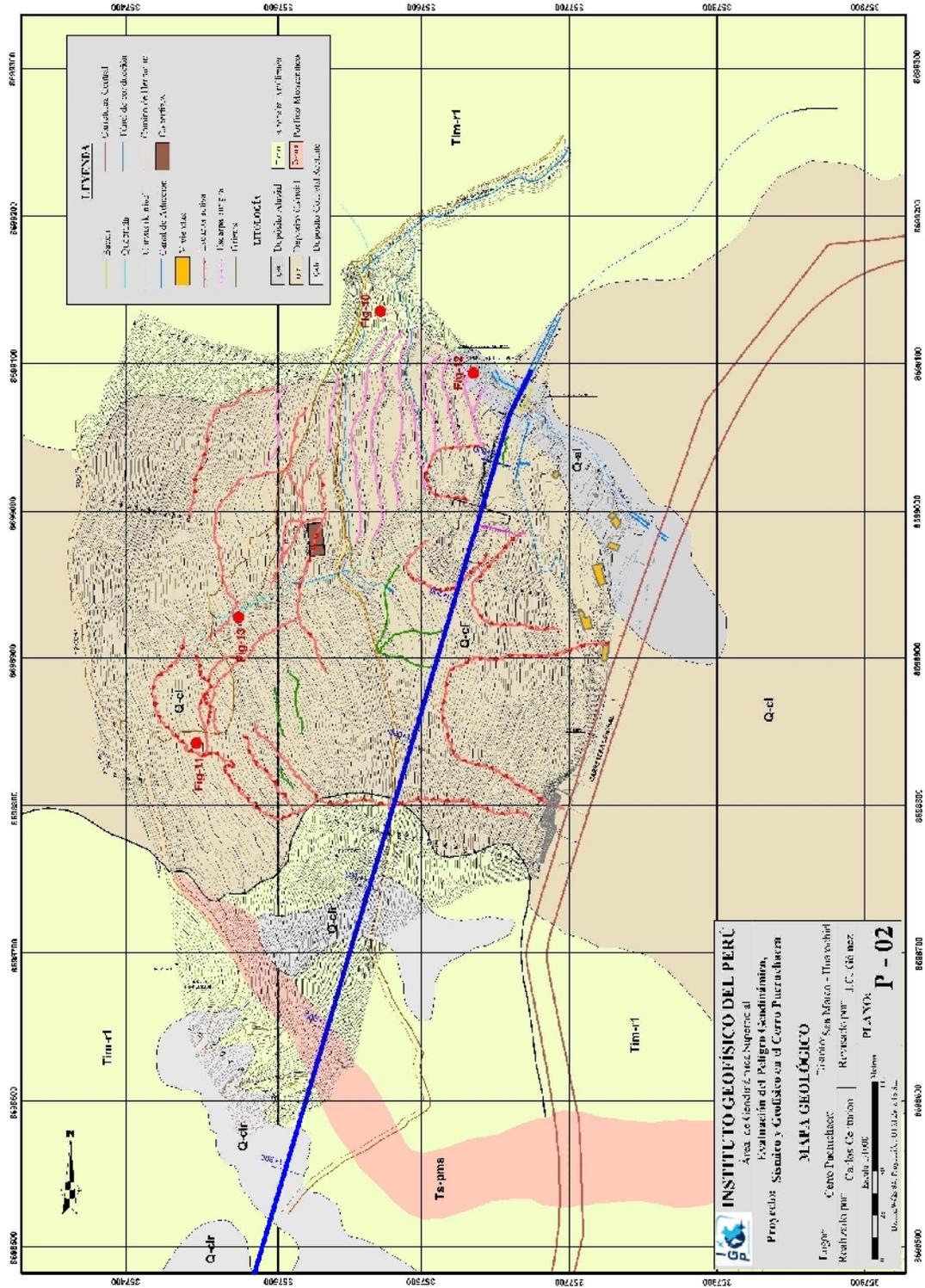


Figura 9: Mapa geológico para el Cerro Pucruchacra. Ver Anexo.



Figura 10: Afloramiento rocoso con meteorización tipo argilítica de color verde grisáceo oscuro del grupo Rímac (Figura 9)

.- Rocas Intrusivas: Presentes en el extremo sur de la ladera del Cerro Pucruchacra, cerca de una torre de alta tensión en donde aflora como un cuerpo pórfido monzonítico (Ts-pms) en dirección NW-SE y que corta a los volcánicos andesíticos del Grupo Rímac, siendo la causa del fracturamiento intenso que se desarrolla en la misma unidad. El intrusivo es de color gris verdoso, grano medio a fino y estructura masiva; están moderadamente fracturados y meteorizados. En el cuerpo se observa venillas de mineralización.

.- Depósitos Cuaternarios: Están constituidos por gruesos depósitos coluviales que se asientan en la margen derecha del valle. Se identifican tres tipos de depósitos con espesores promedio de 20 m, diferenciados en base al tipo de acarreo y naturaleza del material (Varnes, 1978), ver Figura 9.

.- Depósitos Coluviales (Q-cl): Corresponden a materiales producto de deslizamientos con espesores no mayores a 20 m, que cubren gran parte de la zona de estudio y sobreyacen al basamento rocoso de la ladera. Estos depósitos están constituidos por fragmentos de roca andesítica heterométricas de 20" de diámetro en promedio (angulosas a subangulosas), además de presentar una matriz fina arenosa y limoarcillosa. Son materiales permeables, inconsolidados e inestables, Figura 11.



Figura 11: Depósitos coluviales en la parte de la ladera, sector cobertizos (Figura 9)

.- Depósitos Aluviales (Q-al): Constituidos por acumulaciones de bloques de roca andesítica y gravas con formas que van de subangulosas a angulosas y matriz areno limosa. Estos depósitos son conformados por la activación de la quebrada Chahuatupe en temporada de lluvias, Figura 12.



Figura 12: Depósitos aluviales conformados por fragmentos de rocas con matriz areno limosa en la quebrada Chahuatupe (Figura 9)

Depósitos Proluviales: Se encuentran en la parte baja de la quebrada Pucruyacra entre las cotas 3170 y 3310 m.s.n.m. uniendo una franja de 60 m aproximadamente. Están constituidos por material suelto, poco consolidados, de naturaleza volcánica-sedimentaria con un espesor promedio de 0.80 m, presentando bloques de 0.25 m de diámetro con matriz arenosa limosa, de forma subangulosas con una distribución irregular y evidenciando un corto acarreo. El origen de estos materiales es debido a la deposición conformada por el acarreo de flujos detríticos, Figura 13.



Figura 13: Depósitos proluviales en la parte baja de la quebrada Pucruyacra, en las inmediaciones de cobertizos (Figura 9)

4.3.- GEODINÁMICA

Los procesos geodinámicos superficiales dan lugar a diversas geofomas producto de la ocurrencia de movimientos en masa, los cuales están relacionados a parámetros intrínsecos como (Santacana, 2001): litología, pendientes, geomorfología, cobertura vegetal y drenaje; mientras que, como agentes detonantes intervienen las precipitaciones, los sismos y la actividad antrópica (Figura 14) que afectan la infraestructura, tales como trazos de túneles de conducción, tramos de la carreteras y parcelas agrícolas. Los movimientos en masa reconocidos en la zona del Cerro Pucruyacra son los deslizamientos y los flujos de detritos, que asociados a lluvias intensas pueden provocar la reactivación de la quebrada Pucruyacra, Figura 15.



Figura 14: Agrietamientos paralelos a la orientación del canal de aducción que afectan al suelo arenoso limoso, sector el badén en la cota 3145 m.s.n.m. (Figura 9)

.- Deslizamientos: Definen movimientos ladera abajo, de una masa de suelos o rocas que ocurren predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o zonas de intensa deformación cortante. Existen evidencias de escarpas de pequeños deslizamientos superficiales ocurridos en años anteriores en toda la ladera. Por ejemplo, en la parte baja de la ladera se observan trazos de 4 deslizamientos recientes en dirección Este (ver Figura 15) y cuyas características se describen a continuación:

.- El primer deslizamiento (D-1) se encuentra próximo a la Carretera Central (Figura 16); el segundo evento (D-2) se encuentra en la zona de asentamiento de las viviendas (Figura 17 y 18) y caída de rocas cerca de la ladera (Figura 19); el tercero (D-3) se encuentra en la parte alta del portal de entrada del túnel (Figura 20) y el último (D-4), en la parte baja de las terrazas ubicada en el extremo derecho del canal de aducción en las inmediaciones del badén (Figura 21).

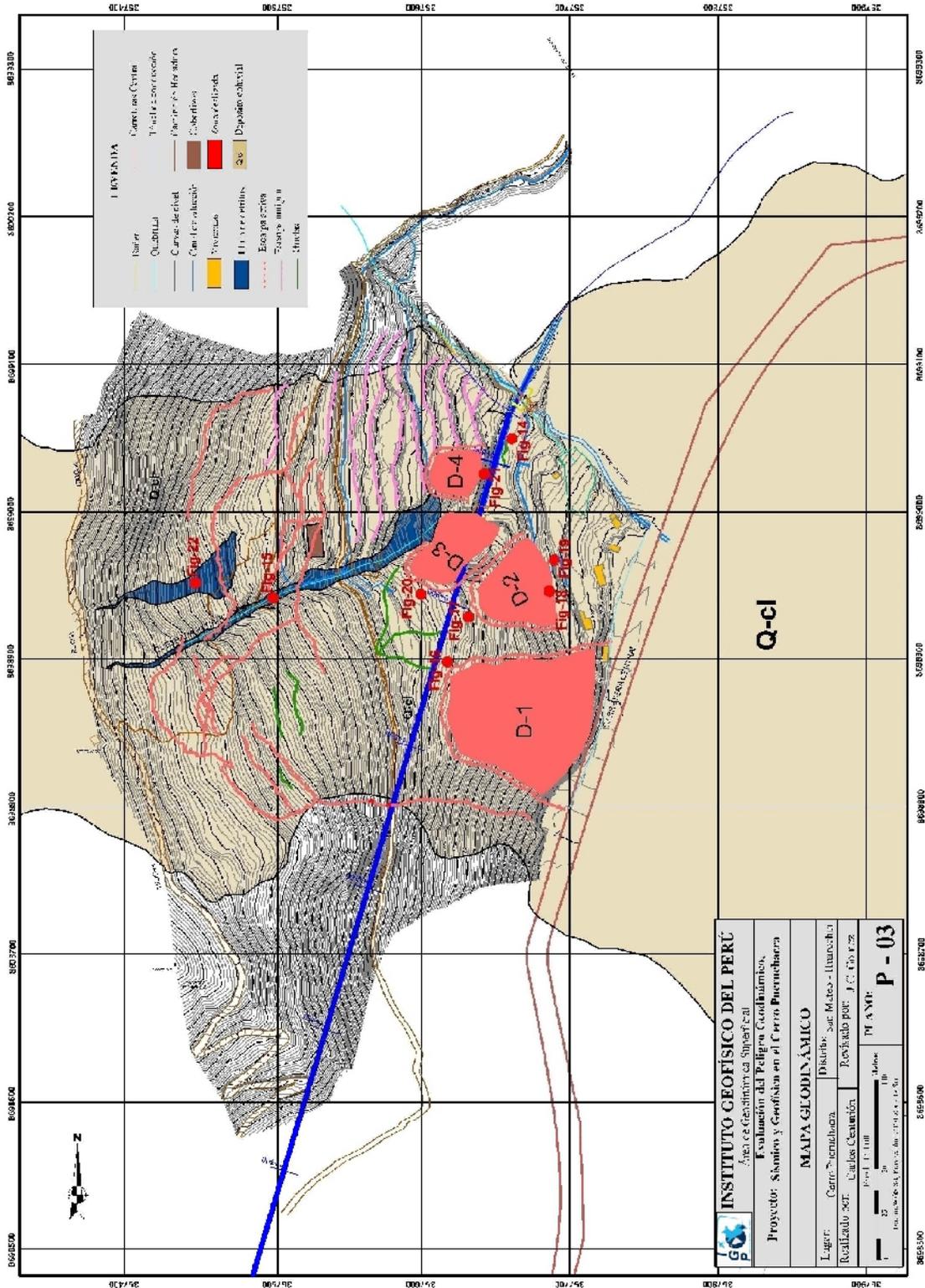


Figura 15: Mapa geodinámico para el Cerro Pucruchacra y distribución espacial de los cuatro deslizamientos activos en el Cerro Pucruchacra



Figura 16: Vista desde la parte alta del deslizamiento (D-1) producido el 16 de agosto del 2011, que afecta el talud hasta la Carretera Central (Figura 15)



Figura 17: Vista del deslizamiento (D-2) ubicado en el extremo norte de la Quebrada Chahuatupe, donde se asientan viviendas contiguas a la Carretera Central (Figura 15)



Figura 18: Otra vista del deslizamiento (D-2), que muestra la escarpa activa y materiales inconsolidados (Figura 15)



Figura 19: Desprendimiento de rocas que afectan a las viviendas ubicadas en el extremo Norte de la quebrada Chahuatupe (Figura 15)



Figura 20: Deslizamiento (D-3) que afecta al canal de aducción, se localiza en la parte alta de la portada del túnel (Figura 15)



Figura 21: Deslizamiento (D-4) ocurrido en el extremo Norte del canal de aducción, donde se hicieron trabajos de estabilización de la ladera (Figura 15)

.- Flujo de detritos: Estos eventos están asociados a las precipitaciones pluviales, como factor detonante para la reactivación de posibles flujos. En la Quebrada Pucruhacra se ha inventariado la existencia de dos flujos de detritos ocurridos en el pasado. En el futuro, fuertes precipitaciones podrían activar estos depósitos por presentar fragmentos de rocas y material inconsolidado, Figura 22.

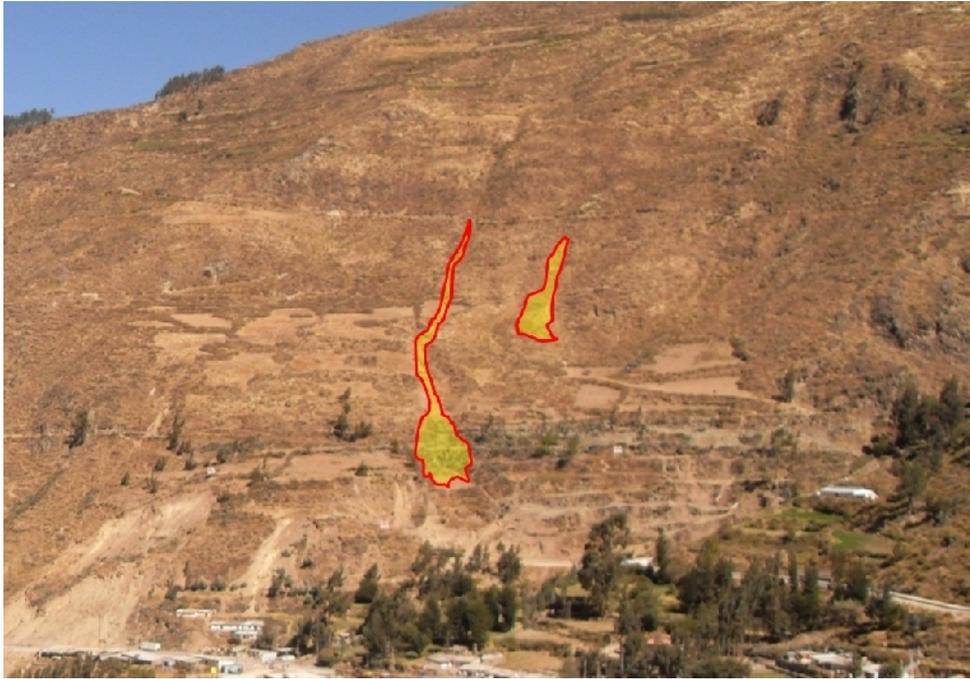


Figura 22: Depósitos de flujos de detritos que está constituido por materiales de origen proluvial (Figura 15)

4.4.- GEOTECNIA

El análisis de las investigaciones realizadas por SVS INGENIEROS S.A.C, permitieron diferenciar en la ladera del Cerro Pucruhacra hasta dos zonas geotécnicas con las siguientes características:

.- Zona geotécnica Norte: Presenta una superficie escalonada con numerosas parcelas agrícolas asentadas sobre suelos areno-arcillosos con un espesor promedio de 15 m y con una pendiente menor de 35°.

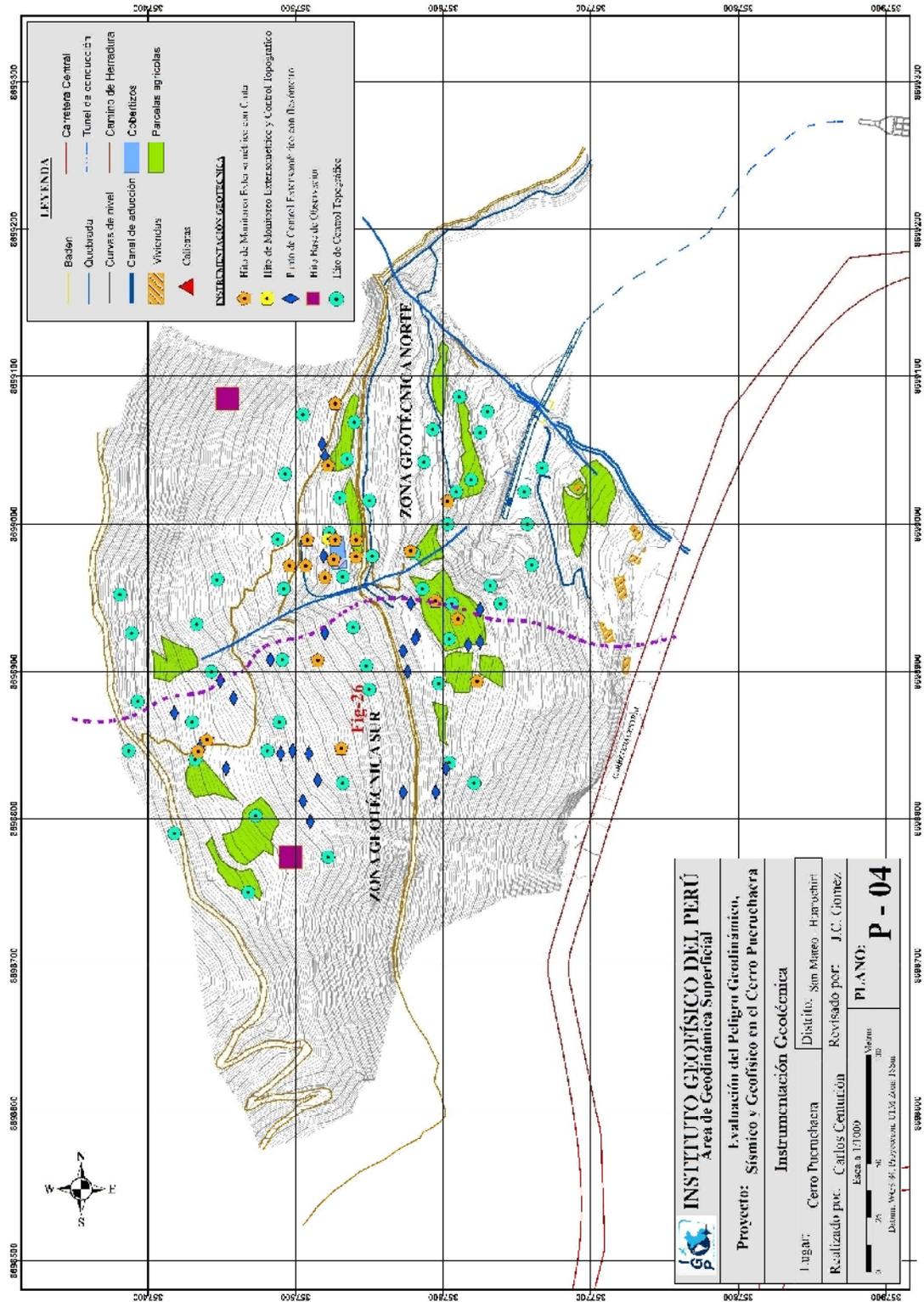


Figura 23: Mapa del Cerro Pucruchacra con la ubicación de los puntos geotécnicos

.- **Zona geotécnica Sur:** Presenta una pendiente uniforme mayor a 35°, no hay parcelas agrícolas y está conformada por suelos granulares de color beige como gravas y cantos rodados con un espesor promedio de 20-25 m.

La consultora SVS INGENIEROS S.A.C como parte de los estudios geotécnicos de la estabilidad de la ladera del Cerro Pucruchacra y del canal de la CC:HH. Huanchor, ha ejecutado 12 calicatas exploratorias con profundidades de hasta 2.40 m a fin de realizar la clasificación geotécnica de los suelos. Además, implementó un plan de monitoreo y control geotécnico mediante la instalación de puntos topográficos y extensómetros, y cuya distribución se muestra en la Figura 23.

.- **Calicatas:** SVS INGENIEROS S.A.C realizó doce (12) calicatas en el mes de mayo del 2011 y su distribución se muestra en la Figura 24. En general, las calicatas no cubren de manera homogénea todo el área de estudio; sin embargo, se ha tratado de explotar al máximo la información disponible. En la Tabla 2 se presenta los códigos y coordenadas de ubicación de las calicatas, así como la clasificación SUCS del material identificado en cada calicata.

.- **Instrumentación:** SVS INGENIEROS S.A.C. instaló hitos para el monitoreo geotécnico de la ladera del Cerro Pucruchacra y su distribución se muestra en la Figura 25.

Tabla 2.- Ubicación de calicatas y clasificación SUCS

Calicata	Profundidad (m)	Norte (m)	Este (m)	Elevación (m.s.n.m.)	Clasificación (SUCS)
C - 1	2.40	8699011	357491	3213	SC
C - 2	2.40	8699027	357495	3213	SC
C - 3	2.20	8698888	357435	3264	GW
H-2	1.00	8699003	357424	3246	GC
H-3	1.00	8699025	357560	3174	GC
H-4	1.00	8698888	357369	3290	GC
H-5	1.00	8698909	357412	3269	SC
H-6	1.00	8698948	357493	3222	GP-GC
H-7	1.00	8698987	357574	3181	GP-GM
H-8	1.00	8698888	357421	3269	GC
H-10	1.00	8698888	357832	3168	GM
H-11	0.20	8698888	357651	3133	GP-GC
	1.00				Andesita

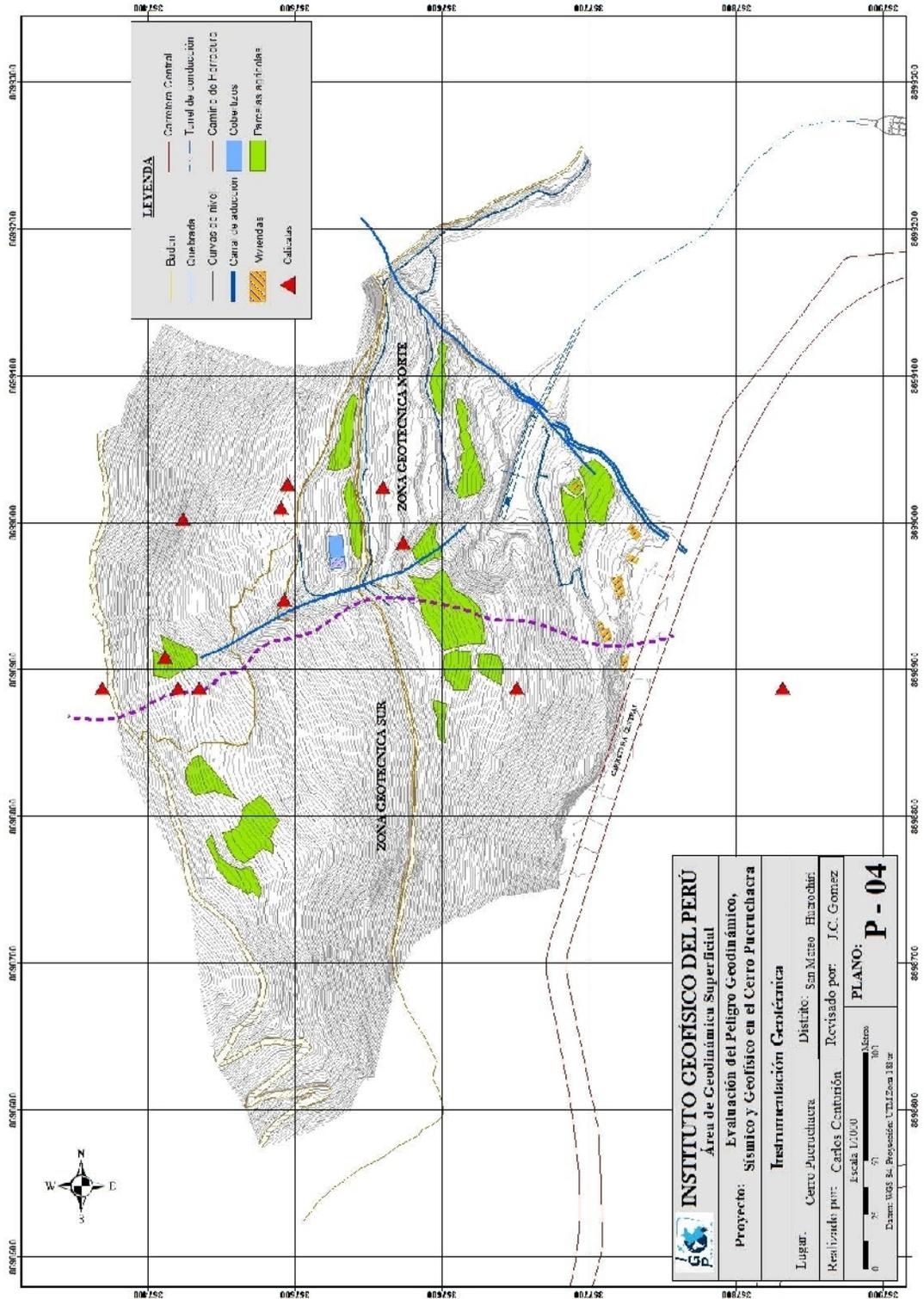


Figura 24: Distribución espacial de las calicatas realizadas por SVS Ingenieros S.A.C. en la ladera del Cerro Pucruchacra.

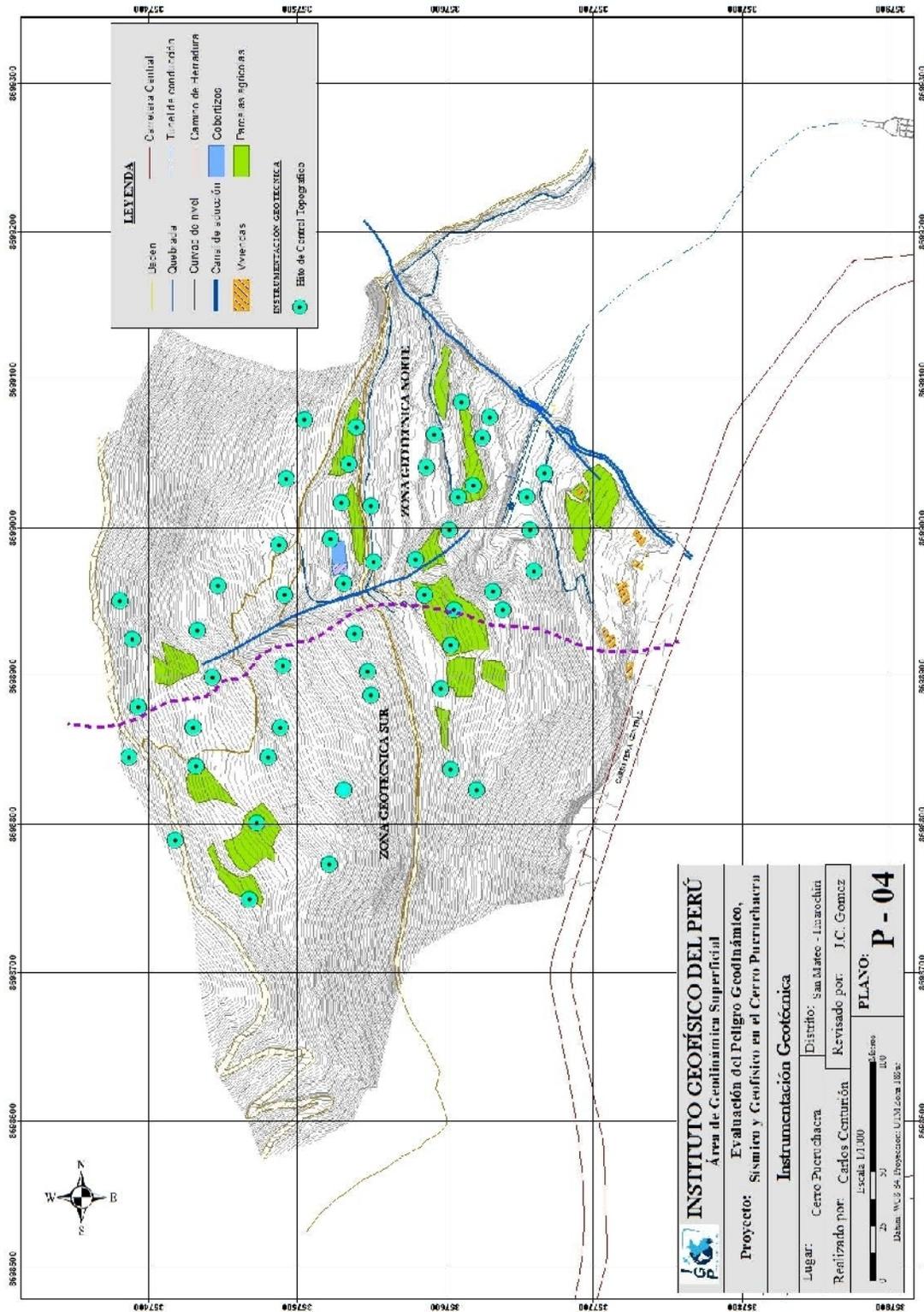


Figura 25: Distribución espacial de 52 hitos de control topográfico realizadas por SVS Ingenieros S.A.C.

- Hitos de control topográfico: Se inventariaron 52 hitos de control topográfico cuyo orden correlativo va de P-1 hasta el P-65 (Figura 26 y Tabla 3). La información corresponde a los meses de agosto y setiembre del presente año, posterior a estos meses, no se dispone de información.

- Estaciones Base: Se ha identificado la existencia de 2 estaciones base de un total de 4 existentes (Figura 27, **Tabla N 4**), las otras dos según, informe de SVS, se ubican en la otra margen del río Rímac. Cabe resaltar que las estaciones Base PB-1 y PB-2 se encuentran instaladas en la zona del deslizamiento (Figura 28) y no en un punto estable, generando la obtención de tasas de movimiento posiblemente erradas, lo cual explicaría las velocidades convergentes mostradas en la Figura 3, sin que se evidencie esta convergencia en el terreno. Para el monitoreo topográfico se ha empleado una Estación Total con Teodolito Modelo GPT-7501 y con precisión angular directa de 1" segundo. Estos puntos están amarrados a los BMS de la Central Hidroeléctrica de Huanchor.

Tabla 3.- Coordenadas GPS de los 52 hitos de control topográfico

N	CODIGO	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN	N	CODIGO	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN
01	P-01	8698952	357381	3303	27	P-27	8699018	357530	3211
02	P-02	8698926	357389	3302	28	P-28	8699044	357535	3214
03	P-03	8698880	357393	3301	29	P-29	8699069	357540	3198
04	P-04	8698846	357387	3306	30	P-31	8698978	357552	3196
05	P-05	8698790	357418	3294	31	P-32	8699016	357550	3207
06	P-06	8698840	357432	3287	32	P-34	8699086	357611	3193
07	P-07	8698866	357430	3279	33	P-35	8699064	357593	3189
08	P-08	8698900	357443	3270	34	P-36	8699042	357587	3191
09	P-09	8698932	357433	3268	35	P-38	8698980	357580	3182
10	P-10	8698962	357447	3270	36	P-39	8698956	357586	3199
11	P-11	8699074	357505	3235	37	P-40	8698946	357606	3202
12	P-12	8699034	357493	3240	38	P-41	8698922	357604	3195
13	P-13	8698990	357488	3246	39	P-42	8698892	357597	3200
14	P-14	8698956	357492	3242	40	P-43	8698838	357604	3240
15	P-15	8698908	357491	3245	41	P-45	8698824	357621	3184
16	P-16	8698866	357489	3242	42	P-48	8698946	357639	3176
17	P-17	8698846	357481	3267	43	P-49	8698958	357632	3187
18	P-18	8698802	357473	3269	44	P-51	8699000	357603	3196
19	P-19	8698750	357468	3294	45	P-52	8699022	357609	3196
20	P-20	8698774	357522	3268	46	P-53	8699030	357619	3188
21	P-21	8698824	357532	3251	47	P-54	8699062	357625	3178
22	P-22	8698888	357550	3240	48	P-55	8699076	357630	3175
23	P-23	8698904	357548	3222	49	P-62	8698972	357660	3153
24	P-24	8698930	357539	3224	50	P-63	8699000	357657	3146
25	P-25	8698964	357532	3221	51	P-64	8699022	357655	3159
26	P-26	8698994	357523	3210	52	P-65	8699038	357667	3151



Figura 26: Hito de control topográfico reconstruido en la zona de cobertizos.

Tabla 4: Coordenadas GPS de 4 hitos de base de observación

NOMBRE	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN
PB - 1	8698774 m	357497 m	3277 m.s.n.m.
PB - 2	8699085 m	357454 m	3271 m.s.n.m.
PB - 3	8699056 m	358205 m	3268 m.s.n.m.
PB - 4	8698820 m	358275 m	3278 m.s.n.m.

.-Puntos de control extensométrico: Esta técnica de monitoreo se utiliza para medir las dimensiones de las aberturas superficiales del terreno y el desnivel que experimentan las grietas ubicadas en toda la ladera del Cerro Pucruchacra. En las dos zonas geotécnicas (Norte y Sur), en donde la ladera del Cerro Pucruchacra está siendo afectada por agrietamientos del suelo que forman parte del proceso de activación de los deslizamientos, SVS ha colocado hitos para monitorear las deformaciones del terreno mediante el uso de extensómetros de cinta (Tabla 5, Figuras 29 y 31) y lecturas manuales a través de un reloj indicador. Los puntos de control son medidos con flexómetros (Tabla 6), tal como se observa en las Figuras 30 y 32.

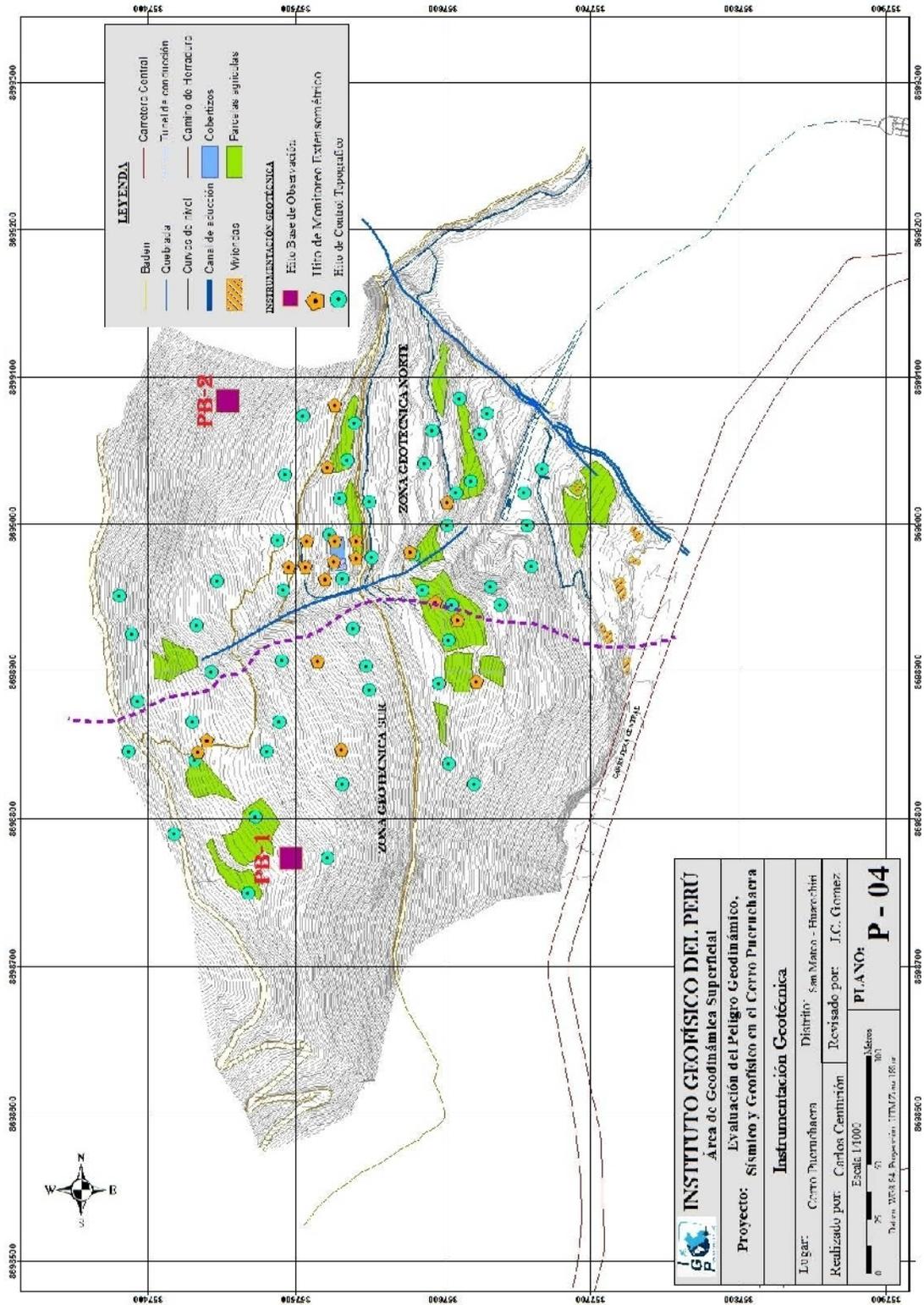


Figura 27: Distribución espacial de los 2 hitos permanentes de observación, SVS Ingenieros S.A.C.



Figura 28: Hito estación base PB-1 ubicado en la zona geotécnica sur.

Tabla 5.- Coordenadas GPS de los puntos de monitoreo extensométrico con cinta, zona geotecnica Sur.

N°	CODIGO	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN	N°	CODIGO	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN
01	04	8698854	357440	3282	11	21	8699082	357527	3236
02	08	8698972	357496	3228	12	23	8698990	357541	3206
03	13	8698848	357531	3238	13	24	8698978	357541	3207
04	14	8698908	357515	3238	14	26	8698936	357610	3198
05	15	8698964	357520	3229	15	27	8698948	357595	3200
06	16	8698972	357507	3231	16	28	8698894	357623	3190
07	17	8698990	357508	3230	17	29	8698982	357578	3181
08	18	8698976	357526	3226	18	30	8699016	357603	3197
09	19	8698990	357527	3225	19	S/N 01	8698846	357434	3284
10	20	8699040	357522	3235	20	C-5	8698990	357522	3224

Tabla 6: Coordenadas GPS de los puntos de control extensométrico con flexómetro. Distribuidas mayormente en toda la Zona geotécnica Sur.

N°	CODIGO	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN	N°	CODIGO	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN
01	E-04	8699054	357518	3231	16	E-20	8698818	357573	3241
02	E-05	8699046	357520	3232	17	E-21	8698834	357602	3198
03	E-06	8698990	357527	3225	18	E-22	8698818	357595	3203
04	E-07	8698978	357519	3227	19	E-23	8698900	357576	3197
05	E-08	8698964	357520	3229	20	E-24	8698914	357573	3219
06	E-09	8698926	357520	3234	21	E-25	8698924	357582	3208
07	E-10	8698908	357483	3238	22	E-26	8698922	357581	3209
08	E-11	8698908	357483	3238	23	E-27	8698918	357617	3195
09	E-13	8698834	357453	3285	24	E-28	8698920	357625	3186
10	E-14	8698798	357510	3259	25	E-29	8698942	357625	3177
11	E-15	8698812	357505	3269	26	E-30	8698946	357578	3204
12	E-16	8698844	357490	3257	27	E-S.N° 1	8698872	357418	3289
13	E-17	8698846	357498	3252	28	E-S.N° 2	8698850	357436	3286
14	E-18	8698826	357515	3259	29	E-S.N° 3	8698894	357449	3269
15	E-19	8698844	357509	3258	30	E-S.N° 4	8698882	357458	3268

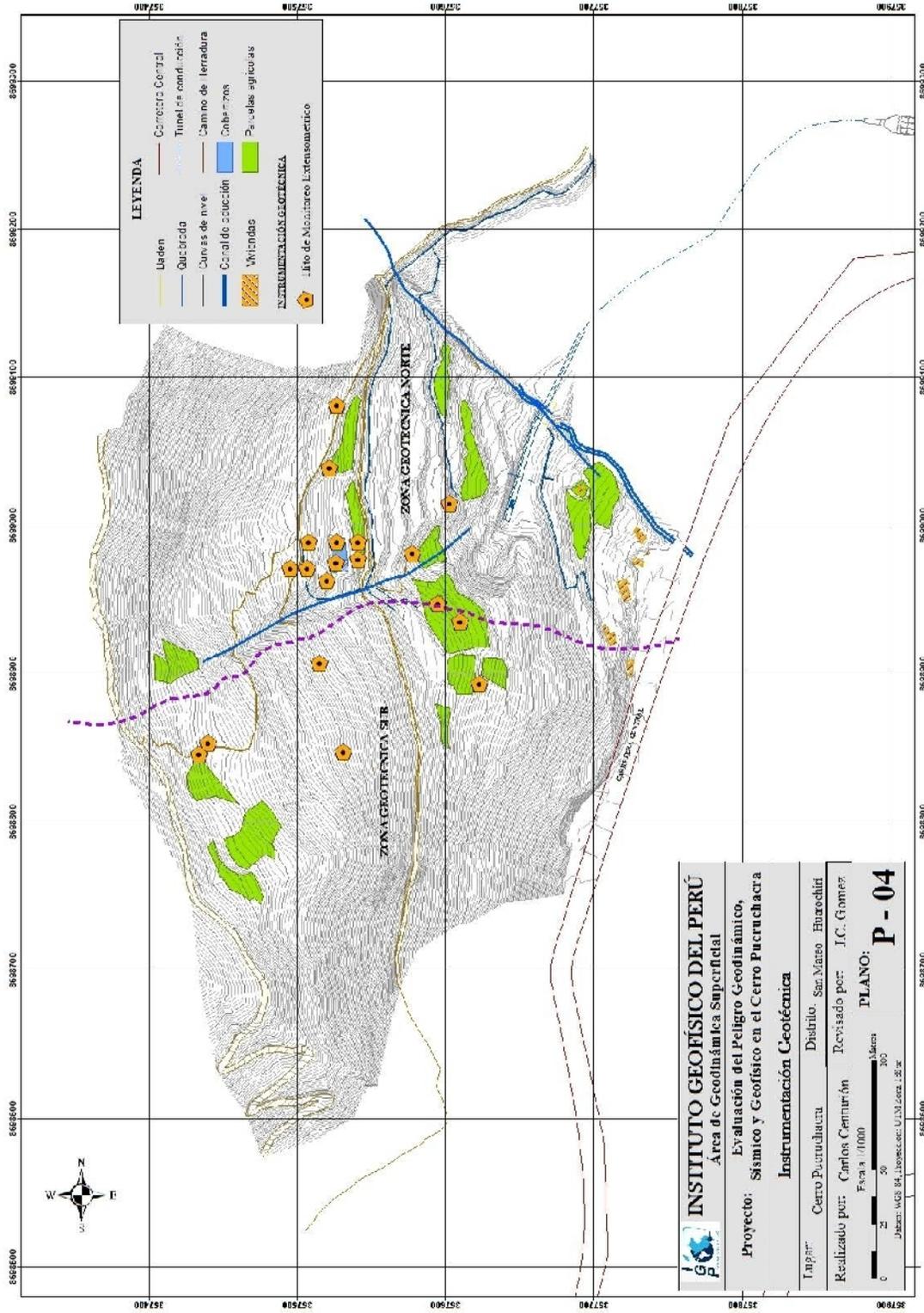


Figura 29.- Distribución espacial de los 19 puntos de monitoreo extensométrico con cinta realizadas por SVS Ingenieros S.A.C.

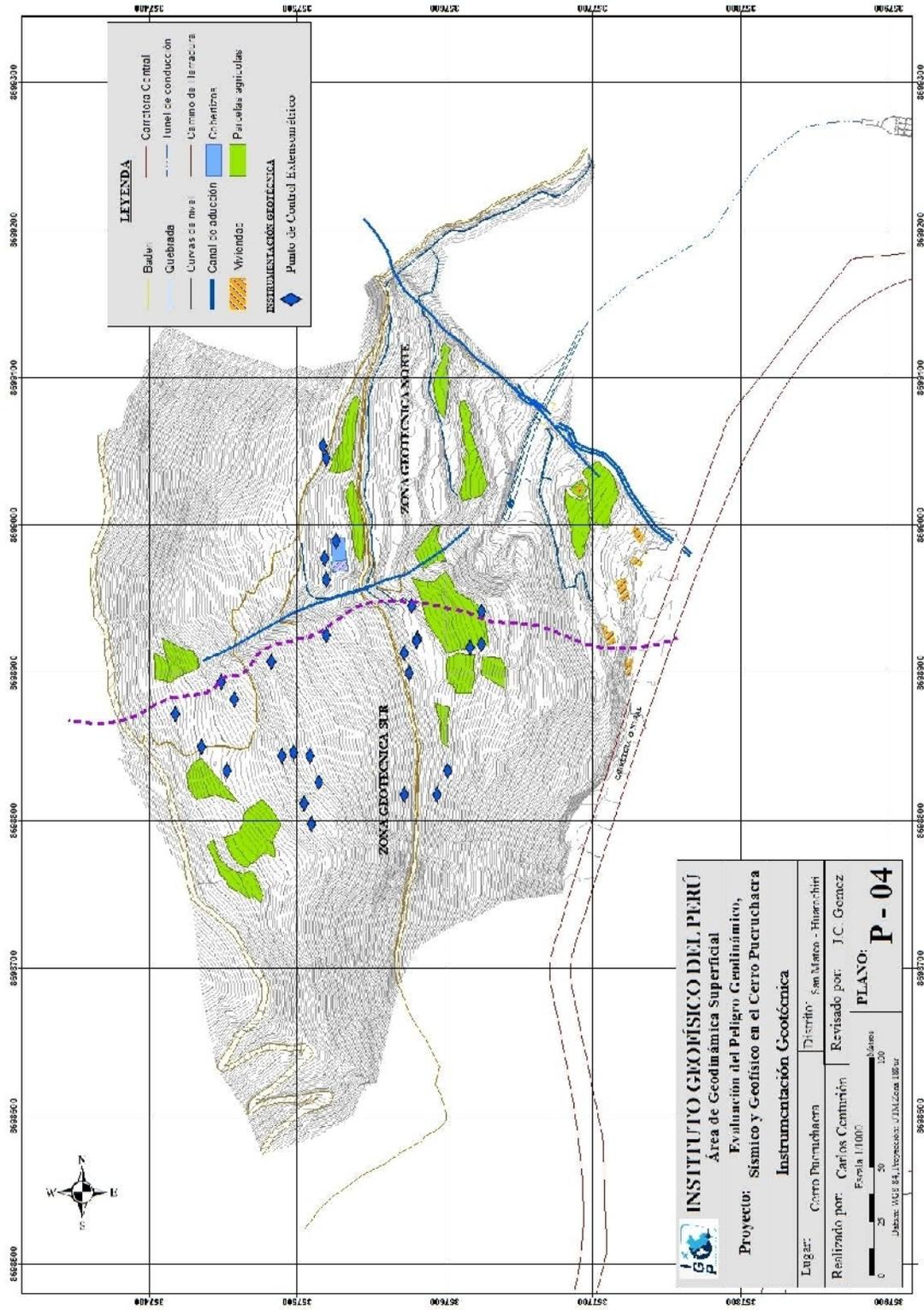


Figura 30: Distribución espacial de los puntos de control extensométrico con flexómetro realizada por SVS Ingenieros S.A.C.



Figura 31.- Hito de monitoreo con extensómetro de cinta

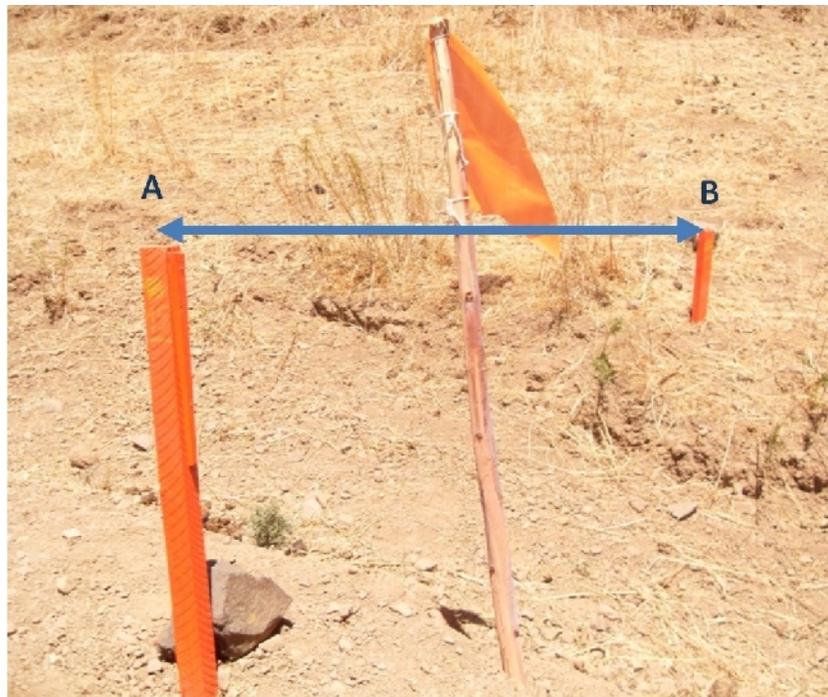


Figura 32: Punto de monitoreo de apertura de agrietamientos con flexómetros de cinta

A la fecha de conclusión del presente informe, no se dispone de la información recolectada con estos métodos para su análisis y evaluación.

5.- SISMOLOGIA

Para la evaluación del peligro sísmico del Cerro Pucruyacra, se ha utilizado dos metodologías que en conjunto permitirán conocer el nivel de sismicidad que pudiera afectar al área de estudio. Estos métodos son los probabilísticos y el de monitoreo sísmico, los mismos que ha permitido obtener los resultados que se presentan a continuación.

5.1.- Peligro Sísmico

El peligro sísmico, que en un futuro se espera en un determinado lugar, puede ser conocido utilizando métodos probabilísticos y para ello, se hace uso del procedimiento desarrollado por Cornell (1968) para estimar, en términos de probabilidad, la severidad sísmica con la cual podría ser sacudida un área en un determinado lapso de tiempo. Este parámetro puede ser expresado en valores de diversos parámetros de diseño como aceleraciones, velocidad o desplazamiento. Para estimar la aceleración con esta metodología se hace uso de la siguiente información:

.- El catálogo sísmico del Perú para el periodo 1964 a 2011, con sus parámetros hipocentrales homogeneizados a la magnitud momento (Mw).

.- Los parámetros sismológicos estimados por el Instituto Geofísico del Perú para las diversas fuentes sismogénicas identificadas, curvas de recurrencia sísmica y parámetros de fuente a ser introducidos al algoritmo de calculo probabilístico.

.- Las leyes de atenuación propuestas por Young et al (1997) para sismos debidos a la convergencia de placas (proceso de subducción) y de Sadigh et al (1997), para sismos de tipo cortical. En la actualidad estas leyes de atenuación vienen siendo utilizadas en Perú en razón que proporcionan resultados razonables desde el punto de vista sismotectónico.

.- El algoritmo CRISIS-2007 (Ordaz et al, 2007) para conocer la probabilidad de ocurrencia de determinados niveles de aceleración pico y cuyo periodo de retorno corresponde simplemente el inverso de la probabilidad anual.

Para el Cerro Pucruchacra (11.7665°S y 76.30759°O), las aceleraciones probabilísticas fueron determinadas para los periodos de 10, 30, 50, 100, 500 y 1000 años de periodo de retorno y sus valores se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Aceleraciones PGA probabilísticas para el Cerro Pucruchacra

Periodo de Retorno en Años	Aceleración Máxima Esperada en "gals"(cm/seg ²)
10	68.3
30	89.6
50	125.1
100	177.7
500	299.3
1000	384.7

Estos resultados sugieren que es posible, desde el punto de vista probabilístico, que en un futuro pueda ocurrir un sismo con una magnitud tal, que podría generar altos niveles de sacudimiento del suelo o capas superficiales del Cerro Pucruchacra. Sismos con una aceleración de 125.1 cm/seg² (intensidad ~ IV-V (MM)) tienen periodos de retorno de 50 años.

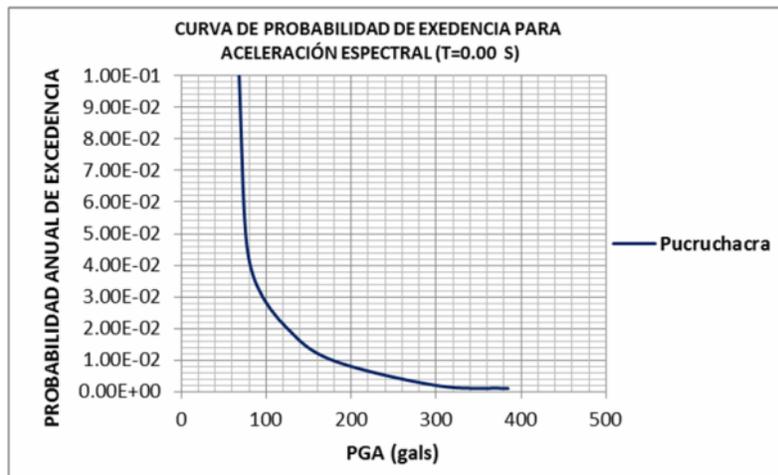


Figura 33: Peligro de excedencia anual para el área del Cerro Pucruchacra

Según la Figura 33, la probabilidad de que un cierto año se exceda una aceleración de 125.1 cm/seg² es de 0.02. Alternativamente, el periodo de recurrencia de sismos que igual o exceden esta aceleración es de 50 años.

5.2.- Monitoreo Sísmico

Para el monitoreo sísmico del Cerro Pucruchacra, se ha hecho uso de 6 estaciones sísmicas de banda ancha con registro en velocidad a fin de registrar los eventos sísmicos que puedan tener su origen en las fallas geológicas presentes entorno al área de estudio. Según la Figura 34, las estaciones fueron instaladas cubriendo el área de estudio a fin de lograr una aceptable cobertura azimutal. En el punto codificado como CPT (Figura 35), además de una estación sísmica se ha considerado otra de aceleración de alta resolución a fin de registrar actividad microsísmica.

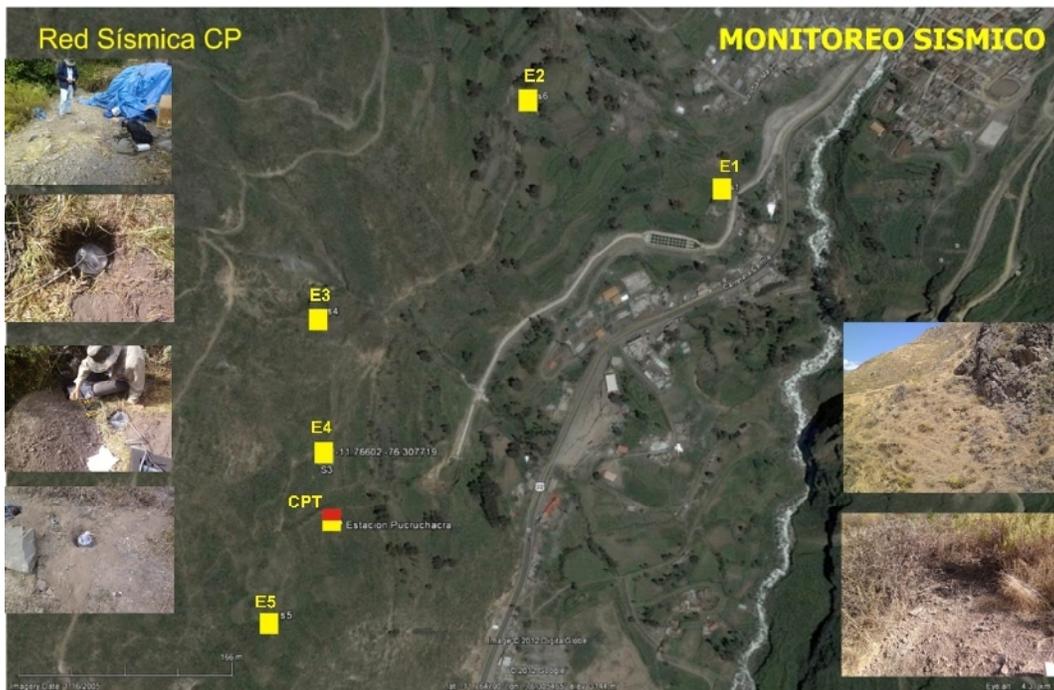


Figura 34: Distribución espacial de las estaciones sísmicas que integraron la red sísmica temporal del Cerro Pucruchacra.

La red sísmica temporal funcionó durante un periodo de 2 meses (Julio y Setiembre-2012), tiempo durante el cual registró un total de 92 eventos sísmicos de carácter local, todos con focos ubicados a profundidades menores a 20 km y magnitudes de hasta 2.2ML; por lo tanto, no fueron percibidos por las personas ni causaron efectos secundarios en la morfología del área de estudio.

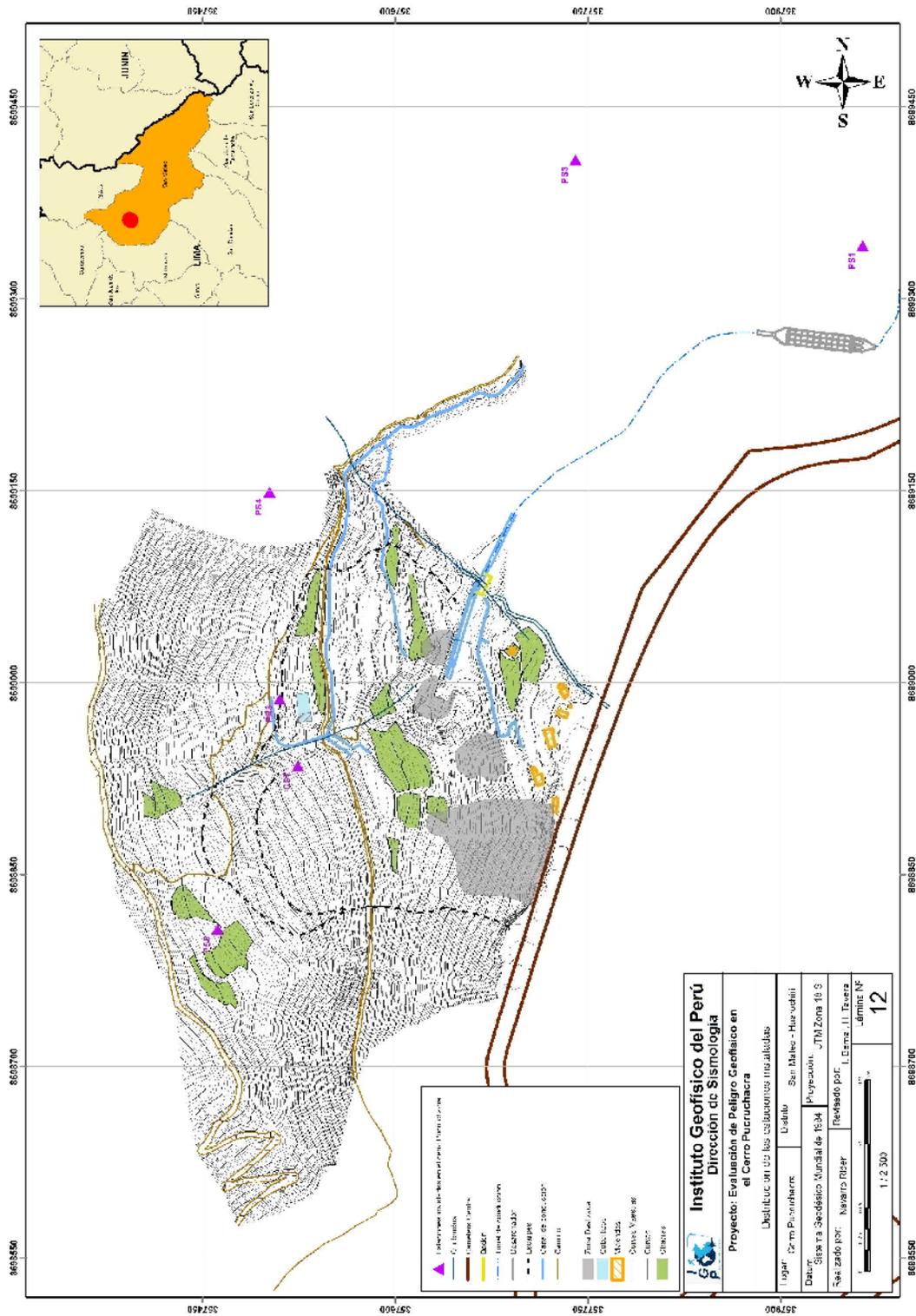


Figura 35: Red temporal de estaciones sísmicas en el Cerro Pucruchacra.

En la Figura 36 se presenta como ejemplo el registro de 3 eventos sísmicos en sus tres componentes. Estos microsismos presentaron magnitudes entre 1.2 y 1.8 ML; por lo tanto, no fueron percibidos por la población aledaña al área de estudio. En estos registros se observa que las formas de ondas de todos los eventos sísmicos son similares, lo cual sugiere que todos provienen de la misma fuente. De acuerdo a la diferencia de tiempos entre los registros de las ondas P y S, se estima una distancia epicentro-estación del orden de 10-15 km. Del mismo modo, en la figura se presenta los registros de los mismos sismos pero en términos de aceleración del suelo, habiéndose registrado aceleraciones del orden de 1.5 cm/seg², los cuales representaron ser mínimos para producir efectos secundarios en superficie.

En la Figura 37 se presenta el mapa de distribución espacial de la sismicidad local y la ubicación de las principales trazas de fallas geológicas identificadas en el área de estudio (INGEMMET, 2012). Obsérvese que los epicentros de los microsismos registrados se concentran básicamente entorno a una traza de la falla de tipo normal de 30 km de longitud (en dirección NO-SE) a la que llamaremos “falla Pucruchaca”. Esta traza de falla se ubica en el extremo sur-oeste del Cerro Pucruchacra a una distancia de 8 km del área de estudio; es decir, lo suficiente como para dar origen a sismos que puedan originar posibles procesos dinámicos con la ocurrencia de sismos de magnitudes moderadas.

Por otro lado, durante el mes de Julio de 2012, el Instituto Geofísico del Perú informó la ocurrencia de hasta 4 eventos sísmicos sensibles en la localidad de San Mateo con intensidades de III (MM) y epicentros ubicados entorno a la falla Pucruchacra (Tabla 8). Los epicentros de estos eventos son mostrados con estrellas en la Figura 37, todos con magnitudes del orden de 4.1 ML; es decir, lo suficiente como para acelerar la ocurrencia de posibles procesos dinámicos sobre la morfología del Cerro Pucruchaca. Estos eventos ocurrieron previos a la instalación de la red sísmica temporal en el área de estudio; por lo tanto, se desconoce los niveles de sacudimiento del suelo in situ, pero la estimación a partir del valor de intensidad reportado indica que pudieron haberse registrado aceleraciones del orden de 5.0 cm/seg². Todos estos sismos presentaron sus focos a profundidades menores a 20 km, a excepción del ocurrido el 28 de setiembre con una magnitud de 4.4ML, que presentó su foco a una profundidad de 99 km.

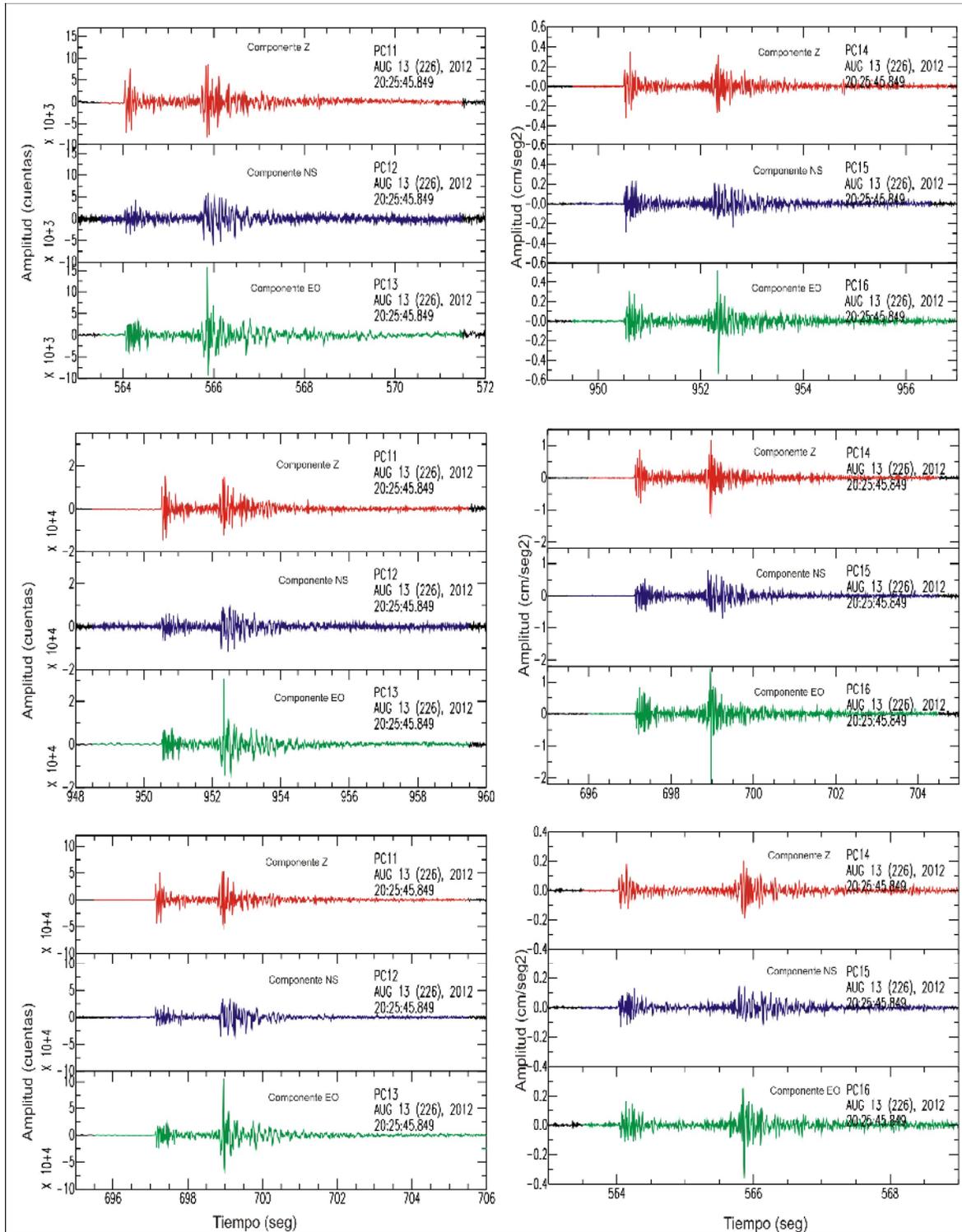


Figura 36: Registros en velocidad y aceleración correspondiente a tres eventos microsísmicos ocurridos entorno al Cerro Pucruchacra.

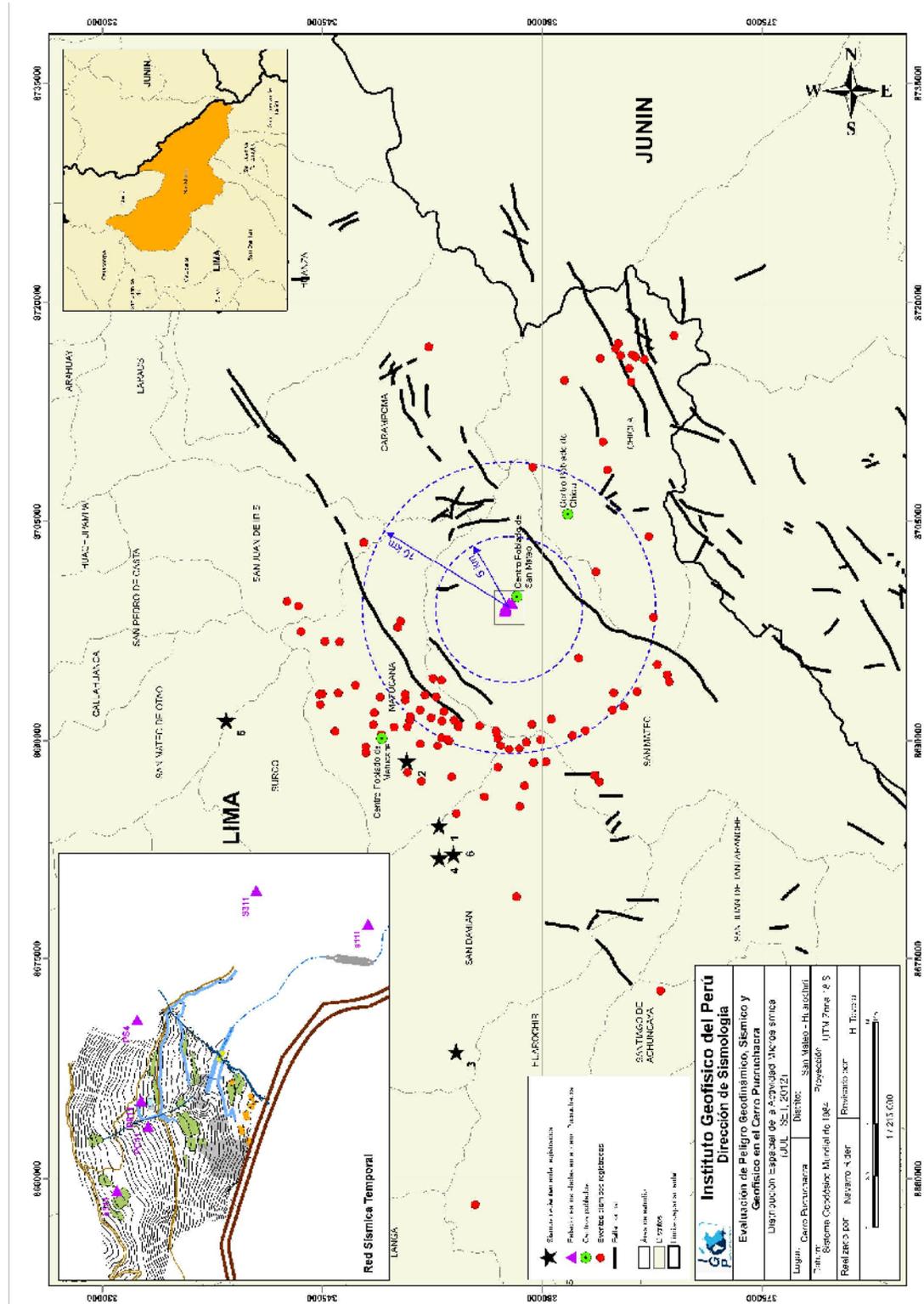


Figura 37: Mapa de distribución espacial de los microsismos registrados por la red sísmica local del Cerro Pucruchaca.

Tabla 8. Parámetros hipocentrales de sismos sensibles ocurridos entorno al Cerro Pucruyacra.
Los números corresponden a la Figura 37

Fecha aa.mm.dd	T. Origen hh:mm	Latitud/Longitud (grados)	Magnitud (ML)	Prof	Intensidad (MM)	N°
2012/07/06	18:59	-11.90 / -76.35	4.1	22	III San Mateo	1
2012/07/06	22:59	-11.87 / -76.37	4.0	24	III San Mateo	2
2012/07/14	08:09	-12.04 / -76.34	3.9	15	II San Mateo	3
2012/09/10	00:04	-11.92 / -76.35	3.7	22	II San Mateo	4
2012/09/28	04:39	-11.83 / -76.48	4.4	99	III San mateo	5
2012/10/23	13:59	-11.90 / -76.34	3.8	17	II San Mateo	6

Durante el periodo de operatividad de la estación de aceleración, se registraron dos eventos sísmicos reportados como sensibles los días 10 de setiembre y 23 de octubre, ambos con magnitudes de 3.7 y 3.8 ML (Figura 38). Estos eventos presentaron sus focos a profundidades de 22 y 17 km, estando sus epicentros ubicados a 17 km en dirección SE con respecto al área de estudio. Las aceleraciones registradas fueron de 7 y 13 cm/seg²; es decir, no suficientes como para producir cambios geomorfológicos en la ladera del Cerro Pucruyacra.

Como conclusiones se puede establecer que la falla Pucruyacra se encuentra activa dando origen a microsismos y sismos con magnitudes de hasta 4.5ML, lo suficiente para iniciar cualquier proceso geodinámico en el Cerro Pucruyacra. Por otro lado, también es frecuente en la región central del Perú, la ocurrencia de sismos de foco intermedio (~100 km) con magnitudes de 4.0 a 5.0 ML que producen intensidades del orden de III-IV (MM) en la localidad de San Mateo y otras circundantes, pudiendo contribuir al desarrollo de procesos geodinámicos en superficie.

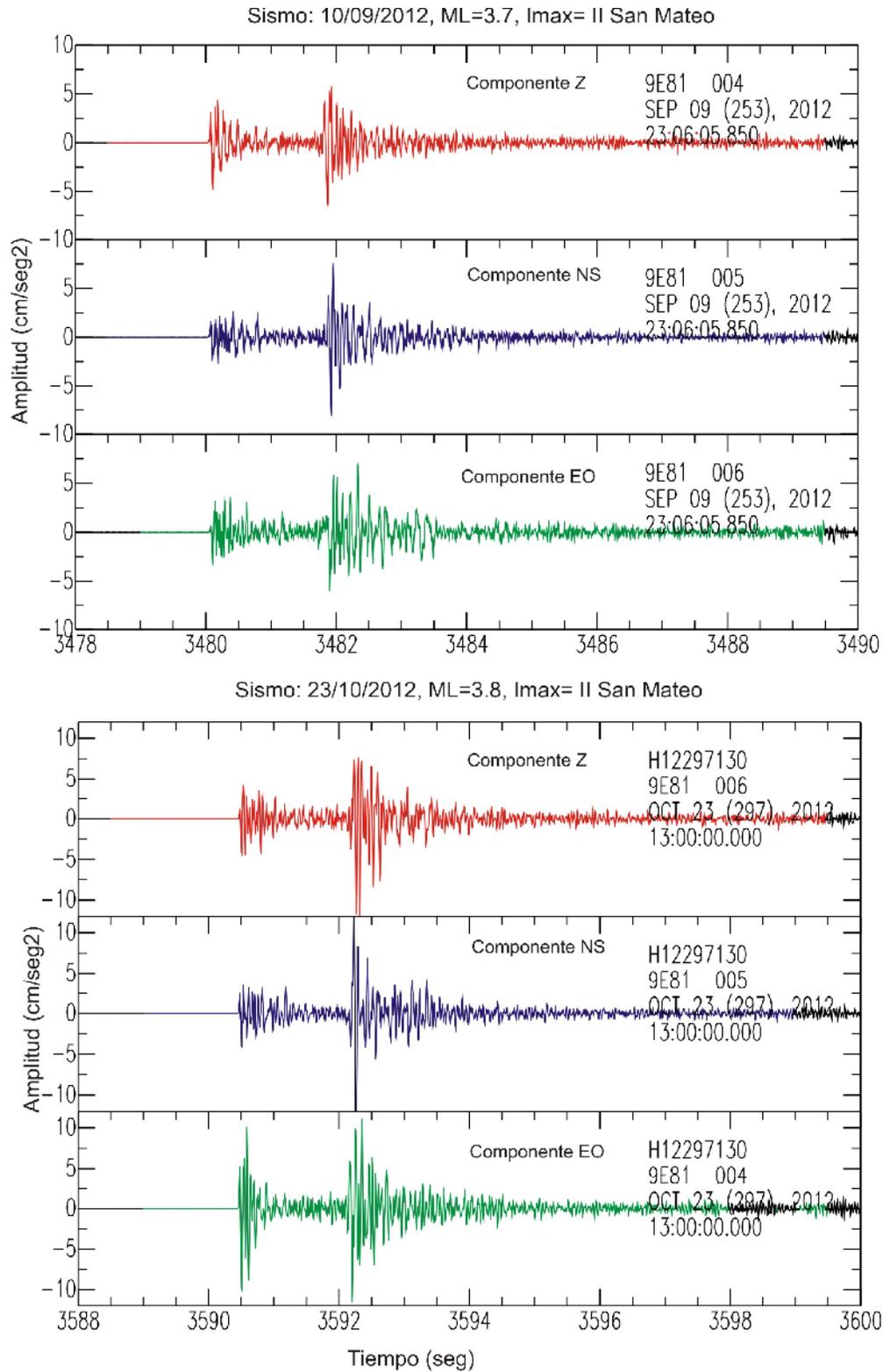


Figura 38: Mapa de distribución espacial de los microsismos registrados por la red sísmica local del Cerro Pucruchacra.

6.- GEOFISICA

Para realizar la evaluación de la estabilidad del Cerro Pucruchacra, se ha utilizado diversas metodologías que en conjunto permitieron conocer el comportamiento dinámico del mismo y la situación física de todas las estructuras que lo conforma, principalmente su geomorfología.

6.1.- Método de H/V

La técnica de H/V o razones espectrales, permite determinar la frecuencia predominante del suelo de manera puntual considerando como hipótesis de base, que las vibraciones ambientales (VA) se deben principalmente a la excitación de las ondas Rayleigh en las capas superficiales debidas a la actividad humana y medio natural. La información recolectada y su interpretación, permiten conocer la frecuencia predominante del suelo y por ende, su periodo natural de vibración, parámetro que define el espesor del sedimento y el comportamiento dinámico del suelo ante la ocurrencia de un evento sísmico y/o fuerzas dinámicas.



Figura 39: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibración ambiental: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

El registro de señales de VA se ha obtenido de manera puntual siguiendo una malla de puntos construida de acuerdo a la geomorfología del área de estudio. Para tal objetivo, se ha hecho uso de sismómetros de tres componentes ortogonales (vertical, Norte-Sur, Este-Oeste) Marca Lennarzt, Modelo LE-3D/5s con un rango dinámico de 140Db y banda de frecuencias que fluctúa entre 0.2 y 40 Hz. El registrador es de Marca LEAS (Modelo City Shark II), el cual registra a 200 muestras/segundo (Figura 39). El equipo sísmico permite visualizar la información registrada en cada punto,

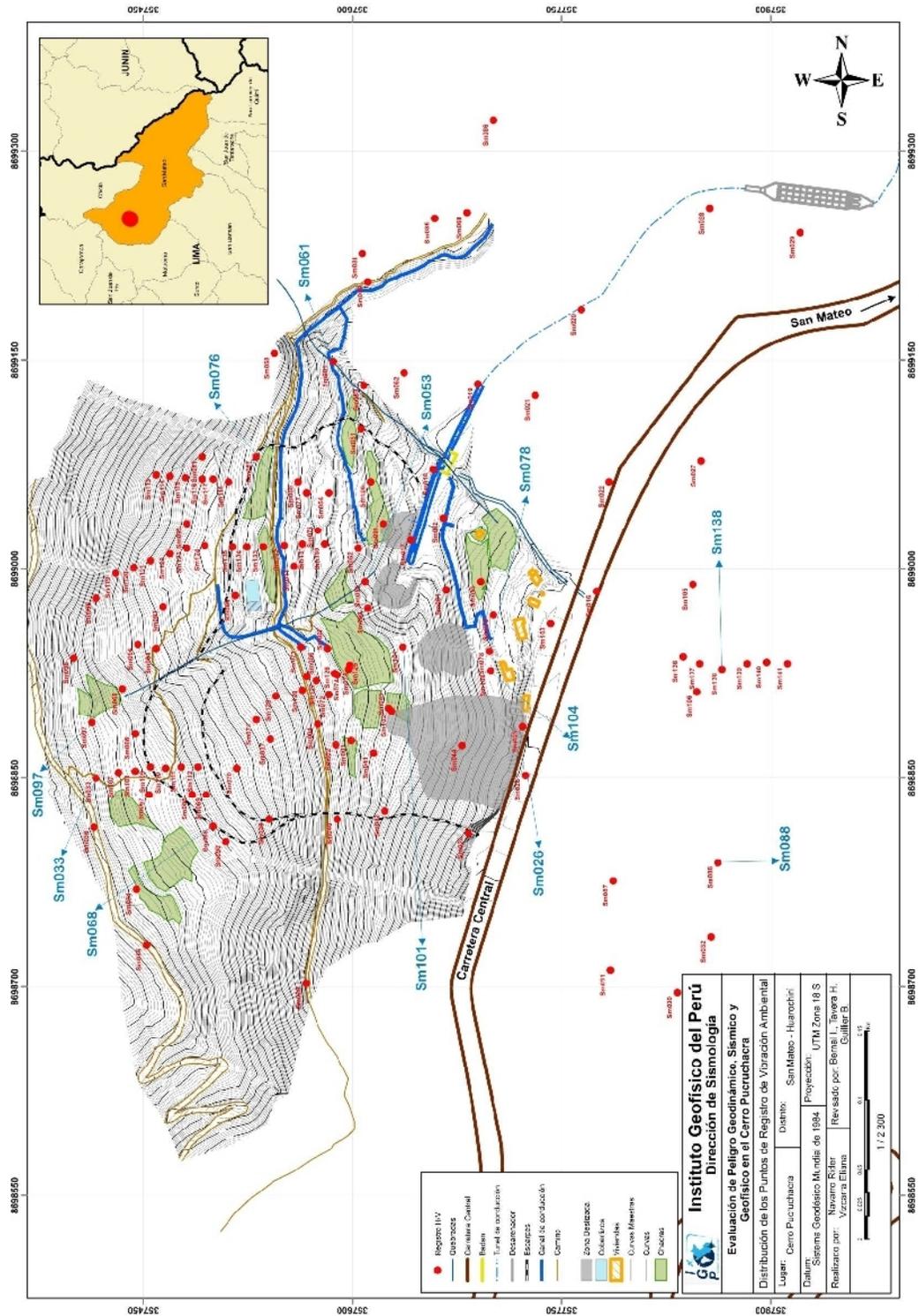


Figura 40: Mapa del Cerro de Pucruchacra y distribución de puntos donde se registró señales de vibración ambiental (ver Anexo)

de esa manera se evalúa la calidad del dato y de presentar alguna perturbación y/o alteración, se procede a obtener un nuevo registro. Para la obtención de la data se consideró un tiempo de registro de 15 minutos y la posición del punto fue controlado por un GPS.

De acuerdo a la geología, morfología y accesibilidad al área de estudio, se ha considerado la toma de datos de VA en un total de 124 puntos distribuidos de tal manera, que permitieron muestrear toda el área de intervención, ver Figura 40. En la Figura 41, se muestra la disposición del equipo sísmico al momento de la toma de datos, así como un ejemplo de la señal de VA registrada en dos puntos de observación, roca y sedimento.

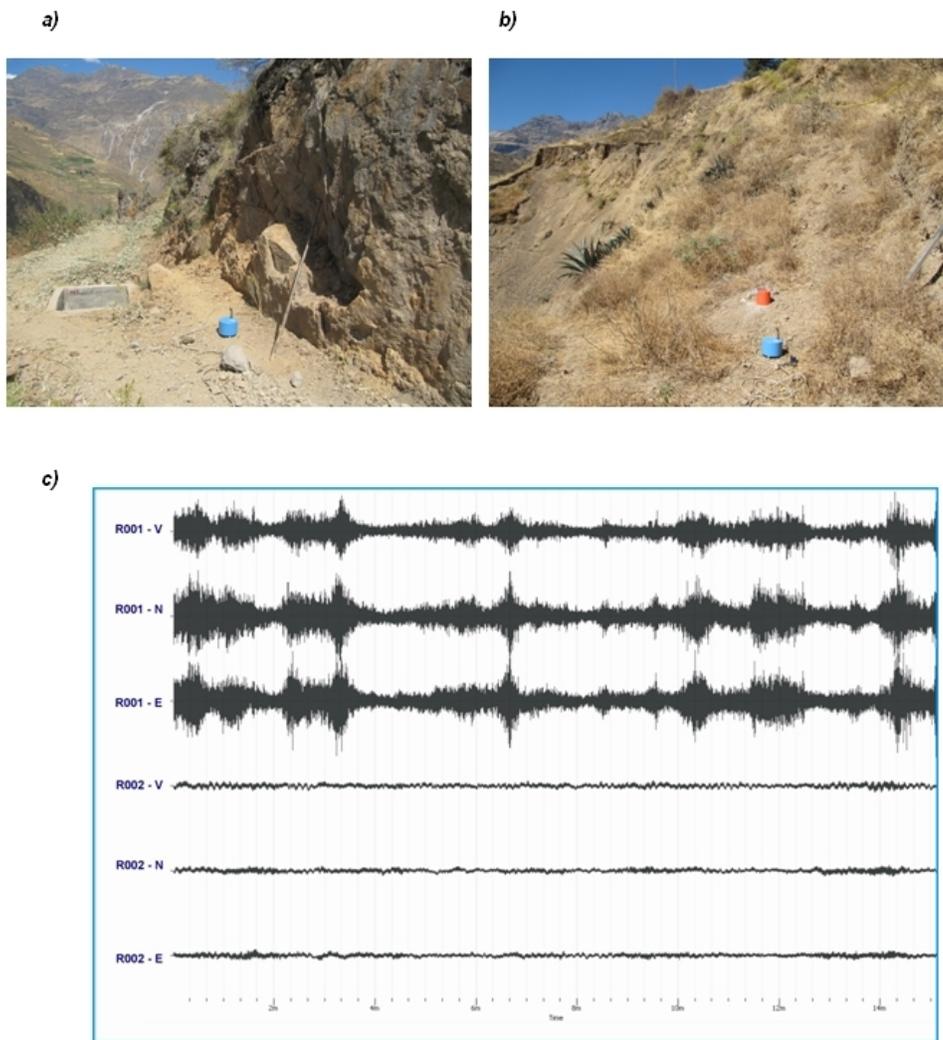


Figura 41: (a,b), Imágenes de la disposición del equipo sísmico para el registro de VA. (c), ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre una zona inestable y en roca. Obsérvese las diferentes amplitudes registradas en cada punto.

Obtenida y analizada el total de la información, se procedió a seleccionar varias ventanas de 25 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo a fin de construir sus razones espectrales (H/V) y su respectivo espectrograma para evaluar la variación azimutal de la amplitud de la energía en diferentes rangos de frecuencias. Con la información de cada punto se construye igual número de fichas a fin de correlacionar los datos e integrarla a una base de datos. Un ejemplo de las fichas elaboradas se puede ver en la Figura 42.

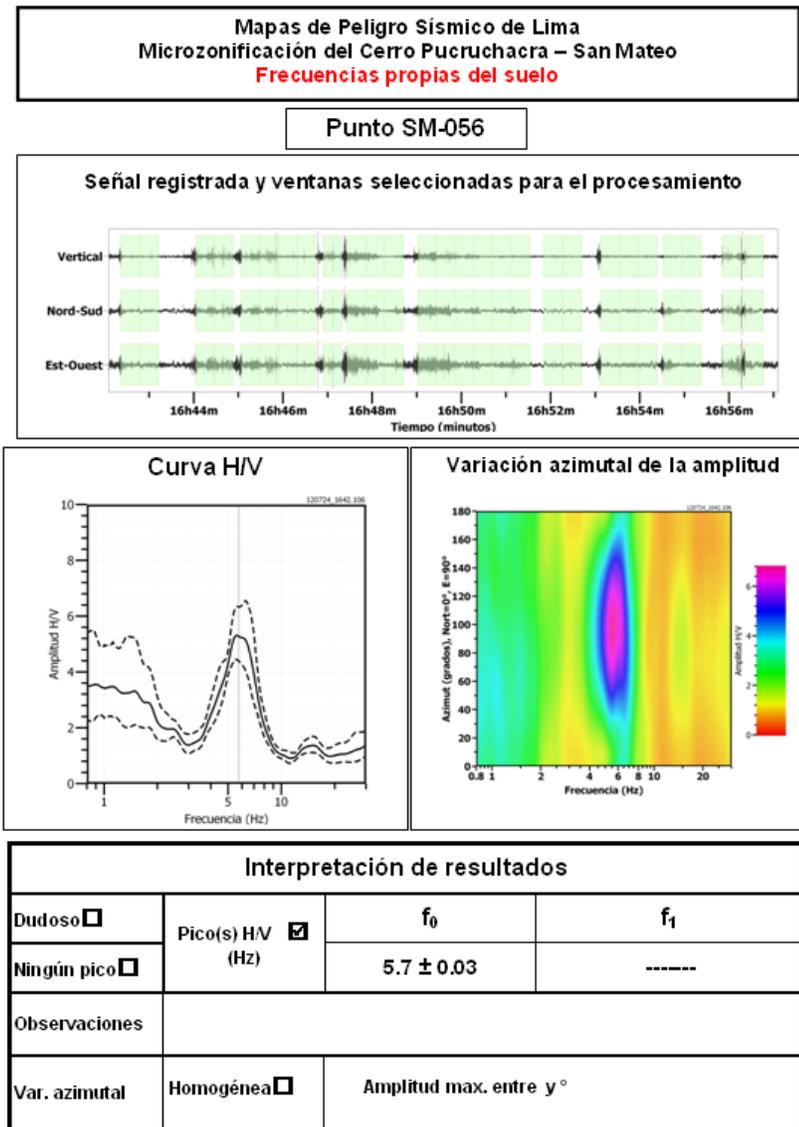


Figura 42: Ejemplo de la ficha H/V en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; espectro H/V en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

A partir de los valores de razones espectrales H/V, se obtiene el mapa de distribución espacial de frecuencias predominantes, tal como se observa en la Figura 43. El análisis de esta información ha permitido diferenciar la presencia de cuatro áreas en donde las frecuencias presentan valores homogéneos. Las principales características de cada una de las áreas se describen a continuación:

Área A1: Predominan frecuencias que fluctúan entre 5.0 y 7.0 Hz (ver Figura 44) y su distribución espacial muestra valores que se incrementan progresivamente conforme se tiende hacia sus extremos Norte y Oeste, lo cual sugiere variaciones en el espesor de la capa sedimentaria. En ambas direcciones, en los puntos más extremos, no se identifica frecuencias predominantes. En superficie, sobre el Túnel de aducción, sobresalen frecuencias que fluctúan alrededor de 5 Hz, lo que indica que la capa sedimentaria tiene mayor espesor con respecto al resto de esta zona.

Área A2: Predominan frecuencias que varían entre 4.0 y 6.0 Hz (ver Figura 45), observándose que hacia el extremo sur del área, los valores de frecuencias se incrementan rápidamente hasta alcanzar los 12 Hz; mientras que, en su extremo Este los valores se encuentran en 5 Hz. En superficie, sobre la proyección del Túnel (enterrado), sobresalen frecuencias que fluctúan alrededor de 4 Hz y sobre la zona donde se produjo el deslizamiento de agosto-2011, las frecuencias son de 5.7 Hz.

Área A3: Considera siete puntos de medición y el ubicado sobre la quebrada de Pucruchacra - al ingreso del túnel de aducción, tiene valores de 6.0 Hz; mientras que, en dirección SE los valores son de 4.0 Hz. El resto de puntos no presentan valores para las frecuencias predominantes (ver Figura 46), lo que sugiere que el suelo bajo estos puntos es compacto.

Área A4: Predominan frecuencias que varían entre 2.0 y 4.0 Hz (ver Figura 47), estando los valores de 2Hz en la zona céntrica del área para incrementarse de manera progresiva hacia su extremo sur.

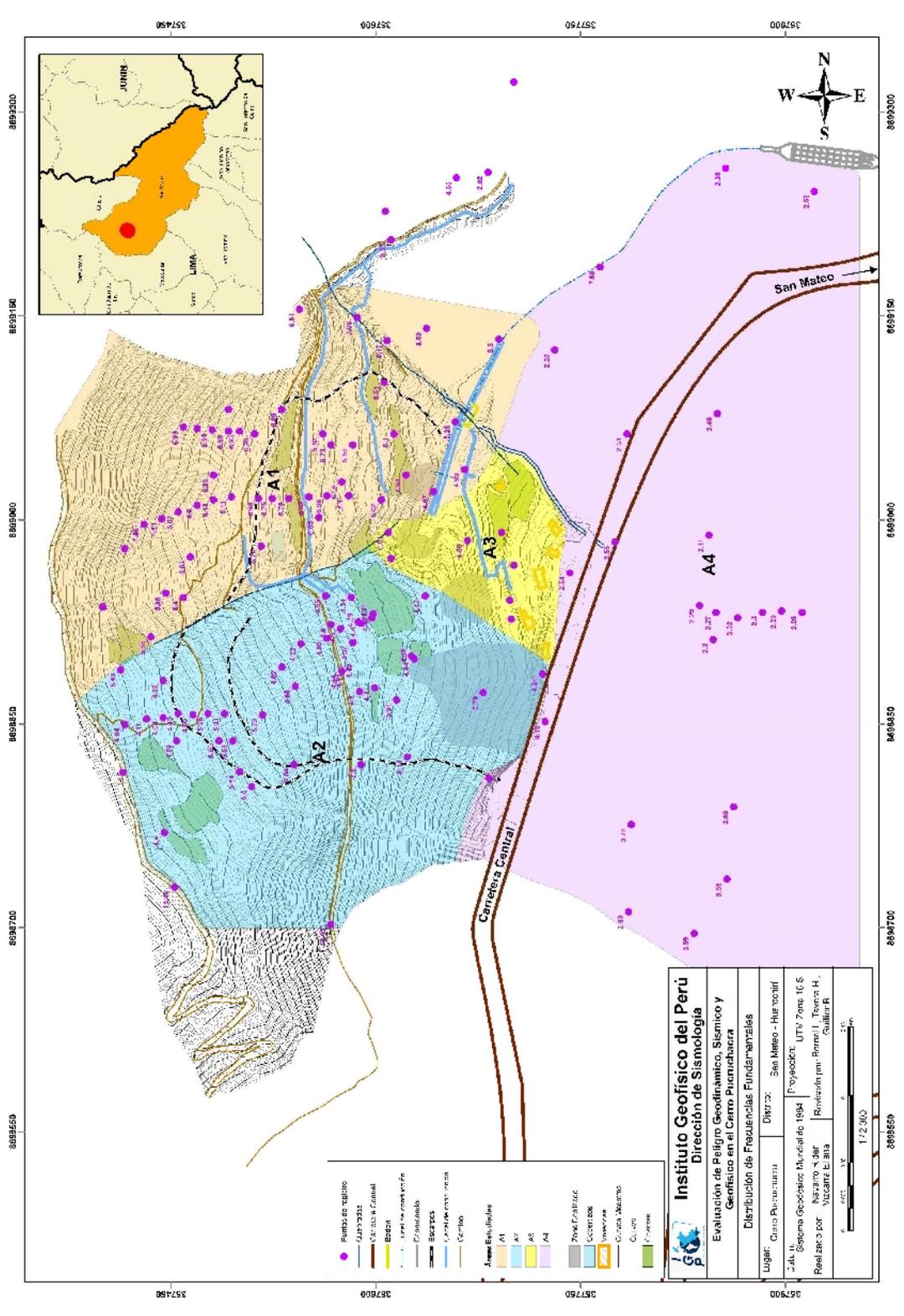
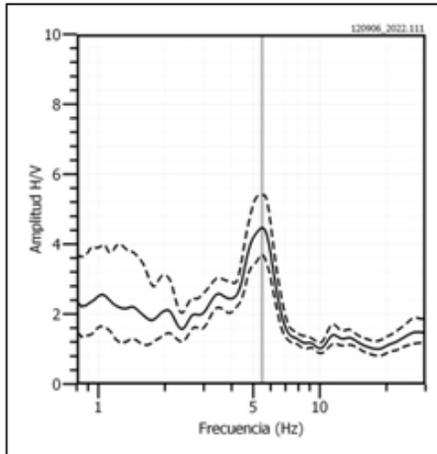
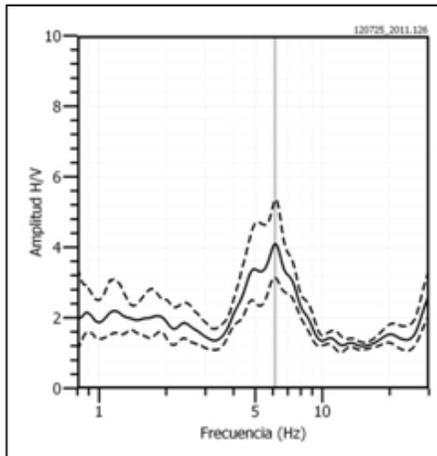


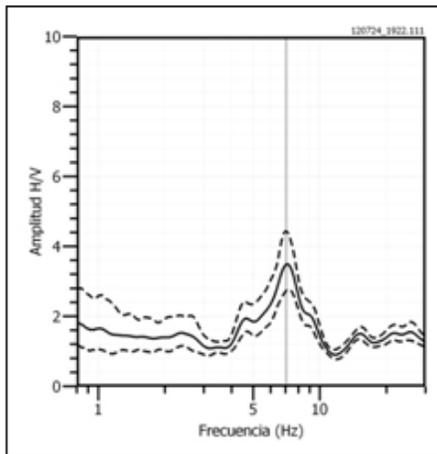
Figura 43: Mapa del área de estudio y distribución de frecuencias predominantes. Los colores delimitan las áreas donde las frecuencias presentan valores similares (ver Anexo)



SM - 097



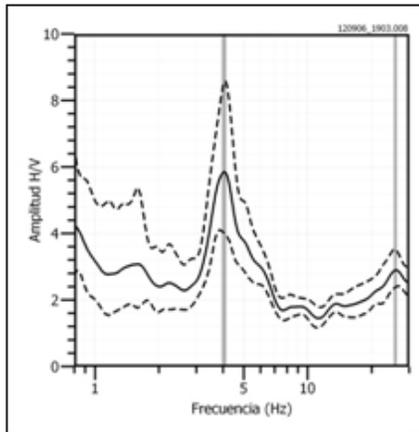
SM - 076



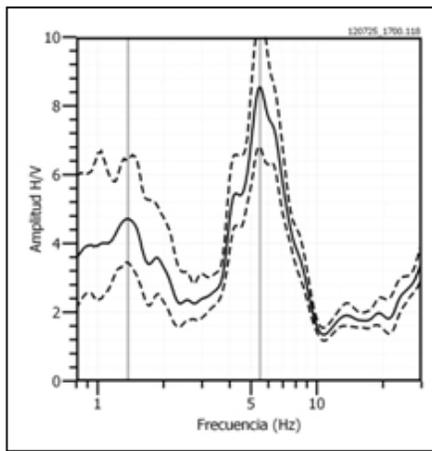
SM - 061



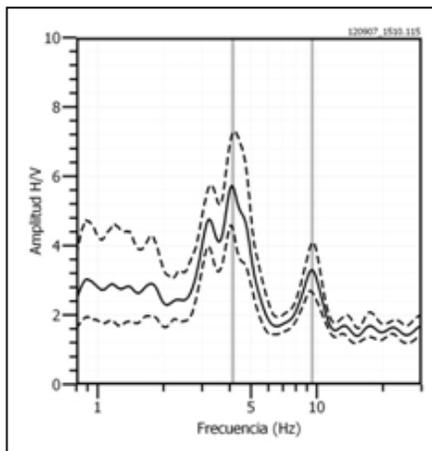
Figura 44: Ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos SM-097, SM-076 y SM-061 ubicados sobre el Área A1 (Figura 40)



SM - 033



SM - 068



SM - 101



Figura 45: Ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos SM-033, SM-068 y SM-101 ubicados sobre el Área A2 (Figura 40).

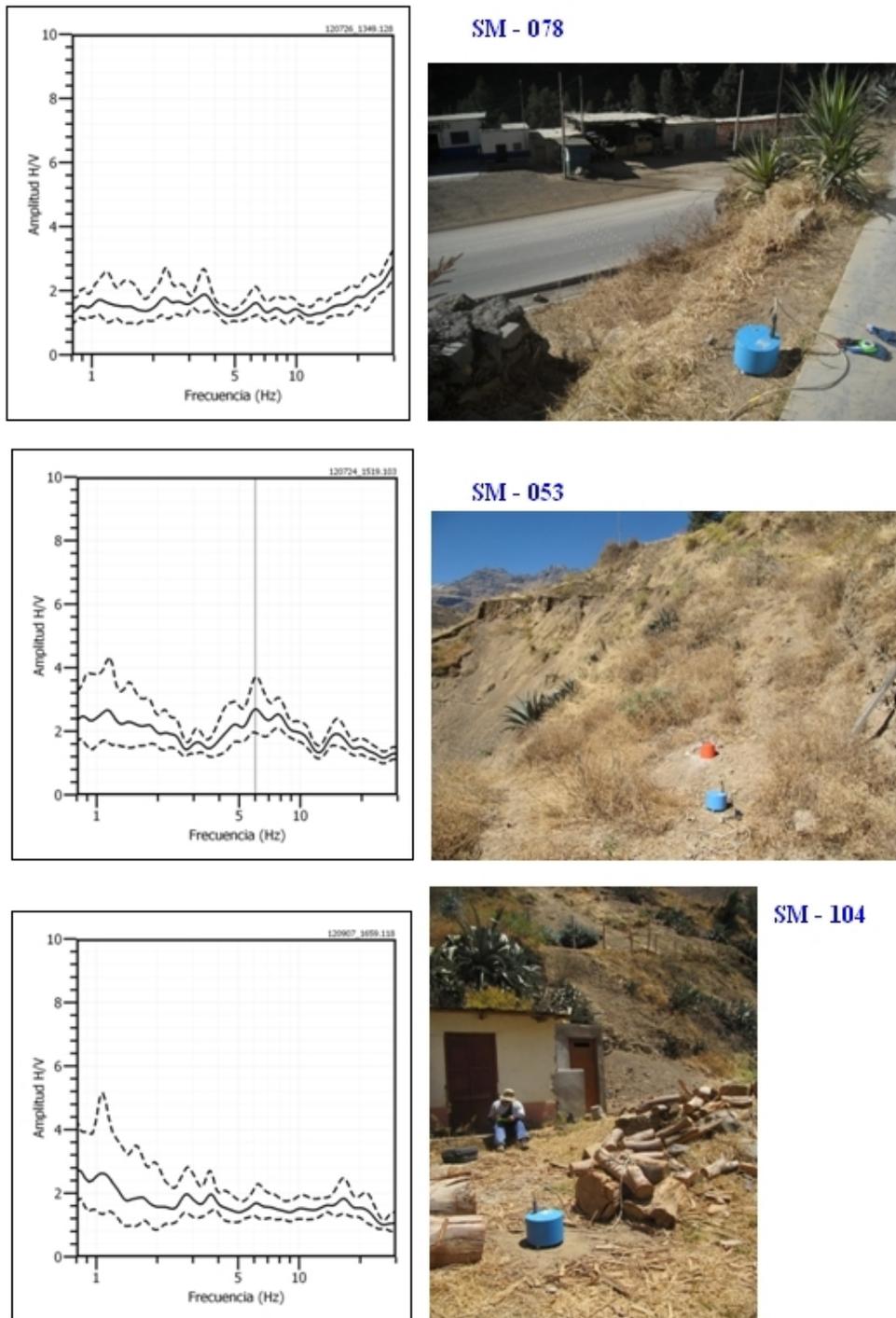
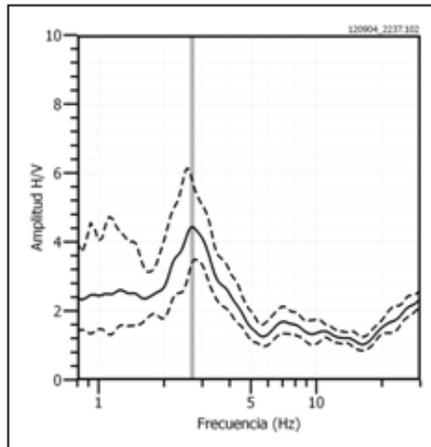
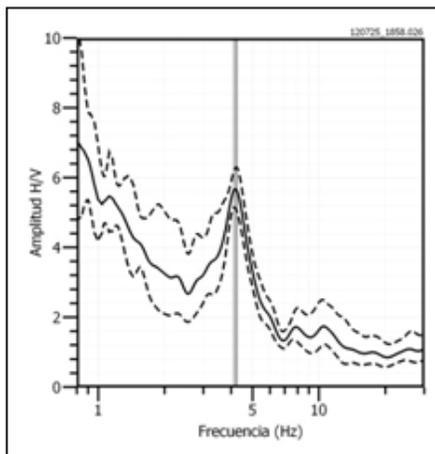


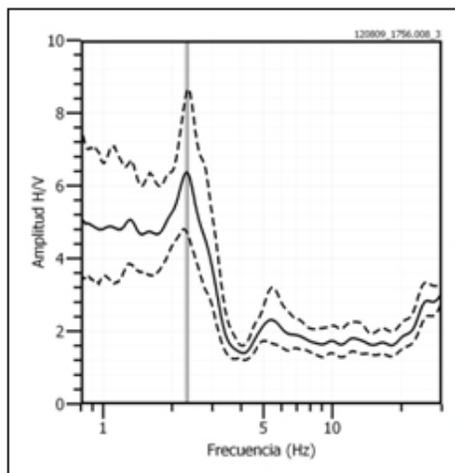
Figura 46: Ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos SM-078, SM-053 y SM-104 ubicados sobre el Área A3 (Figura 40)



SM - 088



SM - 026



SM - 138



Figura 47: Ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos SM-088, SM-026 y SM-138 ubicados sobre el Área A4 (Figura 40)

Los diferentes rangos de frecuencias predominantes identificados en este estudio, han permitido dividir a la ladera del Cerro Pucruchacra en cuatro áreas para las cuales se tiene diferentes espesores para la capa sedimentaria, mayor en el Area-2 y menor en el Area-1, ambas separadas por la Quebrada de Pucruchacra. En el Area-3, la superficie presentaría espesores menores con la posible presencia de un afloramiento rocoso; mientras que, en el Area-4 el espesor del sedimento sería mucho mayor que en las otras áreas (ver Figura 43).

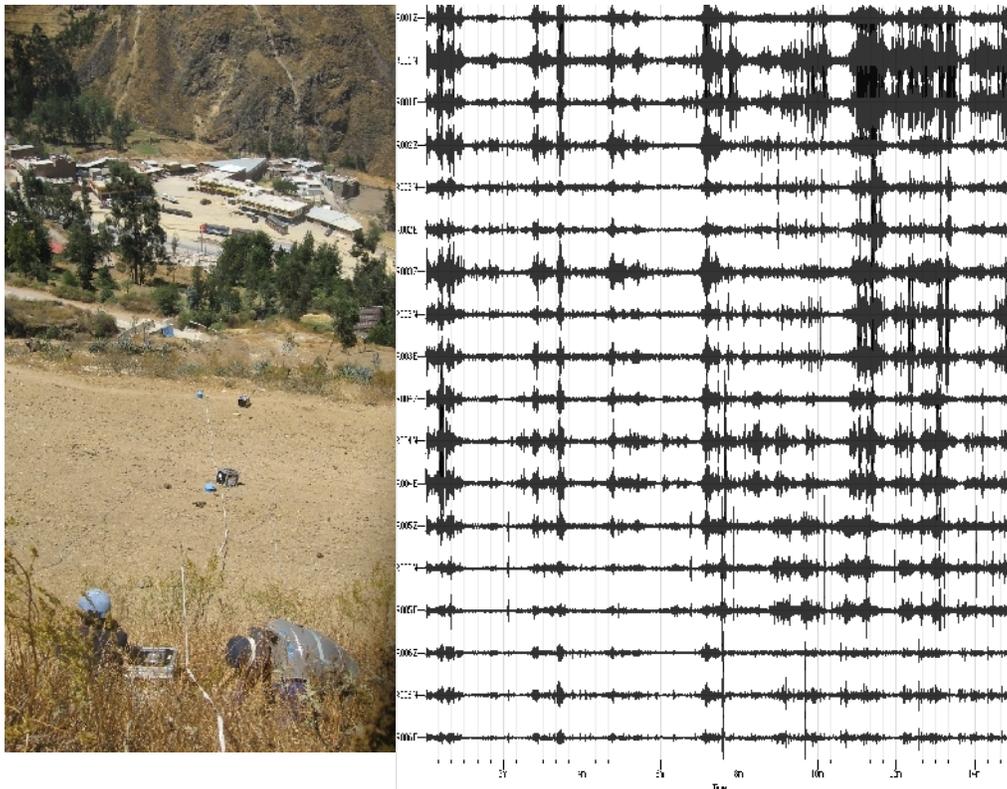


Figura 48: Disposición del arreglo sísmico lineal utilizado para el registro de vibración ambiental debidamente sincronizado. En cada arreglo se hizo uso de seis estaciones sísmicas de 3 componentes de registro.

6.2.- Método de Espectros de Amplitud

El análisis de los espectros de amplitud permite evaluar la cantidad de energía inducida a la estructura geológica y el efecto que se genera en esta. Para evaluar este parámetro, se considera registros de 30-40 segundos de vibración ambiental debidamente sincronizados y obtenidos por medio de arreglos lineales perpendiculares a la topografía considerando las mismas estaciones sísmicas utilizadas en el método H/V (Figura 48). La longitud de los arreglos lineales fue variable ya que dependía

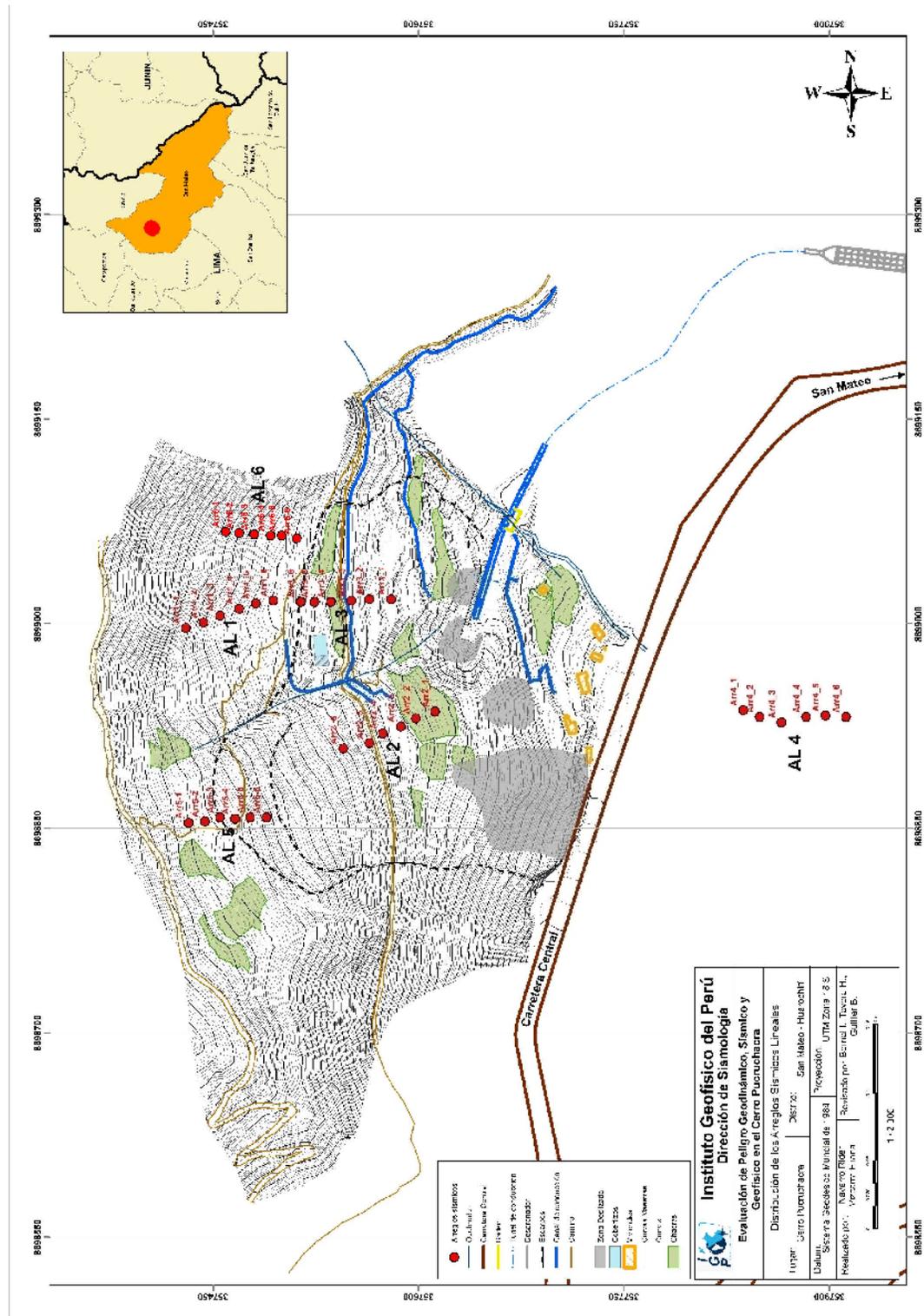


Figura 49: Mapa del Cerro de Pucruchacra y distribución espacial de los seis arreglos sísmicos lineales construidos para la toma de datos de vibración ambiental.

principalmente de la geomorfología y la accesibilidad al área de estudio (150 a 200 metros). Para el análisis y discusión de la información, se ha visto por conveniente continuar con la división por áreas propuesta para el Cerro Pucruchacra y en este caso, se ha considerado tres arreglos para el Área A-1, dos para el Área A-2 y uno para el Área A-4 (ver Figura 49).

Obtenida la información, se procede con la aplicación del método de razones espectrales (H/V) a las componentes horizontales (asumiendo mediciones mono-estación), tomando como información de referencia la correspondiente a la base de la estructura geológica o primer punto de registro. Este procedimiento permite analizar los espectros de amplitud a fin de evaluar la cantidad de energía inducida a la estructura geológica y el efecto que se genera en esta. Del análisis realizado se obtiene los siguientes resultados:

Área A1: Se analizaron los arreglos lineales codificados como AL1, AL3 y AL6. En la Figura 50, se ha graficado las razones espectrales obtenidas para el registro de cada estación que integra el arreglo lineal, todos representadas por diferente color. En este caso, la línea a lo largo de la amplitud 1 representa el nivel de referencia. Los resultados sugieren que no existen efectos de amplificación de ondas por efectos topográficos en ninguna de sus dos componentes de registro.

Área A2: Se analizaron los arreglos lineales codificados como AL2 y AL5. En la Figura 51 se observa que para el arreglo AL2 no se observa amplificación de ondas por efectos topográficos; mientras que, en el arreglo AL5 sobresalen picos a frecuencias entre 3.5 a 4.3 Hz, siendo sus amplificaciones mayores en la componente EO; es decir, coherente con la orientación de los deslizamientos presentados en la ladera del Cerro Pucruchacra. Los resultados sugieren que en la zona de mayor cota, dentro del área A2, se presenta mayor amplificación por efectos topográficos.

Área A3: En esta área no se realizó ningún arreglo de estaciones sísmicas por problemas de acceso y pendiente.

Área A4: Se analizó el arreglo lineal codificado como AL4. Según los resultados mostrados en la Figura 51, no se observa amplificaciones por efectos topográficos.

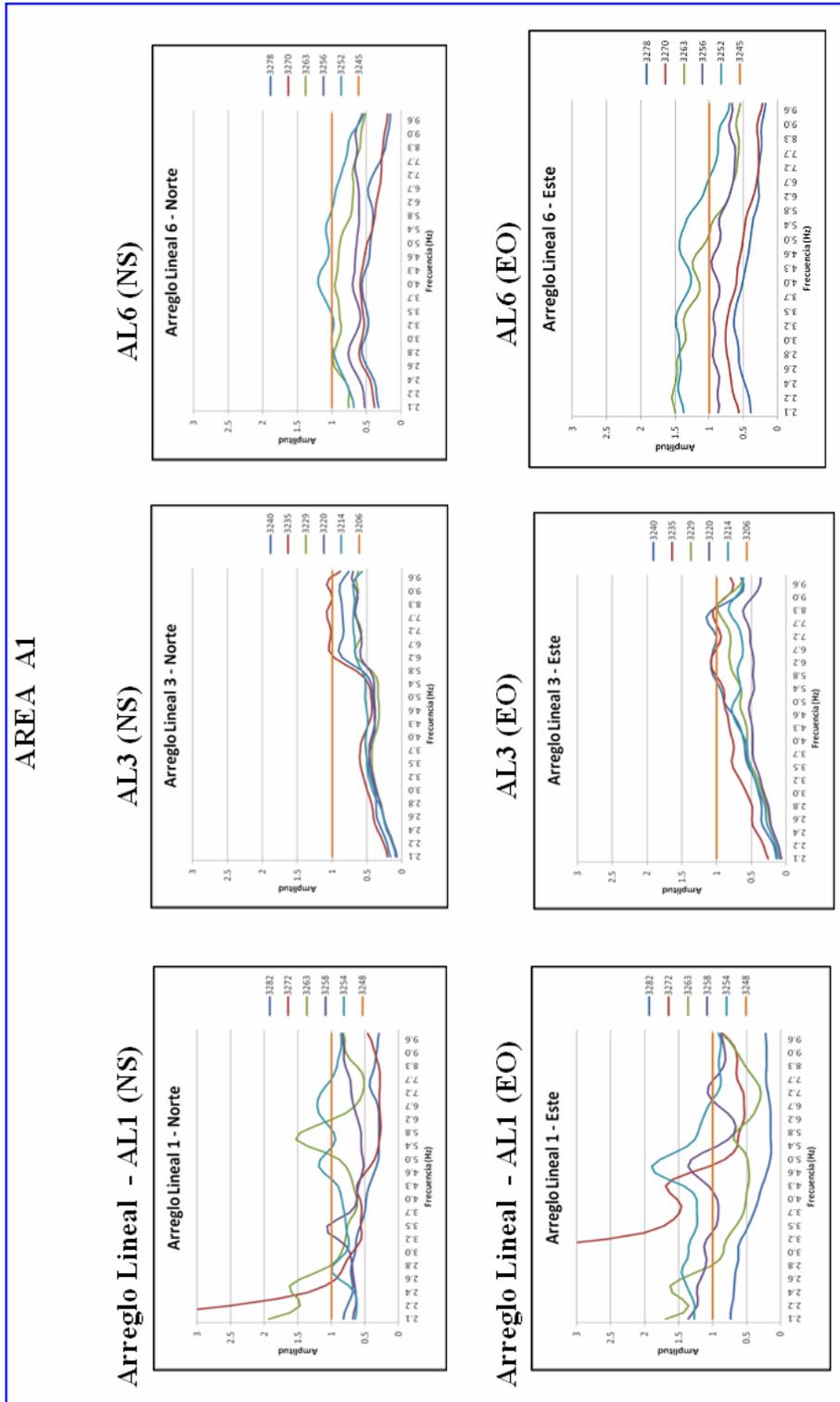


Figura 50: Cocientes espectrales de amplitud obtenidos para las componentes horizontales del arreglo sísmico lineal respecto a la estación base ubicada a menor cota topográfica (en el extremo derecho de cada grafica se indica la cota a la cual se ubican las diferentes estaciones sísmicas), con el fin de evidenciar la amplificación topográfica respecto a la estación base.

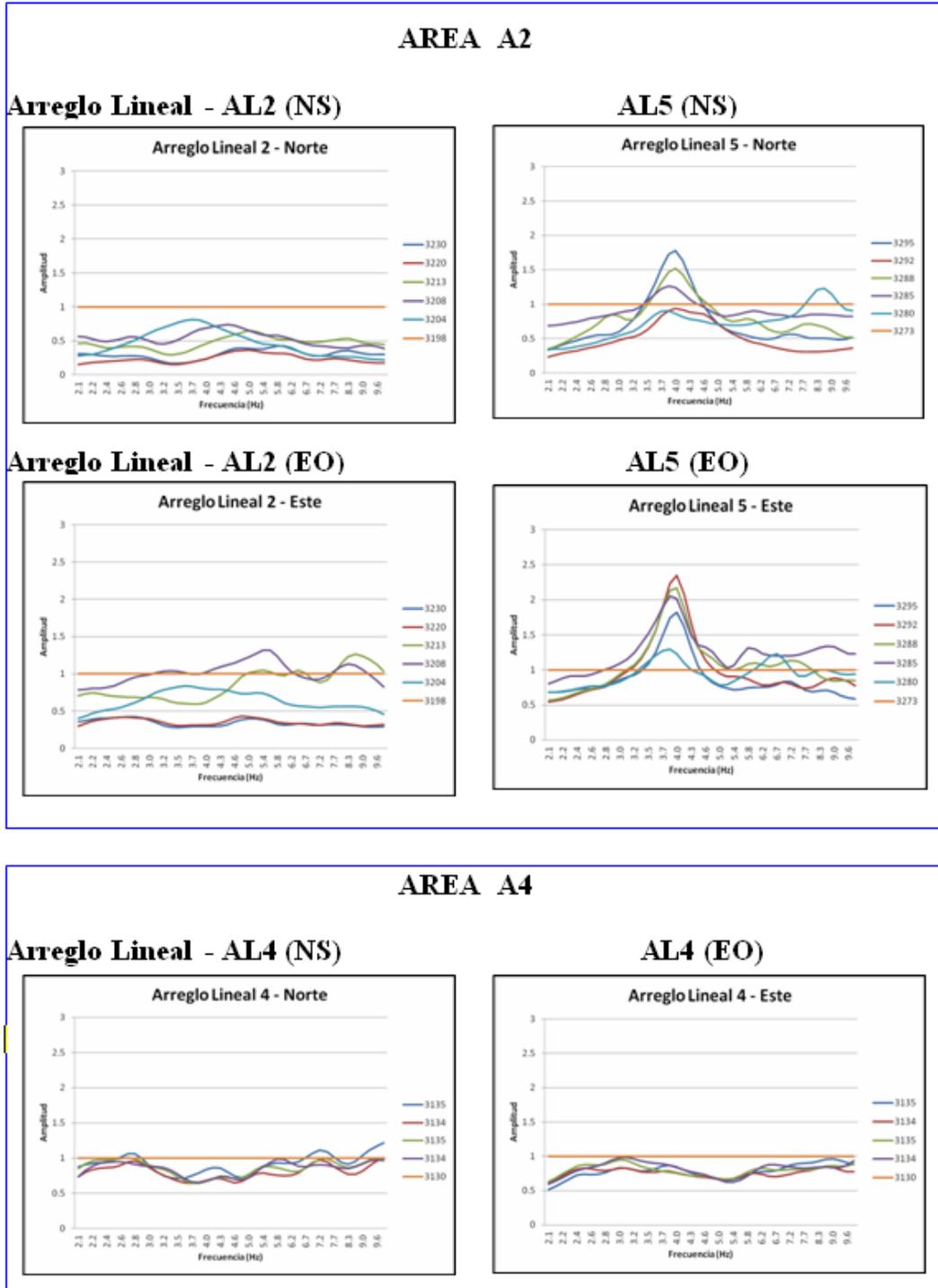


Figura 51: Cocientes espectrales de amplitud obtenidos para las componentes horizontales de todas las estaciones del arreglo sísmico lineal respecto a la estación base ubicada a menor cota topográfica (en el extremo derecho de cada grafica se indica la cota a la cual se ubican las diferentes estaciones sísmicas), con el fin de evidenciar la amplificación topográfica respecto a la estación base.

Los resultados obtenidos evidencian que sobre toda la ladera del Cerro Pucruchacra no existen efectos topográficos sobre la propagación de ondas generadas por fuentes naturales. Una excepción lo constituye la zona ubicada en la cabecera del Área A2, en donde se tiene amplificaciones de hasta 2 veces sobre el nivel de referencia, sobretodo para el rango de frecuencias entre 3.5 a 4.3 Hz. La correlación de estos resultados con los obtenidos para la misma zona con el método H/V, indican que ante la ocurrencia de sismos se podría experimentar efectos de resonancia que facilitarían el desarrollo de cualquier proceso dinámico sobre las capas superficiales.

6.3.- Método de Refracción Sísmica (MASW)

El método MASW (Multichannel Análisis of Surface Waves) permite conocer la velocidad de propagación de las ondas S (V_s) en el subsuelo a partir del análisis de la dispersión de ondas superficiales registradas considerando arreglos de estaciones sísmicas dispuestos de manera lineal. Como resultado se obtiene el perfil de velocidades de ondas de corte (V_s) para el punto central de cada arreglo.

Para el registro de la data se ha utilizado un equipo de refracción sísmica que consta de un registrador multipropósito, modelo GEODE (24 canales), geófonos de 4.5 Hz y registros a una resolución de 24 bits con un rango dinámico mayor a 110dB (Figura 52). Como fuente de impacto y/o energía para generar ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs. Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido, espaciamiento entre geófonos (entre 3 y 6 metros) y el punto de impacto del martillo, fue variable ya que dependía principalmente de la geomorfología de la zona de estudio. La frecuencia de muestreo fue de 4000 Hz con un pre-trigger de -0.1s y una longitud de registro de 2 segundos. Para eliminar el registro de ruido de fondo se realizaron entre 6 y 12 golpes en cada punto de disparo, permitiendo el estaqueo temporal de los datos y así, aumentar la coherencia en los resultados. Asimismo, la calidad del registro fue verificada en campo y analizada por medio del software Geopsy 2.8 (Wathelet, 2011).

Sobre el área de estudio se realizaron 14 líneas de refracción sísmica y de las cuales, siete fueron tomadas paralelas a las curvas de nivel y seis relativamente perpendiculares a las mismas; además, de una en la parte baja del Cerro Pucruchacra (Figura 53).

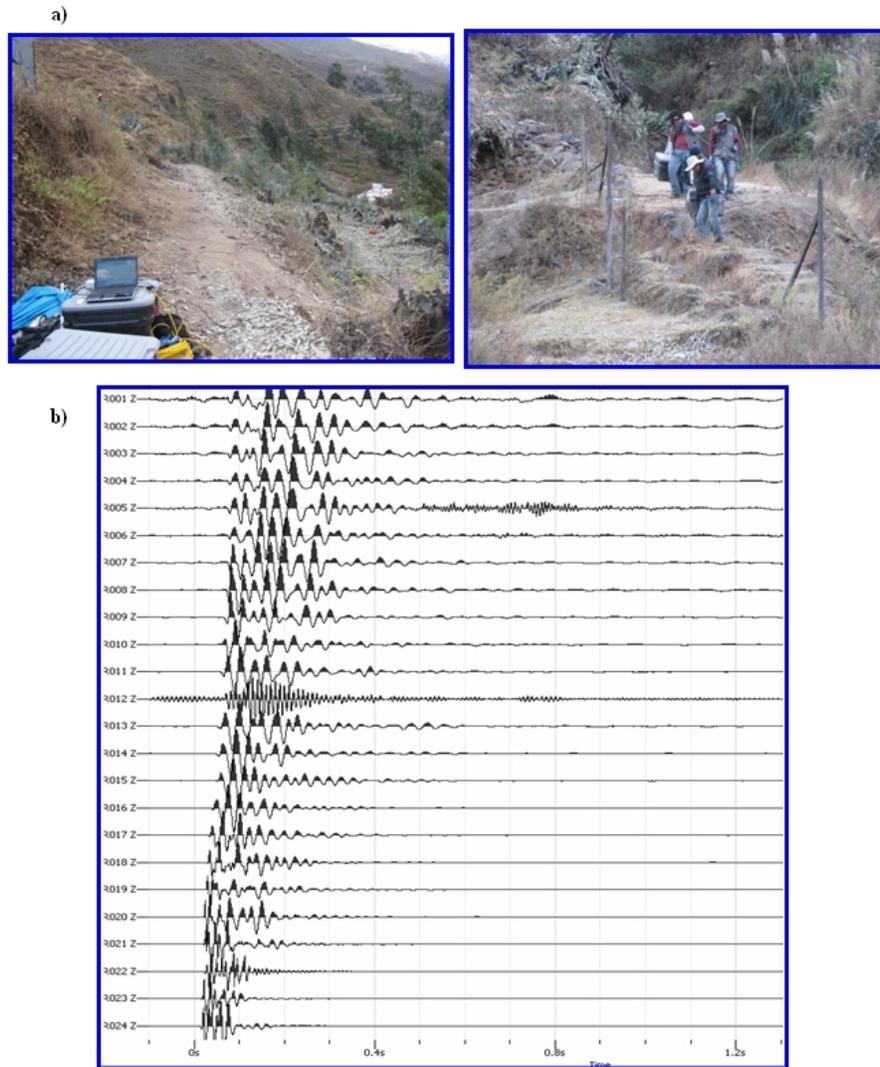


Figura 52: Imágenes de la disposición del equipo de refracción sísmica para la toma de datos (a) y ejemplos de registros obtenidos en los 24 canales (b). Obsérvese la presencia de ruido en el canal 12, motivo por el cual se repitió la toma de datos en este tendido.

De cada tendido sísmico se ha hecho uso del registro obtenido en la componente vertical a fin de calcular la velocidad de fase de la onda Rayleigh en función de su contenido de frecuencias y tomando en cuenta el tiempo de viaje de dicha fase, entre sensores. Suponiendo que la onda se propaga en su modo fundamental, entonces la velocidad de propagación aumenta en profundidad y la señal es asociada a una onda plana moviéndose unidireccionalmente (en frecuencias es tomado en cuenta como una superposición de ondas planas y armónicas). El interés es conocer la fase existente en el viaje (expresado en frecuencias) entre dos posiciones distintas o puntos de registro, la cual es calculada a partir de la densidad espectral cruzada a fin de describir la distribución de la energía entre ambos sensores.

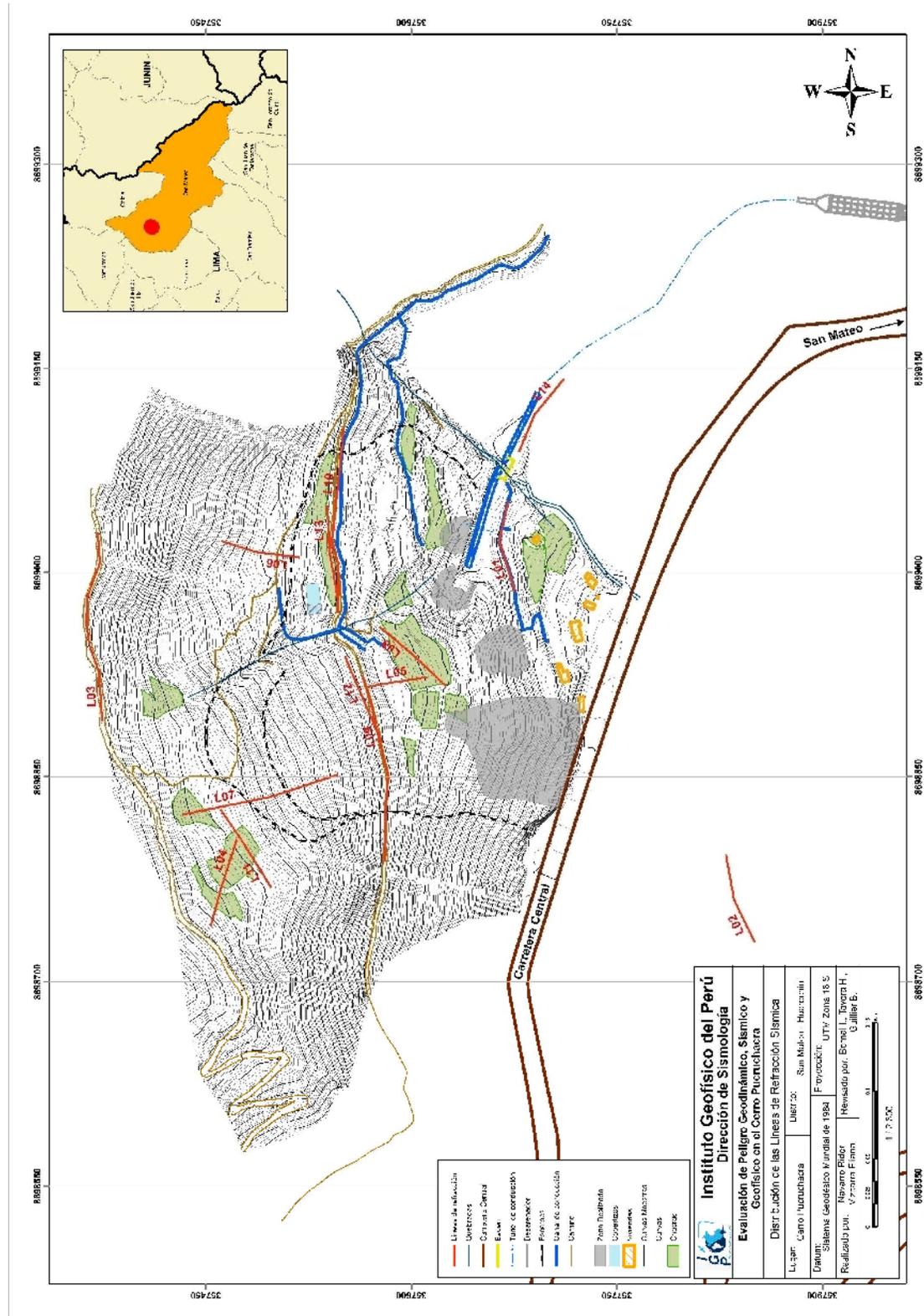


Figura 53. Mapa del Cerro Pucruchacra y distribución de las líneas de refracción sísmica (L01...L14).

Las curvas de dispersión de ondas obtenidas para cada tendido y número de impactos fueron promediadas y luego invertidas usando el algoritmo DINVER a fin de obtener perfiles de velocidad para diferentes zonas del Cerro Pucruyacra. En el análisis de los resultados se considera la clasificación que la Norma E030 establece para las velocidades de las ondas de corte (V_s):

- Rocas duras, velocidades $V_s > 1,500$ m/s
- Rocas moderadamente duras, velocidades V_s de 760 a 1500 m/s
- Suelo muy duro o roca blanda, velocidades V_s de 360 a 760 m/s
- Suelo duro, velocidades V_s de 180 a 360 m/s
- Suelo blando, velocidades $V_s < 180$ m/s

El análisis de la información se realiza por áreas y presentan las siguientes características:

AREA 1: Para esta área se analizaron los arreglos L01, L03, L10, L13 y L14, todos con orientación paralela a las curvas de nivel y el arreglo L06 perpendicular a estas curvas (Figura 54).

- Arreglos L01 y L14: Estos arreglos permitieron obtener perfiles de velocidad V_s para los puntos ubicados al Este del Túnel de Aducción, zona baja del cerro o área de estudio. De acuerdo a los perfiles, se ha identificado la presencia de dos capas, la primera superficial con velocidades V_s de 300-340 m/s correspondiente a suelos duros con posibles espesores entre 4 y 8 metros respectivamente. La segunda capa presenta velocidades V_s de 400-500m/s y corresponde a rocas blandas o suelos muy duros con espesores que fluctúa entre 14 y 18 metros respectivamente. En ambos casos, la superficie de contacto con la siguiente capa alcanza velocidades V_s de hasta 800-900m/s y corresponde a rocas moderadamente duras. Aquí, los espesores de las capas superficiales indican una clara inclinación lateral.

- Arreglo L03: Este arreglo permite obtener el perfil de velocidad para el punto ubicado en el extremo superior del Área 1 y se caracteriza por presentar una capa superficial con velocidades V_s de 320 m/s y espesores del orden de 12 metros correspondiente a suelos duros. La superficie de contacto con la siguiente capa alcanza velocidades V_s de 800 m/s y corresponde a rocas

moderadamente duras.

.- Arreglos L10 y L13: Estos arreglos permitieron obtener perfiles de velocidad para el punto ubicado al Este de la zona conocida como “el cobertizo” sobre la línea de trocha. En estos perfiles de velocidad se ha diferenciado la presencia de dos capas: la primera superficial con velocidades V_s de 200 m/s correspondiente a suelos blandos a duros con espesores del orden de 6 metros. La segunda capa con velocidades V_s de 300-320m/s correspondiente a suelos duros con espesores de alrededor de 4 metros. La superficie de contacto con la siguiente capa alcanza velocidades V_s de hasta 800 m/s correspondiente a rocas moderadamente duros.

.- Arreglo L06: Este arreglo permite obtener un perfil de velocidad para el punto ubicado al SO de la zona conocida como “el cobertizo”, el mismo que muestra la presencia de una capa superficial con velocidades V_s de 300m/s correspondiente a suelos duros con espesor del orden de 10 metros. En este caso, la superficie de contacto con la siguiente capa alcanza velocidades V_s de hasta 700 m/s correspondiente a suelos muy duros.

AREA 2: Para esta área se analizaron los arreglos L09 y L12, ambos paralelos a las curvas de nivel y los arreglos L04, L05, L07, L08 y L11 perpendiculares a estas curvas (Figura 55).

.- Arreglos L09 y L12: Estos arreglos han permitido obtener perfiles de velocidad para los puntos ubicados en el extremo sur de la quebrada de Pucruchacra sobre el camino de trocha. En ambos perfiles se ha diferenciado dos capas: la primera superficial con velocidades V_s promedio de 300 m/s correspondiente a suelos duros con espesores que fluctúan entre 6-10 metros. La segunda capa presenta velocidades V_s de 400m/s equivalente a suelos duros con espesores que fluctúan alrededor de 12 metros. En la superficie de contacto con la siguiente capa se tiene velocidades V_s promedio de 750 m/s que corresponden a suelos muy duros o roca blanda.

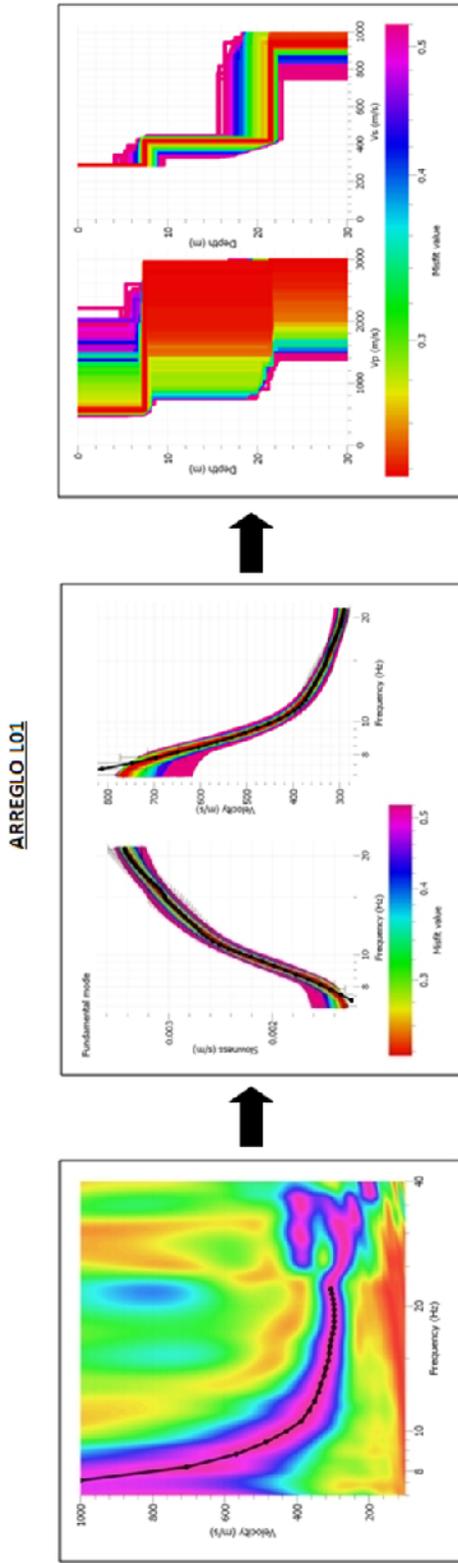


Fig. 1. Imagen de Dispersión

Fig. 2. Curva de Dispersión

Fig. 3. Perfiles de Suelo

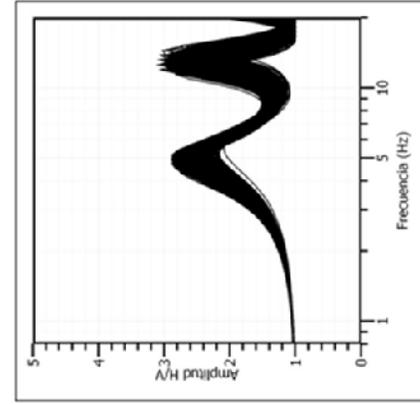


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V

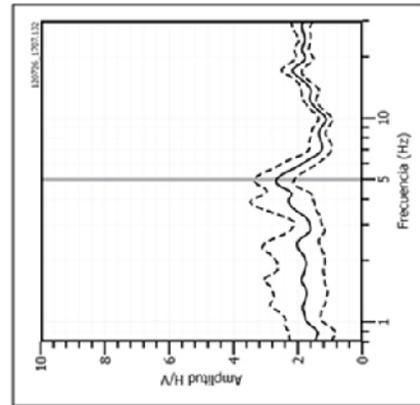


Fig. 5. Punto cercano H/V_ Sm082

Figura 54: Análisis e interpretación geofísica de los arreglos obtenidos con el método MASW para el arreglo L01

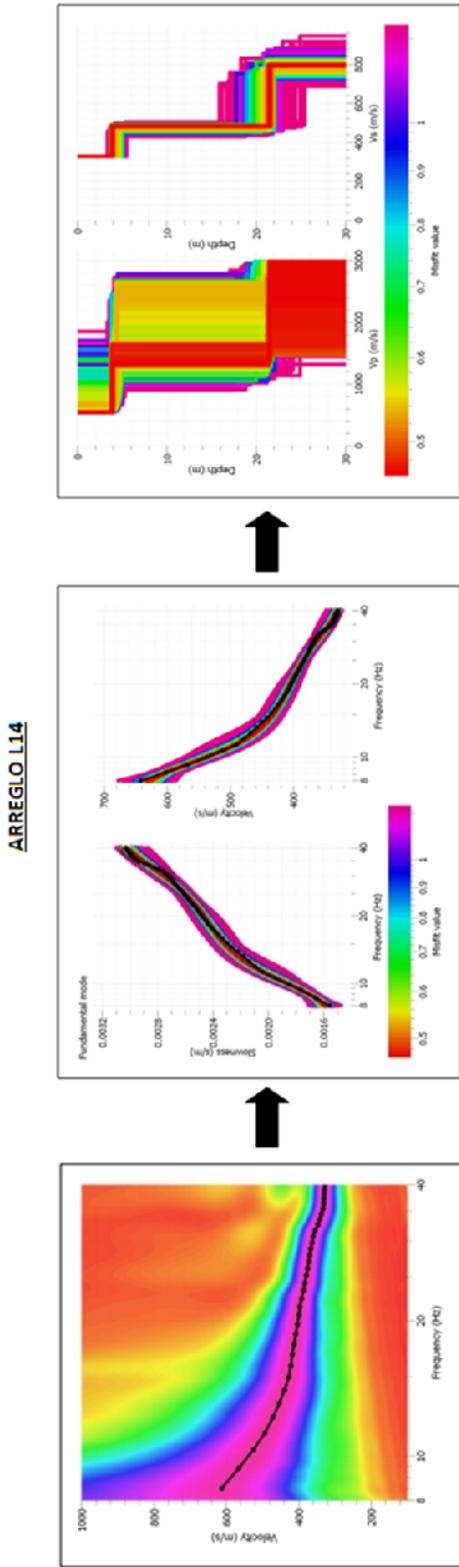


Fig. 1. Imagen de Dispersión

Fig. 2. Curva de Dispersión

Fig. 3. Perfiles de Suelo

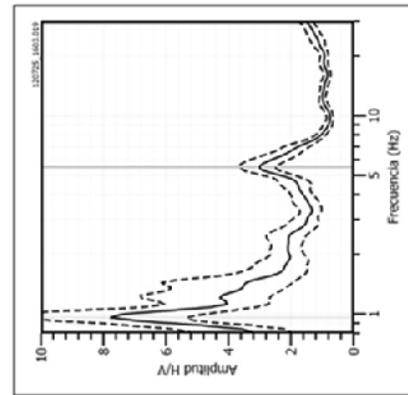


Fig. 5. Punto cercano H/V_ Sm019

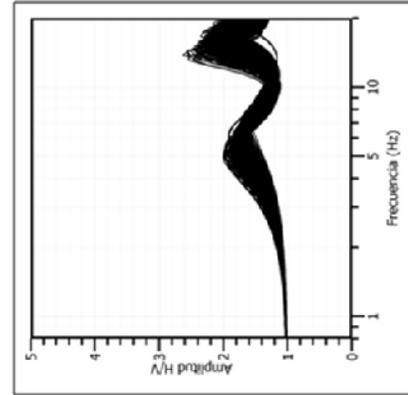


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V



Figura 54: ...// Continuación. Arreglo L14

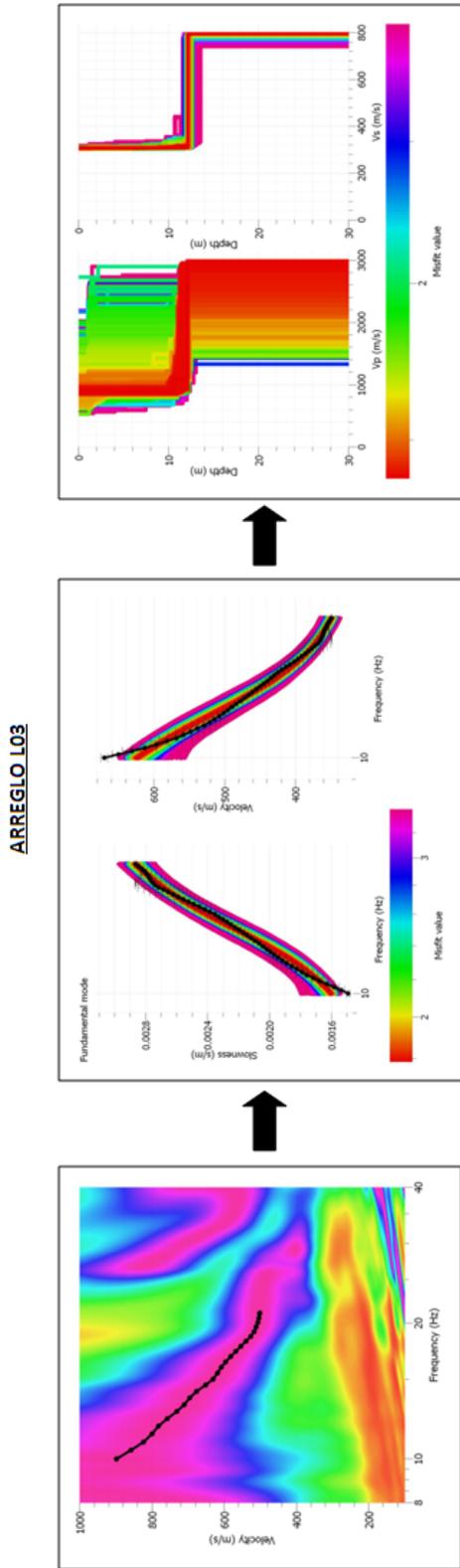


Fig. 1. Imagen de Dispersión

Fig. 2. Curva de Dispersión

Fig. 3. Perfiles de Suelo

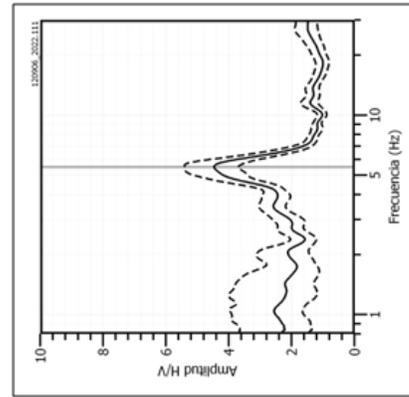


Fig. 5. Punto cercano H/V_ Sm097

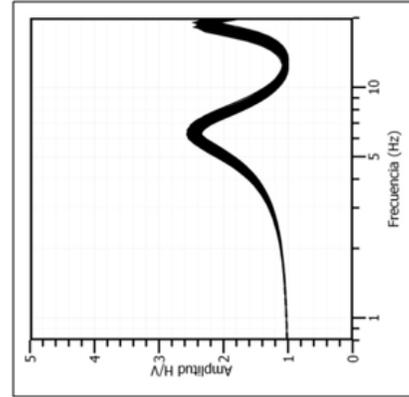


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V

Figura 54: ...// Continuación. Arreglo L03

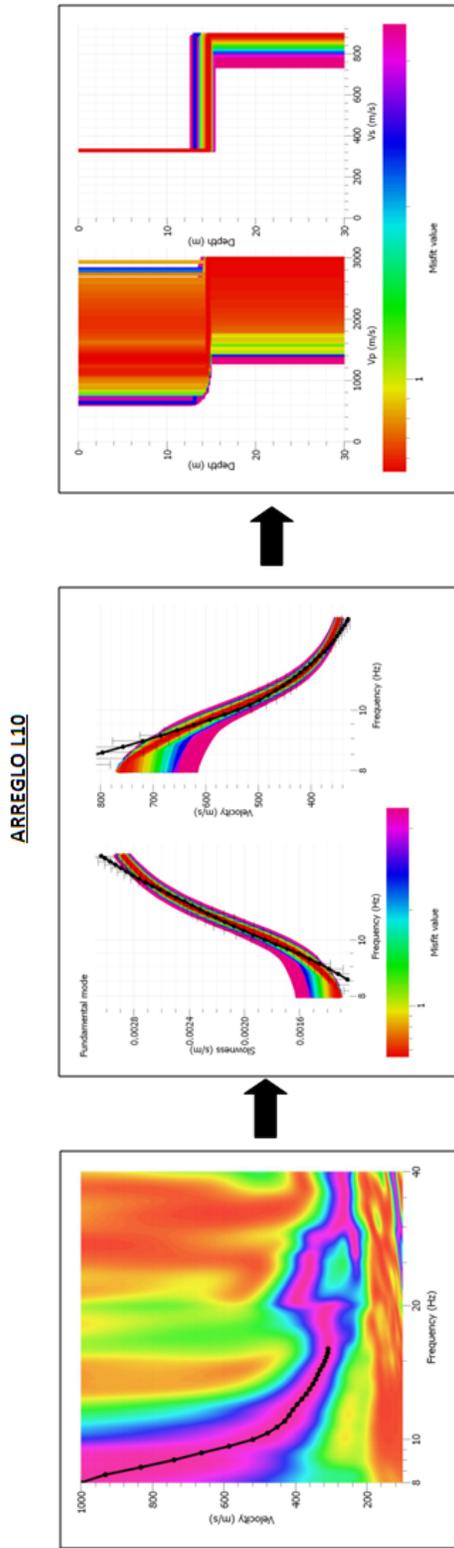


Fig. 1. Imagen de Dispersión

Fig. 2. Curva de Dispersión

Fig. 3. Perfiles de Suelo

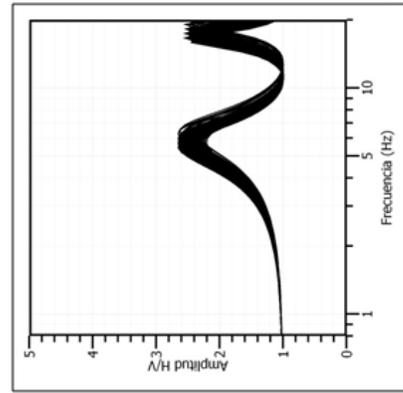


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V

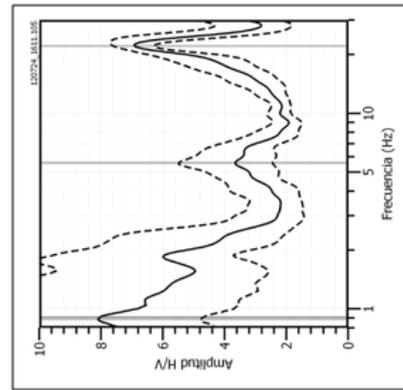


Fig. 5. Punto cercano H/V_Sm055

Figura 54: ...// Continuación. Arreglo L10

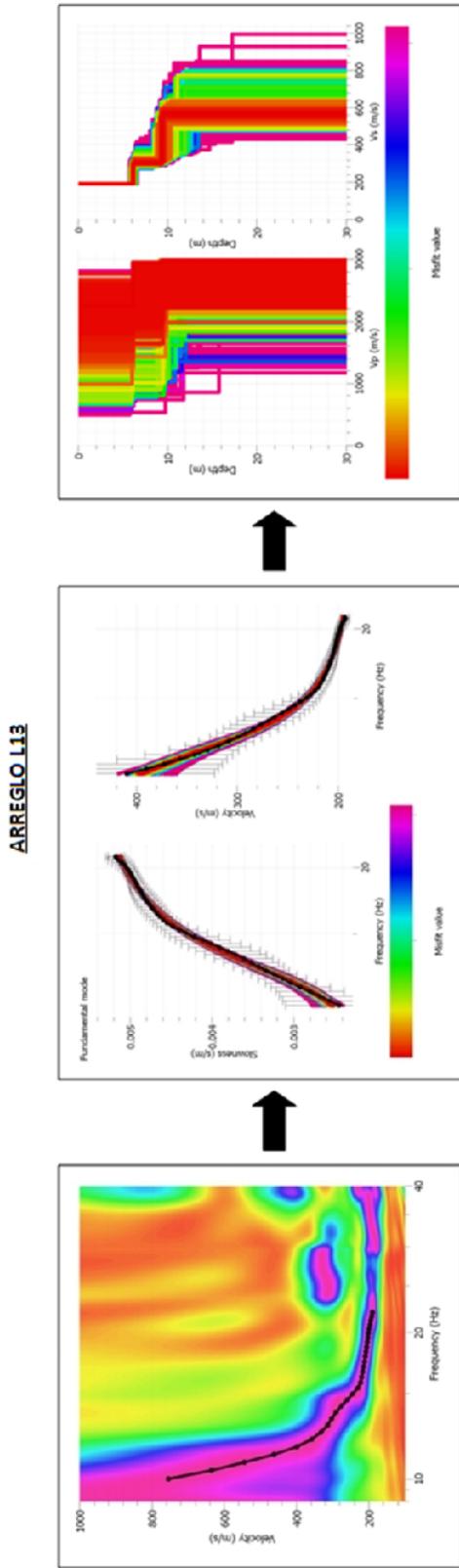


Fig. 1. Imagen de Dispersión

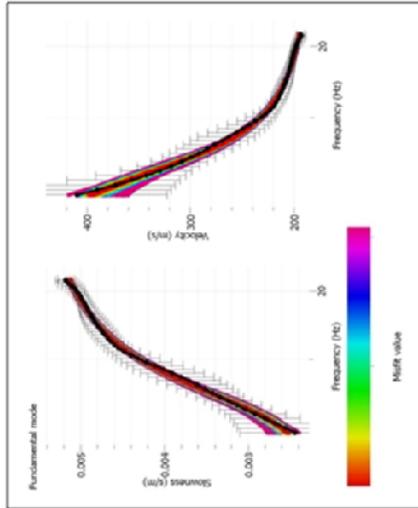


Fig. 2. Curva de Dispersión

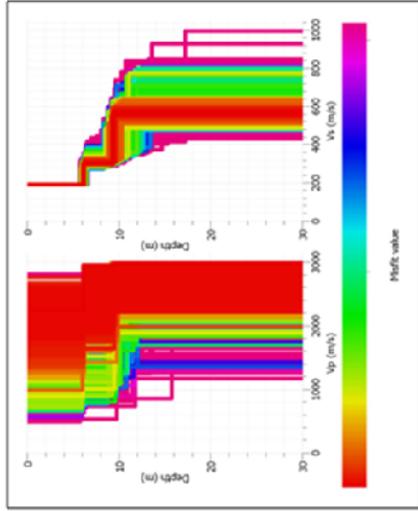


Fig. 3. Perfiles de Suelo

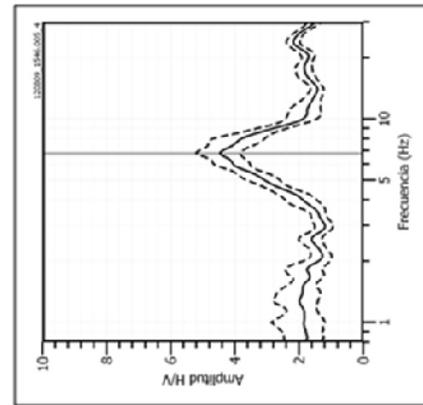


Fig. 5. Punto cercano H/V_ Sm133

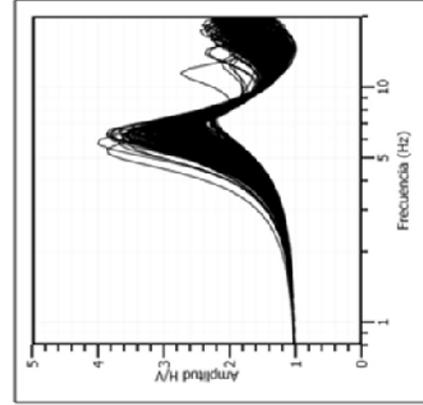


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V

Figura 54: ...// Continuación. Arreglo L13

.- **Arreglo L05 y L08:** Estos arreglos han permitido obtener perfiles de velocidad para puntos ubicados entre el camino de trocha, sobre el Túnel de Aducción y la Quebrada de Pucruhacra. Ambos perfiles presentan dos capas, la primera superficial con velocidades de 210 - 250 m/s correspondientes a suelos blandos-duros con espesores que fluctúan alrededor de 8 metros en ambos perfiles. La segunda capa presenta velocidades de 380 m/s y 490 m/s respectivamente correspondiendos a suelos muy duros con espesores del orden de 12 a 18 metros. La superficie de contacto con la siguiente capa alcanza velocidades de 700 a 800 m/s respectivamente y corresponden a suelos muy duros. Según el perfil L08, el contraste de velocidades se presenta con un factor de 2.

.- **Arreglo L04 y L11:** Estos arreglos han permitido obtener perfiles de velocidad para los puntos ubicados al Oeste del escarpe de fisuras ubicadas en el extremo superior del Área 2. Se ha identificado la presencia de dos capas, la primera superficial con velocidades de 220 m/s correspondiente a suelos blandos-duros con espesores el orden de 8 a 4 metros. La segunda capa presenta velocidades de 440 a 340 m/s y corresponde a suelos muy duros con espesores, en para ambos casos, de hasta 12 metros. La superficie de contacto con la siguiente capa alcanza velocidades de 800 m/s y equivalen a suelos de rocas moderadamente duras.

.- **Arreglo L07:** Este arreglo permite obtener un perfil de velocidad para el punto ubicado en extremo superior del Área 2, llegándose a identificar la presencia de hasta dos capas, la primera superficial con velocidades de 370 m/s correspondiente a suelos muy duros con espesores de alrededor de 4 metros. La segunda capa presenta velocidades de 390 m/s correspondiendo a suelos muy duros con espesores de 8 metros. La superficie de contacto con la siguiente capa presenta velocidades de 800 m/s correspondiente a suelos con rocas moderadamente duras. En este perfil se observa velocidades relativamente altas para la capa superficial en comparación con los valores obtenidos en los perfiles L04 y L11.

AREA 3: En esta área no se realizó ningún arreglo debido a problemas de accesibilidad.

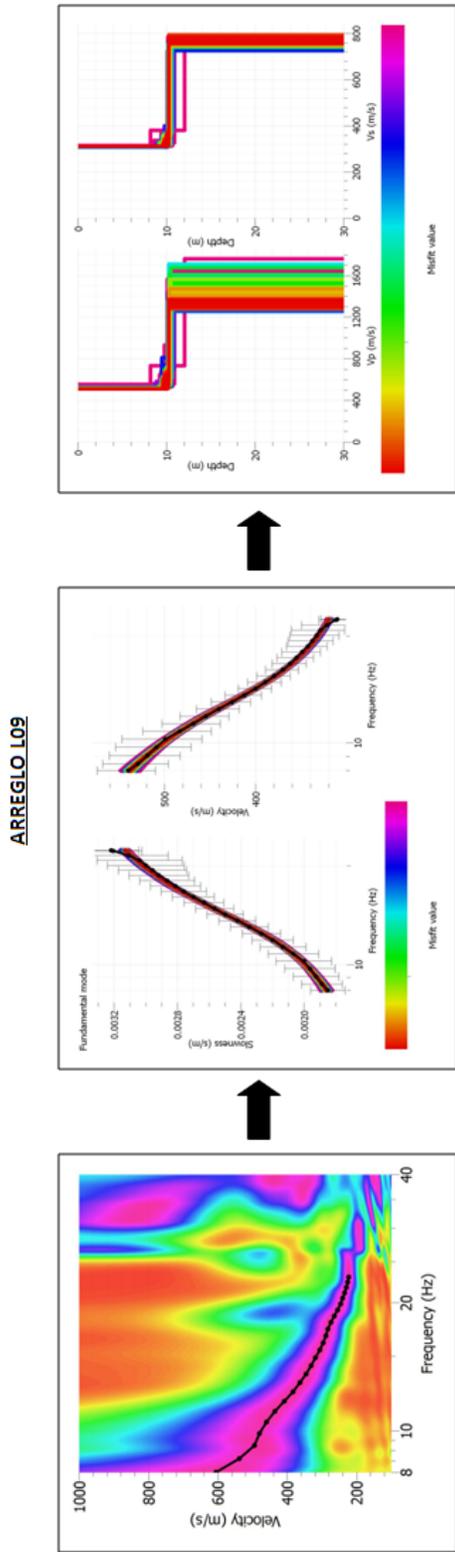


Fig. 1. Imagen de Dispersión

Fig. 2. Curva de Dispersión

Fig. 3. Perfiles de Suelo

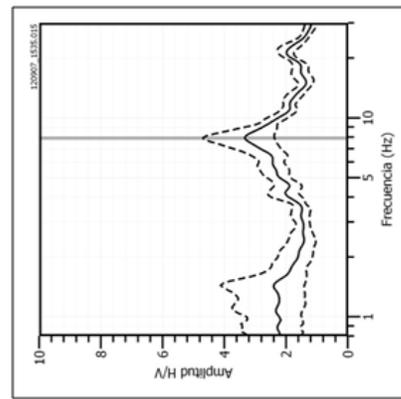


Fig. 5. Punto cercano H/V_ Sm040

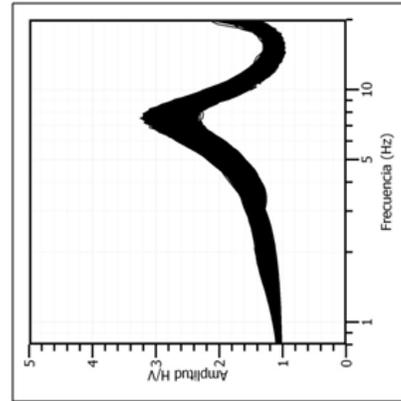


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V

Figura 55: Análisis e interpretación geofísica de los arreglos obtenidos con el método MASW para el arreglo L09

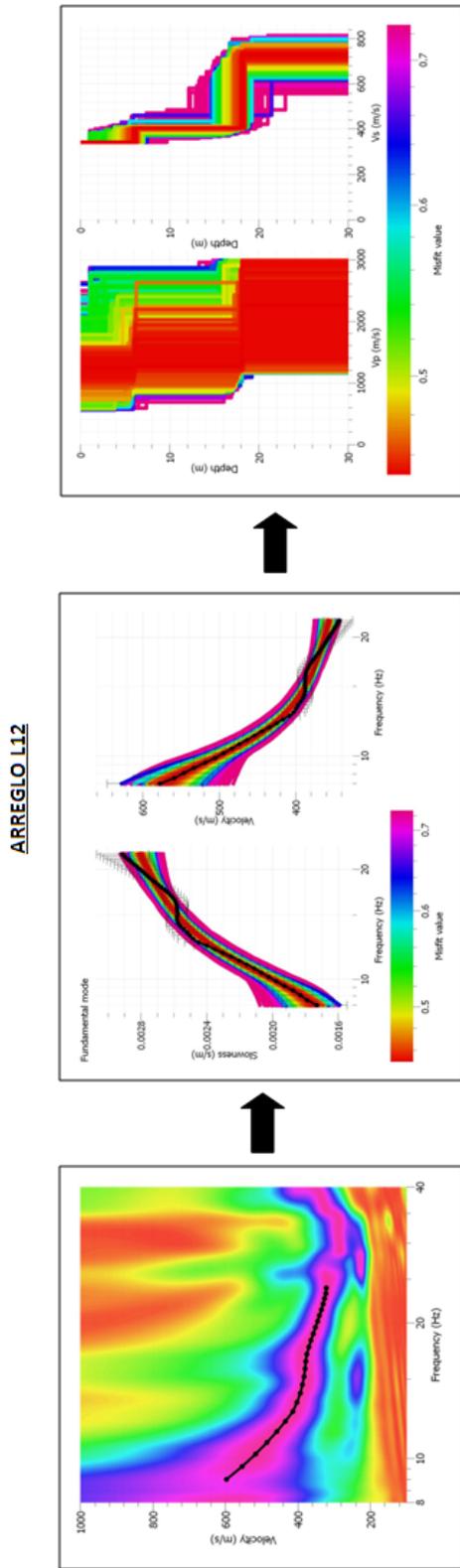


Fig. 3. Perfiles de Suelo

Fig. 2. Curva de Dispersión

Fig. 1. Imagen de Dispersión

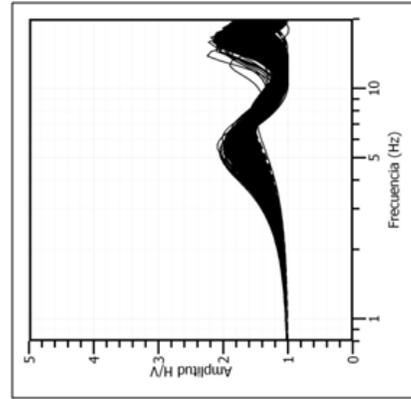


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V

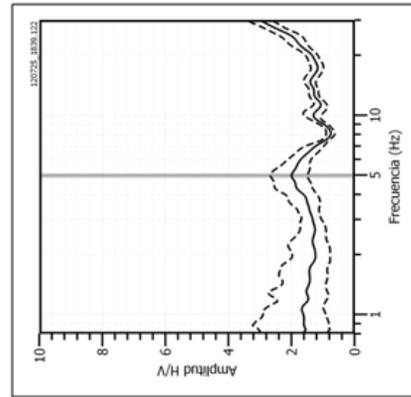


Fig. 5. Punto cercano H/V_ Sm072

Figura 55: ...// Continuación. Arreglo L12

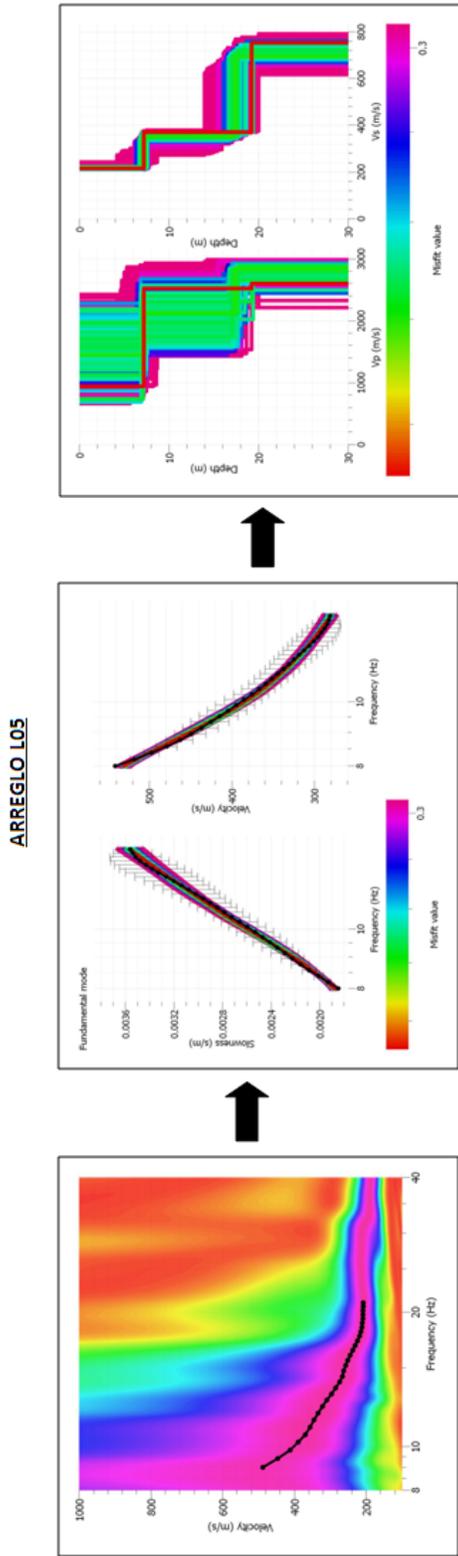


Fig. 1. Imagen de Dispersión

Fig. 2. Curva de Dispersión

Fig. 3. Perfiles de Suelo

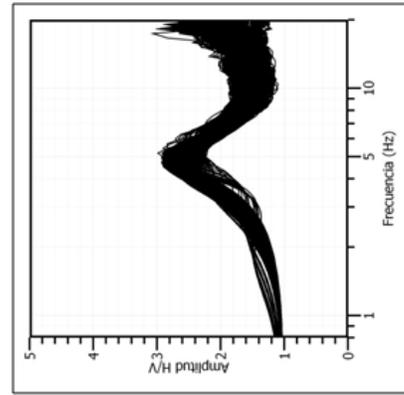


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V

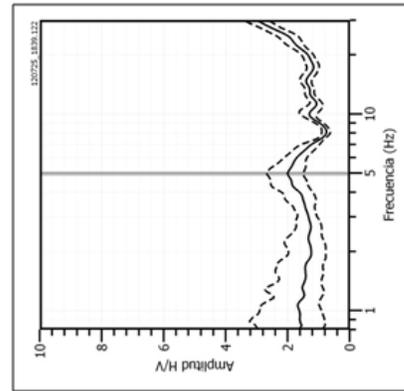


Fig. 5. Punto cercano H/V_Sm072

Figura 55: ...// Continuación. Arreglo L05

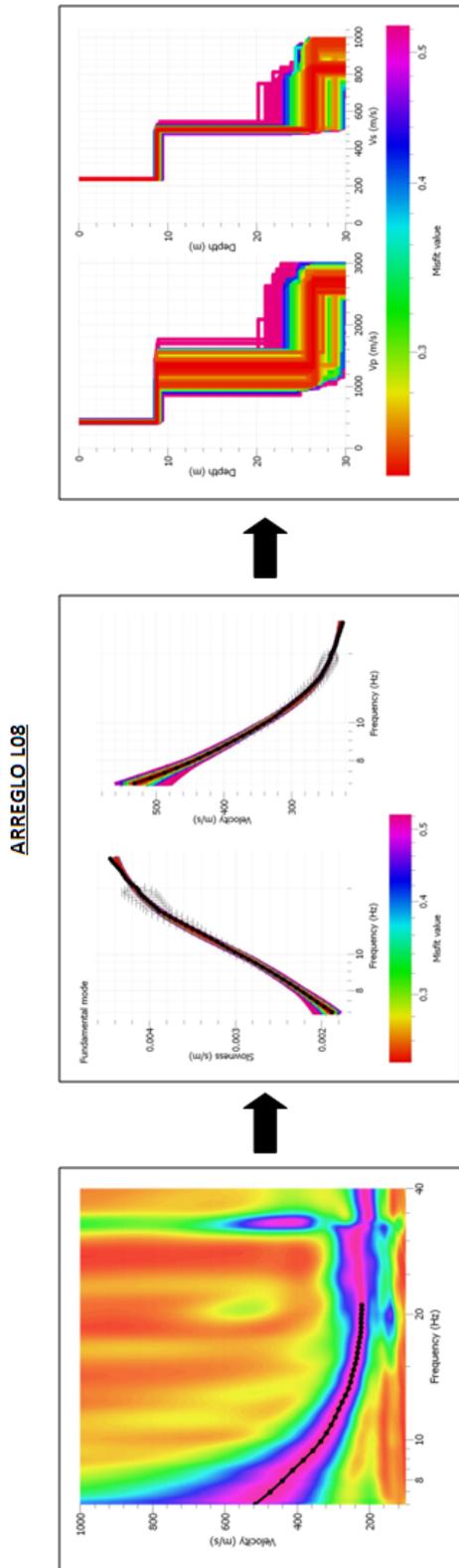


Fig. 1. Imagen de Dispersión

Fig. 2. Inversión de Curva de Dispersión

Fig. 3. Perfiles de Suelo

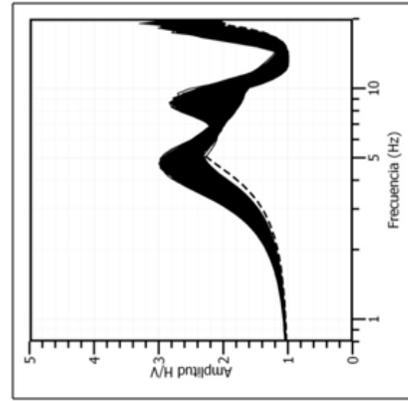


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V

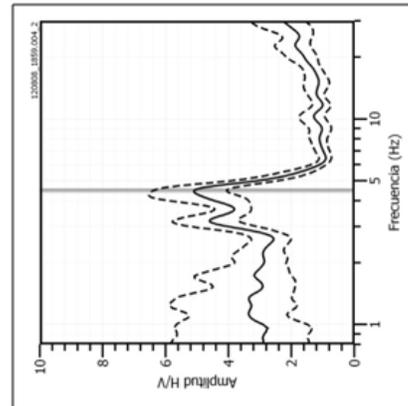


Fig. 5. Punto cercano H/V_ Sm125

Figura 55: ...// Continuación. Arreglo L08

ARREGLO L04

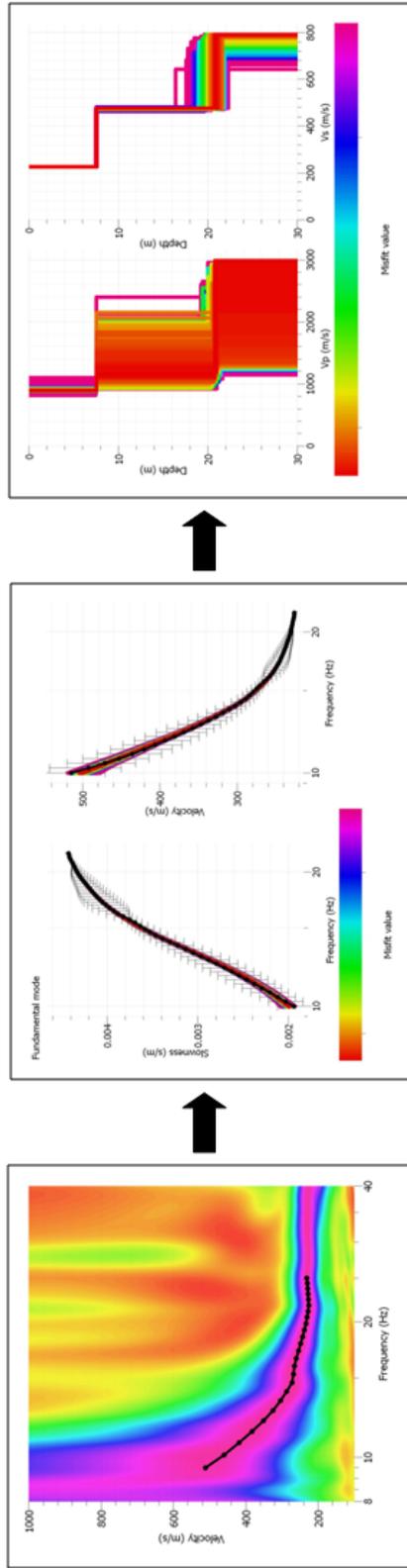


Fig. 1. Imagen de Dispersión

Fig. 2. Curva de Dispersión

Fig. 3. Perfiles de Suelo

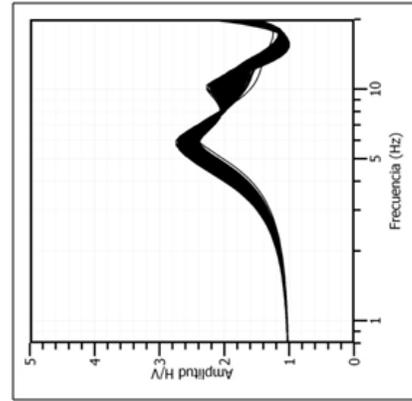


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V

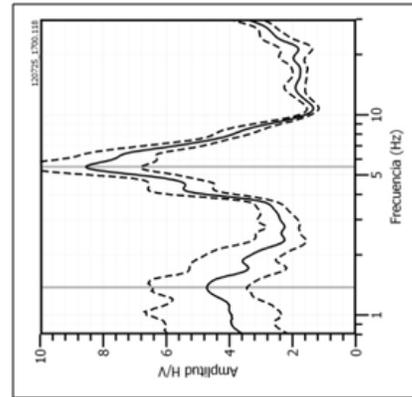


Fig. 5. Punto cercano H/V _ Sm068

Figura 55: ...// Continuación. Arreglo L04

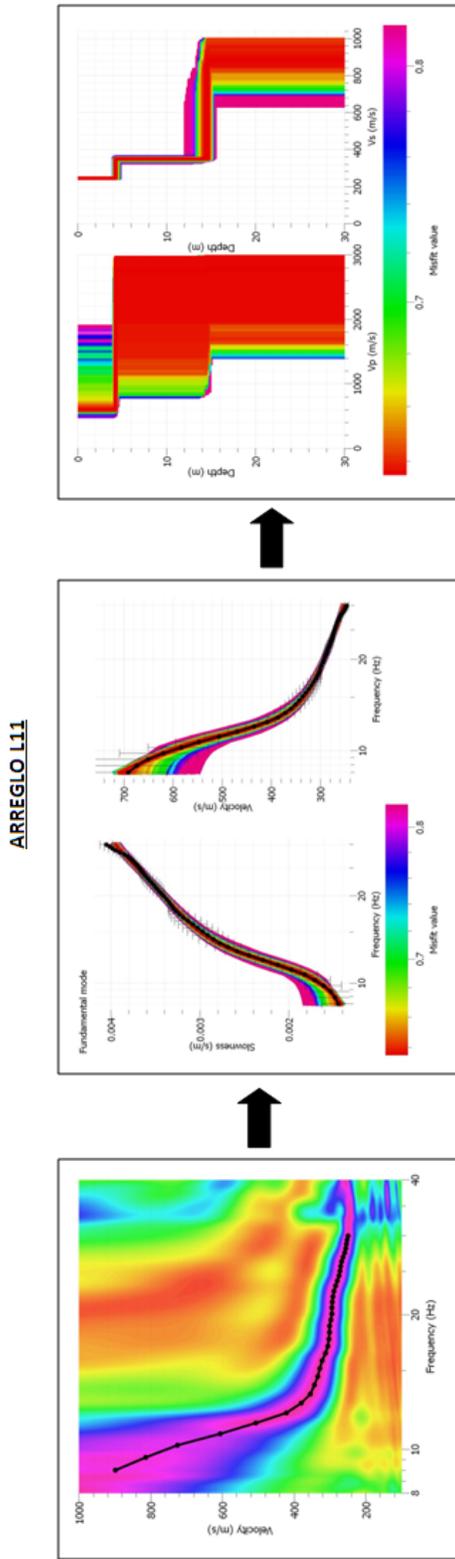


Fig. 1. Imagen de Dispersión

Fig. 2. Curva de Dispersión

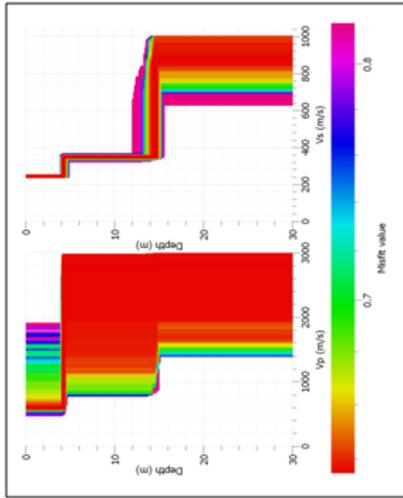


Fig. 3. Perfiles de Suelo

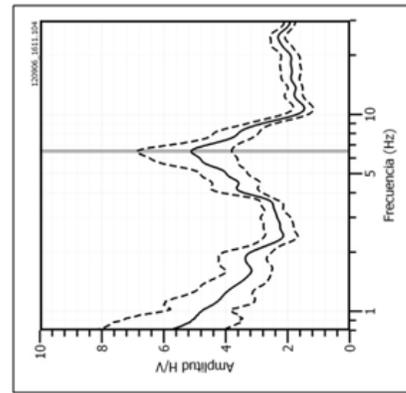


Fig. 5. Punto cercano H/V_ Sm090

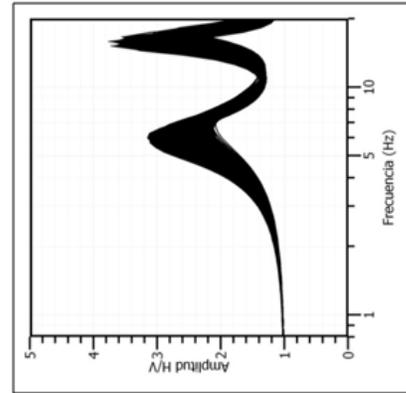


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V

Figura 55: ...// Continuación. Arreglo L11

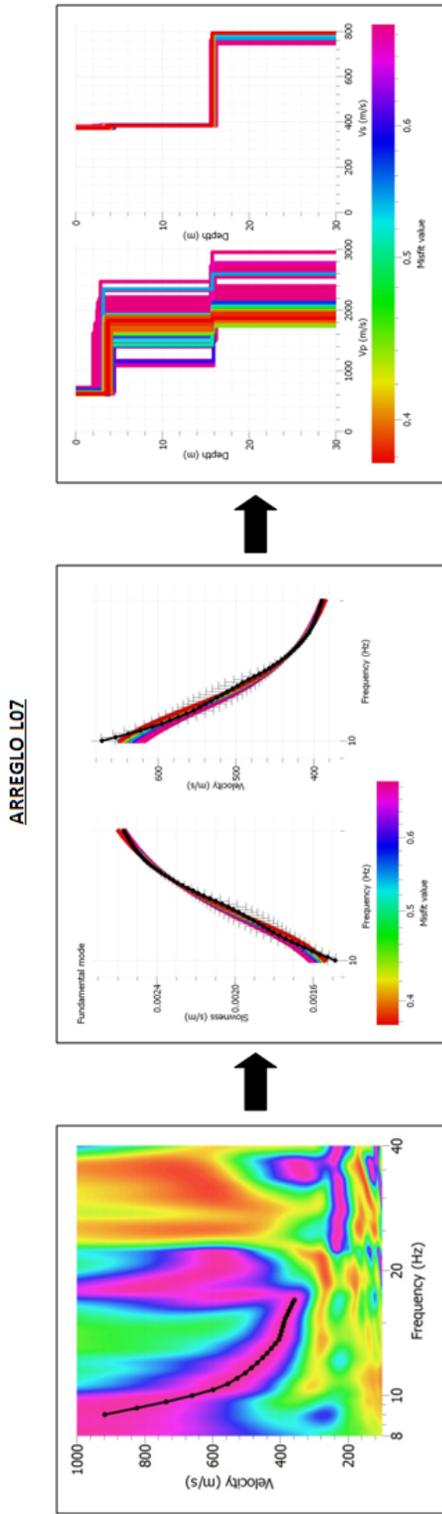


Fig. 1. Imagen de Dispersión Inicio de Línea

Fig. 2. Curva de Dispersión Inicio de Línea

Fig. 3. Perfiles de Suelo de Inicio de Línea

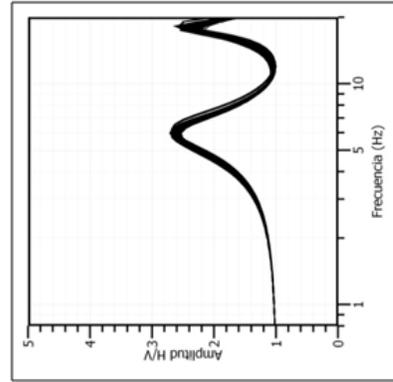


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V de Inicio de Línea

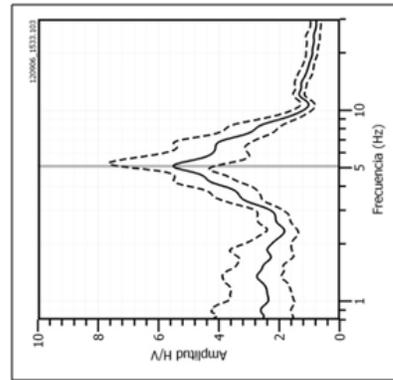


Fig. 5. Punto cercano H/V_ Sm089

Figura 55: ...// Continuación. Arreglo L07

AREA 4: Para esta área se analizó el arreglo L02 que presenta una orientación casi perpendicular a las curvas de nivel (Figura 56).

.- Arreglo L02: Este arreglo permitió obtener el perfil de velocidad para el punto ubicado entre el margen derecho del Río Rimac y la Carretera Central, llegándose a identificar la presencia de dos capas, la primera superficial con velocidades de 310 m/s correspondiente a suelos duros y con espesores del orden de 7 metros. La segunda capa presenta velocidades de 400 m/s y corresponde a suelos muy duros con espesores de 16 metros. En la superficie de contacto con la siguiente capa se observa velocidades de hasta 800 m/s correspondientes a suelo formado por rocas moderadamente duras.

A fin de conocer la distribución de velocidades y espesores de las capas superficiales presentes en el área de estudio, se procedió a invertir el modelo de velocidad de cada punto a fin de obtener una función de transferencia teórica utilizando métodos numéricos inversos. Obtenidas las funciones teóricas, fueron correlacionadas con las funciones obtenidas con el método H/V, observándose, para el mismo rango de frecuencias, buena correspondencia entre las frecuencias predominantes (ver Figuras 54, 55 y 56). Estos resultados permitieron concluir que los valores estimados para las velocidades de ondas de corte (V_s) y espesores de las capas superficiales son correctos, lo cual valida los resultados obtenidos con ambas metodologías.

Posteriormente, a fin de construir un modelo 3D de las capas superficiales no consolidadas y sus espesores se aplicó un procedimiento de inversión a partir de las frecuencias predominantes (H/V) y las velocidades V_s obtenidos con refracción sísmica (MASW). El resultado permite disponer del mapa de iso-espesores presentado en la Figura 57, el mismo que facilita el análisis de la geomorfología de las capas superficiales presentes en el Cerro Pucruchacra. Siguiendo la clasificación por áreas definida anteriormente y los colores establecidos en la escala (rojo, suelos de menor espesor y azul, suelos de mayor espesor), se tiene las siguientes características:

.- Área 1 (extremo superior, Zona Norte), los espesores de la capa superficial varían entre 10 y 14 metros, llegándose a incrementar hasta 20 metros conforme se tiene hacia el Canal de Aducción.

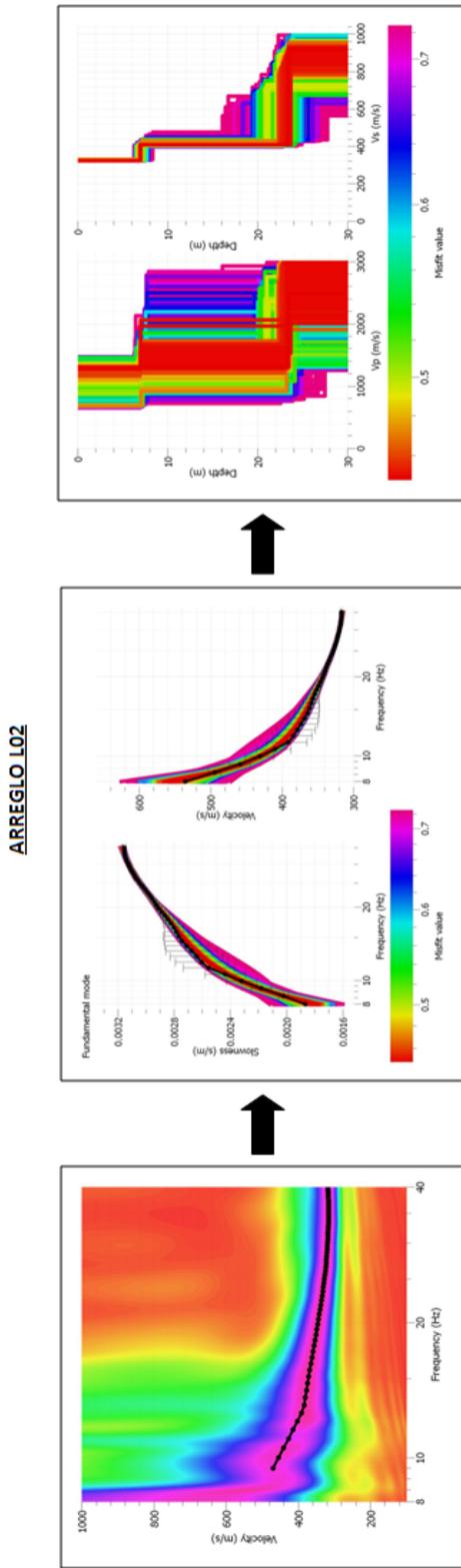


Fig. 1. Imagen de Dispersión

Fig. 2. Curva de Dispersión

Fig. 3. Perfiles de Suelo

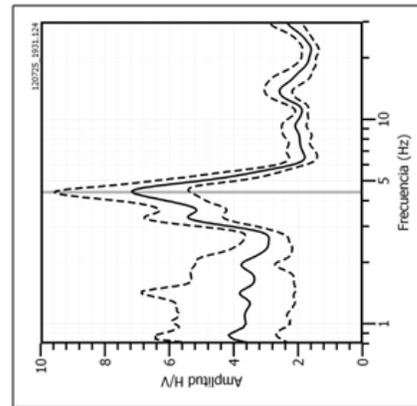


Fig. 5. Punto cercano H/V_ Sm074

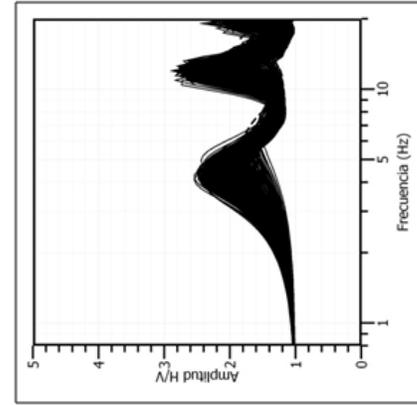


Fig. 4. Inversión de la Inversión H/V



Figura 56: Análisis e interpretación geofísica de los arreglos obtenidos con el método MASW para el arreglo L02

- .- **Área 2** (extremo superior, Zona Sur), el espesor de la capa sedimentaria varía entre 14 y 26 metros.
- .- **Área 3** (extremo inferior entre las Zonas Norte y Sur), el espesor de la capa sedimentaria es mínima.
- .- **Área 4** (parte baja del área de estudio, por debajo de la Carretera Central), los espesores de la capa sedimentaria varían entre 25 a 50 metros

De acuerdo a la geomorfología del área de estudio y a los resultados obtenidos, se establecen las siguientes apreciaciones:

.- En el mapa de iso-espesores (Figura 57), se observa que la parte baja de la ladera central del Cerro Pucruyacra (costado de la quebrada Pucruyacra), se tiene la presencia de dos áreas donde la capa sedimentaria presenta menor espesor, lo cual sugiere la presencia de posibles afloramientos rocosos separados por una área de transición vinculada con un mayor espesor del medio sedimentario. Por otro lado, la distribución de espesores y velocidades sugieren que el extremo superior de la Zona Sur experimenta mecanismos de extensión y su extremo inferior, mecanismos de compresión, por considerar está última los mayores espesores y velocidades. Según el mapa, las zonas rocosas se encuentran en los bordes del área de estudio, todas definidas con tonalidades de color rojo (Figura 57).

.- De acuerdo a la distribución de espesores de la capa sedimentaria sobre la ladera del Cerro Pucruyacra, en el extremo superior del Área-2 (Zona Sur) existe un área cuya capa sedimentaria es de mayor espesor permitiendo que la misma tenga un comportamiento inestable.

.- La distribución de los iso-espesores revelan que la geomorfología de la superficie de contacto, entre la capa sedimentaria superficial (no consolidada) y la base rocosa, presenta dos concavidades con diferentes espesores delimitadas por la Quebrada Pucruyacra (Zonas Norte y Sur). La capa sedimentaria de mayor espesor se encuentra en la Zona Sur (Área-2) y el menor en la Zona Norte (Área-1). La capa sedimentaria en el Área-2, presenta una geometría alargada paralela a la Quebrada Pucruyacra. Hacia el extremo Este del Cerro Pucruyacra (por debajo de la Carretera Central), en las zonas más llanas, los espesores de las capas son considerablemente mayores, evidenciando que sobre estas zonas se asienta la mayor cantidad de material deslizado del cerro de Pucruyacra.

- En general, la capa sedimentaria superficial incrementa su espesor conforme tiende hacia las partes bajas (Carretera Central), aunque en algunas áreas, de manera puntual, se observa que la capa sedimentaria disminuye su espesor debido probablemente a la presencia de afloramientos rocosos que sirven de soporte transitorio a posibles procesos dinámicos.

A fin de realizar un análisis más detallado, sobre el mapa de iso-espesores se ha procedido a elaborar 6 perfiles topográficos (Figura 57), tres de ellos siguen las cotas de la topografía y los otros tres, son perpendiculares a las mismas. En cada perfil, se indica la morfología de la capa superficial no consolidada y la interface en profundidad con la siguiente capa.

.- **Corte C1** (Figura 58), se encuentra a lo largo de la pendiente de la denominada Zona Sur (Área -2). En el extremo superior de la ladera, el espesor de la capa sedimentaria superficial fluctúa alrededor de los 20 metros, en la parte media de la ladera sobre la proyección del canal de conducción y próximo al macizo rocoso, el espesor es relativamente menor, y por debajo de la Carretera Central, el espesor es del orden de 40 metros.

.- **Corte C2** (Figura 58), se encuentra entre las Zonas Sur (Área -2) y Norte (Área -1) del área de estudio. Aquí, el espesor de la capa sedimentaria superficial va decreciendo desde su extremo más alto hacia la parte media del mismo. Entre la cota de 3150 msnm y 3180 msnm, el espesor de la capa sedimentaria se incrementa hasta 25 metros para luego disminuir rápidamente conforme tiende a la cota de 3110 msnm. Por debajo de la Carretera Central, la capa sedimentaria alcanza espesores del orden de 40 metros.

.- **Corte C3** (Figura 59), se encuentra a lo largo de la pendiente de la denominada Zona Norte (Área -1). En la parte superior y media de la ladera, el espesor de la capa sedimentaria superficial presenta espesores que fluctúa alrededor de 18 metros y su parte media entre 18-20 metros. Por debajo de la Carretera Central, el espesor de la capa sedimentaria es del orden de 40 metros.

.- **Corte C4** (Figura 59), corresponde al extremo inferior del área de estudio, sobre la cota 3175m.s.n.m. Aquí, el espesor de la capa sedimentaria, en su extremo sur, es del orden de los 30 metros y hacia su extremo norte, de

aproximadamente 20 metros. Asimismo, la superficie de interface entre la capa superficial y la siguiente capa en profundidad, muestra la base de dos subcuencas separadas por una zona en donde el espesor de la capa sedimentaria es mínimo. Además, hacia el extremo sur, el espesor de las capas sedimentaria disminuye rápidamente, contrario a lo observado en la Zona Norte.

.- **Corte C5** (Figura 60), considera la parte media del Cerro Pucruchacra, sobre la cota 3200m.s.n.m. Aquí se observa claramente que el espesor de la capa sedimentaria se incrementa de norte a sur. En el extremo del Área 1, cerca al canal de abducción, el espesor de la capa sedimentaria es mínima y actúa como limite entre la roca y la capa sedimentaria.

.- **Corte C6** (Figura 60), se encuentra en el extremo superior del Cerro Pucruchacra, sobre la cota 3255m.s.n.m. Aquí se observa una cierta uniformidad en el espesor de la capa sedimentaria, llegando a fluctuar con espesores entre 15 a 20 metros.

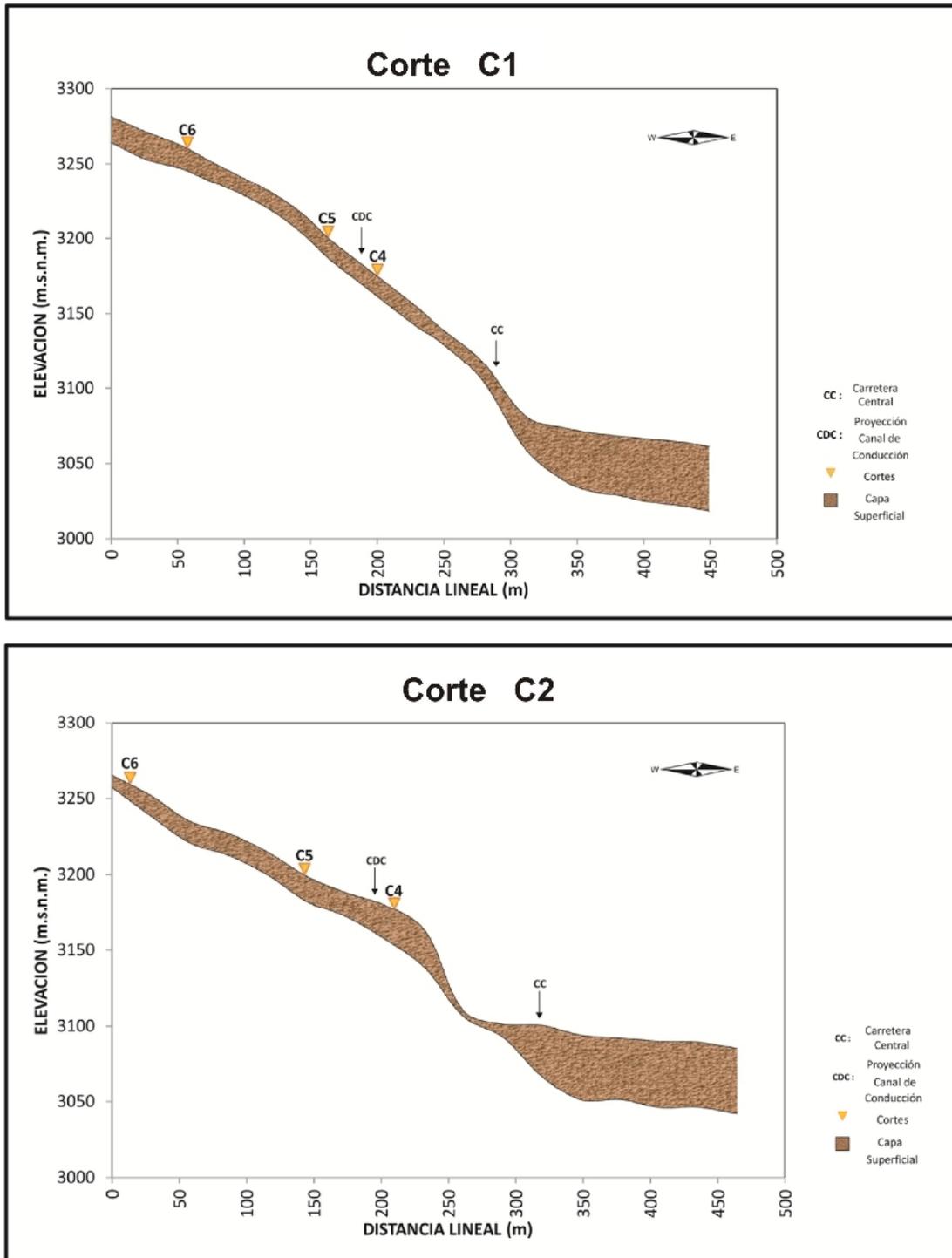


Figura 58: Cortes topográficos perpendiculares a las cotas en el Cerro Pucruchacra. Para identificar C1, C2 y C3, ver Figura 57.

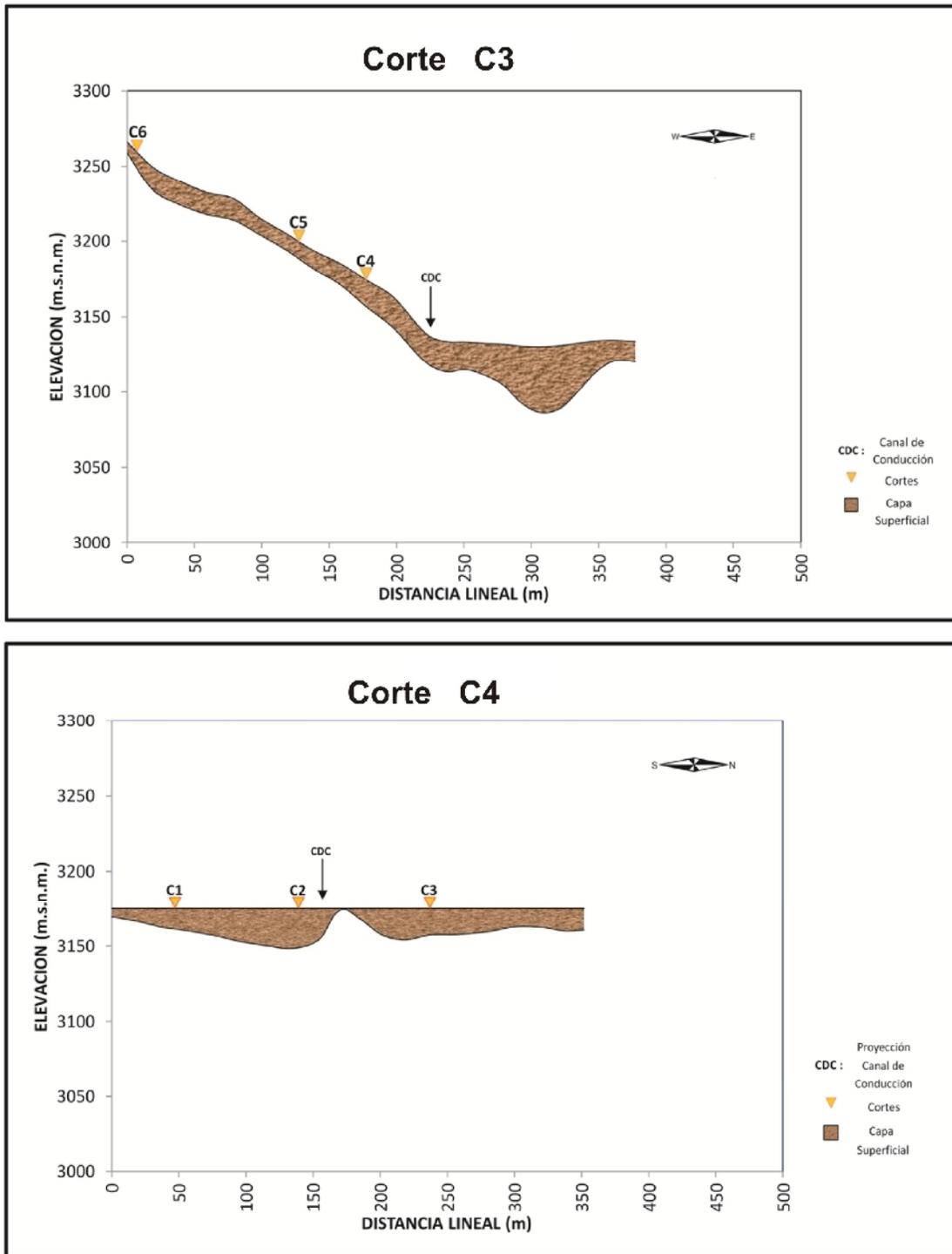


Figura 59: Cortes topográficos perpendiculares a las cotas del Cerro Pucruchacra. Para identificar C1, C2 y C3, ver Figura 57.

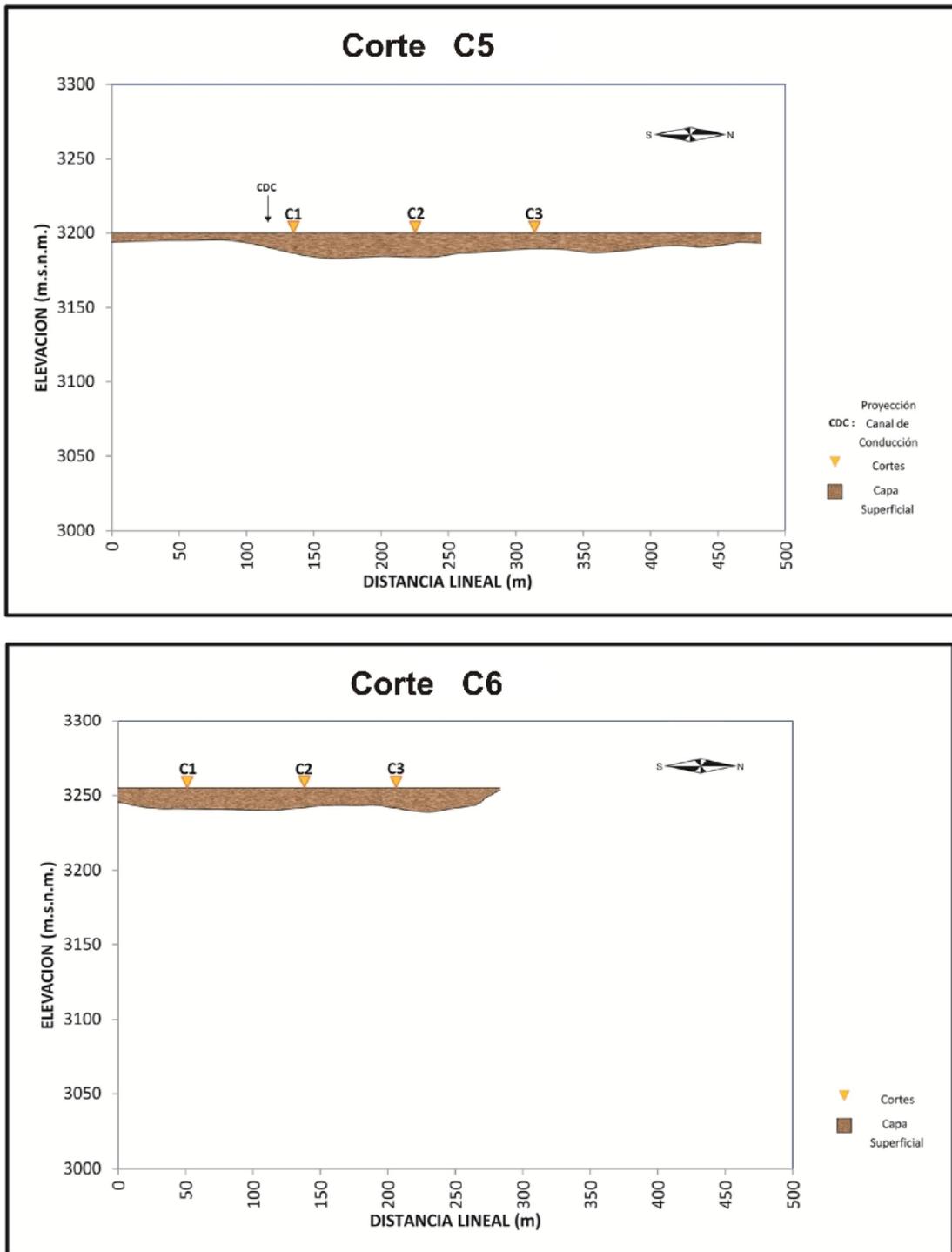


Figura 60: Cortes topográficos paralelos a las cotas del Cerro Pucruchacra. Para identificar C4, C5 y C6, ver Figura 57.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la geomorfología del área de estudio presenta una pendiente importante y revela condiciones apropiadas para el desarrollo de cualquier proceso dinámico asociado a posibles deslizamientos de material inestable. La superficie de contacto entre la capa superficial sedimentaria (no consolidada) y la capa profunda (suelo duro), muestra la existencia de dos concavidades con diferente nivel de profundidad, ambas separadas por la Quebrada de Pucruhacra (llamadas Zona Norte y Sur, INDECI) y delimitadas por un macizo rocoso que bordea toda el área de estudio.

En la parte baja de la ladera central del Cerro Pucruhacra (costado de la quebrada Pucruhacra), se identifica la presencia de dos áreas donde la capa sedimentaria presenta menor espesor, lo cual sugiere la presencia de posibles afloramientos rocosos separados por una área de transición vinculada con un mayor espesor del medio sedimentario. Por otro lado, la distribución de espesores y velocidades sugieren que el extremo superior de la Zona Sur experimenta mecanismos de extensión y su extremo inferior, mecanismos de compresión, por considerar está última los mayores espesores y velocidades.

Finalmente, a partir del mapa de iso-espesores y de los cortes realizados, se ha estimado el área total del material susceptible a deslizamiento en 68965 m^2 , con espesores promedio del orden de 18-25 metros. Por otro lado, el volumen de la capa sedimentaria propensa a posibles deslizamientos alcanzaría volúmenes entre 1241370 y 158619 m^3 .

6.4.- Tomografía Eléctrica

La tomografía eléctrica es un método geofísico que proporciona información sobre las propiedades físicas del subsuelo mediante la evaluación del parámetro de resistividad del mismo al paso de la corriente eléctrica. Para tal fin, se explota las propiedades del suelo asociadas a su porosidad, nivel de saturación en agua, grado de litificación y composición mineralógica, haciendo de la tomografía como la herramienta más adecuada para definir características hidrogeológicas del terreno a lo largo de cortes geo-eléctricos. El resultado final, es una imagen en 2D, distancia-profundidad, que muestra la resistividad real del subsuelo asociado a la presencia de capas y superficies con mayor o menor contenido de agua.

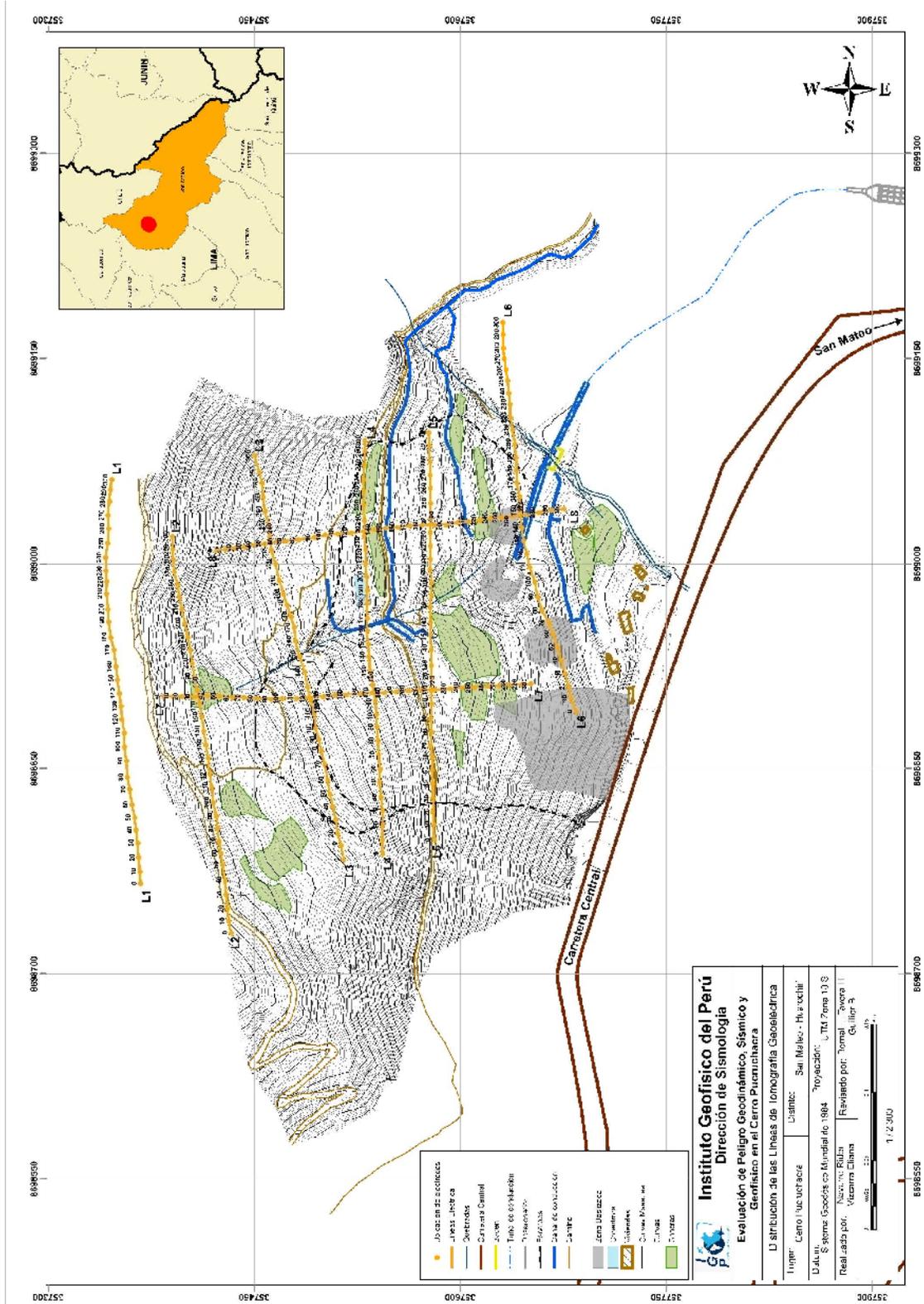


Figura 61: Distribución espacial de las secciones de tomografía geo-eléctrica.

En el área de estudio se ha realizado 8 secciones de tomografía eléctrica distribuidas según la Figura 61 y su interpretación está en función del análisis del gradiente de resistividades en cada una de los cortes geo-eléctricos, así como de los mapas de resistividades a diferentes profundidades. Para el procesamiento de la información se ha hecho uso de los algoritmos de inversión DCIP2D y OASIS MONTAJ que permiten conocer la variación del valor de resistividad en toda el área de estudio.

En general, se ha observado que en toda el área de estudio las resistividades varían, desde los 80 Ohm-m hasta los 800 Ohm-m, lo cual es indicativo de la existencia de un ambiente geológico muy complejo. Se tiene que considerar que la resistividad real para un determinado medio varía en todas las direcciones debido a la anisotropía y heterogeneidad del subsuelo. A continuación, se realiza el análisis y descripción de las principales características observadas en todas las secciones de tomografía eléctrica, considerando términos cualitativos y cuantitativos que han permitido diferenciar las principales zonas de saturación de agua debido a su baja resistividad como respuesta al fuerte fracturamiento y permeabilidad existente en el subsuelo.

- Secciones Geo-eléctricas L1, L2 y L3 (Figura 62): La sección L1 se caracteriza por presentar áreas de resistividades bajas del orden de 200 Ohm-m en las proximidades de las estaciones 40 y 220, estando posiblemente relacionadas con la presencia de material grano grueso no consolidado. La sección L2 exhibe un horizonte de resistividades altas, mayores a 400 Ohm-m en superficie, con potencias que van entre 10 a 40 metros aproximadamente, está constituido por material permeable no consolidado y ausente de humedad; subyacente a este; se observa un horizonte con resistividades moderadas a bajas con una potencia promedio de 40 metros caracterizado por presentar un fuerte fracturamiento, situación que permite definir la presencia de zonas de saturación de agua. En profundidad se observa un horizonte de resistividad alta (>200 Ohm-m) relacionado posiblemente a un material compacto e impermeable (basamento rocoso). Para la sección L3 se define un horizonte de resistividades altas, mayor a 400 Ohm-m, relacionados con material poco consolidado y no saturado que sobreyace a una capa con resistividades que van de moderadas a bajas (<120 Ohm-m) y a otra permeable y saturada fuertemente fracturada. En profundidad las resistividades incrementan (mayores a 250 Ohm-m) y definen la presencia de materiales más consolidados, posiblemente el basamento rocoso.

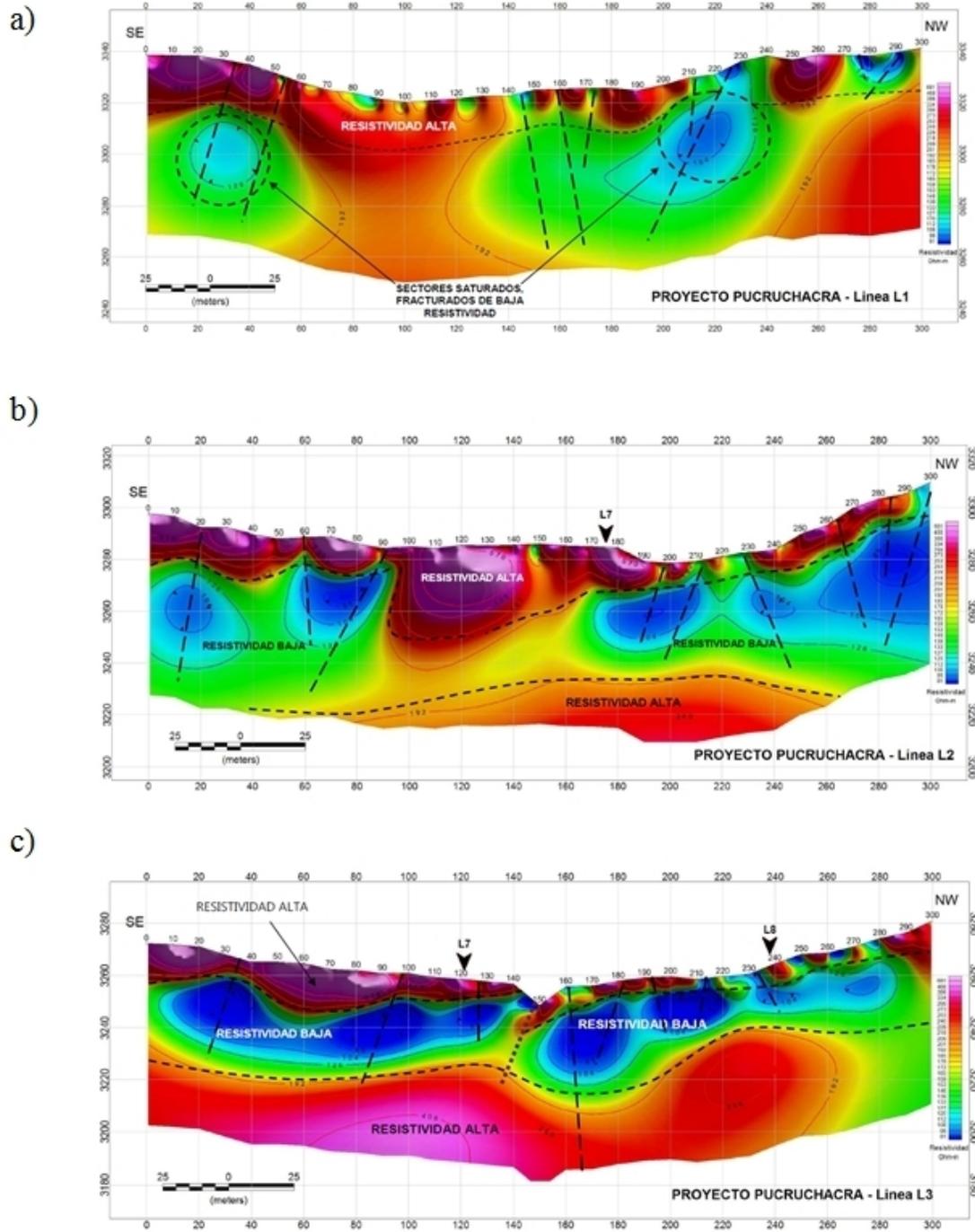


Figura 62: Secciones Geo-eléctricas codificadas como: L1 (a.), L2 (b.) y L3 (c),

.- Secciones Geo-eléctricas L4, L5 y L6 (Figura 63): La Sección L4 presenta características semejantes a las descritas anteriormente, con resistividades altas en superficie seguidas de una resistividad moderada-baja debido a su mayor grado de permeabilidad y que sobreyacen a una capa impermeable con resistividades mayores a 200 Ohm-m relacionada posiblemente al basamento rocoso. Es posible que este basamento se encuentre fuertemente fracturado y alterado en las proximidades de las estaciones 170 a 220, lo que se muestra en el cambio de resistividades de altas a moderadas; es decir, la presencia de una discontinuidad como efecto de su grado de alteración. La sección L5, muestra entre las estaciones 150 a 210, un área dominada por resistividad baja y relacionada posiblemente a materiales fuertemente fracturados y alterados con presencia de humedad. La sección L6 se encuentra dominada por resistividades bajas en su parte central y con valores menores a los 100 Ohm-m característico de zonas saturadas y relacionadas a filtraciones de canales de regadío cercanas a esta. La capa esta limitada en profundidad por otra impermeable con resistividades mayores a 200 Ohm-m. En la estación 190 se define un lineamiento geo-eléctrico relacionado posiblemente a fracturas presentes en el área (fallas?).

.- Secciones Geo-eléctricas L7 y L8 (Figura 64): Ambas secciones son transversales a las curvas de nivel y corroboran lo ya mostrado en las secciones longitudinales. Estas secciones se caracterizan por presentar un horizonte de resistividad alta con una potencia no mayor a los 20 metros, sobreyaciendo a este horizonte uno de baja resistividad. En la parte más profunda se identifica un horizonte de alta resistividad que reflejaría la presencia de material compacto e impermeable. Entre las estaciones 240 a 300 se observa la presencia de una región (circulo con línea punteada) dominada por resistividades bajas y con una potencia mayor al resto del horizonte, lo cual evidencia la presencia de una zona con material no consolidado, permeable y con presencia de humedad

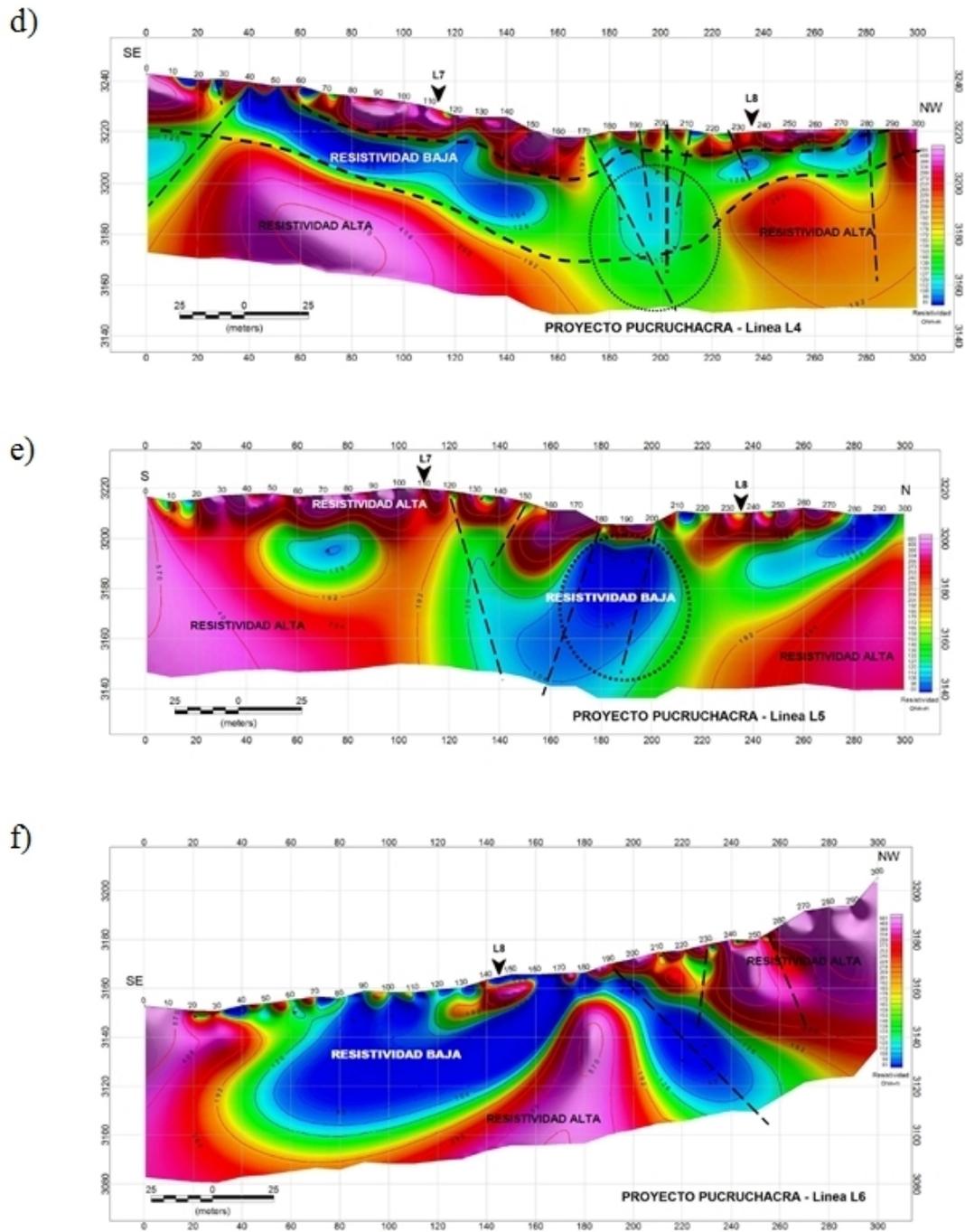


Figura 63: Secciones Geoeléctricas codificadas como: L4 (a.), L5 (b.) y L6 (c).

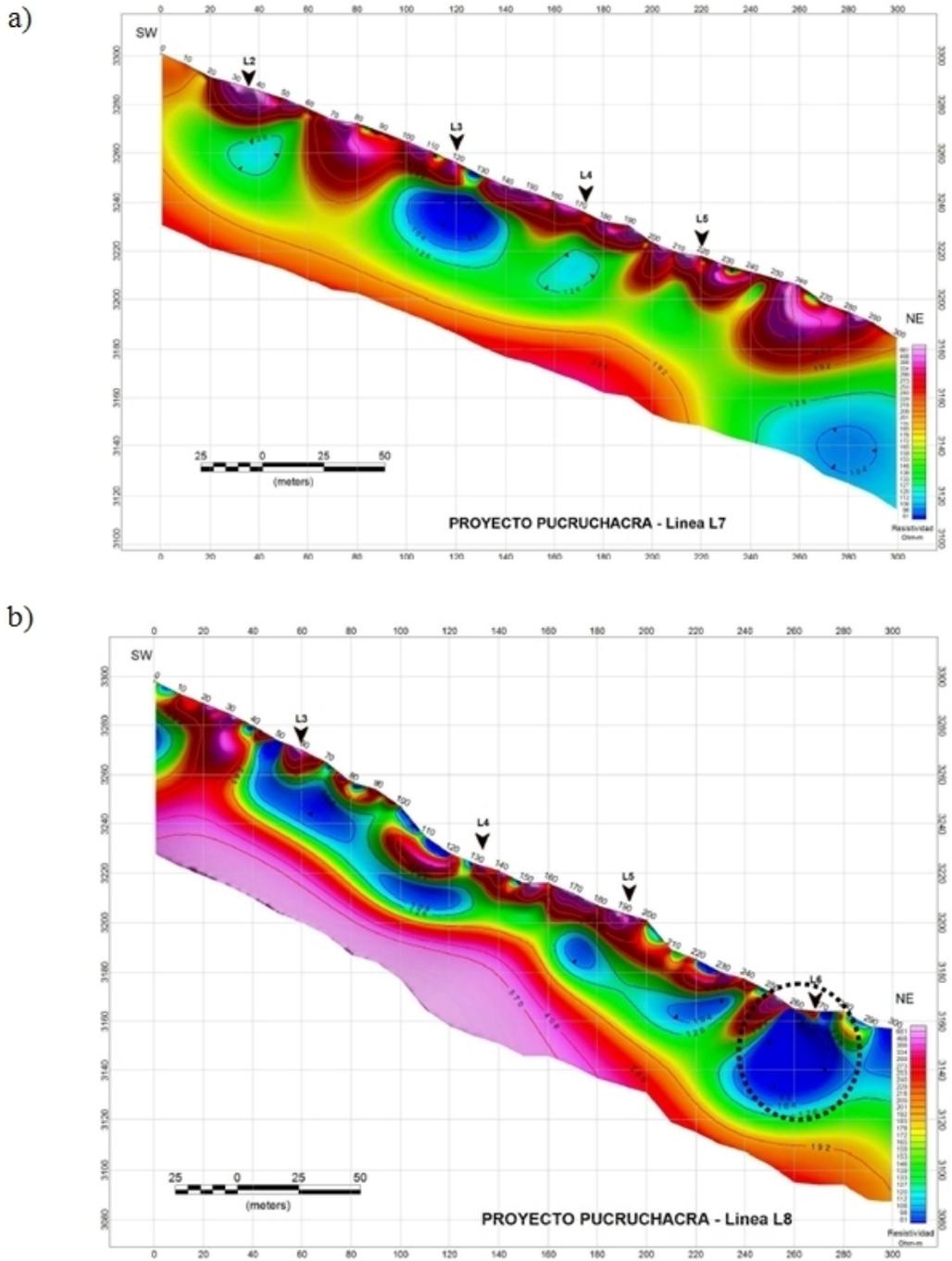


Figura 64: Secciones Geo-eléctricas codificadas como: L7 (a.) y L8 (b.).

6.5.- Hidrología

Con la finalidad de identificar y documentar la causa o causas hidrológicas e hidrogeológicas que pudieran producir la desestabilización de la ladera del Cerro Pucruyacra, se procede a realizar el modelado conceptual del flujo del agua subterránea presente en el área de estudio y para ello, se requiere conocer las características hidrogeológicas y de permeabilidad de los suelos o de los materiales que lo conforman. Para este fin, se utilizó la información proveniente de 8 secciones geológicas-geotécnicas, así como los valores que definen la permeabilidad de los suelos (Geofísica Consultores, 2012). El modelo definido para el cálculo hace uso de las secciones geo-eléctricas denominadas como sección 7-7' y sección 8-8' (Figura 64), además de algoritmos de inversión (Slide 5.0) que hacen uso de elementos finitos para conocer la presión de poros, caudales de infiltración, líneas de flujo, líneas equipotenciales, etc. Los resultados obtenidos para el Cerro Pucruyacra son presentados en la Figura 65 y sus características son:

.- **Para la Sección 7-7'** (Zona Norte): se presenta la malla de elementos finitos usada para el análisis de filtraciones (A-1), la distribución de las líneas de igual carga de presión de agua (A-2) y la distribución de las líneas equipotenciales (A-3). En conjunto, se demuestra que el caudal de ingreso a la ladera, aguas arriba, donde parece iniciarse el deslizamiento activo, es igual a $0.00016616 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. ($0.166 \text{ l/s}/\text{m}$), con un caudal de infiltración hacia aguas debajo atravesando en mayor proporción la capa fracturada de andesita argilizada. La posición del nivel freático se estima en 6.6 m de profundidad en el ingreso. El caudal de infiltración de salida se reporta en $0.0001692 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($0.169 \text{ l/s}/\text{m}$), siendo la posición del nivel freático de salida a 20.5 m. de profundidad. Se debe resaltar que el mayor flujo de aguas subterráneas discurren por la capa de andesita argilizada fracturada (material 2); mientras que, en la capa de andesita argilizada compacta (materiales 3 y 4) no se observa flujo alguno en profundidad.

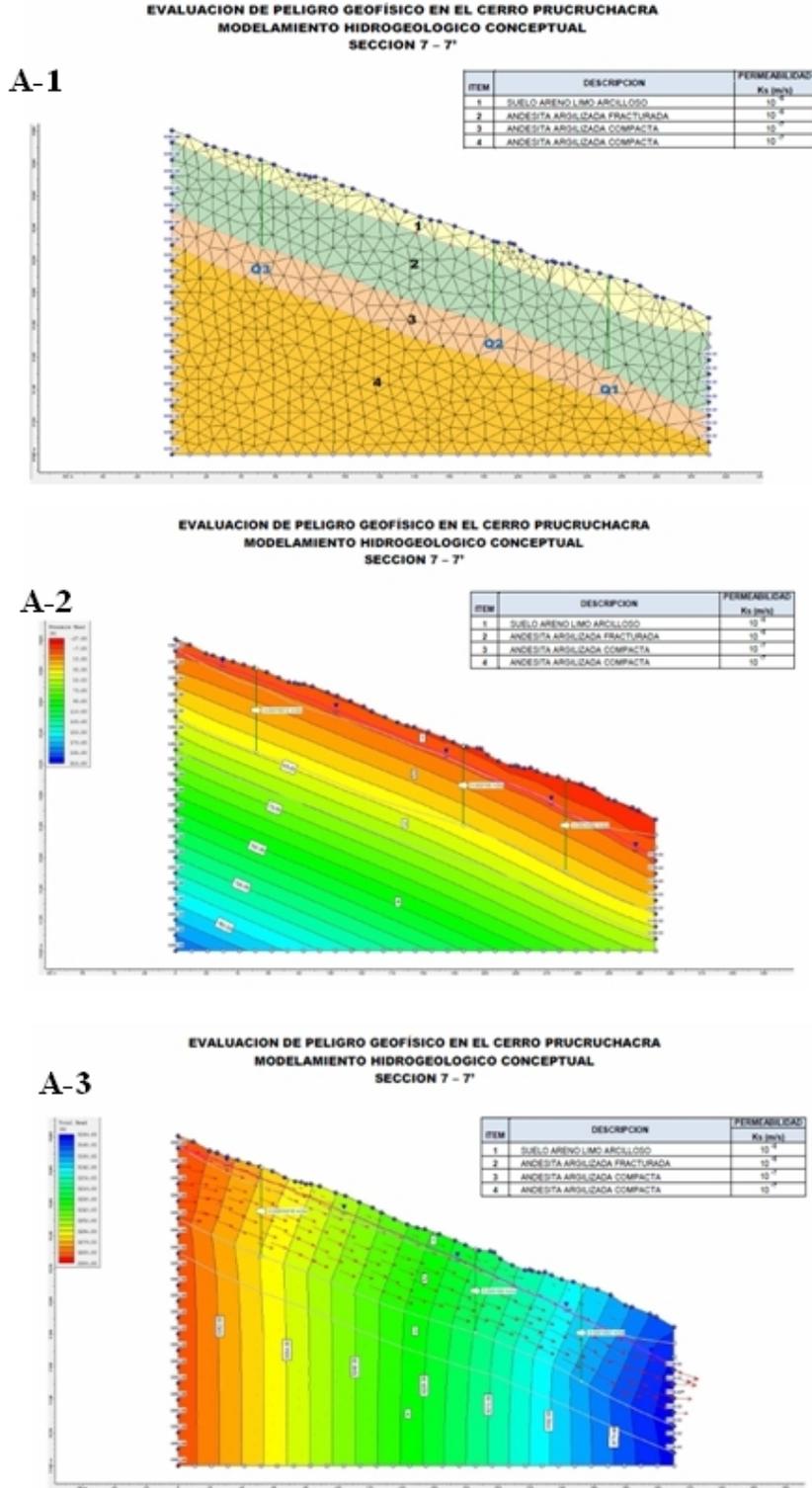


Figura 65: Resultados obtenidos con el modelado conceptual del flujo del agua subterránea en el Cerro Pucruchacra considerando las secciones 7- 7'(A) y 8-8'(B) definidas en los estudios geofísicos. En ambos casos, se presenta la malla de elementos finitos usada para el análisis de filtraciones (A-1/B-1), la distribución de las líneas de igual carga de presión de agua (A-2/B-2) y la distribución de las líneas equipotenciales (A-3/B-3).

.- **Para la Sección 8–8'** (Zona Sur): Se presenta la malla de elementos finitos usada para el análisis de filtraciones (B-1), la distribución de las líneas de igual carga de presión de agua (B-2) y la distribución de las líneas equipotenciales (B-3). En conjunto se demuestra que el caudal de ingreso de la ladera, aguas arriba, donde parece iniciarse el deslizamiento activo es igual a $0.00010661 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$., con un caudal de infiltración hacia aguas debajo de $0.107 \text{ l/s}/\text{m}$, atravesando en mayor proporción la capa fracturada de andesita argilizada. La posición del nivel freático se estima en 15.0 m . de profundidad en el ingreso. El caudal de infiltración de salida se reporta en $0.0001259 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($0.126 \text{ l/s}/\text{m}$) y la posición del nivel freático de salida se estima en 12.0 m . de profundidad, adyacente al canal de la central hidroeléctrica. Se debe resaltar que el mayor flujo de las aguas subterráneas discurren por la capa de andesita argilizada fracturada (material 2); mientras que, en la capa de andesita argilizada compacta (materiales 3 y 4) no se observa flujo alguno en profundidad.

Estos resultados fueron correlacionados con la información proveniente de 2 piezómetros instalados sobre la zona analizada, siendo la única información disponible ya que no se cuenta con reportes del nivel freático; por lo tanto, no se puede establecer modelos hidrogeológicos de detalle. Por otro lado, es necesario indicar que la composición de la capa superficial sedimentaria es heterogénea, variando desde arcilla hasta grava; por lo tanto, su permeabilidad, también es variable y va desde media a alta. El basamento rocoso, debido al intenso fracturamiento que presenta, tiene una permeabilidad media a alta, debido a que las condiciones geológicas e hidrológicas son favorables para las filtraciones y circulación del agua de lluvia e irrigación.

Desde el punto de vista hidrogeológico se debe considerar al agua como agente principal para la generación de los movimientos en masa. Los materiales deslizantes, de naturaleza heterogénea y poco a no consolidados, facilitan la saturación del agua y aumentan los procesos de la inestabilidad. En la parte alta del Cerro Pucruchacra se ha identificado la presencia de afloramientos de rocas volcánico–sedimentario que corresponden a acuíferos fisurados. Por otro lado, se sabe que las grietas presentes en el depósito coluvial aparecieron en el mes de diciembre del 2010 debido a la ocurrencia de precipitaciones del orden de 134 mm , valor más alto registrado en los meses de diciembre de los últimos 25 años, entonces es posible afirmar, que las precipitaciones fueron un factor importante en el origen de dichas grietas.

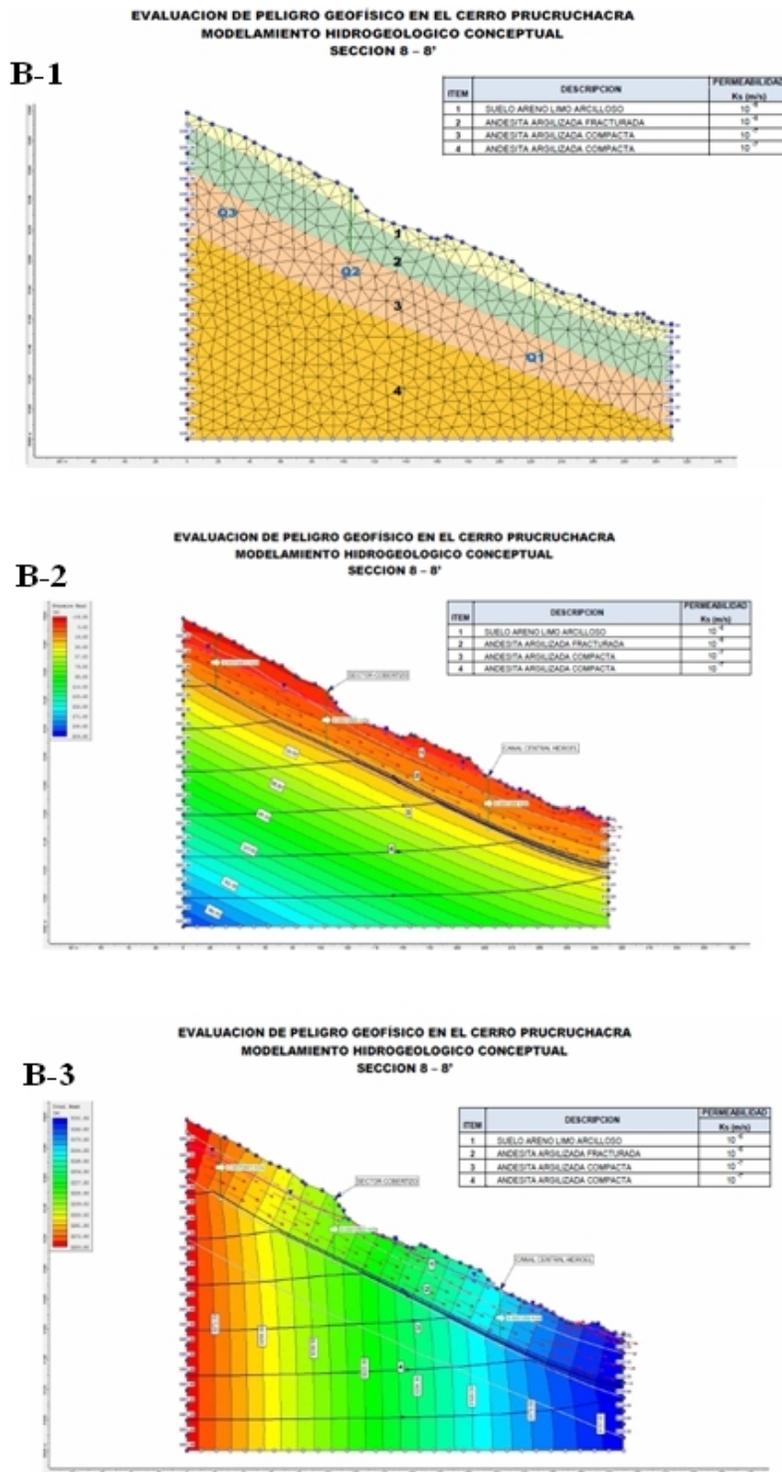


Figura 65: ...// Continuación

7.- ANALISIS DE ESTABILIDAD

Para el análisis de la estabilidad de la capa sedimentaria presente en el Cerro Pucruyacra, se hace uso de los resultados obtenidos en los estudios de H/V, Refracción Sísmica, tomografía geo-eléctrica (Secciones 7-7' y 8-8') e hidrología. Asimismo, se considera las propiedades geotécnicas de los suelos y rocas definidas en los estudios realizados por SVS INGENIEROS S.A.C. Las propiedades físicas de estos suelos se describen en la Tabla 9.

Tabla 9: Propiedades del suelo de la zona de cobertura

ITEM	DESCRIPCION	PESO UNITARIO (KN/m ³)	COHESIÓN C (KN/m ²)	ANGULO DE FRICCIÓN (°)	PERMEABILIDAD
					Ks (m/s)
1	SUELO ARENO LIMO ARCILLOSO	18.2	2	25	10 ⁻⁵
2	ANDESITA ARGILIZADA FRACTURADA	24	100	35	10 ⁻³
3	ANDESITA ARGILIZADA COMPACTA	24	300	38	10 ⁻⁷

El análisis de estabilidad de un talud considera para los Factores de Seguridad (FS) valores iguales a 1 a fin de definir el estado de equilibrio límite. Un talud estable, de acuerdo al criterio del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) y del Ministerio de Energía y Minas (MEM), se presenta cuando los valores de los factores de seguridad mínimos establecidos son:

- Factor de seguridad (FS) mínimo para condiciones estáticas: 1.5
Estática: sin actividad sísmica
- Factor de seguridad (FS) mínimo para condiciones pseudo-estáticas: 1.0
Pseudo-estática: con actividad sísmica y coeficiente sísmico horizontal de 0.2g.

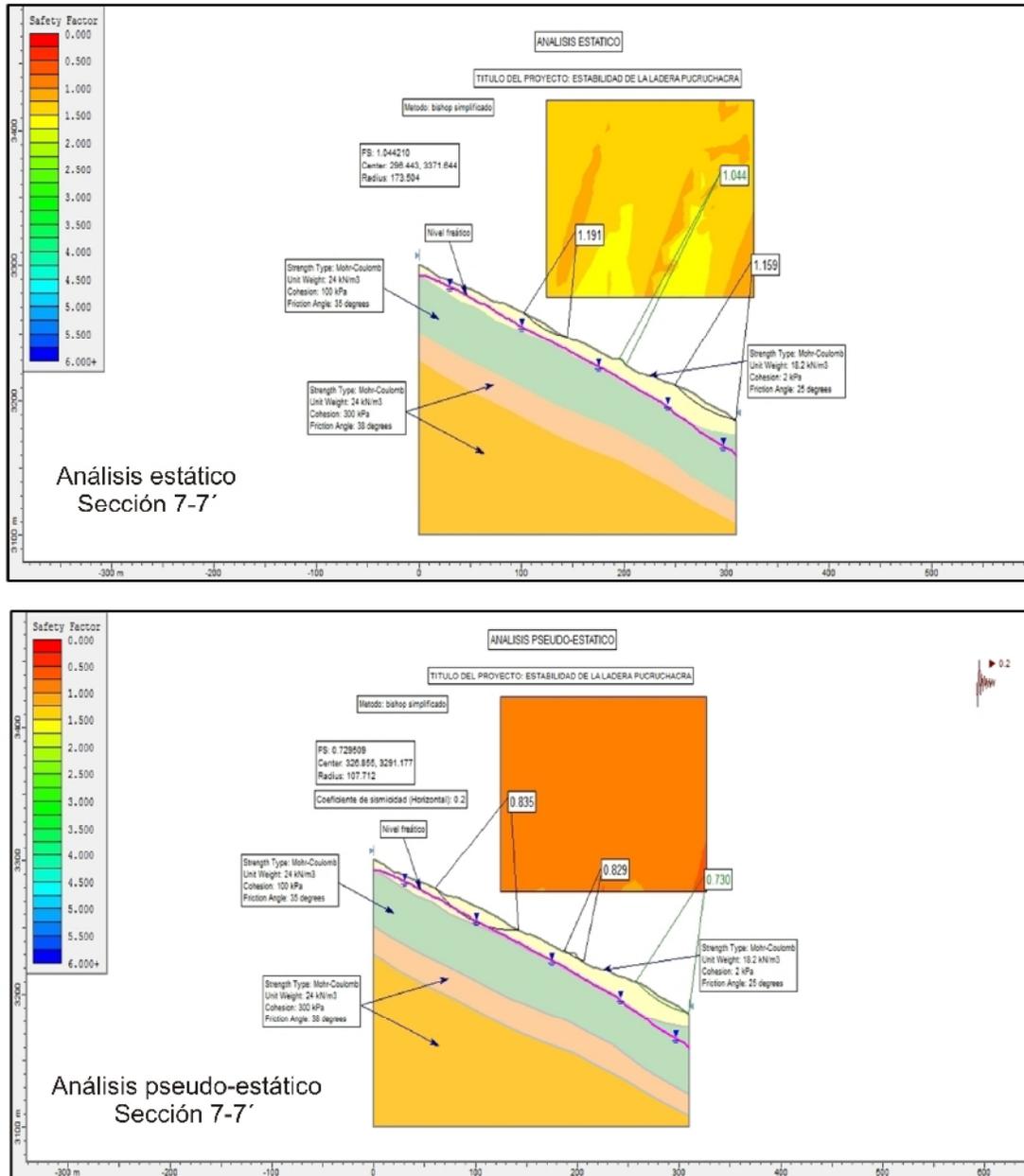


Figura 66: Análisis estático y pseudo-estático para la Sección 7-7'

En la Sección 7-7' (Figura 66) se determinó un factor de seguridad de 1,044 en estado estático y un factor de seguridad de 0.729 en estado pseudo-estático con un coeficiente sísmico de 0.2. Estos resultados indican que la ladera en condiciones estáticas está en equilibrio límite, pero con inminente deslizamiento, en caso de sismo. Según la Sección 7-7', el área con potencial de inestabilidad es de 1 203 m² y el volumen de 50 000 m³.

En la sección 8-8' (Figura 67) se determinó un factor de seguridad de 0,778 en estado estático y un factor de seguridad de 0.491 en estado pseudo-estático con un coeficiente sísmico de 0.2. Estos resultados indican que la ladera en condiciones estáticas está en condición inestable, situación que se incrementa con la ocurrencia de sismos. Según la sección 8-8', el área con potencial de inestabilidad es de 624 m² y el volumen de 26160 m³.

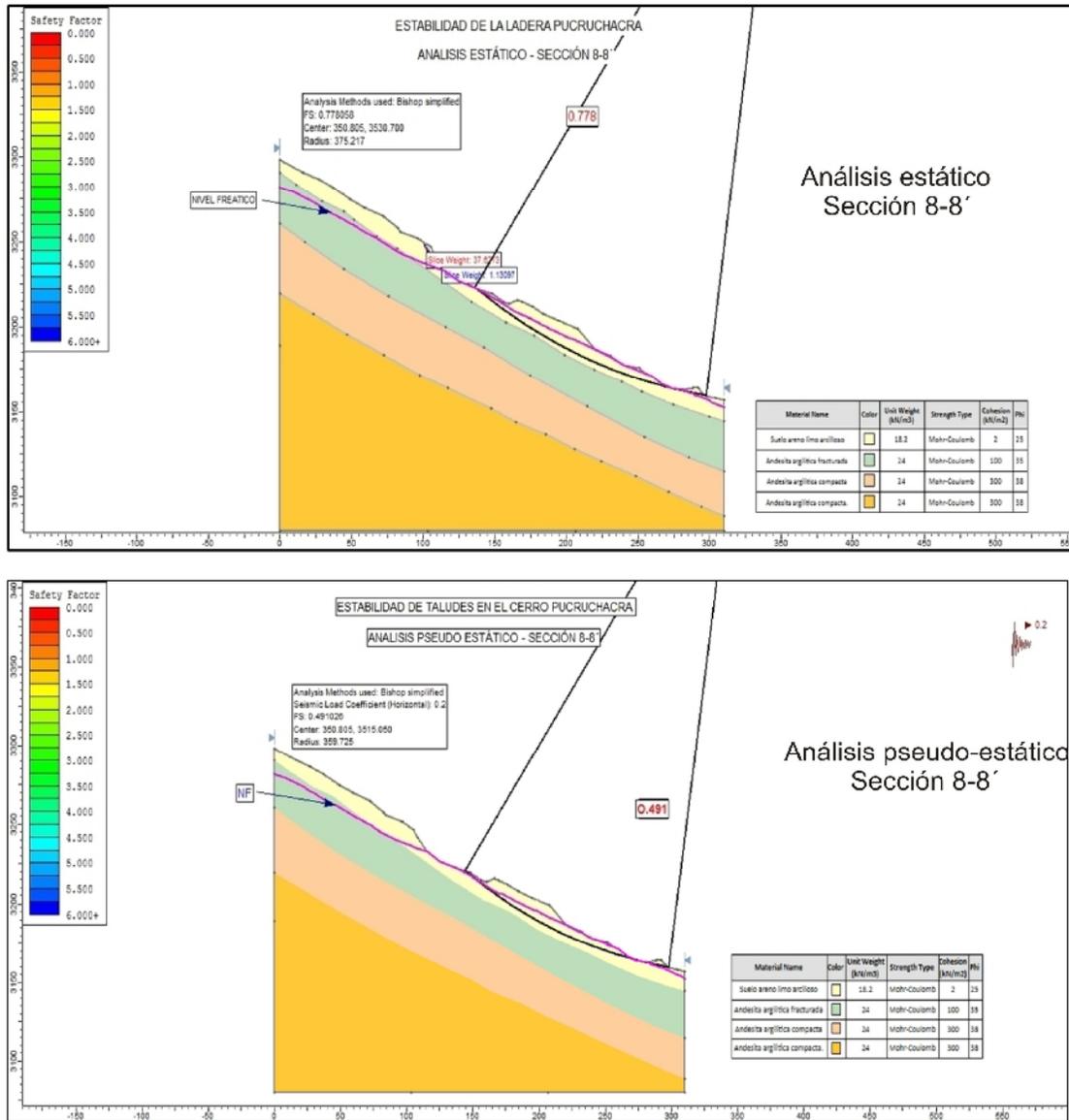


Figura 67: Análisis estático y pseudo-estático para la Sección 8-8'

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES GENERALES

- 1.- La evaluación geodinámica, sísmica y geofísica realizada en la ladera del Cerro Pucruchacra ha permitido estimar para la capa sedimentaria no consolidada espesores variables entre 18 y 25 metros, definiendo un volumen de material susceptible a algún tipo de deslizamiento (movimiento en masa) de 1.5 millones de metros cúbicos.
- 2.- En la ladera del Cerro Pucruchacra la estabilidad de la capa sedimentaria es crítica (coeficiente de seguridad menor a 1.0), siendo el material con mayor potencial a deslizarse (movimiento en masa) equivalente a volúmenes de aproximadamente 50 y 28 mil metros cúbicos para las Zonas Sur y Norte respectivamente.
- 3.- En el área de estudio existen elementos detonadores naturales (sismos y lluvias) y antrópicos (regadíos) que facilitarían el desarrollo de cualquier proceso dinámico activo.
- 4.- Se recomienda tomar las medidas de mitigación bajo la premisa de que el deslizamiento de 50 mil o 28 mil metros cúbicos es muy probable.

CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

- 1.- Se distinguen 3 unidades geomorfológicas diferenciadas por sus pendientes: Laderas empinadas mayor a 35° que se encuentran en la parte alta (Zona Norte) y baja de la ladera (Zona Sur), terrazas menores a 25 ° en la parte baja de la zona norte y laderas de pendiente media entre los 25° - 35° en la parte media de la Zonas Norte- Sur.
- 2.- Se ha observado 2 tipos de movimientos en masa producto de la interacción de factores litológicos, morfológicos y climáticos: 4 deslizamientos en zonas de pendientes empinadas y 2 de flujos de detritos presentes en la quebrada Pucruchacra.

- 3.- Los análisis de estabilidad de taludes, según a los factores de seguridad en estado estático indican que las laderas están por debajo del equilibrio límite y en estado pseudo-estático, bajo condiciones sísmicas sería inestable y provocaría el desprendimiento y empujes de suelo sobre el canal aductor y la Carretera Central.
- 4.- Los resultados obtenidos, a partir del análisis espectral (H/V) y distribución espacial de las frecuencias predominantes, han permitido identificar la presencia de cuatro áreas donde las frecuencias presentan homogeneidad en sus resultados:

Área 1: Con predominio de frecuencias que fluctúan entre 5.0-7.0 Hz.

Área 2: Con predominio de frecuencias que fluctúan entre 4.0-6.0 Hz.

Área 3: En esta área no se identifico frecuencias predominantes.

Área 4: Con predominio de frecuencias que fluctúan entre 2.0-4.0 Hz.

Esta distribución sugiere, que la capa superficial es más potente en el Área 2 con respecto al Área 1, ambas separadas por la quebrada de Pucruchacra. En el Área 3 que observa la presencia de una capa de menor espesor asociada probablemente a un afloramiento rocoso.

- 5.- Del análisis de los registros obtenidos con los arreglos sísmicos lineales, se evidenció que no existe amplificación topográfica a excepción de lo observado para Arreglo 5; es decir, la presencia de una ligera amplificación en el rango de frecuencias de 3.7-4.3 Hz. Este arreglo corresponde a la cabecera de la Zona Sur del Cerro Pucruchacra.

Se evidencia correspondencia entre el rango de frecuencias predominantes de la capa sedimentaria superficial (no consolidado) y el rango de frecuencias que presenta amplificación topográfica. Estos resultados se condicionan para experimentar efectos de resonancia ante la incidencia de ondas sísmicas generadas por sismos de magnitud regular.

- 6.- Según los perfiles de velocidad obtenidos con el método MASW, en el área de estudio se diferencia la existencia de dos capas: la primera capa superficial con velocidades V_s de 200 - 250 m/s correspondiente a suelos blandos a duros, cuyo espesores que fluctúan entre 6-14 metros de potencia. La segunda capa con

velocidades V_s de 300-400m/s predominantemente entre la zona media del cerro hacia la corona y de 380-500m/s en la zona media del cerro hacia la base, correspondiendo a suelos duros a muy duros (roca fracturada) respectivamente. El espesor de estos suelos fluctúa entre 10 y 25 metros para luego incrementarse de Oeste a Este. La superficie de contacto con la siguiente capa o el semi-espacio alcanza velocidades V_s de hasta 800 m/s.

- 7.- El mapa iso-espesores permite definir con mayor claridad el espesor de la capa superficial sedimentaria y la superficie de la interface con la capa más profunda. El espesor promedio es del orden de 18-25 metros, con un volumen de aproximadamente 1.5 millones de m^3 .

La capa sedimentaria superficial presenta mayor potencia en el extremo Sur (Área 2) a diferencia de lo observado en el extremo Norte (Área 1). Asimismo, el Área 3 ubicada en la parte baja del Cerro de Pucruyacra, entre el Área 1 y Área 2, presenta condiciones de comportarse como una barrera natural ante eventos geodinámicos de pequeña magnitud.

La distribución de los espesores y velocidades demuestran que la zona Oeste del área de estudio experimenta mecanismos de extensión y la zona Este, mecanismos de compresión, por considerar esta última, los mayores espesores y velocidades.

- 8.- En el área de estudio existen elementos detonadores naturales como los sismos asociados a la falla Pucruyacra y a la sismicidad de foco intermedio. De presentarse eventos con magnitudes igual o mayores a 4.0 ML, facilitarían el desarrollo de cualquier proceso dinámico activo.

BIBLIOGRAFIA

- ARCE GEOFÍSICOS S.A.S. (2011) Actualización de las secciones geológicas con perfiles de refracción sísmica. Informe Técnico N° 966-11
- Fidel, L; Zavala, B; Nuñez, S y Valenzuela, G (2006). Estudios de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 4. Boletín N° 29, INGEMMET, serie "C" – Geodinámica e ingeniería geológica.
- INFORMES TÉCNICOS N°A6493, agosto del 2011; N°A6575, setiembre del 2011. INGEMMET
- INFORMES FINALES N°. 1-C-116-009, mayo del 2011; N°. 1-C-116-011, noviembre del 2011, SOCIEDAD MINERA CORONA S.A.
- Krizek, R.J. (Eds.). Landslides: Analysis and control. Special Report 176. Transportation Reserch Borrard. Nacional Reserch Council, Washington D:C: 11-33.
- Nakamura Y., (1989). A Method for Dynamic Characteristic Estimation of surface Using Microtremor on the Ground Surface. QR of R. T. R., 30-1.
- Nakamura Y, et al (1994). Characteristics of Ground Motion and Structures Around the Damaged area of the Northridge Earthquake by Microtremor Measurement. (preliminary report ver.2). Rail Technical Research Institute, Tokyo. 1994.
- Norma Técnica de Edificación E-030, Diseño sismorresistente. (2003) Reglamento Nacional de Construcciones en el Perú vigente.
- Núñez S. y Gómez D. (2011) Deslizamiento de tierras en el Cerro de Pucruchacra. Informe Técnico N° A6575. INGEMMET.
- Santacana, N. (2001). Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfico. Aplicación a la Cuenca Alta del río Llobregat. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña
- SOCIEDAD MINERA CORONA S.A.C. (2011) Estudio Geotécnico de la Ladera Pucruchacra. Informe Final. Proyecto N°:1-C-116-009. S.V.S.-Ingenieros S.A.C. 85 pp.
- Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes. En: Shuster, R.L.
- Wathelet M. (2004) Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. Near Surface Geophysics 2, 211-221.