



MEDICIONES GEOFÍSICAS EN EL PARQUE ARQUEOLÓGICO DE SAQSAYWAMAN

Autor 1 : Alva Hurtado, Jorge Elias, email: jalvah@terra.com.pe.

Ingeniero Civil- UNI. PhD en Ingeniería Civil. Universidad de Massachusetts, Amherst – Massachusetts. Profesor Principal de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. Rector Interino de la UNI.

Autor 2 Ortiz Salas , Carmen Eleana; email: carmenos_2900@hotmail.com.

Ingeniera Civil - UNSAAC. Magister en Ingeniería Civil con mención en Geotecnia. Especialización en Ingeniería Sismo Resistente UNI. Investigadora - Posgrado FIC UNI. Docente de la Universidad Privada de Tacna.

Autor 3 Pérez Zuñiga, Alvaro Javier; email: alvaro.jav.pe@gmail.com

Ingeniero Civil - UNSAAC. Egresado de la Sección de Posgrado de la UNI – Mención: Ingeniería Geotécnica. Ingeniero de Proyectos de Jorge E. Alva Hurtado Ingenieros E.I.R.L.

Colaborador: Soto Huamán, Jorge; email: josotoh@uni.pe

Bachiller en Ingeniería Civil - UNI. Estudios de Maestría Sección de Posgrado de la UNI – Mención: Ingeniería Geotécnica. Ingeniero de Proyectos de Jorge E. Alva Hurtado Ingenieros E.I.R.L.

Categoría: Geotécnica y Gestión de Riesgos

Palabras clave: Geofísica , Parámetros Elásticos

Sinopsis:

La investigación se ha desarrollado en el Parque Arqueológico de Saqsaywaman considerado como Patrimonio Cultural de la Nación, el que se ubica en el Departamento de Cusco.

En el año 2009 se tuvieron daños notables en los muros de la tercera terraza en la parte central algunos muros colapsaron, se asume que la principal causa fue el empuje lateral ocasionado por exceso de la cantidad de escorrentia producto de las precipitaciones y la presencia de movimientos sísmicos.

Para analizar los daños ocasionados y proponer alternativas de solución es necesario determinar los parámetros elásticos en el suelo, por lo cual en este trabajo se utilizó técnicas no destructivas mediante ensayos geofísicos aplicando los métodos activo MASW o Análisis de Arreglo Multicanal de Ondas Superficiales, Refracción Sísmica, el método pasivo MAM o Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanal y Georadar GPR , identificando tres tipos de materiales: suelo de cultivo, gravas con presencia de material fino y fragmentos de roca y obteniendo velocidades de ondas V_{s30} que varían de 356 m/s a 440 m/s, velocidades V_p que varían de 300 m/s – 2300 m/s, Módulos de Elasticidad que se encuentran dentro del rango de 220 kg/cm² a 1700 kg/cm². y módulos de corte que varían de 590 kg/cm² a 6500 kg/cm². Asimismo los resultados de los ensayos geofísicos nos proporcionaron evidencias de presencia de muros incas y terrazas que se encuentran actualmente enterradas.

Abstract

This research was developed in the Archaeological Park of Sacsayhuaman considered as Cultural Patrimony of Peru, which is located in the department of Cusco. In 2009 there was significant damage on the walls of the central part of the third terrace where some walls collapsed, the main cause was the increased of lateral thrust caused by saturated soils product of rainfall and poor drainage in the headwaters of the walls affected.

It has conducted geophysical tests applying the methods of Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), Seismic Refraction, Microtremor Array Measurement (MAM) and Ground Penetrating Radar (GPR) to obtain the propagation velocity of compressional (V_p) and shear (V_s) waves in order to estimate elastic parameters and classified based on the average shear wave velocity of the first 30 meters (V_{s30}) and the International Building Code criteria (IBC) of the soils found in the archaeological park.

The V_{s30} vary from 356 m/s to 440 m/s and the V_p vary from 300 m/s to 2300 m/s, the elasticity modulus are within the range of 220 kg/cm² to 1700 kg/cm² besides the shear modulus are within the range of 590 kg/cm² to 6500 kg/cm².

1. INTRODUCCIÓN:

El Parque Arqueológico de Saqsaywaman es considerado como patrimonio Cultural de la Nación. Se ubica en el Departamento de Cusco.

En el año 2009 ocurrieron daños en los muros de la tercera terraza de la Fortaleza de Sacsaywaman, en la parte central algunos muros colapsaron, se asume que la principal causa fue el empuje lateral ocasionado por exceso de la cantidad de escorrentía producto de las precipitaciones y la presencia de movimientos sísmicos. (Fotografías N°01, N°02 y N°03)

En los últimos años, la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad de Virginia ha realizado investigaciones sobre la causa de las fallas estructurales en las murallas de Saqsaywamán, llegando a la conclusión que el enfoque más efectivo y sostenible para proteger las murallas es restaurar los andenes originales, posteriormente y con la finalidad de continuar con estas investigaciones se incorporó a la Universidad Nacional de Ingeniería y a la Universidad Ricardo Palma, siendo las mediciones geofísicas parte de las actividades desarrolladas para este fin.

Este trabajo se ha enfocado principalmente a la determinación de los parámetros elásticos en los suelos del Parque Arqueológico de Saqsayhuamán utilizando técnicas no destructivas mediante ensayos geofísicos, y con la finalidad de que pueda ser utilizado para prevenir daños que futuros sismos puedan ocasionar en los muros de las terrazas existentes y proponer alternativas de solución.

Se ha utilizado los métodos activo MASW o Análisis de Arreglo Multicanal de Ondas Superficiales, Refracción Sísmica, el método pasivo MAM o Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanal y Georadar (GPR).

2. OBJETIVOS:

Realizar mediciones geofísicas para determinar los parámetros elásticos en los suelos del Parque Arqueológico de Saqsaywamán.



Fotografía N°01: Vista del Área de Estudio



Fotografía N°02: Se observa la ubicación de muros que colapsaron



Fotografía N°03: Se observa muro inca que colapsó

3. MARCO TEORICO

3.1 Ensayo Geofísico con Georadar

El Georadar, es una técnica no destructiva que permite realizar una exploración del subsuelo en superficie mediante la emisión de pulsos electromagnéticos (EM). Cuando el pulso electromagnético de poca duración (nanosegundos) emitido por la antena transmisora atraviesa la superficie sufre reflexiones al incidir sobre interfases u objetos con diferentes propiedades electromagnéticas, esta onda de regreso es captada por la antena receptora (Fotografía N°04). Bajo un mismo punto de observación se tendrá un conjunto de reflexiones que constituirán una traza, al desplazar las antenas sobre la superficie van detectando y almacenando un conjunto de trazas en la línea de desplazamiento de las antenas, de esta forma se van formando una especie de "radiografía" del subsuelo, a la que se le denomina radargrama. En la Figura N°01 se muestra el esquema de medición con Georadar.

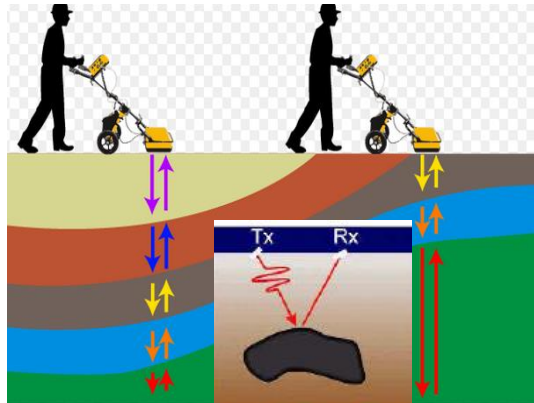


Figura N° 01: Reflexión de las ondas electromagnéticas.



Fotografía N°05: Vista del ensayo de Refracción Sísmica



Fotografía N°04: Vista del equipo Georadar utilizado

3.2 Método de Refracción Sísmica

El ensayo de refracción sísmica es un método de exploración geofísica que permite determinar la estratigrafía del subsuelo en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que lo conforman o propiedades elásticas diferentes (Fotografía N°05). El método consiste en la medición de los tiempos de llegada de las ondas P, por un grupo de geófonos equidistantes en la superficie del terreno, generado por una fuente impulsiva. En la Figura N° 02 se muestra el esquema de medición de la refracción sísmica.

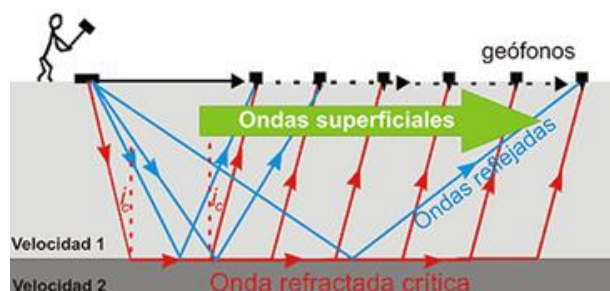


Figura N° 02: Reflexión de las ondas electromagnéticas

3.3 Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

Los sondeos MASW o Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal es un método de exploración geofísica que permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman (Fotografía N°06). Este método consiste en la interpretación de las ondas superficiales (ondas Rayleigh) de un registro en arreglo multicanal, generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, obteniéndose el perfil de velocidades de ondas de corte (V_s) para el punto central de dicha línea.



Fotografía N°06: Vista del ensayo de MASW

3.4 Análisis de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanal (MAM)

Las bases teóricas del método de medición de microtremores, también conocido como MAM (Microtremor Array Measurement) son las mismas que las aplicadas en el MASW, este consiste en monitorear las vibraciones ambientales (de frecuencias bajas mejores a 2Hz) con arreglos determinados (figuras geométricas preestablecidas), una simple transformada

en dos dimensiones de lentitud-frecuencia (p-f) de un registro de microtremor, puede separar las ondas Rayleigh de otras ondas y permitir el reconocimiento de la velocidad de fase verdadera de las velocidades aparentes (Louie, 2001) para así obtener el perfil de velocidades Vs. El trabajo combinado del MASW y MAM permiten obtener mayores profundidades de investigación. Las fuentes comunes de microtremores, que son captadas por los geófonos para el muestreo del método MAM, son las generadas por vibraciones que el viento produce, el impacto de las olas, tráfico, etc. La distribución de los geófonos para el sondaje MAM está función del área disponible, además que los niveles de ruido ambiental ajenos no afecten a la toma de datos los arreglos pueden tomar formas en “L” o triángulos o circulares.

3.5 Parámetros Elásticos

En la teoría de elasticidad de las ondas sísmicas (Kramer, 1996), la velocidad de las ondas S se representan en forma de ecuación de movimiento, para un cuerpo elástico isotrópico de la siguiente manera.

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Donde:

Vp = Velocidad de ondas de compresión

Vs = Velocidad de ondas de corte

λ = Constante de Lamé

μ = Rigidez

ρ = Densidad

Relacionando las velocidades de ondas de corte, ondas de compresión y la densidad de los materiales por donde se propagan las ondas se pueden obtener los siguientes parámetros elásticos:

$$\text{Relación de Poisson } (\nu) \quad \nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2}$$

$$\text{Módulo de Young } (E_d) \quad E_d = 2(1 + \nu)G$$

$$\text{Módulo de Corte } (G_{\max}) \quad G_{\max} = \rho V_s^2$$

4. ENSAYOS GEOFÍSICOS REALIZADOS

La investigación geofísica consistió en la exploración del terreno ejecutándose 34 líneas de Refracción Sísmica, con una longitud total de 1007 metros con separación entre geófonos de 0.46 m a 2.50m; 05 líneas de ensayos MASW con una longitud total 138 metros y 01 arreglo lineal del método pasivo MAM o Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanal (Figura N°02), mediante los cuales se determinaron las velocidades de ondas compresionales (Ondas P y Ondas S), definiéndose la potencia de los estratos que conforman el terreno sobre el que se encuentra el

Parque Arqueológico de Saqsaywamán. Asimismo se han realizado 147 Líneas de Georadar (GPR) con una longitud total de 2350 metros, tal como se aprecia en la Figura N°03.

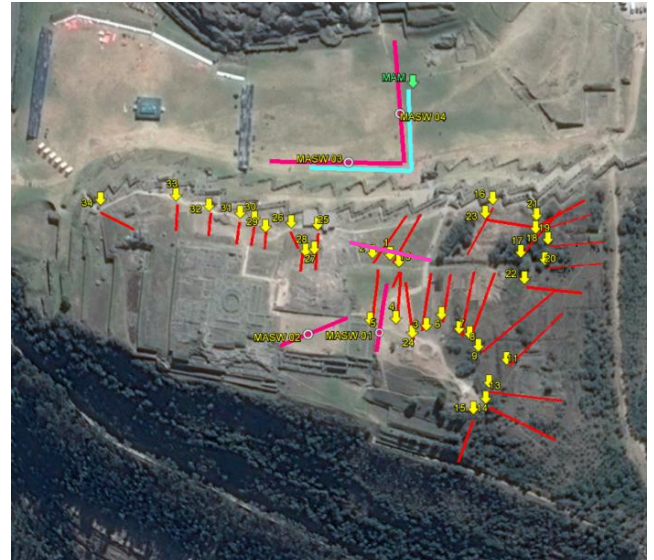


Figura N° 03: Vista de ensayos geofísicos realizados .

5. ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS GEOFÍSICOS

5.1 Perfiles de Georadar - Radargrama

De las mediciones se ha realizado el análisis respectivo de los radargramas .De acuerdo a los resultados del radargrama, en términos generales, ha sido posible identificar tres tipos de materiales identificados tales como, terreno de cultivo, gravas con presencia de material fino y fragmentos de roca.

Además se han identificado en algunos perfiles anomalías en forma de franja vertical ubicada a diferentes distancias y profundidades de la medición, el que posiblemente sea muro inca enterrado (Figuras N°04, N°05 y N°06). En el Cuadro N°01 se muestra la relación de algunas líneas donde se encontraron anomalías .

Cuadro N°01: Relación de líneas donde se encontraron anomalías .

Línea	Ubicación	Intensidad de anomalía
LG-03	24.0m a 31.50m	Alta
LG-05	0.0m a 1.0m	Alta
LG-06	24.0m - 30.0 m	Alta
LG-07	21.0m a 24.0m	Alta
	26.0m a 27.0m	Alta
LG-11	9.0m a 10.5m	Alta
	31.5m a 32.0m	Alta
	40.5m a 42.0m	Alta
LG-17	12.0m a 13.50m	Alta
	22.0m a 24.0m	Alta
LG-31	4.0m a 7.50m	Alta

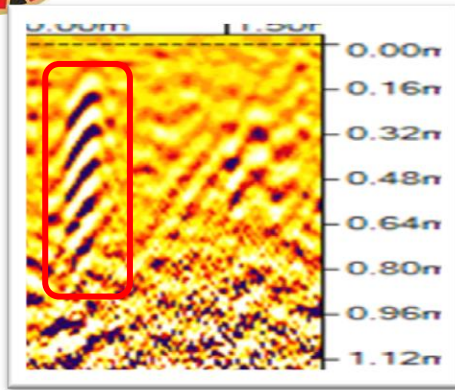


Figura N° 04: Radargrama LG-05 se aprecia anomalías en forma de franja

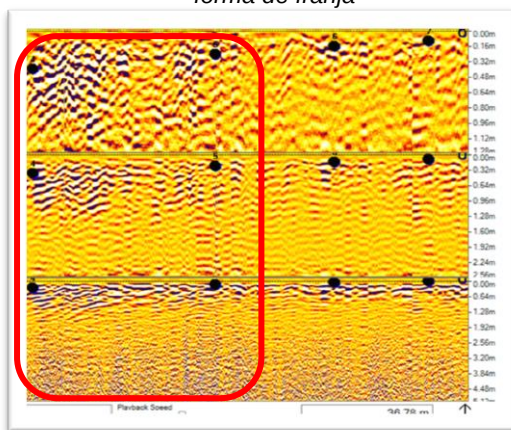


Figura N° 05: Radargrama LG-07 se aprecia s anomalías en forma de franja

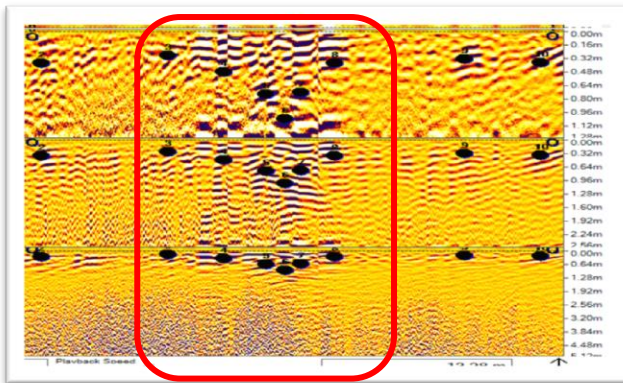


Figura N° 06: Radargrama LG-31 se aprecia s anomalías en forma de franja

5.2 Refracción Sísmica

De acuerdo a los perfiles sísmicos, la profundidad mínima y máxima de investigación ha sido de 3.0m y 15.0m respectivamente. Las velocidades V_p varían de 300 m/s – 2300 m/s. como se aprecia en el Cuadro N°02. Se ha establecido 3 tipos de estratos cuya compacidad varía de densa a muy densa, las potencias de estos estratos son diferentes. En el Cuadro N°03 y Figuras N°07 y 08 se hace referencia a las líneas LS-07 y LS-30 para descripción del tipo de material. En la Figura N°09 se muestra una comparación del perfil sísmico de la línea LS-31 con su respectivo radargrama.(Fotografías N° 07 y N°08).



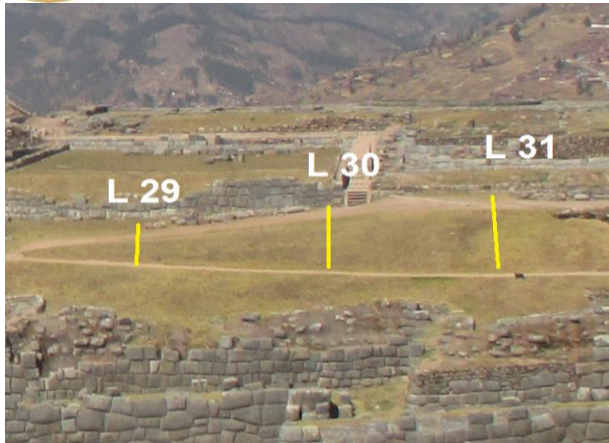
Fotografía N°07: Ubicación de Líneas de Refracción Sísmica LS-04 y LS-05

Cuadro N°02 : Rango de Velocidades V_p

Línea Sísmica	V_p (m/s)	Potencia (m)	Descripción
LS-01, LS-21	300-600	9.0	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-02,LS-19	300-650	9.0	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-03,LS-28, LS-29	300-1100	9.0	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-04,LS-06, LS-09, LS-10, LS-18	300-700	7.6	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-05,LS-13	300-900	8.9	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-07, LS-23, LS-25	300-1000	12.0	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-08	250-650	12.0	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-11	300-800	12.0	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-12	300-950	12.0	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-14,LS-20	300-550	7.5	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-15, LS-16	300-750	8.4	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-17	300-850	9.0	Material de compacidad medianamente densa a densa
LS-22	300-2500	9.0	Material de compacidad medianamente densa a muy densa
LS-24	300-1800	2.8	Material de compacidad medianamente densa a muy densa
LS-26, LS-30	300-1900	3.0	Material de compacidad medianamente densa a muy densa
LS-27	300-1200	3.0	Material de compacidad medianamente densa a muy densa
LS-31, LS-32	300-1200	3.6	Material de compacidad medianamente densa a muy densa

Cuadro N°03 Rango de Velocidades V_p para estratos definidos en Líneas LS-07 y LS-30

Línea Sísmica	V_p (m/s)	Potencia (m)	Descripción
LS-07	300-500	0.75-2.70	Material de compacidad medianamente densa
	500-1000	0.50-2.60	Material de compacidad medianamente densa a densa
	1000-1500	--	Material de compacidad densa
LS-30	300-500	0.25-0.80	Material de compacidad medianamente densa
	500-1000	0.40-1.95	Material de compacidad medianamente densa a densa
	>1500	---	Material de compacidad densa



Fotografía N°08: Ubicación de Líneas de Refracción Sísmica LS-29, LS-30 y LS-31

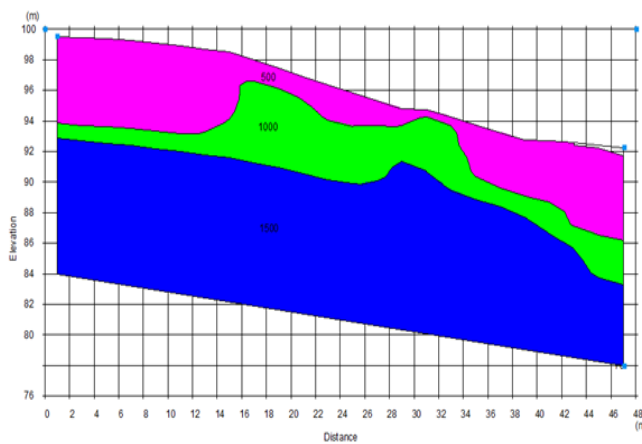


Figura N° 07: Perfil sísmico de la línea LS-07

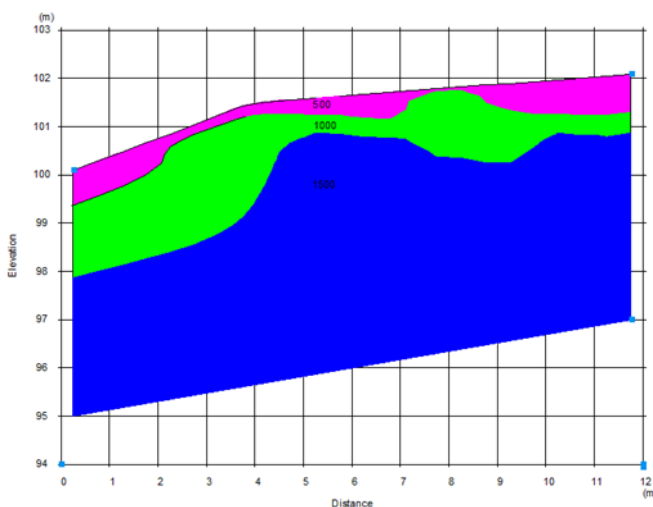


Figura N° 08: Perfil sísmico de la línea LS-30

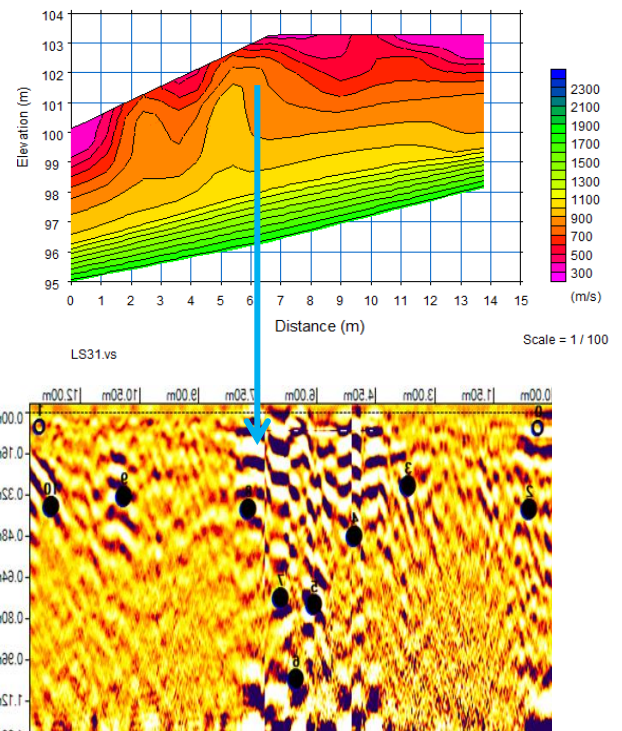


Figura N° 09: Comparación del Perfil sísmico de la línea LS-31 con Radargrama

5.3 Sondaje MASW

En perfil de velocidad de corte unidimensional se ha determinado que la velocidad de corte mínima es de 220 m/s, y el valor máximo es 616m/s, por lo que el tipo de material tiene una compacidad suelta a muy densa. A continuación se presenta el Cuadro N° 04 con los resultados de las líneas en términos de velocidades de ondas S y los perfiles sísmicos LW N°01 y LW N°02 (Figuras N°10 y N°11).

Cuadro N°04 Resultados de Sondaje MASW

Línea Sísmica	Prof. (m)	Vs (m/s)	Caracterización Geotécnica
1	0.00-2.00	220 a 230	Material de cobertura de compacidad suelta a medianamente densa
	2.00-8.90	230 a 330	Material de compacidad medianamente densa
	8.90-30.00	330 a 475	Material de compacidad medianamente densa a densa
2	0.00-2.30	220 a 250	Material de cobertura de compacidad suelta a medianamente densa
	2.30-7.00	250 a 377	Material de compacidad medianamente densa
	7.00-30.00	377 a 451	Material de compacidad medianamente densa a densa
3	0.00-5.20	190 a 217	Material de cobertura de compacidad suelta
	5.20-30.00	210 a 294	Material de compacidad medianamente densa
4	0.00-3.70	180 a 277	Material de cobertura de compacidad suelta a medianamente densa
	3.70-11.00	277 a 400	Material de compacidad medianamente densa
	11.00-30.00	400 a 480	Material de compacidad medianamente densa a densa
5	0.00-3.70	206 a 350	Material de cobertura de compacidad suelta a medianamente densa
	3.70-30.00	350 a 616	Material de compacidad medianamente densa a densa

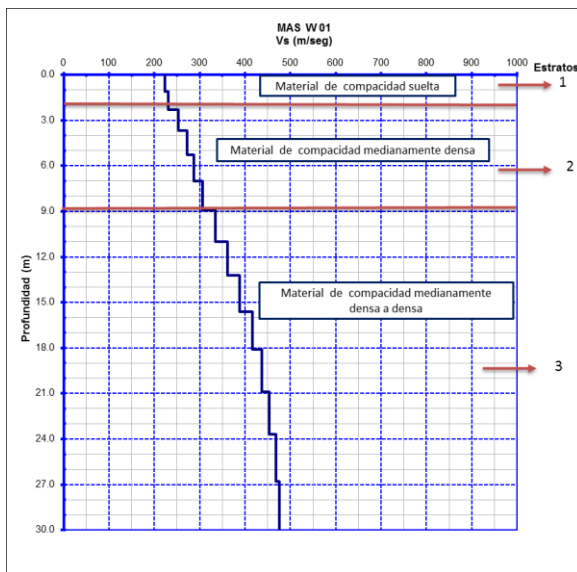


Figura N° 10: Perfil sísmico de la línea LS-30

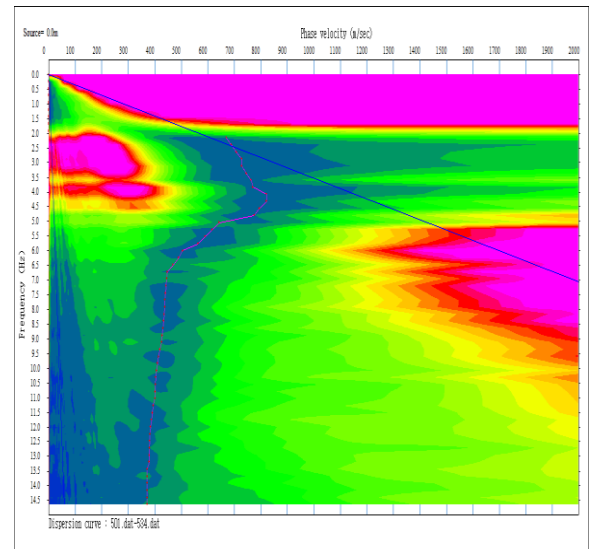


Figura N° 12: Curva de Dispersión - MAM

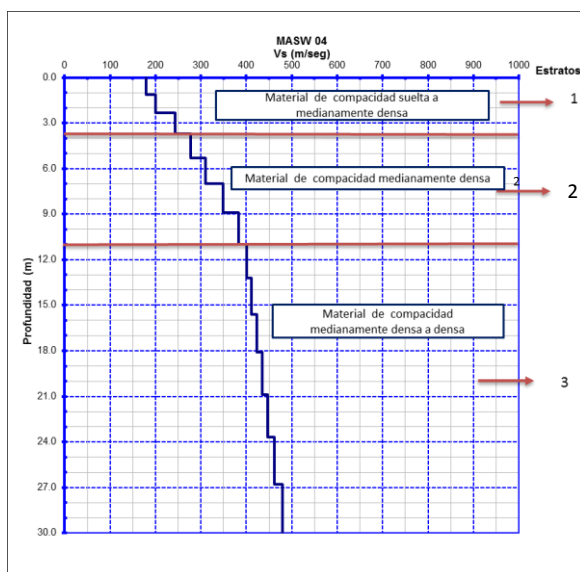


Figura N° 11: Perfil sísmico de la línea LS-30

5.4 Medición de Microtremores (MAM)

En perfil de velocidad de propagación de ondas de corte unidimensional se ha determinado que la velocidad de corte mínima es de 180 m/s, y el valor máximo es 790 m/s, a una profundidad de 105 metros. A continuación se presenta la Figura N°12 donde se observa la curva de dispersión generada y la Figura N°13 que muestra el incremento de velocidades de ondas S con respecto a la profundidad resultado del ensayo MAM.

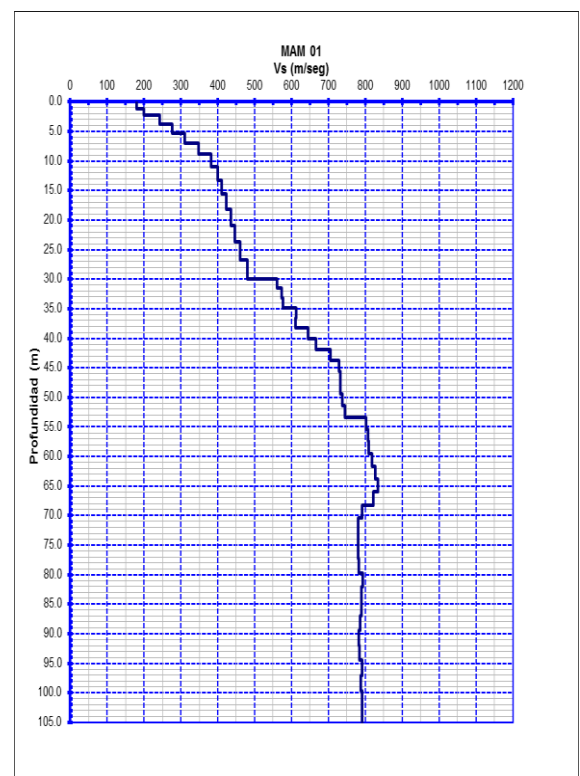


Figura N° 13: Perfil sísmico obtenido con el Ensayo MAM

5.5 Estimación de Parámetros Elásticos

Para el presente estudio, los ensayos geofísicos proporcionaron la velocidad de ondas de corte (Vs) del perfil estratigráfico. Por su parte para estimar la densidad y el módulo de Poisson de los materiales, se asumieron valores característicos, lo cual permitió mediante el empleo de las formulaciones antes indicadas,

obtener los parámetros dinámicos del área de estudio.

Se caracterizaron los sondeos MASW mediante el criterio del V_{s30} , de acuerdo al International Building Code 2012, para lo cual se pondera la distribución de velocidades de ondas de corte hasta 30 m de profundidad.

Los resultados obtenidos para el V_{s30} de los 05 sondeos MASW se presentan en el Cuadro N° 05. Los valores de los parámetros elásticos obtenidos en el sondeo LW-04 se presentan en el Cuadro N° 06.

Cuadro N° 05: Velocidades V_{s30} y Clasificación de Sitio

Línea Sísmica	V_{s30} (m/s)	Clase de sitio
LW-01	356	D
LW-02	378	C
LW-03	250	D
LW-04	360	D
LW-05	440	C

Cuadro N° 06: Parámetros Elásticos obtenidos en el Sondeo LW-04

Profundidad		Velocidad de Onda S (m/seg) Vsi	Módulo de Corte (kg/cm ²) G	Módulo de Young (kg/cm ²) Es
h(m)				
Desde	Hasta			
0.00	1.10	179.46	587	147
1.10	2.30	199.75	733	183
2.30	3.70	242.69	1,089	272
3.70	5.30	277.17	1,429	372
5.30	7.00	310.21	1,797	467
7.00	8.90	348.64	2,284	594
8.90	11.00	382.47	2,769	720
11.00	13.20	400.33	3,047	792
13.20	15.60	411.34	3,223	838
15.60	18.10	423.58	3,429	891
18.10	20.90	435.45	3,633	944
20.90	23.70	446.49	3,825	994
23.70	26.80	461.38	4,094	1,064
26.80	30.00	480.18	4,447	1,156

6. CONCLUSIONES:

- Se determinó los parámetros elásticos en los suelos del Parque Arqueológico de Saqsayhuamán con mediciones geofísicas obteniendo velocidades de ondas V_{s30} que varían de 356 m/s a 440 m/s, velocidades V_p varían de 300 m/s – 2300 m/s, Módulos de Elasticidad que se encuentran dentro del rango de 220 kg/cm² a 1700 kg/cm². y módulos de corte que varían de 590 kg/cm² a 6500 kg/cm².
- La combinación de los diferentes metodos permitió la obtención con la precision requerida de los parámetros elásticos.

- La interacción entre métodos MASW y MAM permitió obtener perfiles de ondas S hasta profundidades de 105 m.
- Mediante la técnica del Georadar se identificó tres tipos de materiales que se encuentra por debajo de las terrazas Incas en Saqsaywaman: suelo de cultivo, gravas con presencia de material fino y fragmentos de roca, así como las anomalías en forma de franja vertical.
- Los resultados de los ensayos geofísicos proporcionaron evidencias de presencia de muros incas y terrazas que se encuentran actualmente enterradas y cuya ubicación es fundamental para mejorar el sistema de drenaje existente y disminuir los esfuerzos que han venido ocasionando el colapso de los muros en la tercera terraza.
- Esta información permitirá analizar los daños ocasionados en los muros incaicos, proponer alternativas de solución, determinar la amplificación sísmica en la zona de estudio y simular el comportamiento de los muros existente ante la presencia de un evento sísmico.

7. AGRADECIMIENTOS:

Se agradece a la Empresa Jorge E. Alva Hurtado Ingenieros E.I.R.L. por el patrocinio para este trabajo, al Ministerio de Cultura por las facilidades brindadas, a los Bachilleres en Ingeniería Civil Frank Rojas Parco y Jose Galindo por el apoyo que brindaron.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Richard W Miksad, Kenneth Wright, Alexei Vranich "A 3-D Topographic Study of the Current and Inca Era Drainage System at Saqsaywaman", University of Virginia, 2013.
- Richard W Miksad, L Wildfire, Kenneth Wright, "A Paleo-Hydrological Analysis of Rainfall-Runoff and Drainage of the Inca Ruins at Saqsaywaman (Cusco)", University of Virginia, 2010
- Ricardo Mar y Alejandro Beltran – Caballero, "El Conjunto Arquelógico de Saqsaywaman (Cusco) Una Aproximación a su Arquitectura", Revista Española de Antropología Americana, 2014
- Arce Helberg, J. "La Geofísica Aplicada a la Microzonificación – Métodos de Prospección Geofísica en Estudios de Ingeniería", CISMID-UNI. (1991),
- IBC "International building Code", USA. (2012),
- Kramer S. "Geotechnical Earthquake Engineering" Ed. Prentice Hall. New Jersey – USA. (1996).