

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Efectividad del Acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kolkaque Abancay, Apurímac 2024

Presentado por:

Wilber Arias Benites

Para optar el título de Ingeniero Civil

Abancay, Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



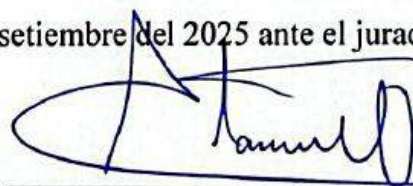
TESIS

**Efectividad del acelerómetro MPU6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kolkaque Abancay, Apurímac 2024**

Presentado por **Wilber Arias Benites**, para optar el título de Ingeniero Civil

Sustentado y aprobado el 01 de setiembre del 2025 ante el jurado evaluador:

**Presidente:**

  
\_\_\_\_\_  
*Dr. Calixto Cañari Otero*

**Primer miembro:**

  
\_\_\_\_\_  
*Ing. Ricardo Heinrich Pinto Yupanqui*

**Segundo miembro:**

  
\_\_\_\_\_  
*Ing. Oscar Velazque Rojas*

**Asesor:**

  
\_\_\_\_\_  
*Dr. Edwar Ilasaca Cahuata*



*"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"*

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 211-2025

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis intitulada: **Efectividad del Acelerómetro MPU 6050 versus geófono sísmico en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kolkaque Abancay, Apurímac 2024**, presentado por el Bachr: **Wilber Arias Benites**, Para optar el Título de **Ingeniero Civil**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud **ACEPTABLE de (17%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 26 de agosto del 2025

Atentamente,

  
  
**Dra. Hesméralda Rojas Enriquez**  
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.  
Archivo  
REG. N° 702

## **Agradecimiento**

*Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme tener buena experiencia dentro de mi universidad.*

*Al Dr. Edward Illasaca Cahuata, asesor del presente proyecto de investigación, por su apoyo incondicional, por aquellos consejos que siempre fueron de gran valía y todas sus enseñanzas que siempre las llevaré en mi mente.*

*A la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, por ser mi alma mater durante estos años de mucho sacrificio y felicidad, por hospedarme y ofrecerme un crecimiento profesional.*

*A la Escuela académico Profesional de Ingeniería Civil, a los docentes y demás trabajadores, por haberme permitido estar al lado de ellos, compartir grandes experiencias y sobre todo hacerme crecer en mi formación académica y personal.*

**Wilber**



## **Dedicatoria**

*La presente tesis está dedicada con todo mi cariño a toda mi familia en especial a mis padres Dalmecio y Juana, por todo el amor que siempre me muestran, por el apoyo que me dan día a día, por los valores y enseñanzas que me inspiran en mi vida.*

*A Ronal, Vilma, Mariluz, mis queridos hermanos, que sus consejos fueron de mucha ayuda para superar obstáculos en toda mi etapa universitaria, Edison y Elvis, mis cuñados, ya que con su apoyo incondicional en esta etapa fue crucial personalmente, a mis amigos, compañeros y a todas las personas que apoyaron para lograr este objetivo en mi vida. A Dios, que me guía y me ayuda en todos los momentos, dándome fuerza, perseverancia y sobre todo fe.*

**Wilber**



Efectividad del Acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kolkaque Abancay, Apurímac 2024

Línea de investigación: Ingeniería de la construcción.

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>RESUMEN</b>	3
<b>ABSTRAC</b>	4
<b>CAPÍTULO I</b>	5
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del problema	7
1.2.1 Problema general	7
1.2.2 Problemas específicos	7
1.3 Justificación de la investigación	7
<b>CAPÍTULO II</b>	9
<b>OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b>	9
2.1 Objetivos de la investigación	9
2.1.1 Objetivo general	9
2.1.2 Objetivos específicos	9
2.2 Hipótesis de la investigación	9
2.2.1 Hipótesis general	9
2.2.2 Hipótesis específicas	9
2.3 Operacionalización de variables	10
<b>CAPÍTULO III</b>	11
<b>MARCO TEÓRICO REFERENCIAL</b>	11
3.1 Antecedentes	11
3.1.1 Internacional	11
3.1.2 Nacional	15
3.2 Marco teórico	17
3.2.1 Acelerómetro MPU 6050 – Variable independiente 1	17
3.2.1.1 Tipo de sensor	19
3.2.1.2 Precisión y señales registradas	20
3.2.1.3 Frecuencia de medición (frecuencia de muestreo)	20
3.2.1.4 Vibración en tiempo real	20
3.2.1.5 Arduino	20
3.2.1.6 Estructura de programación	21
	1



3.2.2	Geófonos verticales de 4.5 Hz – Variable independiente 2	22
3.2.2.1	Tipo de sensor	22
3.2.2.2	Precisión y señales registradas	23
3.2.2.3	Frecuencia de medición (frecuencia de muestreo)	23
3.2.2.4	Vibración en tiempo real	23
3.2.3	Deslizamiento de suelo – Variable dependiente 1	23
3.2.3.1	Deslizamiento	25
3.2.3.2	Tipos básicos de deslizamientos	26
3.2.3.3	Propiedades del suelo	27
3.2.3.4	La velocidad de desplazamiento	28
3.2.3.5	Volumen de un deslizamiento	28
3.2.3.6	Ángulo y longitud de recorrido	29
3.2.4	Características de los materiales	29
3.2.4.1	Tipología y formas de manifestación	29
3.2.4.2	Clasificación de los movimientos	30
3.2.4.3	Reptación de formaciones de roca	31
3.2.4.4	Inestabilización	32
3.2.5	Análisis de estabilidad	32
3.2.6	Deslizamientos en áreas urbanas y en obras de ingeniería	33
3.2.6.1	Procesos de erosión urbana	34
3.2.6.2	Deslizamientos en carreteras	34
3.2.7	Investigación de deslizamientos	34
3.2.7.1	Organización del estudio	35
3.2.8	Estudio geotécnico	35
3.2.9	Ensayos de campo	36
3.2.10	Ensayos geofísicos	36
3.2.10.1	Resistividad	36
3.2.10.2	Sondeos electromagnéticos	37
3.2.10.3	Refracción sísmica	37
3.2.10.4	Método geoacústica	38
3.2.11	Aplicación de ensayos geofísicos a los deslizamientos	39
3.2.12	Instrumentación y monitoreo	41
3.2.12.1	Objetivos de la instrumentación	42
3.3	Marco conceptual	42
<b>CAPÍTULO IV</b>		<b>45</b>
<b>METODOLOGÍA</b>		<b>45</b>
4.1	Tipo y nivel de investigación	45
4.1.1	Tipo de investigación	45

4.1.2	Nivel de investigación	45
4.2	Diseño de la investigación	45
4.3	Descripción de la ética de la investigación	47
4.4	Población y muestra	48
4.4.1	Población	48
4.4.2	Muestra	48
4.5	Procedimiento	49
4.6	Técnica e instrumentos	51
4.6.1	Técnicas	51
4.6.2	Instrumentos	51
4.7	Estadístico de investigación	53
<b>CAPÍTULO V</b>		<b>60</b>
5.1	Análisis y resultados	60
5.1.1	Análisis de los resultados de variable dependiente: Deslizamientos de suelos	62
5.1.1.1	Deslizamiento de suelo	62
5.1.2	Análisis de los resultados de variable independiente: Sensores de detección de movimiento.	75
5.1.2.1	Aceleración MPU 6050	75
5.1.2.2	Geófonos verticales de 4.5 Hz	86
5.1.2.3	Diferencia de aceleraciones	99
5.1.3	Análisis estadístico descriptivo	105
5.1.3.1	Variable dependiente: deslizamiento de suelo	105
5.1.3.2	Variable independiente (sensores de detención de movimiento)	109
5.1.4	Prueba de normalidad por cada variable	112
5.2	Análisis de resultados general	117
5.3	Análisis de resultados específicos	118
5.4	Contrastación de hipótesis	119
5.4.1	Contrastación de hipótesis general	119
5.4.2	Contrastación de hipótesis específica	121
5.5	Discusión	125
<b>CAPÍTULO VI</b>		<b>127</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>127</b>
6.1	Conclusiones	127
6.2	Recomendaciones	128
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>130</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>135</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> — Cuadro de operacionalización de variables	10
<b>Tabla 2</b> — Métodos geofísicos en los deslizamientos	40
<b>Tabla 3</b> — Diseño de la investigación	47
<b>Tabla 4</b> — Muestra para grupo experimental	49
<b>Tabla 5</b> — Validadores instrumentales	51
<b>Tabla 6</b> — Interpretación del valor de Alfa de Cronbach	52
<b>Tabla 7</b> — Interpretación del valor del a de Alfa de Cronbach	52
<b>Tabla 8</b> — Vía de acceso al área de investigación	60
<b>Tabla 9</b> — Coordenadas geográficas de las calicatas	64
<b>Tabla 10</b> — Análisis del del nivel freático y contenido de humedad	65
<b>Tabla 11</b> — Descripción estratigráfica de las calicatas	67
<b>Tabla 12</b> — Análisis granulométrico de las muestras de suelo	68
<b>Tabla 13</b> — Análisis de los límites de Atterberg y contenido de humedad	69
<b>Tabla 14</b> — Clasificación de los suelos según el sistema SUCS	71
<b>Tabla 15</b> — Pendiente del terreno	74
<b>Tabla 16</b> — Distribución de la fuente sísmica y ubicación de los sensores acelerómetros	78
<b>Tabla 17</b> — Grupo experimental acelerómetros	79
<b>Tabla 18</b> — Tabla resumen de las aceleraciones máximas - Acelerómetro	84
<b>Tabla 19</b> — Distribución de la fuente sísmica y ubicación de los geófonos	88
<b>Tabla 20</b> — Grupo experimental geófonos	88
<b>Tabla 21</b> — Tabla resumen de las aceleraciones máximas – Geófonos	95
<b>Tabla 22</b> — Resumen de las aceleraciones máximas – Acelerómetros y geófonos	100
<b>Tabla 23</b> — Diferencia de aceleraciones - 2 metros	103
<b>Tabla 24</b> — Diferencia de aceleraciones - 4 metros	104
<b>Tabla 25</b> — Error en la aceleración de geófonos y acelerómetros a 2m y 4m	104
<b>Tabla 26</b> — Estadística de la humedad del suelo	105
<b>Tabla 27</b> — Estadística tipo de suelo	107
<b>Tabla 28</b> — Estadística pendiente del terreno	108
<b>Tabla 29</b> — Estadística aceleración acelerómetros	109
<b>Tabla 30</b> — Estadística aceleración geófonos	110
<b>Tabla 31</b> — Estadística diferencia de aceleraciones	111
<b>Tabla 32</b> — Prueba de normalidad causas de deslizamiento	113
<b>Tabla 33</b> — Prueba de normalidad acelerómetro	115
<b>Tabla 34</b> — Prueba de normalidad geófono vertical de 4.5 Hz	116
<b>Tabla 35</b> — Análisis de la varianza en la capacidad de detección de deslizamientos	120
<b>Tabla 36</b> — Correlación acelerómetro MPU 6050 y deslizamiento de suelo	122
<b>Tabla 37</b> — Correlación geófonos sísmicos y deslizamiento de suelo	123
<b>Tabla 38</b> — Matriz de consistencia	136

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> — Esquema interno del acelerómetro	18
<b>Figura 2</b> — Esquema de la placa arduino	21
<b>Figura 3</b> — Esquema interno del geófono	22
<b>Figura 4</b> — Deslizamiento rotacional	24
<b>Figura 5</b> — Efectos directos de los deslizamientos de tierra	25
<b>Figura 6</b> — Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento	26
<b>Figura 7</b> — Ángulo de desplazamiento ( $\alpha$ )	28
<b>Figura 8</b> — Volumen de un deslizamiento	28
<b>Figura 9</b> — Longitud y ángulo de recorrido	29
<b>Figura 10</b> — Caído o desprendimiento de suelo	30
<b>Figura 11</b> — Esquema de caídos de roca y residuos	31
<b>Figura 12</b> — Proceso de reptación	32
<b>Figura 13</b> — Ejemplo de un análisis de estabilidad de taludes	33
<b>Figura 14</b> — Deslizamientos urbanos	34
<b>Figura 15</b> — Diagrama de flujo de la adquisición de datos	35
<b>Figura 16</b> — Variaciones en el arreglo de electrodos	37
<b>Figura 17</b> — Esquema de un ensayo de refracción sísmica	38
<b>Figura 18</b> — Esquema de una prospección de refracción sísmica	39
<b>Figura 19</b> — Refracción de las ondas	40
<b>Figura 20</b> — Estudio y monitoreo de deslizamientos	41
<b>Figura 21</b> — Procedimiento	50
<b>Figura 22</b> — Variable respuesta cuantitativa, pruebas paramétricas	55
<b>Figura 23</b> — Humedad relativa del área de investigación	61
<b>Figura 24</b> — Humedad relativa del área de investigación	62
<b>Figura 25</b> — Puntos de ubicación de las calicatas en el área de estudio	63
<b>Figura 26</b> — Contenido de humedad	66
<b>Figura 27</b> — Análisis granulométrico	69
<b>Figura 28</b> — Análisis de los límites de Atterberg	71
<b>Figura 29</b> — Refracción sísmica	76
<b>Figura 30</b> — Ubicación de sensores en el área de estudio de Kolkaque	77
<b>Figura 31</b> — Grupo experimental acelerómetros – A1 – 2m	80
<b>Figura 32</b> — Grupo experimental acelerómetros – A2 – 2m	80
<b>Figura 33</b> — Grupo experimental acelerómetros – A3 – 2m	81
<b>Figura 34</b> — Grupo experimental acelerómetros – A4 – 2m	81
<b>Figura 35</b> — Grupo experimental acelerómetros – A1 – 4m	82
<b>Figura 36</b> — Grupo experimental acelerómetros – A2 – 4m	82
<b>Figura 37</b> — Grupo experimental acelerómetros – A3 – 4m	83
<b>Figura 38</b> — Grupo experimental acelerómetros – A4 – 4m	83
<b>Figura 39</b> — Comparación de aceleración máxima – Acelerómetro	85
<b>Figura 40</b> — Registro de aceleraciones máximas para A1 (2m)	86
<b>Figura 41</b> — Registro de aceleraciones máximas para A2 (4m)	86
<b>Figura 42</b> — Propagación de ondas detectadas por los geófonos	87
<b>Figura 43</b> — Grupo experimental geófonos – G1	90
<b>Figura 44</b> — Registro de ondas - Aceleración máxima - Suelo GC	91
<b>Figura 45</b> — Grupo experimental geófonos – G2	92



<b>Figura 46</b> — Registro de ondas - Aceleración máxima - Suelo GC	92
<b>Figura 47</b> — Grupo experimental geófonos – G3	93
<b>Figura 48</b> — Registro de ondas - Aceleración máxima - Suelo SP-OL	94
<b>Figura 49</b> — Grupo experimental geófonos – G4	94
<b>Figura 50</b> — Registro de ondas - Aceleración máxima - Suelo SP -ML	95
<b>Figura 51</b> — Comparación de aceleración máxima – Geófonos	97
<b>Figura 52</b> — Registro de aceleraciones máximas para G1 (2m)	98
<b>Figura 53</b> — Registro de aceleraciones máximas para G2 (4m)	99
<b>Figura 54</b> — Registro de aceleraciones máximas para G2 (4m)	101
<b>Figura 55</b> — Registro de ondas para grupo experimental - 2 metros	102
<b>Figura 56</b> — Registro de ondas para grupo experimental - 4 metros	103
<b>Figura 57</b> — Q-Q Plot de causas de deslizamiento	114
<b>Figura 58</b> — Q-Q Plot de aceleración – acelerómetro	116
<b>Figura 59</b> — Q-Q Plot de aceleración – Geófono	117
<b>Figura 60</b> — Determinación de contenido de humedad de un suelo para las calicatas N° 01, 02, 03 y 04	138
<b>Figura 61</b> — Determinación del límite líquido y límite plástico de un suelo para las calicatas N° 01, 02, 03 y 04	139
<b>Figura 62</b> — Análisis granulométrico por tamizado de un suelo para las calicatas N° 01, 02, 03 y 04	139
<b>Figura 63</b> — Análisis de las aceleraciones – Geófono vertical de 4.5 Hz	140
<b>Figura 64</b> — Determinación de contenido de humedad de un suelo para calicata N° 01	140
<b>Figura 65</b> — Determinación de contenido de humedad de un suelo para calicata N° 02	141
<b>Figura 66</b> — Determinación de contenido de humedad de un suelo para calicata N° 03	142
<b>Figura 67</b> — Determinación de contenido de humedad de un suelo para calicata N° 04	143
<b>Figura 68</b> — Determinación del límite líquido y límite plástico de un suelo para las calicatas N° 01	144
<b>Figura 69</b> — Determinación del límite líquido y límite plástico de un suelo para las calicatas N° 02	145
<b>Figura 70</b> — Determinación del límite líquido y límite plástico de un suelo para las calicatas N° 03	146
<b>Figura 71</b> — Determinación del límite líquido y límite plástico de un suelo para las calicatas N° 04	147
<b>Figura 72</b> — Análisis granulométrico por tamizado de un suelo para las calicatas N° 01	148
<b>Figura 73</b> — Análisis granulométrico por tamizado de un suelo para las calicatas N° 02	149
<b>Figura 74</b> — Análisis granulométrico por tamizado de un suelo para las calicatas N° 03	150
<b>Figura 75</b> — Análisis granulométrico por tamizado de un suelo para las calicatas N° 04	151
<b>Figura 76</b> — Valoración de experto N°01	152
<b>Figura 77</b> — Valoración de experto N°02	153
<b>Figura 78</b> — Valoración de experto N°03	154
<b>Figura 79</b> — Valoración de experto N°04	155
<b>Figura 80</b> — Valoración de experto N°05	156
<b>Figura 81</b> — Resumen de valoración de instrumentos	157
<b>Figura 82</b> — Exploración de campo zona Kolkaque	158
<b>Figura 83</b> — Marcado de puntos para obtener las aceleraciones	158
<b>Figura 84</b> — Registro de resultados en la calicata 1	159
<b>Figura 85</b> — Registro de aceleraciones a 2 metros	159
<b>Figura 86</b> — Registro de aceleraciones a 4 metros	160
<b>Figura 87</b> — Exploración de la calicata 2	160
<b>Figura 88</b> — Registro de aceleraciones calicata 2 – 2 metros	161
<b>Figura 89</b> — Registro de aceleraciones calicata 2 – 4 metros	161

<b>Figura 90</b> — Registro de aceleraciones aplicando carga	162
<b>Figura 91</b> — Registro de aceleraciones aplicando carga	162
<b>Figura 92</b> — Calibración del acelerómetro	163
<b>Figura 93</b> — Exploración de campo calicata 3	163
<b>Figura 94</b> — Registro de aceleraciones	164
<b>Figura 95</b> — Exploración de campo calicata 4	164
<b>Figura 96</b> — Ensayos de laboratorio	165
<b>Figura 97</b> — Ensayos de laboratorio LL y LP	165
<b>Figura 98</b> — Ensayos de laboratorio AG	166
<b>Figura 99</b> — Ensayos de laboratorio AG – C3	166
<b>Figura 100</b> — Certificado de calibración del geófono o sismografo	167
<b>Figura 101</b> — Certificado de calibración del geófono o sismógrafo	168
<b>Figura 102</b> — Declaración de originalidad	169

## SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- ADC — Analog to Digital Converter — Conversor Analógico-Digital
- FFT — Fast Fourier Transform — Transformada Rápida de Fourier, utilizada en el procesamiento de señales
- GPS — Global Positioning System — Sistema de Posicionamiento Global
- Hz — Hertz — Unidad de frecuencia
- I2C — Inter-Integrated Circuit — Protocolo de comunicación de datos usado por el MPU-6050
- IMU — Inertial Measurement Unit — Unidad de Medición Inercial que combina acelerómetro y giroscopio
- LPF — Low Pass Filter — Filtro Pasa-Bajo, empleado para reducir el ruido de las mediciones
- MPU-6050 — Sensor de seis ejes que integra acelerómetro y giroscopio
- PCB — Printed Circuit Board — Placa de Circuito Impreso donde se montan los componentes electrónicos
- SNR — Signal to Noise Ratio — Relación Señal/Ruido
- $m/s^2$  — Metros por segundo al cuadrado — Unidad de aceleración
- s — Segundo — Unidad de tiempo
- UGS — Unidad Geotécnica de Suelo — Clasificación geotécnica de la zona de estudio
- UNP — Umbral de Nivel de Peligro — Valor de referencia para detección de eventos de deslizamiento

## INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra representan uno de los principales peligros geotécnicos, afectando de manera recurrente la infraestructura vial, agrícola y poblacional. El objetivo principal de la presente investigación fue evaluar la efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo, estableciendo su nivel de precisión y coherencia de mediciones bajo distintas condiciones geotécnicas.

La metodología empleada incluyó mediciones simultáneas con ambos dispositivos en campo, análisis estadístico mediante pruebas de varianza y correlación de Pearson, así como la caracterización granulométrica de los suelos. La base teórica se sustentó en los principios de la dinámica de suelos, propagación de ondas sísmicas y fundamentos de instrumentación geotécnica.

**Capítulo I: Planteamiento del problema.** Presenta el contexto y la relevancia del estudio, destacando los desafíos que implica la detección temprana de deslizamientos de suelo y las preguntas que orientan la investigación.

**Capítulo II: Objetivos e hipótesis.** Define los objetivos generales y específicos, así como las hipótesis que serán evaluadas durante el desarrollo del trabajo.

**Capítulo III: Marco teórico referencial.** Examina la literatura y los fundamentos técnicos relacionados con la detección de deslizamientos, describiendo el funcionamiento de los acelerómetros y geófonos, así como los antecedentes y estudios previos más relevantes.

**Capítulo IV: Metodología.** Detalla el diseño de la investigación, el proceso de selección de muestras, la instalación de los equipos, la recolección de datos y las técnicas de análisis estadístico utilizadas para comparar el desempeño de ambos dispositivos.

**Capítulo V: Resultados y discusión.** Presenta los resultados obtenidos, analiza las diferencias y similitudes en el rendimiento de los sensores y discute su relación con las condiciones geotécnicas de la zona.



**Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones.** Resume los hallazgos más importantes, responde a las preguntas de investigación y propone acciones para mejorar la efectividad de los sistemas de monitoreo en áreas vulnerables.

En conjunto, este trabajo ofrece una evaluación comparativa entre acelerómetros y geófonos, brindando evidencias técnicas que pueden orientar la toma de decisiones en la gestión del riesgo geotécnico en la zona de Kolkaque.



## RESUMEN

El presente estudio nace con el objeto de evaluar la efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz para la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac (2024). El tipo de investigación utilizada fue aplicada. El nivel de investigación descriptivo – correlacional. El diseño fue experimental transversal: Grupo Experimental **GE1** (Acelerómetro MUP,6050), Grupo Experimental **GE2** (Geófono vertical de 4.5 Hz). Siendo la población los puntos de monitorio ubicados dentro del polígono geográfico de Kolkaque y una muestra de 4 puntos de exploración.

Los resultados muestran que las mayores aceleraciones se registraron en el suelo GP, con valores de 0.2795 g en A1 (2 m) y 0.2593 g en A2 (4 m). Los demás suelos (GC, SP-OL y SP-ML) presentaron menores respuestas sísmicas. En los geófonos, G1 (2 m) alcanzó 0.2695 g, mayor que G2 (4 m) con 0.2301 g, debido a la proximidad a la fuente. Se evidenció un mismo patrón de onda, pero con mayor intensidad en G1. En general, los acelerómetros a 4 m registraron menores valores que los geófonos a 2 m, confirmando la atenuación de las ondas sísmicas con la distancia y según las propiedades del suelo.

Se concluye la efectividad de los sensores para la detección de deslizamiento de suelo, ya que ofrecen un rendimiento similar en cuanto a su capacidad para detectar el movimiento de suelo en el área de estudio.

**Palabras clave:** *Acelerómetro, MPU 6050, geófono vertical de 4.5 Hz, deslizamiento, suelo.*



## ABSTRAC

This study was designed to evaluate the effectiveness of the MPU 6050 accelerometer versus a seismic geophone for detecting landslides in the Kolkaque area, Abancay, Apurímac (2024). The type of research used was applied. The research level was descriptive-correlational. The design was cross-sectional experimental: Experimental Group GE1 (MUP,6050 Accelerometer), Experimental Group GE2 (Seismic Geophone). The population was the monitoring points located within the Kolkaque geographic polygon and a sample of 4 exploration points.

The results show that the highest accelerations were recorded in soil GP, with values of 0.2795 g at A1 (2 m) and 0.2593 g at A2 (4 m). The other soils (GC, SP-OL and SP-ML) presented lower seismic responses. At the geophones, G1 (2 m) reached 0.2695 g, higher than G2 (4 m) with 0.2301 g, due to its proximity to the source. The same wave pattern was evident, but with greater intensity in G1. In general, the accelerometers at 4 m recorded lower values than the geophones at 2 m, confirming the attenuation of seismic waves with distance and depending on soil properties.

The effectiveness of the sensors in detecting landslides is confirmed, as they offer similar performance in terms of their ability to detect ground movement in the study area.

**Keywords:** *Accelerometer, MPU 6050, seismic geophone, landslide, soil.*



## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Descripción del problema

A nivel internacional, los deslizamientos de tierra representan uno de los fenómenos geodinámicos más letales. Un estudio publicado en *Natural Hazards and Earth System Sciences* detalla que entre 2004 y 2016 murieron aproximadamente 55 997 personas en 4 862 eventos de deslizamientos no sísmicos alrededor del mundo (Froude y Petley 2018).

Además, se estiman pérdidas económicas de hasta USD 20 000 millones anuales Capobianco et al. (2024). Así mismo La Organización Mundial de la Salud confirma señala que entre 1998 y 2017 los deslizamientos afectaron a cerca de 4.8 millones de personas, causando más de 18 000 muertes. Factores como el cambio climático, la ocupación en zonas inestables y la deforestación elevan la probabilidad de ocurrencia de estos eventos.

El Perú es un país con alta susceptibilidad a movimientos en masa, principalmente deslizamientos, que afectan significativamente la seguridad de poblaciones e infraestructura. Según el Informe Técnico N° A7501 del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2024), se han identificado 3,189 zonas críticas por peligros geológicos en todo el territorio nacional, de las cuales 1,040 corresponden a laderas con pendientes mayores a 15°. Estos lugares poseen poblaciones o infraestructura relevante que están en alto riesgo de ser afectadas por uno o varios peligros geológicos.

De estas zonas críticas en laderas, el 45.6 % corresponde a deslizamientos rotacionales, seguidos por derrumbes (21.7 %) y caídas de rocas (14.4 %), fenómenos que ponen en peligro la integridad física de miles de habitantes y la estabilidad de infraestructuras clave como viviendas, vías de comunicación y servicios básicos. Además, 439 de estas zonas críticas se encuentran en áreas sin acceso cercano a servicios básicos, lo que agrava la vulnerabilidad de las comunidades afectadas.



El informe resalta que las condiciones topográficas, geológicas y geomorfológicas del Perú, con elevaciones que varían entre 0 y 5,000 metros sobre el nivel del mar y pendientes que oscilan entre suaves en la costa y selva, hasta fuertes en la sierra (15° a 45°), potencian la ocurrencia de estos movimientos en masa. La combinación de factores naturales, como intensas precipitaciones y suelos inestables, junto a actividades antrópicas como la urbanización sin planificación, deforestación y uso inadecuado del suelo, contribuyen al incremento y la gravedad de estos deslizamientos.

Este escenario genera una amenaza constante para miles de personas, particularmente en zonas rurales y periurbanas, con un impacto directo en su seguridad, calidad de vida y desarrollo económico. La ausencia de sistemas efectivos para la detección temprana y monitoreo de estos fenómenos limita la capacidad de respuesta y prevención, aumentando el riesgo de pérdidas humanas y daños materiales.

En la región Apurímac, la vulnerabilidad frente a los movimientos en masa es considerable, ya que se encuentran registradas 28 zonas críticas en laderas, según el diagnóstico del (INGEMMET, 2024). Estas zonas representan un riesgo latente para comunidades rurales dispersas, infraestructura vial y edificaciones básicas, poniendo en peligro la vida de miles de habitantes. La ubicación geográfica montañosa y las pendientes pronunciadas de la región, que oscilan entre 15° y 45°, favorecen la ocurrencia de deslizamientos, especialmente durante la temporada de lluvias intensas que se presentan con mayor frecuencia debido al cambio climático (INGEMMET, 2024)

La zona de Kolkaque, ubicada en el distrito de Abancay, presenta características geomorfológicas y geotécnicas que la hacen especialmente susceptible a deslizamientos de masa. Estas inestabilidades afectan a la zona de Kolkaque, las cuales sus causas principales es el grado de pendiente del talud y el tipo de suelo, ocasionando efectos de deslizamiento afectando a la población aledaña, el cual se manifiestan con movimientos graduales o repentinos de suelo que amenazan directamente la seguridad de las comunidades asentadas en las laderas, así como la infraestructura vial. La ausencia de sistemas de monitoreo efectivos limita la capacidad para anticipar estos eventos y tomar medidas preventivas adecuadas, lo que aumenta el riesgo de pérdidas humanas y daños materiales.



El desafío principal radica en determinar qué tecnologías de detección y monitoreo como los acelerómetros MPU 6050 y geófonos sísmicos pueden ofrecer un rendimiento óptimo y confiable para alertar oportunamente sobre movimientos sísmicos y deslizamientos en esta zona particular.

## 1.2 Enunciado del problema

### 1.2.1 Problema general

¿Cuál es la efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024?

### 1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué efectividad existe entre la medición del acelerómetro MPU-6050 en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024?
- ¿Qué efectividad existe entre la medición del geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024?

## 1.3 Justificación de la investigación

Los deslizamientos de suelo representan un riesgo geotécnico significativo en zonas montañosas del Perú, especialmente en regiones como Apurímac, donde se han identificado 28 zonas críticas en laderas con pendientes pronunciadas (INGEMMET, 2024). Estos eventos amenazan la seguridad de miles de habitantes, infraestructura vial y viviendas, generando pérdidas humanas y económicas importantes. La zona de Kolkaque, ubicada en Abancay, es particularmente vulnerable debido a sus condiciones geomorfológicas y climáticas, como pendientes abruptas y lluvias intensas frecuentes. La falta de sistemas de monitoreo eficaces limita la capacidad para anticipar estos deslizamientos y aplicar medidas preventivas oportunas, lo que hace necesario estudiar y validar tecnologías confiables para su detección temprana.



La detección temprana de deslizamientos es crucial para la gestión de riesgos y la protección de vidas humanas y bienes materiales. En este contexto, la evaluación comparativa de tecnologías como los acelerómetros MPU 6050 y los geófonos sísmicos aporta herramientas innovadoras para mejorar la precisión y rapidez en la identificación de movimientos de masa. Esto tiene una alta relevancia técnica y social, ya que permite a las autoridades y comunidades implementar sistemas de alerta temprana más eficientes y reducir la vulnerabilidad ante desastres naturales, contribuyendo al desarrollo sostenible y la resiliencia territorial.

Esta investigación es original e inédita, ya que combina un análisis comparativo riguroso entre acelerómetros MPU 6050, dispositivos de bajo costo y alta sensibilidad, y geófonos sísmicos, tradicionalmente usados en monitoreo sísmico, para la detección específica de deslizamientos de suelos. No existen antecedentes documentados que apliquen estas tecnologías de forma conjunta en Kolkaque, lo que posiciona este estudio como pionero en la aplicación de estas herramientas para la gestión local del riesgo geotécnico.

Los resultados de esta investigación proporcionarán una evaluación técnica cuantitativa teniendo un aporte técnico - científico sobre la efectividad relativa de los acelerómetros y geófonos para detectar movimientos de masas, contribuyendo al desarrollo de protocolos de monitoreo más precisos y accesibles. Esto fortalecerá la base científica en la gestión de riesgos geológicos, permitirá optimizar recursos en la implementación de sistemas de alerta temprana y favorecerá la transferencia tecnológica hacia comunidades y entidades locales. Además, el estudio contribuirá a la literatura científica sobre sensores de movimiento aplicados en geotecnia, ya que el acelerómetro MPU 6050 toma un papel importante en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, siendo un sensor MENS económico y muy sensible. Este dispositivo combina en un chip un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio de tres ejes, lo que facilita la medición simultánea de aceleraciones lineales y velocidades angulares en tres ejes, teniendo aportes científicos en el avance de estudios sísmicos y geotécnicos para la detección temprana de deslizamientos, monitoreo de vibraciones de suelos y estructuras, abriendo nuevas líneas de investigación y aplicación en contextos similares.



## CAPÍTULO II

### OBJETIVOS E HIPÓTESIS

#### 2.1 Objetivos de la investigación

##### 2.1.1 Objetivo general

Evaluar la efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.

##### 2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar la efectividad entre la medición del acelerómetro MPU-6050 en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.
- Determinar la efectividad entre la medición del geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.

#### 2.2 Hipótesis de la investigación

##### 2.2.1 Hipótesis general

El acelerómetro MPU 6050 presenta una efectividad significativa frente al geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, durante el año 2024.

##### 2.2.2 Hipótesis específicas

- El acelerómetro MPU 6050 presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.
- El geófono vertical de 4.5 Hz presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.



### 2.3 Operacionalización de variables

**Tabla 1 — Cuadro de operacionalización de variables**

<b>Variables</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Ítem/ Unidad</b>	<b>Instrumento</b>
X: Independiente Acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz	Dispositivos electrónicos para detección y registro de movimientos del suelo: el acelerómetro mide aceleraciones en 3 ejes, el geófono registra ondas sísmicas(ÁNGELES 2019, p. 1)	Instrumentos instalados en zona de estudio que registran datos cuantitativos de aceleración y vibración del suelo durante eventos de deslizamiento de suelo.	Acelerómetros MPU 6050  Geófono vertical de 4.5 Hz	Aceleraciones registradas  Sensibilidad	(g o m/s <sup>2</sup> )  (v/m/s)	IDE de Arduino,Python  GEODE, PASI
Y: Dependiente Deslizamiento de suelo	Proceso de identificación o reconocimiento de movimientos de masa en el terreno que indican un deslizamiento de suelo, mediante monitoreo y análisis geotécnico.(SUÁREZ 2009)	Capacidad de los sensores para detectar oportunamente señales o patrones que indiquen un deslizamiento, considerando además las características geotécnicas.	Porcentaje de humedad  Tipo de Suelo  Grado de Pendiente	Contenido de agua en el suelo  Clasificación del suelo  Inclinación del terreno	%  Diámetro (mm)  (% , °)	Horno de secado + balanza de precisión  Juego de tamices  Estación tota

## CAPÍTULO III

### MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 3.1 Antecedentes

##### 3.1.1 Internacional

- a) Widodo, et al. (2024), tuvo como objetivo desarrollar un sistema de alerta temprana para deslizamientos utilizando una red de sensores inalámbricos. La muestra consistió en tres nodos sensorados instalados en el área de captación de una mini-hidroeléctrica en Batubrak (Lampung, Indonesia), cada uno equipado con un acelerómetro MPU 6050, un pluviómetro tipo tipping-bucket y sensores de humedad o vibración. Metodológicamente, se implementó una red de sensores (WSN) conectada a una interfaz SCADA para visualización y generación de alertas mediante umbrales preestablecidos. Se sustentó en teorías modernas de monitoreo multiparamétrico. Como resultado cuantificado, los sistemas alertaron en menos de un minuto al superar los umbrales establecidos, correlacionándose con lluvias e inclinación detectada. Se concluyó que la integración de MPU 6050 con sensores pluviométricos mejoró la detección temprana respecto a configuraciones monomodal.
- b) Jabrane (2023), en su tesis doctoral planteo como objetivo, abordar los desafíos en la detección y localización de zonas inestables en entornos urbanos específicos de Marruecos (Tghat Fès, Sefrou y Bhalil) y en la Sierra de Gádor (España). La población de estudio comprendió áreas urbanas y rurales con antecedentes de deslizamientos, cavidades y formaciones cársticas, delimitando sectores de alto riesgo mediante estudios geológicos previos.

La metodología incluyó el uso combinado de métodos geofísicos como tomografía eléctrica, sondeo eléctrico vertical, georradar y tomografía sísmica de refracción. Estos métodos fueron complementados con modelización directa empleando herramientas Python como pyGIMLi y pyBERT, que facilitaron la simulación de respuestas geofísicas del subsuelo. La base teórica se sustentó en principios de geotecnia aplicada y geofísica de prospección.



Entre los resultados cuantificados, se identificaron zonas de alto riesgo en Tghat con potencial de deslizamientos, cavidades subterráneas en Bhalil y Sefrou, así como dolinas en la Sierra de Gádor. Las técnicas eléctricas mostraron una alta efectividad para detectar cavidades cársticas y zonas de fracturación, mientras que la modelización directa optimizó la precisión de las interpretaciones. Se concluyó que la integración de métodos geofísicos con modelización computacional mejora la detección y caracterización de inestabilidades, siendo aplicable a futuras campañas de campo para la gestión de riesgos geotécnicos en.

- c) Cargua, et al. (2024), desarrollaron un estudio cuyo objetivo fue elaborar un modelo cartográfico de susceptibilidad a deslizamientos en la carretera Puyo–Tena, en la Amazonía ecuatoriana, considerando variables como pendiente, litología, cobertura y uso del suelo, así como la distancia a fallas geológicas, carreteras y ríos, con el fin de anticipar y mitigar estos eventos. La población de estudio comprendió la totalidad de la carretera, prestando especial atención a zonas con antecedentes de inestabilidad, y la muestra incluyó quince sectores identificados como críticos.

La metodología aplicada se basó en el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para ponderar variables, integrando datos geotécnicos, topográficos y geológicos. La base teórica utilizada se fundamentó en modelos multicriterio para la evaluación de riesgos geológicos y en la teoría de toma de decisiones de Saaty en 1980.

Los resultados indicaron que el 21,25 % del trazado (17 km) presentaba una alta probabilidad de deslizamientos, con mayor riesgo en áreas con pendientes pronunciadas, litología permeable y cercanía a cursos de agua. El modelo alcanzó un índice de validación del 83,7 % medido mediante el Área Bajo la Curva (AUC) de la curva ROC, lo que confirmó su alto nivel de precisión.

El autor concluyó que el modelo desarrollado constituye una herramienta técnica eficaz para la gestión del riesgo en infraestructuras viales, recomendándose la aplicación de medidas preventivas y correctivas en las zonas de mayor



susceptibilidad, a fin de proteger la seguridad de los usuarios y preservar la integridad de la vía.

- d) Xiaojie (2022), desarrolló una investigación doctoral cuyo objetivo fue crear y aplicar nuevas tecnologías para la identificación temprana, el seguimiento y la predicción de deslizamientos de tierra en áreas extensas mediante el uso de teledetección por radar espacial. La población de estudio abarcó amplias zonas montañosas de la meseta Qinghai-Tíbet y la meseta de Loes, en China, con una superficie total aproximada de 3 140 000 km<sup>2</sup>, mientras que la muestra correspondió a sectores específicos con antecedentes o alto riesgo de movimientos de ladera.

La metodología se centró en tres tecnologías clave: el procesamiento interferométrico SAR (InSAR) de alta precisión, la técnica de SAR offset-tracking y el monitoreo de deformaciones mediante series temporales tridimensionales. El procesamiento de datos radar alcanzó una resolución espacial de 20 m, lo que permitió elaborar mapas detallados de deformación superficial. La base teórica de la investigación se sustentó en los principios de la interferometría radar y la modelización de movimientos de ladera, integrando conceptos de geotecnia y geomática avanzada.

Los resultados mostraron que el uso combinado de InSAR de alta precisión y offset-tracking mejoró notablemente la detección de deslizamientos complejos en entornos montañosos, permitiendo su identificación incluso bajo condiciones geomorfológicas adversas. Además, la aplicación de series temporales 3D permitió caracterizar la evolución de las deformaciones y establecer patrones predictivos de inestabilidad.

El autor concluyó que las metodologías propuestas representan un avance significativo en la alerta temprana de deslizamientos de tierra, al proporcionar herramientas más precisas para su identificación, monitoreo y predicción. Estas tecnologías tienen un alto potencial de aplicación en la gestión del riesgo geotécnico, contribuyendo a la prevención de desastres y a la protección de comunidades en zonas vulnerables.

- e) Pérez (2021), desarrolló un trabajo de investigación cuyo objetivo fue proponer una metodología eficiente y económica para la detección y ubicación de deslizamientos rotacionales y traslacionales en áreas extensas, utilizando herramientas de la Geomática. La población de estudio correspondió a zonas rurales del municipio de Villavicencio, en el departamento del Meta (Colombia), mientras que la muestra estuvo compuesta por sectores previamente identificados con presencia de movimientos en masa.

La metodología combinó la identificación visual de rasgos pictórico-morfológicos con un procedimiento semiautomático de clasificación basado en objetos geográficos (GEOBIA). Se analizaron criterios espectrales, temporales, espaciales y de área a partir de imágenes multiespectrales Sentinel-2 y un modelo digital de terreno (MDT) derivado de imágenes radar Sentinel-1. Posteriormente, se incorporaron parámetros como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el índice S2 BI, la pendiente y datos contextuales para refinar la clasificación.

La base teórica se apoyó en la teledetección satelital aplicada a la geomorfología y la modelización espacial de deslizamientos, con énfasis en la clasificación orientada a objetos. Los resultados mostraron que el método permitió identificar deslizamientos con una exactitud de clasificación entre el 51 % y el 56,6 %, con un área erróneamente clasificada que varió entre el 17 % y el 25 %.

El autor concluyó que la metodología propuesta constituye una alternativa viable para la delimitación de zonas susceptibles a deslizamientos en territorios amplios, optimizando el tiempo de análisis y reduciendo costos. Asimismo, su implementación puede facilitar la elaboración de inventarios y mapas de susceptibilidad, contribuyendo a la gestión de riesgos geotécnicos en regiones de alta vulnerabilidad.

- f) Buñay (2023), desarrolló un trabajo de investigación cuyo objetivo principal fue planificar el uso del suelo y proponer medidas de mitigación para reducir el riesgo de deslizamientos en la ciudad de Riobamba, Ecuador. El estudio tuvo como meta



identificar las zonas vulnerables, evaluar la vulnerabilidad física y diseñar un Sistema de Alerta Temprana (SAT) específico para la prevención de deslizamientos.

La población de análisis correspondió a diferentes sectores urbanos de Riobamba, mientras que la muestra se concentró en el tramo comprendido entre el Barrio Los Shirys y la Ciudadela Monseñor Leónidas Proaño, identificado como el de mayor riesgo. La metodología se basó en recolección de datos en campo para determinar parámetros asociados a la susceptibilidad, combinando un análisis cualitativo con evaluaciones de vulnerabilidad física. Los resultados indicaron que el tramo seleccionado presentó un valor de Riesgo de Vulnerabilidad Física (RVF) de 28,24, lo que justificó su priorización.

La base teórica se sustentó en la gestión del riesgo de desastres, los principios de planificación urbana y las tecnologías aplicadas a los SAT. La propuesta consistió en un sistema mixto que combinó componentes tecnológicos —Arduino MEGA, sensores de humedad FC28, sensores DHT11 para temperatura y humedad relativa, y un pluviómetro de balancín— con estrategias comunitarias de alerta. Esta integración buscó maximizar la eficiencia del monitoreo y optimizar los costos.

El autor concluyó que la identificación precisa de las zonas de mayor riesgo permite focalizar las medidas de prevención, y que un SAT mixto puede representar una solución eficiente y accesible para la gestión del riesgo de deslizamientos. El trabajo aportó una propuesta adaptable a contextos urbanos similares, fortaleciendo las capacidades de respuesta y mitigación frente a amenazas geotécnicas.

### 3.1.2 Nacional

- a) Ticona (2019), realizó un trabajo de investigación con el objetivo de aplicar métodos geofísicos sísmicos y eléctricos para caracterizar el subsuelo, identificar sus condiciones físicas y mecánicas, así como detectar zonas de riesgo para futuras infraestructuras. La población de estudio correspondió al área del Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), donde



se ejecutaron cinco líneas de Refracción Sísmica, cuatro líneas MASW1D, cuatro líneas MASW2D y cuatro líneas MAM. En la refracción sísmica se utilizaron geófonos de 14 Hz con espaciamiento de 3 m, mientras que para MASW1D se efectuaron tiros a distintas distancias; en MASW2D se emplearon geófonos de 4.5 Hz, y en MAM se registraron 24 archivos por línea. En la prospección eléctrica se desarrollaron cinco Sondajes Eléctricos Verticales y tres líneas de Tomografía Eléctrica de hasta 35 m de profundidad. Los resultados indicaron velocidades de onda P ( $V_p$ ) de 300 m/seg en superficie y entre 1000 y 2000 m/seg en horizontes más profundos; mientras que las ondas S ( $V_s$ ) variaron entre 380 m/seg en capas superficiales y 1000 m/seg en profundidad. El método eléctrico reveló la presencia de acuíferos a 50 m y humedades relacionadas con el riego. Se concluyó que la combinación de métodos sísmicos y eléctricos permitió obtener una caracterización detallada del subsuelo, útil para la planificación de infraestructuras y la gestión de recursos hídricos subterráneos.

- b) Barrientos (2022), desarrolló una investigación cuyo objetivo fue explicar cómo el monitoreo microsísmico influía en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior de la Mina San Vicente, en 2022. La población de estudio correspondió al macizo rocoso de la mina, y la muestra se delimitó al sector Ayala inferior. La metodología fue de tipo aplicada, nivel explicativo y diseño descriptivo, enfocándose en el análisis de eventos microsísmicos y su relación con el comportamiento estructural de la roca. Los resultados evidenciaron que el monitoreo microsísmico permitió identificar zonas vulnerables, facilitando la adopción de medidas preventivas y posibilitando la implementación de un sistema de alerta temprana adaptado a las condiciones específicas del yacimiento. Se concluyó que este tipo de monitoreo es una herramienta eficaz para comprender la dinámica interna del macizo rocoso y garantizar la seguridad de las operaciones mineras.

El trabajo aporta conocimientos significativos sobre la relación entre el monitoreo microsísmico y la estabilidad del macizo rocoso en contextos mineros. Los resultados pueden contribuir al desarrollo de estrategias más efectivas para garantizar la seguridad y estabilidad en operaciones mineras similares.

c) Alayo (2021), llevó a cabo una investigación con el propósito de correlacionar imágenes ópticas satelitales de los satélites SPOT 6 y Sentinel 2, correspondientes a los años 2017 y 2019, para generar información que permitiera identificar y caracterizar zonas vulnerables a procesos de remoción en masa en Huancabamba, Piura. La población de estudio fue la ciudad de Huancabamba, afectada por constantes deslizamientos de tierra. La metodología se basó en el uso del software COSI-Corr, aplicando la correlación subpíxel mediante transformadas de Fourier, seleccionando la ventana temporal en función de la variabilidad climática de la zona. Los resultados identificaron 14 zonas de deformación superficial, de las cuales 11 presentaban desplazamientos significativos de entre 0.10 m y 0.83 m, mientras que 3 mostraban movimientos lentos y continuos. Estos hallazgos fueron validados con estudios geodésicos y morfodinámicos del proyecto “Evaluación Geodinámica, Geofísica y Geología de los Deslizamientos de Tierra que Afectan la Seguridad Física de la Ciudad Huancabamba”. Se concluyó que la metodología empleada permitió una identificación precisa de áreas inestables, constituyendo una herramienta valiosa para la gestión del riesgo de desastres en la región. La investigación contribuye significativamente al conocimiento de la dinámica de deslizamientos de tierra en Huancabamba. Los resultados proporcionan información esencial para la gestión de riesgos de desastres, permitiendo una adecuada identificación y caracterización de zonas inestables por procesos de remoción de masa.

## 3.2 Marco teórico

### 3.2.1 Acelerómetro MPU 6050 – Variable independiente 1

El acelerómetro MPU 6050 fue identificado como un sensor MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) que integró en un solo chip un acelerómetro triaxial y un giroscopio triaxial, permitiendo la medición simultánea de aceleraciones lineales y velocidades angulares InvenSense (2013). Este dispositivo se utilizó ampliamente en aplicaciones de monitoreo de movimientos y vibraciones debido a su bajo costo, reducido tamaño y capacidad de registrar datos en tiempo real.

El principio de funcionamiento del acelerómetro se basó en la medición de la variación de capacitancia generada por el desplazamiento de una microestructura interna ante una fuerza inercial, conforme a la segunda ley de Newton. El giroscopio,

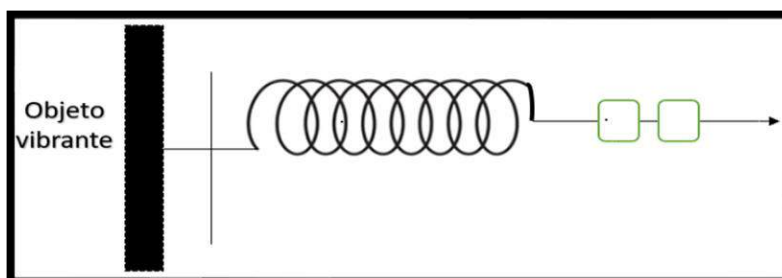


por su parte, utilizó el efecto Coriolis para medir la velocidad angular, complementando así el análisis de movimientos y permitiendo discriminar entre vibraciones ambientales y movimientos anómalos del terreno.

Este dispositivo digital funciona como un sensor combinado de acelerómetro y giroscopio. Para este proyecto, solo se utilizará la funcionalidad del acelerómetro. Se comunica a través del protocolo I2C y cuenta con una resolución de 16 bits (65,536).

El MPU6050 es una Unidad de Medición Inercial o IMU (Inertial Measurement Unit) que cuenta con seis grados de libertad (6DoF), ya que integra un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio de tres ejes. Este sensor es ampliamente empleado en aplicaciones de navegación, goniometría (medición de ángulos) y estabilización (Naylamp Mechatronics, 2020)

Fernández (2007, p. 23) Los métodos tradicionales de detección y medición de aceleraciones se fundamentan en el principio formulado por Isaac Newton, el cual está detallado en su obra "Principia" de 1687.



FUENTE: Fernández, 2007, p. 23

### Figura 1 — Esquema interno del acelerómetro

Es importante destacar que tanto la aceleración como la fuerza son cantidades vectoriales, lo que significa que poseen dirección y sentido. En términos matemáticos, estas magnitudes pueden expresarse con valores positivos o negativos.

El principio básico que rige todos los acelerómetros, independientemente de la tecnología empleada, es la detección de la fuerza aplicada a una masa a través de una restricción elástica. (Fernández, 2007)



Un acelerómetro es un dispositivo utilizado para medir la vibración o la aceleración del movimiento de una estructura. La fuerza producida por la vibración o el cambio en el movimiento (aceleración) causa que la masa comprima el material piezoeléctrico, lo que genera una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada sobre él. Debido a que la carga es proporcional a la fuerza y la masa es constante, la carga también es proporcional a la aceleración.(Omega, 2023)

Alzate (2016) Los acelerómetros o sensores de aceleración están diseñados para detectar y medir la aceleración o la vibración, generando una señal eléctrica en respuesta a cambios en estas variables físicas. A continuación, se presentan varios modelos que emplean diversas tecnologías, como los acelerómetros piezoresistivos, piezoeléctricos y capacitivos.

### 3.2.1.1 Tipo de sensor

En un sistema de medición, el sensor es específicamente diseñado para adquirir datos en forma de señal eléctrica sobre la propiedad que se está midiendo. Sin embargo, no sería lógico anticipar que el sensor responda únicamente a la magnitud que se está midiendo, ni que las señales de salida provengan únicamente de la señal de entrada presente (Pallas 2003)

Es crucial armonizar las características del sensor con las del circuito que permite medir, acondicionar, procesar y utilizar dichas mediciones (Mayné 2003, p. 5)

El **MPU-6050** es un sensor MEMS de 6 grados de libertad (6-DoF), que integra un **acelerómetro triaxial** y un **giroscopio triaxial** en el mismo chip, junto con un **procesador de movimiento digital (DMP)** para procesamiento interno de datos (Invensense, 2013)

Ambas unidades acelerómetro y giroscopio utilizan convertidores analógico-digitaes (ADC) de 16 bits, lo que proporciona alta resolución en la captura de valores.



### 3.2.1.2 Precisión y señales registradas

El acelerómetro es configurable para rangos completos de:  $\pm 2$  g,  $\pm 4$  g,  $\pm 8$  g,  $\pm 16$  g, lo que permite adaptar la sensibilidad según el nivel de aceleración esperado.

El giroscopio, por su parte, se puede ajustar a rangos de:  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ ,  $\pm 2000$  °/seg, lo que permite medir velocidades angulares de distintos niveles con precisión.

### 3.2.1.3 Frecuencia de medición (frecuencia de muestreo)

La salida del acelerómetro puede configurarse para funcionar hasta 1 kHz si el filtro digital (DLPF) está habilitado, mientras que el giroscopio puede alcanzar hasta 8 kHz cuando el filtro está desactivado.

El muestreo real depende del registro de división (SMPLRT\_DIV), que ajusta el ritmo de salida según el valor de configuración.

En la práctica, con comunicación I<sup>2</sup>C a 400 kHz, muchos usuarios reportan tasas efectivas cercanas a 100 Hz, debido a limitaciones en lectura y procesamiento de datos por el microcontrolador. (Invensense, 2013)

### 3.2.1.4 Vibración en tiempo real

El sensor es ideal para **vibraciones y movimientos tanto rápidos como lentos**, gracias a su amplio rango dinámico y capacidad de procesamiento interno mediante el DMP. (Invensense, 2013)

En entornos prácticos, puede usarse para **monitoreo continuo (por ejemplo, en estructuras o laderas)**, y su bajo consumo en modos de bajo muestreo lo hace especialmente útil en aplicaciones remotas o alimentadas por batería.

### 3.2.1.5 Arduino

Arduino es una placa de control con entradas y salidas, programada desde el ordenador con un lenguaje específico. Examinaremos los componentes de una Arduino UNO. (Departamento de Tecnologías IES 2018, p. 3)

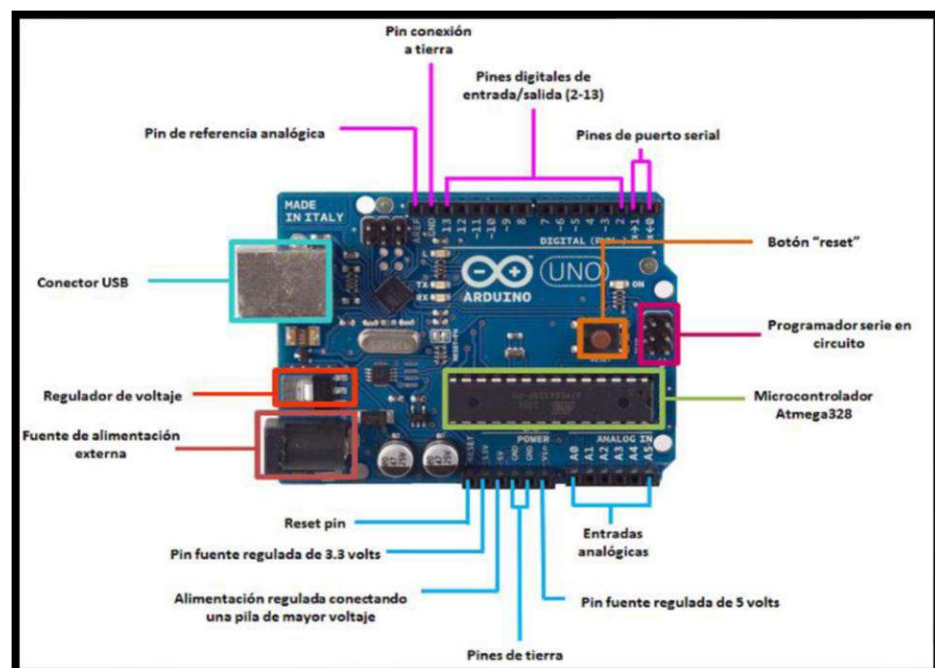


Desde una perspectiva formal, Arduino representa una plataforma de hardware de código abierto concebida por David Cuartielles y Massimo Banzi. Fundamentada en una placa que integra un microcontrolador y un ambiente de desarrollo, su objetivo es simplificar la aplicación de la electrónica en proyectos interdisciplinarios, apta tanto para aficionados como para profesionales.(Peña 2017, p. 28)

### 3.2.1.6 Estructura de programación

El esquema fundamental del lenguaje de programación de Arduino es directo, con al menos dos funciones esenciales. Estas funciones incluyen bloques que contienen declaraciones e instrucciones.(Ruiz 2007, p. 6)

```
void setup()  
{  
  estamentos;  
}  
void loop()  
{  
  estamentos;  
}
```



FUENTE: Departamento de Tecnologías IES, 2018, p. 3

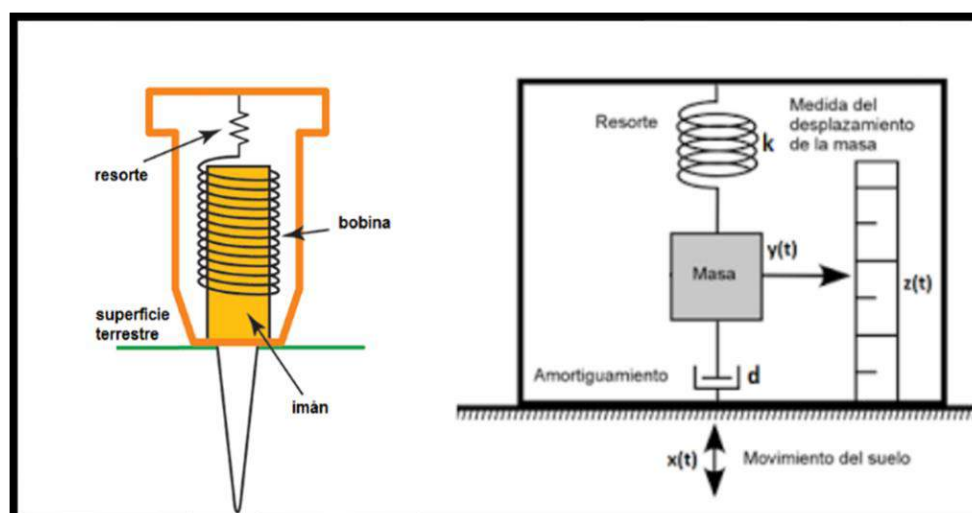
**Figura 2 — Esquema de la placa arduino**



### 3.2.2 Geófonos verticales de 4.5 Hz – Variable independiente 2

Un dispositivo sísmico es un aparato diseñado para registrar los cambios en el movimiento del suelo cuando su estabilidad se ve afectada. Este dispositivo, también conocido como sismómetro o geófono, tiene como objetivo proporcionar datos sobre la cinemática del suelo, como su desplazamiento, velocidad o aceleración. (Contreras, 2019)

El diseño básico de un sismómetro se puede concebir como un sistema que consta de una masa suspendida por un resorte, con la inclusión de un amortiguador para prevenir oscilaciones excesivas cerca de la frecuencia de resonancia. Si designamos la constante de rigidez del resorte como " $k$ " en unidades de  $[N/m]$ , y la constante de fricción viscosa del amortiguador como " $d$ " en  $[N.s/m]$ , y expresamos el movimiento del suelo en función del tiempo como " $x(t)$ ", y el movimiento absoluto de la masa como " $y(t)$ ", el sistema se puede representar según el siguiente esquema.



FUENTE: Contreras, 2019, p. 3

Figura 3 — Esquema interno del geófono

#### 3.2.2.1 Tipo de sensor

Un geófono vertical de 4.5 Hz es un transductor electromecánico tradicionalmente basado en una bobina móvil suspendida en un campo magnético que genera una señal eléctrica proporcional al movimiento del terreno (velocidad del suelo) mediante el principio de inducción electromagnética. Actualmente existen versiones MEMS con respuesta en aceleración, aunque suelen presentar mayor nivel de ruido.



### 3.2.2.2 Precisión y señales registradas

- **Sensibilidad SG-10:** 22.8 V/m/s  $\pm 2.5$  %
- **Sensibilidad SM-24:** 28.8 V/m/s  $\pm 2.5$  %
- **Distorsión armónica:**  $\leq 0.075$  % (SG-10) y  $\leq 0.1$  % (SM-24)

Registran señales de **vibración y ondas sísmicas** en un rango que depende de la frecuencia natural del sensor. (Sercel, 2023)

### 3.2.2.3 Frecuencia de medición (frecuencia de muestreo)

Aunque la frecuencia natural típica de un geófono para geotecnia es de 10 Hz, la frecuencia de muestreo recomendada debe ser al menos 5 - 10 veces mayor para capturar adecuadamente la forma de onda. En la práctica, sistemas de adquisición usan 100 - 200 Hz para monitoreo de deslizamientos y vibraciones de corta duración.(Sercel, 2023)

### 3.2.2.4 Vibración en tiempo real

Tiene una alta relación señal/ruido y baja distorsión, los geófonos son capaces de registrar en tiempo real vibraciones mínimas que pueden preceder a un deslizamiento. Esto los hace esenciales en Sistemas de Alerta Temprana (SAT) para riesgos geotécnicos.

Algunos suelos granulares se pueden compactar fácilmente mediante vibraciones, los edificios que descansan sobre tales suelos pueden sufrir asentamientos importantes, debido a la vibración de la máquina que se instale en ellos, tales como grandes compresores y turbinas. Estos efectos de vibración son graves cuando la frecuencia de la vibración coincide con la frecuencia natural de terreno, advirtiendo que las vibraciones pueden causar asentamientos perjudiciales en una estructura particular.(Lambe y Whitman, 2004)

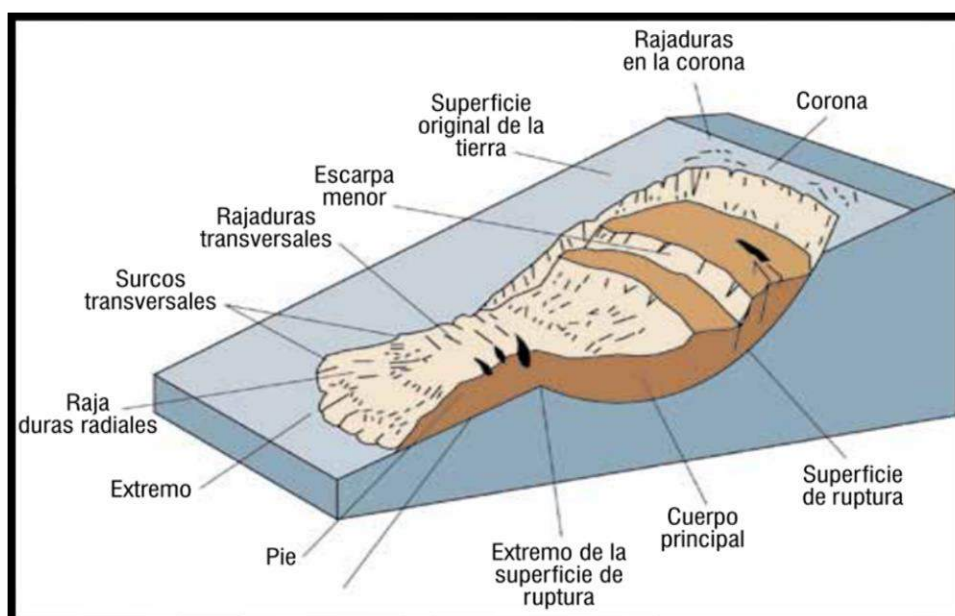
## 3.2.3 Deslizamiento de suelo – Variable dependiente 1

INDECI (2011, p. 13) Los desplazamientos de suelo constituyen elementos inherentes a los procesos denudativos que configuran la topografía terrestre. Su



génesis responde a una amplia variedad de fenómenos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos presentes en la corteza terrestre y en la interfaz entre esta, la hidrósfera y la atmósfera.

La expansión geográfica de la población podría enfrentar restricciones, especialmente cuando se extiende a áreas inestables, empinadas o remotas. En muchos casos, resulta prohibitivamente costoso estabilizar regiones afectadas por deslizamientos, y algunos residentes pueden carecer de alternativas viables para su reubicación. (Highland y Bobrowsky, 2008)

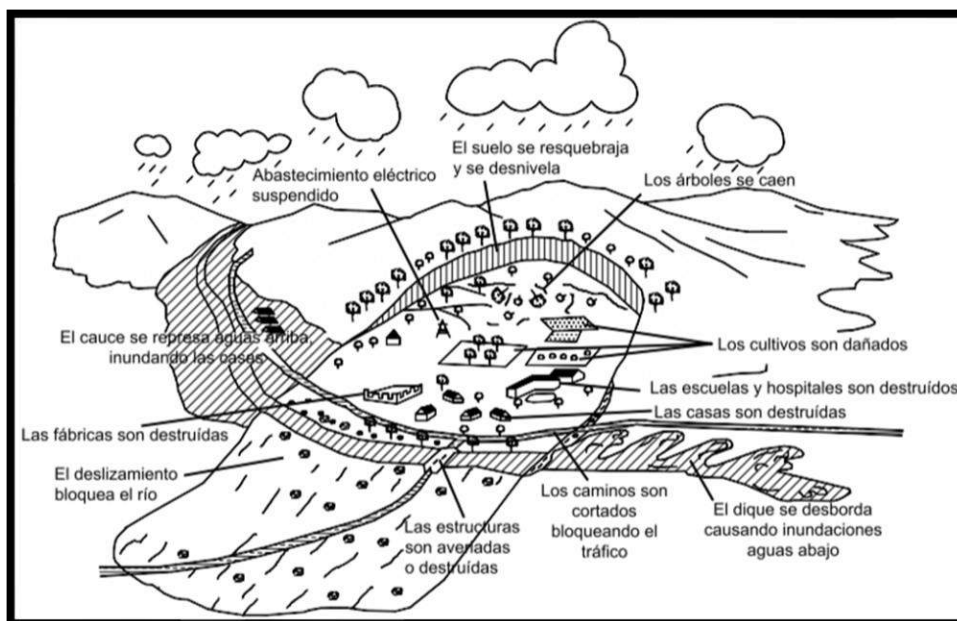


FUENTE: Highland y Bobrowsky, 2008, p. 25

#### Figura 4 — Deslizamiento rotacional

La actividad de un desplazamiento en masa abarca tres aspectos generales en la evolución temporal de la masa de material involucrada: el estado, la distribución y el estilo de la actividad. El primero se refiere a la regularidad o irregularidad temporal del desplazamiento; el segundo describe las partes o sectores de la masa que experimentan movimiento; y el tercero señala la manera en que los distintos movimientos dentro de la masa contribuyen al desplazamiento total. El estado de actividad de un movimiento en masa puede clasificarse como activo, reactivado, suspendido, inactivo latente, inactivo abandonado, inactivo estabilizado e inactivo relictos. (INGEMMET, 2023, p. 9)

Jimenez, Hurtado y Duque (2020, p. 17) Los movimientos de tierra constituyen las actividades llevadas a cabo por el ser humano con el objetivo de alterar o ajustar la topografía de una región, franja o zona, con el propósito de acuerdo a un proyecto preconcebido. Esta intervención puede ejecutarse mediante métodos manuales o mecanizados, en función del tipo y alcance del proyecto en cuestión.



FUENTE: Suárez, 2009, p. 20

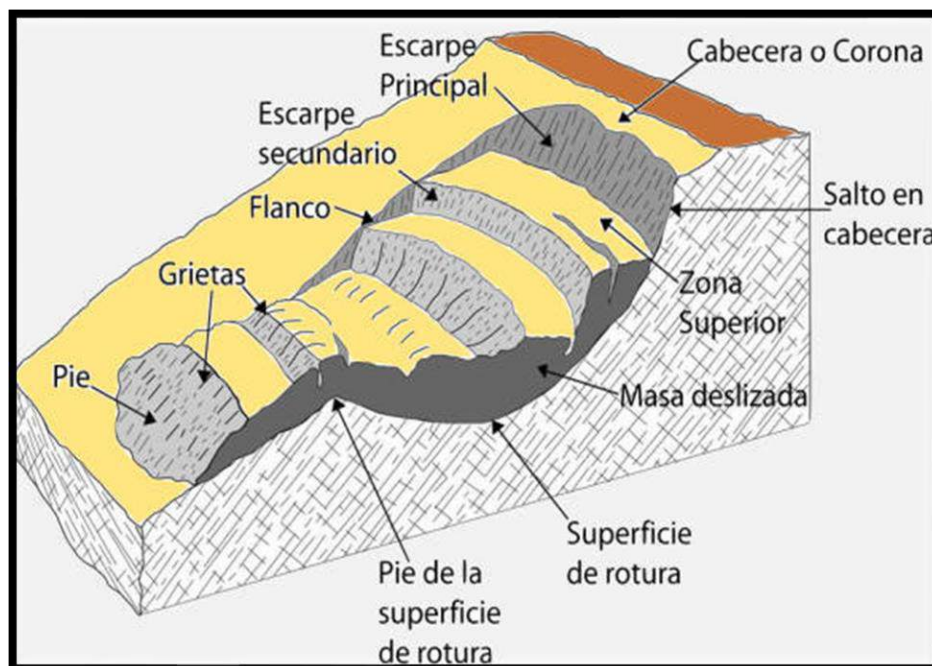
### Figura 5 — Efectos directos de los deslizamientos de tierra

Los deslizamientos de tierra representan uno de los fenómenos geológicos más perjudiciales para las comunidades humanas, provocando numerosas pérdidas de vidas y daños materiales valuados en decenas de miles de millones de dólares anualmente. (Suárez, 2009)

#### 3.2.3.1 Deslizamiento

Un deslizamiento se define como el descenso hacia abajo de una masa de tierra o roca, desarrollándose en superficies de rotura o en áreas relativamente delgadas con deformación intensa de corte. En su inicio, los movimientos no se manifiestan de manera simultánea en la totalidad de lo que eventualmente se convierte en la superficie de rotura; en su lugar, el volumen del material desplazado se incrementa desde una zona localizada de falla. (Highland y Bobrowsky 2008, p. 31)





FUENTE: geologiaweb, 2020

### **Figura 6 — Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento**

Suárez (2009) Los deslizamientos, definidos como "movimientos de masas de roca, residuos o tierra hacia abajo de un talud" según Cruden (1991), abarcan tanto procesos erosivos como dudacionales. La definición no especifica la naturaleza precisa del proceso, englobando aquellos que resultan de las fuerzas gravitacionales, hidráulicas, entre otras.

#### **3.2.3.2 Tipos básicos de deslizamientos**

Highland y Bobrowsky (2008, p. 25) Un derrumbe se caracteriza por un descenso de rocas o suelos, o ambos, en la superficie de ruptura, que puede adoptar formas curvas, como en los deslizamientos de rotación, o planas, como en los deslizamientos de traslación. En este fenómeno, una parte significativa del material tiende a desplazarse como una masa cohesionada o semi-cohesionada, con mínima deformación interna. Es importante destacar que, en algunos casos, en los deslizamientos de tierra también pueden manifestarse otros tipos de movimiento, ya sea al comienzo de la falla o posteriormente, si las propiedades experimentan cambios a medida que el material desplazado avanza hacia abajo.

Los deslizamientos de tierra pueden ser categorizados en distintos tipos, tomando en consideración tanto el entorno en el que se desplazan como el tipo de material involucrado. En síntesis, la masa de material en un deslizamiento de tierra puede estar constituida por roca, tierra, o ambos elementos. Highland y Bobrowsky (2008) En el caso de la tierra, se clasifica como tal cuando está mayoritariamente compuesta por partículas del tamaño de arena o más finas, mientras que se denomina escombros cuando está formada por fragmentos gruesos. La tipología de movimiento describe la mecánica interna precisa de cómo se produce el desplazamiento de la masa del deslizamiento.

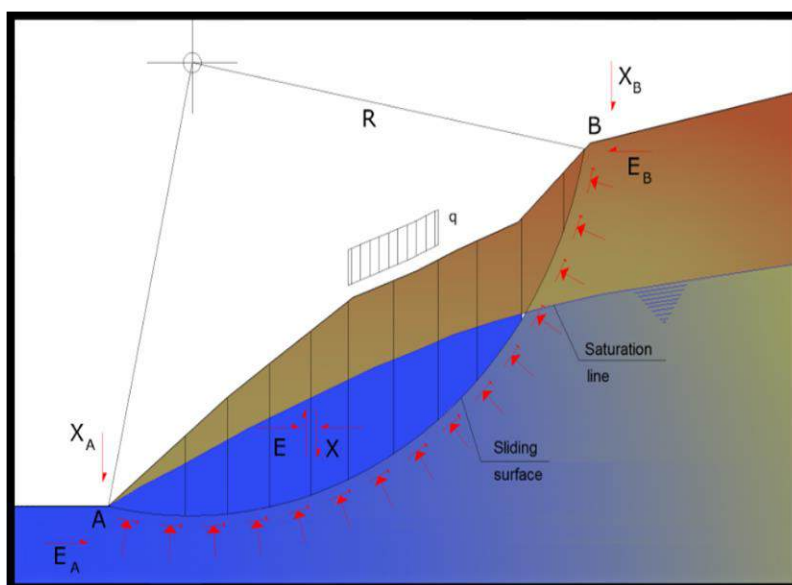
### 3.2.3.3 Propiedades del suelo

- a) **Porcentaje de humedad del suelo:** El contenido de agua influye directamente en la presión de poros y la resistencia al corte; la humedad elevada puede generar inestabilidad al aumentar el peso y reducir la cohesión del terreno. Estudios de demostraron que la inclusión de mediciones in situ de humedad mejora significativamente la predicción de deslizamientos en sistemas de alerta temprana. (Ameratunga, Sivakugan y Das, 2016)
- b) **Límites de Atterberg:** Determinan los estados de consistencia del suelo, límite líquido, plástico y de contracción y permiten evaluar su comportamiento ante cambios de humedad, lo cual es crítico en suelos arcillosos o limosos propensos a inestabilidad. (Lambe y Whitman, 2004)
- c) **Tipo de suelo:** La textura, composición y plasticidad del suelo (por ejemplo, arcilla, limo, arena) afectan su capacidad de retención de agua y susceptibilidad a deslizamientos. Los suelos con alta plasticidad generalmente presentan mayor riesgo por su variabilidad volumétrica. (Ameratunga, Sivakugan y Das, 2016)
- d) **Grado de pendiente:** Las pendientes más pronunciadas incrementan el componente gravitacional que impulsa el deslizamiento, reduciendo la

estabilidad de manera significativa. Este factor es considerado en modelos de susceptibilidad geotécnica. (Ameratunga, Sivakugan y Das, 2016)

### 3.2.3.4 La velocidad de desplazamiento

Descenso rápido o sumamente veloz en caída libre; desprendimiento de tierra que rebota y rueda, involucrando rocas y guijarros. La velocidad de deslizamiento está determinada por la inclinación de la pendiente. (Highland y Bobrowsky, 2008)



FUENTE: Geostru, 2016

**Figura 7 — Ángulo de desplazamiento ( $\alpha$ )**

### 3.2.3.5 Volumen de un deslizamiento

La medición del volumen de un deslizamiento se realiza en metros cúbicos después de la falla. La aproximación del volumen de un deslizamiento de rotación puede calcularse utilizando la expresión.

$$Vol_{des} = \left( \frac{1}{6} \pi D_r x W_r x L_r \right) F_{ex}$$

Donde  $F_{ex}$ : Factor de expansión del suelo al ser perturbado.

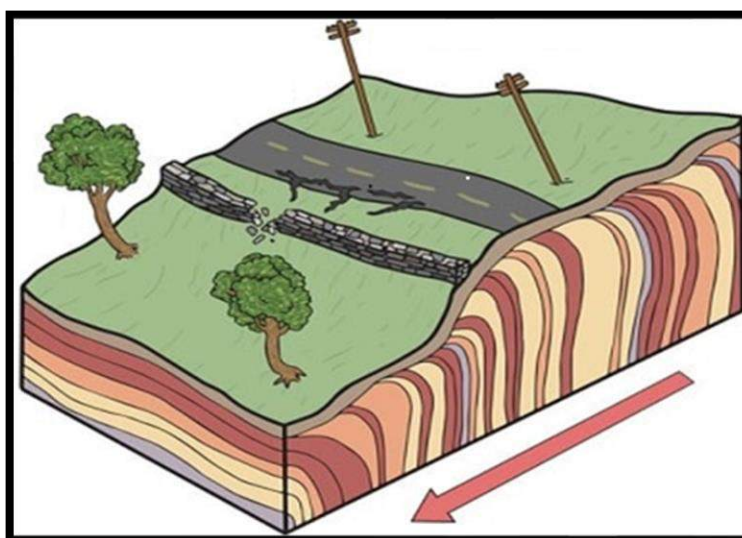
FUENTE: Suárez, 2009, p. 25

**Figura 8 — Volumen de un deslizamiento**



### 3.2.3.6 Ángulo y longitud de recorrido

En los movimientos de flujo, especialmente en los flujos rápidos, tanto el ángulo de desplazamiento inicial como la longitud de recorrido pueden determinar la magnitud del riesgo. El ángulo de desplazamiento inicial influye en las condiciones iniciales del movimiento, mientras que el ángulo de recorrido (figura 1.8) impacta el proceso del flujo hasta que se detiene o alcanza su longitud total de recorrido. Esta longitud está condicionada por el ángulo de inclinación y la geometría del talud, el tipo de material, el contenido de agua y el volumen del movimiento. (Suárez, 2009)



FUENTE: Geología, 2023

**Figura 9 — Longitud y ángulo de recorrido**

### 3.2.4 Características de los materiales

Los materiales utilizados comúnmente en el proceso de Movimiento de Tierra, que incluye el corte, transporte y colocación, consisten en rocas y suelos. Dada su relevancia en la construcción de infraestructuras civiles, resulta esencial familiarizarse con ellos, identificarlos y comprender sus características y propiedades en relación con las fases de extracción, transporte y colocación. Esto se realiza con el propósito de preparar áreas para cimentación, accesos y planificación urbana en general. (Jimenez, Hurtado y Duque 2020, p. 23)

#### 3.2.4.1 Tipología y formas de manifestación

Entre los riesgos asociados a la geodinámica externa, se encuentran aquellos originados por las inestabilidades en las laderas, comúnmente denominados

como Movimientos en Masa en Laderas. La inestabilidad de las laderas se describe como el desplazamiento de masas de roca, detritos o tierra a lo largo de la pendiente, influenciado directamente por la gravedad INDECI (2011, p. 13). Es importante señalar que existen laderas inestables que aún no han experimentado movimientos, a pesar de estar bajo la influencia directa de la gravedad, y requieren la intervención de otro factor desencadenante para provocar un deslizamiento.

La ruptura de los materiales en las laderas tiene lugar cuando la fuerza de gravedad supera la cohesión interna de la roca o el suelo que constituye la ladera. En otras palabras, se producen alteraciones en el equilibrio entre las fuerzas de resistencia al corte y las fuerzas motrices, siendo la fuerza de gravedad el factor desencadenante constante. (Berry y Reid, 2003)



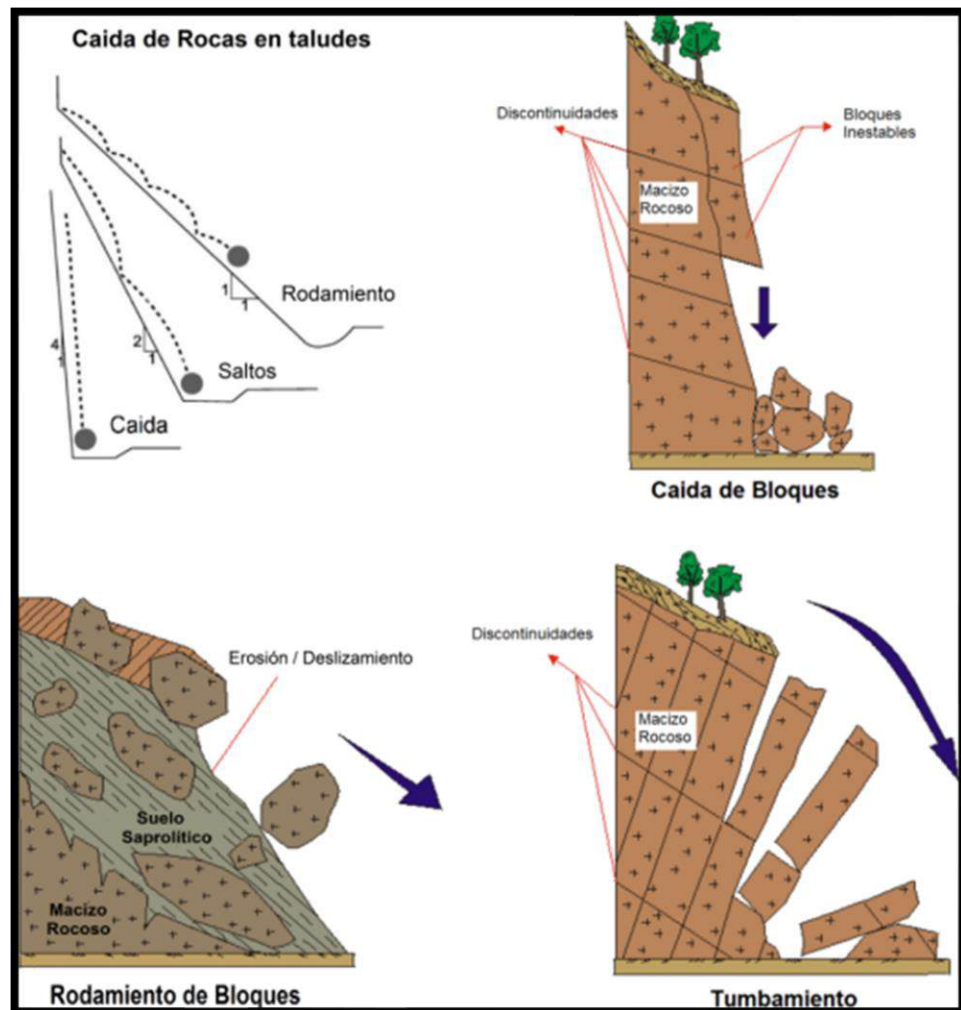
FUENTE: ANDINA, 2009

**Figura 10 — Caído o desprendimiento de suelo**

### 3.2.4.2 Clasificación de los movimientos

Para la categorización de los deslizamientos, se utiliza el sistema propuesto por Varnes (1978), que clasifica los principales tipos de movimiento. En este texto, se introducen algunas adiciones a los procesos de movimiento

originalmente identificados por Varnes. Algunos de estos movimientos están considerados dentro de la clasificación de procesos de deterioro (anteriores a un deslizamiento), siendo desafiante distinguir entre cuándo son procesos de deterioro y cuándo son componentes principales del movimiento del talud. A modo de ejemplo, la erosión se clasifica como un proceso en lugar de un tipo de movimiento.



FUENTE: INGEMMET, 2016

Figura 11 — Esquema de caídos de roca y residuos

### 3.2.4.3 Reptación de formaciones de roca

La reptación de formaciones de roca se refiere a desplazamientos muy gradual y no acelerados, que son diferenciales, ocurriendo dentro de unidades de roca relativamente íntegras, de manera similar a un volcamiento a flexión en bloque. Estos movimientos pueden tener lugar a lo largo de superficies de corte que parecen no estar conectadas entre sí.



Esta clase de desplazamiento lento y no acelerado, conocido como reptación, suele ser el resultado de la relajación de tensiones en las masas rocosas, especialmente en áreas con alta fracturación en formaciones sedimentarias. En algunas situaciones, los fenómenos de origen tectónico son erróneamente identificados como reptación. (Suárez, 2009, p. 32)



FUENTE: Geotécnia, 2022

**Figura 12 — Proceso de reptación**

#### 3.2.4.4 Inestabilización

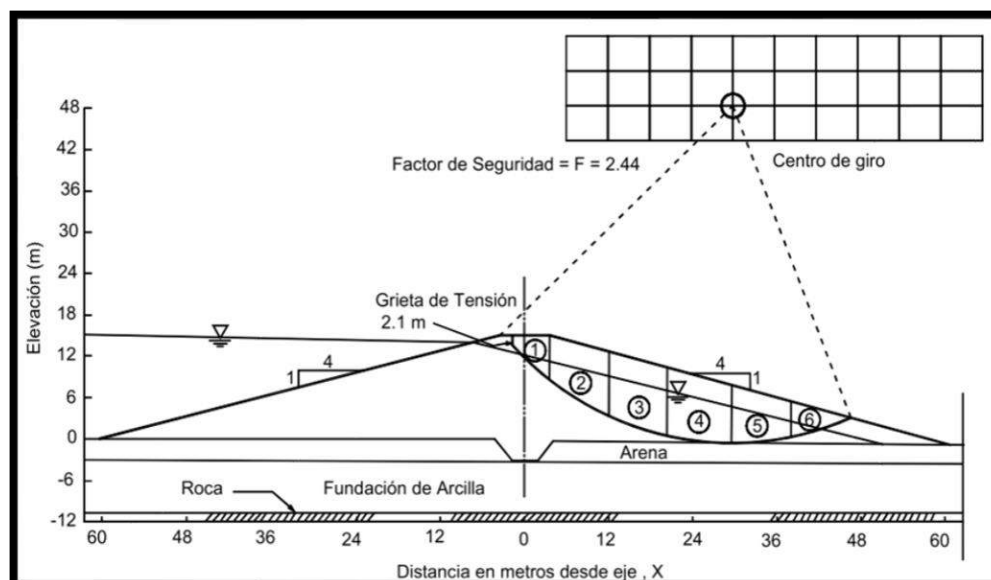
Terzaghi (1950) distinguió entre los factores externos e internos que influyen en la aparición de los deslizamientos. Tanto las causas internas como externas alteran el equilibrio de un talud de dos maneras:

- Disminuyendo la resistencia al corte.
- Aumentando los esfuerzos de corte.

#### 3.2.5 Análisis de estabilidad

La aplicación de modelos matemáticos en el estudio de taludes es una actividad fundamental en la ingeniería geotécnica. Su propósito es evaluar la estabilidad de taludes naturales y garantizar la seguridad y eficacia del diseño en taludes construidos artificialmente.

Considerando la amplia gama de aplicaciones numéricas disponibles en la actualidad, es crucial que los ingenieros comprendan las ventajas y desventajas de cada metodología. Existen numerosas herramientas informáticas para el análisis de la estabilidad de taludes. Si bien los métodos de equilibrio límite son ampliamente utilizados, los enfoques basados en esfuerzo-deformación mediante elementos finitos han ganado relevancia y popularidad en años recientes. (Suárez 2009, p. 147)



FUENTE: Suárez, 2009, p. 146

**Figura 13 — Ejemplo de un análisis de estabilidad de taludes**

La falta de estabilidad en un deslizamiento de masa en pendiente surge de la interacción entre diversos factores predisponentes y la influencia de factores externos o desencadenantes. (INDECI, 2011)

### 3.2.6 Deslizamientos en áreas urbanas y en obras de ingeniería

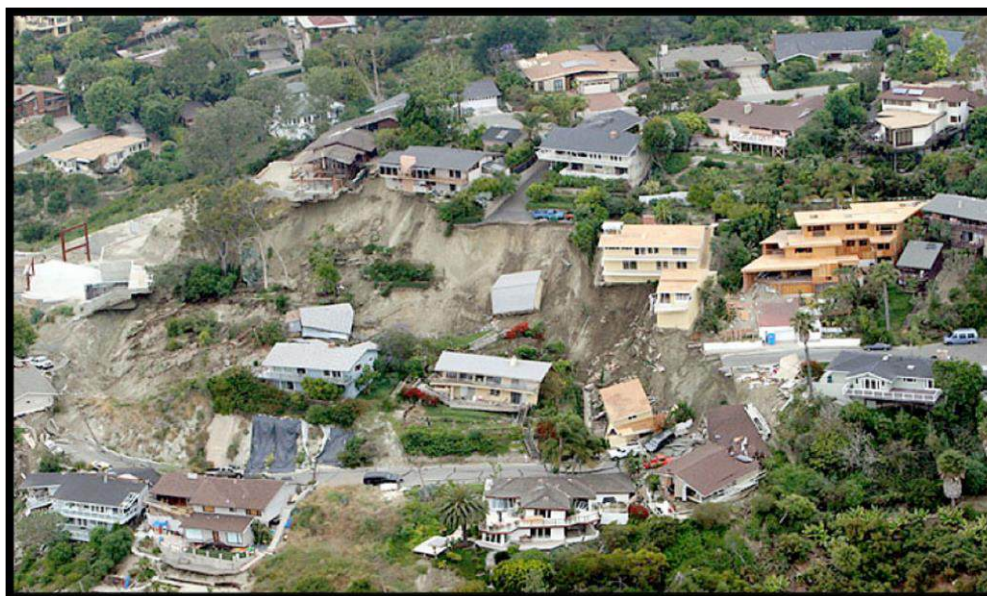
La urbanización contribuye a incrementar la vulnerabilidad de las laderas urbanas frente a los deslizamientos, especialmente en aquellas ciudades ubicadas en rutas potenciales de flujos de detritos. Históricamente, las áreas urbanas han experimentado los mayores riesgos asociados con los deslizamientos.

Los deslizamientos de tierra representan una preocupación frecuente en las ciudades situadas en regiones montañosas. El crecimiento demográfico ha impulsado el desarrollo en las laderas propensas a deslizamientos dentro de las áreas urbanas. (Suárez, 2009, p. 330)



### 3.2.6.1 Procesos de erosión urbana

Las variaciones en el sistema hidrológico pueden dar lugar a fenómenos erosivos que funcionan como desencadenantes de deslizamientos. Estos procesos de erosión son consecuencia de leyes naturales y son eventos esperados en la dinámica del entorno geológico. (Suárez, 2009)



FUENTE: Suárez, 2009, p. 342

**Figura 14 — Deslizamientos urbanos**

### 3.2.6.2 Deslizamientos en carreteras

Los estudios de campo en diferentes regiones del mundo indican que los deslizamientos son más frecuentes en las cercanías de las carreteras que en áreas más remotas. El problema de la zona es el deslizamiento rotacional de masas de suelo en el talud inferior, este deslizamiento afecta todo el ancho de la vía, en consecuencia, se producen fisuras en media luna hacia el talud inferior, también se producen caídas de bloques que dañan el pavimento. (Rodríguez, 2015)

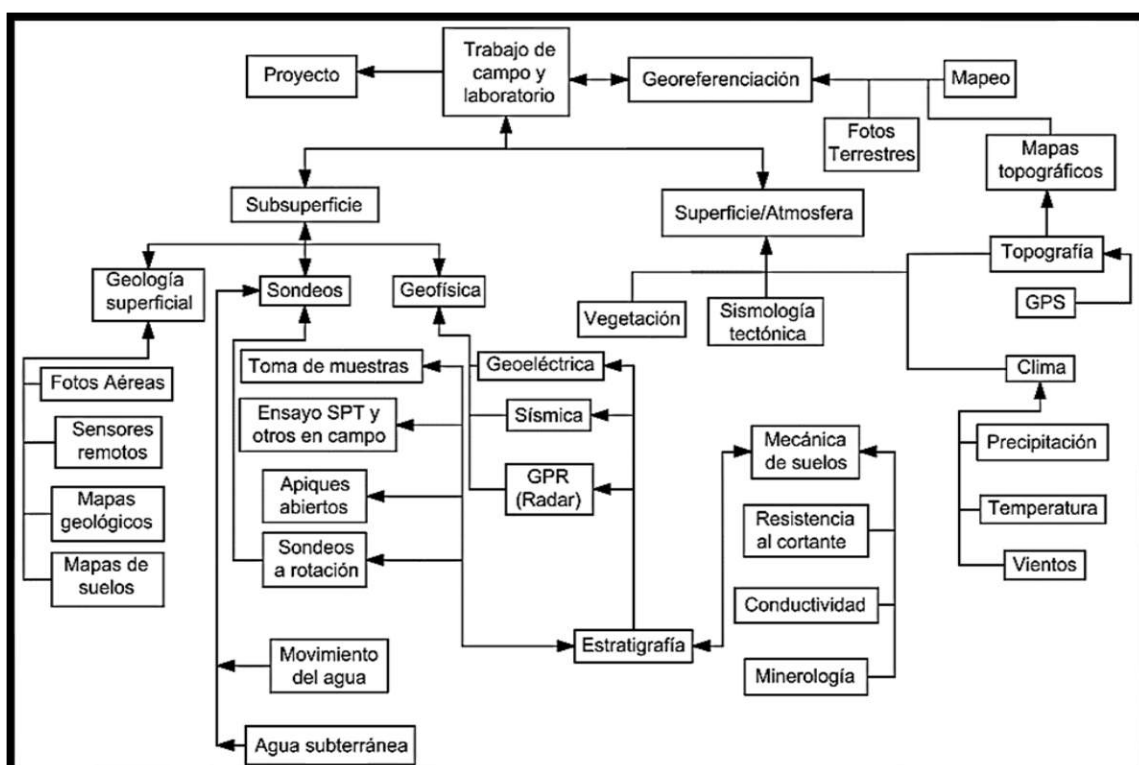
### 3.2.7 Investigación de deslizamientos

El estudio de una pendiente, talud o deslizamiento implica recabar información exhaustiva sobre sus características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales. Esto permite realizar un diagnóstico preciso de los problemas y diseñar soluciones efectivas para su mitigación o remedio. Es fundamental identificar y

comprender completamente los parámetros fundamentales que influyen en la estabilidad del talud o la pendiente. (Suárez, 2009)

### 3.2.7.1 Organización del estudio

Con el fin de identificar las causas y los mecanismos de falla, así como para cuantificar los factores que inciden en la estabilidad de un talud, y finalmente para diagnosticar y planificar las medidas de estabilización necesarias.(Suárez, 2009)



FUENTE: Suárez, 2009, p. 458

Figura 15 — Diagrama de flujo de la adquisición de datos

### 3.2.8 Estudio geotécnico

El propósito del estudio geotécnico es recopilar todos los parámetros necesarios para comprender los procesos de inestabilidad y planificar las medidas de mitigación y remediación adecuadas. La extensión del área a investigar varía según el alcance del proyecto y la influencia de los factores geológicos y topográficos en el problema bajo estudio. En casos donde se buscan identificar movimientos potenciales aún no manifestados, el área de investigación no puede ser definida de antemano. (Suárez 2009; Highland y Bobrowsky, 2008)



### **3.2.9 Ensayos de campo**

Los ensayos de campo ofrecen la posibilidad de reproducir condiciones similares a las del entorno natural del talud, lo que los hace altamente efectivos para determinar los parámetros necesarios en el análisis de un deslizamiento. (Berry y Reid, 2003)

### **3.2.10 Ensayos geofísicos**

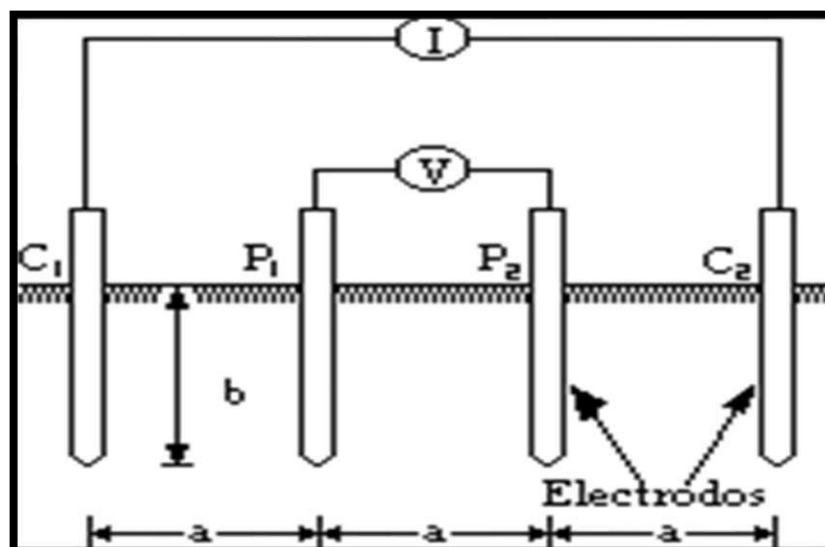
Los ensayos geofísicos se basan en la correlación entre las condiciones del suelo y otras propiedades físicas, y su interpretación requiere la experiencia de un especialista en geofísica. Estas metodologías no pueden sustituir los sondeos y deben emplearse con un control de campo meticuloso. Es aconsejable verificar los resultados mediante sondeos para garantizar su precisión. (Suárez, 2009)

#### **3.2.10.1 Resistividad**

El método de resistividad eléctrica implica el uso de un conjunto de cuatro electrodos, donde un par transmite una corriente eléctrica al suelo, mientras que el otro par mide la potencia del campo eléctrico generado por esa corriente. Durante el ensayo de resistividad, se aplica una corriente eléctrica al suelo y se registran mediciones de la resistividad del material. Los sondeos eléctricos y electromagnéticos, por lo general, evalúan la resistencia al paso de la corriente eléctrica a través de los materiales del suelo. (Suárez 2009, p. 501)

La principal ventaja de los ensayos de resistividad radica en la facilidad de transporte y la simplicidad de los instrumentos utilizados. No obstante, su mayor desventaja reside en la dificultad de interpretar las medidas, especialmente en áreas con estratos no horizontales y estructuras geológicas complejas. Es común que se produzcan errores en la interpretación de estos ensayos geoelectrónicos.





FUENTE: Ruelas, 2021

**Figura 16** —Variaciones en el arreglo de electrodos

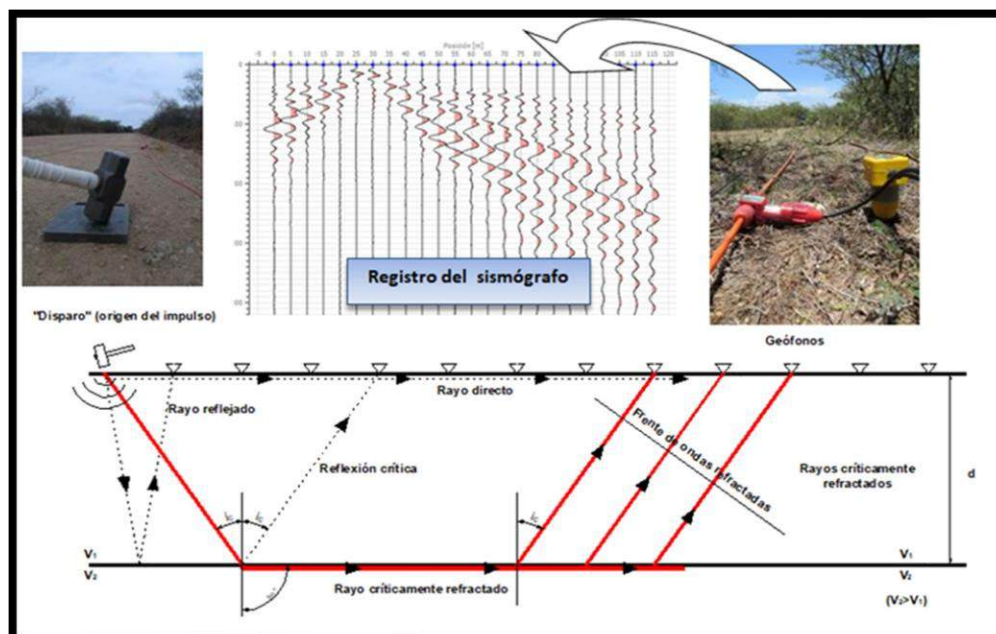
### 3.2.10.2 Sondeos electromagnéticos

El método electromagnético puede emplearse de manera similar al de la resistividad eléctrica directa mediante el uso de una frecuencia electromagnética baja y una separación reducida entre los elementos. En este caso, la amplitud del campo secundario, que está fuera de fase, guarda una relación directa con la conductividad. (Varnes, 1978; Suárez, 2009)

### 3.2.10.3 Refracción sísmica

Los sondeos sísmicos emplean diversas técnicas, como la refracción y otras acústicas, fundamentadas en las propiedades elásticas de los materiales de suelo y roca, las cuales determinan la velocidad de las ondas que atraviesan estos materiales. Estas ondas, generadas por un impacto, siguen trayectorias diferentes desde la fuente hasta el punto de detección, inicialmente como ondas directas y luego como ondas reflejadas. Se utilizan sismógrafos para registrar los tiempos de llegada en un receptor o geófono, siendo común el uso de sistemas sismográficos multicanal con varios geófonos dispuestos a distintas distancias de la fuente en la mayoría de los estudios sísmicos relacionados con deslizamientos. (Suárez, 2009)



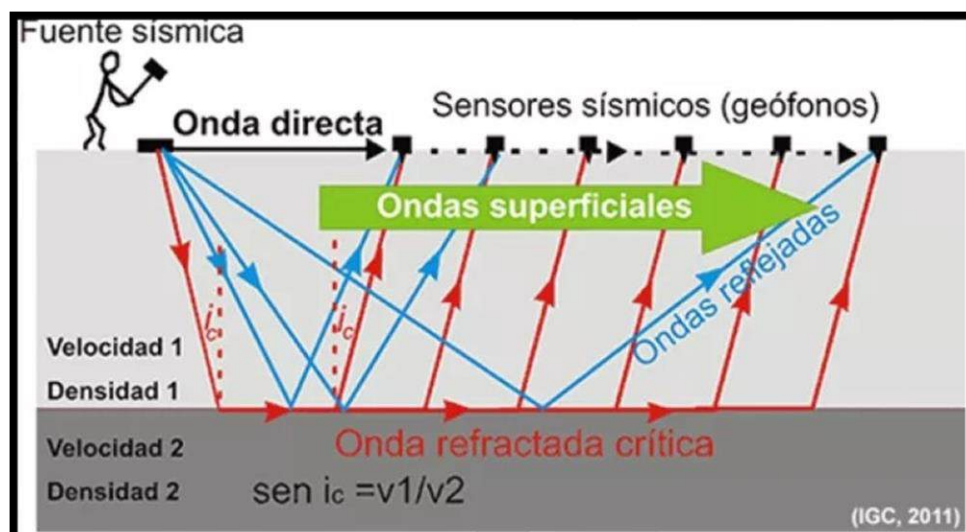


FUENTE: Ingiter, 2022

Figura 17 — Esquema de un ensayo de refracción sísmica

#### 3.2.10.4 Método geoacústica

Jimenez, Hurtado y Duque (2020) y Suárez (2009) El seguimiento de la actividad micro sísmica se puede emplear para identificar la ubicación de la zona de falla dentro de un deslizamiento. Esta actividad micro sísmica puede ser captada mediante geófonos estándar o arreglos de acelerómetros, tanto en la superficie como en perforaciones profundas. Con un número adecuado de puntos de monitoreo, es factible localizar la fuente de esta actividad, que puede coincidir con la superficie de la falla. Es crucial interpretar la actividad micro sísmica en términos relativos, atendiendo especialmente a los cambios en su intensidad.



FUENTE: Subsuelo3D, 2022

Figura 18 — Esquema de una prospección de refracción sísmica

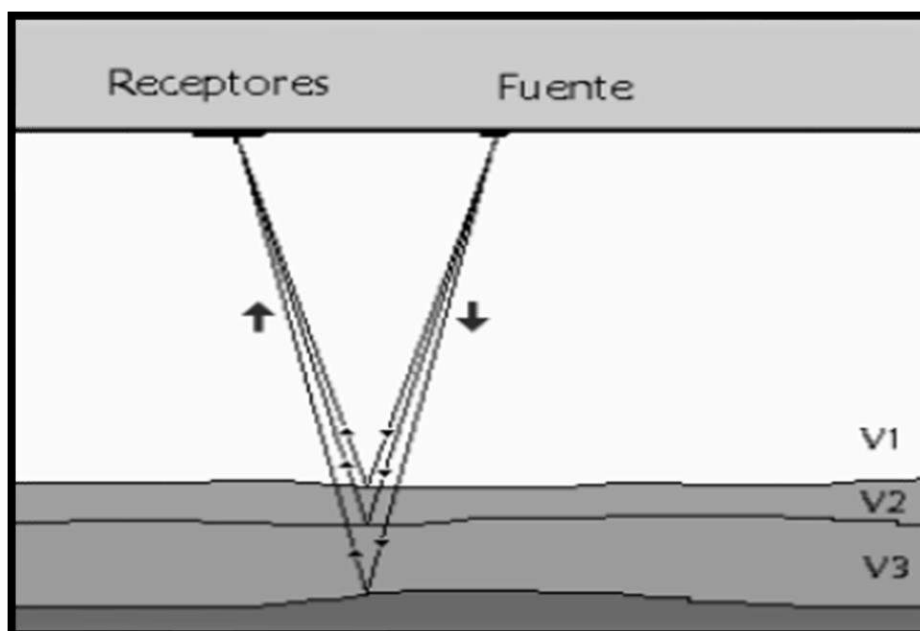
### 3.2.11 Aplicación de ensayos geofísicos a los deslizamientos

La importancia de la preparación previa, la selección cuidadosa de los métodos geofísicos, la colaboración entre expertos y los desafíos en la interpretación de los datos geofísicos en el contexto de los deslizamientos. (Berry y Reid, 2003)

- **Preparación previa a la exploración geofísica:** Antes de realizar cualquier exploración geofísica, es crucial realizar un estudio exhaustivo de toda la información disponible, que incluye mapas y fotografías aéreas.
- **Selección del método geofísico adecuado:** Es esencial tener claro el objetivo de la investigación antes de programar las prospecciones geofísicas y seleccionar el método geofísico más adecuado para obtener la información requerida.
- **Interpretación de los datos geofísicos:** Los datos geofísicos proporcionan variaciones en parámetros como la resistencia eléctrica del suelo o la velocidad de onda sísmica, los cuales deben interpretarse correctamente para convertirse en datos útiles para el modelo geológico.
- **Colaboración entre expertos:** Es necesario un enfoque colaborativo entre geólogos, ingenieros geotécnicos y geofísicos para evitar errores de

interpretación, ya que la interpretación de los datos geofísicos requiere el análisis combinado de toda la información disponible.

- **Desafíos de la interpretación geofísica en deslizamientos:** Los perfiles geofísicos en deslizamientos suelen ser heterogéneos, lo que dificulta la interpretación de la información. Sin embargo, los métodos geofísicos pueden proporcionar información valiosa sobre la extensión, composición y régimen de aguas de un deslizamiento.
- **Utilización combinada de métodos geofísicos:** La combinación de ensayos de resistividad y refracción sísmica ha demostrado ser efectiva para localizar la superficie de falla de deslizamientos, proporcionando información sobre la humedad de los materiales deslizados y la rigidez de los materiales profundos.



FUENTE: Monclou y Vargas, 2017

**Figura 19 — Refracción de las ondas**

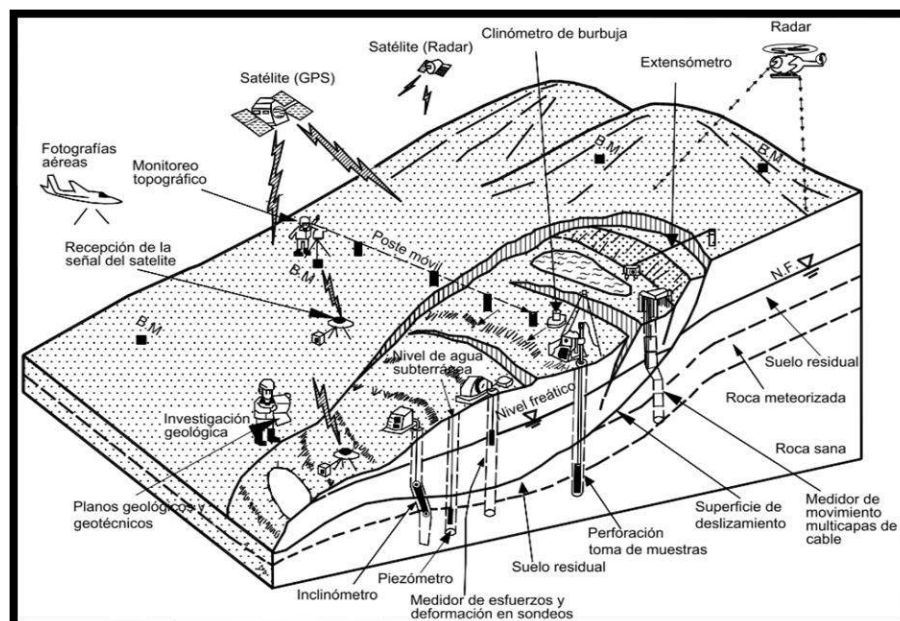
**Tabla 2 — Métodos geofísicos en los deslizamientos**

Método	Variante	Objetivos
Térmico	- Medida del gradiente	Medida de la T° en rocas y fluido
Eléctrico	- Potencial espontáneo; Resistividad aparente	- Medida de resistividad;



Electromagnético	- Magnetotelúrico; CSAMT; TDEM	- Estructura geológica; Procesos hidrotermales; Fallas; Cámaras magmáticas; Zonas de alteración
Sísmico	- Sísmica pasiva; Sísmica activa (refracción, reflexión)	- Estructura geológica; Procesos hidrotermales; Fallas; Cámaras magmáticas
Testificación y Sondeos	- Sondajes geofísicos variadas	- Porosidad; Permeabilidad; Litología; Fallas con salmueras; Zonas de alteración
FUENTE: GEOMADRILES, 2013		

### 3.2.12 Instrumentación y monitoreo



FUENTE: Suárez, 2009, p. 516

**Figura 20 — Estudio y monitoreo de deslizamientos**

Suárez (2009) La finalidad de la instrumentación es observar y registrar a lo largo del tiempo cómo se comporta un talud o un deslizamiento. La importancia de la instrumentación de campo reside en la capacidad de recopilar datos sobre



la evolución del talud a lo largo del tiempo y medir ciertos parámetros geotécnicos que influyen en el proceso de falla.

### 3.2.12.1 Objetivos de la instrumentación

Las circunstancias habituales que requieren el uso de instrumentación son las siguientes:

- Identificar la profundidad y configuración de la superficie de falla en un deslizamiento en curso.
- Medir los desplazamientos horizontales y verticales dentro del área afectada por el deslizamiento.
- Establecer la tasa o velocidad de movimiento del deslizamiento y configurar sistemas de alerta.
- Supervisar la actividad en zonas de excavación o relleno, y evaluar los efectos de proyectos de construcción específicos.
- Controlar los niveles de agua subterránea o las presiones de los poros y determinar su relación con la actividad del deslizamiento.

## 3.3 Marco conceptual

### a) Acelerómetro MPU 6050

Unidad de medición inercial que integra acelerómetro triaxial y giróscopo, capaz de medir aceleración lineal y velocidad angular con resolución de hasta  $\pm 16$  g y frecuencia de muestreo configurable. (InvenSense, 2013)

### b) Geófono vertical de 4.5 Hz

Está diseñado específicamente para registrar el movimiento vertical del terreno y es sensible a bajas frecuencias, lo que lo hace apropiado para estudios de sismología aplicada, prospección geofísica e investigaciones geotécnicas. (Sharma, 1997)



**c) Causa de deslizamiento**

Las causas de los deslizamientos se deben a los siguientes factores:

- Saturación del material por las fuertes precipitaciones pluviales (contenido de humedad)
- Por la existencia de materiales poco consolidados. (tipos de suelo)
- Por la pendiente de la ladera. (Rivas, 2023)

**d) Deslizamiento de suelo**

Movimiento descendente de masa de suelo o rocas por la acción de la gravedad, usualmente inducido por saturación hídrica, pendiente y pérdida de resistencia al corte. (Suárez, 2009)

**e) Estudio de suelos**

Un informe técnico que integra todas las exploraciones, investigaciones de campo, pruebas de laboratorio y análisis de escritorio destinados a examinar cómo se comportan los suelos y cómo responden a las cargas aplicadas. (Glosario de términos, 2013)

**f) MPU**

Es un acrónimo de "Unidad de Medición Inercial" (en inglés, "Inertial Measurement Unit", IMU), un sensor que mide la aceleración y la velocidad angular de un objeto. (Peña, 2017, p. 24)

**g) Monitoreo**

Supervisión continua y sistemática de un proceso, actividad o entorno, generalmente mediante la recopilación de datos y la observación regular para evaluar su desempeño o detectar cambios. (MTC - Manual de carreteras mantenimiento o conservación vial, 2018)

**h) Magnitud de la carga**

Son las fuerzas generadas por el movimiento del suelo sobre el sensor como resultado de la actividad geológica, como deslizamientos de tierra, movimientos sísmicos o cambios en la estructura del suelo. (Juárez y Rico, 2005)



**i) Talud**

Un **talud** se define como una superficie inclinada del terreno que resulta de procesos naturales (erosión, movimientos tectónicos, deslizamientos) o de actividades humanas (excavaciones, cortes viales, presas, terrazas agrícolas). Su estabilidad depende de la interacción entre las características del suelo o roca, las condiciones hidrológicas y los factores geométricos como la pendiente y la altura. (Lambe y Whitman, 2024)

**j) Aceleraciones registradas**

Enfatizan que la utilización de acelerómetros y geófonos en terreno facilita la comparación de datos de aceleración en distintos estratos, lo que resulta crucial para la valoración de deslizamientos en vías y pendientes. suelo. (Huaman y Aguilar, 2017)

**k) Humedad**

El nivel de humedad tiene un impacto directo en la estabilidad de los taludes, dado que un aumento en la cantidad de agua en los poros provoca presiones intersticiales que disminuyen la resistencia real del terreno. En circunstancias de saturación, la disminución de la succión capilar causa inestabilidad y promueve los procesos de deslizamiento. (Craig, 2004)

**l) Pendiente**

Los perfiles más profundos de meteorización se encuentran en los taludes suaves más que en los empinados. Para cada formación en un estado determinado de meteorización existe un ángulo de pendiente a partir del cual un talud es inestable. (Zeballos, 2017)

**m) Tipo del suelo**

La identificación del tipo de terreno es esencial para evaluar la estabilidad de taludes, cimientos y vías, dado que determina directamente los peligros de deslizamiento y deformación. (Craig, 2004)

**n) Sensibilidad.**

la sensibilidad es esencial en estudios de estabilidad de taludes, diseño de cimentaciones y prevención de deslizamientos, ya que permite estimar el nivel de vulnerabilidad de los suelos frente a disturbios naturales. (Lambe y Whitman 2024)



## CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

### 4.1 Tipo y nivel de investigación

#### 4.1.1 Tipo de investigación

El presente estudio, en función a su propósito, fue de tipo aplicada, pues busca dar solución a un problema concreto relacionado con la detección de deslizamientos de suelos, empleando para ello tecnologías específicas de medición. Por su naturaleza de datos e información, es cuantitativa, lo que implica la recolección de datos numéricos para poner a prueba las hipótesis mediante mediciones y análisis estadísticos Hernández y Mendoza (2018). La investigación se desarrolló con mediciones de aceleración y vibración registradas por los acelerómetros MPU 6050 y geófonos sísmicos, evaluando su efectividad en condiciones reales de campo.

#### 4.1.2 Nivel de investigación

El presente estudio corresponde al nivel descriptivo–correlacional.

Según Hernández y Mendoza (2018), la investigación descriptivo-correlacional tiene como finalidad medir el grado de asociación existente entre dos o más variables dentro de un contexto específico, describiendo al mismo tiempo sus características y comportamiento.

Graneles (2000, p. 3) afirma que la investigación descriptiva, se centra en fenómenos reales y su objetivo principal es ofrecer una interpretación precisa.

Así mismo Rodríguez (2011, p. 49), menciona que una investigación científica se considera descriptiva cuando su enfoque se centra en describir, registrar, analizar e interpretar las condiciones presentes en un momento dado.

### 4.2 Diseño de la investigación

En un diseño experimental - transversal, se busca establecer una relación causa-efecto entre la variable independiente y la variable dependiente, lo cual es coherente con el objetivo de nuestra investigación, que es determinar cuál de los dos tipos de sensores es más efectivo



para la detección de movimientos de suelo asociados a deslizamientos. Huapaya y Hinochio (2018). Además, en un diseño experimental, se controlan cuidadosamente los factores que pueden influir en los resultados, lo cual se refleja en la selección de grupos homogéneos en cuanto a su rendimiento inicial y condiciones socioeconómicas, tal como se menciona en la descripción de nuestra investigación.

En resumen, la investigación fue experimental debido a la manipulación de variables, el control de factores y el objetivo de establecer una relación causa-efecto entre la aplicación de diferentes sensores y su efectividad en la detección de deslizamientos de suelo.

Sabino (1992, p. 67) en su libro el proceso de investigación menciona:

Una gran cantidad de conocimientos adquiridos durante los últimos tres siglos se han derivado del uso de experimentos, un diseño que ha generado importantes contribuciones tecnológicas y prácticas. Sin embargo, esto no implica que la ciencia se limite únicamente a los resultados obtenidos mediante la experimentación, por muy significativos que sean. Es importante destacar que la experimentación solo es aplicable a ciertos problemas y no a otros, y su utilidad es mucho mayor en el ámbito de las ciencias naturales que en el de las ciencias sociales.

Básicamente, un experimento implica exponer el objeto de estudio a factores específicos, bajo condiciones controladas y conocidas por el investigador, con el fin de observar cómo cada factor afecta al objeto. El factor que se manipula en el estudio se conoce como la variable independiente o estímulo.

La investigación se clasifica como experimental debido a que implica la manipulación deliberada de una variable independiente, que en este caso sería la aplicación de diferentes tipos de sensores de detección de movimiento de suelo (acelerómetros MPU 6050 vs. geófonos sísmicos), y la observación de cómo esta manipulación afecta a la variable dependiente, que en este caso sería la capacidad de detección de deslizamientos de suelo.



**Tabla 3 — Diseño de la investigación**

<i>Grupo experimental</i>	<i>Pretest</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Posttest</i>
GE 1	O1	X	O2
GE 2	O1		O2

Donde

- GE 1      Grupo experimental Acelerómetro
- GE 2      Grupo experimental Geófono
- O1        Pretest o medición inicial
- X          Estímulo o tratamiento (Fuente sísmica)
- O2        Posttest o medición final

#### **4.3 Descripción de la ética de la investigación**

La ética en investigación exige el respeto a los principios de integridad, justicia, beneficencia y respeto por las personas, garantizando que los datos se obtengan y utilicen de forma honesta y responsable. (Hirsch y Navia 2018)

El Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica – CONCYTEC (2020) establece que toda investigación debe proteger la dignidad humana, la confidencialidad de la información y minimizar riesgos para las personas y el medio ambiente.

El Código de Ética para la Investigación de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac UNAMBA (2021) señala que los investigadores deben actuar con responsabilidad social, transparencia y compromiso con el desarrollo sostenible de la región.

En la presente investigación se cumplieron dichos principios, garantizando la obtención de datos de manera responsable, la transparencia en el análisis y la ausencia de manipulación indebida, preservando siempre la seguridad y bienestar de las comunidades involucradas.



## 4.4 Población y muestra

### 4.4.1 Población

Según Hernández y Mendoza (2018)), la población o universo de estudio fue constituida por el conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones o características definidas por el investigador.

#### a) Criterios de inclusión

- Puntos de monitoreo ubicados dentro del polígono geográfico de Kolkaque.
- Mediciones simultáneas obtenidas por acelerómetros MPU 6050 y geófonos verticales de 4.5 Hz.

#### b) Criterios de exclusión

- Registros incompletos o con fallos técnicos de los sensores.
- Mediciones afectadas por interferencias externas no relacionadas con movimientos de masa.
- Puntos fuera del área delimitada del estudio.

### 4.4.2 Muestra

La muestra es el subconjunto de la población que se selecciona con reglas explícitas para medir las variables de interés y hacer inferencias sobre la población (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

En este estudio, la muestra fue conformada por cuatro puntos de exploración ubicados en la zona de Kolkaque, Abancay, seleccionados mediante muestreo no probabilístico por criterio.

En cada punto se instalaron simultáneamente un acelerómetro MPU-6050 y un geófono vertical de 4.5 Hz, realizando mediciones a 2 metros y 4 metros de la fuente de vibración, con el objetivo de registrar datos comparables en distintas distancias.



Tabla 4 — Muestra para grupo experimental

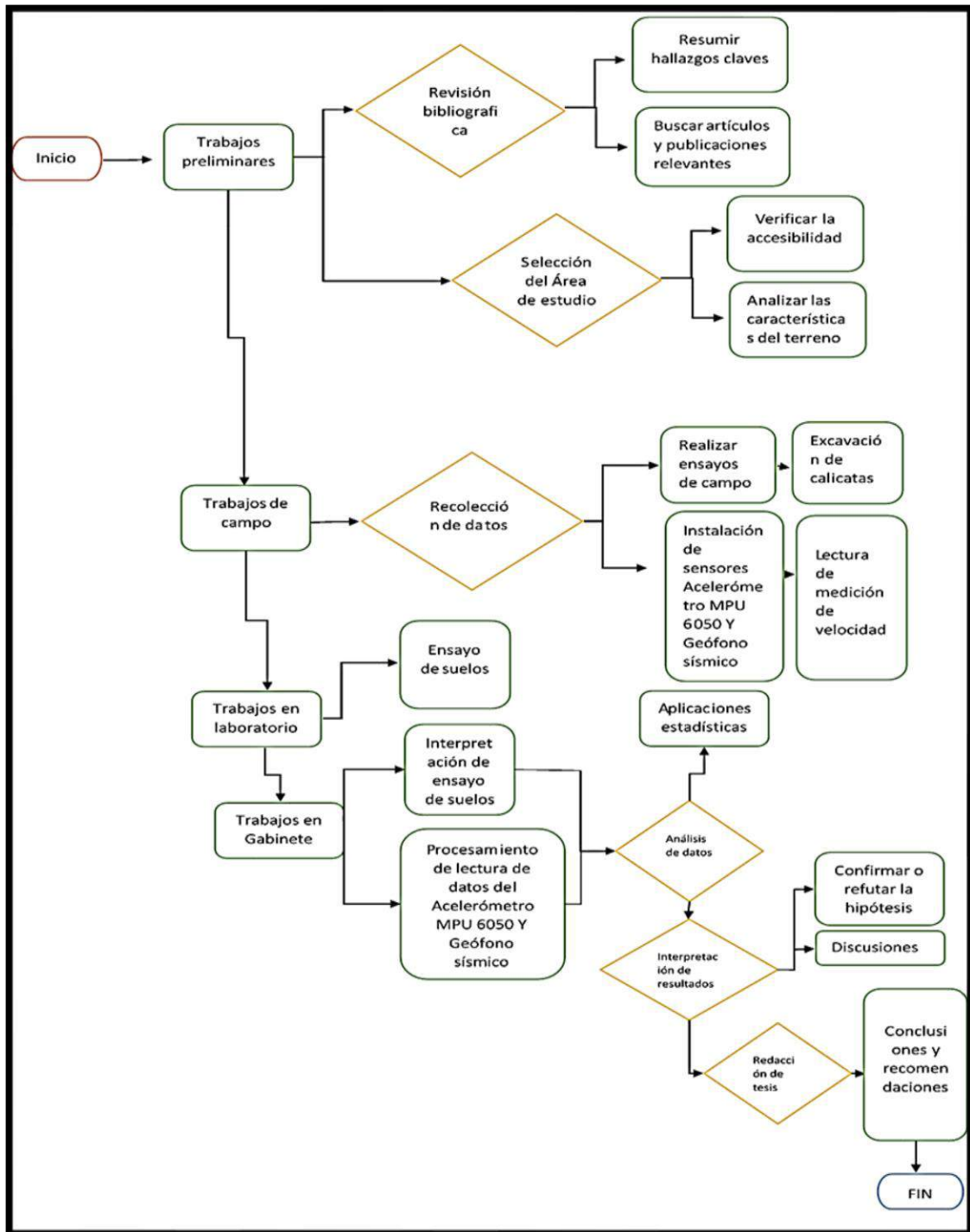
<i>Grupo experimental</i>	<i>Postest</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Puntos</i>
GE 1 ACCELERÓMETRO	O1	X (Fuente sísmica)	1
			2
			3
			4
GE 2 GEÓFONO	O1	X (Fuente sísmica)	1
			2
			3
			4

Cada grupo experimental será sometido a su respectivo pretest antes de la instalación del sensor, luego se aplicará el tratamiento (observación y registro de datos), y finalmente se realizará el postest para evaluar la efectividad del sensor en la detección de deslizamientos de suelo.

#### 4.5 Procedimiento

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo siguiendo un procedimiento detallado y estructurado que garantice la validez y confiabilidad de los resultados. A continuación, se describe el procedimiento general:





NOTA

En la figura se muestra el flujograma de todo el procedimiento que se realizó para la elaboración de la presente investigación, en la que se detalla las diferentes actividades que se realizaron.

**Figura 21 — Procedimiento**



## 4.6 Técnica e instrumentos

### 4.6.1 Técnicas

En esta investigación, el enfoque principal fue de observación, dado que se recolectaron datos numéricos para analizar la efectividad de los sensores en la detección de deslizamientos. La técnica principal empleada será:

La observación estructurada consiste en registrar de manera sistemática y planificada los fenómenos estudiados, siguiendo un protocolo predefinido que especifica qué aspectos observar y cómo medirlos (Hernández, Fernández y Baptista, 2018, p. 228).

Observación directa: Se realizaron en el lugar de para registrar en tiempo real las señales emitidas por los sensores durante eventos de vibración controlada o deslizamientos simulados.

Observación indirecta: Se utilizaron los registros obtenidos por los sensores (acelerómetros y geófonos) almacenados en dispositivos de adquisición de datos para su posterior análisis.

### 4.6.2 Instrumentos

Para la obtención de resultados veraces se optó por utilizar algunos formatos con un alto grado de confianza (según valoración del test de expertos), con el fin del recojo de datos e información y también se optó el uso de algunos instrumentos de laboratorio que fueron necesarios para la determinación de resultados óptimos, se detallan a continuación:

Formato 01: Análisis de aceleraciones (Acelerómetro MPU 6050 – geófono vertical de 4.5 Hz)

**Tabla 5 — Validadores instrumentales**

N°	Experto	Especialidad	Grado académico	Veredicto
1	Wilson John Mollocondo Flores	Metodólogo	Doctor	Es aplicable
2	Edar Anibal Perez Olagivel	Estadístico	Doctor	Es aplicable
3	Michel Palma Vargas	Ingeniero civil	Magister	Es aplicable
4	Carlos Mendoza Contreras	Ingeniero Geólogo	Magister	Es aplicable



5	Charles N. Checya Alata	Ingeniero civil	Magister	Es aplicable
---	-------------------------	-----------------	----------	--------------

De acuerdo a la valoración instrumental y según la baremación de los datos obtenidos la validez de los instrumentos es 0.853 resultando ser una validez muy buena (Anexo C), en consecuencia, se valida el instrumento de investigación.

- **Prueba de confiabilidad**

Para el cálculo Alfa de Cronbach, se determinará el “ $\alpha$ ”

**Tabla 6 — Interpretación del valor de Alfa de Cronbach**

Valor de " $\alpha$ "	Interpretación
$\alpha > 0.90$	Excelente
$0.80 < \alpha \leq 0.90$	Bueno
$0.70 < \alpha \leq 0.80$	Aceptable
$0.60 < \alpha \leq 0.70$	Cuestionable
$0.50 < \alpha \leq 0.60$	Pobre
$\alpha \leq 0.50$	Inaceptable

NOTA

En la tabla podemos ver los intervalos de valores que puede tomar alfa y su respectiva interpretación, esta tabla nos ayudara a interpretar los resultados de confiabilidad

FUENTE: Arias y Cangalaya, 2023, P.298

Realizado el procedimiento por el Software SPSS el cálculo de la confiabilidad, tenemos el siguiente cuadro:

**Tabla 7 — Interpretación del valor del  $\alpha$  de Alfa de Cronbach**

Estadística de fiabilidad	
Alfa de Cronbach	N de elementos
0.985	8

- Interpretación: siendo el valor obtenido en el Software SPSS de  $\alpha = 0.985$ , siendo este  $\alpha > 0.90$  concluimos que la confiabilidad es excelente.



#### 4.7 Estadístico de investigación

Para el procesamiento y análisis de los datos se empleará estadística descriptiva e inferencial.

La estadística descriptiva se utiliza para resumir y describir los datos utilizando medidas como promedios, medianas, desviaciones estándar y gráficos. Estas medidas proporcionan una comprensión básica de la distribución de los datos y sus características principales. (Hernández y Mendoza, 2018)

En la estadística inferencial, se aplicará la correlación de Pearson ya que se utiliza cuando quieres medir el grado de relación lineal entre dos variables cuantitativas. Para determinar la relación entre las mediciones de ambos sensores, así comparando la efectividad de los equipos en la detección de deslizamiento de suelo.

##### 4.7.1 Criterios de selección de la prueba de estadística

Las razones y condiciones que justifican que tipo de prueba estadística usar para analizar los datos recolectados.

###### a) Estructura de los datos: el nivel de medición de las variables

Si solo existe una variable independiente se habla de análisis bivariados, mientras que si existe más de una variable dependiente se habla de análisis multivariados; si, por otro lado, existen varias variables dependientes se habla de métodos de respuesta múltiple. (Watt y Van Den Berg, 2002)

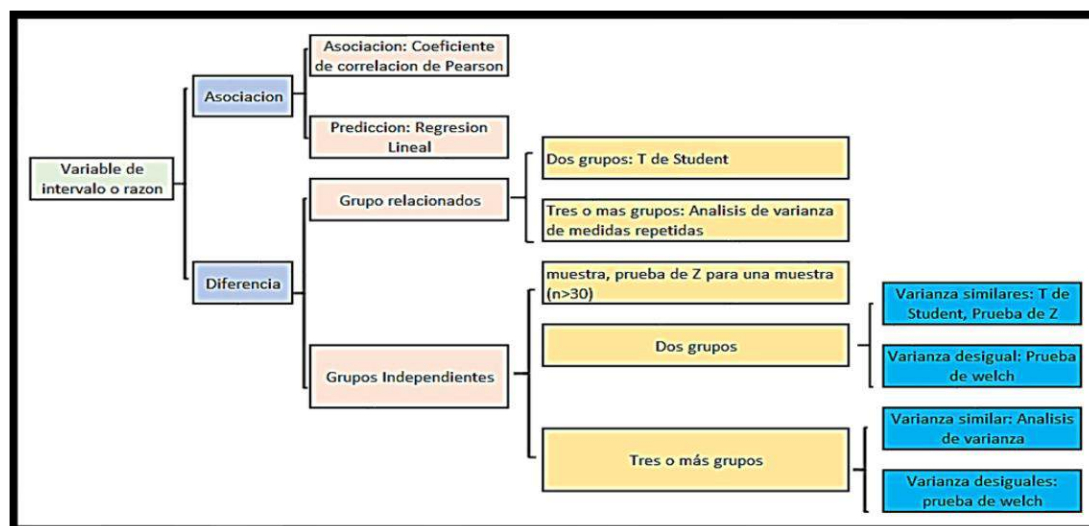
Conviene terminar el análisis de la escala de medición hablando de variables duras y blandas. Variables duras son aquellas en las cuales existe una medición objetiva, al repetirse se obtienen resultados similares, generalmente tienen poca posibilidad de influencia externa y para las cuales hay instrumentos precisos; variables blandas son aquellas que no son objetivas o que tienen un grado alto de subjetividad, no hay instrumentos de medición estandarizados, no hay necesariamente repetibilidad cuando se hacen varias mediciones en condiciones similares y puede haber influencia externa. (Ruiz y Morillo, 2004)

**b) Estructura de los datos: distribución de probabilidad**

Cuando la variable independiente tiene una escala de intervalo o razón, hay que preguntarse cuál es la distribución de probabilidad poblacional de la misma. Si los datos presentan una distribución de probabilidad similar a la normal, deberían utilizarse pruebas paramétricas para evaluar las hipótesis propuestas; de lo contrario, deberán utilizarse métodos no paramétricos, los cuales pueden aplicarse también a variables ordinales.

Existen varios métodos para evaluar la distribución de probabilidad de los datos, como lo son el uso de histogramas, diagramas de cajas (boxplots), gráficos de normalidad Q-Q (Q-Q plots), bean plots, cálculo del coeficiente de asimetría y la curtosis, la evaluación de la regla empírica, los test de bondad de ajuste como la prueba de **Shapiro-Wilk**, la prueba de Kolmogórov-Smirnov, la prueba de Agostino-Pearson; éstas últimas evalúan la hipótesis que los datos se distribuyen poblacionalmente de forma normal (hipótesis nula). (Albert y Rizzo, 2012;. Barton y Peat, 2014; Jaykaran, 2010; Kanji, 2006)

**c) Algoritmos para elegir una prueba estadística**



**NOTA**

Dado que el deslizamiento del suelo es la variable que depende (escala de intervalo/razón) y se evalúa en relación con la variable que no depende (tipo de sensor: acelerómetro MPU 6050 Versus geófono vertical de 4.5 Hz, formando dos conjuntos), se examinará la normalidad, sin embargo, para este estudio se utilizará el grupo de asociación considerando la correlación de



Pearson frente al estudio del acelerómetro MPU 6050 versus Geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo.

FUENTE: Asociación de Medicina Interna de Guatemala, 2017, p. 37.

**Figura 22 — Variable respuesta cuantitativa, pruebas paramétricas**

#### 4.7.2 Justificación para elegir una prueba estadística

El diagrama muestra el criterio de para elegir pruebas estadísticas en función del tipo de variable y de diseño de estudio, para este caso tendremos:

##### a) Variable de investigación

- Variables dependientes (deslizamiento de suelo) tipo cuantitativo, escala de intervalo /razón.
- Variables independientes (Acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz)

##### b) Según el diagrama

Como se trabaja con una variable dependiente numérica (intervalo/razón) y una variable independiente (acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz), se debe ir por la rama de “**Asociación → correlación de Pearson → Acelerómetro versus geófono sísmico → deslizamiento de suelo**”.

#### 4.7.3 Descripciones numéricas

Las descripciones numéricas tienen por objetivo resumir la información de un conjunto de datos, principalmente numéricos, los que resaltan la media, la moda y la mediana. (Córdova, 2016)

#### 4.7.4 La media ( $\bar{X}$ )

Dentro de una distribución de datos la media aritmética es el valor alrededor del cual los otros valores se concentran (o se distribuyen), es decir, un valor de referencia para un conjunto de datos analizados. La media de un conjunto de datos se interpreta como el punto de equilibrio de todos los datos analizados o valores de una distribución (Córdova, 2016).

$$\bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n}$$



Donde

- $\bar{x}$  Media o promedio
- $x_n$  enesima muestra
- $n$  Tamaño de muestra

#### 4.7.5 Medidas de dispersión

Son aquellas cantidades miden el grado de dispersión de un conjunto de datos numéricos. Se considera un valor central como punto de referencia para la mayoría de las medidas (Córdova, 2016). Las medidas de dispersión más conocidas son la varianza, desviación estándar, desviación media, frecuencias, momentos, rangos, etc.

#### 4.7.6 Varianza ( $S^2$ )

Se define como el promedio de la distancia al cuadrado de cada uno de los datos  $x_i$  respecto de la media es una de las medidas de dispersión generalmente usadas Córdova (2016). Su fórmula es la siguiente.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Donde

- $S^2$  Varianza
- $\bar{x}$  Media o promedio
- $n$  Tamaño de muestra

#### 4.7.7 Desviación estándar (S)

También conocida como desviación típica, es la raíz cuadrada positiva de la varianza, la cual se denota por las letras. (Córdova, 2016)

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$



Donde

$S$	Desviación estándar
$\bar{x}$	Media o promedio
$n$	Tamaño de muestra
$n - 1$	Grados de Libertad

Por otro lado, la estadística inferencial se utiliza para hacer inferencias o generalizaciones sobre una población a partir de una muestra. Esto se logra mediante la aplicación de técnicas como la estimación de parámetros y las pruebas de hipótesis. La estadística inferencial permite determinar si las diferencias observadas entre grupos son estadísticamente significativas o si son el resultado del azar. (Hernández y Mendoza, 2018)

#### 4.7.8 Pasos básicos para el análisis estadístico descriptivo

##### a) Clasificación de variables

Identificar el tipo de variable.

- **Cualitativas** (nominales u ordinales)-categóricas o clasificaciones. Clasifica de forma precisa las cualidades de un grupo o sujeto.
- **Cuantitativas** (discretas o continuas)-variables numéricas. Clasifica en forma precisa las cantidades de un grupo o sujeto (Arias y Cangalaya, 2023).

##### b) Cálculo de medias estadísticas

- Medidas de tendencia central (media aritmética, mediana, moda).
- Medidas de dispersión o variabilidad (rango, varianza, coeficiente de variación).
- Medidas de posición (cuartiles, percentiles)

##### c) Análisis e interpretación de los resultados obtenidos

Describir hallazgos.



#### d) Pruebas de normalidad por cada variable

Para la prueba de normalidad de una población se tuvo en cuenta el tamaño de la muestra si es menor a 50 se aplica la prueba de Shapiro-Wilk (Arias y Cangalaya, 2023).

Siendo los siguientes pasos:

- Hipótesis
  - H0: Los datos tienen distribución normal.
  - Ha: Los datos no tienen distribución normal.
- Se asumió  $\alpha = 0.05$
- Se contrastó el supuesto de normalidad.

El siguiente criterio de decisión se tuvo en cuenta que, Si el valor de Sig.  $< 0.05$  se acepta Ha y se rechaza H0. Si el valor de Sig.  $\geq 0.05$  se acepta H0 y se rechaza Ha.

### 4.7.9 Pasos básicos para el análisis estadístico inferencial

#### a) Formulación de hipótesis

- **Formulación de hipótesis general**
  - H1 = El acelerómetro MPU 6050 presenta una efectividad significativa frente al geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, durante el año 2024.
- **Formulación de hipótesis específica 1**
  - H1 = El acelerómetro MPU 6050 presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.



- **Formulación de hipótesis específica 2**

- H1 = El geófono vertical de 4.5 Hz presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.

**b) Selección de tipo de prueba estadística**

La selección de la prueba depende del tipo de datos y del diseño del estudio y como se dijo en párrafos anteriores se realizará pruebas estadísticas.

La prueba de correlación de rangos de Pearson se emplea para medir la fuerza y dirección de la asociación de correlación entre las variables. se interpreta los resultados como valores cercanos a 1 o -1 indican una fuerte relación; valores cercanos a 0 indican una relación débil.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 5.1 Análisis y resultados

Se presentan y analizan los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas con los acelerómetros MPU 6050 y los geófonos verticales de 4.5 Hz en los puntos de monitoreo establecidos en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac. Los resultados se procesaron mediante técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales, con el propósito de evaluar y comparar la efectividad de ambos dispositivos en la detección de deslizamientos de suelos. Los resultados han sido organizados en tablas y gráficos para facilitar su interpretación, permitiendo comparar el desempeño de ambos sensores en la detección de deslizamientos de suelos y verificar las hipótesis planteadas.

**Tabla 8 — Vía de acceso al área de investigación**

<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>	<b>Longitud</b>	<b>Tiempo / Camioneta</b>	<b>Tipo de vía</b>
Plaza principal de Abancay	Sector Kolkaque (Área de investigación)	6.1 km	17 min	Pavimentada





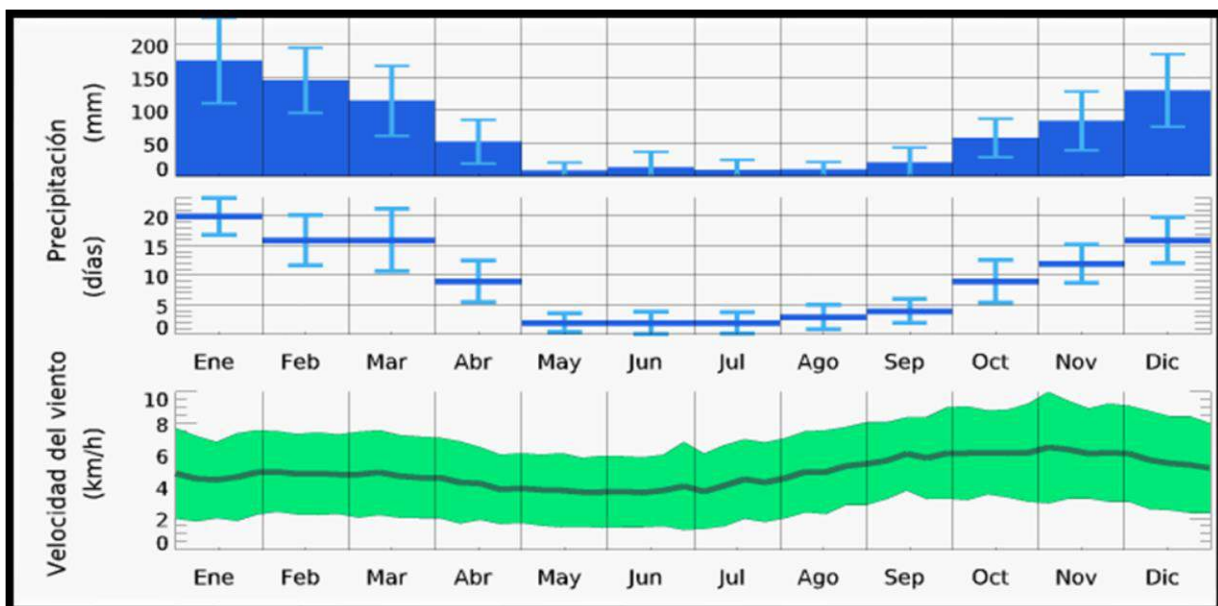
NOTA

La imagen muestra un mapa con la humedad relativa en una zona de investigación. el área está representada con una escala de colores que indica los niveles de humedad relativa en el terreno, que varían entre 5% y 100%. La sección marcada en el mapa, que tiene un porcentaje de humedad relativa de 55-60%, indica las áreas con esa cantidad de humedad en el suelo.

La alta humedad puede incrementar la probabilidad de deslizamientos y afectaciones en la infraestructura debido a la reducción de la cohesión entre las partículas del suelo.

FUENTE: meteoblue, 2025

Figura 23 — Humedad relativa del área de investigación



## NOTA

El gráfico muestra tres variables climáticas en el área de Kolkaque, Tamburco. La precipitación aumenta hacia el final del año, con un notable incremento en los días de lluvia, lo que afecta la humedad del suelo y, por ende, la estabilidad del terreno. La velocidad del viento se mantiene constante, pero influye en la evaporación y la propagación de las ondas sísmicas. Estos datos son cruciales para evaluar la efectividad de los sensores sísmicos y acelerómetros MPU 6050 en condiciones de alta humedad, particularmente durante la temporada de lluvias, cuando el riesgo de deslizamientos es mayor.

FUENTE: meteoblue, 2025

### **Figura 24 — Humedad relativa del área de investigación**

## **5.1.1 Análisis de los resultados de variable dependiente: Deslizamientos de suelos**

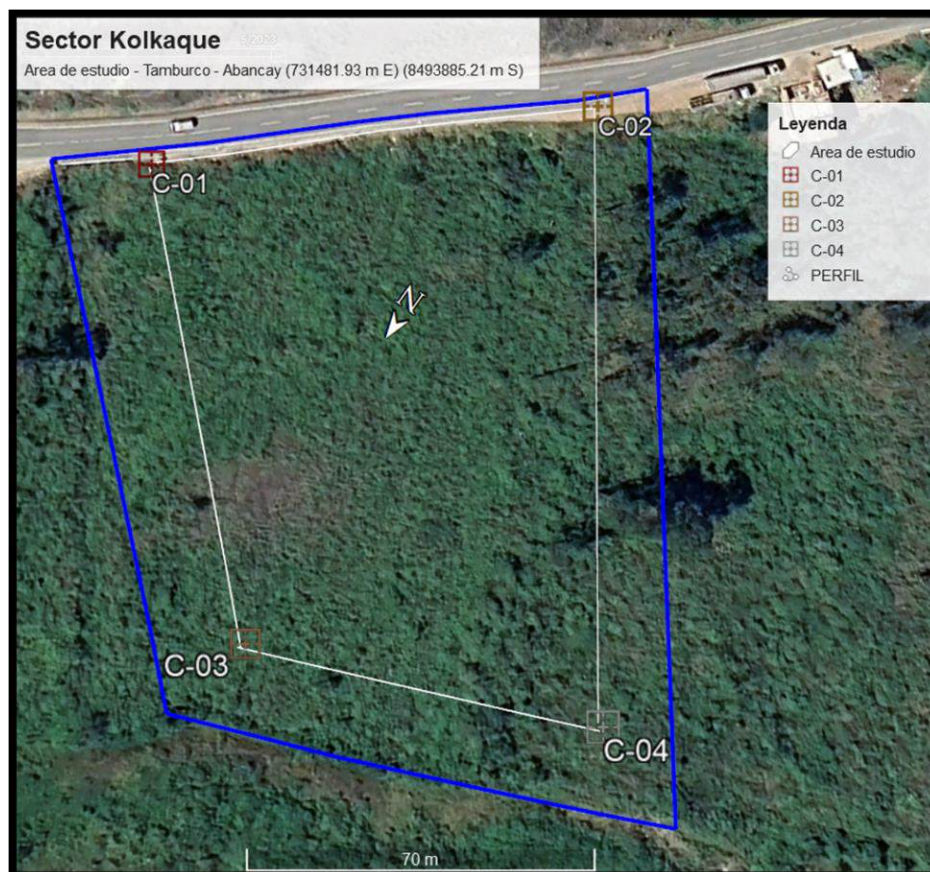
### **5.1.1.1 Deslizamiento de suelo**

El análisis de deslizamiento de suelo en el área de estudio de Kolkaque, Tamburco, Abancay, es crucial para comprender cómo afectan la detección de deslizamientos de suelos utilizando los sensores sísmicos (geófonos) y acelerómetros MPU 6050. Estas causas incluyen factores como la composición del suelo, la pendiente del terreno, la humedad y la topografía de la zona, que influyen directamente en la estabilidad del suelo y en la propagación de las ondas sísmicas.

- **Distribución de los puntos de investigación**

Se establecieron cuatro pozos de exploración claves de medición identificados como C-01, C-02, C-03, y C-04. Estos puntos fueron ubicados en áreas con diferentes tipos de suelo y en distintas elevaciones, para garantizar una cobertura representativa de las condiciones geotécnicas locales.





#### NOTA

Ubicación geográfica de las calicatas realizadas en la zona de estudio, ubicada en Kolkaque, Tamburco en la provincia de Abancay, región de Apurímac. El área de estudio está delimitada por un contorno azul, y los puntos C-01, C-02, C-03, y C-04 corresponden a los lugares específicos donde se realizaron las calicatas para el análisis geotécnico del suelo.

De acuerdo con los cálculos realizados, el área total de estudio tiene un perímetro de 547 metros y un área de 17,824 metros cuadrados.

El área de 17,824 m<sup>2</sup> es representativa del terreno montañoso y accidentado de la zona Kolkaque, que presenta diversas características geotécnicas.

**Figura 25 — Puntos de ubicación de las calicatas en el área de estudio**

- **Exploración de campo en el área de estudio**

La exploración de campo se llevó a cabo en el sector Kolkaque, ubicado en la región de Abancay, Apurímac, con el objetivo de evaluar el desempeño de los sensores de acelerómetros MPU 6050 y geófonos en la detección de ondas sísmicas. Para ello, se utilizaron diversas herramientas de medición y se establecieron puntos estratégicos en la zona para colocar los sensores.

Según las características del terreno y los objetivos de la investigación, se realizaron cuatro pozos de exploración a cielo abierto. La profundidad máxima de excavación fue de 1.50 metros en todas las calicatas. Se obtuvieron muestras alteradas para llevar a cabo los ensayos de laboratorio. Cada tipo de suelo encontrado fue identificado y descrito visualmente, siguiendo lo establecido en la norma técnica peruana NTP 339.150.

A continuación, se presenta un resumen de la ubicación de las calicatas y la profundidad de exploración.

**Tabla 9 — Coordenadas geográficas de las calicatas**

Calicata	Este	Norte	Cota	Profundidad	Observación
C-01	731604,00	8493791,00	2778,00	1,50	
C-02	731532,00	8493708,00	2785,00	1,50	
C-03	731515,00	8493851,00	2712,00	1,50	
C-04	739866,00	8493819.86	2703,00	1,50	

NOTA

La tabla presenta las coordenadas geográficas y las características de las calicatas realizadas en el área de estudio en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, para la evaluación de los deslizamientos de suelos. Los datos fueron obtenidos mediante perforaciones en puntos estratégicos, y se utiliza el sistema de coordenadas UTM para indicar la ubicación exacta de cada calicata.

**a) Humedad del suelo**

La humedad del suelo tiene un efecto directo en la densidad y rigidez del terreno. En suelos con alta humedad, la compresibilidad del terreno aumenta, lo que puede afectar cómo las ondas sísmicas o los movimientos de la tierra se propagan y cómo son detectadas por el acelerómetro. En terrenos más húmedos, el acelerómetro podría registrar movimientos más amplios debido a



la mayor movilidad del suelo y la mayor capacidad de absorción de las ondas sísmicas.

- **Suelos húmedos:** En suelos con alta humedad, el acelerómetro podría detectar mayores aceleraciones o vibraciones más fuertes, ya que la propagación de las ondas sísmicas es más eficiente. Esto podría dar lugar a lecturas con mayor amplitud y mayor frecuencia en comparación con suelos secos.
- **Suelos secos:** En suelos con poca humedad, el acelerómetro podría registrar movimientos más pequeños, ya que la mayor rigidez del suelo reduce la capacidad de transmisión de ondas sísmicas. Esto puede hacer que los movimientos sean más difíciles de detectar o menos pronunciados en las lecturas.

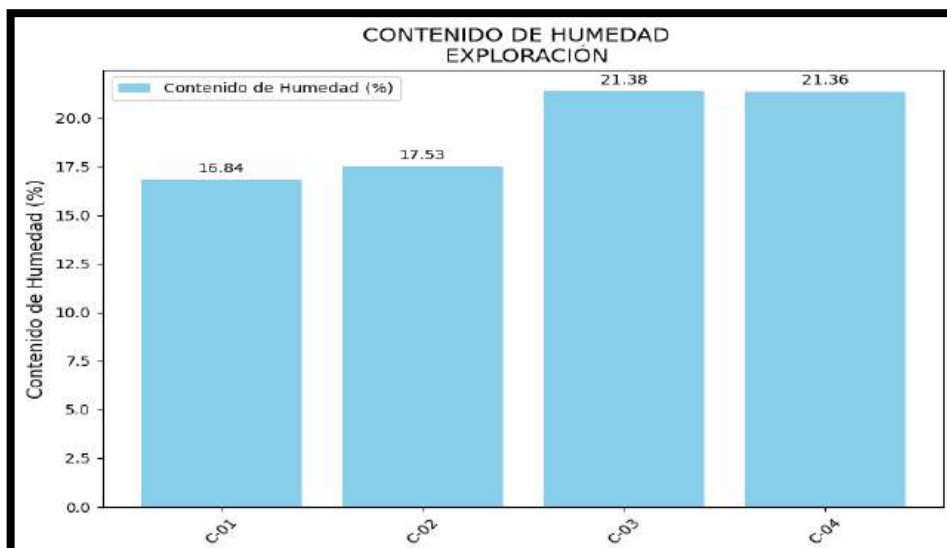
**Tabla 10 — Análisis del del nivel freático y contenido de humedad**

Calicatas "C"	Profundidad alcanzada	Nivel freático	Contenido de humedad (%)
C-01	1.50 m	NO	16.84
C-02	1.50 m	NO	17.53
C-03	1.50 m	NO	21.38
C-04	1.50 m	NO	21.36

NOTA

La tabla muestra los datos correspondientes a las calicatas C-01, C-02, C-03 y C-04, realizadas en el área de Kolkaque, Abancay, con respecto a la profundidad alcanzada, el nivel freático y el contenido de humedad. Todas las calicatas tienen una profundidad alcanzada de 1.50 metros, pero el nivel freático no se alcanzó en ninguna de ellas. El contenido de humedad varía entre 16.84% en C-01 y 21.38% en C-03 y C-04, lo que podría influir en la estabilidad del suelo.





**NOTA**

El gráfico presentado muestra el contenido de humedad (%) en cuatro calicatas (C-01, C-02, C-03, y C-04) a una profundidad de 1.5 metros. La medición se realizó para analizar cómo varía la humedad del suelo en distintas ubicaciones de la zona de exploración.

Calicatas C-01 y C-02 tienen un contenido de humedad relativamente similar (16.84% y 17.53% respectivamente), lo que indica que en estas áreas la capacidad de retención de agua del suelo es comparable.

En contraste, las calicatas C-03 y C-04 muestran un contenido de humedad significativamente más alto, alcanzando 21.38% y 21.36%. Esta diferencia podría sugerir variaciones en la composición del suelo o en las condiciones ambientales de esas zonas, como una mayor infiltración de agua o una mayor capacidad de retención debido a factores geotécnicos.

Este comportamiento en los datos puede tener implicaciones importantes para estudios de propagación de ondas sísmicas y la sensibilidad de los sensores en la detección de deslizamientos de tierra, ya que, como se ha observado en investigaciones previas, la humedad del suelo juega un papel crucial en la eficiencia de las mediciones de los acelerómetros y geófonos.

**Figura 26 — Contenido de humedad**

**b) Tipo de suelo**

Las condiciones geotécnicas son un conjunto de características físicas y mecánicas del suelo que influyen significativamente en la estabilidad del



terreno y en la propagación de ondas sísmicas. En el contexto de este estudio, estas condiciones son fundamentales para entender cómo los sensores (acelerómetros y geófonos) pueden detectar con precisión los deslizamientos de suelos, ya que los materiales y la estructura del suelo afectan tanto la propagación de ondas sísmicas como la forma en que los sensores responden a las vibraciones.

- **Composición**

**Tabla 11 — Descripción estratigráfica de las calicatas**

Calicatas "C"	Estratos "E"	Profundidad	Composición
C-01	E-01	0.00 m-1.50 m	Gravas mal gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos (GP)
C-02	E-01	0.00 m-1.50 m	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla. (GC)
C-03	E-01	0.00 m-0.20 m	Materia orgánica conformado por vegetación propia de la zona
	E-02	0.20 m-1.50 m	Arenas con arcillas inorgánicas de media plasticidad (SP - OL)
C-04	E-01	0.00 m-0.20 m	Materia orgánica conformado por vegetación propia de la zona
	E-02	0.20 m-1.50 m	Arenas con limos inorgánicos de media plasticidad (SP - ML)
<p><b>NOTA</b></p> <p>El gráfico presenta el análisis de los estratos de suelo encontrados en las calicatas realizadas en la zona de Kolkaque, como parte de la investigación. La tabla detalla los estratos identificados en cada punto de exploración, incluyendo la profundidad y la composición del suelo (como gravas mal gradadas, gravas arcillosas, materia orgánica, entre otros). Esta información es clave para comprender cómo las condiciones geotécnicas del terreno pueden influir en la</p>			



propagación de ondas sísmicas y la capacidad de los sensores para detectar movimientos del suelo.

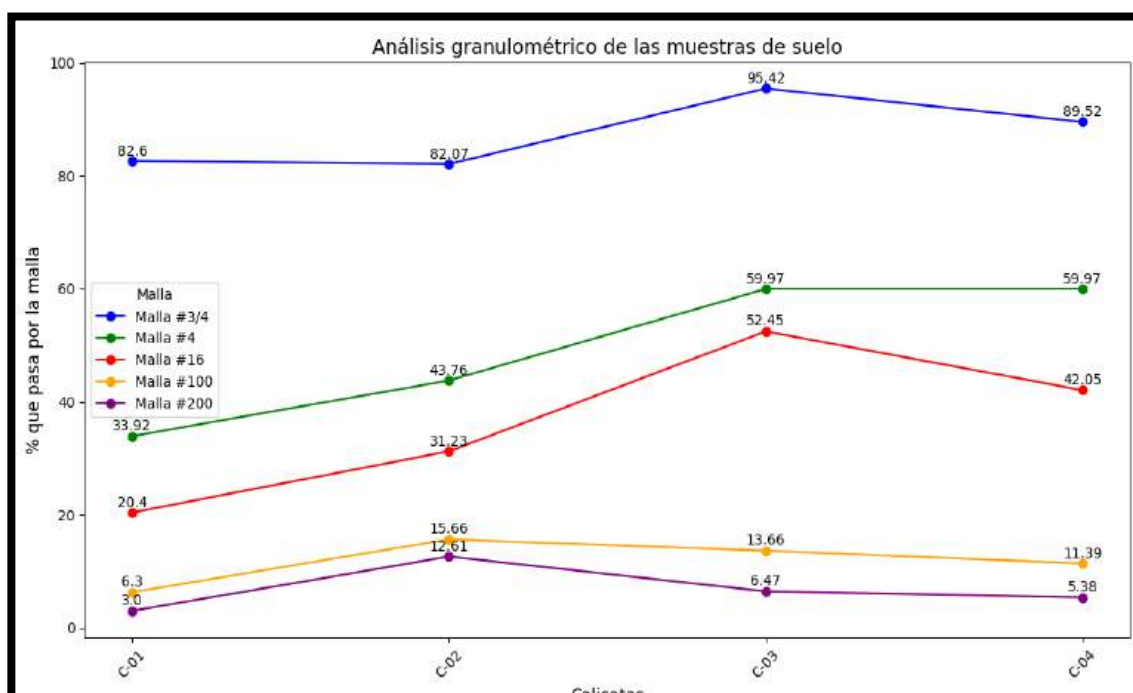
- **Análisis granulométrico**

**Tabla 12 — Análisis granulométrico de las muestras de suelo**

Identificación			Análisis granulométrico				
Calicata	Muestra	Prof.	% Que pasa la malla N°				
N°	N°	m	N° 3/4	N°4	N°16	N°100	N°200
C-01	E-01	1,5	82,60	33,92	20,40	6,30	3,00
C-02	E-01	1,5	82,07	43,76	31,23	15,66	12,61
C-03	E-02	1,5	95,42	73,96	52,45	13,69	6,47
C-04	E-02	1,5	89,52	59,97	42,05	11,39	5,38

**NOTA**

La tabla presenta el análisis granulométrico de las muestras de suelo extraídas de las calicatas C-01, C-02, C-03 y C-04, situadas en la zona de Kolkaque. Cada calicata tiene una profundidad de 1.5 metros, y se detalla el porcentaje de material que pasa a través de las mallas de diferentes tamaños (N°3/4, N°4, N°16, N°100, N°200). Estos datos proporcionan información sobre la distribución granulométrica de los suelos, lo que es esencial para entender sus propiedades de compactación, permeabilidad y resistencia.



**NOTA**

El gráfico presenta los resultados del análisis granulométrico de las muestras de suelo tomadas en cuatro calicatas (C-01, C-02, C-03, C-04) a una profundidad de 1.5 metros. El análisis muestra el porcentaje de material que pasa por mallas de diferentes tamaños: #3/4, #4, #16, #100, y #200.

El análisis granulométrico revela diferencias en la distribución del tamaño de partículas entre las diferentes calicatas. Las calicatas C-03 y C-04 muestran una mayor presencia de material fino en comparación con C-01 y C-02, lo que podría estar relacionado con las condiciones geotécnicas y la composición del suelo en estas zonas. Esta información es crucial para entender la composición del terreno y cómo afecta la propagación de ondas sísmicas y la detección de deslizamientos.

La variabilidad en los porcentajes de partículas finas también tiene implicaciones en la efectividad de los sensores (acelerómetros y geófonos), ya que su capacidad para detectar movimientos podría verse influenciada por la granulometría del suelo.

**Figura 27 — Análisis granulométrico**

- **Clasificación**

**Tabla 13 — Análisis de los límites de Atterberg y contenido de humedad**

Identificación			Límites de Atterberg			Humedad
Calicata	Muestra	Prof.	LL	LP	IP	
N°	N°	m	%	%	%	%
C-01	E-01	1,5	13,00	10,05	2,95	16.84
C-02	E-01	1,5	21,90	12,12	9,78	17.53
C-03	E-02	1,5	37,20	14,93	22,27	21.38
C-04	E-02	1,5	46,50	37,12	9,38	21.36

**NOTA**

La tabla muestra los resultados del análisis de los límites de Atterberg (Límite Líquido - LL, Límite Plástico - LP, e Índice de Plasticidad - IP) y el contenido de humedad para las muestras obtenidas de las calicatas C-01, C-02, C-03 y C-04 en la zona de

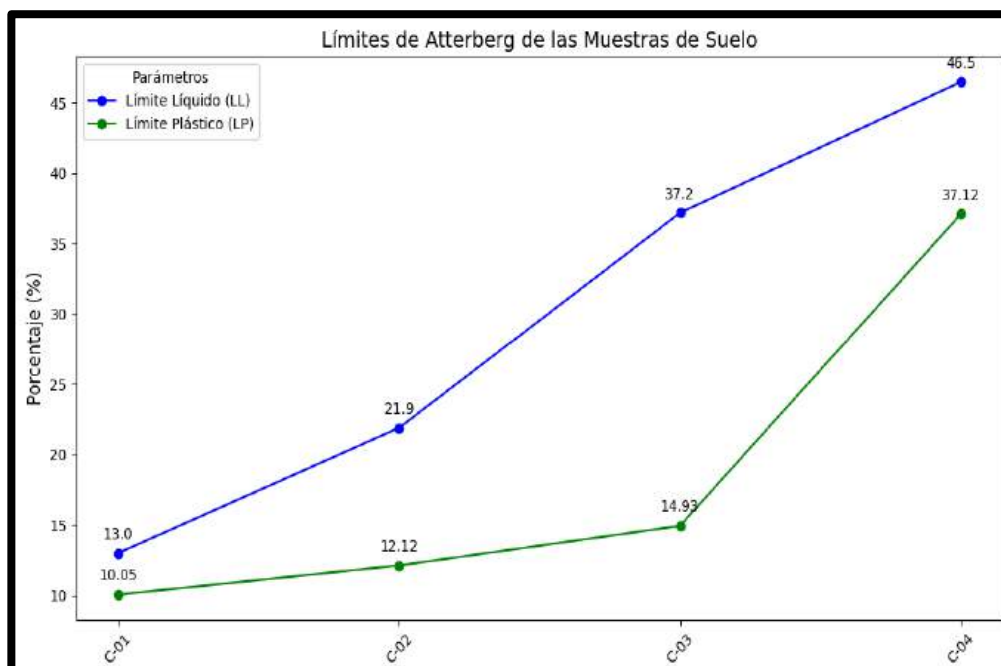


Kolkaque, Abancay. Este análisis es esencial para comprender las propiedades físicas de los suelos en función de su plasticidad y su capacidad para retener agua.

- Límite Líquido (LL): Representa el contenido de agua en el cual el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Los valores de LL en las calicatas varían de 13.00% (C-01) a 46.50% (C-04).
- Límite Plástico (LP): Es el contenido de agua en el que el suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico. Los valores de LP en las muestras van de 10.05% (C-01) a 37.12% (C-04).
- Índice de Plasticidad (IP): Se calcula como la diferencia entre el LL y el LP, lo que indica la plasticidad del suelo. Los valores de IP en las muestras varían de 2.95% (C-01) a 22.27% (C-03).

El contenido de humedad en las muestras oscila entre 16.84% en la calicata C-01 y 21.38% en la calicata C-03, lo que influye directamente en las propiedades geotécnicas del suelo y en su comportamiento frente a posibles deslizamientos.

Este análisis es fundamental para la clasificación del suelo y para la evaluación de su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y humedad, especialmente en relación con la efectividad de los sensores utilizados para la detección de deslizamientos de suelos.



NOTA

El gráfico muestra los resultados de los Límites de Atterberg de las muestras de suelo tomadas en cuatro calicatas (C-01, C-02, C-03, C-04), a una profundidad de 1.5



metros, y presenta dos parámetros fundamentales en la clasificación de suelos: Límite Líquido (LL) y Límite Plástico (LP).

Los resultados de los Límites de Atterberg indican que las calicatas C-03 y C-04 tienen un mayor contenido de material fino, con propiedades plásticas más marcadas, lo que las hace más susceptibles a cambios en el contenido de agua. Esto podría afectar la estabilidad estructural y la propagación de ondas sísmicas, especialmente en áreas de deslizamiento de suelos.

Las calicatas C-01 y C-02 tienen un comportamiento más estable, con suelos de menor plasticidad, posiblemente asociados con materiales más gruesos como arenas o suelos menos plásticos.

**Figura 28 — Análisis de los límites de Atterberg**

**Tabla 14 — Clasificación de los suelos según el sistema SUCS**

Calicata	Muestra	Clasificación		Descripción	Símbolo	
		SUCS	AASTH O		SUCS	AASTHO
C-01	E-01	GP	A -1 - a	Gravas mal gradadas, mezclas de grava y arena con poca o nada de finos		
C-02	E-01	GC	A -2 -6	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla		
C-03	E-02	SP - OL	A3 – A5	Arenas con arcillas inorgánicas de media plasticidad		
C-04	E-02	SP - ML	A3 – A5	Arenas con limos inorgánicos de media plasticidad		

NOTA

La tabla presenta la **clasificación de suelos** realizada en las **calicatas C-01, C-02, C-03 y C-04** ubicadas en la zona de **Kolkaque, Abancay**, utilizando los sistemas **SUCS** (Sistema



Unificado de Clasificación de Suelos) y **AASHTO** (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transporte). Además, se incluye una descripción detallada de cada tipo de suelo y su representación gráfica correspondiente.

Este análisis es crucial para la **caracterización geotécnica** de los suelos y para comprender su **comportamiento** ante cambios de humedad, presión y vibraciones, como las que pueden ser detectadas por **acelerómetros** y **geófonos** en la zona de estudio. Además, la **representación gráfica** (símbolos) ayuda a visualizar las propiedades de los suelos clasificados.

1. **C-01 (GP - Gravas Mal Gradadas):**

- **Descripción Técnica:** El suelo clasificado como **GP** está compuesto por una mezcla de **grava y arena**, con una escasa cantidad de finos. Este tipo de suelo tiene una alta permeabilidad y baja plasticidad, lo que puede proporcionar una buena **capacidad de carga y estabilidad**, pero también una mayor susceptibilidad a la erosión bajo condiciones de alta humedad o vibraciones.
- **Causas de deslizamiento:** Su alta permeabilidad puede permitir que el agua se drene rápidamente, pero su baja cohesión puede generar deslizamientos en condiciones de saturación.

2. **C-02 (GC - Gravas Arcillosas):**

- **Descripción Técnica:** El suelo **GC** está compuesto por una mezcla de **grava, arena y arcilla**. Presenta una mayor **plasticidad** que las gravas mal gradadas, lo que puede generar una **cohesión mayor** entre las partículas del suelo.
- **Causas de deslizamiento:** Su mayor **plasticidad** lo hace más susceptible a cambios volumétricos con la humedad, lo que podría afectar la estabilidad del suelo en condiciones de alta humedad o durante un deslizamiento.

3. **C-03 (SP-OL - Arenas con Arcillas Inorgánicas de Media Plasticidad):**

- **Descripción Técnica:** El suelo clasificado como **SP-OL** se compone de **arenas** mezcladas con **arcillas inorgánicas de media plasticidad**. Este tipo de suelo tiene una **plasticidad intermedia**, lo que le da una **cohesión** moderada entre las partículas.
- **Causas de deslizamiento:** Su alta **plasticidad** puede afectar la capacidad de carga en ciertas condiciones, y es particularmente sensible a la humedad, lo que puede generar **expansión o contracción** en presencia de agua.

4. **C-04 (SP-OL - Arenas con Limos Inorgánicos de Media Plasticidad):**

- **Descripción Técnica:** Similar al suelo C-03, el suelo **SP-OL** de la calicata C-04 también contiene **arenas** mezcladas con **limos inorgánicos** y tiene una **plasticidad media**. Este tipo de suelo presenta **baja cohesión** entre las partículas más finas, lo que puede reducir su resistencia en comparación con su capacidad de carga de las partículas gruesas.
- **Causas de deslizamiento:** La **composición arenosa** de este suelo indica una **baja capacidad de retención de agua**, pero la presencia de limos puede hacer que el suelo sea más susceptible a la **erosión** y deslizamientos en condiciones de saturación.

### c) Pendiente del terreno

La pendiente del terreno es el ángulo de inclinación de una superficie en relación con la horizontal, que afecta la propagación de las ondas sísmicas y la determinación de la estabilidad del terreno en estudios de deslizamientos de suelos. A medida que aumenta la pendiente, es probable que el riesgo de deslizamientos también aumente, lo que puede influir en la efectividad de los sensores de aceleración y geófonos.

La pendiente del terreno será una dimensión clave en el análisis de las condiciones geotécnicas para el estudio de los deslizamientos de suelos.

Las calicatas en terrenos con pendientes más altas podrían estar asociadas a una mayor probabilidad de deslizamientos y a una mayor efectividad de los sensores para detectar cambios en el terreno.

Este análisis puede ser complementado con cálculos de estabilidad y la evaluación del comportamiento de los sensores bajo condiciones de pendiente variable.



Tabla 15 — Pendiente del terreno

Grupo experimental	Medición		Pendiente	Pendiente
	Control 1	Control 2	%	°
G1 – A1	2.00	4.00	2.4	1.37°
G2 – A2	2.00	4.00	5.6	3.21°
G3 – A3	2.00	4.00	11.9	6.79°
G4 – A4	2.00	4.00	8.2	4.69°

**NOTA**

El análisis de las pendientes en los diferentes grupos experimentales, basado en las mediciones de CONTROL 1 y CONTROL 2, se realizó utilizando dos unidades de medida: el porcentaje y los grados. Los resultados de la pendiente muestran variaciones significativas en la inclinación de cada grupo, lo que es relevante para evaluar la estabilidad del terreno y la propagación de ondas sísmicas en la zona de estudio.

**Análisis de resultados:**

- G1 – A1: La pendiente medida es 2.4%, lo que corresponde a una inclinación de 1.37°. Este valor indica que el terreno en este grupo experimental tiene una pendiente moderada, con un cambio gradual en la elevación.
- G2 – A2: La pendiente aumenta a 5.6%, lo que equivale a 3.21°. Esta pendiente es más pronunciada que en el grupo G1 – A1, indicando una mayor inclinación en la sección correspondiente a este grupo.
- G3 – A3: En este grupo experimental, la pendiente es mucho más alta, alcanzando 11.9% o 6.79°. Este valor sugiere un terreno con una inclinación considerable, lo cual puede generar un mayor riesgo de deslizamientos o movimientos sísmicos, siendo una zona de interés para estudios de estabilidad geotécnica.
- G4 – A4: Finalmente, el grupo G4 – A4 presenta una pendiente de 8.2%, equivalente a 4.69°. Aunque menos pronunciada que la de G3 – A3, sigue representando un terreno relativamente inclinado.



**Implicaciones para el estudio:**

Las variaciones en las pendientes observadas en estos grupos experimentales tienen implicaciones directas en la estabilidad estructural del terreno. Las áreas con pendientes mayores, como G3 – A3, son más susceptibles a movimientos de tierra, lo que puede influir en los resultados de las mediciones obtenidas con los sensores de aceleración y geófonos.

Estos datos sobre la pendiente son fundamentales para comprender cómo la inclinación del terreno afecta la propagación de ondas sísmicas y cómo se pueden ajustar los métodos de detección de deslizamientos en áreas con diferentes pendientes.

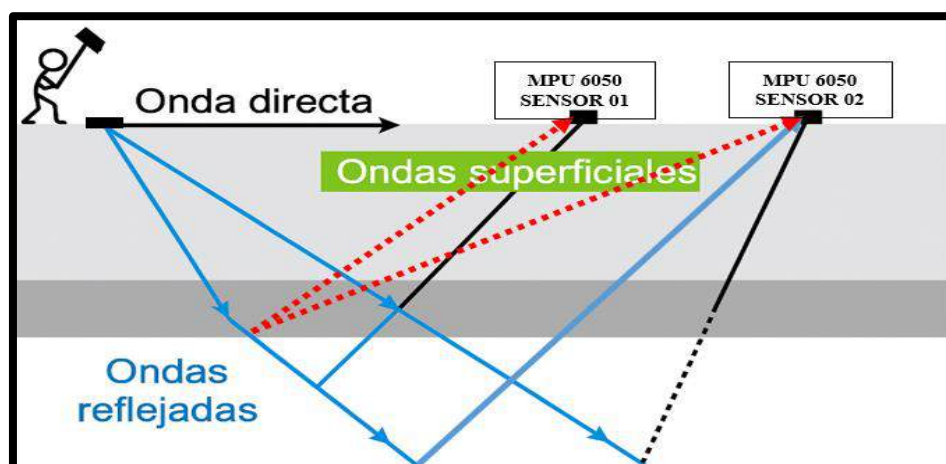
**5.1.2 Análisis de los resultados de variable independiente: Sensores de detección de movimiento.**

**5.1.2.1 Aceleración MPU 6050**

Se analiza la aceleración medida por el sensor MPU 6050, el cual es un sensor de movimiento que integra un acelerómetro y un giroscopio. Este sensor es ampliamente utilizado en aplicaciones de monitoreo de movimiento, como en dispositivos de detección sísmica o sistemas de monitoreo de deslizamientos de suelos.

- **Condiciones ambientales y geotécnicas**

El área de estudio presenta un terreno montañoso con pendientes pronunciadas y una variabilidad en el tipo de suelo (arcilloso, rocoso, arenoso), lo cual tiene un impacto directo en la propagación de las ondas sísmicas. Las condiciones climáticas de la zona, que incluyen estaciones de lluvias intensas, también influyen en la estabilidad del suelo y la capacidad de los sensores para detectar vibraciones.



NOTA

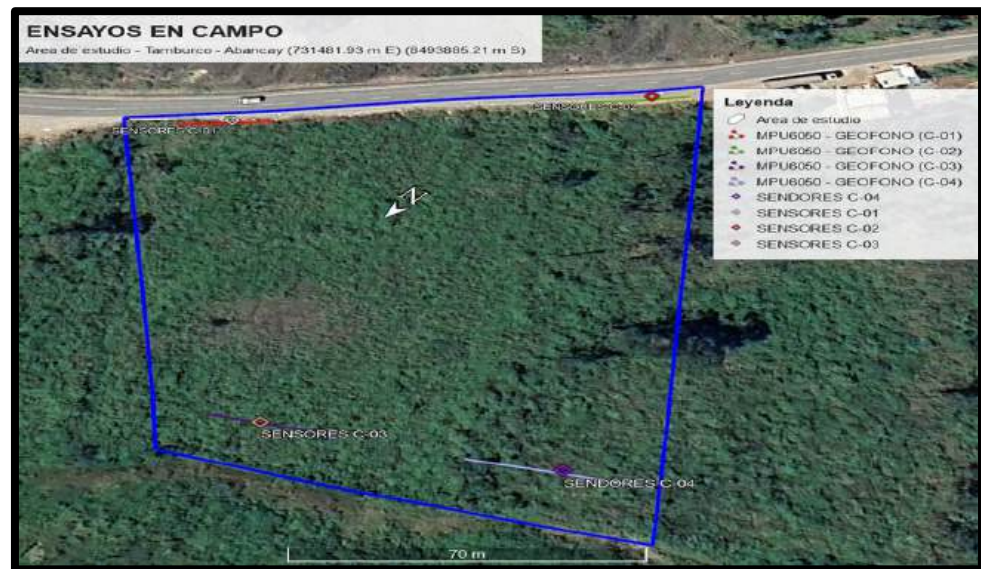
La imagen muestra la propagación de ondas sísmicas generadas por una fuente sísmica, que se transmite a través de diferentes capas del terreno. Se ilustran tres tipos principales de ondas: onda directa, ondas superficiales y ondas reflejadas.

La imagen destaca dos sensores MPU 6050 ubicados en el terreno en diferentes posiciones, etiquetados como Sensor 01 y Sensor 02. Estos sensores se encargan de registrar las vibraciones provocadas por las ondas sísmicas en distintas distancias desde la fuente.

**Figura 29 — Refracción sísmica**

**a) Distribución de las líneas de aplicación**

Los sensores se distribuyeron en diferentes puntos dentro del área de estudio, como se muestra en las tablas de ubicación de los sensores C-01, C-02, C-03, y C-04, así como los puntos de medición de los grupos experimentales con acelerómetros MPU 6050 y geófonos. Estas ubicaciones fueron elegidas cuidadosamente para representar las diversas condiciones geotécnicas de la zona, como la variabilidad en el tipo de suelo, las características del terreno.



#### NOTA

La imagen muestra un mapa aéreo del área de estudio ubicada en el sector Kolkaque, distrito de Tamburco, Abancay, donde se realizaron los ensayos de campo. En este mapa, se destacan los sensores de tipo MPU 6050 y geófonos, distribuidos en diferentes puntos identificados como C-01, C-02, C-03, y C-04. Estos sensores fueron ubicados estratégicamente dentro del área de estudio, delimitada por un contorno azul, para evaluar la propagación de las ondas sísmicas generadas durante el experimento.

**Figura 30 — Ubicación de sensores en el área de estudio de Kolkaque**

**Tabla 16 — Distribución de la fuente sísmica y ubicación de los sensores acelerómetros**

Grupo experimental acelerómetros	Fuente sísmica (m)	Grupo de control 1 (GC A1)	
		MPU -6050 (A - 01) (m)	MPU -6050 (A - 02) (m)
MPU 6050 – A1	0.0	2.00	4.00
MPU 6050 - A2	0.0	2.00	4.00
MPU 6050 - A3	0.0	2.00	4.00
MPU 6050 - A4	0.0	2.00	4.00

**NOTA**

La tabla muestra la distribución de la fuente sísmica y las ubicaciones de los sensores acelerómetros (MPU 6050) en los grupos de control durante los experimentos. Cada grupo de control está asociado con diferentes distancias entre los sensores y la fuente sísmica, lo que permite evaluar la respuesta de los acelerómetros bajo diversas condiciones.

Grupo de Control 1 (GC A1): Las distancias de medición para los sensores de acelerómetros en el primer grupo de control. El MPU-6050 (A-01) está a 2.0 m, mientras que el MPU-6050 (A-02) está a 4.0 m.

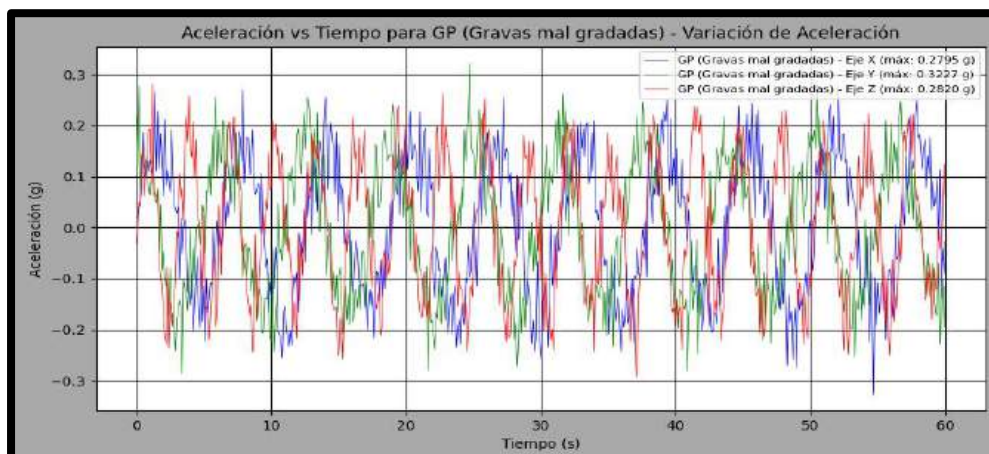


Tabla 17 — Grupo experimental acelerómetros

Grupo experimental acelerómetro	Fuente sísmica (m)	Puntos		Tipo de suelo	Descripción
		Geófono (G – 01) (m)	Geófono (G – 02) (m)		
Acelerómetro - A1	0.0	2.00	4.00	GP	Gravas mal gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos
Acelerómetro - A2	0.0	2.00	4.00	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla
Acelerómetro - A3	0.0	2.00	4.00	SP - OL	Arenas con arcillas inorgánicas de media plasticidad
Acelerómetro - A4	0.0	2.00	4.00	SP - ML	Arenas con limos inorgánicos de media plasticidad

NOTA

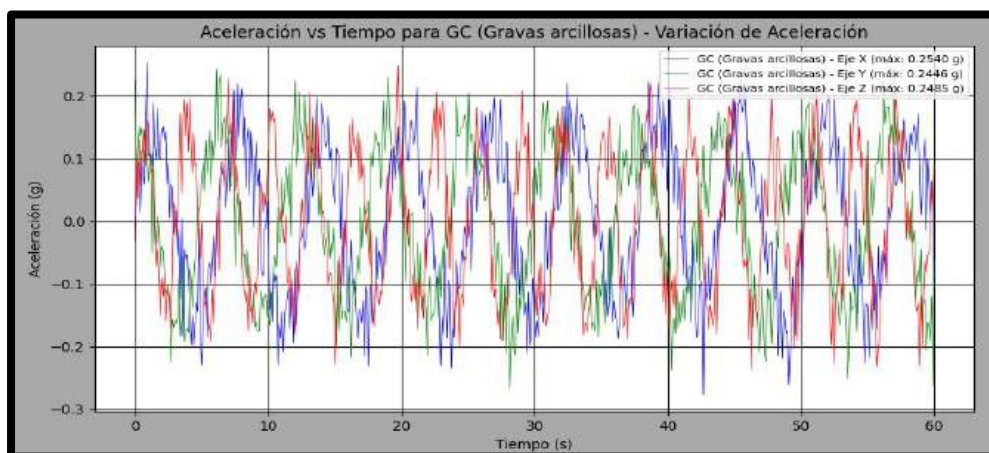
La Tabla muestra los resultados del grupo experimental de acelerómetros, con mediciones tomadas en dos puntos (G-01 y G-02) para cada grupo. Los datos incluyen la fuente sísmica (0.0 m) y el tipo de suelo en cada grupo experimental.



NOTA

El gráfico muestra la aceleración medida en tres ejes (X, Y, Z) para el tipo de suelo GP (Gravas mal gradadas) durante 60 segundos. Las aceleraciones máximas alcanzadas fueron 0.2795 g en el eje X, 0.3227 g en el eje Y y 0.2820 g en el eje Z. Las fluctuaciones observadas en cada eje reflejan la respuesta dinámica del suelo a las vibraciones

**Figura 31 — Grupo experimental acelerómetros – A1 – 2m**

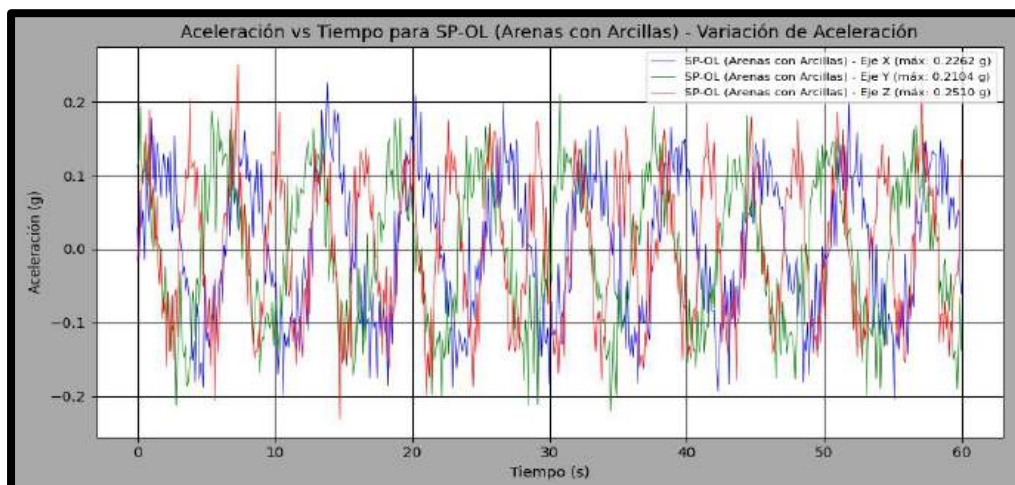


NOTA

El gráfico muestra la aceleración medida en tres ejes (X, Y, Z) para el tipo de suelo GC (Gravas arcillosas) durante 60 segundos. Las aceleraciones máximas alcanzadas fueron 0.2540 g en el eje X, 0.2446 g en el eje Y e 0.2485 g en el eje Z. Las fluctuaciones observadas en cada eje reflejan la respuesta dinámica del suelo a las vibraciones.

**Figura 32 — Grupo experimental acelerómetros – A2 – 2m**

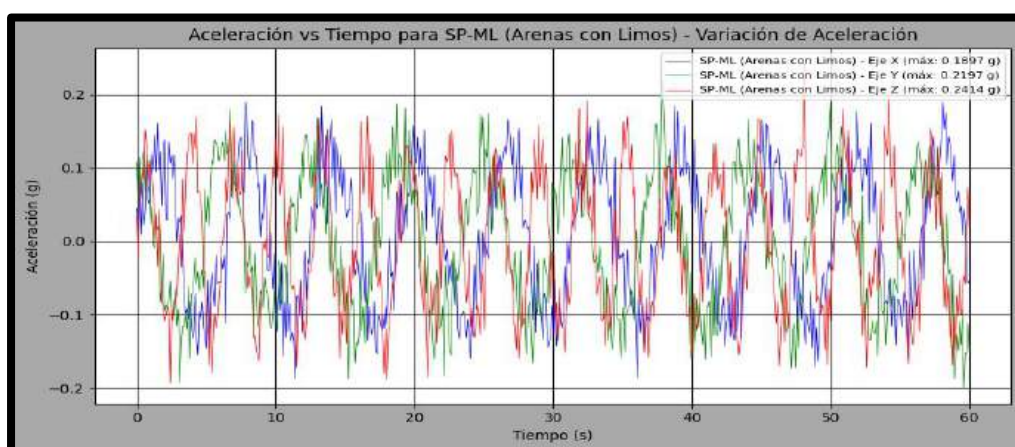




NOTA

El gráfico muestra la aceleración medida en tres ejes (X, Y, Z) para el tipo de suelo SP-OL (Arenas con Arcillas) durante 60 segundos. Las aceleraciones máximas alcanzadas fueron 0.2262 g en el eje X, 0.2104 g en el eje Y e 0.2510 g en el eje Z. Las fluctuaciones en cada eje reflejan la respuesta dinámica del suelo a las vibraciones

**Figura 33 — Grupo experimental acelerómetros – A3 – 2m**

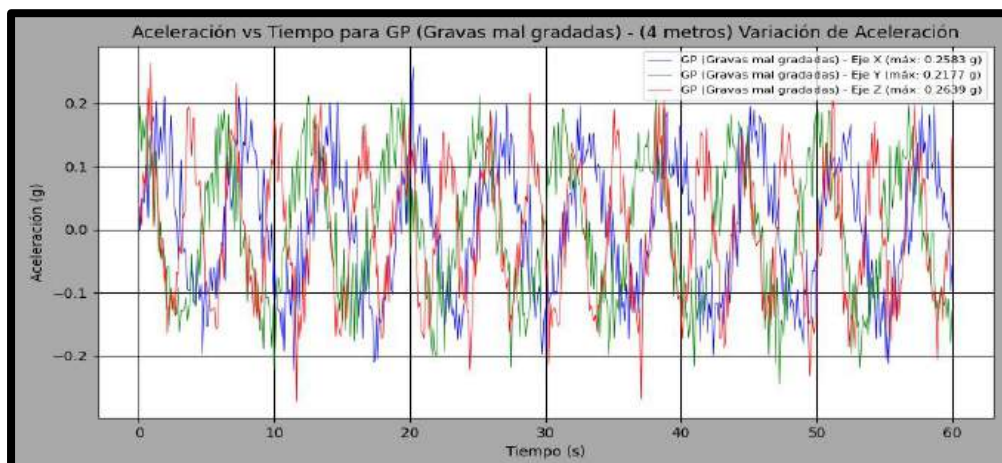


NOTA

El gráfico muestra la aceleración medida en tres ejes (X, Y, Z) para el tipo de suelo SP-ML (Arenas con Limos) durante 60 segundos. Las aceleraciones máximas alcanzadas fueron 0.1897 g en el eje X, 0.2197 g en el eje Y e 0.2414 g en el eje Z. Las variaciones en cada eje reflejan cómo este tipo de suelo responde a las vibraciones.

**Figura 34 — Grupo experimental acelerómetros – A4 – 2m**

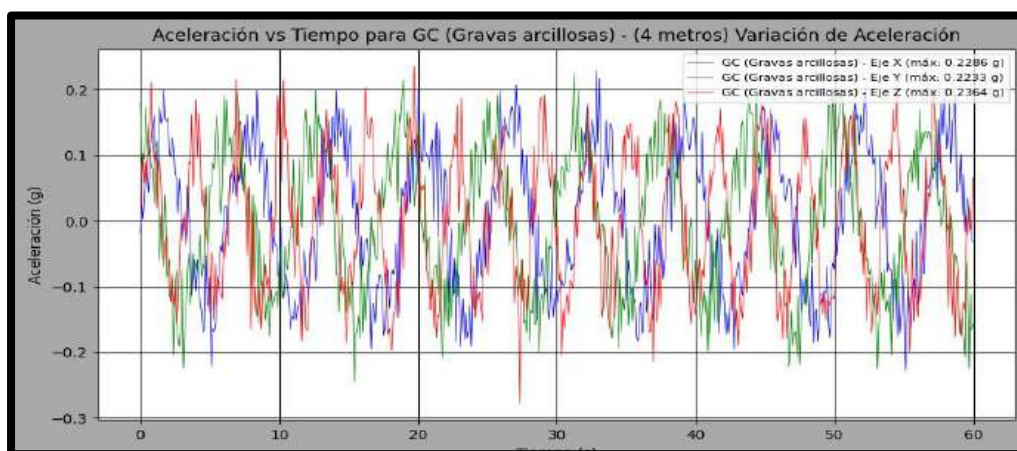




NOTA

El gráfico muestra la aceleración medida en tres ejes (X, Y, Z) para el tipo de suelo GP (Gravas mal gradadas) durante 60 segundos. Las aceleraciones máximas alcanzadas fueron 0.2583 g en el eje X, 0.2177 g en el eje Y e 0.2639 g en el eje Z. Las fluctuaciones observadas en cada eje reflejan la respuesta dinámica del suelo a las vibraciones

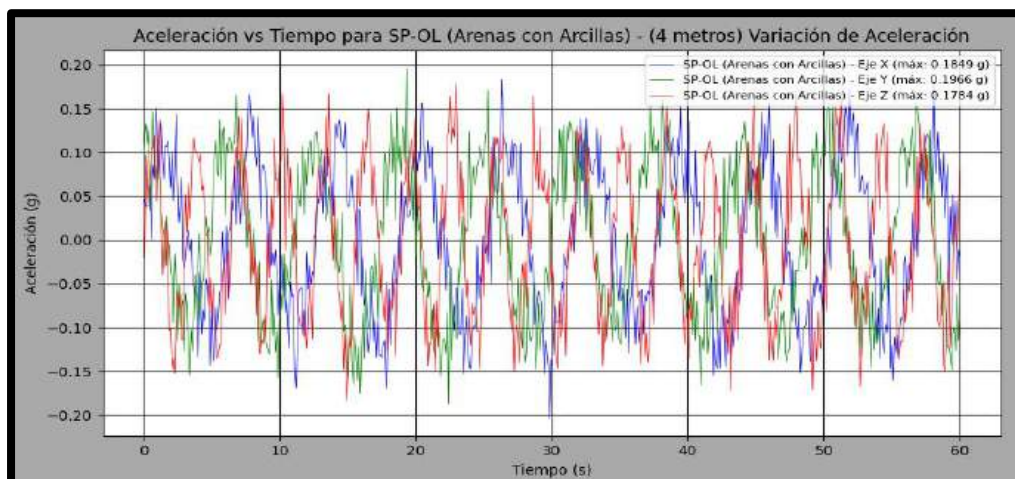
**Figura 35 — Grupo experimental acelerómetros – A1 – 4m**



NOTA

El gráfico muestra la aceleración medida en tres ejes (X, Y, Z) para el tipo de suelo GC (Gravas arcillosas) durante 60 segundos. Las aceleraciones máximas alcanzadas fueron 0.2286 g en el eje X, 0.2233 g en el eje Y e 0.2364 g en el eje Z. Las fluctuaciones observadas en cada eje reflejan la respuesta dinámica del suelo a las vibraciones.

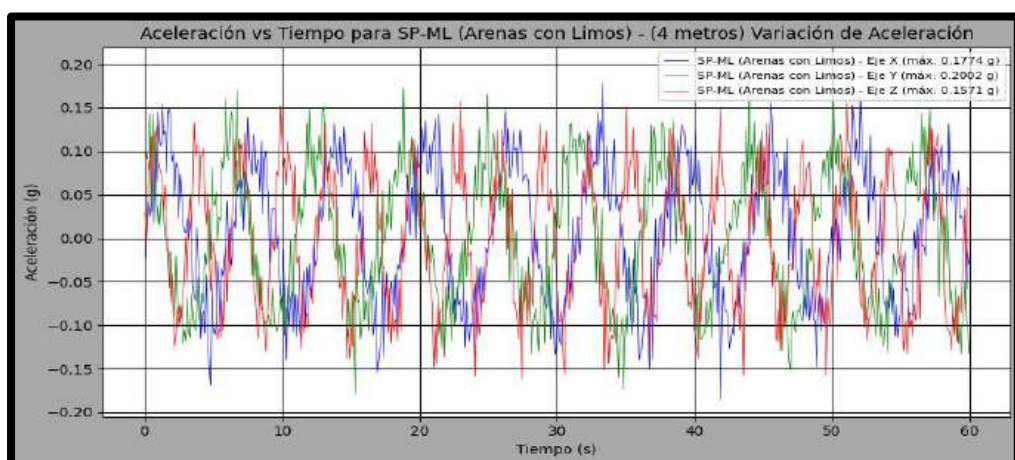
**Figura 36 — Grupo experimental acelerómetros – A2 – 4m**



NOTA

El gráfico muestra la aceleración medida en tres ejes (X, Y, Z) para el tipo de suelo SP-OL (Arenas con Arcillas) durante 60 segundos. Las aceleraciones máximas alcanzadas fueron 0.1849 g en el eje X, 0.1966 g en el eje Y y 0.1784 g en el eje Z. Las fluctuaciones en cada eje reflejan la respuesta dinámica del suelo a las vibraciones

**Figura 37 — Grupo experimental acelerómetros – A3 – 4m**



NOTA

El gráfico muestra la aceleración medida en tres ejes (X, Y, Z) para el tipo de suelo SP-ML (Arenas con Limos) durante 60 segundos. Las aceleraciones máximas alcanzadas fueron 0.1774 g en el eje X, 0.2002 g en el eje Y y 0.1571 g en el eje Z. Las variaciones en cada eje reflejan cómo este tipo de suelo responde a las vibraciones.

**Figura 38 — Grupo experimental acelerómetros – A4 – 4m**

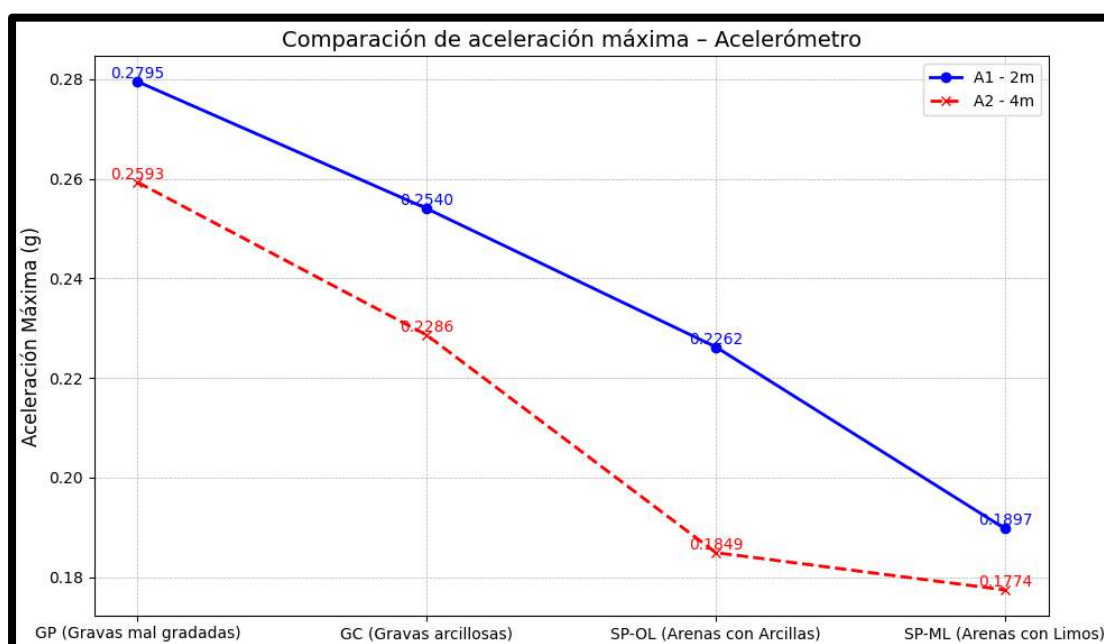


Tabla 18 — Tabla resumen de las aceleraciones máximas - Acelerómetro

Tipo de suelo	Acelerómetro A1 (2m)	Aceleración máxima A1 eje x (g)	Acelerómetro A2 (4m)	Aceleración máxima A2 eje x (g)
GP (Gravas mal gradadas)	A1 (2m)	0,2795	A2 (4m)	0,2593
GC (Gravas arcillosas)	A1 (2m)	0,254	A2 (4m)	0,2286
SP-OL (Arenas con Arcillas)	A1 (2m)	0,2262	A2 (4m)	0,1849
SP-ML (Arenas con Limos)	A1 (2m)	0,1897	A2 (4m)	0,1774

NOTA

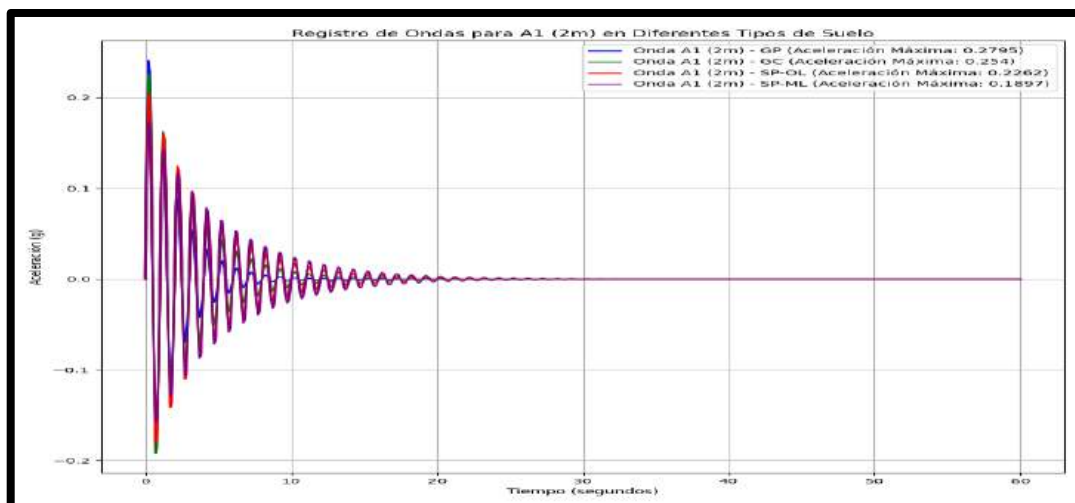
La tabla muestra las aceleraciones máximas alcanzadas en el eje X para diferentes tipos de suelo, utilizando los acelerómetros A1 (2m) y A2 (4m). Los valores más altos de aceleración se registran en el tipo de suelo GP (Gravas mal gradadas), con una aceleración máxima de 0.2795 g en A1 y 0.2593 g en A2. En comparación, los otros suelos como GC (Gravas arcillosas), SP-OL (Arenas con Arcillas) y SP-ML (Arenas con Limos) muestran aceleraciones máximas más bajas, lo que refleja la variabilidad en la respuesta dinámica de estos suelos a las vibraciones.



NOTA

El gráfico muestra la comparación de la aceleración máxima medida por los acelerómetros para diferentes tipos de suelos y distancias de los geófonos. En general, se observa que el Geófono A1 (2m), más cercano a la fuente sísmica, registra una mayor aceleración máxima en comparación con el Geófono A2 (4m). Los tipos de suelo influyen considerablemente la intensidad de las ondas sísmicas detectadas. Para el suelo de Gravadas mal gradadas (GP), la aceleración máxima es la más alta, con un valor de 0.2795 g a 2m y 0.2593 g a 4m, mostrando una disminución a medida que se aleja de la fuente. En suelos de Gravadas arcillosas (GC), la aceleración también se reduce, aunque en menor medida, con valores de 0.2540 g a 2m y 0.2286 g a 4m. Para Arenas con arcillas (SP-OL), la caída es más significativa, alcanzando 0.2262 g a 2m y 0.1849 g a 4m, reflejando una mayor atenuación de las ondas. Finalmente, en Arenas con limos (SP-ML), se observa la menor aceleración, con 0.1897 g a 2m y 0.1774 g a 4m, indicando que las ondas sísmicas se disipan más rápido en estos suelos. En conclusión, los resultados muestran que a mayor distancia y en suelos con mayor contenido de arcilla o limo, la aceleración máxima disminuye, lo que evidencia la atenuación de las ondas sísmicas a través de diferentes tipos de terreno.

**Figura 39 — Comparación de aceleración máxima – Acelerómetro**



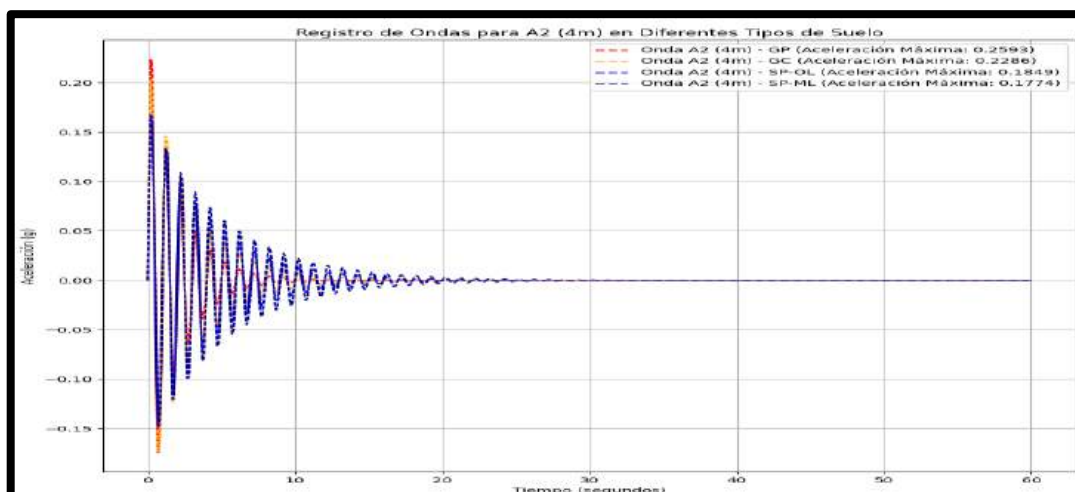
NOTA

Este gráfico muestra las ondas sísmicas captadas por el Acelerómetro A1 (2m) en distintos tipos de suelo: Gravadas mal gradadas (GP), Gravadas arcillosas (GC), Arenas con arcillas (SP-OL) y Arenas con limos (SP-ML). El análisis revela que Gravadas mal gradadas (GP) muestra la mayor aceleración máxima (0.2795 g), lo que sugiere una menor atenuación de las ondas



sísmicas en suelos más permeables y con partículas menos compactas. En cambio, Arenas con limos (SP-ML) tiene la menor aceleración máxima (0.1897 g), indicando una mayor atenuación de las ondas sísmicas debido a la mayor plasticidad del suelo y la alta concentración de limos.

**Figura 40 — Registro de aceleraciones máximas para A1 (2m)**



NOTA

Este gráfico muestra las ondas sísmicas registradas por el Acelerómetro A2 (4m) para distintos tipos de suelo: Gravas mal gradadas (GP), Gravas arcillosas (GC), Arenas con arcillas (SP-OL) y Arenas con limos (SP-ML). El análisis muestra que Gravas mal gradadas (GP) tiene la mayor aceleración máxima (0.2593 g), indicando que este tipo de suelo es menos denso y permite una mayor propagación de las ondas sísmicas. Por otro lado, Arenas con limos (SP-ML) presenta la aceleración máxima más baja (0.1774 g), lo que sugiere una mayor atenuación de las ondas sísmicas debido a la mayor cohesión y plasticidad de este tipo de suelo.

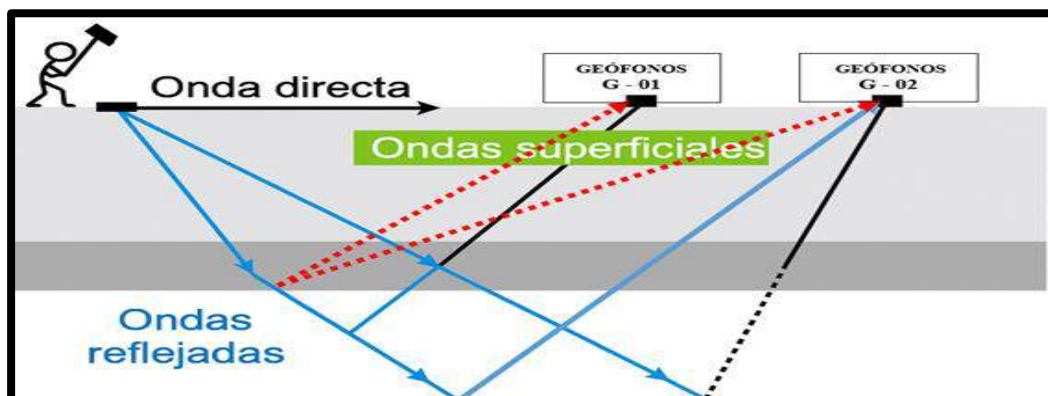
**Figura 41 — Registro de aceleraciones máximas para A2 (4m)**

### 5.1.2.2 Geófonos verticales de 4.5 Hz

Se realizará la medición de la aceleración utilizando geófonos, dispositivos que son comúnmente empleados en aplicaciones de monitoreo sísmico y geotécnico para medir la vibración y los movimientos del suelo. A diferencia del MPU 6050, que mide la aceleración en tres ejes, los geófonos están diseñados para detectar las vibraciones sísmicas y movimientos de suelo a lo largo de un solo eje, generalmente en la dirección vertical o en la dirección de las ondas sísmicas.



Para determinar la aceleración del suelo con un geófono, es necesario realizar una integración de la señal medida, que inicialmente da la velocidad de la vibración del suelo. Para obtener la aceleración, se aplica una operación de derivación o se utiliza un factor de calibración adecuado.



NOTA

La imagen muestra la propagación de ondas sísmicas generadas por una fuente sísmica, que se transmite a través de diferentes capas del terreno. Se ilustran tres tipos principales de ondas: onda directa, ondas superficiales y ondas reflejadas.

La imagen destaca dos geófonos ubicados en el terreno en diferentes posiciones, etiquetados como G-01 y Sensor G-02. Estos sensores se encargan de registrar las vibraciones provocadas por las ondas sísmicas en distintas distancias desde la fuente.

**Figura 42 — Propagación de ondas detectadas por los geófonos**

**Tabla 19 — Distribución de la fuente sísmica y ubicación de los geófonos**

Grupo experimental geófonos	Fuente sísmica (m)	Grupo de control 1 (GC G1)	
		Geófono (G – 01) (m)	Geófono (G – 02) (m)
Geófonos - G1	0.0	2.00	4.00
Geófonos - G2	0.0	2.00	4.00
Geófonos - G3	0.0	2.00	4.00
Geófonos - G4	0.0	2.00	4.00

NOTA

La tabla muestra la distribución de la fuente sísmica y la ubicación de los sensores geófonos en dos grupos de control durante el experimento. Los datos indican las distancias entre los sensores y la fuente sísmica en cada uno de los grupos de control, así como las variaciones en la distancia de medición entre los distintos sensores.

Grupo de Control 1 (GC1): Muestra las distancias de medición de los sensores para el primer grupo de control, con distancias variables para los geófonos (G-01 y G-02) a 2.0 m, 4.0 m, respectivamente.

**Tabla 20 — Grupo experimental geófonos**

Grupo experimental geófonos	Fuente sísmica (m)	Puntos		Tipo de suelo	Descripción
		Geófono (G – 01) (m)	Geófono (G – 02) (m)		
Geófonos - G1	0.0	2.00	4.00	GP	Gravas mal gradadas, mezclas de grava y arena con



					poco o nada de finos
Geófonos - G2	0.0	2.00	4.00	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla
Geófonos - G3	0.0	2.00	4.00	SP - OL	Arenas con arcillas inorgánicas de media plasticidad
Geófonos - G4	0.0	2.00	4.00	SP - ML	Arenas con limos inorgánicos de media plasticidad

**NOTA**

La Tabla presenta los datos del grupo experimental de geófonos, con mediciones realizadas en dos puntos diferentes (G-01 y G-02) en cada grupo. Estos datos son cruciales para evaluar la propagación de ondas sísmicas y vibraciones en diferentes tipos de suelo.

1. Geófonos - G1:

- Tipo de suelo: GP (Gravas mal gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos).
- Descripción: El suelo tiene una baja cohesión y es adecuado para mediciones dinámicas debido a la composición porosa.

2. Geófonos - G2:

- Tipo de suelo: GC (Gravas arcillosas, mezcla de grava, arena y arcilla).
- Descripción: Suelo arcilloso, lo que influye en la propagación de las ondas sísmicas, absorbiendo energía de forma diferente a suelos más arenosos.

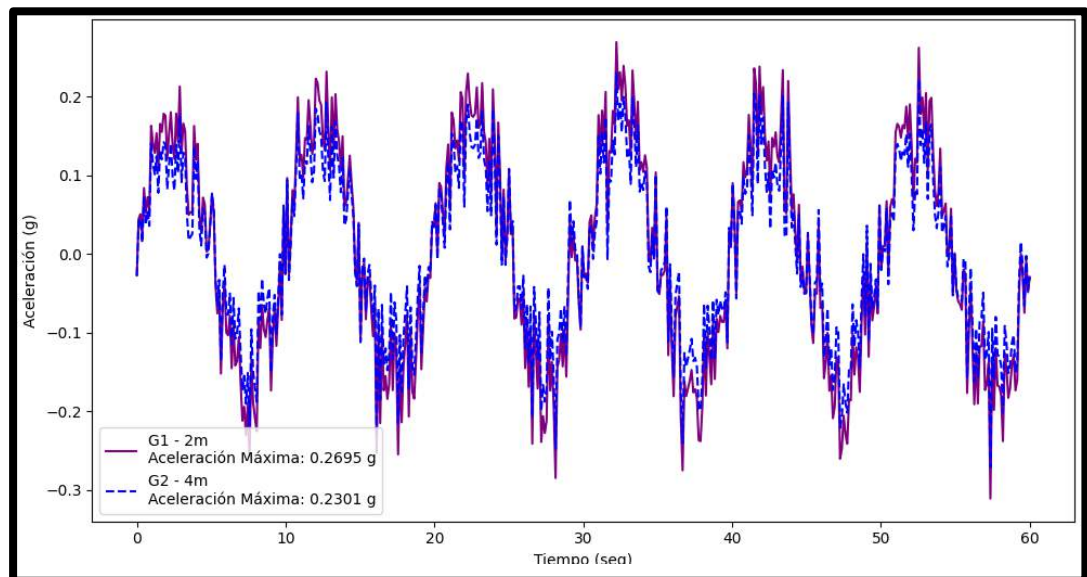
3. Geófonos - G3:



- Tipo de suelo: SP – OL (Arenas con arcillas inorgánicas de media plasticidad).
- Descripción: El contenido de arcilla hace que este suelo tenga una respuesta diferente en comparación con las gravas y arena pura, siendo un terreno más plástico.

#### 4. Geófonos - G4:

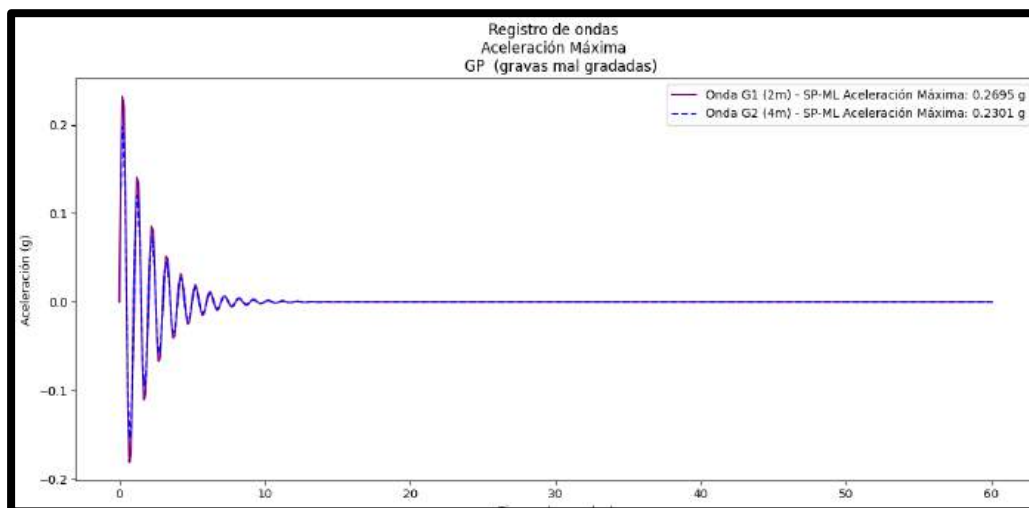
- Tipo de suelo: SP – ML (Arenas con limos inorgánicos de media plasticidad).
- Descripción: Las arenas con limos presentan un comportamiento plástico más marcado, afectando la absorción de vibraciones y la propagación de ondas sísmicas.



#### NOTA

El gráfico muestra las ondas sísmicas captadas por los geófonos G1 (2 metros) y G2 (4 metros) en un terreno con gravas mal gradadas (GP). Como era de esperar, G1, al estar más cercano a la fuente sísmica, registra una aceleración máxima de 0.2695 g, mientras que G2, más alejado, tiene una aceleración máxima de 0.2301 g. La onda primaria tiene un patrón similar en ambos geófonos, pero con diferencias en la intensidad debido a la distancia a la fuente. Además, la diferencia en la magnitud refleja cómo las propiedades del suelo afectan la propagación de las ondas sísmicas, siendo más intensas en G1 (más cercano) y más atenuadas en G2.

**Figura 43 — Grupo experimental geófonos – G1**

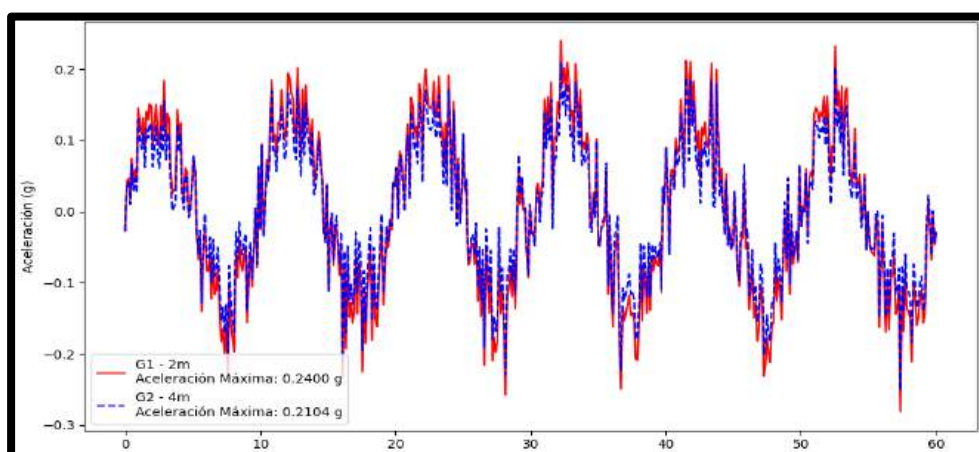


NOTA

- G1 (2m), al estar más cerca de la fuente sísmica, registra una aceleración máxima mayor (0.2695 g) y detecta las ondas sísmicas con mayor rapidez.
- G2 (4m), al estar más alejado, registra una aceleración máxima más baja (0.2301 g) y tiene un retraso en la llegada de las ondas debido a la mayor distancia.

Ambos geófonos captan ondas similares en forma, pero con diferencias en la intensidad y el tiempo de llegada debido a la atenuación de las ondas sísmicas conforme se alejan de la fuente sísmica.

**Figura 44 — Registro de ondas - Aceleración máxima - Suelo GC**



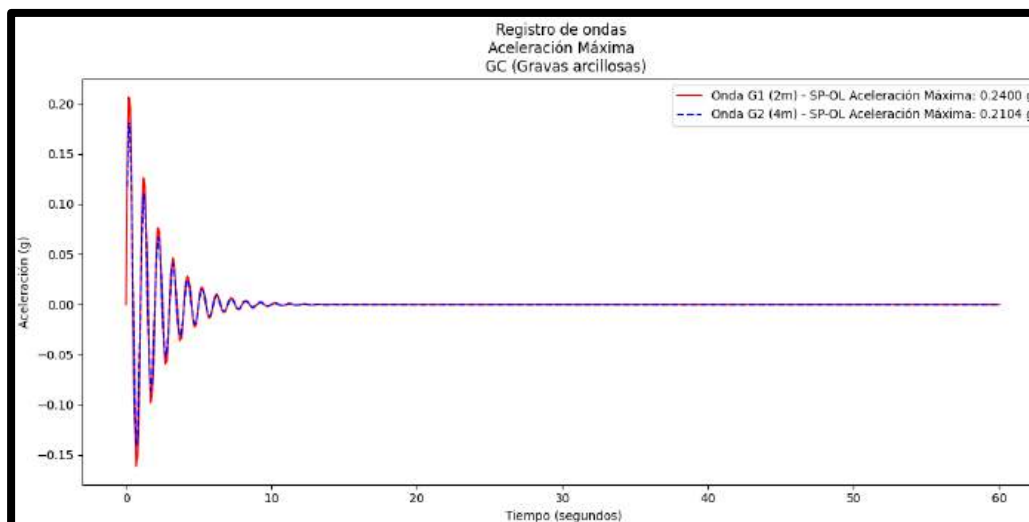
NOTA

El gráfico presenta las ondas sísmicas captadas por los geófonos G1 (2 metros) y G2 (4 metros) en un suelo de gravas arcillosas (GC). Como se esperaba, G1, al estar más cercano a la fuente sísmica, registra una aceleración máxima más alta (0.2400 g), mientras que G2, situado a una distancia mayor, presenta una aceleración



máxima ligeramente más baja (0.2104 g). Sin embargo, a pesar de esta diferencia en la magnitud, ambas ondas tienen una forma similar y muestran variaciones en la aceleración a lo largo del tiempo, lo que refleja la propagación de las ondas sísmicas a través del terreno. Esto confirma que, aunque la distancia y el tipo de suelo influyen en la intensidad de las ondas, el patrón general de las ondas no varía drásticamente.

**Figura 45 — Grupo experimental geófonos – G2**



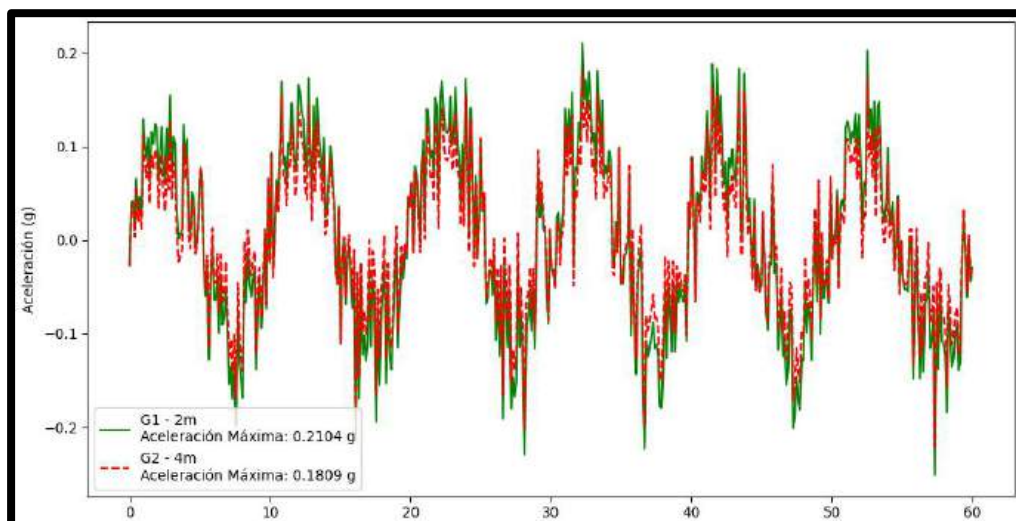
**NOTA**

- G1 (2m), al estar más cerca de la fuente sísmica, registra una aceleración máxima mayor (0.2400 g) y detecta las ondas sísmicas con mayor rapidez.
- G2 (4m), al estar más alejado, registra una aceleración máxima más baja (0.2104 g) y tiene un retraso en la llegada de las ondas debido a la mayor distancia.

Ambos geófonos captan ondas similares en forma, pero con diferencias en la intensidad y el tiempo de llegada debido a la atenuación de las ondas sísmicas conforme se alejan de la fuente sísmica.

**Figura 46 — Registro de ondas - Aceleración máxima - Suelo GC**

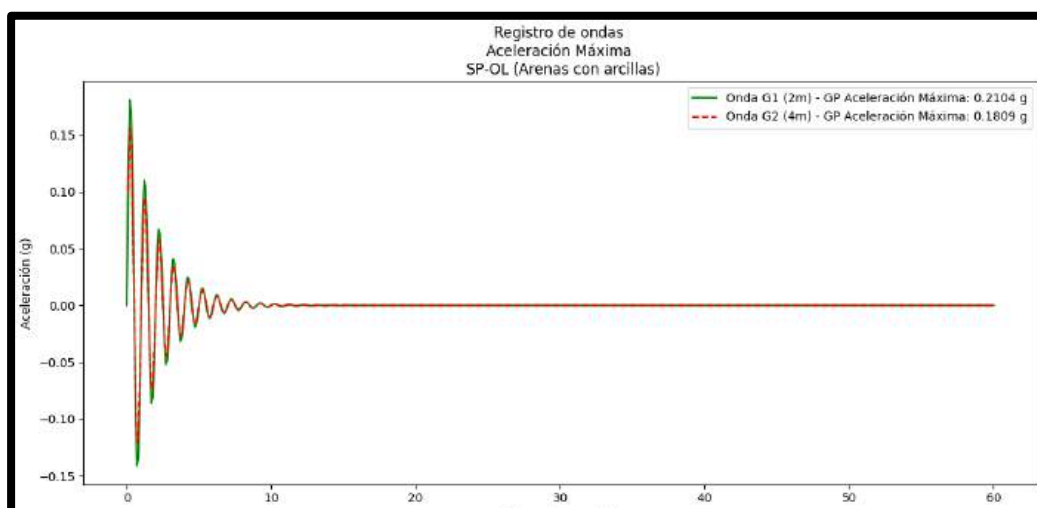




NOTA

El gráfico muestra las ondas sísmicas registradas por los geófonos G1 (2 metros) y G2 (4 metros) sobre el tipo de suelo SP-OL (Arenas con arcillas). G1, al estar más cerca de la fuente sísmica, captura una aceleración máxima de 0.2104 g, mientras que G2, más alejado, registra una aceleración máxima de 0.1809 g. Ambos geófonos muestran ondas con un patrón similar, pero con diferencias en intensidad y tiempo de llegada debido a la distancia y atenuación de las ondas sísmicas.

**Figura 47 — Grupo experimental geófonos – G3**



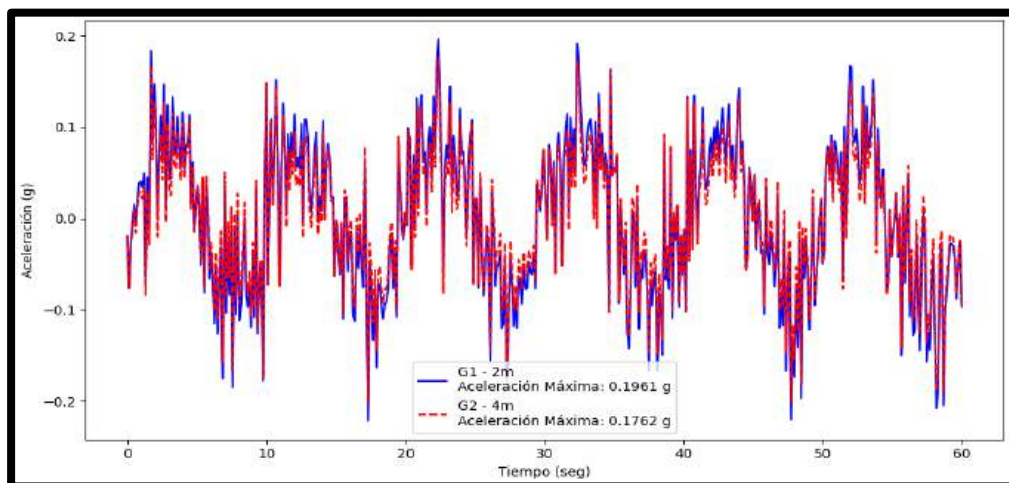
NOTA

- G1 (2m), al estar más cerca de la fuente sísmica, registra una aceleración máxima mayor (0.2104 g) y detecta las ondas sísmicas con mayor rapidez.
- G2 (4m), al estar más alejado, registra una aceleración máxima más baja (0.1809 g) y tiene un retraso en la llegada de las ondas debido a la mayor distancia.



Ambos geófonos captan ondas similares en forma, pero con diferencias en la intensidad y el tiempo de llegada debido a la atenuación de las ondas sísmicas conforme se alejan de la fuente sísmica.

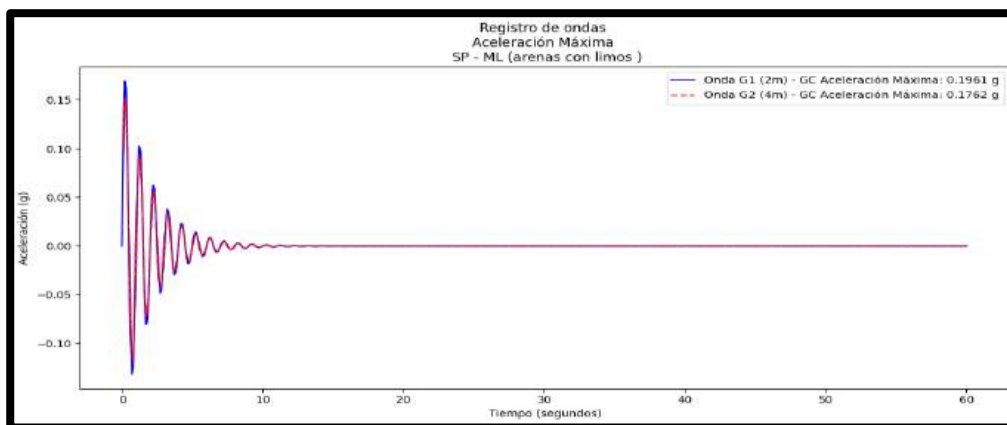
**Figura 48 — Registro de ondas - Aceleración máxima - Suelo SP-OL**



**NOTA**

El gráfico muestra las ondas sísmicas captadas por los geófonos G1 (2 metros) y G2 (4 metros) en un terreno de arenas con limos (SP-ML). Se observa que G1, al estar más cercano a la fuente sísmica, registra una aceleración máxima mayor (0.1961 g) y detecta las ondas más rápidamente. Por otro lado, G2, más alejado, presenta una aceleración máxima menor (0.1762 g) y un retraso en la llegada de la onda debido a la mayor distancia. Ambos geófonos captan ondas similares en forma, pero con diferencias en la intensidad y el tiempo de llegada debido a la atenuación de las ondas sísmicas con la distancia.

**Figura 49 — Grupo experimental geófonos – G4**



**NOTA**

- G1 (2m), al estar más cerca de la fuente sísmica, registra una aceleración máxima mayor (0.1961 g) y detecta las ondas sísmicas con mayor rapidez.
- G2 (4m), al estar más alejado, registra una aceleración máxima más baja (0.1762 g) y tiene un retraso en la llegada de las ondas debido a la mayor distancia.

Ambos geófonos captan ondas similares en forma, pero con diferencias en la intensidad y el tiempo de llegada debido a la atenuación de las ondas sísmicas conforme se alejan de la fuente sísmica.

**Figura 50 — Registro de ondas - Aceleración máxima - Suelo SP -ML**

**Tabla 21 — Tabla resumen de las aceleraciones máximas – Geófonos**

Tipo de suelo	Geófono G1 (2m)	Aceleración máxima G1 (g)	Geófono G2 (4m)	Aceleración máxima G2 (g)
GP (Gravas mal gradadas)	G1 (2m)	0,2695	G2 (4m)	0,2301
GC (Gravas arcillosas)	G1 (2m)	0,2400	G2 (4m)	0,2104
SP-OL (Arenas con Arcillas)	G1 (2m)	0,2104	G2 (4m)	0,1809
SP-ML (Arenas con Limos)	G1 (2m)	0,1961	G2 (4m)	0,1762

NOTA



En la Tabla, se presentan las aceleraciones máximas registradas por los geófonos G1 (a 2 metros) y G2 (a 4 metros) en cuatro tipos de suelo diferentes, especificando los valores máximos alcanzados para cada configuración.

1. GP (Gravas mal gradadas):

- El geófono G1 (ubicado a 2 metros) muestra una aceleración máxima de 0.2695 g, mientras que el geófono G2 (ubicado a 4 metros) registra 0.2301 g. La diferencia en los valores de aceleración refleja una mayor atenuación de la onda sísmica debido a la mayor distancia entre el geófono y la fuente de la vibración.

2. GC (Gravas arcillosas):

- En este caso, las aceleraciones son ligeramente menores que las de las gravas mal gradadas. El geófono G1 a 2 metros alcanza una aceleración de 0.2400 g, y el G2 a 4 metros registra 0.2104 g. Las gravas arcillosas también presentan una atenuación, pero a menor nivel debido a la mezcla más homogénea de las partículas de arcilla con las gravas.

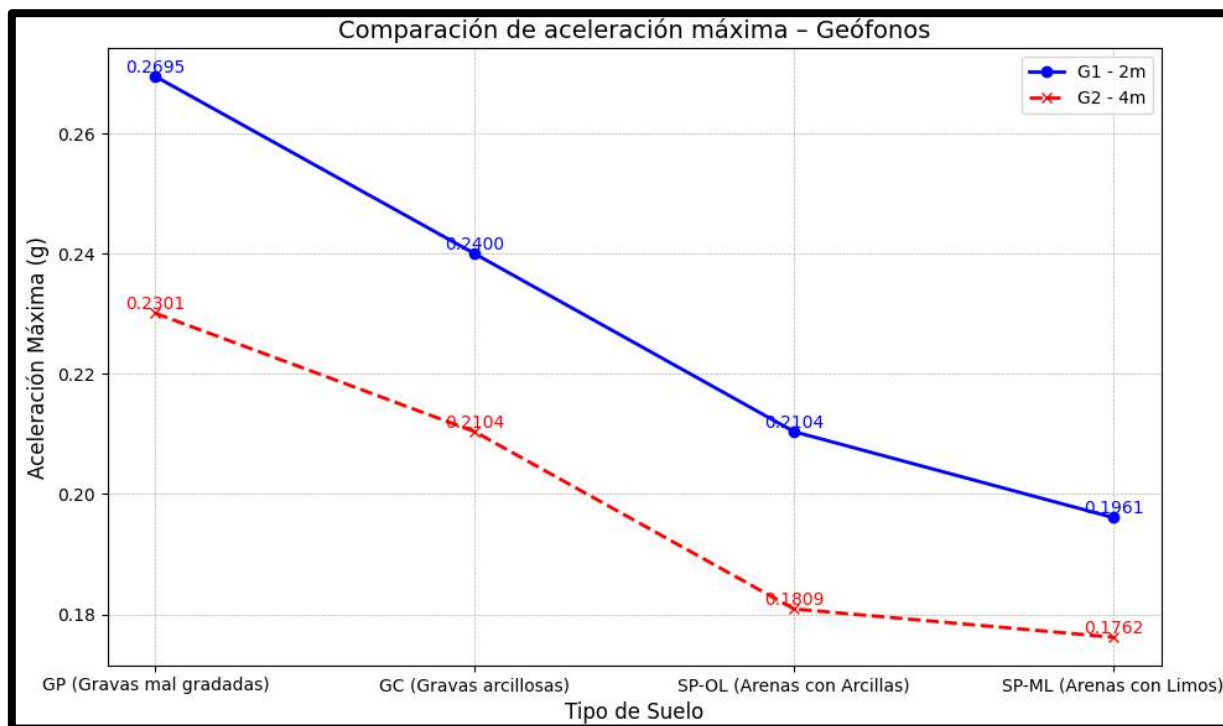
3. SP-OL (Arenas con arcillas):

- En las arenas con arcillas, el geófono G1 a 2 metros muestra una aceleración de 0.2104 g, mientras que G2 a 4 metros muestra una aceleración de 0.1809 g. Como se espera, la mayor distancia del geófono G2 produce una atenuación de la onda sísmica y una menor aceleración registrada.

4. SP-ML (Arenas con limos):

- En las arenas con limos, el geófono G1 a 2 metros muestra la menor aceleración máxima registrada de 0.1961 g, mientras que G2 a 4 metros muestra una aceleración de 0.1762 g. Este tipo de suelo, con limos finos y partículas más pequeñas, absorbe la energía de las ondas sísmicas de manera más eficiente, resultando en menores aceleraciones en comparación con los otros tipos de suelo.

Conclusión: La tabla ilustra cómo la distancia entre el geófono y la fuente sísmica afecta la medición de la aceleración máxima, así como cómo diferentes tipos de suelos influyen en la intensidad de las ondas sísmicas. En general, los suelos con partículas más finas como las arenas con limos y las arcillosas presentan una mayor atenuación de las ondas, resultando en aceleraciones más bajas en comparación con los suelos más gruesos y heterogéneos como las gravas.



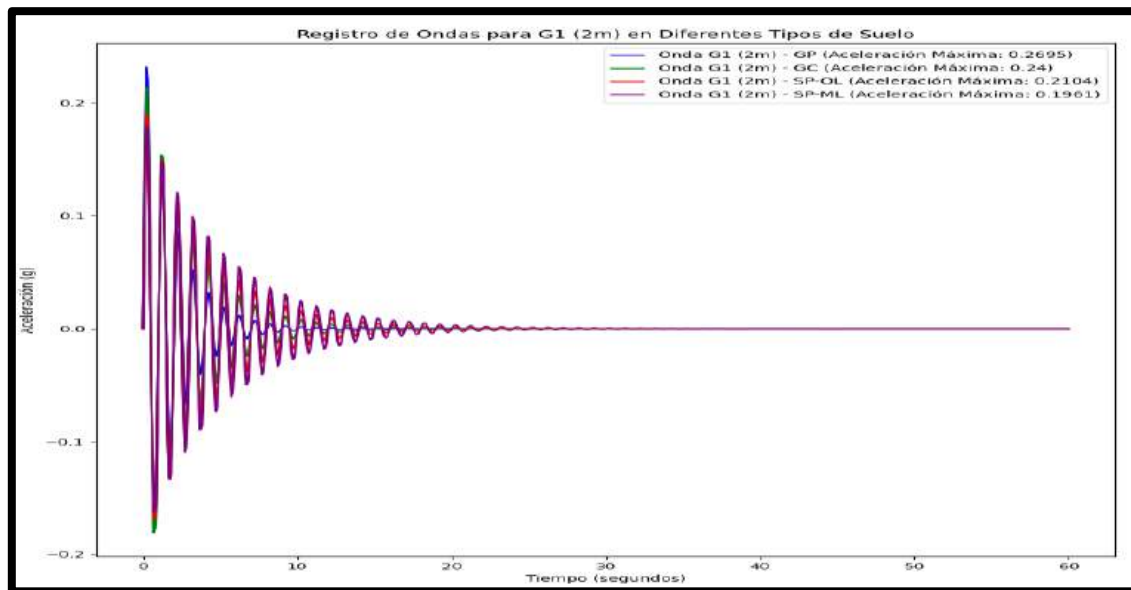
NOTA

El gráfico muestra la comparación de las aceleraciones máximas registradas por los geófonos G1 (2 metros) y G2 (4 metros) en cuatro tipos de suelo: GP (Gravas mal gradadas), GC (Gravas arcillosas), SP-OL (Arenas con arcillas) y SP-ML (Arenas con limos). Se observa que las aceleraciones disminuyen conforme aumenta la distancia entre el geófono y la fuente sísmica. G1, ubicado a 2 metros, registra siempre valores mayores que G2, que se encuentra a 4 metros. Además, los suelos más gruesos y heterogéneos, como las gravas mal gradadas, presentan aceleraciones más altas que los suelos más finos, como las arenas con limos, que muestran las aceleraciones más bajas.

Este gráfico ilustra cómo la distancia y la composición del suelo afectan la propagación y atenuación de las ondas sísmicas.

**Figura 51 — Comparación de aceleración máxima – Geófonos**

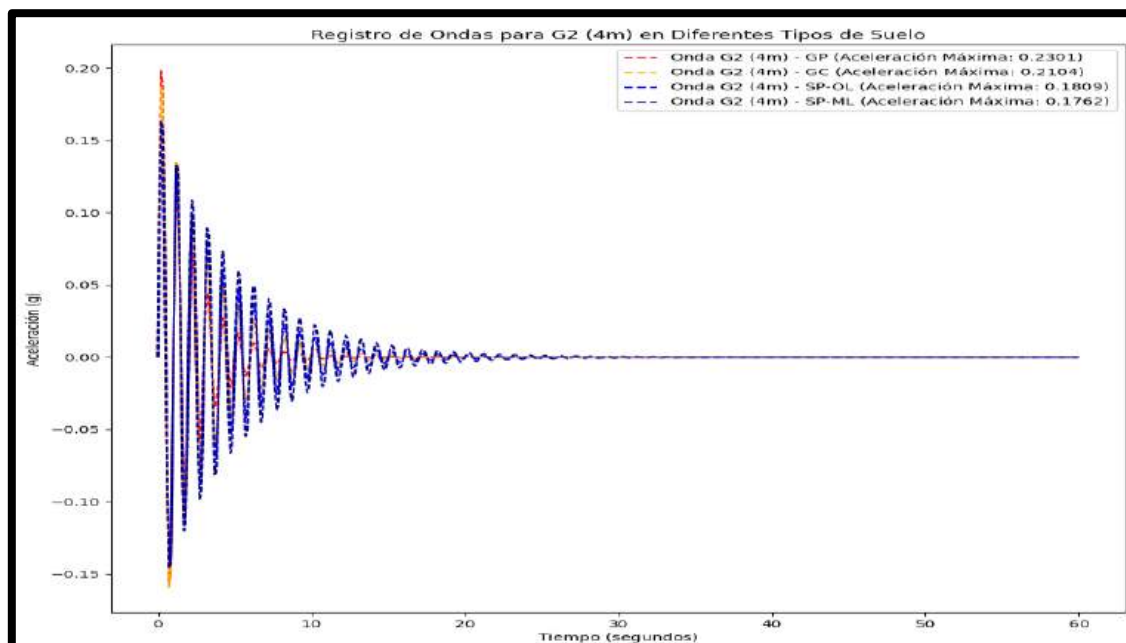




NOTA

Este gráfico muestra las ondas sísmicas registradas por el Geófono G1 (2m) para cuatro tipos de suelo: Gravas mal gradadas (GP), Gravas arcillosas (GC), Arenas con arcillas (SP-OL) y Arenas con limos (SP-ML). Cada tipo de suelo muestra una distinta aceleración máxima, con Gravas mal gradadas (GP) teniendo la mayor aceleración máxima (0.2695 g), lo que indica que este suelo tiene menor densidad y mayor capacidad de propagación de ondas sísmicas. Por otro lado, Arenas con limos (SP-ML) presenta la aceleración máxima más baja (0.1961 g), sugiriendo una mayor atenuación de las ondas sísmicas debido a la mayor cohesión del suelo.

**Figura 52 — Registro de aceleraciones máximas para G1 (2m)**



#### NOTA

Este gráfico muestra las ondas sísmicas registradas por el Geófono G2 (4m) para cuatro tipos de suelo: Gravas mal gradadas (GP), Gravas arcillosas (GC), Arenas con arcillas (SP-OL) y Arenas con limos (SP-ML). Se observa que la aceleración máxima de las ondas es más baja para el suelo SP-ML (Arenas con limos), con una aceleración de 0.1762 g, lo que indica una mayor capacidad de atenuación de las ondas sísmicas debido a la mayor cohesión de las partículas. Por el contrario, las Gravas mal gradadas (GP) muestran la mayor aceleración máxima (0.2301 g), lo que refleja su menor densidad y mayor capacidad de propagación de las ondas sísmicas.

**Figura 53 — Registro de aceleraciones máximas para G2 (4m)**

#### 5.1.2.3 Diferencia de aceleraciones

La diferencia de aceleraciones mide la variación de las aceleraciones máximas registradas por los acelerómetros y los geófonos sísmicos a diferentes distancias de la fuente sísmica, lo que permite comparar cómo cada tipo de sensor captura las ondas sísmicas.

Este indicador es crucial para evaluar la efectividad de los sensores en la medición de la intensidad de las ondas sísmicas relacionadas con deslizamientos de suelos, ya que permitirá determinar cuál sensor proporciona una mayor o menor sensibilidad en función de la distancia y el tipo de suelo. Además, la diferencia de aceleraciones ayudara comparar la

precisión y fiabilidad de los acelerómetros MPU 6050 versus los geófonos sísmicos.

Este indicador también es importante para analizar el comportamiento de las ondas sísmicas en función de los materiales del suelo, lo que se correlaciona con la atenuación de las ondas al pasar por diferentes tipos de suelos, lo cual es relevante para entender cómo los diferentes sensores responden en ambientes naturales como los de la zona Kolkaque.

**Tabla 22 —Resumen de las aceleraciones máximas – Acelerómetros y geófonos**

Tipo de suelo	2 m		4 m	
	Aceleración máxima A1 (g)	Aceleración máxima G1 (g)	Aceleración máxima A2 (g)	Aceleración máxima G2 (g)
GP (Gravas mal gradadas)	0,2795	0,2695	0,2593	0,2301
GC (Gravas arcillosas)	0,254	0,24	0,2286	0,2104
SP-OL (Arenas con Arcillas)	0,2262	0,2104	0,1849	0,1809
SP-ML (Arenas con Limos)	0,1897	0,1961	0,1774	0,1762

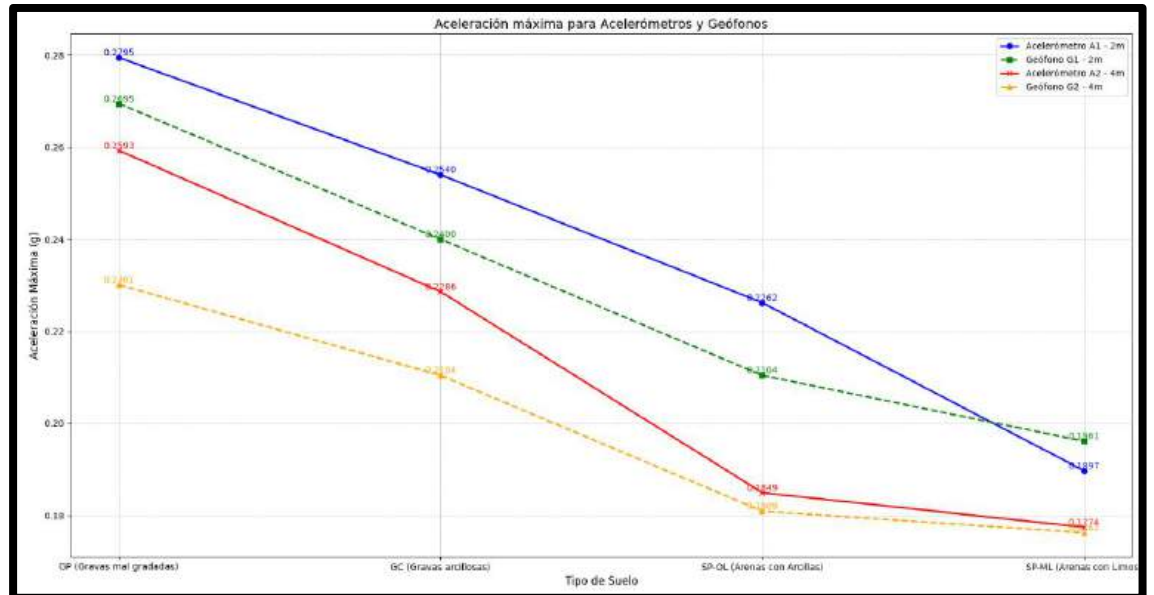
NOTA

La tabla muestra un resumen de las aceleraciones máximas registradas por los **Geófonos** (G1 y G2) y los **Acelerómetros** (A1 y A2) a 2 metros y 4 metros de distancia de la fuente sísmica. Se observa que la **aceleración máxima** tiende a disminuir a medida que se aleja el sensor de la fuente. Este patrón es consistente en los diferentes tipos de suelo, como se muestra en los valores de aceleración para **GP (Gravas mal gradadas)**, **GC (Gravas arcillosas)**, **SP-OL (Arenas con arcillas)**, y **SP-ML (Arenas con limos)**.

En todos los tipos de suelo, las mediciones para **Acelerómetros a 4 metros (A2)** presentan una aceleración máxima más baja que las mediciones obtenidas con los **Geófonos a 2 metros (G1)**. Por ejemplo, para **GP**, la aceleración máxima medida a 2 metros con el Geófono (0.2695 g) es mayor que la medida a 4 metros (0.2301 g)



con el Geófono, y también mayor que la medida con el Acelerómetro. Este comportamiento sugiere que las ondas sísmicas se atenúan conforme aumentan la distancia entre el sensor y la fuente sísmica, lo cual es esperado debido a la propagación de las ondas en el medio.

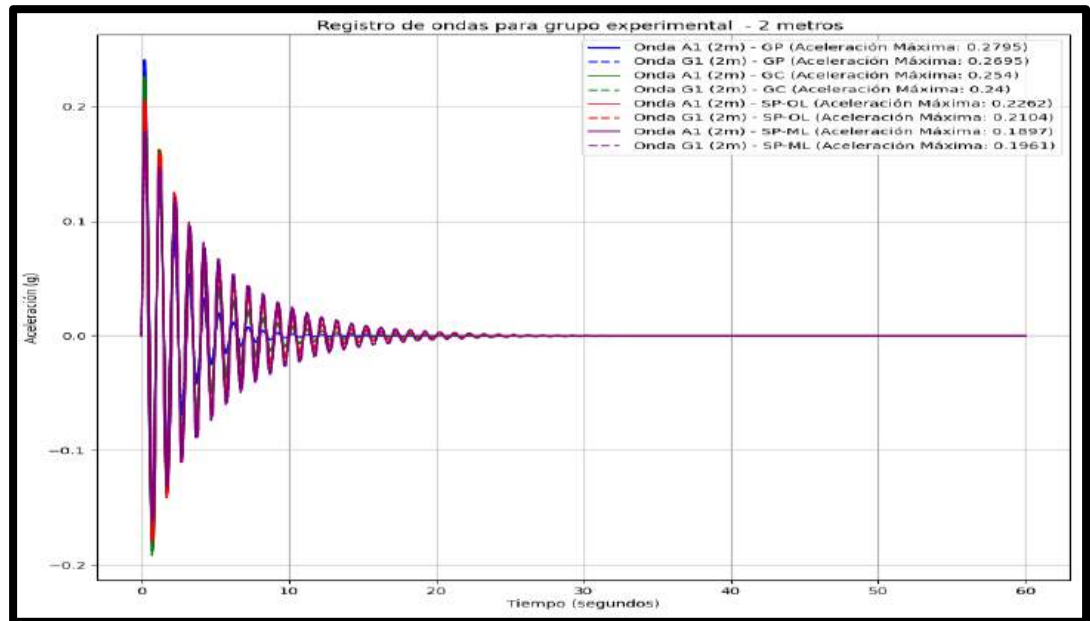


NOTA

En el gráfico se observa que las aceleraciones máximas registradas por los acelerómetros (A1 a 2m y A2 a 4m) son más altas en comparación con los geófonos (G1 a 2m y G2 a 4m), independientemente del tipo de suelo. Este comportamiento sugiere que los acelerómetros son más sensibles a las variaciones de aceleración a distintas profundidades. Además, las aceleraciones tienden a disminuir al aumentar la distancia de medición, tanto para los acelerómetros como para los geófonos, lo que refleja la atenuación de las ondas sísmicas con la distancia. En cuanto a los tipos de suelo, GP (Gravas mal gradadas) muestra las mayores aceleraciones, mientras que SP-ML (Arenas con limos) presenta las más bajas, lo que puede ser atribuido a la menor rigidez de las arenas con limos, lo que atenúa más las ondas sísmicas.

Figura 54 — Registro de aceleraciones máximas para G2 (4m)



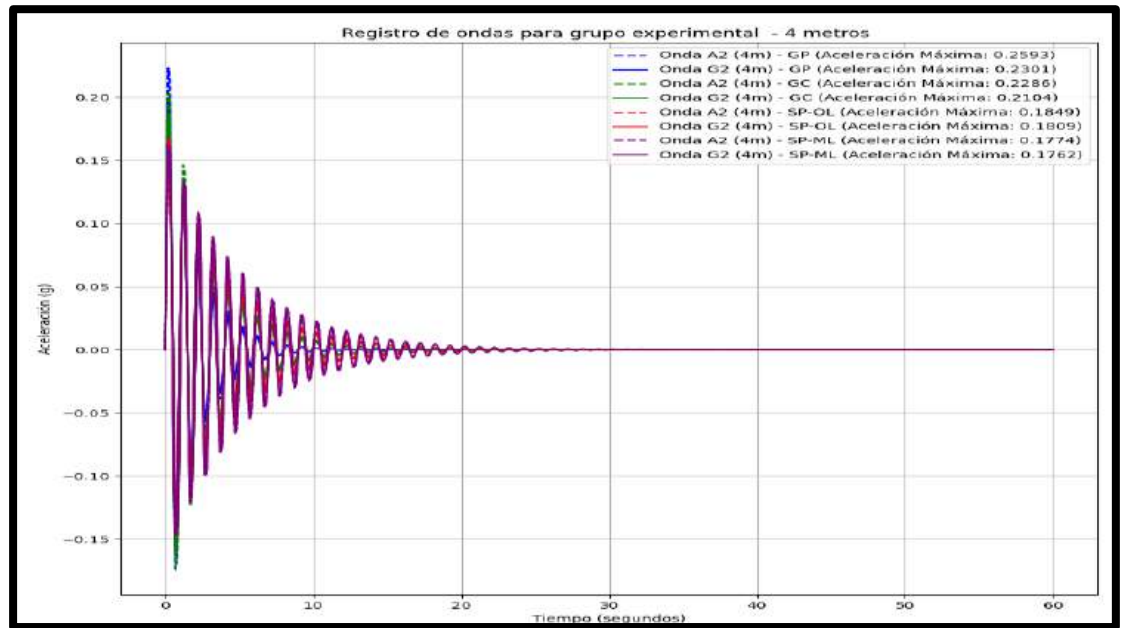


NOTA

El gráfico muestra el registro de ondas para el grupo experimental a una distancia de 2 metros, con diferentes tipos de suelo (GP, GC, SP-OL, SP-ML). Se observan variaciones en las ondas según el tipo de suelo, lo cual refleja la diferencia en las aceleraciones máximas alcanzadas. Esto permite comprender cómo la estructura del suelo afecta la propagación y la intensidad de las ondas sísmicas, proporcionando información relevante para la interpretación de los datos obtenidos en la investigación.

**Figura 55 — Registro de ondas para grupo experimental - 2 metros**





NOTA

El gráfico ilustra el registro de ondas para el grupo experimental a una distancia de 4 metros, mostrando la variación en las ondas de diferentes tipos de suelo (GP, GC, SP-OL, SP-ML). Se observa cómo la intensidad de las ondas varía dependiendo del tipo de suelo, lo que tiene implicaciones directas en la amplitud y la propagación de las ondas sísmicas. Estos resultados son fundamentales para comparar cómo la distancia y las características del suelo afectan el comportamiento de las ondas sísmicas captadas por los sensores, proporcionando datos clave para la evaluación y monitoreo sísmico en la investigación.

**Figura 56 — Registro de ondas para grupo experimental - 4 metros**

**Tabla 23 — Diferencia de aceleraciones - 2 metros**

Tipo de suelo	Aceleración A1 (2m)	Aceleración G1 (2m)	Diferencia (A1 - G1)
GP (Gravas mal gradadas)	0,2795	0,2695	0,0100
GC (Gravas arcillosas)	0,254	0,240	0,014
SP-OL (Arenas con Arcillas)	0,2262	0,2104	0,0158



SP-ML (Arenas con Limos)	0,1897	0,1961	-0,0064
<p>NOTA</p> <p>Esta tabla muestra la diferencia en las aceleraciones máximas medidas por el acelerómetro A1 y el geófono G1 a 2 metros de longitud, en diferentes tipos de suelo. En suelos GP, GC, y SP-OL, el acelerómetro A1 muestra mayores valores de aceleración en comparación con el geófono G1, mientras que en SP-ML, el geófono registra una aceleración más alta.</p>			

**Tabla 24 — Diferencia de aceleraciones - 4 metros**

Tipo de suelo	Aceleración A2 (4m)	Aceleración G2 (4m)	Diferencia (A2 - G2)
GP (Gravas mal gradadas)	0,2593	0,2301	0,0292
GC (Gravas arcillosas)	0,2286	0,2104	0,0182
SP-OL (Arenas con Arcillas)	0,1849	0,1809	0,0040
SP-ML (Arenas con Limos)	0,1774	0,1762	0,0012
<p>NOTA</p> <p>Esta tabla presenta la diferencia en las aceleraciones máximas registradas por el acelerómetro A2 y el geófono G2 a 4 metros de longitud, para distintos tipos de suelo. En suelos GP y GC, el acelerómetro A2 muestra una aceleración más alta en comparación con el geófono G2, mientras que en SP-OL y SP-ML, las diferencias en aceleración son pequeñas, siendo más notoria en suelos con mayor densidad, como las gravas mal gradadas.</p>			

**Tabla 25 — Error en la aceleración de geófonos y acelerómetros a 2m y 4m**

Tipo de suelo	Error (2m) (%)	Error (4m) (%)
---------------	----------------	----------------



<b>GP (Gravas mal gradadas)</b>	3,72%	12,69%
<b>GC (Gravas arcillosas)</b>	5,83%	8,64%
<b>SP-OL (Arenas con Arcillas)</b>	7,52%	2,22%
<b>SP-ML (Arenas con Limos)</b>	3,26%	0,68%

NOTA

La tabla muestra el porcentaje de error entre los datos obtenidos por los acelerómetros y los geófonos para diferentes tipos de suelo a dos distancias: 2 metros y 4 metros. Se observa que el error es generalmente más alto en suelos con una mayor variabilidad, como las gravas mal gradadas (GP), mientras que, en suelos con menos variabilidad, como las arenas con limos (SP-ML), el error es considerablemente más bajo. Esto sugiere que el tipo de suelo influye en la precisión de las mediciones de aceleración.

### 5.1.3 Análisis estadístico descriptivo

#### 5.1.3.1 Variable dependiente: deslizamiento de suelo

##### a) Porcentaje de humedad

##### 1º. Clasificación de variables

- La **humedad del suelo** es una variable **cuantitativa continua**. Esto significa que su valor se puede medir en una escala numérica continua y puede tomar cualquier valor dentro de un intervalo determinado.

##### 2º. Cálculo de medidas estadística

Tabla 26 — Estadística de la humedad del suelo

Descriptivos			
		Estadístico	Desv. Error
Contenido de humedad	Media		19,278
	95% de intervalo de confianza	Límite inferior	15,925
		Límite superior	22,629



<b>para la media</b>			
<b>Media recortada al 5%</b>		19,278	
<b>Mediana</b>		19,445	
<b>Varianza</b>		4,438	
<b>Desv. Estándar</b>		2.106	
<b>Mínimo</b>		16,840	
<b>Máximo</b>		21,380	
<b>Rango</b>		4,540	
<b>Rango Inter cuartil</b>		4,008	
<b>Asimetría</b>		-0,039	
<b>Curtosis</b>		-1,947	

NOTA

La tabla presenta las medidas estadísticas del contenido de humedad de las muestras, con una media de 19.278% y un error estándar de 1.0533%. El rango es de 4.540% y la mediana es 19.445%, indicando una distribución relativamente equilibrada. El intervalo de confianza del 95% varía entre 15.925% y 22.629%, lo que refuerza la precisión de los resultados. La asimetría y la curtosis muestran una ligera inclinación y menor concentración de valores extremos en comparación con una distribución normal.

## b) Tipo de suelo

### 1º. Clasificación de variables

- **Variables cualitativas:** No se pueden medir en términos numéricos y están relacionadas con categorías, como el tipo de suelo (gravas, arenas, arcillas).

Para darle un enfoque **cuantitativo** se va trabajar con el análisis granulométrico.

Vamos a trabajar con la granulometría para entender cómo cada tipo de suelo influye en los resultados experimentales.

2º. Cálculo de medidas estadística.

Tabla 27 — Estadística tipo de suelo

Descriptivos				
		Estadístico	Desv. Error	
Tipo de suelo	Media		52.90	8.837
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	24.776	
		Límite superior	81.028	
	Media recortada al 5%		51.864	
	Mediana		51.864	
	Varianza		234.322	
	Desv. Estándar		5.307	
	Mínimo		33.92	
	Máximo		73.96	
	Rango		40.039	
	Rango Intercuartil		22.167	
	Asimetría		0.145	
	Curtosis		-1.470	

NOTA

La tabla presenta las estadísticas descriptivas de las condiciones geotécnicas del suelo. La media es de 52.90, con un intervalo de confianza de 24.776 a 81.028. La media recortada al 5% es 51.864, y la mediana coincide con este valor. La desviación estándar es 5.307, indicando una dispersión moderada. El rango es de 40.039 (entre el mínimo de 33.92 y el máximo de 73.96), y el rango intercuartil es 22.167. La asimetría es baja (0.145), y la curtosis es negativa (-1.470), lo que sugiere una distribución simétrica con colas ligeras.

En resumen, los datos geotécnicos muestran una distribución razonablemente simétrica con variabilidad moderada.



c) Pendiente

1º. Clasificación de variables

Pendiente del terreno: Es una variable **cuantitativa** y **continua** que representa la inclinación o pendiente del terreno en grados o porcentaje. Este valor puede ser medido en diferentes puntos del terreno.

Tipo: **Cuantitativa, continua.**

2º. Cálculo de medidas estadística

Tabla 28 — Estadística pendiente del terreno

Descriptivos				
			Estadístico	Desv. Error
Pendiente del terreno	Media		7.024	2.011
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	0.622	
		Límite superior	13.427	
	Media recortada al 5%		7.025	
	Mediana		6.899	
	Varianza		12.141	
	Desv. Estándar		3.484	
	Mínimo		2.4	
	Máximo		11.9	
	Rango		9.5	
	Rango Intercuartil		4.325	
	Asimetría		0.0925	
	Curtosis		-1.256	

NOTA

La pendiente del terreno se ha analizado utilizando datos de muestras obtenidas en diferentes tipos de suelo. La media obtenida para la



pendiente es de 7.024, con un intervalo de confianza del 95% que varía entre 0.622 y 13.427. El rango de las pendientes observadas es 9.5, lo que refleja una variabilidad considerable entre las mediciones. La mediana es de 6.899, lo que indica que la mayoría de las pendientes están cercanas a este valor. La desviación estándar de 3.484 también muestra una dispersión moderada en los datos. Finalmente, los valores de asimetría y curtosis indican que la distribución de las pendientes tiene una ligera asimetría positiva y una curtosis negativa, lo que sugiere que la distribución es algo más plana que una distribución normal.

### 5.1.3.2 Variable independiente (sensores de detención de movimiento)

#### a) Acelerómetros MPU 6050

Tabla 29 — Estadística aceleración acelerómetros

Descriptivos				
		Estadístico	Desv. Error	
Aceleración acelerómetro MPU 6050	Media		0.212	0.0192
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	0.1513	
		Límite superior	0.273	
	Media recortada al 5%		0.212	
	Mediana		0.2127	
	Varianza		0.00111	
	Desv. Estándar		0.0333	
	Mínimo		0.1774	
	Máximo		0.2593	
	Rango		0.081	
	Rango Intercuartil		0.0532	
	Asimetría		0.2818	
	Curtosis		-1.591	



**NOTA**

El análisis estadístico de las aceleraciones registradas por los acelerómetros muestra que la media de las mediciones es 0.212, con un intervalo de confianza al 95% que va de 0.1513 a 0.273. El valor mínimo registrado fue 0.1774 y el máximo alcanzó 0.2593, resultando en un rango de 0.081. Además, el rango intercuartil es de 0.0532, lo que indica una dispersión moderada en los datos. La asimetría es 0.2818, sugiriendo que los datos tienen una ligera inclinación hacia la derecha, mientras que la curtosis de -1.591 indica que la distribución de los datos es más plana que una distribución normal.

**b) Geófonos sísmicos**

**Tabla 30 — Estadística aceleración geófonos**

<b>Descriptivos</b>				
		<b>Estadístico</b>	<b>Desv. Error</b>	
<b>Aceleración geófono vertical de 4.5 Hz</b>	<b>Media</b>		0.1994	0.01272
	<b>95% de intervalo de confianza para la media</b>	<b>Límite inferior</b>	0.158894	
		<b>Límite superior</b>	0.23990	
	<b>Media recortada al 5%</b>		0.1994	
	<b>Mediana</b>		0.19565	
	<b>Varianza</b>		0.000485994	
	<b>Desv. Estándar</b>		0.012727	
	<b>Mínimo</b>		0.1762	
	<b>Máximo</b>		0.2301	
	<b>Rango</b>		0.0539	
	<b>Rango Intercuartil</b>		0.035599	
	<b>Asimetría</b>		0.2670	
	<b>Curtosis</b>		-1.61365	
	<b>NOTA</b>			



El análisis estadístico de las aceleraciones medidas por los geófonos muestra que la media de las mediciones es 0.1994, con un intervalo de confianza del 95% que va desde 0.1589 hasta 0.2399. El valor mínimo registrado fue 0.1762 y el máximo fue 0.2301, lo que da un rango de 0.0539. El rango intercuartil es de 0.0356, lo que refleja una dispersión moderada en los datos. La asimetría de 0.2670 indica que los datos tienen una ligera inclinación a la derecha, mientras que la curtosis de -1.6136 sugiere que la distribución de los datos es relativamente plana comparada con una distribución normal.

c) **Diferencia de aceleraciones**

1º. **Clasificación de variables**

- **Error de medición:**

Tipo de variable: Cuantitativa continua. El error de medición es un valor porcentual que representa la magnitud de la diferencia entre las mediciones.

2º. **Cálculo de medidas estadística**

**Tabla 31 — Estadística diferencia de aceleraciones**

Descriptivos				
		Estadístico	Desv. Error	
Diferencia de aceleraciones	Media		6.0574	2.4277
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	-1.66867	
		Límite superior	13.783	
	Media recortada al 5%		3.84666	
	Mediana		5.430000	
	Varianza		23.5758	
	Desv. Estándar		4.85549	
	Mínimo		0.68	



<b>Máximo</b>	12.69	
<b>Rango</b>	12.01	
<b>Rango Intercuartil</b>	7.8175	
<b>Asimetría</b>	0.21177	
<b>Curtosis</b>	-1.63593	

NOTA

La diferencia de aceleraciones entre los acelerómetros MPU 6050 y los geófonos sísmicos muestra una media de 6.0574 y una desviación estándar de 4.85549, indicando una gran dispersión y variabilidad en las mediciones. El intervalo de confianza al 95% es amplio, con valores que van desde -1.66867 hasta 13.783, lo que sugiere una gran variabilidad en los datos. La mediana de 5.4300 y la media recortada al 5% de 3.84666 son cercanas, lo que indica que los datos no están extremadamente sesgados por valores atípicos. Además, la asimetría positiva (0.21177) y la curtosis negativa (-1.63593) reflejan una ligera inclinación hacia la izquierda y una distribución relativamente plana. El rango intercuartil de 7.8175 y el rango total de 12.01 también destacan la dispersión entre los valores de aceleración.

#### 5.1.4 Prueba de normalidad por cada variable

##### a) Variable dependiente (Deslizamiento de suelo)

Se establecieron cuatro pozos de exploración claves de medición identificados como C-01, C-02, C-03, y C-04. Estos puntos fueron ubicados en áreas con diferentes tipos de suelo y en distintas elevaciones, para garantizar una cobertura representativa de las condiciones geotécnicas locales.

##### Hipótesis

- **H0 (Hipótesis nula):** Los datos siguen una distribución normal.
- **Ha (Hipótesis alternativa):** Los datos no siguen una distribución normal.



**Decisión**

- Si el valor de Sig. (p-valor) < 0.05, se rechaza **H0** (los datos siguen una distribución normal) y se **acepta Ha** (los datos no siguen una distribución normal).
- Si el valor de Sig. (p-valor) ≥ 0.05, se **acepta H0** (los datos siguen una distribución normal) y se **rechaza Ha** (los datos no siguen una distribución normal).

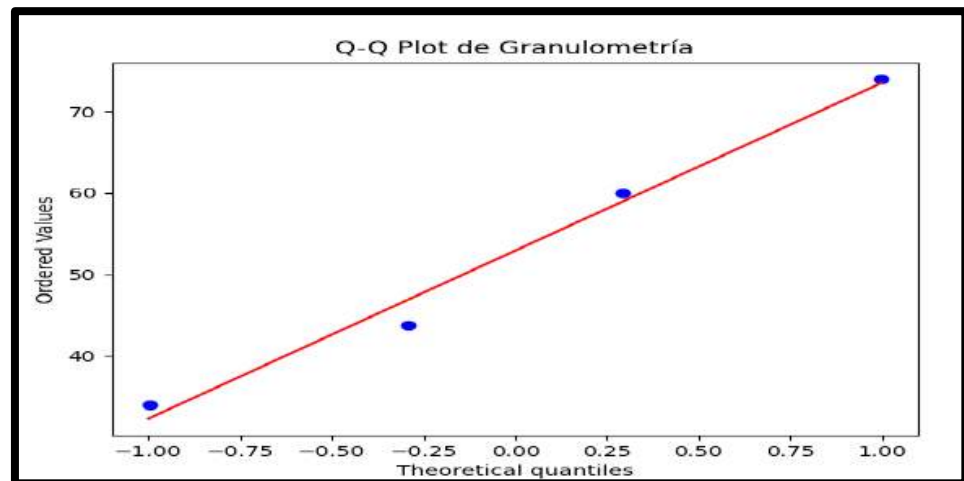
**Tabla 32 — Prueba de normalidad causas de deslizamiento**

Grupo experimental		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
A. Variable independiente (deslizamiento de suelo)	C-01, C-02, C-03, y C-04	0.973	4	0.866

NOTA

El valor p de 0.866 es significativamente mayor que el umbral comúnmente aceptado de 0.05, lo que no rechaza la hipótesis nula. Esto significa que las causas de deslizamiento de los pozos C-01, C-02, C-03 y C-04 siguen una distribución normal. La prueba indica que las mediciones de las causas de deslizamiento en los puntos de exploración no presentan una desviación significativa de la normalidad y que pueden ser analizadas utilizando métodos estadísticos que asumen normalidad en los datos. Este resultado es importante porque asegura que las variaciones en las causas de desplazamiento son consistentes con una distribución normal, lo que permite utilizar pruebas paramétricas.





NOTA

El Q-Q plot (gráfico de cuantiles vs cuantiles) muestra los valores ordenados de factores geotécnicos en el eje vertical contra los cuantiles teóricos de una distribución normal en el eje horizontal. Al observar que los puntos se alinean de manera casi perfecta con la línea roja, se puede concluir que los datos de granulometría siguen una **distribución normal**, lo que permite utilizar métodos estadísticos paramétricos en su análisis.

**Figura 57 — Q-Q Plot de causas de deslizamiento**

**b) Variable independiente (Acelerómetro MPU 6050 versus el Geófono vertical de 4.5 Hz)**

Los sensores fueron distribuidos en puntos estratégicos dentro del área de investigación, como se detalla en las tablas correspondientes a los sensores C-01, C-02, C-03 y C-04, así como en los puntos de medición de los grupos experimentales que incluyen tanto acelerómetros MPU 6050 como geófonos. Las ubicaciones fueron elegidas de manera meticulosa para reflejar las diferentes causas de deslizamiento presentes en la zona, tomando en cuenta la variabilidad del tipo de suelo y las características del terreno.

**Hipótesis**

- **H<sub>0</sub> (Hipótesis nula):** Los datos siguen una distribución normal.
- **H<sub>a</sub> (Hipótesis alternativa):** Los datos no siguen una distribución normal.



**Decisión**

- Si el valor de Sig. (p-valor) < 0.05, se rechaza H0 (los datos no siguen una distribución normal) y se acepta Ha (los datos no siguen una distribución normal).
- Si el valor de Sig. (p-valor) ≥ 0.05, se acepta H0 (los datos siguen una distribución normal) y se rechaza Ha (los datos no siguen una distribución normal).

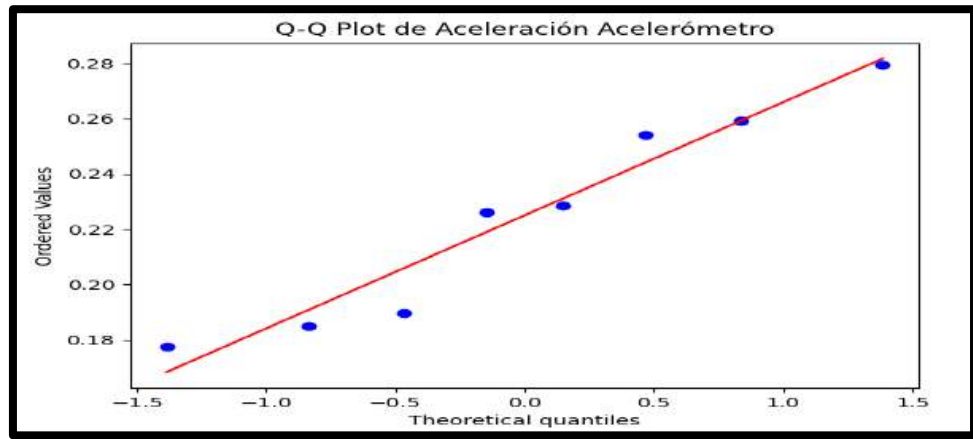
**Tabla 33 — Prueba de normalidad acelerómetro**

Grupo experimental		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
<b>Aceleración del acelerómetro</b>	A1, A2, A3, y A4	0.9239	4	0.46239

NOTA

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los datos de Aceleración Acelerómetro (A1, A2, A3, y A4) muestra un estadístico de 0.9239 y un valor p de 0.46239. Dado que el valor p es mayor que 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula, lo que indica que los datos de aceleración del acelerómetro siguen una **distribución normal**. Esto permite utilizar pruebas estadísticas que asumen normalidad en el análisis de los datos.





NOTA

El Q-Q plot de la aceleración del acelerómetro muestra que los puntos se ajustan muy bien a la línea roja, indicando que los datos de aceleración siguen una **distribución normal**. Esto se confirma visualmente, lo que sugiere que se pueden utilizar técnicas estadísticas paramétricas para su análisis.

**Figura 58 — Q-Q Plot de aceleración – acelerómetro**

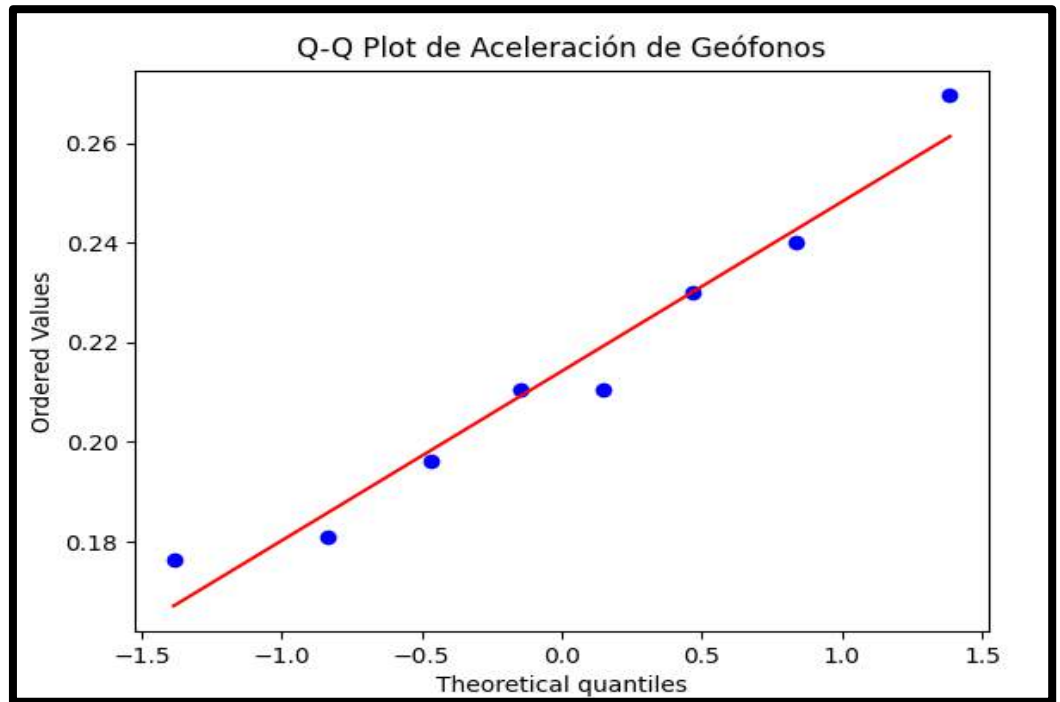
**Tabla 34 — Prueba de normalidad geófono vertical de 4.5 Hz**

Grupo experimental		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
<b>Aceleración Geófono</b>	G1, G2, G3, G4	0.95515	4	0.76288

NOTA

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los datos de Aceleración Geófono (G1, G2, G3, G4) muestra un estadístico de 0.95515 y un valor p de 0.76288. Dado que el valor p es mayor que 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula, lo que indica que los datos de aceleración del geófono siguen una **distribución normal**. Esto permite aplicar métodos estadísticos que asumen la normalidad en el análisis de los datos.





NOTA

El Q-Q plot de la aceleración de geófonos muestra que los puntos se alinean estrechamente con la línea roja, lo que indica que los datos de aceleración también siguen una distribución normal. Esto refuerza la conclusión de que los datos de geófonos pueden analizarse utilizando métodos estadísticos paramétricos.

Figura 59 — Q-Q Plot de aceleración – Geófono

## 5.2 Análisis de resultados general

Al evaluar la efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geofono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamientos de suelo en Kolkaque, Abancay, Apurímac (2024), se analizaron las variables dependientes (deslizamiento de suelo) y la variable independiente (tipo de sensor).

Se realizaron cuatro calicatas (C-01, C-02, C-03 y C-04), todas con una profundidad de 1.50 m. No se alcanzó nivel freático en ninguna, mientras que el contenido de humedad varió entre 16.84 % (C-01) y 21.38 % (C-03 y C-04), lo que influye en la estabilidad del terreno. Dando resultados de las aceleraciones máximas de los acelerómetros MPU en la calicata C-01 (0,2795) , C-02 (0,254), C-03( 0,2262) y C-04 (0,1897) Por otra parte los resultados de las de los Geofono vertical de 4.5 Hz en la calicata C-01 (0,2695) , C-02 (0,2400), C-03( 0,2104) y C-04 (0,1961) se tiene:



### **La clasificación de suelos mostró:**

- C-01: GP (Gravas mal gradadas)
- C-02: GC (Gravas arcillosas)
- C-03: SP-OL (Arenas con arcilla y limo)
- C-04: SP-ML (Arenas con limo)

### **Respecto a la pendiente:**

- G1–A1: 2.4 % (1.37°) → Moderada.
- G2–A2: 5.6 % (3.21°) → Más pronunciada.
- G3–A3: 11.9 % (6.79°) → Considerable, con alto riesgo de deslizamientos.
- G4–A4: 8.2 % (4.69°) → Intermedia, con riesgo moderado.

Los resultados muestran una efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geofono vertical de 4.5 Hz, en tres de las cuatro calicatas (C-01, C-02 y C-03). Discriminación por tipo de suelo (sensibilidad material): el patrón se mantiene en ambas distancias:

$$GP > GC > SP-OL > SP-ML.$$

Esto muestra que el MPU-6050 detecta y ordena coherentemente la respuesta dinámica según la granulometría/cohesión del terreno (más alta en gravas, más baja en arenas con finos) Asimismo, la disminución de la aceleración con la distancia confirma que la energía sísmica se atenúa progresivamente, siendo más crítica la zona cercana a la fuente. En conjunto, los resultados muestran a través de las diferencias de aceleración entre métodos, grupos, sensores, la opción más efectiva es la más grande entonces tendremos el 0.029g siendo 2,92% más efectivo respecto a las diferentes medidas, porque a mayor diferencia, mayor separabilidad y, en general, mejor sensibilidad, especificidad al detectar cambios, ocurrido en el tipo de suelo granulares (GP) son más vulnerables a deslizamientos inducidos por aceleraciones sísmicas.

### **5.3 Análisis de resultados específicos**

- Los acelerómetros registraron las mayores aceleraciones máximas en suelos de tipo GP (0.2795 g a 2 m y 0.2593 g a 4 m), mientras que los suelos GC, SP-OL y SP-ML presentaron valores progresivamente menores. Estos resultados evidencian que los suelos granulares gruesos (GP) transmiten con mayor intensidad las ondas sísmicas, en contraste con los suelos con mayor presencia de finos (GC, SP-OL y SP-ML), donde se observa una mayor atenuación de la aceleración.

- El acelerómetro MPU-6050 registró aceleraciones máximas en distintos tipos de suelo, alcanzando valores de hasta 0.2795 en suelos GP.
- La prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) confirmó que los datos presentan distribución normal ( $p > 0.05$ ).

En consecuencia, se determinó que las mediciones del acelerómetro más representativo o efectivo es 25.93% indicando una mayor sensibilidad de las demás mediciones, en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de estudio.

- Los geófonos registraron mayores aceleraciones a menor distancia de la fuente, siendo G1 (2 m) superior a G2 (4 m) en todos los tipos de suelo. Asimismo, las gravas mal gradadas (GP) mostraron las aceleraciones más altas, mientras que las arenas con limos (SP-ML) registraron las más bajas. Estos resultados confirman que tanto la distancia como la composición granulométrica del suelo influyen directamente en la atenuación de las ondas sísmicas.
- Los geófonos sísmicos registraron aceleraciones máximas en los mismos escenarios, con valores de hasta 0.2695 g en suelos GP.

En consecuencia, se determinó que el geófono vertical de 4.5 Hz es efectivo registrando aceleraciones máximas en los mismos escenarios, con valores de hasta 26.95% (GP), a comparación de las otras mediciones. En otras palabras: mayor relación señal/ruido → detección más fiable. consistencia en los diferentes puntos de medición y validaron su efectividad como sensor de referencia.

## 5.4 Contrastación de hipótesis

### 5.4.1 Contrastación de hipótesis general

- **Hipótesis nula ( $H_0$ )**
- **Hipótesis alternativa ( $H_1$ )**
  - **$H_0$ :** No existe una diferencia significativa en la efectividad del acelerómetro MPU 6050 frente al geófono vertical de 4.5 Hz para la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.

- **H<sub>1</sub>:** Existe una diferencia significativa en la efectividad del acelerómetro MPU 6050 frente al geófono vertical de 4.5 Hz para la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.

**Tabla 35 — Análisis de la varianza en la capacidad de detección de deslizamientos**

ANOVA						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	P - va.
1	Entre Grupos	0.000462	1	0.000462	0.3805	0.547237
	Dentro de los Grupos	0.017008	14	0.001215		
	Total	0.017470	15			

**NOTA**

1. Suma de Cuadrados:

- Entre Grupos (0.000462): Representa la variabilidad entre los diferentes tipos de sensores (acelerómetros y geófonos). Esta cantidad refleja cómo los distintos grupos de datos (sensores) difieren entre sí.
- Dentro de los Grupos (0.017008): Mide la variabilidad dentro de cada grupo (es decir, cómo varían los datos dentro de un mismo grupo de medición).
- Total (0.017470): Es la variabilidad total en todos los datos, sumando la variabilidad entre y dentro de los grupos.

2. Grados de Libertad (gl):

- Entre Grupos (1): Hay un solo grado de libertad entre los grupos porque estamos comparando dos grupos de datos (acelerómetros vs geófonos).
- Dentro de los Grupos (14): Hay 14 grados de libertad dentro de los grupos, que corresponden a las observaciones individuales menos el número de grupos.

3. Media Cuadrática:



- Entre Grupos (0.000462): Es la suma de cuadrados entre grupos dividida entre sus grados de libertad. Esta es la estimación de la variabilidad debida a las diferencias entre los grupos.
- Dentro de los Grupos (0.001215): Es la suma de cuadrados dentro de los grupos dividida entre los grados de libertad dentro de los grupos. Esta estimación refleja la variabilidad interna dentro de cada grupo.

4. Valor F (0.3805):

El valor de F se calcula como la razón entre la media cuadrática entre grupos y la media cuadrática dentro de los grupos. Un valor F bajo indica que la variabilidad entre los grupos es pequeña en comparación con la variabilidad interna dentro de los grupos. En este caso,  $F = 0.3805$  sugiere que la diferencia entre los grupos no es significativa, ya que el valor es bajo.

5. P- valor (0.547237):

El p-valor es la probabilidad de obtener un resultado tan extremo como el observado, bajo la hipótesis nula (es decir, que no hay diferencias entre los grupos). Un P-valor mayor a 0.05 (en este caso, 0.547237) indica que no se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), lo que se puede afirmar es que no existen diferencias significativas entre los dos tipos de sensores medidos.

Con base en el análisis, se concluye que **no existe diferencia significativa en la efectividad entre el acelerómetro MPU 6050 y los geófonos sísmicos para la detección de deslizamientos de suelos en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024**. Se entiende que los dos sensores tienen una efectividad equivalente en la detección de deslizamiento de suelo.

## 5.4.2 Contrastación de hipótesis específica

### 5.4.2.1 Hipótesis específica 1

- **$H_0$ :** El acelerómetro MPU 6050 no presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.
- **$H_1$ :** El acelerómetro MPU 6050 presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.

**Tabla 36 — Correlación acelerómetro MPU 6050 y deslizamiento de suelo**

		<b>Deslizamiento de suelo</b>	<b>Aceleración - Acelerómetro</b>
Deslizamiento de suelo	Correlación de Pearson	0.874385	0.814385
	Sig. (bilateral)	0.004500	0.0
	N	8	8
Aceleración - Acelerómetro	Correlación de Pearson	0.814385	0.874385
	Sig. (bilateral)	0.0	0.004500
	N	8	8

**a) Correlación Pearson:**

- La **correlación de Pearson** entre el deslizamiento de suelo (específicamente la granulometría) y las mediciones de **aceleración del acelerómetro MPU 6050** es **0.874385**. Este valor indica una **correlación positiva fuerte**. En términos prácticos, a medida que cambian las condiciones geotécnicas (por ejemplo, el contenido de material fino en el suelo), las mediciones de aceleración realizadas por el acelerómetro también tienden a cambiar en una forma predecible y coherente.

**b) Valor p:**

- El **valor p de 0.004500** es significativamente **menor que 0.05**, lo que indica que la relación entre las **causas de deslizamiento** y las **mediciones de aceleración del acelerómetro** es **estadísticamente significativa**. Este resultado sugiere que las condiciones del suelo tienen un **impacto directo** sobre las mediciones obtenidas por los **acelerómetros MPU 6050**.

**Conclusión:**

existe una fuerte correlación positiva (**0.874385**) entre las mediciones del MPU-6050 y la detección de deslizamientos es



positiva y significativa ( $\rho > 0$ ). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ). Esto significa que el acelerómetro MPU 6050 presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac (2024). Asimismo, los resultados evidencian que las condiciones del suelo influyen de manera directa en las mediciones del sensor, lo cual respalda su utilidad como herramienta confiable para el monitoreo y la caracterización de eventos de remoción en masa.

#### 5.4.2.2 Hipótesis específica 2

- a)  $H_0$ : El geófono vertical de 4.5 Hz no presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.
- b)  $H_1$ : El geófono vertical de 4.5 Hz presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.

**Tabla 37 — Correlación geófonos sísmicos y deslizamiento de suelo**

		Deslizamiento de suelo	Aceleración - Geófonos
Deslizamiento de suelo	Correlación de Pearson	0.84082	0.794385
	Sig. (bilateral)	0.0089163	0.0
	N	8	8
Aceleración – Geófonos	Correlación de Pearson	0.794385	0.84082
	Sig. (bilateral)	0.0	0.0089163
	N	8	8

#### 1. Correlación Pearson:

- **Correlación de Pearson entre deslizamiento de suelo y Aceleración Geófonos:**



El valor de **correlación** es **0.794385**, lo que indica una **correlación positiva moderada**. Esto significa que existe una relación directa entre las **causas de deslizamiento** (tipos de suelo) y las **aceleraciones medidas por los geófonos**. Es decir, a medida que las condiciones del terreno cambian, las mediciones de aceleración también tienden a cambiar de manera consistente.

- **Valor p (0.0089163):**

El **valor p** es menor que **0.05**, lo que indica que **la correlación es estadísticamente significativa**. Esto nos permite rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ), lo que significa que **sí existe una relación significativa** entre el **deslizamiento de suelo** y la **aceleración medida por los geófono verticales de 4.5 Hz**

- **Correlación inversa entre Aceleración – Geófonos y deslizamiento de suelo**

El valor de **correlación de 0.794385** muestra una fuerte relación positiva entre **deslizamiento de suelo** y **Aceleración medida por los geófonos**. Esto sugiere que las características del suelo (por ejemplo, el tipo de suelo) afectan directamente las mediciones de aceleración que se registran con los geófonos.

### **Conclusión:**

Dado que el valor p es menor que 0.05 y la correlación es significativa, **se concluye La correlación entre las mediciones del geófono vertical de 4.5 Hz y la detección de deslizamientos es positiva y significativa ( $\rho > 0$ ).** se **rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ )** y se confirma que existe una correlación positiva y significativa ( $\rho = 0.794385$ ) entre las causas de deslizamiento y la aceleración registrada por los geófonos. Esto significa que las características del suelo influyen directamente en las mediciones, validando la efectividad de los geófonos sísmicos como herramienta confiable para la detección y monitoreo de deslizamientos en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac (2024).

## 5.5 Discusión

- En este estudio, se evaluó la efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz para detectar deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac. Los resultados mostraron que no existen diferencias significativas entre los dos dispositivos ( $p = 0.547237$ ), lo que sugiere que ambos sensores tienen un rendimiento similar para la tarea de detección de movimientos sísmicos. Este hallazgo coincide con el de (JABRANE 2023), quien, al analizar el uso de diferentes herramientas geofísicas para detectar inestabilidades, encontró que ciertas tecnologías, como los geófonos, proporcionaban resultados similares en términos de precisión.
- A pesar de sus diferencias técnicas, el acelerómetro MPU 6050 versus geófonos vertical de 4.5 Hz mostraron una capacidad comparable en la medición de movimientos sísmicos. Esto refuerza la idea de que ambos dispositivos pueden ser utilizados de manera intercambiable en investigaciones geotécnicas de esta naturaleza, tal como lo evidencian los estudios previos de (PÉREZ, 2021), quien también observó que el uso de sensores sísmicos proporciona información coherente y útil en la identificación de deslizamientos. Los resultados indicaron una correlación fuerte y positiva (Pearson = 0.8744;  $p = 0.0045$ ) entre las mediciones del acelerómetro MPU-6050 y la detección de deslizamientos de suelos en la zona de Kolkaque.

Esto confirma que las variaciones en la composición del suelo influyen de manera significativa en la respuesta del sensor. Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por (CARGUA et al. 2024), quienes evidenciaron que parámetros como el contenido de finos y la litología son determinantes en el comportamiento de sensores en estudios de susceptibilidad a deslizamientos. Asimismo, la significancia estadística obtenida respalda la aplicabilidad del acelerómetro MPU-6050 como herramienta confiable para el monitoreo de inestabilidades en laderas, tal como lo sugieren estudios técnicos en geotecnia y geofísica.

- En el caso de los geófonos sísmicos, se obtuvo una correlación positiva alta (Pearson = 0.7944;  $p = 0.0089$ ) entre las mediciones de los geófonos sísmicos y la detección de deslizamientos. Estos resultados se alinean con los reportes de

(CARGUA et al. 2024; TICONA 2019) quienes señalan que los geófonos son sensibles a factores como la densidad, la humedad y el tipo de suelo. La significancia estadística confirma que estos dispositivos son igualmente útiles para la detección de movimientos, lo que refuerza su uso en sistemas de monitoreo y alerta temprana.



## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

- Al evaluar la efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024. Los hallazgos obtenidos permiten afirmar que tanto los acelerómetros MPU-6050 como los geófonos sísmicos son herramientas eficaces para la detección de deslizamientos en la zona de Kolkaque. Según los resultados en la tabla 35 se observa la fuerte correlación con los eventos simulados y la elevada coherencia entre sus mediciones sugieren que su implementación conjunta puede optimizar la capacidad de detección y reducir falsos positivos. Además, la facilidad de integración de ambos sensores en sistemas de adquisición de datos en tiempo real abre la posibilidad de desarrollar soluciones tecnológicas de bajo costo y alta confiabilidad para el monitoreo geotécnico, lo cual es especialmente relevante en zonas rurales o con recursos limitados. concluyendo que ambos dispositivos ofrecen un rendimiento similar en cuanto a su capacidad para detectar el movimiento de suelo en el área de estudio.
- Al determinar la efectividad entre la medición del acelerómetro MPU-6050 en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024. Según la tabla 36. El análisis estadístico demostró que las mediciones registradas por el acelerómetro MPU-6050 presentaron una correlación fuerte y significativa con la ocurrencia de deslizamientos simulados en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac ( $\rho = 0.8744$ ;  $p < 0.05$ ). Esto significa que este tipo de sensor es capaz de detectar de manera confiable las vibraciones y aceleraciones generadas por el movimiento del suelo, incluso en condiciones simuladas que replican un evento real. La magnitud de la correlación sugiere que la respuesta del acelerómetro está estrechamente vinculada con la dinámica de los deslizamientos, lo que permite no solo la detección, sino también la caracterización de la intensidad del evento. Este hallazgo es relevante, lo que indica que el acelerómetro MPU 6050 presenta una

efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.

- Al determinar la efectividad entre la medición del geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024. Según los resultados de tabla 37, que los geófonos sísmicos también presentan una correlación positiva y significativa con los deslizamientos simulados ( $\rho = 0.7944$ ;  $p < 0.05$ ), lo que confirma su capacidad para registrar señales vibratorias del terreno asociadas al inicio y propagación de un evento de remoción en masa. Si bien la correlación fue ligeramente menor que la del acelerómetro MPU-6050, los geófonos mantienen la ventaja de ser dispositivos específicamente diseñados para captar vibraciones del suelo con alta sensibilidad. Esto los convierte en una herramienta fiable para aplicaciones de monitoreo geotécnico, especialmente en contextos donde la respuesta a bajas frecuencias es un factor clave para la detección temprana. Lo que indica que el geófono vertical de 4.5 Hz presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.

## 6.2 Recomendaciones

- A pesar de los resultados obtenidos, aún falta por estudiar la validación de la implementación conjunta del acelerómetro MPU-6050 y el geófono vertical de 4.5 Hz en otros escenarios reales, ya que hasta el momento gran parte de las pruebas se han realizado en condiciones controladas. Es importante porque en otras situaciones reales los factores ambientales, como la humedad, la saturación del terreno, el tipo de suelo, la pendiente y el ruido superficial, pueden alterar el desempeño de los sensores y generar variaciones en la confiabilidad de los registros. Por ello, deben estudiar estos aspectos equipos multidisciplinarios conformados por geotecnias, sismólogos, ingenieros electrónicos, especialistas en inteligencia artificial y entidades de defensa civil, quienes cuentan con la experiencia necesaria para integrar adecuadamente sensores, algoritmos y protocolos de seguridad. El propósito de estas investigaciones debe ser mejorar la detección temprana de deslizamientos de suelo y garantizar sistemas de alerta confiables y de bajo costo, que permitan proteger a las comunidades vulnerables

mediante la reducción de falsos positivos, la optimización de los puntos de instalación y el diseño de protocolos de respuesta inmediata.

- Aunque los resultados obtenidos con el acelerómetro MPU-6050 demostraron una correlación fuerte y significativa con la ocurrencia de deslizamientos simulados aún falta estudiar su desempeño en eventos reales, ya que los ensayos realizados se llevaron a cabo en condiciones controladas que no reproducen toda la complejidad del terreno y la influencia de factores externos como la pendiente, el tipo de suelo o la estacionalidad de lluvias. Esto es necesario porque la efectividad del sensor podría variar en escenarios con alta humedad, saturación del terreno o presencia de interferencias ambientales, lo que exige confirmar su confiabilidad antes de implementarlo en sistemas de alerta temprana. La investigación debe ser estudiada por especialistas en geotecnia y sismología, ingenieros electrónicos e informáticos, así como instituciones de defensa civil y universidades, quienes tienen la capacidad de validar tanto la respuesta del sensor como la integración tecnológica requerida. Para fortalecer la prevención de desastres en comunidades vulnerables, desarrollando sistemas accesibles y confiables que permitan detectar de manera temprana los deslizamientos de suelo y activar protocolos de seguridad que reduzcan el riesgo humano y material.
- Si bien los resultados muestran que el geófono vertical de 4.5 Hz presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo, aún falta por estudiar su desempeño en escenarios reales de remoción en masa y bajo diferentes condiciones geotécnicas y climáticas, ya que las pruebas se realizaron en simulaciones controladas. Es necesario avanzar en este aspecto porque en el terreno intervienen factores como la saturación por lluvias, la heterogeneidad de los suelos y la presencia de ruidos ambientales, que pueden influir en la calidad y confiabilidad de las mediciones. Por ello, deben estudiar estos aspectos especialistas en geotecnia, sismología, ingeniería electrónica y protección civil, quienes pueden integrar el uso de geófonos en sistemas de alerta temprana robustos y adaptados al contexto local. El propósito de estas investigaciones debe ser optimizar la detección temprana de deslizamientos, mejorar los modelos predictivos y establecer protocolos de seguridad más eficaces.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAYO, J.T., 2021. *Análisis de imágenes satelitales para la identificación y determinación de variación espacial de deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba, Piura, para el periodo 2017 – 2019*. S.l.: s.n.
- ALZATE, L.C., 2016. CARACTERIZACION ACELEROMETROS. . S.l.:
- AMERATUNGA, J., SIVAKUGAN, N. y DAS, B.M., 2016. Developments in Geotechnical Engineering Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering. [en línea], [consulta: 11 agosto 2025]. Disponible en: <http://www.springer.com/series/13410>.
- ANDINA, 2009. Desastre en Pataz. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2025]. Disponible en: <https://andina.pe/agencia/noticia-desastre-pataz-recomendaciones-brindo-ingemmet-para-zona-alto-riesgo-884907.aspx>.
- ANGELES, F., 2019. Sensor. *Publicación semestral No* [en línea]. 2019. pp. 21-22. Disponible en: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa3/issue/archive>.
- ARIAS, F.G., 2012. El proyecto de investigación 6a Edición. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/301894369>.
- ARIAS, D. y CANGALAYA, L., 2023. Manual del tesista. Principios para desarrollar una tesis. 1. Lima: s.n. vol. 1.
- ALBERT, J. y RIZZO, M., 2012. *R by Example*. New York: Springer. Disponible en: <http://doi.org/10.1007/978-1-4614-1365-3>.
- ASOCIACIÓN DE MEDICINA INTERNA DE GUATEMALA, 2017. Revista. Vol. 3, agosto-octubre 2017.
- BARRIENTOS, R., 2022. *ESTUDIO DE SISMICIDAD INDUCIDA PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE INESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO DEL SECTOR AYALA INFERIOR MINA SAN VICENTE 2022*. S.l.: s.n.
- BERRY, P.L. y REID, D., 2003. *Mecánica de suelos*. S.l.: s.n.
- BUÑAY, A.L., 2023. *Propuesta teórica de un Sistema de Alerta Temprana ante deslizamientos en la ciudad de Riobamba*. S.l.: s.n.
- BARTON, B. y PEAT, J., 2014. *Medical Statistics: A Guide to SPSS, data analysis and critical appraisal*. 2nd ed. United Kingdom: BMJ Books.
- CAPOBIANCO, V., CHOI, C.E., CROSTA, G., HUTCHINSON, · D Jean, JABOYEDOFF, M., LACASSE, S., NADIM, F. y REEVES, H., 2024. Landslides



Effective landslide risk management in era of climate change, demographic change, and evolving societal priorities. *Landslides*, DOI 10.1007/s10346-024-02418-2.

CARGUA, C.J., ESPIN, R., VALENCIA, B.G., SIMBAÑA, M., ARAUJO, S., CORNEJO, C. y OCAMPOS, A., 2024. Análisis de susceptibilidad a deslizamientos empleando el proceso de jerarquía analítica en una carretera Amazónica del Ecuador. *Granja*, vol. 39, no. 1, ISSN 13908596. DOI 10.17163/lgr.n39.2024.07.

CONCYTEC, 2020. Código Nacional de la Integridad Científica. . S.l.: s.n.,

CONTRERAS, R., 2019. El sensor sismológico: geófono. [en línea], DOI 10.6084/m9.figshare.8801045.v1. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/334307404>.

CRAIG, R. F. *Craig's Soil Mechanics*. 7.<sup>a</sup> ed. London: Spon Press, 2004.

CÓRDOVA, Z., M. (2016). Estadística Descriptiva e Inferencial. Aplicaciones. 5th edición. Lima-Perú.

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS IES, 2018. Tema 3 Arduino. . S.l.: s.n.,

FERNÁNDEZ, R., 2007. *SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE POSICIONAMIENTO GEOGRÁFICO*. S.l.: s.n.

FROUDE, M.J. y PETLEY, D.N., 2018. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 18, no. 8, pp. 2161-2181. ISSN 16849981. DOI 10.5194/NHESS-18-2161-2018,.

GEOLOGÍA, 2023. Tipos de movimientos de ladera. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2025]. Disponible en: [https://biologia-geologia.com/geologia/5222\\_tipos\\_de\\_movimientos\\_de\\_ladera.html](https://biologia-geologia.com/geologia/5222_tipos_de_movimientos_de_ladera.html).

GEOLOGIAWEB, 2020. ▷ Deslizamientos y tipos de deslizamientos [ ejemplos ]. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2025]. Disponible en: <https://geologiaweb.com/riesgos-naturales/deslizamientos/>.

GEOMADRILES, 2013. Geotermia (IV.A): Métodos Geofísicos Aplicados Introducción |. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2025]. Disponible en: <https://geomadriles.blogspot.com/2013/12/geotermia-iva-metodos-geofisicos.html>.

GEOSTRU, 2016. Estabilidad de taludes. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2025].

Disponible en: <https://www.geostru.eu/es/blog/2016/06/13/estabilidad-de-taludes/>.

GEO TÉCNIA, 2022. Reptaciones de suelos: significado, tipos, factores y mitigación. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2025]. Disponible en: <https://geotecniafacil.com/reptacion-de-suelos/>.



- GLOSARIO DE TERMINOS, 2013. *Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial*. S.l.: s.n.
- GRANELES, T., 2000. Tipo de Investigación. ,
- GUÍA T DE STUDENT, 2020. Prueba «t» de Student. . S.l.:
- HERNÁNDEZ, R. y MENDOZA, C., 2018. *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN: LAS RUTAS CUANTITATIVA, CUALITATIVA Y MIXTA.* ,
- HIGHLAND, L. y BOBROWSKY, P., 2008. *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes*. S.l.: s.n.
- HIRSCH, A. y NAVIA, C., 2018. Research ethics and teacher trainers. *Revista Electronica de Investigacion Educativa*, vol. 20, no. 3, pp. 1-10. ISSN 16074041. DOI 10.24320/redie.2018.20.3.1776.
- HUAPAYA, C. y HINOCHIO, J.F., 2018. *Guía de Investigación* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 9786124774522. Disponible en: <http://investigacion.pucp.edu.pe/>.
- HUAMÁN EGOÁVIL, Carlos E. y AGUILAR CHUQUIMUNI, Roberth. *Manual/taller sobre prospección sísmica (refracción y perfilaje)*. Lima: CISMID–UNI, 2017.
- INDECI, 2011. *MANUAL DE ESTIMACIÓN DEL RIESGO ANTE MOVIMIENTOS E MASA EN LADERAS*. S.l.: s.n.
- INGEMMET, 2016. Caída de rocas en el sector de Huamatambo - Huancavelica. ,
- INGEMMET, 2023. Evaluación del peligro geológico por deslizamiento en el centro poblado La Laja. . S.l.:
- INGITER, 2022. Sísmica de Refracción y MASW. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2025]. Disponible en: <https://www.ingiter.es/servicios/sismica-de-refraccion-masw/>.
- INVENSENSE, 2013. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. ,
- IMPELÁEZ, I. M. Comparación de medias. En: *Comparación de medios (PDF)*. [s.l.]: [s.n.], s.f. Capítulo sobre pruebas paramétricas: t de Student y ANOVA. Disponible en: <https://www.revistaseden.org/files/12-cap%2012.pdf> (consultado el 20 agosto 2025).
- JABRANE, O., 2023. *IDENTIFICACIÓN Y MODELIZACIÓN DE INESTABILIDADES DEL SUELO POR MÉTODOS GEOFÍSICOS Y HERRAMIENTAS BASADAS EN PYTHON: CASO DE LA CIUDAD DE FEZ (MARRUECOS) Y LA SIERRA DE GADOR (ESPAÑA)*. S.l.: Universidad Politécnica de Cartagena.
- JIMENEZ, G., HURTADO, C.A. y DUQUE, J.J., 2020. *ESTUDIOS DE MOVIMIENTO DE TIERRA*. S.l.: s.n.



- JUÁREZ, E. y RICO, A., 2005. *Fundamentos de la mecánica de suelos TOMO I*. S.l.: s.n.
- KANJI, G., 2006. 100 Statistical Tests. 3rd ed. Londres: SAGE Publications Ltd. Disponible en: <http://doi.org/10.4135/9781849208499>.
- LAMBE, T.W. y WHITMAN, R., 2004. *Mecánica de Suelos*. S.l.: s.n.
- MAYNÉ, J., 2003. *Sensores Acondicionadores y Procesadores de señal*. S.l.: s.n.
- MONCLOU, A. y VARGAS, L., 2017. Prototipo Preliminar para el estudio de ondas Sísmicas y su aplicación en el laboratorio de ciencias básicas. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2025]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5075/507555007006/html/>.
- MTC - MANUAL DE CARRETERAS MANTENIMIENTO O CONSERVACIÓN VIAL, 2018. *Manual de carreteras mantenimiento o conservación vial MTC* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: [www.mtc.gob.pe](http://www.mtc.gob.pe).
- MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012. Introducción al análisis de regresión lineal. S.l.: s.n.
- NAYLAMPMECHATRONICS, 2020. Tutorial MPU6050, Acelerómetro y Giroscopio. , OMEGA, 2023. Acelerómetro - Introducción y tipos. [en línea]. [consulta: 5 febrero 2024]. Disponible en: <https://mx.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>.
- PALLAS, R., 2003. *Sensores y acondicionadores de señal*. S.l.: s.n.
- PEÑA, C., 2017. *Arduino de cero a experto*. S.l.: s.n.
- PÉREZ, M.A., 2021. *Interpretación visual y digital de datos de sensores remotos para la identificación de deslizamientos rotacionales y traslacionales*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- RODRÍGUEZ, W., 2011. *Guía de Investigación Científica*. S.l.: s.n.
- RUELAS, R., 2021. RESISTIVIDAD... TEORIA Y DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2025]. Disponible en: <https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html>.
- RUIZ, J.M., 2007. *Manual de Programación* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.arduino.cc/http://www.wiring.org.co/http://www.arduino.cc/en/Booklet/HomePagehttp://cslibrary.stanford.edu/101/http://creativecommons.org/licenses/by-nc/>.
- RIVAS, N., 2023. Análisis de cárcavas mediante un enfoque que integra características geológicas, edafológicas, de uso y manejo de suelos en sitios ubicados en el departamento de Cerro Largo.



- RODRÍGUEZ, Íberico. *Estabilización y recuperación de taludes en carreteras, caso "IIRSA Norte Tramo n° 1 km 45+690 – km 45+830"*. Tesis de licenciatura. Lima: Universidad Ricardo Palma, 2015.
- RUIZ, A. y MORILLO, L., 2004. *Epidemiología Clínica: Investigación clínica aplicada*. Bogotá: Editorial Médica Panamericana.
- SABINO, C., 1992. *El proceso de investigación*. S.l.: s.n.
- SERCEL, 2023. geophones\_newcharte\_sercel. [en línea], [consulta: 11 agosto 2025]. Disponible en: [https://www.sercel.com/sites/default/files/2023-08/geophones\\_newcharte\\_sercel.pdf](https://www.sercel.com/sites/default/files/2023-08/geophones_newcharte_sercel.pdf).
- SUÁREZ, J., 2009. *Deslizamientos, Análisis geotécnico*. S.l.: s.n.
- SUBSUELO3D, 2022. Líneas de Refracción Sísmica Vp-Vs-MASW-ReMi-SPAC. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2025]. Disponible en: <https://www.subsuelo3d.com/refraccion-sismica-en-colombia-vp-vs-masw-remi-spac/>.
- SHARMA, P. V. *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- TICONA, J., 2019. *CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS DEL INSTITUTO GEOFÍSICO DE LA UNSA, A TRAVÉS DE METODOLOGÍAS SÍSMICAS Y ELÉCTRICAS*. S.l.: s.n.
- VARNES, D.J., 1978. Slope Movement Types and Processes. . S.l.: s.n.,
- WIDODO, A., SUSANTO, M., SETYAWAN, A. y FX, 2024. Landslide Monitoring and Warning System Based on Wireless Sensor Network. , vol. 16, no. 2, pp. 2580.
- WATT, J. y VAN DEN BERG, S., 2002. *Research Methods for Communication Science*. Boston: Allyn & Bacon.
- XIAOJIE, L., 2022. *Investigación sobre tecnologías clave para la identificación temprana, el seguimiento y la previsión de deslizamientos de tierra en zonas amplias mediante teledetección por radar espacial*. S.l.: s.n.
- ZEVALLOS, A. I. (2017). La gestión del riesgo de desastres en el Perú. (Vol. 6(7)). *Paideia XXI*.



## ANEXOS



Anexo A

Tabla 38 — Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e indicadores			Metodología
<p><b>Problema general:</b> ¿Cuál es la efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024?</p>	<p><b>Objetivo general:</b> Evaluar la efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.</p>	<p><b>Hipótesis general:</b> El acelerómetro MPU 6050 presenta una efectividad significativa frente al geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, durante el año 2024.</p>	<p><b>DIMENSIÓN</b></p>	<p><b>INDICADORES</b></p>	<p><b>ÍNDICES</b></p>	<p><b>Tipo de investigación:</b> Investigación Aplicada</p> <p><b>Nivel:</b> Correlacional.</p> <p><b>Diseño:</b> experimental - transversal</p> <p><b>La Población:</b> La población incluirá todas las áreas relevantes de Kolkaque, Abancay, Apurímac, que puedan ser susceptibles a deslizamientos y</p>
<p><i>VARIABLE INDEPENDIENTE:</i> Sensores de detección de movimiento.</p>						
			<p>acelerómetros MPU 6050</p>	<p>Aceleraciones Registradas</p>	<p>(g o m/s<sup>2</sup>)</p>	
<p><b>Problemas específicos:</b> <b>PE1:</b> ¿Qué efectividad existe entre la medición del acelerómetro MPU 6050 en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024?  <b>PE2:</b></p>	<p><b>Objetivos específicos:</b> <b>OE1:</b> Determinar la efectividad entre la medición del acelerómetro MPU-6050 en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.  <b>OE2:</b></p>	<p><b>Hipótesis específicos:</b> <b>HE1:</b> El acelerómetro MPU 6050 presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.  <b>HE2:</b></p>				
			<p><i>VARIABLE DEPENDIENTE:</i> Deslizamientos de suelos</p>			

<p>¿Qué efectividad existe entre la medición del geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024?</p>	<p>Determinar la efectividad entre la medición del geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.</p>	<p>El geófono vertical de 4.5 Hz presenta una efectividad significativa en la detección de deslizamientos de suelo en la zona de Kolkaque, Abancay, Apurímac, 2024.</p>	<p>Porcentaje de humedad</p> <p>Tipo de Suelo</p> <p>Grado de Pendiente</p>	<p>Contenido de agua en el suelo</p> <p>Clasificación del suelo</p> <p>Inclinación del terreno</p>	<p>%</p> <p>Diámetro (mm)</p> <p>(%, °)</p>	<p>donde la aplicación de dispositivos de detección sea de interés.</p> <p><b>Muestra:</b> Para este trabajo de investigación se tomará 4 puntos de muestreo en zona kolkaque.</p>
--	--	---	---	--	---	--

ONOTA

**Título:** Efectividad del acelerómetro MPU 6050 versus geófono vertical de 4.5 Hz en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kolkaque Abancay, Apurímac 2024.

## Anexo B

### INSTRUMENTO DE COLECCIÓN DE DATOS

<b>PROYECTO :</b> Efectividad del Acelerómetros MPU 6050 versus geófonos sísmicos en la detección de deslizamientos de suelos en la zona kollaque Abancay, Apurímac.		<b>MUESTRA :</b> C-01			
<b>LUGAR :</b> Tamburco, Abancay, Apurímac		<b>FECHA :</b> Febrero, 2025			
<b>SOLICITA :</b> Bach. Wilber Arias Benites					
<b>DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO</b> <small>[ NTP 339.037   ASTM D2216   MTC E108 ]</small>					
CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
1	Tara N°				
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)				
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)				
4	Peso del agua contenida (gr) ( 2 ) - ( 3 )				
5	Peso de la tara (gr)				
6	Peso del suelo seco (gr) ( 3 ) - ( 5 )				
7	Contenido de humedad (%) ( 4 ) / ( 6 )				

**Figura 60 — Determinación de contenido de humedad de un suelo para las calicatas N° 01, 02, 03 y 04**

<b>DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO Y LIMITE PLASTICO</b>					
MTC E 110, MTC E 111, NTP 339.129					
Ensayo N°	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO	
	1	2	3	1	2
# de Tara	T1	T2	T3	TP1	TP2
Peso de Tara					
Peso de Tara + M. Húmeda					
Peso de Tara + M. Seca					
Peso del Agua					
peso de M. Seca					
Contenido de Humedad					
# de Golpes					
<b>RESULTADO</b>					

Figura 61 — Determinación del límite líquido y límite plástico de un suelo para las calicatas N° 01, 02, 03 y 04


<b>ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO</b>						
NTP 339.128, MTC E 107, ASTM D422, AASHTO T87						
TAMIZ	ABERTURA (mm)	Pesos Retenidos	% Pesos Retenidos	% Retenidos Acumulados	% Q' PASA	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
						C-01

Figura 62 — Análisis granulométrico por tamizado de un suelo para las calicatas N° 01, 02, 03 y 04

Tiempo - Plot 0	Amplitud - Plot 0	Tiempo - Plot 1	Amplitud - Plot 1	Tiempo - Plot 2	Amplitud - Plot 2

Figura 63 — Análisis de las aceleraciones – Geófono vertical de 4.5 Hz

### B. 1 Resultados




**LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO**

ENGINEERING · CONSTRUCTION

997374826 / 985190489

MAUCACALLE - SAHUNAY MZ B Nº2, ABANCAY, PERU



**PROYECTO :** Efectividad del Acelerómetros MPU 6050 versus geófonos sísmicos en la detección de deslizamientos de suelos en la zona kolkaque Abancay, Apurímac 2024. **MUESTRA :** C-01

**LUGAR :** Tamburco, Abancay, Apurímac

**SOLICITA :** Bach. Wilber Arias Benites **FECHA :** Febrero, 2025

**DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO**

| NTP 339.037 | ASTM D2216 | MTC E108 |

CONTENIDO DE HUMEDAD		CH			PROMEDIO
		T1	T2	T3	
1	Tara N°				<b>16,84%</b>
2	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	70,5	82,5	80,5	
3	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	63,9	75,00	73,2	
4	Peso del agua contenida (gr) ( 2 ) - ( 3 )	6,6	7,5	7,3	
5	Peso de la tara (gr)	25,00	30,00	30,00	
6	Peso del suelo seco (gr) ( 3 ) - ( 5 )	38,9	45	43,2	
7	Contenido de humedad (%) ( 4 ) / ( 6 )	16,97%	16,67%	16,90%	

Figura 64 — Determinación de contenido de humedad de un suelo para calicata N° 01

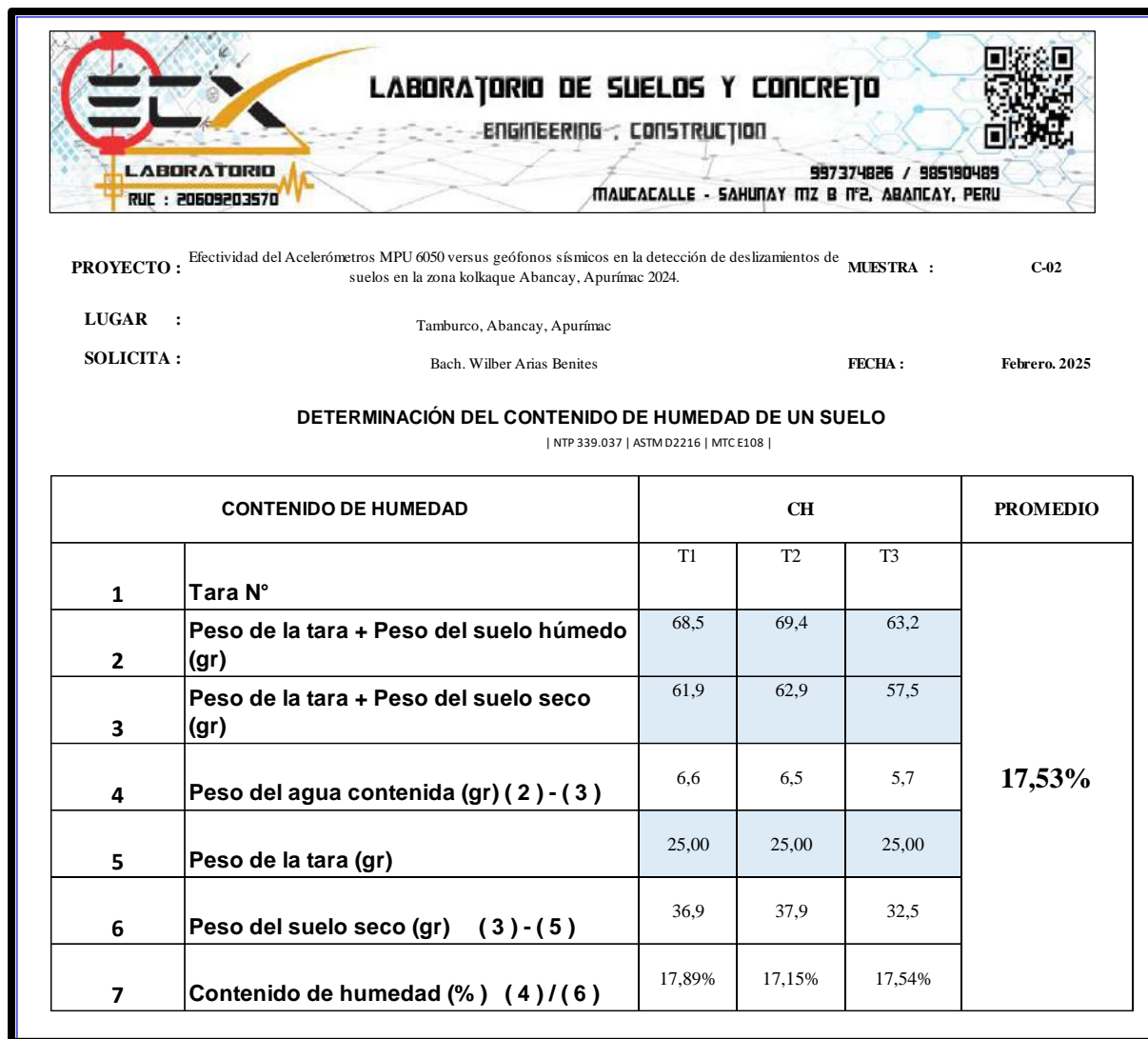
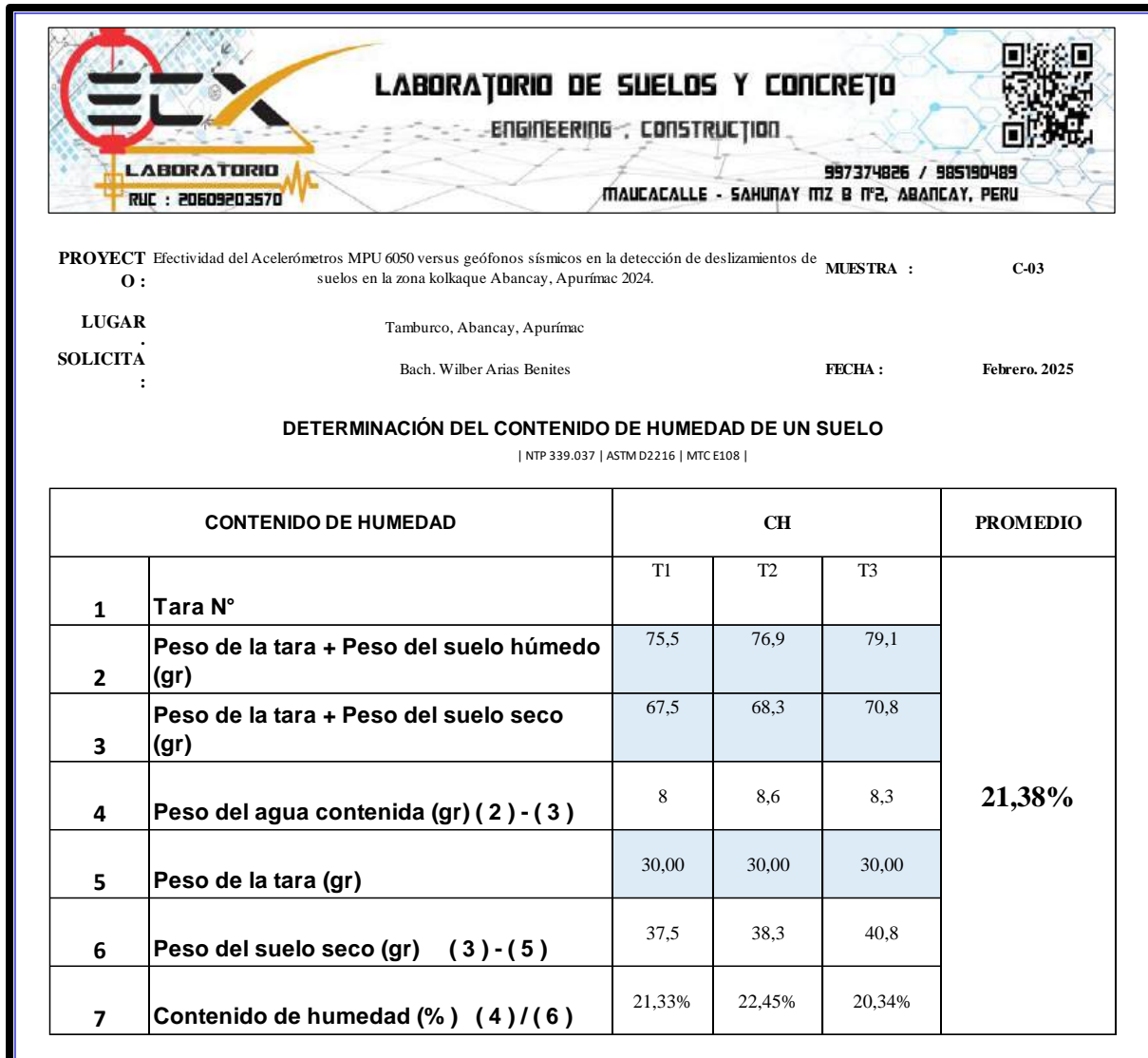


Figura 65 — Determinación de contenido de humedad de un suelo para calicata N° 02



**Figura 66 — Determinación de contenido de humedad de un suelo para calicata N° 03**

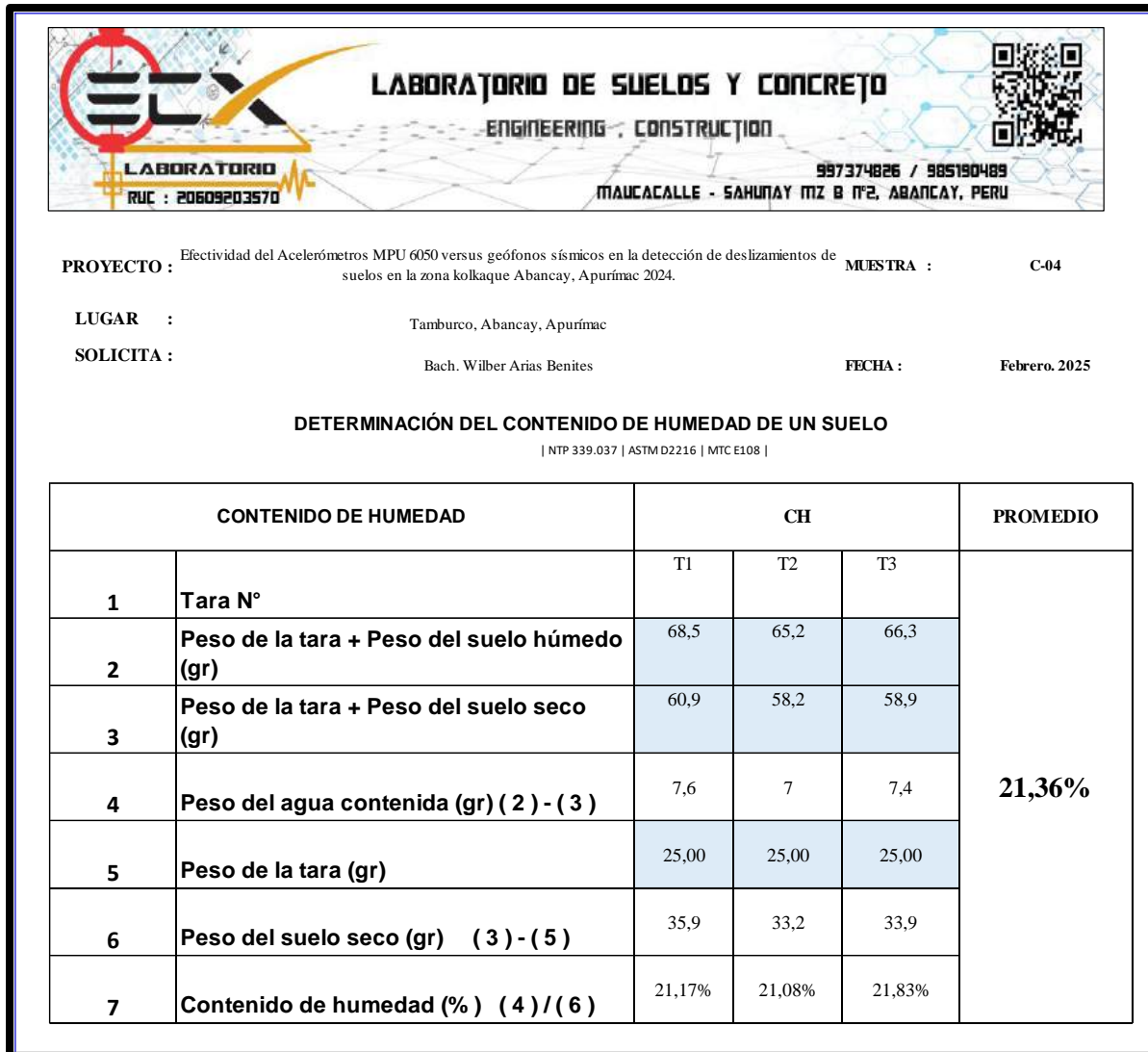
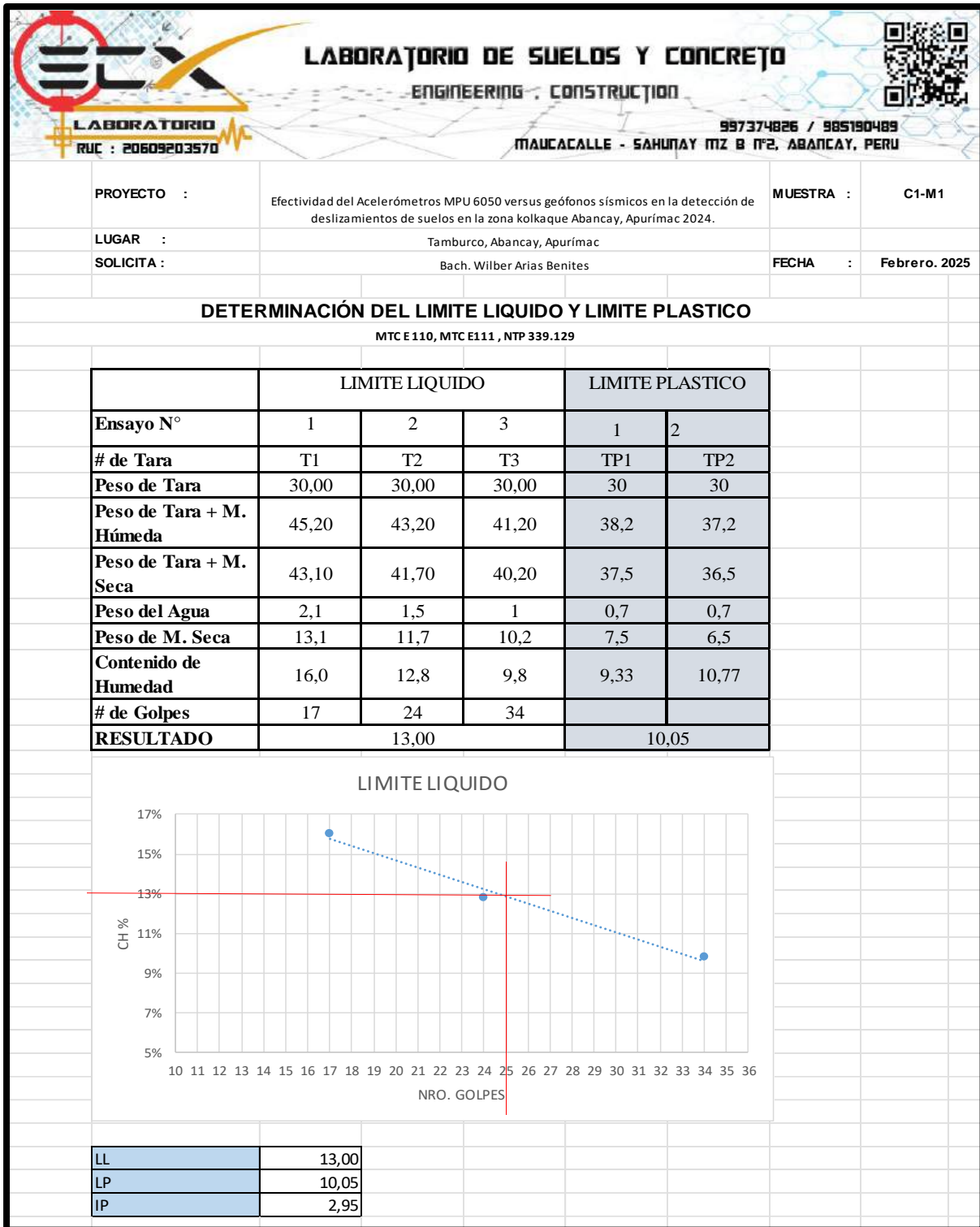
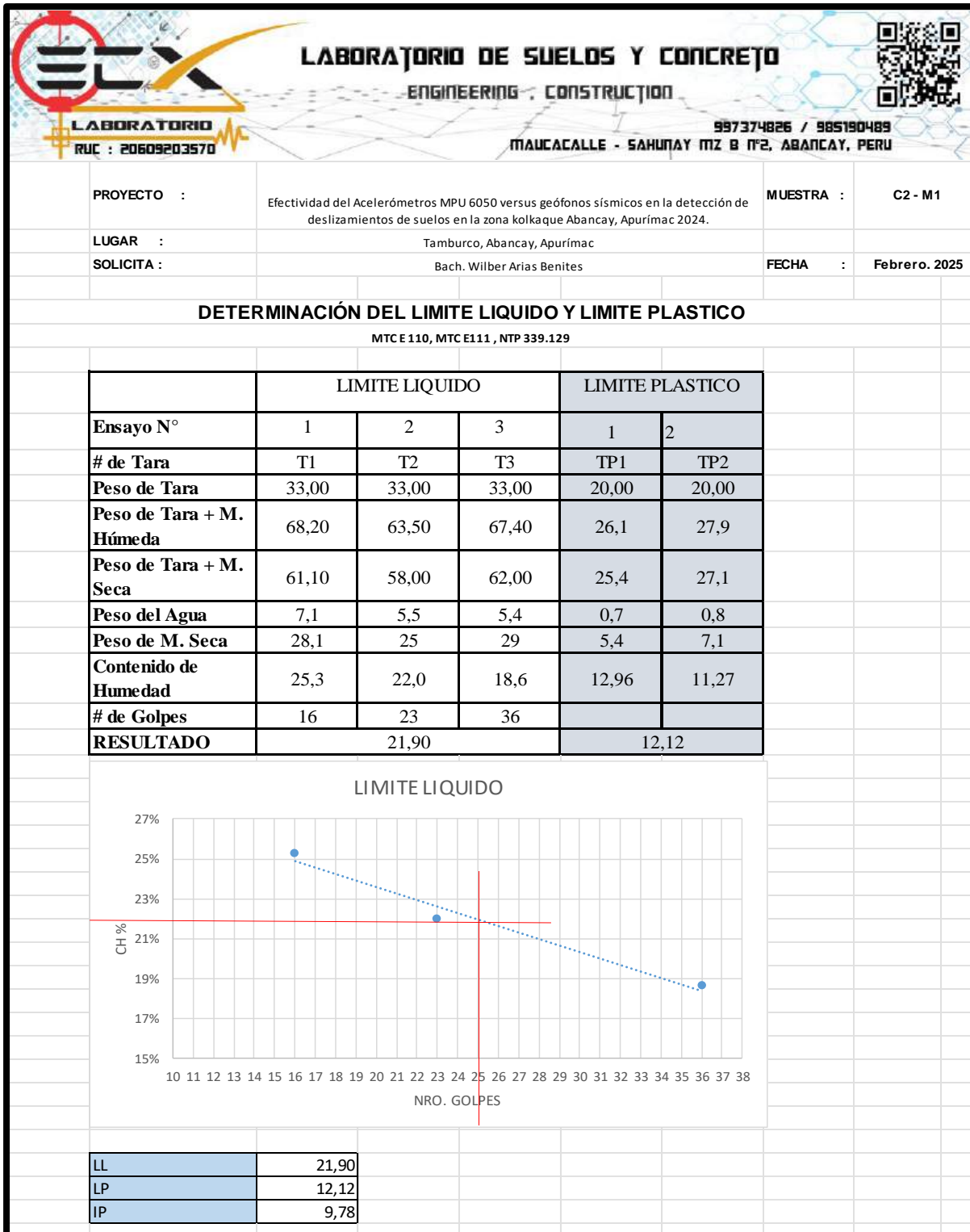


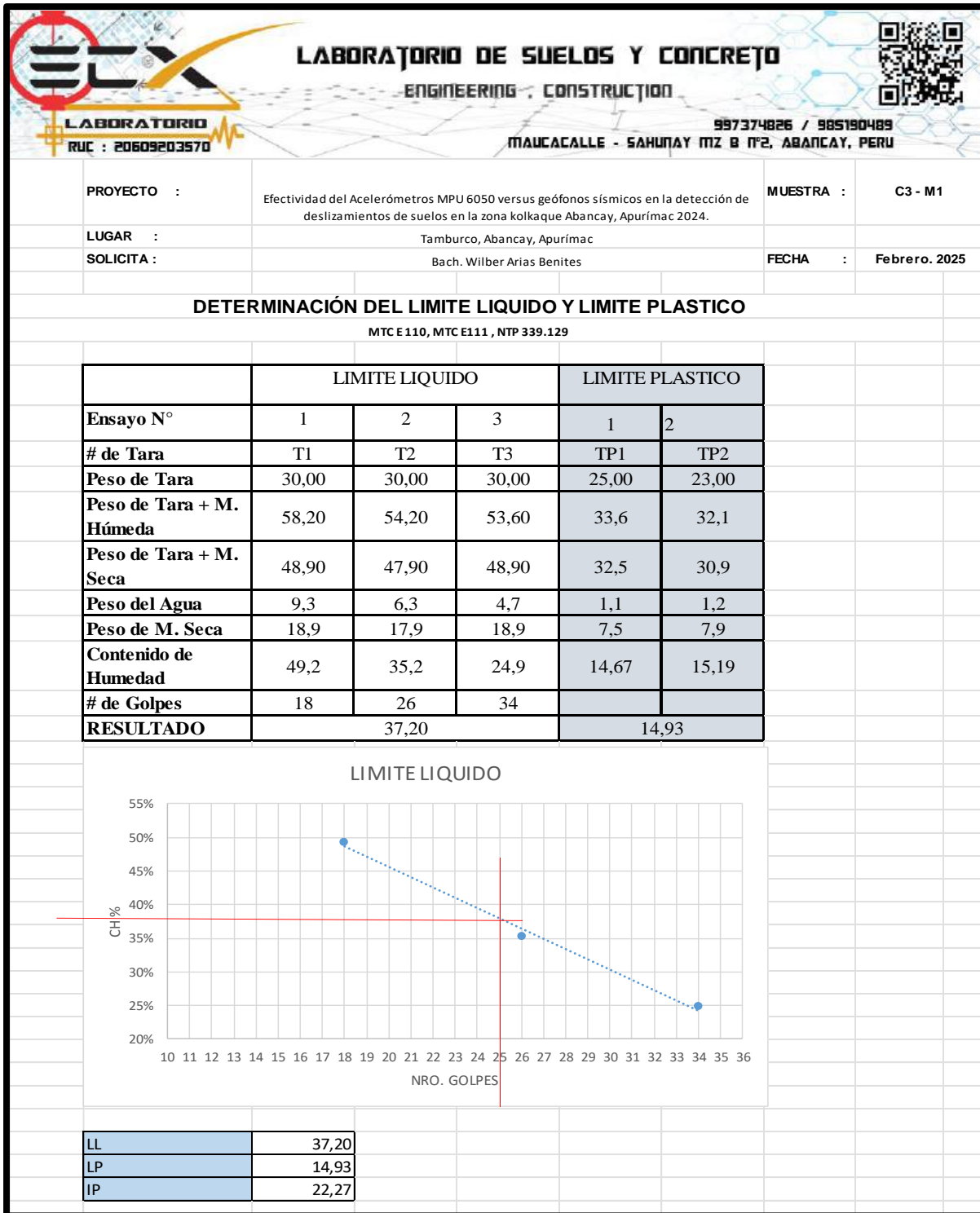
Figura 67 — Determinación de contenido de humedad de un suelo para calicata N° 04



**Figura 68 — Determinación del límite líquido y límite plástico de un suelo para las calicatas N° 01**



**Figura 69 — Determinación del límite líquido y límite plástico de un suelo para las calicatas N° 02**



**Figura 70 — Determinación del límite líquido y limite plástico de un suelo para las calicatas N° 03**

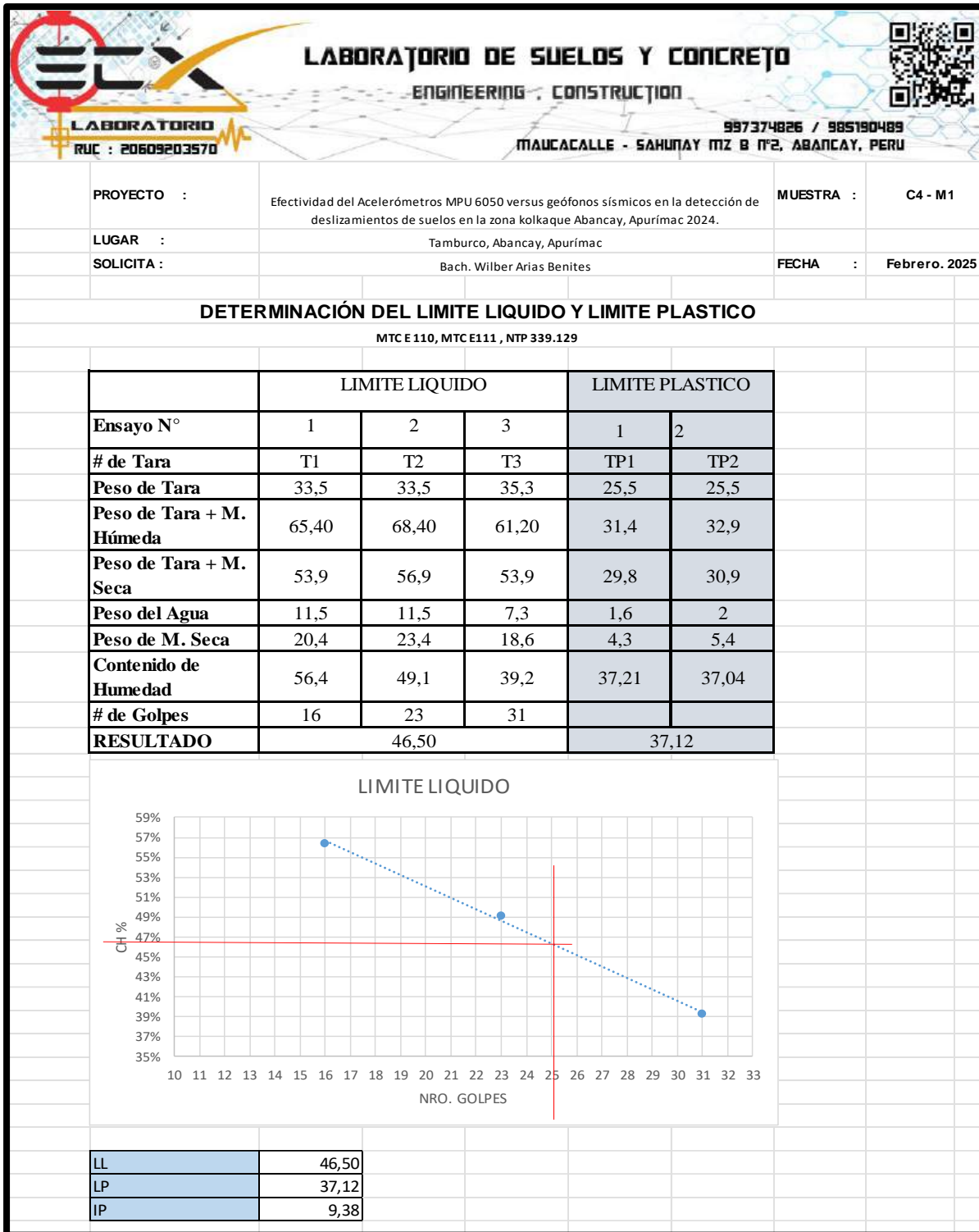
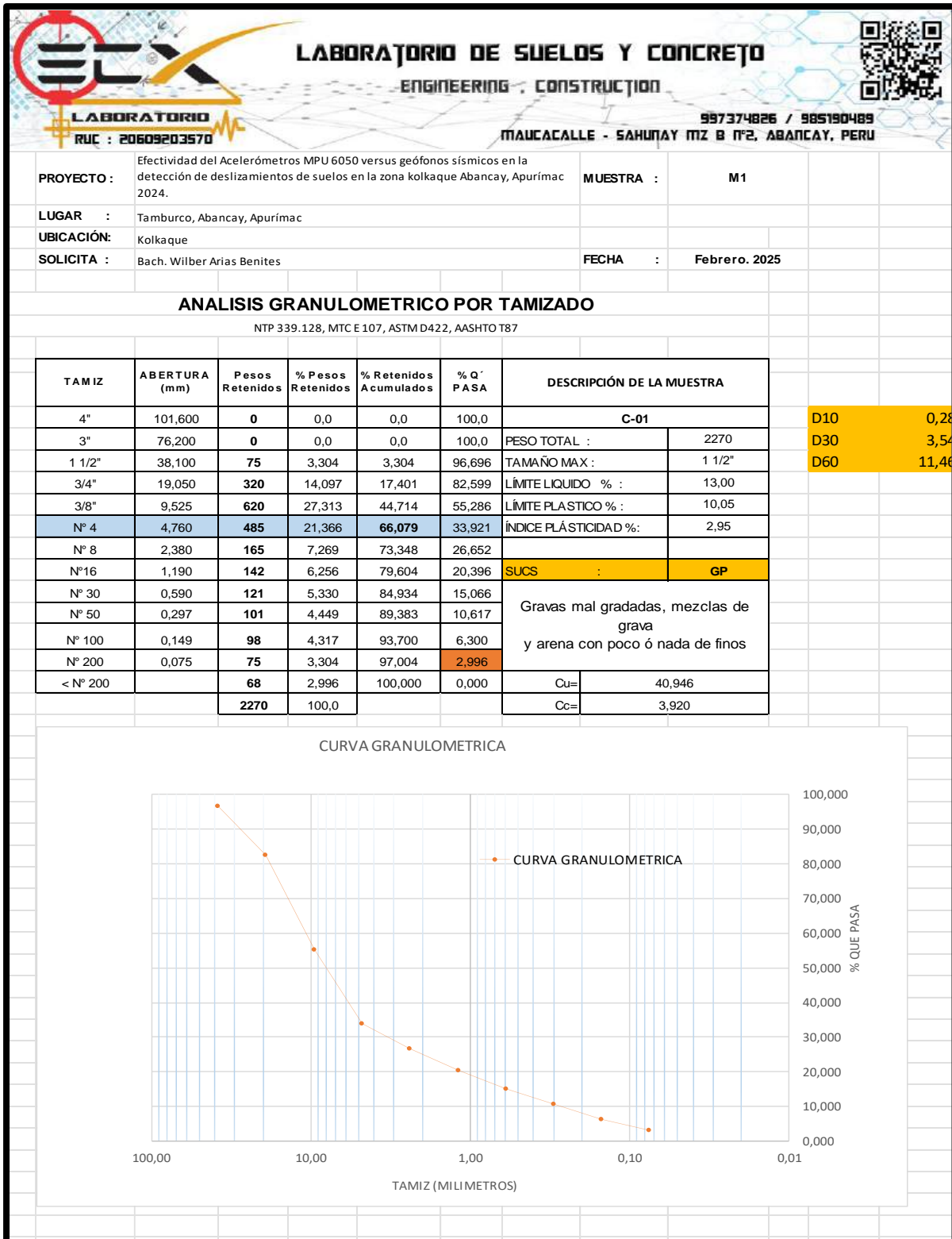


Figura 71 — Determinación del límite líquido y limite plástico de un suelo para las calicatas N° 04



**Figura 72 — Análisis granulométrico por tamizado de un suelo para las calicatas N° 01**

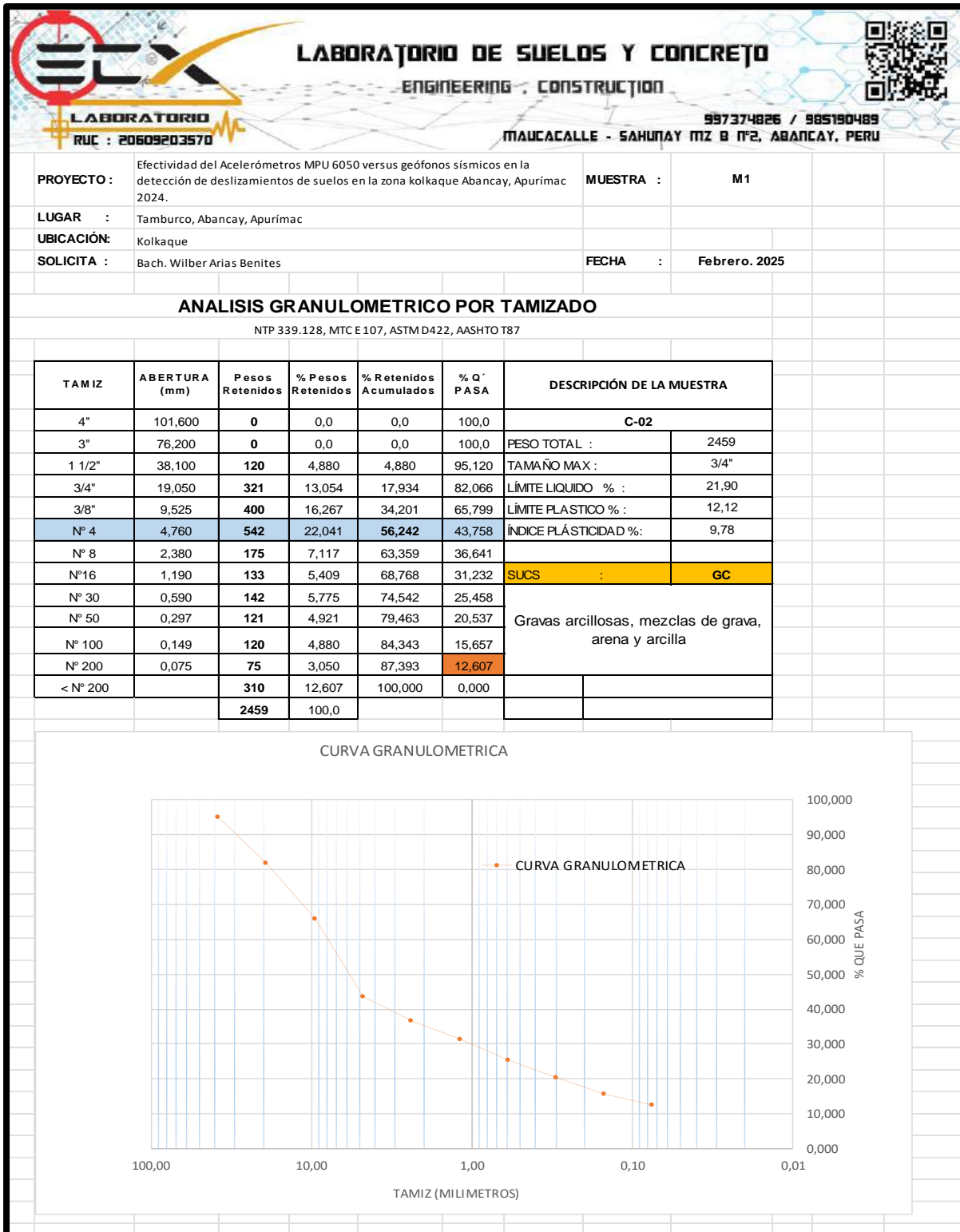


Figura 73 — Análisis granulométrico por tamizado de un suelo para las calicatas N° 02

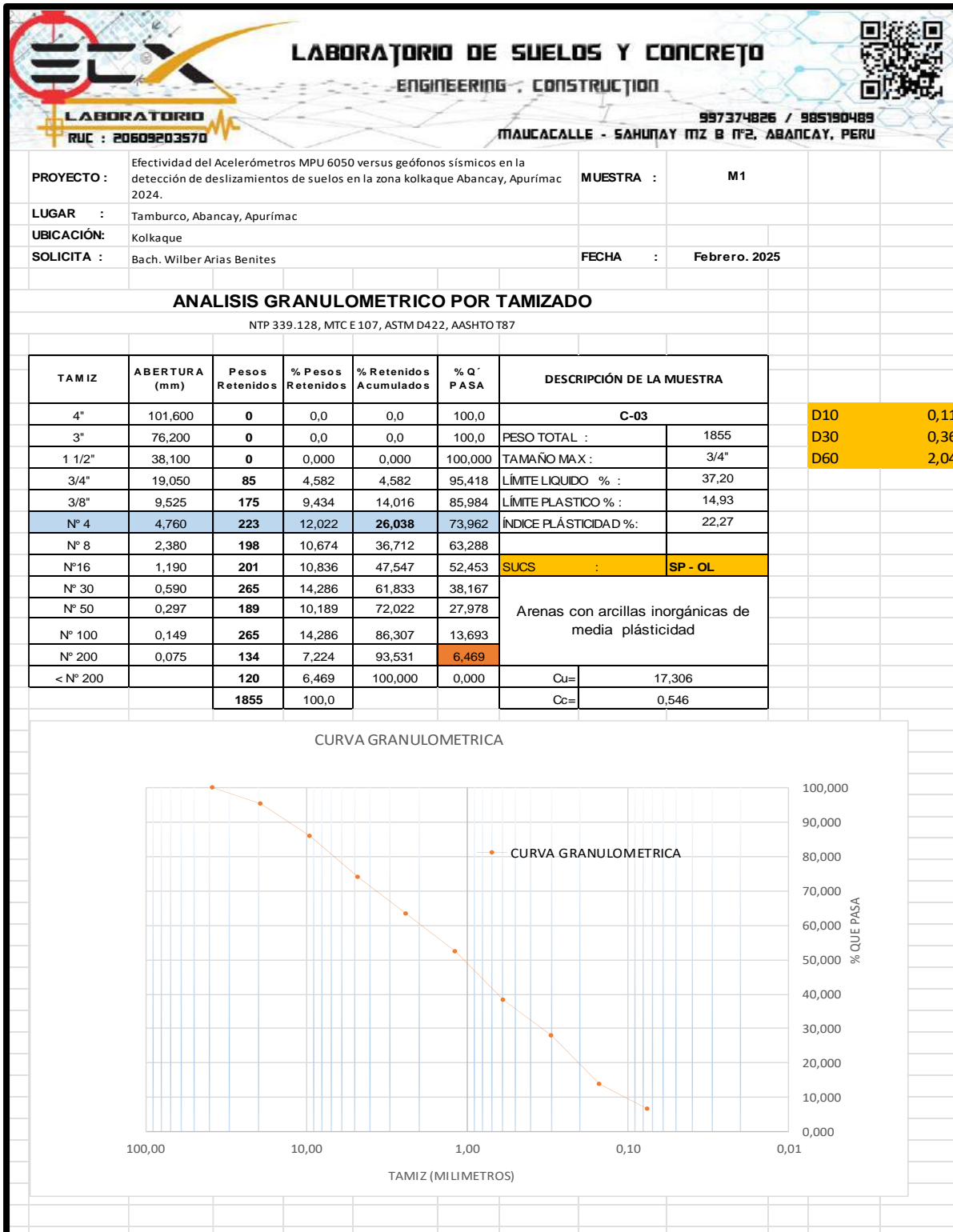


Figura 74 — Análisis granulométrico por tamizado de un suelo para las calicatas N° 03

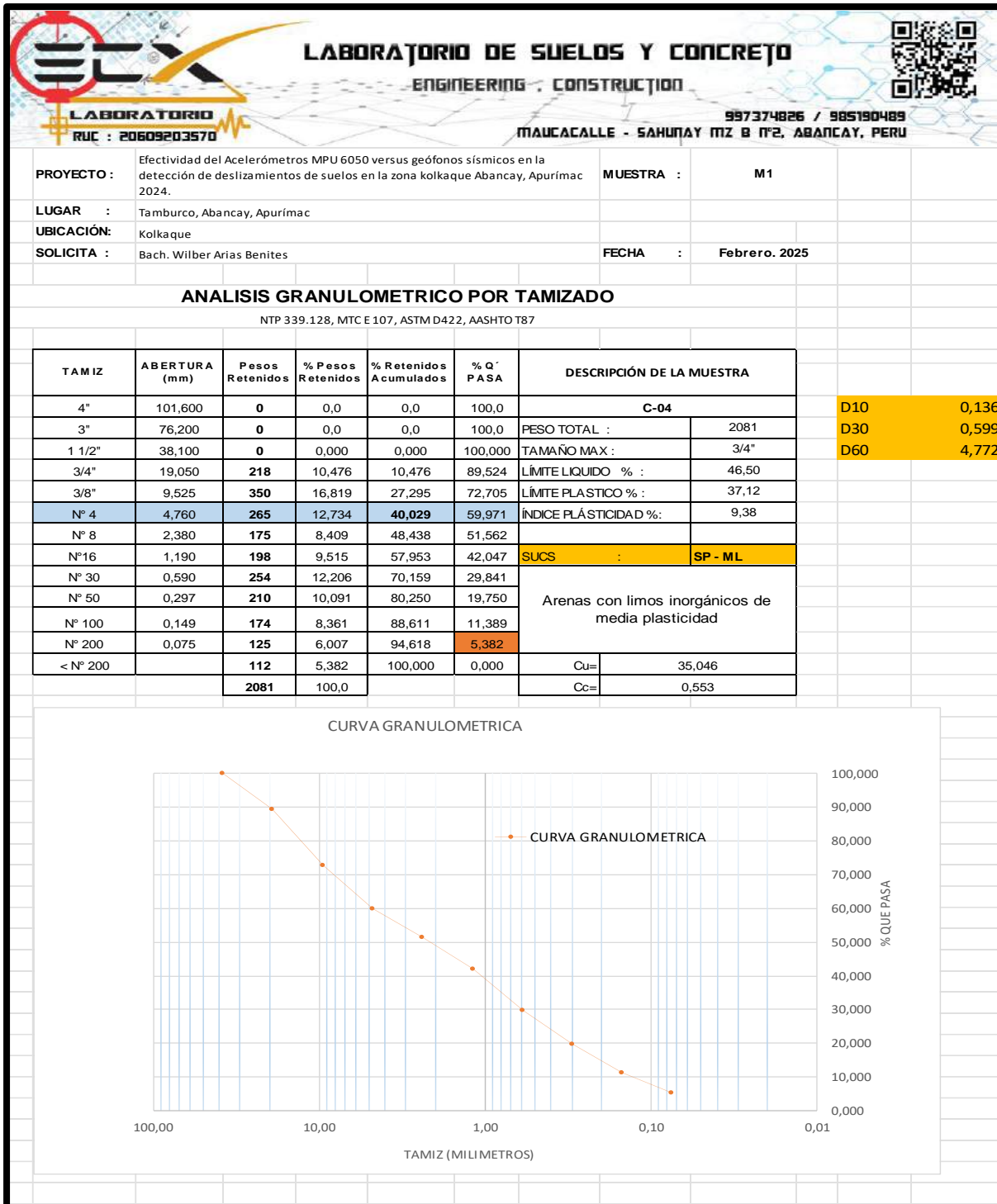


Figura 75 — Análisis granulométrico por tamizado de un suelo para las calicatas N° 04

## Anexo C JUICIO DE EXPERTOS

**FORMATO ÚNICO DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO**

**I.- INFORMACION GENERAL**

1.1. Investigador	: Wilber Arias Benites	N° DNI	74020253
1.2. Título de la Investigación	: Efectividad del Acelerómetro MPU 6050 versus geófono sísmico en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kollaque Abancay, Apurímac 2024.		
1.3. Universidad	: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac		
1.4. Experto	: Carlos Mendoza Contreras	N° DNI	40628370
1.5. Grado Académico	: MAESTRO		
1.6. Institución labor	: CEPROMIN S.A.C.		
1.7. Nombre del Instrumento	: Acelerómetro MPU6050 - Geófono.		

**II.- ASPECTOS DE VALIDACION**

Revisar cada uno de los Items del Instrumento y marcar con un aspa el recuadro (x), según la calificación que se puede asignar a cada uno de los indicadores.

1. DEFICIENTE (D) : Si menos del 30% de los Items cumplen con el Indicador  
 2. REGULAR (R) : Si entre el 30% y 70% de los Items cumplen con el Indicador  
 3. BUENO (B) : Si más el 70% de los Items cumplen con el Indicador

ASPECTOS DE VALIDACION INSTRUMENTAL		D	R	B	OBSERVACIONES Y/O SUGERENCIA
CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	
PERTINENCIA	Los Items miden lo previsto en los objetivos de investigación		X		
COHERENCIA	Los Items responden a los que se debe medir en las variables y sus dimensiones	X			
CONGRUENCIA	Los Items son congruentes entre sí, y con conceptos que miden.			X	
OBJETIVIDAD	Los Items miden comportamiento y acciones observables.			X	
CONSISTENCIA	Los Items se han formulado en concordancia a los fundamentos teóricos de las variables.		X		
SUFICIENCIA	Los Items son suficientes en cantidad para medir las variables.			X	
ORGANIZACIÓN	Los Items están secuenciados y distribuidos de acuerdo a dimensiones e indicadores.			X	
CLARIDAD	Los Items están redactados de un lenguaje entendible.			X	
FORMATO	Los Items están escritos respetando aspectos teóricos (tamaño de letra, espaciado, interlineado, nitidez).		X		
ESTRUCTURA	El instrumento cuenta con instrucciones, consignas, opciones de respuesta bien definidos.	X			
CONTEO TOTAL		2	6	15	PUNTAJACIÓN TOTAL
		A	B	C	

COEFICIENTE DE VALIDACIÓN:  $\frac{A+B+C}{30} = 0.76$

INTERVALOS	RESULTADOS
0.00 - 0.49	Validez nula
0.50 - 0.59	Validez muy baja
0.60 - 0.69	Validez baja
0.70 - 0.79	Validez aceptable
0.80 - 1.00	Validez muy buena

Calificación Global  
Mide el coeficiente validez en el intervalo respectivo

Escriba sobre el espacio el resultado

23 - Validez aceptable.

Abancay, 13 de Agosto del 2025

Ing. Carlos Mendoza Contreras

CIB 130235

Evaluador del Riesgo de Desastres

R. Nº 0002-2021 - CENEPRED-J

Figura 76 — Valoración de experto N°01

**FORMATO ÚNICO DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO**

**I.- INFORMACION GENERAL**

1.1. Investigador	: Wilber Arias Benites	N° DNI	74020253
1.2. Título de la Investigación	: Efectividad del Acelerómetro MPU 6050 versus geófono sísmico en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kolkague Abancay, Apurímac 2024.		
1.3. Universidad	: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac		
1.4. Experto	: Charles N. Checya Alata	N° DNI	41547037
1.5. Grado Académico	: Magister		
1.6. Institución laboral	: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.		
1.7. Nombre del Instrumento	: Acelerómetro MPU6050 - Geof0110.		

**II.- ASPECTOS DE VALIDACION**

Revisar cada uno de los Items del Instrumento y marcar con un aspa el recuadro (x), según la calificación que se puede asignar a cada uno de los indicadores.

- 1. DEFICIENTE (D) : Si menos del 30% de los Items cumplen con el Indicador
- 2. REGULAR (R) : Si entre el 30% y 70% de los Items cumplen con el Indicador
- 3. BUENO (B) : Si más el 70% de los Items cumplen con el Indicador

CRITERIOS	INDICADORES	D	R	B	OBSERVACIONES Y/O SUGERENCIA
		1	2	3	
PERTINENCIA	Los Items miden lo previsto en los objetivos de investigación		X		
COHERENCIA	Los Items responden a los que se debe medir en las variables y sus dimensiones		X		
CONGRUENCIA	Los Items son congruentes entre sí, y con conceptos que miden.			X	
OBJETIVIDAD	Los Items miden comportamiento y acciones observables.			X	
CONSISTENCIA	Los Items se han formulado en concordancia a los fundamentos teóricos de las variables.		X		
SUFICIENCIA	Los Items son suficientes en cantidad para medir las variables.			X	
ORGANIZACIÓN	Los Items están secuenciados y distribuidos de acuerdo a dimensiones e indicadores.			X	
CLARIDAD	Los Items están redactados de un lenguaje entendible.			X	
FORMATO	Los Items están escritos respetando aspectos teóricos (tamaño de letra, espaciado, interlineado, nitidez).		X		
ESTRUCTURA	El instrumento cuenta con instrucciones, consignas, opciones de respuesta bien definidos.			X	
CONTEO TOTAL			B	1B	PUNTUACIÓN TOTAL
		A	B	C	

COEFICIENTE DE VALIDACIÓN:

$$\frac{A+B+C}{30} = 0.86$$

INTERVALOS	RESULTADOS
0.00 - 0.49	Validez nula
0.50 - 0.59	Validez muy baja
0.60 - 0.69	Validez baja
0.70 - 0.79	Validez aceptable
0.80 - 1.00	Validez muy buena

Calificación Global

Mide el coeficiente validez en el Intervalo respectivo

Escriba sobre el espacio el resultado

2.6 - Validez muy buena.

Abancay, 13 de Agosto del 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC  
  
 Ing. Charles N. Checya Alata  
 DOCENTE

Figura 77 — Valoración de experto N°02

**FORMATO ÚNICO DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO**

**I.- INFORMACION GENERAL**

1.1. Investigador	: Wilber Arias Benites	N° DNI	74020253
1.2. Título de la Investigación	: Efectividad del Acelerómetro MPU 6050 versus geófono sísmico en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kollaque Abancay, Apurímac 2024.		
1.3. Universidad	: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac		
1.4. Experto	: Edgar Anibal Pérez Olaguiuel	N° DNI	0109626
1.5. Grado Académico	: Doctor		
1.6. Institución laboral	: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.		
1.7. Nombre del Instrumento	: Acelerómetro MPU6050 - Grafeno		

**II.- ASPECTOS DE VALIDACION**

Revisar cada uno de los Items del Instrumento y marcar con un aspa el recuadro (x), según la calificación que se puede asignar a cada uno de los indicadores.

- 1. DEFICIENTE (D) : Si menos del 30% de los Items cumplen con el Indicador
- 2. REGULAR (R) : Si entre el 30% y 70% de los Items cumplen con el Indicador .
- 3. BUENO (B) : Si más el 70% de los Items cumplen con el Indicador

ASPECTOS DE VALIDACION INSTRUMENTAL		D	R	B	OBSERVACIONES Y/O SUGERENCIA
CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	
PERTINENCIA	Los Items miden lo previsto en los objetivos de investigación		X		
COHERENCIA	Los Items responden a los que se debe medir en las variables y sus dimensiones			X	
CONGRUENCIA	Los Items son congruentes entre sí, y con conceptos que miden.			X	
OBJETIVIDAD	Los Items miden comportamiento y acciones observables.			X	
CONSISTENCIA	Los Items se han formulado en concordancia a los fundamentos teóricos de las variables.		X		
SUFICIENCIA	Los Items son suficientes en cantidad para medir las variables.			X	
ORGANIZACIÓN	Los Items están secuenciados y distribuidos de acuerdo a dimensiones e indicadores.			X	
CLARIDAD	Los Items están redactados de un lenguaje entendible.		X		
FORMATO	Los Items están escritos respetando aspectos teóricos (tamaño de letra, espaciado, interlineado, nitidez).		X		
ESTRUCTURA	El instrumento cuenta con instrucciones, consignas, opciones de respuesta bien definidos.			X	
CONTEO TOTAL			0	16	PUNTUACIÓN TOTAL
		A	B	C	

COEFICIENTE DE VALIDACIÓN:

$$\frac{A+B+C}{30} = 0.86$$

INTERVALOS	RESULTADOS
0.00 - 0.49	Validez nula
0.50 - 0.59	Validez muy baja
0.60 - 0.69	Validez baja
0.70 - 0.79	Validez aceptable
0.80 - 1.00	Validez muy buena

Calificación Global  
Mide el coeficiente validez en el intervalo respectivo

Escriba sobre el espacio el resultado

26 - Validez muy buena.

Abancay, 13 de Agosto del 2025



Figura 78 — Valoración de experto N°03

**FORMATO ÚNICO DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO**

**I.- INFORMACION GENERAL**

1.1. Investigador	: Wilber Arias Benites	N° DNI	74020253
1.2. Título de la Investigación	: Efectividad del Acelerómetro MPU 6050 versus geófono sísmico en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kolkake Abancay, Agurímac 2024.		
1.3. Universidad	: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Agurímac		
1.4. Experto	: Michel Palma Vargas	N° DNI	42347864
1.5. Grado Académico	: Magister		
1.6. Institución laboral	: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Agurímac		
1.7. Nombre del Instrumento	: Acelerómetro MPU6050		

**II.- ASPECTOS DE VALIDACION**

Revisar cada uno de los ítems del instrumento y marcar con un aspa el recuadro (x), según la calificación que se puede asignar a cada uno de los indicadores.

- 1. DEFICIENTE (D) : Si menos del 30% de los ítems cumplen con el indicador
- 2. REGULAR (R) : Si entre el 30% y 70% de los ítems cumplen con el indicador
- 3. BUENO (B) : Si más del 70% de los ítems cumplen con el indicador

CRITERIOS	INDICADORES	D	R	B	OBSERVACIONES Y/O SUGERENCIA
		1	2	3	
PERTINENCIA	Los ítems miden lo previsto en los objetivos de investigación		X		
COHERENCIA	Los ítems responden a los que se debe medir en las variables y sus dimensiones			X	
CONGRUENCIA	Los ítems son congruentes entre sí, y con conceptos que miden.			X	
OBJETIVIDAD	Los ítems miden comportamiento y acciones observables.			X	
CONSISTENCIA	Los ítems se han formulado en concordancia a los fundamentos teóricos de las variables.		X		
SUFICIENCIA	Los ítems son suficientes en cantidad para medir las variables.			X	
ORGANIZACIÓN	Los ítems están secuenciados y distribuidos de acuerdo a dimensiones e indicadores.			X	
CLARIDAD	Los ítems están redactados de un lenguaje entendible.			X	
FORMATO	Los ítems están escritos respetando aspectos teóricos (tamaño de letra, espaciado, interlineado, nitidez).		X		
ESTRUCTURA	El instrumento cuenta con instrucciones, consignas, opciones de respuesta bien definidos.			X	
CONTEO TOTAL			6	21	PUNTAJE TOTAL
		A	B	C	

COEFICIENTE DE VALIDACIÓN:  

$$\frac{A+B+C}{30} = \boxed{0.9}$$

INTERVALOS	RESULTADOS
0.00 - 0.49	Validez nula
0.50 - 0.59	Validez muy baja
0.60 - 0.69	Validez baja
0.70 - 0.79	Validez aceptable
0.80 - 1.00	Validez muy buena

Calificación Global  
 Mide el coeficiente validez en el intervalo respectivo

Escriba sobre el espacio el resultado

27 - Validez muy buena.

Abancay, 13 de Agosto del 2025



  
  
 Michel Palma Vargas  
 Ingeniero Civil  
 CIP. N° 107700

Figura 79 — Valoración de experto N°04

**FORMATO ÚNICO DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO**

**I.- INFORMACION GENERAL**

1.1. Investigador	: Wilber Arias Beites	N° DNI	: 74020253
1.2. Título de la Investigación	: Efectividad del Acelerómetro MPU 6050 versus geófono sísmico en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kollaque Abancay, Apurímac 2024.		
1.3. Universidad	: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac		
1.4. Experto	: Wilson J. Molloccordo Flores	N° DNI	: 01 322 422
1.5. Grado Académico	: Doctor		
1.6. Institución laboral	: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac		
1.7. Nombre del Instrumento	: Acelerómetro MPU6050 - Geofono sísmico		

**II.- ASPECTOS DE VALIDACION**

Revisar cada uno de los Items del Instrumento y marcar con un aspa el recuadro (x), según la calificación que se puede asignar a cada uno de los indicadores.

1. DEFICIENTE (D) : Si menos del 30% de los Items cumplen con el Indicador  
 2. REGULAR (R) : Si entre el 30% y 70% de los Items cumplen con el Indicador  
 3. BUENO (B) : Si más el 70% de los Items cumplen con el Indicador

ASPECTOS DE VALIDACION INSTRUMENTAL		D	R	B	OBSERVACIONES Y/O SUGERENCIA
CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	
PERTINENCIA	Los Items miden lo previsto en los objetivos de investigación			X	
COHERENCIA	Los Items responden a los que se debe medir en las variables y sus dimensiones		X		
CONGRUENCIA	Los Items son congruentes entre sí, y con conceptos que miden.		X		
OBJETIVIDAD	Los Items miden comportamiento y acciones observables.		X		
CONSISTENCIA	Los Items se han formulado en concordancia a los fundamentos teóricos de las variables.			X	
SUFICIENCIA	Los Items son suficientes en cantidad para medir las variables.			X	
ORGANIZACIÓN	Los Items están secuenciados y distribuidos de acuerdo a dimensiones e indicadores.			X	
CLARIDAD	Los Items están redactados de un lenguaje entendible.			X	
FORMATO	Los Items están escritos respetando aspectos teóricos (tamaño de letra, espaciado, interlineado, nitidez).		X		
ESTRUCTURA	El instrumento cuenta con instrucciones, consignas, opciones de respuesta bien definidos.			X	
CONTEO TOTAL			B	1B	PUNTUACIÓN TOTAL
		A	B	C	

COEFICIENTE DE VALIDACIÓN:  $\frac{A+B+C}{30} = 0.86$

INTERVALOS	RESULTADOS
0.00 - 0.49	Validez nula
0.50 - 0.59	Validez muy baja
0.60 - 0.69	Validez baja
0.70 - 0.79	Validez aceptable
0.80 - 1.00	Validez muy buena

Calificación Global  
Mide el coeficiente validez en el intervalo respectivo

Escriba sobre el espacio el resultado

26 - Validez muy buena.

Abancay, 13 de Agosto del 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL  
ESCALA BASTIDAS DE APURIMAC

*Wilson J. Molloccordo Flores*

Dr. Wilson J. Molloccordo Flores  
DOCENTE

Figura 80 — Valoración de experto N°05

<b>Criterios</b>	<b>Validación 01</b>	<b>Validación 02</b>	<b>Validación 03</b>	<b>Validación 04</b>	<b>Validación 05</b>
Pertinencia	2	2	2	2	3
Coherencia	1	2	3	3	2
Congruencia	3	3	3	3	2
Objetividad	3	3	3	3	2
Consistencia	2	2	2	2	3
Suficiencia	3	3	3	3	3
Organización	3	3	3	3	3
Claridad	3	3	2	3	3
Formato	2	2	2	2	2
Estructura	1	3	3	3	3
<b>SUB TOTAL</b>	<b>0.767</b>	<b>0.867</b>	<b>0.867</b>	<b>0.900</b>	<b>0.867</b>
<b>TOTAL</b>	<b>0.853</b>				

<b>INTERVALOS</b>	<b>RESULTADOS</b>
0.00 - 0.49	Validez nula
0.50 - 0.59	Validez muy baja
0.60 - 0.69	Validez baja
0.70 - 0.79	Validez aceptable
0.80 - 1.00	Validez muy buena

De acuerdo a la valoración instrumental y según la baremación de los datos obtenidos el coeficiente de confiabilidad de Alfa de Cronbach es de **0.853** resultando ser una

**Figura 81 — Resumen de valoración de instrumentos**

## Anexo E PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 82 — Exploración de campo zona Kolkaque



Figura 83 — Marcado de puntos para obtener las aceleraciones



Figura 84 — Registro de resultados en la calicata 1



Figura 85 — Registro de aceleraciones a 2 metros



**Figura 86 — Registro de aceleraciones a 4 metros**



**Figura 87 — Exploración de la calicata 2**



**Figura 88 — Registro de aceleraciones calicata 2 – 2 metros**



**Figura 89 — Registro de aceleraciones calicata 2 – 4 metros**



**Figura 90 — Registro de aceleraciones aplicando carga**



**Figura 91 — Registro de aceleraciones aplicando carga**



Figura 92 — Calibración del acelerómetro



Figura 93 — Exploración de campo calicata 3





Figura 96 — Ensayos de laboratorio

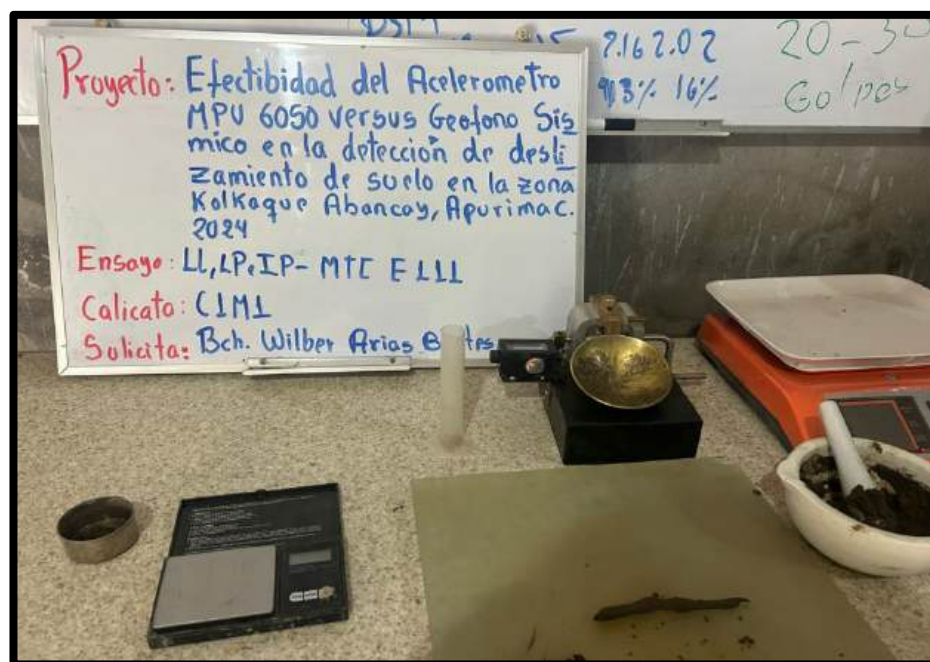


Figura 97 — Ensayos de laboratorio LL y LP



Figura 98 — Ensayos de laboratorio AG

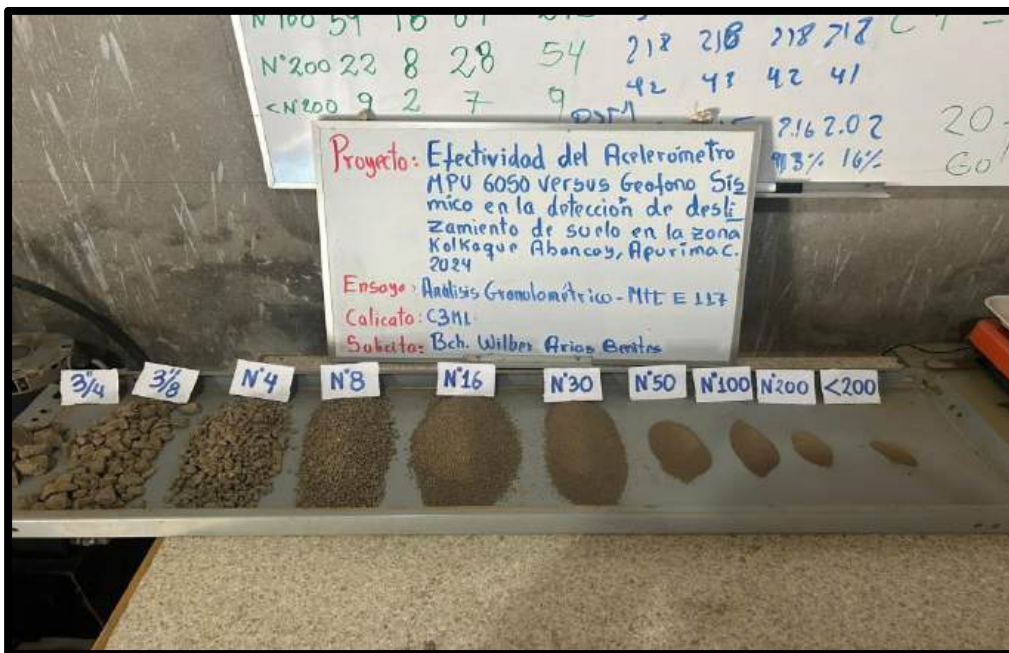


Figura 99 — Ensayos de laboratorio AG - C3



## DBS280B Certifications

### Acquisition Sensors

DB280B uses HG-6 A coil geophones with resonant frequency of 4.5 Hz. Included to this document is their parameters and calibration chart.

### AD converter

DB280B uses Analog Devices AD7767 Successive Approximations analog to digital converter.  
Go to Analog Devices web site for further information.

### System clock

Timing for Sampling Frequency comes from microprocessor clock.  
Clock is derived from a base frequency of 32768 Hz +/- 20ppm.

Triggering time is synchronized at trigger mode start, from software protocol.


Triggering time is hardware depending, from external mechanical circuit closure (or opening).

In Faith

Dr. Costanzo Tononi

DOLANG GEOPHYSICAL Srl  
P.IVA IT 02302260993

Figura 100 — Certificado de calibración del geófono o sismografo



**DOLANG**  
Geophysical

**DOLANG GEOPHYSICAL SRLs a SOCIO UNICO**

Piazza Dinegro 3 - 16126 Genova (GE) - Italy  
 e-mail: info@dolang.it Pec: dolanggeophysical@legalmail.com Internet: WWW.DOLANG-GEOPHYSICAL.COM  
 C.F./P.Iva IT02302280993 Reg. imprese GE-476662

Fattura nr. 1/2021 del 13/01/2021

**Destinatario**

UNIVERSAL TESTING SOCIEDAD ANONIMA  
 CERRADA - UNITEST S.A.C.  
 CAL.PERU MZA. X LOTE. 13 URB. TTIO (ALTURA  
 QUINTO PARADERO DE TTIO)  
 08002 CUSCO - WANCHAQ  
 Cod. Fisc. RUC: 20490872508

**Destinazione**

UNIVERSAL TESTING SOCIEDAD ANONIMA CERRADA -  
 UNITEST S.A.C.  
 CAL.PERU MZA. X LOTE. 13 URB. TTIO (ALTURA  
 QUINTO PARADERO DE TTIO)  
 08002 CUSCO - WANCHAQ

Codice	Descrizione	Quantità	Prezzo	Sconto	Importo	Iva
	SEISMOGRAPH DBS280B 24 CH N° 24 GEOPHONES 4,5Hz	1	€ 6.512,00		€ 6.512,00	N8a

Aeropuerto del destino: Lima - Peru

Número de teléfono y persona de contacto para Aduana

MOCAYAS LOGISTICA ADUANERA S.A.C.

Número de RUC: 20546805973


Juan Solano Huaranga AGENTE DE ADUANAS

Celular: 945 077 380

Central telefónica: 484-5229 / 304-5796

E-mail: arles4628@hotmail.com

jsolanoh@mocayasaduanera.com



MOCAYAS LOGISTICA ADUANERA S.A.C.  
 RUC: 20546805973  
 COD. 7215  
**JUAN C. SOLANO HUARANGA**  
 REPRESENTANTE LEGAL

Iva	Imponible	Imposta
N8a: Non imp. art. 8 c. 1 lett. a DPR 633/72	€ 6.512,00	€ 0,00

Pagamento: Contanti	Tot. imponible € 0,00 Tot. Iva € 0,00 Tot. importi non imp. Iva € 6.512,00
Scadenze:	
<b>Tot. documento € 6.512,00</b>	

Pag. 1 Nel rispetto della normativa vigente, ivi incluso DL 196/03 e reg. UE 2016/678, informiamo che l'iva, dal saranno utilizzati ai soli fini connessi ai rapporti commerciali tra di noi in essere. Contributo CONAI assolto ove dovuto - Vi preghiamo di controllare l'iva, dell'anagrafici, la P. IVA e il Cod. Fiscale. Non ci riteniamo responsabili di eventuali errori.

**Figura 101 — Certificado de calibración del geófono o sismógrafo**

**Anexo F**  
**DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD**

**DECLARACION JURADA DE ORIGINALIDAD Y DE NO PLAGIO**

**Tesista:**

Yo, wilber Arias Benites, identificado con DNI: 74020253, egresado de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil – UNAMBA, autor de la tesis titulada: **“Efectividad del Acelerómetro MPU 6050 versus geófono sísmico en la detección de deslizamiento de suelo en la zona Kolkaque Abancay, Apurímac 2024”**.

DECLARO BAJO JURAMENTO QUE:

El tema y contenido de tesis es original, siendo resultados de mi esfuerzo y trabajo, no ha sido copiado, no se han utilizado ideas, formulaciones, citas integrales ni ilustraciones diversas sacadas de otras tesis, obras, artículos, memorias, etc. Sin mencionar de forma exacta y clara su origen, fuente o autor, tanto en el cuerpo o texto, gráficos o figuras, cuadros, tablas u otro contenido protegido por derechos de autor o que no hayan sido debidamente citados.

En ese sentido, soy consciente de que la falta de respeto a los derechos de autor y plagiar son acciones que serán castigados mediante sanciones universitarias y/o legales.

Me afirmo y me ratifico en lo expresado, en señal de lo cual firmo el presente documento en la ciudad de Tamburco, a los 12 días del mes de agosto del año 2025



-----  
Tesista: Bach. Wilber Arias Benites  
DNI:74020253

Figura 102 — Declaración de originalidad