

UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**"ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN Y DISTORSIÓN DE SEÑALES
ELÉCTRICAS EN SUELOS ARCILLOSOS REMOLDEADOS DE LA FORMACIÓN
TOSAGUA MEDIANTE PROCESAMIENTO COMPUTACIONAL DE SEÑALES"**

ASIGNATURA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR: FASE DE RESULTADOS

AUTORA:

PASPUEL VELEZ KERLY JANNETH


DOCENTE

ING. MARCELO OLEAS ESCALANTE

MANTA – MANABÍ – ECUADOR

2024

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante Paspuel Vélez Kerly Janneth, legalmente matriculado en la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2024-2025, cumpliendo el total de 192 horas, cuyo tema del proyecto es "análisis de la propagación y distorsión de señales eléctricas en suelos arcillosos remoldeados de la formación Tosagua mediante procesamiento computacional de señales”

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 07 de Enero de 2025

Lo certifico,

Ing. Marcelo Oleas Escalante
Docente Tutor
Área: Vías

Declaratoria de Autoría:

Yo, Paspuel Vélez Kerly Janneth, declaro bajo mi responsabilidad que el presente trabajo de titulación, titulado "análisis de la propagación y distorsión de señales eléctricas en suelos arcillosos remoldeados de la formación Tosagua mediante procesamiento computacional de señales", es de mi completa autoría. Este documento es resultado de mi esfuerzo, investigación y análisis, y no ha sido presentado previamente para la obtención de ningún título académico ni se encuentran en proceso de evaluación en otra institución educativa. Certifico que todas las fuentes de información y referencias utilizadas han sido debidamente citadas y reconocidas, cumpliendo con los estándares éticos y académicos correspondientes. Asimismo, cualquier similitud con otros trabajos es puramente incidental. Por lo tanto, asumo la total responsabilidad sobre el contenido, análisis y resultados presentados en este documento.

DEDICATORIA

La presente Tesis está dedicada a mi familia, principalmente a mis padres quienes han estado desde el principio de este proceso hasta concluir con mi carrera teniendo fe en todo el esfuerzo, siendo mi pilar principal en mi vida, a mis hermanos que sin duda su apoyo ha sido parte importante, a mi abuelita María que siempre me ha acompañado con sus palabras y aliento confiando en mí.

A mis seres queridos que me han apoyado en todo este proceso, dándome ánimos y aliento para continuar.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios por nunca abandonarme en todo este tiempo, mostrándome la luz en todo este proceso, poniéndome a las personas que necesitaba.

A mis Padres Bairon Paspuel y Yaneth Vélez, quienes han sido mi roca en todos estos años, apoyándome no solo económicamente, sino moralmente alentándome a seguir esforzándome, mostrándome su amor y sacrificio, lo que me ha inspirado a poder recorrer este camino para un mejor futuro, a mis hermanos que han sido mi apoyo incondicional, a mi abuelita María que ha sido parte de la fortaleza e inspiración por todo este camino siempre animándome a no rendirme.

A mi tutor de tesis el Ing. Marcelo Oleas, que ha sido una gran ayuda de todo este proceso, agradezco la paciencia y la orientación impartida.

Quiero agradecer al Ing. Andrés Vines que ha sido apoyo incondicional a lo largo de la carrera, compartiéndome su conocimiento, siendo luz en este camino, gracias por haber sido guía en este proceso.

Expreso mi gratitud al Ing. Carlo Cano, docente e investigador de la carrera de ingeniería eléctrica y al estudiante Kenneth Masapanta, quien realizó el generador de frecuencias, por haber estado presto a siempre ayudar en lo que sea necesario.

Agradezco a mis amigos, a las personas que hoy están y las que no están, porque de alguna manera aprendí y saqué lo mejor de ellos, de las situaciones en las que hemos estado, gracias a Erick por apoyarme en los ensayos elaborados en la Universidad, apoyarme sin alguna condición.

RESUMEN

Este estudio aborda el análisis del comportamiento mecánico y la propagación de señales eléctricas en suelos arcillosos remoldeados de la formación Tosagua bajo condiciones controladas de humedad (0%, 5%, 10% y 15%). Mediante ensayos experimentales, se evaluaron la resistencia a compresión no confinada, los módulos elásticos y las características de propagación de señales eléctricas (amplitud, frecuencia y distorsión). Los datos se procesaron utilizando técnicas computacionales y análisis estadístico, desarrollando modelos predictivos que correlacionan propiedades mecánicas y eléctricas.

Los resultados evidencian que la resistencia a compresión y los módulos elásticos disminuyen significativamente con el aumento de la humedad, alcanzando pérdidas del 68% y 73%, respectivamente. Las señales eléctricas mostraron una atenuación del 50% en amplitud máxima (1.2 V a 0.6 V), atribuida a la absorción dieléctrica y las pérdidas resistivas, mientras que las frecuencias predominantes permanecieron estables. Además, se identificaron correlaciones inversas entre la amplitud de las señales y las propiedades mecánicas, destacando que los modelos estadísticos desarrollados, aunque limitados (R^2 de 0.06 y 0.13), ofrecen herramientas prácticas para predecir el comportamiento del suelo en contextos dinámicos.

Este trabajo aporta un enfoque novedoso al combinar experimentación y modelación computacional para analizar el impacto de la humedad en suelos arcillosos. Sus hallazgos son relevantes para el diseño de cimentaciones, monitoreo geotécnico y evaluación de estabilidad en regiones con suelos sensibles, proporcionando una base sólida para futuros estudios que integren propiedades mecánicas y eléctricas en escenarios más complejos.

Palabras clave: Humedad, suelos arcillosos, atenuación de señales, modelación computacional, propiedades mecánicas.

ABSTRACT

This study examines the mechanical behavior and electrical signal propagation in remolded clay soils from the Tosagua formation under controlled moisture conditions (0%, 5%, 10%, and 15%). Experimental tests evaluated unconfined compressive strength, elastic moduli, and the characteristics of electrical signal propagation (amplitude, frequency, and distortion). Data were processed using computational techniques and statistical analysis to develop predictive models correlating mechanical and electrical properties.

The results indicate that compressive strength and elastic moduli significantly decrease with increasing moisture, showing reductions of 68% and 73%, respectively. Electrical signals exhibited a 50% attenuation in maximum amplitude (from 1.2 V to 0.6 V), attributed to dielectric absorption and resistive losses, while dominant frequencies remained stable. Inverse correlations were identified between signal amplitude and mechanical properties, demonstrating the potential of electrical signals as indicators for soil characterization. Although limited (R^2 of 0.06 and 0.13), the predictive models provide practical tools for assessing soil behavior in dynamic contexts.

This study introduces a novel approach by combining experimental and computational modeling to analyze moisture effects on clay soils. The findings are relevant to foundation design, geotechnical monitoring, and stability assessments in regions with moisture-sensitive soils. They establish a robust foundation for future research that integrates mechanical and electrical properties in more complex scenarios.

Keywords: Moisture, clay soils, Tosagua formation, signal attenuation, computational modeling, mechanical properties.

CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	1
Objetivo General	1
Objetivos específicos	1
1.3 Antecedentes	2
1.4 Hipótesis	7
1.5 Justificación	7
1.6 Diseño metodológico	7
Población y muestra	8
Técnica de recolección de datos.....	8
Procedimiento	9
Limitaciones del estudio	10
CAPÍTULO II	11
2.1 Marco teórico	11
2.2 Introducción a la formación Tosagua y sus suelos.	11
2.2 Propiedades de los suelos arcillosos	12
Propiedades Geotécnicos de los suelos Arcillosos Remodelados.....	12
Propiedades eléctricas de los suelos arcillosos de Tosagua	13
Composición de los Suelos Arcillosos	14
Importancia de los minerales y su impacto en las propiedades eléctricas de los suelos Arcillosos.....	14

Relevancia de los minerales en los suelos arcillosos	14
2.3 Propiedades eléctricas influenciadas por Minerales	15
Impacto en el procesamiento computacional de señales.....	16
Relación entre minerales y propiedades geotécnicas	16
Parámetros relevantes en Ecuador	16
Comportamiento Mecánico de los suelos arcillosos	17
Estructura del suelo y propagación de ondas.	17
Textura del Suelo y propagación de Ondas.....	18
2.4 Fundamentos de la propagación de ondas	19
Ondas mecánicas.....	20
Tipos de ondas mecánicas.....	20
Principios Físicos de la propagación de ondas (Leyes Fundamentales)	22
Conceptos de Impedancia acústica y reflexión/transmisión en interfaces	25
Reflexión y Transmisión en Interfaces	26
Parámetros Característicos	27
Frecuencia	27
Longitud de Onda.....	29
Velocidad de Propagación.....	30
Amplitud	31
2.5 Propagación de señales eléctricas en medios porosos	32
Conductividad eléctrica.....	33
Resistividad eléctrica	33
Principios físicos detrás de la propagación de señales en suelos porosos.....	33

	Efecto de humedad y porosidad: Cambios en resistividad eléctrica	35
2.6	Modelos teóricos específicos	37
2.7	Formación Tosagua y sus suelos.....	38
	Metodologías experimentales para el Estudio de Propagación de Ondas.	38
	Efectos de la Remoldeación en la propagación de Ondas.....	39
	Factores que influye en la Propagación de Ondas.	40
	Propiedades dinámicas de los suelos remoldeados	42
	Aplicación en Ingeniería Sísmica.....	43
CAPÍTULO III		1
3.1	Marco metodológico	1
3.2	Enfoque de la Investigación.....	2
	Investigación exploratoria y correlacional:	2
3.2	Selección y caracterización de la muestra	3
	Caracterización Geotécnica inicial.....	3
3.3	Preparación de Probetas y control de humedad	4
	Remoldeado de la muestra	4
	Modelado y Compactación	5
3.4	Ensayos Mecánicos.....	5
	Ensayo de Compresión No confinado.....	5
	Cálculo de parámetros mecánicos.....	6
3.5	Propagación y Adquisición de señales eléctricas.....	7
	Generador de Señales	7
	Configuración del sistema de medición	9

Proceso de Medición	9
3.6 Análisis Frecuencial y Cálculo de Parámetros Dinámicos	10
Transformada de Fourier	10
Tiempo de Tránsito y Velocidad de Propagación	11
3.7 Integración de Datos y Procesamiento Computacional.	11
Unificación de Bases de Datos.....	11
Análisis de Correlación	12
Modelado Estadístico y Gráficos	12
CAPÍTULO IV	13
4.1 Análisis e interpretación de Resultados	13
4.2 Gráficas Comparativas.....	13
4.3 Análisis de las Curvas de Esfuerzo-Deformación	16
4.4 Representación mediante Círculos de Mohr	17
4.5 Validación Experimental de propiedades del Suelo	18
Presentación de Gráficos.....	18
4.6 Tablas	19
4.7 Propagación y Distorsión de Señales	21
Presentación de Gráficos.....	21
Tablas	23
Conclusión.....	23
4.8 Análisis de Pérdida de Energía	23
4.9 Análisis Complementario del Espectro de Frecuencias.....	25
4.10 Análisis Estadístico y Predicciones de Propiedades Geotécnicas.....	25

4.11	Evaluación de Normalidad y Métricas de Error	26
4.12	Relación entre V_{max} y Tensión máxima.....	28
4.13	Relación entre V_{rms} y Módulo Elástico.....	30
CAPÍTULO V		33
5.1	Conclusiones	33
5.2	Recomendaciones.....	35
BIBLIOGRAFÍA.....		36
ANEXOS.....		43

INDICE DE ILUSTRACIÓN

Ilustración 1 Ondas de Volumen-Ondas Sísmicas	21
Ilustración 2 Ondas de Superficie	21
Ilustración 3 Un generador de ondas funciona.....	8
Ilustración 4 Salidas de ondas cuadradas seno y triangular	8

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Esfuerzo-Deformación para 0% de Humedad	13
Fig. 2 Esfuerzo-Deformación para 5% de Humedad (Probeta 1)	14
Fig. 3 Esfuerzo-Deformación para 5% de Humedad (Probeta 2)	14
Fig. 4 Esfuerzo-Deformación para 10% de Humedad (Probeta 1)	15
Fig. 5 Esfuerzo-Deformación para 10% de Humedad (Probeta 2)	15
Fig. 6 Esfuerzo-Deformación para 15% de Humedad (Probeta 1)	16
Fig. 7 Esfuerzo-Deformación para 15% de Humedad (Probeta 2)	16
Fig. 8 Círculos de Mohr para todas las probetas	17
Fig. 9 Correlación entre contenido de humedad y atenuación de señal	19
Fig. 10 Espectro de frecuencias de señales	21
Fig. 11 Señales recreadas con atenuación y dispersión.....	22
Fig. 12 Pérdida de Energía en Función del Contenido de Humedad	24
Fig. 13 Espectro de frecuencias de las señales.....	25
Fig. 14 Residuos de Tensión Máxima.....	27
Fig. 15 Residuos de módulo elástico.....	27
Fig. 16 Relación entre V_{max} y Tensión máxima.....	29
Fig. 17 Residuos de la relación entre V_{max} y tensión máxima	29

Fig. 18 Relación entre V_{rms} y Módulo elástico	31
Fig. 19 Relación entre V_{rms} y Módulo elástico	31

INDICE DE ILUSTRACIÓN

Anexo 1 Extracción de las primeras muestras	43
Anexo 2 Reconocimiento de la zona de estudio	43
Anexo 3 Extracción de muestras de la zona Tosagua- Rocafuerte	44
Anexo 4 Puntos de extracción de muestras	44
Anexo 5 Muestra de la formación Tosagua	45
Anexo 6 Muestra del suelo para ensayo de Proctor	45
Anexo 7 Molde del ensayo de Proctor	46
Anexo 8 Ensayo de Proctor	46
Anexo 9 Muestras del ensayo de Proctor con distintas humedades	47
Anexo 10 Ensayo de compresión en Probetas	47
Anexo 11 Probetas con distintas humedades para ensayo con generador de frecuencia y compresión	48
Anexo 12 Probetas ensayadas con distintas humedades	48
Anexo 13 Ensayo con el generador de frecuencia y osciloscopio	49
Anexo 14 Ondas sinusoidal de probetas con distintos tipos de suelo	49
Anexo 15 Ondas sinusoidal con arcillas de tosagua con distintas humedades	50
Anexo 16 Ondas sinusoidal con arcillas de Tosagua 0% de humedad	50
Anexo 17 Ondas sinusoidal con arcillas de Tosagua 5% de humedad	50
Anexo 18 Ondas sinusoidal con arcillas de Tosagua 10% de humedad	51
Anexo 19 Ondas sinusoidal con arcillas de Tosagua 15% de humedad	51

Capítulo I

1.1 Introducción

El comportamiento mecánico y eléctrico de suelos arcillosos es un campo de estudio fundamental en la ingeniería geotécnica y geofísica. En este estudio, se evalúa la relación entre las propiedades mecánicas (como la resistencia a compresión no confinada y los módulos elásticos) y la propagación de señales eléctricas a través de suelos arcillosos con diferentes niveles de humedad. Las metodologías implementadas buscan integrar enfoques experimentales y computacionales, proporcionando una visión integral de los efectos de la humedad en las propiedades mecánicas y eléctricas de los suelos.

Este análisis es crucial para entender el desempeño de suelos en condiciones controladas, con aplicaciones que van desde el diseño de cimentaciones hasta la caracterización de suelos en proyectos de infraestructura y monitoreo ambiental.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Analizar el comportamiento mecánico y la propagación de señales eléctricas en suelos arcillosos bajo condiciones controladas de humedad, correlacionando las propiedades mecánicas con los parámetros eléctricos obtenidos.

Objetivos específicos

- Determinar la resistencia a compresión no confinada y los módulos elásticos de suelos arcillosos remoldeados con niveles de humedad del 0%, 5%, 10% y 15%.
- Evaluar la propagación de señales eléctricas a través de las probetas mediante mediciones de amplitud, frecuencia y distorsión.



- Analizar la relación entre las propiedades mecánicas y la atenuación/distorsión de las señales eléctricas.
- Generar modelos estadísticos que permitan predecir el comportamiento mecánico y eléctrico en función del contenido de humedad.

1.3 Antecedentes

El análisis de la propagación de señales eléctricas a través de medios como el suelo ha sido un área clave de estudio en disciplinas como la geofísica, la ingeniería civil y las telecomunicaciones. Estos estudios han permitido desarrollar modelos predictivos que ayudan a comprender cómo interactúan las señales con materiales complejos, siendo los suelos arcillosos un tema de especial interés debido a sus características únicas.

Los suelos arcillosos destacan por su alta conductividad eléctrica y su capacidad para retener humedad, factores que tienden a provocar una mayor atenuación y distorsión de las señales eléctricas que los atraviesan. Además, la frecuencia de las señales juega un papel fundamental en su comportamiento: mientras que las señales de baja frecuencia son más eficaces para atravesar medios conductivos, las de alta frecuencia suelen experimentar una mayor dispersión y absorción.

En investigaciones relacionadas con suelos remoldeados, el control de sus propiedades físicas se convierte en una ventaja, ya que permite reducir la variabilidad de las muestras y concentrarse en el análisis de las características intrínsecas del suelo. Yong (1997) subraya la importancia de homogenizar los suelos en este tipo de estudios, especialmente cuando el objetivo es evaluar su impacto en la transmisión de señales eléctricas. En este contexto, la formación Tosagua, ubicada en Ecuador, representa un caso de estudio relevante debido a su alto contenido de arcillas y la influencia significativa que tienen factores como la humedad en sus propiedades físicas y eléctricas.



El uso de generadores de frecuencia y osciloscopios en experimentos es una metodología ampliamente aceptada en este campo. Los generadores permiten controlar con precisión las señales de entrada en términos de frecuencia y amplitud, mientras que los osciloscopios registran y analizan las señales modificadas después de atravesar el suelo, proporcionando una comparación clara entre la señal inicial y la distorsionada. Estas técnicas experimentales se complementan con herramientas computacionales, como la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que facilitan el análisis detallado de los cambios en las señales, tales como atenuación, distorsión y variación de fase.

Por su parte, la formación Tosagua ha sido objeto de estudios debido a su composición rica en arcillas, lo que presenta retos particulares para la propagación de señales eléctricas. Factores como la humedad y la heterogeneidad del suelo complican su caracterización, pero también ofrecen una oportunidad para desarrollar modelos predictivos que puedan aplicarse a proyectos de infraestructura en la región. Las arcillas expansivas en Tosagua generan diversos problemas en las estructuras geotécnicas, como cimentaciones, muros de contención y taludes. Estas arcillas tienen la capacidad de absorber agua, lo que provoca su hinchamiento y expansión. Al secarse, experimentan una contracción significativa, generando movimientos diferenciales en el terreno. Estos movimientos pueden ocasionar grietas en muros, deformaciones en pavimentos, e incluso el colapso de estructuras. La presencia de arcillas expansivas también afecta negativamente la construcción y mantenimiento de vías en Tosagua. Estas arcillas generan inestabilidad en el subsuelo, lo que provoca hundimientos y deformaciones en la superficie de las carreteras. Además, la retención de agua en las arcillas puede ocasionar problemas de drenaje, generando inundaciones y deteriorando la calidad del pavimento.



En este marco, la presente investigación busca integrar herramientas experimentales y computacionales para comprender mejor cómo los suelos arcillosos de la formación Tosagua afectan la propagación de señales eléctricas. Esto permitirá generar modelos precisos y útiles para aplicaciones tanto académicas como prácticas.

Fundamentación Teórica en la Propagación de Ondas

La propagación de ondas en suelos es un fenómeno complejo que involucra la interacción de diversas variables físicas y mecánicas. Los suelos arcillosos, en particular, presentan características únicas que afectan significativamente la manera en que las ondas se propagan a través de ellos. A continuación, se detallan algunos aspectos teóricos clave que sustentan este estudio. En el contexto de suelos, las ondas más comúnmente estudiadas son las ondas de compresión (P) y las ondas de corte (S). Las ondas P son las primeras en llegar a un punto de observación después de un evento sísmico y se caracterizan por la compresión y expansión del material en la dirección de propagación. Las ondas S, por otro lado, se desplazan de forma transversal a la dirección de propagación, causando deformaciones de corte en el material. La velocidad de estas ondas depende de las propiedades elásticas y la densidad del suelo.

Velocidad de Propagación

La velocidad de propagación de las ondas en los suelos arcillosos está influenciada por factores como la porosidad, la saturación de agua, la densidad y la presión efectiva. En general, la velocidad de las ondas P es mayor que la de las ondas S debido a la diferente naturaleza de las deformaciones que inducen. La velocidad de las ondas puede ser expresada mediante las siguientes relaciones:

$$\text{Para ondas P: } V_p = \sqrt{\frac{K+G}{\rho}}$$



$$\text{Para Ondas S: } V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Donde K es el módulo volumétrico, G es el módulo de rigidez, y ρ es la densidad del suelo.

Atenuación y Disipación de Energía

La atenuación de las ondas en suelos arcillosos es un fenómeno crítico que debe ser considerado. La atenuación se refiere a la pérdida de energía de la onda a medida que viaja a través del material, lo cual puede deberse a diversos mecanismos como la absorción interna, la fricción entre partículas y la dispersión. Esta pérdida de energía se manifiesta como una reducción en la amplitud de la onda y se describe por el coeficiente de atenuación, que depende de la frecuencia de la onda y las propiedades del suelo.

Efectos No Lineales

Los suelos arcillosos exhiben un comportamiento no lineal bajo grandes deformaciones, lo que afecta la propagación de las ondas. La no linealidad se manifiesta en la forma de modulaciones en la velocidad de las ondas y cambios en las características de atenuación. Estos efectos son más pronunciados a altas amplitudes de onda y pueden llevar a la generación de armónicos, donde nuevas frecuencias son generadas a partir de la onda original. Modelos matemáticos y numéricos, como los métodos de elementos finitos, son empleados para simular estos comportamientos no lineales y predecir la respuesta del suelo bajo diversas condiciones de carga.

Influencia de la Saturación

La saturación del suelo también juega un papel crucial en la propagación de ondas. Los suelos arcillosos, al tener una capacidad significativa de retención de agua, pueden presentar comportamientos diferentes dependiendo del nivel de saturación. En suelos completamente saturados, las ondas P pueden viajar más rápido debido a la incompresibilidad del agua, mientras



que las ondas S pueden ser más atenuadas debido a la mayor fricción interna. Los modelos de propagación de ondas deben considerar la interacción entre la fase sólida del suelo y el agua intersticial para una predicción precisa

Ensayos dinámicos e instrumentación

Los ensayos de propagación de señales son uno de los procedimientos dinámicos más populares debido a su simplicidad conceptual. Estos ensayos se basan en la propagación de ondas en un medio homogéneo, donde se crea una perturbación mecánica en un punto (fuente) y se mide su llegada en otro punto (receptor). Midiendo la distancia y el tiempo de viaje de la perturbación, se puede calcular la velocidad de propagación. En el campo, estos ensayos se aplican en diferentes configuraciones, como pruebas cross-hole, down-hole, up-hole y basadas en ondas Rayleigh, pero esta investigación se enfoca en pruebas de laboratorio.

En el laboratorio, los ensayos de propagación de señales se han realizado en diversas configuraciones, colocando fuentes y receptores en la superficie de la muestra o enterrándolos dentro de cámaras de calibración. Los esquemas de múltiples receptores alineados, que permiten medir el tiempo de viaje de la perturbación entre receptores alineados, se han utilizado tanto en campo como en laboratorio, aunque su aplicación en equipos estáticos ha sido limitada.

Un avance significativo fue la introducción de elementos flexibles (bender elements) en 1978, que incrementaron la salida mecánica y disminuyeron la frecuencia resonante, superando las limitaciones de los transductores piezoeléctricos tradicionales. Estos elementos permitieron medir velocidades de corte muy bajas, demostrando su viabilidad en exploración de sedimentos marinos blandos y en equipos estándar de pruebas de suelos, como edómetros y aparatos triaxiales.

La comparación entre diferentes tipos de transductores muestra que, aunque los elementos flexibles han sido ampliamente adoptados, los platos de corte para suelos rígidos tienen seguidores

limitados debido a los problemas de recepción atenuada. Los ensayos en cámaras de calibración han utilizado diversos tipos de transductores, como acelerómetros y geófonos, destacando la necesidad de alta amplificación y filtrado para obtener datos interpretables en suelos de rigidez media.

1.4 Hipótesis

El contenido de humedad en suelos arcillosos afecta significativamente sus propiedades mecánicas y su capacidad para atenuar y distorsionar señales eléctricas, estableciendo una correlación directa entre ambas variables.

1.5 Justificación

La presente investigación está justificada por la necesidad de comprender cómo las señales eléctricas se propagan y se distorsionan en suelos arcillosos remoldeados, específicamente en la formación Tosagua. Este conocimiento es fundamental para mejorar técnicas de exploración geofísica, optimizar sistemas de comunicación subterránea y desarrollar modelos computacionales. Históricamente, los suelos arcillosos han sido objeto de numerosas investigaciones debido a su comportamiento complejo y no lineal bajo condiciones dinámicas.

1.6 Diseño Metodológico

El proyecto de investigación se empleará diseño cuantitativo de tipo experimental con posprueba y grupo de control permitiendo la recolección y análisis de datos numéricos que faciliten la comparación estadística entre las diferentes muestras ejecutadas en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura, serán incluidos los resultados que sean representativos para el estudio, en donde se busca evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos mediante la aplicación de la técnica de propagación de ondas, en condiciones controladas. Para la recopilación y recolección de datos se garantizará la confiabilidad de los

resultados mediante la utilización de herramientas validadas y establecidas de forma nacional o internacional. El objetivo es identificar como se ve influenciada la propagación y atenuación de ondas en los suelos arcillosos superficiales de la formación Tosagua. En relación con los aspectos técnicos serán garantizada la correcta implementación de pruebas bajo los respectivos estándares.

Población Y Muestra

La población objetivo está constituida por suelos arcillosos pertenecientes a la formación Tosagua, ubicada en la provincia de Manabí, Ecuador. Se seleccionarán un total 15 representativas utilizando un muestreo aleatorio estratificado, de las cuales fueron para mediciones reales cada cierta distancia para poder recolectar las muestras necesarias. Este método asegurará que se incluyan variaciones geológicas relevantes dentro de la formación.

Técnica De Recolección De Datos

Para la recolección de datos se utilizó un generador de frecuencias proporcionado por la carrera de ingeniería eléctrica el cuál es un dispositivo o instrumento que produce señales eléctricas oscilatorias a una frecuencia específica, estas señales pueden ser de forma sinusoidal, cuadrada, triangular, o de pulso, también se hizo uso de un osciloscopio el cual permite medir y visualizar señales eléctricas en un determinado tiempo.

Se inicio con la preparación del medio, es decir, se toma la muestra o probetas representativas del suelo, se verifica los parámetros como humedad, densidad y distintos tipos de suelo.

En la configuración del equipo para el generador de frecuencias, se selecciona la forma de la onda que puede ser sinusoidal, cuadrada o triangular, se ajusta la frecuencia inicial la cual se



puede ajustar según el rango que se necesite desde 1 Hz a 1 MHz. Se configura la amplitud de la señal para que sea adecuada para el medio.

Cuando se tienen listas las probetas de suelo, se colocan los electrodos emisores y receptores en puntos específicos del suelo.

Para que la señal sea visible, se conecta el osciloscopio al generador y al electrodo receptor, donde se configura la escala de amplitud para observar las señales. El generador de frecuencia envía señales de diferente frecuencia al suelo, luego en el osciloscopio, se observa las señales transmitidas y recibidas. Se observarán las diferencias en amplitud, frecuencia o forma de onda debido a la propagación a través del suelo.

Esto se repetirá las veces que sean necesarias donde se tomarán datos de distinto tipos de suelos y diferentes porcentajes de humedades en las arcillas de Tosagua.

Procedimiento

Para el procedimiento del estudio se desarrollará en varias etapas:

- **Revisión bibliográfica:** Se llevará a cabo una revisión exhaustiva sobre información fidedigna que aporte a la investigación relacionada con el comportamiento mecánico de suelos arcillosos y técnicas de propagación de ondas.
- **Recolección de muestras:** Se realizarán actividades en campo para obtener las muestras inalteradas y remoldeados.
- **Ensayo de propagación de ondas:** Se aplicará esta técnica en cada muestra bajo condiciones controladas.
- **Análisis estadístico:** Los datos recolectados serán analizados para extraer conclusiones significativas.

Limitaciones Del Estudio

Las principales limitaciones de este estudio radican en la variabilidad inherente de las propiedades de los suelos arcillosos, incluso dentro de la misma formación geológica, lo que puede dificultar la generalización de los resultados. Además, el proceso de remoldear las muestras podría alterar sus características naturales, afectando la propagación y distorsión de las señales eléctricas. A esto se suma la posible discrepancia entre las condiciones controladas de laboratorio y las condiciones reales en campo, así como las restricciones en la precisión y sensibilidad de los equipos utilizados para generar, registrar y analizar las señales. Finalmente, el procesamiento computacional puede enfrentarse a limitaciones relacionadas con la modelización precisa de las interacciones complejas entre las señales y las propiedades del suelo.

CAPÍTULO II

2.1 Marco teórico

2.2 Introducción a la formación Tosagua y sus suelos.

La formación Tosagua, ubicada en la región costera de Manabí, Ecuador, es un estrato sedimentario que data del Mioceno medio-superior. Esta formación está compuesta predominantemente por depósitos arcillosos, con inclusiones de limos y areniscas finas. Su origen marino y continental hace que sus características litológicas sean de particular interés para estudios geotécnicos y de dinámica de suelos (Jiménez & Zambrano, 2019), especialmente en zonas con alta sismicidad, como región costera de Ecuador. Debido a su composición, los suelos de esta formación presentan alta plasticidad y una sensibilidad considerable a cambios en la humedad y la estructura, factores clave para el comportamiento mecánico.

Desde una perspectiva geotécnica, los suelos arcillosos de la Formación Tosagua son utilizados comúnmente como base para proyectos de infraestructura en la región. Sin embargo, debido a sus características de compresibilidad y sensibilidad a la remodelación representan desafíos significativos (Pérez & Cabrera, 2021), es fundamental entender cómo estos suelos se comportan bajo condiciones dinámicas. Este análisis se vuelve especialmente relevante para evaluar su respuesta frente a eventos sísmicos, dadas las altas tasas de actividad tectónica del cinturón costero del Pacífico.

Desde una perspectiva geotécnica, el interés por los suelos de la formación Tosagua no solo radica en sus características mecánicas, sino también en su respuesta frente a eventos sísmicos. Su alta plasticidad, combinada con una capacidad limitada para disipar cargas, los hace susceptibles a fenómenos como la licuefacción, que puede ocurrir durante terremotos. En este contexto, comprender las propiedades eléctricas y dinámicas de los suelos arcillosos remodelados de esta



formación es esencial para desarrollar modelos predictivos y mejorar la resistencia de infraestructura locales. (K & Pastor, 2022)

El análisis de señales eléctricas en suelos arcillosos es esencial para entender sus propiedades físicas y químicas. En suelos remodelados, los procesos de compactación o remoción alteran la estructura y composición, afectando propiedades como la conductividad y la atenuación de señales, fundamentales en estudios geofísicos y de ingeniería.

Los minerales, como montmorillonita, caolinita e illita, influyen significativamente en el comportamiento eléctrico. La montmorillonita, con alta capacidad de retención de agua e intercambio catiónico, mejora la conductividad, mientras que la caolinita, con menor retención, reduce este efecto. La mineralogía es crucial para modelar y predecir respuestas eléctricas.

Propiedades de los suelos arcillosos

Los suelos arcillosos son materiales de gran relevancia en Ecuador en el área de geotecnia y en ingeniería civil, las propiedades de los suelos arcillosos están determinadas en gran medida por su composición mineralógica y estructura interna, las cuales controlan su respuesta ante esfuerzos mecánicos y su interacción con el agua.

Propiedades Geotécnicas de los suelos Arcillosos Remodelados.

La caracterización geotécnica de los suelos arcillosos de la formación Tosagua incluye análisis granulométricos, límites de Atterberg y ensayos de compactación. Su alta plasticidad y sensibilidad a la remodelación afectan su comportamiento mecánico y dinámico, lo que ha sido ampliamente documentado en estudios de suelos de la costa ecuatoriana. (Gómez & Morales, 2020).

El proceso de remodelación altera la microestructura el suelo, reduciendo su rigidez y resistencia al esfuerzo cortante. En suelos arcillosos como los de Tosagua, esta alteración puede

resultar en una disminución significativa en la velocidad de ondas sísmicas, lo cual ha sido evidenciado en ensayos de laboratorio donde las velocidades de las ondas S disminuyen hasta un 50% después de la remodelación.

Las propiedades de plasticidad, definidas por los límites líquidos y plásticos, son factores determinantes en el análisis geotécnico. En suelos remodelados, los altos valores de plasticidad resultan en un incremento en la dispersión de partículas, afectando su estabilidad y potencial de licuación, (Gómez & Morales, 2020). Además, la compactación y el contenido de humedad son variables críticas para entender la dinámica del material bajo condiciones de carga.

Ensayos realizados en muestras de Tosagua han demostrado que la compactación a densidades óptimas mejora parcialmente las propiedades mecánicas, aunque no compensa completamente la pérdida de estructura natural. Esto refuerza la necesidad de aplicar metodologías avanzadas para analizar suelos remodelados en contextos dinámicos. (Torres & Sánchez, 2021).

Propiedades eléctricas de los suelos arcillosos de Tosagua

Los suelos arcillosos presentan una conductividad eléctrica elevada debido a la presencia de minerales arcillosos que absorben agua y sales. Esto permite una mejor propagación de señales eléctricas, pero también introduce distorsiones por la alta capacidad de retención de carga.

La modelización computacional de este fenómeno permite predecir cómo los suelos arcillosos afectan las señales electromagnéticas, siendo clave en aplicaciones como prospección geofísica.

Las propiedades dieléctricas de los suelos de Tosagua dependen del contenido de agua y la frecuencia de las señales aplicadas. A frecuencias bajas, las señales tienden a penetrar más

profundamente, pero con una mayor distorsión a la capacitancia inducida por las partículas de arcilla.

Composición de los Suelos Arcillosos

Los suelos arcillosos son una de las fracciones más importantes en la clasificación de suelos, caracterizados por su alta proporción de partículas finas de arcilla, específicamente aquellas con un diámetro menor a 0.002 mm. En Ecuador, donde la geología, el clima varían considerablemente y la actividad tectónica, que generan una alta tasa de alteración de materiales geológicos, (INIGEMM, 2017), los suelos arcillosos presentan características únicas que influye en su comportamiento mecánico y en su uso en diversas aplicaciones, como agricultura y construcción.

De partículas muy finas donde está compuesta predominantemente por minerales de arcilla, estos minerales son productos de la descomposición química de rocas madre y son responsables de las propiedades distintivas de los suelos arcillosos, como su plasticidad, compresibilidad y capacidad de retener agua. (Mitchell & Soga, 2005)

Importancia de los minerales y su impacto en las propiedades eléctricas de los suelos Arcillosos.

Relevancia de los minerales en los suelos arcillosos

Los suelos arcillosos están constituidos principalmente por minerales de filosilicatos como montmorillonita, caolinita e illita. Cada uno tiene propiedades específicas que influyen en el comportamiento eléctrico del suelo:



Montmorillonita: Mineral con alta capacidad de intercambio catiónico (CEC) y alta retención de agua. Esto genera una mayor conductividad eléctrica debido a la presencia de iones móviles y la absorción de agua.

Caolinita: Mineral con baja CEC y baja retención de agua, lo que resulta en menor conductividad eléctrica.

Illinita: Propiedades intermedias, influyendo moderadamente en la conductividad eléctrica.

1.7 2.3 Propiedades eléctricas influenciadas por Minerales

Conductividad Eléctrica: La conductividad eléctrica en suelos arcillosos depende directamente de la cantidad de agua adsorbida por los minerales y de la presencia de iones en la solución del suelo. La montmorillonita, al adsorber más agua y cationes, incrementa significativamente la conductividad en comparación con otros minerales como la caolinita. (Avilés & Ortiz-Hernandez, 2020).

Capacidad Dieléctricas: Los suelos con un alto contenido de montmorillonita presentan una permitividad eléctrica mayor. Esto afecta la propagación de ondas electromagnéticas, causando variaciones en la amplitud y la velocidad de las señales, especialmente en estudios de propagación en suelos arcillosos. (Chunga & Mulas, 2018).

Atenuación y distorsión de señales: La heterogeneidad en la composición mineral afecta la propagación de señales eléctricas. Los minerales como la montmorillonita, con alta capacidad de adsorción, causan una mayor atenuación y dispersión de las señales, complicando su interpretación en estudios geofísicos y de ingeniería eléctrica. (Díaz & Suclupe, 2021)



Impacto en el procesamiento computacional de señales

En aplicaciones que involucran modelado de propagación de señales eléctricas, como el análisis computacional de señales en suelos arcillosos, es crucial considerar:

Distribución Mineralógica: La variabilidad en la distribución espacial de los minerales genera heterogeneidades eléctricas.

Propiedades específicas: Las características dieléctricas y de conductividad deben incorporarse para modelar correctamente el comportamiento del suelo.

Relación entre minerales y propiedades geotécnicas

Los minerales también afectan las propiedades mecánicas de los suelos. Por ejemplo, la montmorillonita, debido a su alta plasticidad, presenta mayor susceptibilidad a la expansión y contracción, lo que afecta indirectamente las propiedades eléctricas al alterar el contenido de humedad y la compactación del suelo.

Parámetros relevantes en Ecuador

En Ecuador, el análisis de las propiedades de los suelos arcillosos es crucial debido a la interacción de factores geológicos, climáticos y antrópicos.

- **Índice de Plasticidad (IP):** Valores elevados en las arcillas de la Costa, que oscilan entre 30% y 50%. Indican alta plasticidad y comportamiento expansivo.
- **Límite líquido (LL) y Límite (LP):** Estos parámetros ayudan a clasificar las arcillas según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS). En la región del Guayas, las arcillas suelen presentar LL superiores a 50 %.
- **Expansividad:** Asociada con suelos ricos en montmorillonita, presentes en zonas bajas y depósitos fluviales.



- **Fuerza cortante No Drenada (S_u):** En Quito, las arcillas sometidas a análisis triaxial muestran una resistencia no drenada promedio de 20-30 kPa, dependiendo de su grado de compactación.

Comportamiento Mecánico de los suelos arcillosos

Los suelos arcillosos presentan características únicas debido a su composición mineralógica, textura fina u alta capacidad de retención de agua. Estas propiedades son críticas en el análisis geotécnico y en estudios dinámicos, como la propagación de ondas, especialmente en regiones sísmicamente activas como Ecuador. La estructura y textura afectan significativamente la propagación de ondas en estos suelos, lo que tiene implicaciones prácticas en el diseño de cimentaciones y la evaluación de riesgos sísmicos.

En Ecuador, los suelos de la formación Tosagua, compuestos predominantemente por arcillas, son de interés particular debido a su sensibilidad y comportamiento dinámico frente a alteraciones como la remodelación.

Estructura del suelo y propagación de ondas.

La estructura del suelo se refiere a la disposición geométrica de las partículas y agregados.

1. Tamaño y forma de las partículas: Los suelos arcillosos están compuestos generalmente por partículas menores a 0.002 mm. La forma plana y laminada de estas partículas genera estructuras en láminas o escamas, que afectan el paso de ondas longitudinales y transversales.

2. Uniones entre partículas: La capacidad de las interacciones entre partículas para resistir deformaciones controla cómo se propagan las ondas. En suelos arcillosos del Ecuador, las condiciones climáticas y los ciclos de humectación-secado



pueden alterar significativamente estos enlaces, modificando el módulo elástico efectivo del suelo. (Cevallos & Cobo, 2021)

3. Porosidad y distribución de poros: La porosidad alta típica en algunos suelos arcillosos disminuye la velocidad de propagación de las ondas debido a la mayor capacidad del suelo para absorber energía. Según informes del (INAMHI, 2022), en el Ecuador, los suelos arcillosos en la región costa presentan porosidades promedio del 35%-45%, lo que implica una velocidad reducida de ondas P y S.

Textura del Suelo y propagación de Ondas

La textura del suelo está determinada por la proporción de partículas de arena, limo y arcilla, lo que influye en las propiedades mecánicas y dinámicas de este. En los suelos arcillosos, la textura está dominada por partículas muy finas, y esto afecta la propagación de ondas de la siguiente forma:

1. Velocidad de ondas P y S: La textura controlada por partículas finas reduce la rigidez general del medio, disminuyendo las velocidades de las ondas sísmicas primarias (ondas P) y secundarias (ondas S). En estudios realizados en zonas como el valle de los chillos, Quito, a velocidad promedio de ondas S en suelos arcillosos varía entre 120-180 m/s para profundidades menores a 10 m. (Cevallos & Cobo, 2021).

2. Atenuación de las ondas: en los suelos de textura arcillosa, las ondas sísmicas experimentan una mayor atenuación debido a la disipación de energía en forma de calor. Esta propiedad es crítica en regiones con suelos arcillosos saturados, como la cuenca del Guayas.



En Ecuador se presenta diversidad de condiciones geológicas que influyen en las propiedades dinámicas de los suelos arcillosos. Factores como la alta pluviosidad, actividad tectónica y diversidad litológica impactan las características del suelo. Según investigaciones realizadas por (Pérez & Lopez, 2019), menciona que los suelos arcillosos en la región Interandina, como Quito, tienen una sensibilidad significativa a la saturación, lo que puede disminuir drásticamente la rigidez del suelo y aumentar su amortiguamiento.

En la Costa, debido a la alta concentración de minerales expansivos, generan cambios volumétricos, lo que afecta a la propagación de ondas en términos de velocidad y atenuación. (INEC, 2020)

Entre los parámetros dinámicos que están relacionados está:

- 1. Módulo de Rigidez (G):** Este parámetro es fundamental para entender la relación entre el esfuerzo y las deformaciones en los suelos arcillosos. En Ecuador, los valores típicos para suelos arcillosos no saturados oscilan entre 20 MPa y 50 MPa.
- 2. Relación de Poisson (ν):** Los suelos arcillosos del Ecuador suelen mostrar una relación de Poisson de 0.3 a 0.4, donde se observa la incompresibilidad del material.
- 3. Densidad y saturación:** La densidad de los suelos arcillosos varía entre 1.6 y 2.1 g/cm³. En suelos completamente saturados, el agua que ocupa los espacios que rodean el suelo actúa como amortiguador de las ondas.

2.4 Fundamentos de la propagación de ondas

La propagación de ondas sísmicas en el suelo es un fenómeno de especial importancia en sismología e ingeniería civil, lo que permitirá comprender cómo se transmiten las vibraciones generadas por terremotos y otras fuentes sísmicas a través de distintos materiales geológicos. Esta

propuesta es fundamental para la evaluación del riesgo sísmico y el diseño de estructuras antisísmicas.

Krammer, introduce conceptos relacionados con las propiedades dinámicas del suelo, incluyendo velocidad de ondas P y S, además de los efectos de la presión efectiva y la heterogeneidad del medio. Esto complementa la base teórica sobre las leyes de propagación de ondas sísmicas y su relación con la mecánica del suelo.

2.5 Ondas mecánicas

Las ondas mecánicas son perturbaciones que se propagan a través de un medio material elástico, transportando energía sin desplazar materia de manera neta. Estas ondas requieren un medio físico, que puede ser sólido, líquido o gaseoso, para su propagación. A diferencia de las ondas electromagnéticas, que pueden viajar a través del vacío, las ondas mecánicas dependen de la interacción entre las partículas del medio para transmitirse. (Pérez & Merino, 2022)

2.6 Tipos de ondas mecánicas

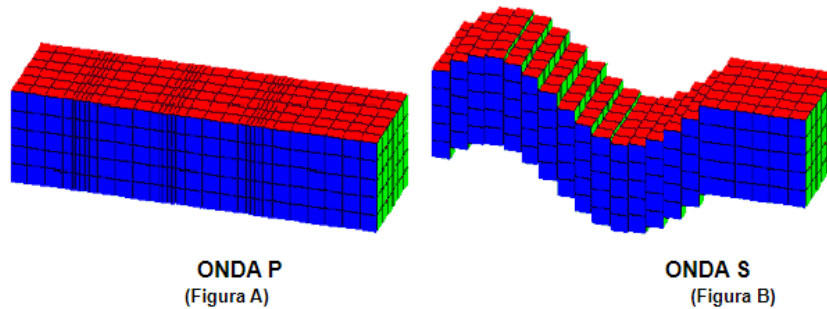
Ondas P (Primarias): Son ondas longitudinales las cuales el suelo es altamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Son las más rápidas, viajando a través de sólidos, líquidos y gaseoso. (StudySmarter, 2023) En su paso estas comprimen y expanden el material en la dirección de propagación. La velocidad de las ondas P está determinada por los parámetros elásticos del medio, conocidos como los módulos de Lamé (λ y μ) y la densidad material

Ondas Secundarias (S): Son ondas transversales o de corte, lo cual significa que el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es alrededor de 58% la de una onda P para



cualquier material sólido, usualmente la onda S tiene mayor amplitud que la P y se siente más fuerte que esta. (LPI, s.f.)

Ilustración 1 Ondas de Volumen-Ondas Sísmicas



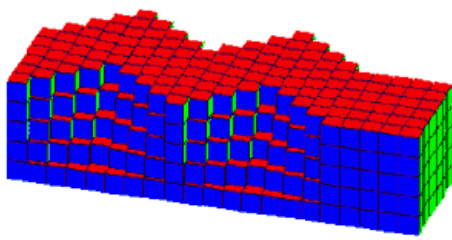
Fuente 1 Ondas Sísmicas, UDC

1. **Ondas superficiales:** Son ondas que viajan a lo largo de la superficie de la Tierra, son más lentas que las ondas S, pero tienden a ser más destructivas porque tienen mayores amplitudes y causan más movimiento en la superficie. Estas se clasifican en Ondas Rayleigh y Ondas Love.

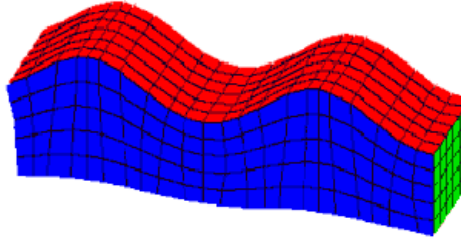
4. **Ondas Rayleigh:** Combinan movimientos verticales y horizontales.

5. **Ondas Love:** Generan desplazamientos horizontales perpendiculares a la dirección de la propagación.

Ilustración 2 Ondas de Superficie



ONDA LOVE
(Figura C)



ONDA RAYLEIGH
(Figura D)

Fuente 2 Ondas Sísmicas, UDC

Principios Físicos De La Propagación De Ondas (Leyes Fundamentales)

La propagación de ondas es un fenómeno físico que ocurre en diferentes situaciones, desde las ondas de sonido hasta las ondas sísmicas. El proceso está determinado por las leyes de conservación de la energía y el momento, después de una perturbación, como un terremoto o una directriz de sonido, la energía se transfiere a las partículas cercanas y hace que la energía se mueva por los materiales. Por lo tanto, es importante comprender las leyes que rigen el proceso, como la ley de Hooke, que define la forma en que los materiales recuerdan a las fuerzas externas. También es relevante entender las ecuaciones que determinan el trabajo de las ondas tanto en un material específico como en diferentes materiales debido a su capacidad para hacer predicciones basadas en condiciones dadas. De esta forma, los conceptos ofrecen una comprensión suficiente de la propagación de ondas en varios casos.

Ley de Hooke

La ley de Hooke es aplicable en el contexto de la propagación de ondas en suelos, particularmente para describir el comportamiento elástico de los materiales en respuesta a las fuerzas. La ley establece que la deformación de un material es proporcional a la fuerza aplicada, dentro del rango elástico del material, si el suelo se deforma más allá de su límite elástico, se



producirá deformaciones plásticas o irreversibles, y la ley de Hooke ya no aplicaría en este caso, lo que es fundamental para entender como las ondas sísmicas o mecánicas se propagan a través de los suelos.

Cuando las ondas se propagan en un medio sólido como el suelo, estas generan fuerzas elásticas que corresponden a las deformaciones producidas por dichas ondas. Estas fuerzas elásticas son proporcionales a las deformaciones, siguen el principio descrito por la ley de Hooke. En términos de propagación de ondas, esta ley ayuda a describir cómo el esfuerzo y la deformación se relacionan, lo que a su vez afecta la velocidad y comportamiento de las ondas.

La ley de Hooke establece que la Fuerza F aplicada a un material elástico es proporcional a la deformación Δx que experimenta, dentro del límite elástico del material:

$$F = -k\Delta x$$

Donde:

F : Fuerza aplicada al material.

k : Constante elástica o de rigidez del material

Δx : Deformación (elongación o compresión)

Mencionando a las ondas en los suelos, esta ley describe cómo se comporta el material bajo una deformación causada por la prolongación de ondas.

Relación Entre La Velocidad De Las Ondas Sísmicas Y Los Módulos Elásticos: Las velocidades de propagación de las ondas sísmicas están directamente relacionadas con las propiedades elásticas del suelo, que siguen el comportamiento descrito por la ley de Hooke. Las fórmulas para las velocidades de las ondas de compresión (v_p) y de corte (v_s) en un medio elástico homogéneo son las siguientes:



Velocidad de las ondas de compresión (Ondas P)

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

Donde:

K: Módulo de compresibilidad o volumen

G: Módulo de cizallamiento

ρ : Densidad del material

Velocidad de las ondas de corte (Ondas S): Las ondas S dependen únicamente del módulo de corte G, lo que refleja como el suelo resiste las deformaciones laterales.

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Ecuaciones de ondas: Describen la propagación de ondas son fundamentales para entender cómo se transmiten las perturbaciones a través de un medio. La ecuación de onda es una ecuación diferencial describe cómo una función escalar (como desplazamiento o presión) varía con respecto al tiempo y el espacio. Muestra que la aceleración del desplazamiento en un punto dado depende de la curvatura del desplazamiento en ese punto y sus alrededores, la solución a esta ecuación proporciona información sobre cómo se comporta una onda a medida que se propaga a través del medio. La forma general de la ecuación de onda unidimensional es:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Donde:

u: Representa la variable que describe la onda (como el desplazamiento)

v: Velocidad de propagación de la onda



t: Tiempo

x: Posición en el medio

Principio de Huygens: Este principio establece que cada punto en un frente de onda puede considerarse como una fuente secundaria de ondas. Esto implica que el nuevo frente de onda se forma a partir de estas fuentes secundarias, lo que permite entender cómo las ondas se difractan y propagan.

Principio de Fermat: Este principio indica que una onda seguirá el camino que toma el menor tiempo para llegar a su destino. Este concepto es crucial para entender fenómenos como la refracción y reflexión.

Conceptos de Impedancia acústica y reflexión/transmisión en interfaces

Principios de la Impedancia Acústica

La impedancia acústica es un concepto clave en la acústica que describe la resistencia que un medio ofrece a las ondas sonoras que se propagan a través de él. Se define como el producto de la densidad del medio (ρ) y la velocidad del sonido en ese medio (c), expresándose matemáticamente como:

$$Z = \rho * c$$

ρ : Densidad del medio (kg/m^3)

c : Velocidad del sonido (m/s)

Z : Impedancia acústica, medida en rayl ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$)

Importancia de la impedancia acústica

La impedancia acústica es fundamental para entender cómo los materiales interactúan con el sonido. Un material con alta impedancia acústica reflejará más sonido, mientras que uno con

baja impedancia será más efectivo en absorberlo. Esto tiene implicaciones significativas en el diseño acústico de espacios como auditorios y estudios de grabación, donde se busca optimizar la claridad del sonido o minimizar el ruido.

La impedancia acústica y su influencia en la reflexión y transmisión de ondas. Sería útil al desarrollar la comprensión de como las interfaces entre materiales con diferentes propiedades afectan la propagación.

Propiedades acústicas

Frecuencia: El número de oscilaciones por segundo de una onda sonora, medido en hertzios (Hz). La frecuencia afecta la percepción del tono del sonido.

Longitud de onda: La distancia entre dos crestas consecutivas de una onda sonora, que varía inversamente más largas, lo que puede dificultar su absorción.

Reflexión y Transmisión en Interfaces

Cuando una onda sonora alcanza una interfaz entre dos medios con diferentes impedancias acústicas, parte de la energía de la onda se refleja y parte se transmite. La cantidad de energía reflejada se puede calcular utilizando el coeficiente de reflexión (R) y transmisión (T) dependen del grado de desajuste entre las impedancias acústicas de ambos medios Z_1 y Z_2 (Pierce, 1989), que se define como:

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$



$Z_1 + Z_2$ son las impedancias acústicas de los dos medios involucrados. Este coeficiente indica que cuanto mayor sea la diferencia entre las impedancias acústicas de los medios, mayor será la cantidad de energía reflejada y menor la transmitida.

Ley de Snell

La dirección del haz transmitido al cruzar la interfaz también cambia, siguiendo la ley de Snell, que relaciona los ángulos de incidencia y refracción con las velocidades del sonido en los dos medios:

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{c_1}{c_2}$$

Donde:

θ_1 : Ángulo de incidencia

θ_2 : Ángulo de refracción

Parámetros Característicos

Frecuencia

La frecuencia (f) de una onda se define como el número de oscilaciones o ciclos completos como una onda sísmica, que se producen en una unidad de tiempo, generalmente expresada en Hz donde 1 Hz=1 ciclo por segundo.

La frecuencia es un parámetro crítico en estudios geotécnicos, especialmente en el análisis de la respuesta dinámica del suelo ante cargas, como las generadas por terremotos o maquinaria pesada. En ese sentido, frecuencias más altas pueden provocar resonancia en estructuras y suelos, lo que puede llevar a los fallos estructurales si no se consideran adecuadamente en el diseño.



En estudios de respuesta sísmica del terreno, la frecuencia natural del suelo y su interacción con la frecuencia de excitación de una estructura son clave para evaluar posibles resonancias que pueden amplificar las vibraciones. (Kramer, 1996)

Matemáticamente, la frecuencia está dada por:

$$f = \frac{1}{T}$$

Donde:

T: Periodo de la onda

Representa el tiempo que tarda en completar un ciclo. La frecuencia también se utiliza en pruebas como el ensayo de ondas superficiales (MASW), para identificar las propiedades dinámicas del suelo, como el módulo de corte y el coeficiente de amortiguamiento.

La frecuencia de una onda depende principalmente de la fuente de la vibración y de las características dinámicas del suelo, como la rigidez y la densidad. El medio actúa como un filtro que atenúa o amplifica ciertas frecuencias debido a:

1. **Rigidez del medio (módulo de corte, G):** En un suelo más rígido favorece la transmisión de ondas con frecuencias más altas, mientras que un suelo menos rígido tiende a filtrar estas frecuencias. Esto es crítico en la respuesta sísmica local, donde suelos blandos pueden amplificar frecuencias bajas que coinciden con la frecuencia natural de las estructuras.

2. **Densidad (ρ):** La densidad del suelo afecta indirectamente a la frecuencia al influir en la velocidad de propagación. Un aumento en la densidad puede reducir la frecuencia observable en el terreno debido a una mayor absorción de energía.



Longitud de Onda

La longitud de onda es la separación entre dos puntos sucesivos de una onda que comparten la misma fase, como dos picos o dos valles. En mecánica de suelos, la longitud de onda es crucial para comprender la transmisión de las ondas sísmicas a través del suelo y comúnmente se representa con la letra griega (λ) y se mide en metros.

La longitud de onda está relacionada con la frecuencia y la velocidad de propagación mediante la fórmula:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Donde:

v : Velocidad de propagación

f : Frecuencia

La relación implica que si la velocidad de propagación es constante en un medio dado y la frecuencia aumenta, la longitud de onda disminuirá. (Khan Academy, s.f.)

En estudios geotécnicos, el conocer la longitud de onda ayuda a evaluar como las ondas sísmicas interactúan con diferentes capas del suelo, lo que es importante para el diseño adecuado de cimentaciones y estructuras. (Bourne, 2012)

1. **Elasticidad del medio:** En suelos rígidos con altos valores de G , la velocidad de propagación es mayor, resultando en longitudes de onda más largas para una frecuencia dada. En suelos blandos o saturados, las longitudes de onda tienden a ser más cortas.

2. **Profundidad de penetración:** La longitud de onda está relacionada con la profundidad efectiva a la que las ondas pueden influir en el medio. Longitudes de onda



más largas penetran más profundamente en el suelo, proporcionando información sobre capas profundas.

Velocidad de Propagación

La velocidad de propagación (v) de una onda en el suelo describe la rapidez con la que la perturbación se mueve a través del medio. Para mecánica de suelos, esta propiedad es esencial para determinar las características dinámicas del terreno, especialmente la rigidez y la capacidad de amortiguamiento del suelo. Esta velocidad varía dependiendo del tipo de material y su estado consolidado o no consolidado.

Para ondas elásticas en suelos, como las ondas P que son ondas primarias o de compresión y las ondas S que son las ondas secundarias o de corte, la velocidad depende de las propiedades elásticas del suelo.

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

$$v_p = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Donde:

K: Módulo volumétrico del suelo

G: Módulo de corte

ρ : Densidad del suelo

1. **Rigidez del medio:** Un módulo de corte alto, en donde suelos compactos o rocas aumentan la velocidad de propagación, mientras que suelos blandos, saturados o con baja rigidez reducen significativamente esta velocidad.



2. **Densidad:** Un aumento en la densidad del medio reduce la velocidad de las ondas, aunque este efecto es menos pronunciado que el de la rigidez.

3. **Nivel de saturación:** La presencia de agua en los poros puede aumentar la velocidad de las ondas P debido al incremento en el módulo volumétrico K, pero disminuye la velocidad de las ondas S al reducir el módulo de corte efectivo.

Amplitud

La amplitud se refiere al desplazamiento máximo desde el punto medio en una onda. En términos acústicos y geotécnicos, representa el nivel máximo de presión sonora o deformación que alcanza una onda. En estudios de suelos, una mayor amplitud puede indicar un mayor nivel de energía transmitida a través del suelo.

La amplitud está relacionada con la intensidad del sonido o vibraciones generadas por fenómenos como explosiones o terremotos. En mecánica de suelos, el entender como varía la amplitud durante un evento sísmico puede ayudar a predecir el nivel de daño potencial a las estructuras. (Chopra, 2012)

Además, está relacionada con la energía que transporta y las características de atenuación del medio:

1. **Densidad:** Un medio más denso absorbe más energía, reduciendo la amplitud de las ondas a medida que se propagan.

2. **Rigidez:** Suelos rígidos tienden a mantener amplitudes más altas, ya que tienden menor capacidad de amortiguamiento interno.

3. **Amortiguamiento del medio:** En suelos con alto coeficiente de amortiguamiento, como las arcillas saturadas, las ondas pierden rápidamente su



amplitud. Esto ocurre debido a la disposición de energía en forma de calor y deformación viscosas.

Los parámetros de las ondas y las propiedades del medio están interrelacionados y afectan a distintos procesos como:

Respuesta sísmica local: Suelos blandos amplifican amplitudes y prolongan el tiempo de vibración, mientras que suelos rígidos transmiten ondas más rápidamente.

Evaluación de licuación: Reducción en la velocidad de ondas S en suelos saturados indica un aumento en la susceptibilidad a la licuación.

Análisis de estabilidad: Atenuación de amplitudes puede indicar zonas de alta amortiguación, mientras que la amplificación apunta a posibles problemas de estabilidad estructural.

2.5 Propagación de señales eléctricas en medios porosos

La propagación de señales eléctricas en medios porosos es un fenómeno de gran relevancia en disciplinas como la geofísica, la ingeniería civil y la geotecnia. Este proceso implica el movimiento de corrientes eléctricas a través de materiales con estructuras heterogéneas, como los suelos, que presentan variaciones en sus propiedades físicas y químicas. Estas señales se ven afectadas por factores como la composición mineralógica, la saturación de agua y la textura del medio, lo que resulta en una propagación que puede sufrir atenuación, dispersión y distorsión.

La investigación sobre este tema no solo permite comprender las propiedades eléctricas de los suelos, sino también desarrollar modelos computacionales para predecir su comportamiento frente a estímulos eléctricos. En el caso de los suelos arcillosos de la formación Tosagua, estas investigaciones son fundamentales para caracterizar su respuesta eléctrica y estudiar cómo los procesos de remoldeado afectan las propiedades dieléctricas y la conducción eléctrica.



Conductividad eléctrica

Mide la capacidad de un material para permitir el flujo de corriente eléctrica y en los suelos depende de factores como el contenido de agua, la salinidad y la estructura porosa. En suelos arcillosos, alta conductividad se atribuye al agua intersticial rica en iones, que actúan como portadores de carga. Según investigaciones de Rubio y Álvarez (2009), la interacción entre los iones y las partículas arcillosas puede intensificar la conductividad debido a la carga superficial de las partículas.

Resistividad eléctrica

Inversamente proporcional a la conductividad y es un parámetro útil para identificar variaciones en la saturación de agua y la densidad del suelo. Los suelos arcillosos, aunque tienen resistividades bajas en condiciones saturadas, pueden mostrar resistencias más altas cuando están compactadas o tienen menor contenido de agua. (Gómez Treviño, 2005). Este parámetro se utiliza ampliamente en métodos de prospección eléctrica.

Capacitancia

Representa la capacidad de un material para almacenar carga eléctrica, está directamente influenciada por la constante dieléctrica del material y la estructura de los poros. En suelos arcillosos, la capacitancia es alta debido a la polarización interfacial y la capacidad de las partículas para retener cargas en sus superficies.

Principios físicos detrás de la propagación de señales en suelos porosos.

La propagación de señales eléctricas en suelos porosos depende de la conducción iónica y los fenómenos de polarización. En suelos saturados, el agua intersticial actúa como el principal medio conductor, y la eficiencia de la propagación se ve influenciada por la concentración de iones

disueltos y su interacción con las partículas sólidas. En suelos arcillosos, la elevada área superficial y la disposición de partículas facilitan esta conducción. (Custodio & Llamas, 2001).

Un aspecto clave en la propagación de señales eléctricas es la polarización dieléctrica, la cual se genera por la acumulación de cargas eléctricas en las interfaces entre sólidos y líquidos. Este fenómeno presenta un comportamiento que varía con la frecuencia, lo que permite su estudio a través de técnicas como la espectroscopía eléctrica. En el caso de las partículas de arcilla, su elevada carga superficial amplifica este efecto, dando lugar a una respuesta eléctrica más compleja en los suelos arcillosos.

Por otro lado, la atenuación de las señales eléctricas en medios porosos ocurre debido a procesos de dispersión y pérdida de energía en forma de calor. La magnitud de esta atenuación está determinada por las propiedades dieléctricas del material y su configuración interna. En los suelos arcillosos remoldeados, los cambios en la estructura de los poros generan alteraciones significativas en el nivel de atenuación, lo que afecta la propagación de las señales eléctricas. Estas variaciones pueden analizarse mediante modelos que simulan el comportamiento de las señales bajo diferentes grados de compactación.

En conclusión, la transmisión de señales eléctricas en medios porosos, y particularmente en suelos arcillosos remoldeados, está influenciada por una interacción compleja entre las propiedades eléctricas del material y su estructura física. La comprensión de estos mecanismos resulta fundamentalmente para desarrollar modelos computacionales que permitan analizar y caracterizar el comportamiento eléctrico de estos suelos, con aplicaciones específicas en el ámbito geotécnico, como en el caso de la formación Tosagua.



Efecto de humedad y porosidad: Cambios en resistividad eléctrica

La transmisión de señales eléctricas en medios porosos, como los suelos arcillosos remoldeados, depende significativamente de factores como la humedad y la porosidad. Estos elementos afectan de manera directa la resistividad eléctrica, que es un indicador fundamental de las características del suelo. En términos generales, a medida que aumenta el contenido de agua en el suelo, la resistividad eléctrica disminuye. Esto ocurre porque el agua facilita el movimiento de los iones disueltos, actuando como un medio conductor. Investigaciones han demostrado que suelos con altos niveles de humedad presentan menor resistividad debido a que la mayor cantidad de agua en los poros favorece la conectividad eléctrica entre las partículas minerales.

Por su parte, la porosidad, definida como el porcentaje de vacíos dentro del suelo, también influye en la propagación de señales eléctricas. Los suelos con alta porosidad tienen una mayor capacidad de señales eléctricas para retener agua, lo que aumenta su conductividad eléctrica. Sin embargo, en situaciones donde los poros no están completamente saturados, la resistividad tiende a ser mayor, ya que el aire presente en estos espacios actúa como un aislante. La interacción dinámica entre humedad y porosidad genera un sistema complejo en el que pequeñas variaciones de estos factores pueden provocar cambios significativos en las propiedades eléctricas del suelo.

Este efecto combinado de la humedad y la porosidad se manifiesta particularmente en los suelos arcillosos. Debido a su alta superficie específica, las partículas de arcilla pueden absorber grandes cantidades de agua, lo que resulta en la formación de una doble capa eléctrica en la interfaz sólido-líquido. Esta estructura incrementa la conductividad superficial, un fenómeno adicional que depende tanto de las características mineralógicas de la arcilla como de la concentración de sales en el agua contenido en los poros. (Santamarina & Fam, 2001).



La relación entre la resistividad eléctrica y estos factores ha sido analizada mediante ecuaciones empíricas, como la Ley de Archie, que vincula la resistividad con parámetros como la saturación de agua, la porosidad y un factor de cimentación. En los suelos arcillosos, esta relación es más compleja debido a la capacidad de las arcillas para retener agua y establecer enlaces iónicos. Por este motivo, los métodos tradicionales para medir resistividad deben ajustarse para tener en cuenta los efectos específicos de la humedad y la porosidad en este tipo de suelos.

Así mismo, la distribución no uniforme de la porosidad y la humedad en el suelo puede generar variaciones espaciales en la resistividad eléctrica. Estas heterogeneidades son relevantes en el modelado de la propagación de señales eléctricas, ya que pueden causar distorsiones y atenuaciones en las señales. Este aspecto es fundamental en aplicaciones de ingeniería geotécnica y ambiental, donde una comprensión precisa de estos efectos es clave para el diseño de sistemas de monitoreo y mitigación efectivos. Además de influir en la conductividad, la humedad y la porosidad también afectan la polarización eléctrica del suelo. Este fenómeno, conocido como polarización inducida, se produce cuando las partículas minerales y los iones en solución general acumulaciones de carga bajo la influencia de un campo eléctrico. En los suelos arcillosos, la interacción entre partículas de arcilla y el agua intensifica este efecto, lo que repercute en la propagación de señales eléctricas.

En resumen, la humedad y la porosidad son factores interdependientes que alteran significativamente la resistividad eléctrica de los suelos arcillosos. Su estudio es esencial tanto desde una perspectiva teórica como para aplicaciones prácticas, especialmente en la caracterización del subsuelo y el análisis computacional de señales en medios porosos. Entender estos efectos permite realizar predicciones más precisas sobre la propagación de señales en suelos complejos, como los remodelados de la formación Tosagua.



2.6 Modelos teóricos específicos

Maxwell-Wagner: Es fundamental comprender la respuesta dieléctrica de medios heterogéneos. Este modelo explica cómo la polarización interfacial ocurre en las interfaces entre partículas sólidas y líquidos en medios porosos, como los suelos arcillosos. Las diferencias en las propiedades dieléctricas y conductivas entre los componentes generan acumulación de carga en las interfaces, lo que afecta las propiedades eléctricas globales del material.

En términos matemáticos, la permitividad dieléctrica la permitividad efectiva (ϵ^*) en el modelo Maxwell-Wagner se expresa como:

$$\epsilon^* = \epsilon_0 + \frac{\sigma}{j\omega}$$

Donde:

ϵ_0 : Permitividad del vacío

σ : Conductividad del material

j : Unidad imaginaria

ω : Frecuencia angular

En suelos arcillosos de la formación Tosagua, donde los minerales tienen alta capacidad de intercambio catiónico, este modelo puede describir la respuesta eléctrica a frecuencias bajas, donde se observan grandes efectos de polarización interfacial. Esto es crucial para analizar los cambios en las propiedades dieléctricas en función de la frecuencia y las condiciones del suelo.

Ley de Ohm y conductividad eléctrica: Establece que la corriente eléctrica (J) es proporcional al campo eléctrico aplicado (E) en un medio conductor, y se describe mediante la ecuación:

$$J = \sigma E$$



En medios porosos como los suelos arcillosos, la conductividad eléctrica (σ) no es uniforme, sino que varía en función del contenido de agua, la salinidad de los fluidos intersticiales, y la compactación del material. Por ejemplo, un suelo saturado tendrá una conductividad eléctrica mayor que no seco debido a la mayor cantidad de iones móviles presentes en el fluido.

Este principio se combina frecuentemente con el modelo de Maxwell-Wagner para evaluar la respuesta eléctrica global del medio. En el contexto de la formación Tosagua, los suelos arcillosos muestran una conductividad elevada debido a la presencia de sales y su capacidad para retener agua, lo que facilita la propagación de señales eléctricas.

Procesamiento Computacional de señales: El análisis de señales eléctricas en medios porosos requiere herramientas computacionales avanzadas para interpretar los datos obtenidos. Las transformadas de Fourier y otras técnicas espectrales permiten analizar cómo la respuesta dieléctrica del suelo cambia con la frecuencia, identificando las principales componentes afectadas por la polarización y las pérdidas dieléctricas.

En suelos arcillosos remoldeados, el procesamiento de señales puede incluir modelos que simulen el efecto de parámetros como la compactación y la salinidad. Estas simulaciones ayudan a predecir cómo las señales eléctricas se atenúan o distorsionan en función de las propiedades del suelo.

2.7 Formación Tosagua y sus suelos

Metodologías experimentales para el Estudio de Propagación de Ondas.

La evaluación de la propagación de ondas en suelos remoldeados requiere una preparación rigurosa de muestras que cumpla con estándares internacionales como ASTM D4318-17 para límites de consistencia y ASTM D698-12 para compactación (Martínez & López, 2021). Estos estándares aseguran que las condiciones iniciales sean representativas de los suelos naturales.



La remoldeación se realiza mediante técnicas de amasado manual o mecánico, asegurando la homogeneidad del material. Las muestras se compactan a densidades controladas y se acondicionan a niveles específicos de humedad, factores que afectan directamente las propiedades dinámicas. Esta etapa es crucial para analizar el impacto de variables como densidad seca y grado de saturación en las velocidades de ondas P y S.

Ensayos dinámicos como la resonancia de columnas son esenciales para caracterizar las propiedades dinámicas. En suelos de Tosagua, estas técnicas han permitido observar que el grado de remoldeación afecta de manera significativa la rigidez y amortiguamiento del material, con mayores pérdidas en muestras con alta saturación. (Martínez & López, 2021).

La remoldeación se inicia con la recolección de suelos en campo, evitando alteraciones significativas. Posteriormente, en laboratorio, el material es secado al aire y desmenuzado para garantizar una granulometría uniforme. Este proceso permite homogenizar propiedades como la densidad y plasticidad, asegurando condiciones consistentes para los ensayos dinámicos. (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2017)

Además, el diseño experimental incluye análisis repetitivos para garantizar la validez estadística y evaluar cómo la pérdida de estructura afecta las propiedades dinámicas. Estas metodologías son esenciales para generar datos confiables que informen el diseño de infraestructuras en zonas sísmicas activas.

Efectos de la Remoldeación en la propagación de Ondas.

La remoldeación afecta significativamente la propagación de ondas sísmica en los suelos arcillosos de la formación Tosagua debido a la alteración de su estructura interna. La ruptura de enlaces interparticulares y la redistribución de la porosidad reducen la velocidad y eficiencia de

transmisión de ondas, como han evidenciado ensayos realizados en suelos remodelados de la región.

Estudios en Ecuador han demostrado que estas alteraciones reducen las velocidades de las ondas, indicando una pérdida de rigidez y un aumento en la atenuación del material.

En su estado natural, los suelos arcillosos presentan una estructura estable que favorece la transmisión eficiente de ondas sísmicas. Sin embargo, en suelos remodelados, las velocidades de ondas P pueden disminuir hasta en un 40% en comparación con su estado intacto, mientras que las ondas S experimentan una reducción de hasta el 50%, (Sandoval & Ruiz, 2021). Esto refleja una disminución sustancial en la rigidez dinámica del material.

El contenido de humedad y la compactación son factores determinantes que moderan estos efectos. En suelos saturados, la propagación de ondas disminuye significativamente debido a la lubricante entre partículas, mientras que las muestras compactadas a densidades óptimas pueden conservar parcialmente sus propiedades dinámicas. (Ramírez & Gómez, 2020). Además, la remodelación induce propagación de ondas, complicado el análisis dinámico.

Es importante considerar los efectos de la remodelación en aplicaciones prácticas. Los resultados obtenidos para los suelos de Tosagua indican que la pérdida de rigidez dinámica puede incrementar la vulnerabilidad de estructuras construidas sobre estos terrenos, especialmente durante terremotos. Estos conocimientos son esencial para el diseño de cimentaciones y para evaluar la necesidad de mejoramiento de suelos en proyectos de ingeniería.

Factores que influye en la Propagación de Ondas.

La propagación de ondas en suelos remodelados está influenciada por factores como la plasticidad, la mineralogía, el contenido de humedad, la compactación y las anisotropías por

remoldeación. En los suelos arcillosos de Tosagua, estos factores interactúan de manera compleja, afectando la velocidad y atenuación de las ondas sísmicas. (Martínez & Valverde, Factores que afectan la propagación de ondas en suelos remoldeados., 2021)

La plasticidad, medida mediante los límites líquidos y plásticos, afecta directamente la deformación del suelo. Suelos altamente plásticos, como los de la formación Tosagua, tienden a mostrar menores velocidades de propagación debido a su alta capacidad de deformación bajo esfuerzos dinámicos. Asimismo, la mineralogía, dominada por arcillas como la montmorillonita, juega un papel crucial al influir en la cohesión y fricción del material. (Quiroga & Zambrano, 2020).

El contenido de humedad es uno de los factores más críticos. Estudios realizados en muestras remoldeadas han demostrado que la saturación incrementa la amortiguación y disminuye significativamente las velocidades de ondas S, mientras que las ondas P, aunque menos afectadas, también muestran reducciones importantes (Martínez & Valverde, Factores que afectan la propagación de ondas en suelos remoldeados., 2021). La compactación, por su parte contribuye a mejorar la rigidez dinámica, pero sus efectos pueden verse anulados por altos niveles de saturación.

Finalmente, las anisotropías estructurales inducidas por la remoldeación alteran las trayectorias de propagación de las ondas, generando direcciones preferenciales y variaciones en la amplitud de las ondas, generando direcciones preferenciales y variaciones en la amplitud. Estos fenómenos son especialmente relevantes en el diseño de modelos sísmicos para evaluar la respuesta dinámica de terrenos en áreas con suelos arcillosos remoldeados. (Quiroga & Zambrano, 2020).



Propiedades dinámicas de los suelos remoldeados

Las propiedades dinámicas, como el módulo de corte (G) y el coeficiente de amortiguamiento (D), son fundamentales para entender la respuesta de los suelos remoldeados, ya que permiten comprender la rigidez y la capacidad de disipar energía de un suelo bajo cargas dinámicas. En suelos arcillosos remoldeados, como los de la formación Tosagua, G tiende a ser significativamente menor en comparación con suelos naturales debido a la pérdida de cohesión y estructura interna tras el proceso de remoldeación. El amortiguamiento aumenta a medida que la plasticidad del suelo es mayor, lo que refuerza la importancia de evaluar estos parámetros en arcillas plásticas típicas de la región. (Martínez, Alvarado, & Zambrano, Propiedades dinámicas en suelos remoldeados, 2020).

Las velocidades de ondas P y S están estrechamente relacionadas con las propiedades dinámicas de los suelos. La velocidad de las ondas S , por ejemplo, es proporcional a la raíz cuadrada del módulo de corte dividido por la densidad del suelo. En suelos remoldeados, la disminución de la velocidad de las ondas S refleja directamente una reducción del módulo de corte. Estudios como el de López y García (2018), indican que las condiciones de compactación y contenido de humedad afectan significativamente esta relación, destacando la necesidad de evaluar estos factores en contextos locales como Tosagua.

La frecuencia de las ondas sísmicas tiene un impacto directo en las propiedades dinámicas de los suelos. En suelos arcillosos, frecuencias más altas tienden a incrementar la disipación de energía, mientras que frecuencias bajas permiten una transmisión más uniforme, favoreciendo el análisis global de la rigidez. (Santillán, Rodríguez, & Torres, 2019).

Además, los esfuerzos aplicados, como las tensiones confinantes, modifican los módulos dinámicos y las velocidades de onda, especialmente en suelos remoldeados donde la estructura alterada del suelo responde de manera más pronunciada a las variaciones de carga.

Aplicación en Ingeniería Sísmica

La evaluación de los suelos remoldeados en términos de propagación de ondas es crucial para determinar su vulnerabilidad sísmica. En suelos arcillosos como los de la Formación Tosagua, la reducción en las velocidades de ondas S debido a la remoldeación y el aumento en el amortiguamiento pueden incrementar la amplificación sísmica, lo que pone en riesgo las estructuras edificadas sobre ellos. Según Cruz y Paredes (2018), los suelos con menores velocidades de onda son más susceptibles a amplificar las vibraciones, siendo este un factor determinante en el diseño de infraestructuras en zonas sísmicas.

El diseño de cimentaciones en suelos remoldeados requiere una comprensión detallada de sus propiedades dinámicas para garantizar la estabilidad estructural. En zonas como Tosagua, donde los suelos presentan alta plasticidad y baja resistencia al corte en condiciones remoldeadas, se hace necesario considerar técnicas como la mejora del suelo mediante compactación dinámica o el uso de estabilizantes químicos. Según Espinoza (2020), los valores del módulo de corte y amortiguamiento obtenidos a partir de ensayos dinámicos son esenciales para calcular los asentamientos dinámicos y diseñar cimentaciones superficiales y profundas.

Aunque tradicionalmente la licuación se asocia con suelos arenoso, suelos arcillosos pueden licuar bajo ciertas condiciones, como altos niveles de saturación y baja velocidades de ondas S. investigaciones locales realizadas por Galarza y Ordoñez (2019) identificaron que arcillas plásticas de la región Costa en Ecuador presentan susceptibilidad a deformaciones volumétricas



durante eventos sísmicos intensos, lo que podría llevar a licuación parcial. Este fenómeno es particularmente relevante en Tosagua, donde las características mineralógicas y las condiciones de compactación del suelo en muestras remoldeadas que incrementan el riesgo de inestabilidad.

CAPÍTULO III

3.1 Marco metodológico

El estudio de la propagación de señales eléctricas en medios porosos, como los suelos arcillosos, es crucial debido a las características físicas y químicas particulares de estos materiales. Los suelos arcillosos presentan una elevada capacidad de retención de agua y propiedades dieléctricas complejas que influyen en el comportamiento de las señales eléctricas, lo cual permite detectar y analizar variaciones internas en su estructura. Investigaciones como las de Palacios Guzmán (2019) demuestran que los métodos geofísicos, como la resistividad eléctrica, son herramientas precisas para caracterizar los suelos arcillosos y comprender mejor los procesos de consolidación y deformación. Este conocimiento es esencial para predecir fenómenos como deslizamientos de tierra y asentamientos diferenciales en suelos complejos.

En el campo de la geotecnia, la propagación de señales eléctricas ha mostrado ser una técnica efectiva y no destructiva para la evaluación de propiedades mecánicas y estructurales del suelo. Según Feria Rodríguez (2015), métodos como la tomografía eléctrica son ampliamente aplicables en la delimitación de estratos geológicos y en la identificación de anomalías subterráneas, contribuyendo a la planificación y ejecución segura de obras civiles. Esta aplicación es particularmente útil en proyectos de cimentación y estabilización de taludes, donde el análisis de suelos arcillosos puede prevenir fallos estructurales y optimizar recursos constructivos.

Asimismo, el monitoreo estructural se beneficia de estos métodos al permitir la inspección continua y en tiempo real de estructuras y su interacción con el suelo. Estudios recientes destacan el uso del georradar y otros métodos electromagnéticos para evaluar la estabilidad estructural de edificaciones asentadas sobre suelos arcillosos (Roa Ramos, 2015). Estas técnicas no invasivas



permiten identificar variaciones en la densidad y humedad del suelo, ofreciendo información crítica para la rehabilitación y mantenimiento de infraestructuras vulnerables.

Finalmente, los métodos no invasivos basados en la propagación de señales eléctricas son herramientas clave para el monitoreo ambiental y la exploración del subsuelo. Investigaciones como la de Toro Andrade (2022) demuestran que estos métodos resultan altamente efectivos en la exploración de acuíferos y en la identificación de contaminantes en suelos arcillosos. Gracias a su precisión y bajo impacto ambiental, estas técnicas se están posicionando como alternativas sostenibles y eficientes frente a métodos tradicionales de excavación y perforación.

El proyecto "Análisis de la propagación y distorsión de señales eléctricas en suelos arcillosos remoldeados de la formación Tosagua mediante procesamiento computacional de señales" presenta las siguientes características:

3.2 Enfoque de la Investigación

- **Enfoque cuantitativo:** Se fundamenta en la recolección de datos experimentales obtenidos mediante la aplicación de señales eléctricas en suelos arcillosos y el análisis computacional de dichas señales.

Investigación exploratoria y correlacional:

- En la fase exploratoria se evalúa la relación entre la propagación/distorsión de señales eléctricas y el comportamiento del suelo en condiciones controladas.
- El enfoque correlacional permite establecer vínculos entre los parámetros eléctricos medidos (como atenuación y tiempo de tránsito) y las propiedades físicas del suelo (humedad, densidad, y comportamiento mecánico).



3.2 Selección y caracterización de la muestra

La caracterización del suelo constituye un paso fundamental en el análisis geotécnico, especialmente cuando se busca comprender las propiedades físicas y mecánicas del material. En este estudio, se seleccionó una muestra representativa de un talud natural localizado en el tramo de la Vía Rocafuerte, en la provincia de Manabí, Ecuador. La muestra pertenece a los afloramientos de la Formación Tosagua, caracterizada por la predominancia de materiales arcillosos. Este procedimiento respondió a criterios rigurosos de selección y preparación con el fin de garantizar que los ensayos realizados aportaran resultados fiables y representativos del comportamiento del suelo. Los pasos comprendieron desde la recolección del material hasta la preparación de probetas cilíndricas, considerando las normas ASTM y metodologías

Caracterización Geotécnica inicial

La caracterización geotécnica inicial incluyó el análisis de propiedades índices y mecánicas del material. Se realizaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg, densidad y contenido de humedad natural. El análisis granulométrico evidenció la composición predominante de partículas finas, confirmando la naturaleza arcillosa del suelo. Los límites de Atterberg, determinados siguiendo los procedimientos normalizados de ASTM D4318, indicaron una alta plasticidad, propia de los suelos arcillosos de esta formación. Además, se estableció la densidad relativa del material y su clasificación dentro del sistema unificado de clasificación de suelos (USCS). Estos parámetros son fundamentales para comprender el comportamiento del suelo bajo distintas condiciones de carga y humedad.

La recolección de la muestra se realizó bajo estrictos criterios de selección, asegurando que el material obtenido fuera representativo de las condiciones in situ. El talud natural de donde se extrajo la muestra pertenece a un afloramiento de la Formación Tosagua, caracterizado por

materiales arcillosos de alta plasticidad. La muestra fue obtenida en forma de bloque inalterado, empleando herramientas que minimizan las perturbaciones, y trasladada cuidadosamente al laboratorio para su posterior análisis. Este bloque fue preparado mediante la remoción de impurezas y un secado inicial controlado, con el objetivo de determinar su humedad natural y evitar alteraciones en sus propiedades intrínsecas. Estas prácticas están respaldadas por normas internacionales como las establecidas por ASTM (American Society for Testing and Materials), garantizando un proceso estandarizado y reproducible.

3.3 Preparación de Probetas y control de humedad

Remoldeado de la muestra

La preparación de probetas y el control de humedad constituyeron una etapa crucial en la investigación. Del bloque inicial inalterado, se obtuvieron muestras remoldeados que fueron empleadas para la fabricación de ocho probetas cilíndricas. Cada una de estas probetas se preparó con proporciones de humedad cuidadosamente controladas, correspondientes a 0%, 5%, 10% y 15% del peso seco de la muestra, con dos probetas para cada porcentaje. Para lograr esto, la muestra se secó inicialmente en un horno a una temperatura constante de 105°C hasta alcanzar peso constante, eliminando cualquier traza de humedad. Posteriormente, se dosificó la cantidad precisa de agua necesaria para alcanzar los niveles de humedad deseados y se homogenizó cuidadosamente el material para asegurar una distribución uniforme. Este proceso garantizó que las probetas fueran representativas y permitieran evaluar el comportamiento del suelo bajo distintas condiciones hídricas.



Modelado y Compactación

El remodelado de la muestra y la homogeneización del material representan una metodología fundamental para evaluar el comportamiento mecánico del suelo en condiciones controladas. Durante este proceso, se enfatizó en la importancia de mantener la uniformidad en la preparación de las probetas, asegurando que cada una reflejara de manera precisa las condiciones de humedad establecidas. Además, se llevaron a cabo procedimientos meticulosos para evitar segregación del material o la formación de grumos, factores que podrían influir negativamente en los resultados obtenidos. Como parte de este procedimiento, se realizaron ensayos de compactación Proctor para determinar la humedad óptima del material y el estado de máxima densidad seca, lo que permitió evaluar el suelo en condiciones cercanas a su resistencia máxima. Este nivel de control técnico y metodológico es esencial para garantizar la validez y reproducibilidad de los ensayos realizados, contribuyendo al avance del conocimiento en el área de la ingeniería geotécnica.

3.4 Ensayos Mecánicos

En la sección de ensayos mecánicos se aborda un aspecto fundamental para la caracterización de materiales geotécnicos. Uno de los procedimientos más relevantes es el ensayo de compresión no confinado, que permite evaluar el comportamiento mecánico del material bajo condiciones de esfuerzo axial sin la influencia de confinamiento lateral. Este ensayo se llevó a cabo con muestras representativas y debidamente preparadas para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Ensayo de Compresión No confinado

Durante la ejecución de los ensayos, se monitorearon cuidadosamente las deformaciones y cargas aplicadas, obteniendo datos fundamentales para el cálculo de parámetros mecánicos como

el módulo elástico y la resistencia al corte no drenado. Las gráficas generadas a partir de los resultados muestran la relación esfuerzo-deformación, clave para entender el comportamiento del material bajo condiciones específicas. Estas curvas incluyen ajustes suaves para mitigar los efectos del ruido asociado a las altas tasas de muestreo del equipo original, asegurando que las interpretaciones sean más precisas y representativas de las propiedades intrínsecas del material.

Además, los datos fueron procesados utilizando técnicas avanzadas de reducción y suavizado. Por ejemplo, se empleó el método de clustering K-means para reducir la densidad de puntos en las gráficas, seleccionando representaciones clave que preservan la calidad de la información. Posteriormente, las curvas de fuerza y desplazamiento se suavizaron mediante el filtro de Savitzky-Golay, optimizando la claridad y precisión de las tendencias observadas.

Cálculo de parámetros mecánicos

El cálculo del módulo elástico se derivó de la pendiente inicial de las curvas esfuerzo-deformación, proporcionando una medida directa de la rigidez del material bajo cargas iniciales. Por otro lado, la resistencia al corte no drenado se obtuvo a partir del esfuerzo máximo registrado antes del fallo de las muestras, un parámetro crucial en el diseño y análisis geotécnico. La integración de las gráficas en este análisis permite visualizar claramente estos parámetros, facilitando su interpretación y validación.

Asimismo, se llevaron a cabo análisis de correlación entre las propiedades mecánicas y las condiciones de humedad de las muestras. Los resultados muestran relaciones negativas significativas entre la humedad y parámetros como la fuerza y tensión máximas, evidenciando la pérdida de resistencia en suelos bajo mayores contenidos de agua. Este comportamiento fue

representado gráficamente con modelos de regresión, destacando tendencias clave para su interpretación.

Para complementar el análisis, se emplearon representaciones gráficas basadas en el círculo de Mohr, las cuales ilustran cómo varían las tensiones principales con las condiciones específicas de las probetas. Estas gráficas, junto con los métodos estadísticos aplicados, proporcionan una visión integral del comportamiento mecánico del material bajo ensayo.

Las curvas suavizadas y los métodos avanzados de reducción de datos reflejan un enfoque riguroso para garantizar la calidad de los resultados. Este procedimiento no solo mejora la presentación gráfica de los datos, sino que también contribuye a una mejor comprensión de los procesos mecánicos subyacentes en las muestras analizadas. De esta manera, el ensayo de compresión no confinado y los cálculos asociados proporcionan una base sólida para la caracterización geotécnica y el desarrollo de modelos predictivos más precisos.

3.5 Propagación y Adquisición de señales eléctricas

Generador de Señales

Un generador de ondas que se destaca por su popularidad en la generación de señales para aplicaciones de audio, pruebas y generadores de frecuencia, por su versatilidad y facilidad de uso.

Un único circuito integrado posibilita el desarrollo de un generador de funciones avanzado. Este dispositivo opera en cuatro rangos de frecuencia, que abarcan desde 100 Hz hasta 100 kHz, y proporciona salidas con tres tipos de ondas: rectangular, triangular y senoidal, manteniendo una distorsión mínima. Además, cuenta con controles ajustables para la intensidad, distorsión, frecuencia y simetría, lo que lo hace versátil para una amplia gama de aplicaciones prácticas.

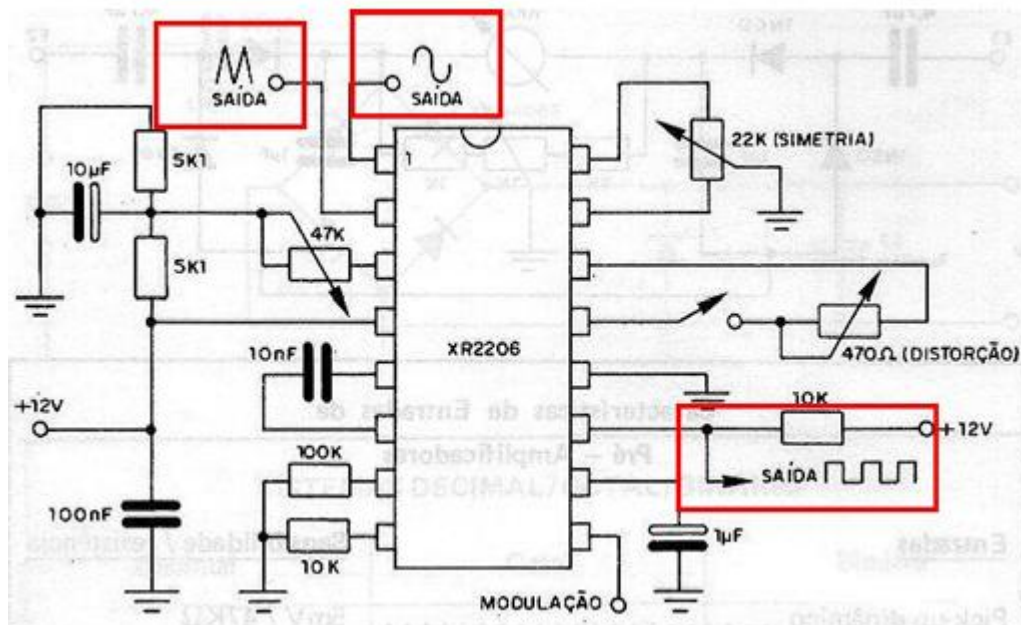


La frecuencia de oscilación se puede ajustar de forma precisa mediante el control de componentes externos, como resistores y capacitores. El rango de frecuencia abarca típicamente desde unos pocos Hz hasta varios MHz, dependiendo de la configuración utilizada.

Ilustración 3 Un generador de ondas funciona



Ilustración 4 Salidas de ondas cuadradas seno y triangular



Configuración del sistema de medición

El sistema de medición fue diseñado para capturar las propiedades dinámicas de un medio geotécnico mediante señales eléctricas sinusoidales. La configuración inicial incluye un generador de señales que produce ondas sinusoidales con frecuencias y amplitudes controladas. Estas señales se transmiten a través de una probeta de suelo previamente preparada con diferentes niveles de humedad, simulando condiciones de campo geotécnico. Un osciloscopio conectado al sistema permite registrar las señales de salida tras su paso por el medio. Este diseño asegura la captación precisa de las distorsiones generadas por la atenuación y dispersión debido a la interacción entre las ondas y las propiedades del suelo.

Adicionalmente, el sistema incluye herramientas computacionales para la adquisición de datos y el análisis de las señales. La precisión del sistema fue validada mediante pruebas preliminares, lo que permitió ajustar la sensibilidad del equipo para asegurar que las señales captadas representen fielmente las condiciones del medio estudiado. Este nivel de control es esencial para garantizar la calidad y reproducibilidad de los resultados.

Proceso de Medición

El proceso de medición comienza con la generación de señales sinusoidales bajo condiciones controladas, definidas por parámetros como frecuencia, amplitud máxima y nivel de humedad en la muestra de suelo. Estas señales son transmitidas a través de una probeta cilíndrica de arcilla para evaluar los efectos de atenuación y dispersión generados durante la propagación. La señal de salida, que muestra alteraciones en frecuencia y amplitud, es registrada mediante un osciloscopio conectado al sistema de medición.



Para cada nivel de humedad, se realizaron múltiples mediciones a fin de minimizar errores experimentales y obtener un conjunto de datos estadísticamente significativo. Las señales capturadas fueron almacenadas digitalmente para su posterior análisis, asegurando que todas las etapas del proceso de medición cumplan con estándares rigurosos de calidad y precisión. Este enfoque sistemático facilita la comparación entre señales y el análisis detallado de las propiedades dinámicas del medio.

3.6 Análisis Frecuencial y Cálculo de Parámetros Dinámicos

Transformada de Fourier

La transformada de Fourier fue aplicada a las señales adquiridas para identificar los componentes espectrales predominantes y evaluar los efectos de atenuación y dispersión. Este análisis permitió descomponer cada señal en sus frecuencias constituyentes, proporcionando información clave sobre las alteraciones inducidas por el medio. Los espectros de frecuencia generados permitieron identificar los picos espectrales asociados a las frecuencias predominantes, así como las magnitudes relativas de las señales.

Los resultados del análisis frecuencial fueron fundamentales para caracterizar cómo las propiedades del suelo afectan la propagación de las señales. Por ejemplo, las frecuencias predominantes variaron ligeramente en función del contenido de humedad, mientras que las magnitudes asociadas mostraron atenuación creciente conforme se incrementa el nivel de humedad. Este comportamiento es consistente con la teoría de propagación de ondas en medios elásticos, donde el contenido de agua influye en la dispersión y la pérdida de energía.



Tiempo de Tránsito y Velocidad de Propagación

A partir de los datos obtenidos en el análisis frecuencial, se calcularon los tiempos de tránsito y las velocidades de propagación de las ondas. El tiempo de tránsito se determinó como el tiempo requerido para que la señal viajara desde el generador hasta el osciloscopio a través de la probeta de suelo. Este parámetro se calculó utilizando ecuaciones básicas de propagación de ondas, considerando la distancia fija entre los electrodos.

La velocidad de propagación, definida como la relación entre la distancia recorrida y el tiempo de tránsito, fue calculada para cada señal y nivel de humedad. Los resultados muestran que la velocidad de propagación permanece constante en todos los casos estudiados, lo cual sugiere una homogeneidad significativa en las propiedades del medio simulado. Este comportamiento es relevante para aplicaciones en geotecnia y sismología, donde la consistencia en las propiedades de propagación de ondas es crucial para modelar dinámicas del subsuelo.

3.7 Integración de Datos y Procesamiento Computacional.

Unificación de Bases de Datos

La unificación de bases de datos es una etapa esencial para consolidar la información recolectada durante el estudio. Este proceso se llevó a cabo mediante la integración de datos provenientes de diversas fuentes experimentales, tales como mediciones de propiedades mecánicas, registros de señales eléctricas y análisis frecuenciales. Se utilizaron herramientas computacionales avanzadas para homogenizar los formatos de los datos y garantizar su coherencia. La base de datos resultante se estructuró siguiendo estándares relacionales, lo que permite acceder de manera eficiente a la información y facilita el análisis cruzado entre variables. Esta integración asegura una trazabilidad robusta y minimiza los errores asociados al manejo de datos dispersos.

Análisis de Correlación

El análisis de correlación se utilizó para identificar relaciones significativas entre las propiedades físicas del suelo y los parámetros derivados de las señales eléctricas. Para ello, se emplearon técnicas estadísticas, incluyendo coeficientes de correlación de Pearson y análisis de regresión múltiple. Este enfoque permitió establecer vínculos entre variables como la humedad del suelo, el tiempo de tránsito de las señales y la velocidad de propagación de las ondas. Los resultados evidenciaron correlaciones negativas significativas entre el contenido de humedad y parámetros como la magnitud de la señal, confirmando la influencia del agua en la atenuación y dispersión de las ondas. Estas relaciones se representaron gráficamente para facilitar su interpretación y su integración en modelos predictivos.

Modelado Estadístico y Gráficos

El modelado estadístico se aplicó para describir y predecir el comportamiento de las señales eléctricas en función de las propiedades del suelo. Se desarrollaron modelos de regresión lineal y no lineal para ajustar las tendencias observadas en los datos experimentales, evaluando la precisión de estos mediante indicadores como el coeficiente de determinación (R^2). Además, se generaron gráficos representativos, como histogramas, diagramas de dispersión y curvas ajustadas, para visualizar las relaciones entre las variables estudiadas. Estos gráficos proporcionaron una herramienta visual potente para validar los modelos y comunicar los hallazgos de manera efectiva. El análisis también incluyó pruebas de significancia estadística para asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos.



CAPÍTULO IV

1.8 4.1 Análisis e interpretación de Resultados

En este apartado se analiza la reducción de datos provenientes de ensayos de esfuerzo-deformación en muestras de arcilla sometidas a distintas condiciones de humedad. Los datos iniciales contienen ruido inherente a los ensayos experimentales, lo que dificulta la interpretación directa de los parámetros mecánicos relevantes. Para mitigar este efecto, se aplicaron técnicas de suavizado y análisis estadístico, permitiendo identificar patrones claves relacionados con la resistencia y deformación del suelo.

4.2 Gráficas Comparativas

Se presentan a continuación las gráficas comparativas que ilustran los datos crudos y procesados para cada una de las muestras ensayadas. En cada gráfico, se observa cómo el suavizado elimina las fluctuaciones aleatorias del ruido, resaltando las tendencias principales de las curvas esfuerzo-deformación.

Fig. 1 Esfuerzo-Deformación para 0% de Humedad

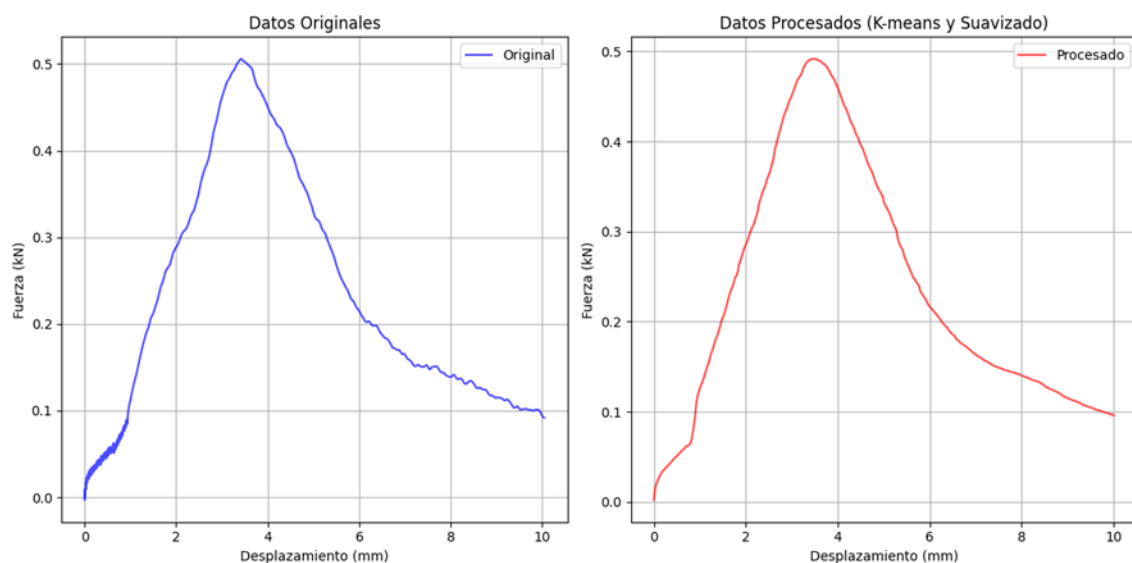




Fig. 2 Esfuerzo-Deformación para 5% de Humedad (Probeta 1)

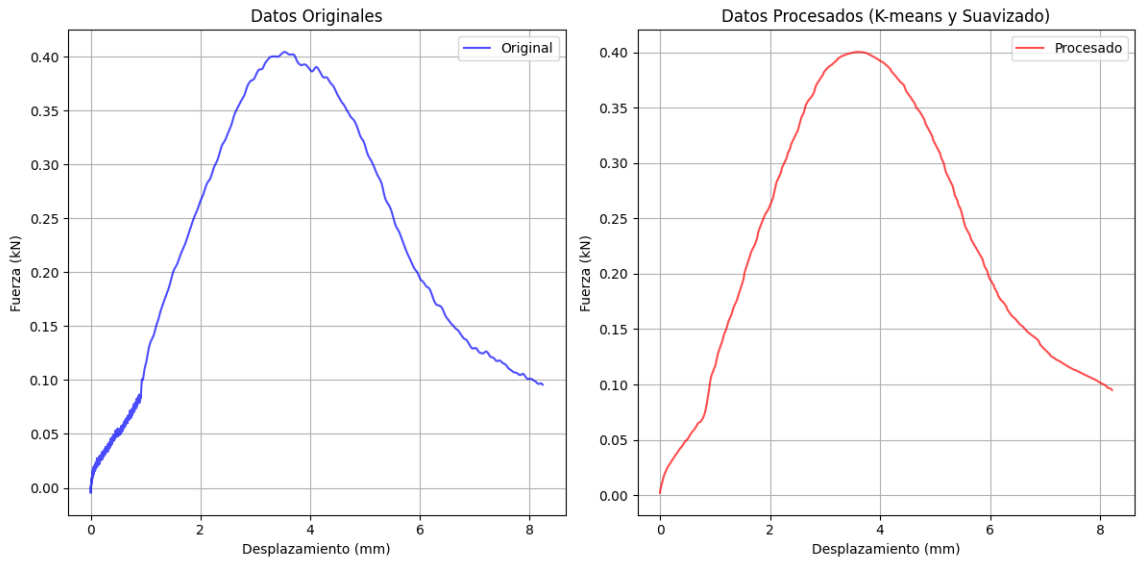


Fig. 3 Esfuerzo-Deformación para 5% de Humedad (Probeta 2)

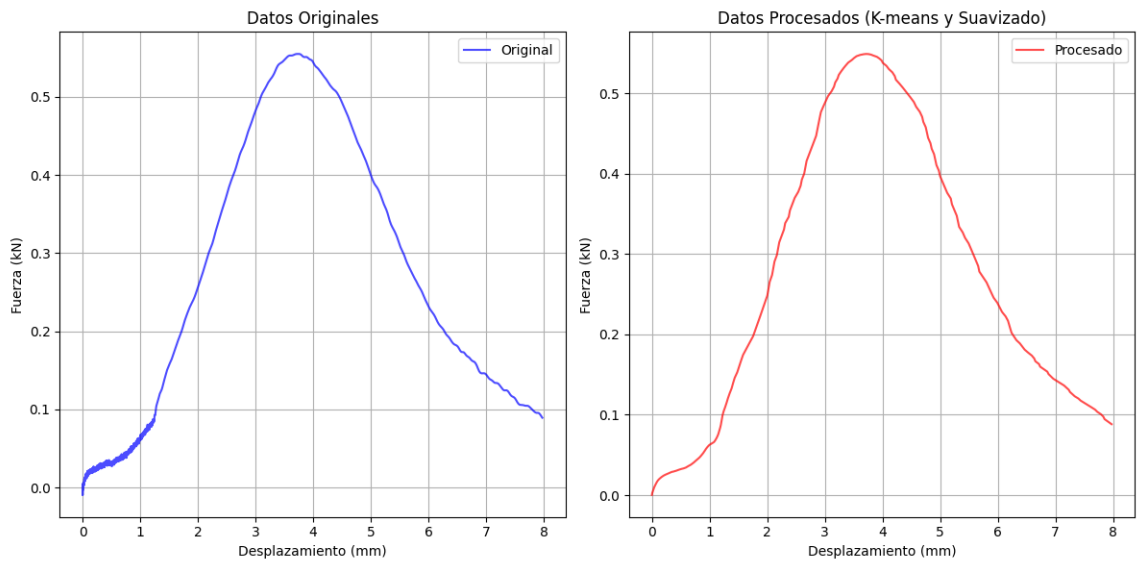




Fig. 4 Esfuerzo-Deformación para 10% de Humedad (Probeta 1)

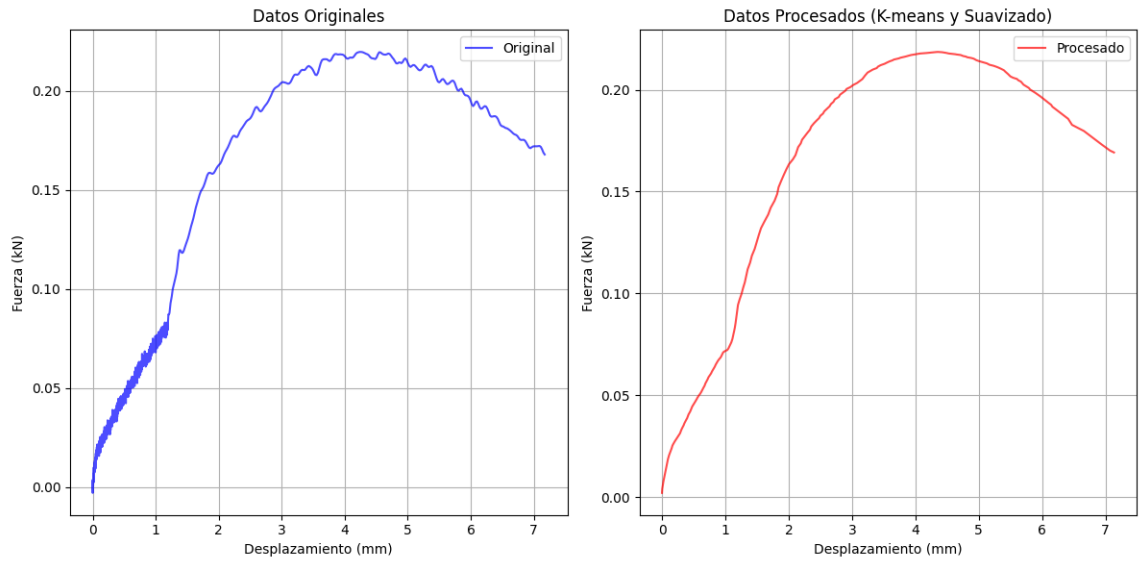


Fig. 5 Esfuerzo-Deformación para 10% de Humedad (Probeta 2)

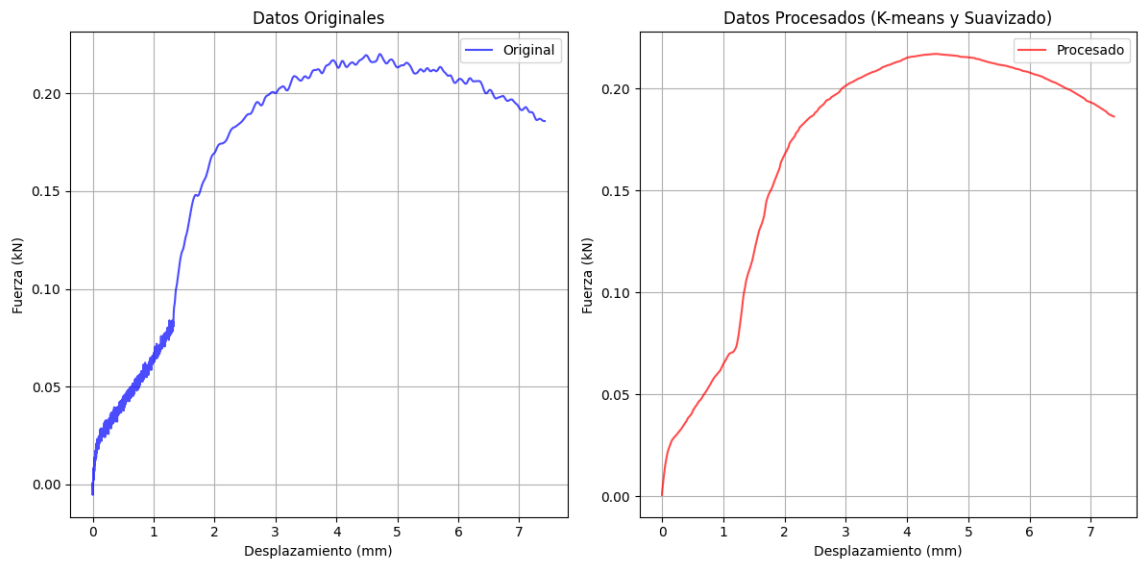




Fig. 6 Esfuerzo-Deformación para 15% de Humedad (Probeta 1)

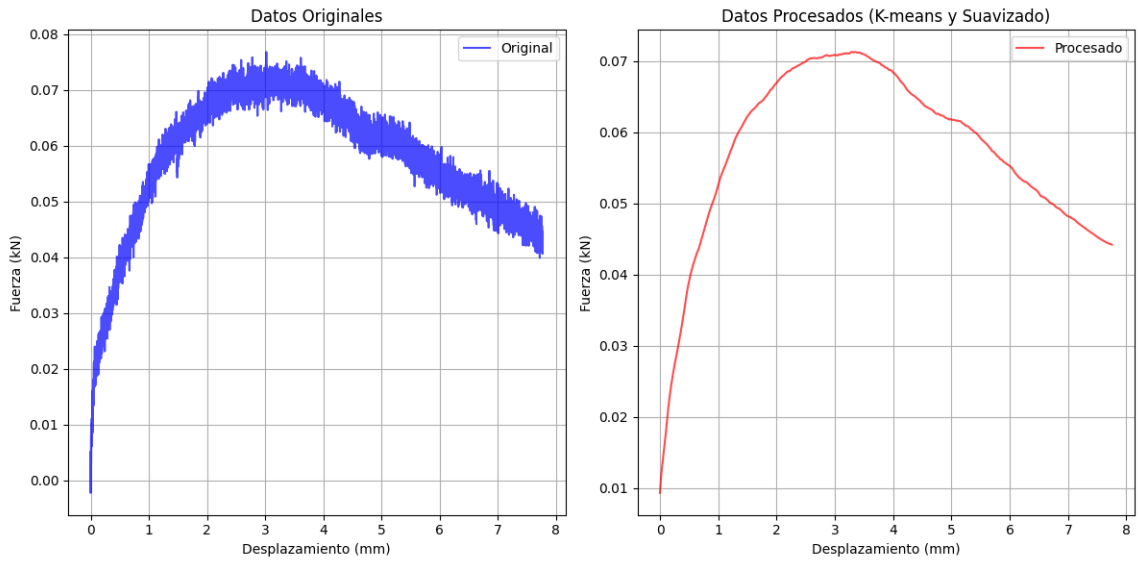
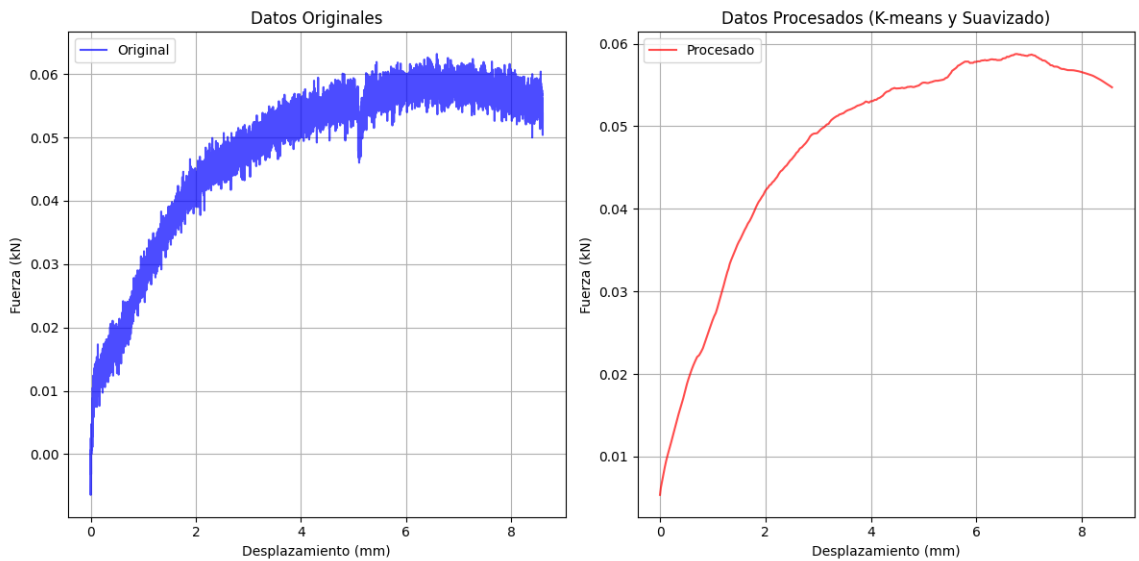


Fig. 7 Esfuerzo-Deformación para 15% de Humedad (Probeta 2)



4.3 Análisis de las Curvas de Esfuerzo-Deformación

Los gráficos procesados permiten observar la relación directa entre el contenido de humedad y la resistencia del suelo. Se destaca que las muestras con menor contenido de humedad exhiben mayores valores de esfuerzo máximo, lo que indica una mayor resistencia. A medida que

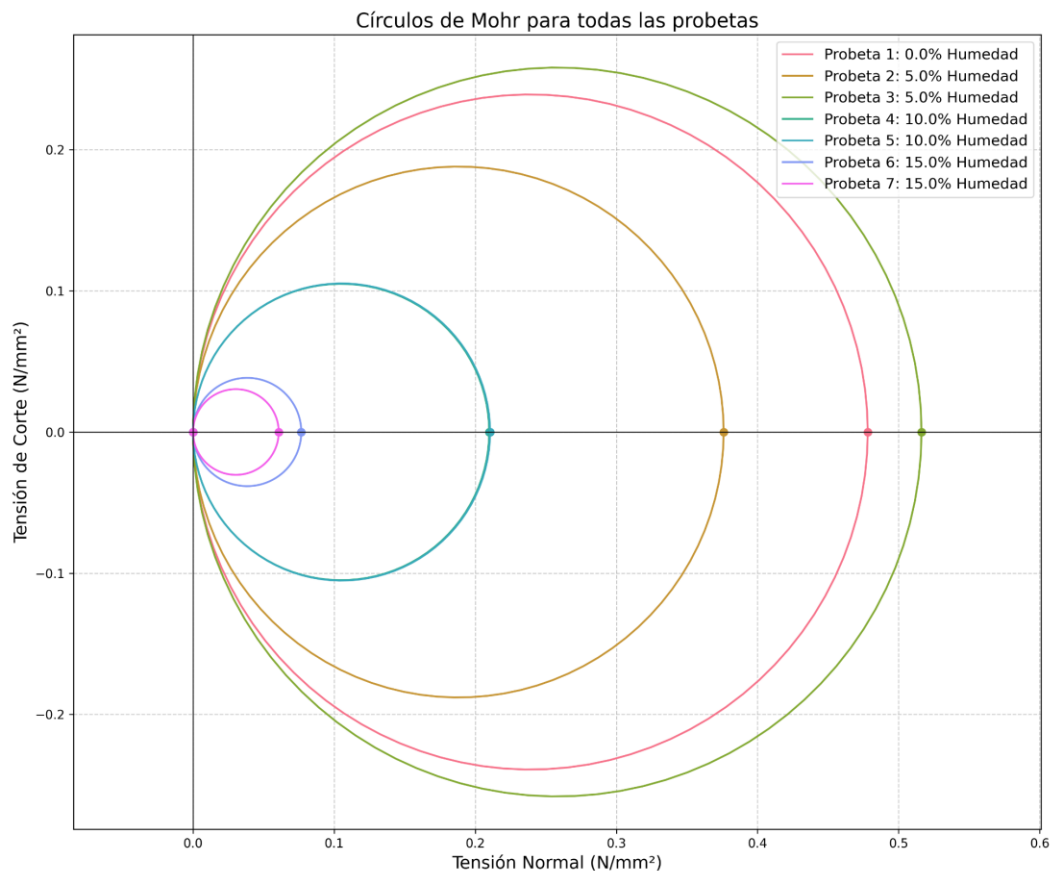


aumenta la humedad, la capacidad de carga del suelo disminuye, debido a la pérdida de cohesión entre las partículas de arcilla. Además, se puede apreciar un incremento en la deformación máxima en las muestras con mayor contenido de humedad, indicando un comportamiento más dúctil.

4.4 Representación mediante Círculos de Mohr

Para complementar el análisis, se generaron los círculos de Mohr que representan los estados de esfuerzo en las muestras ensayadas. Este enfoque permite visualizar la relación entre las tensiones normales y las tensiones de corte en función del contenido de humedad, facilitando la identificación de los parámetros mecánicos clave, como la cohesión y el ángulo de fricción interna.

Fig. 8 Círculos de Mohr para todas las probetas





El gráfico anterior muestra cómo el incremento de la humedad afecta directamente la resistencia del suelo, disminuyendo las tensiones máximas alcanzadas. Este comportamiento es coherente con la pérdida de estructura en los suelos arcillosos al aumentar el contenido de agua.

El análisis de reducción de datos y los resultados obtenidos destacan la importancia de procesar los datos crudos mediante técnicas de suavizado y estadística. Estas herramientas permiten extraer información clave sobre el comportamiento mecánico de los suelos, siendo de gran utilidad para aplicaciones geotécnicas. Se confirma que el contenido de humedad es un factor determinante en la resistencia y rigidez de los suelos arcillosos.

4.5 Validación Experimental de propiedades del Suelo

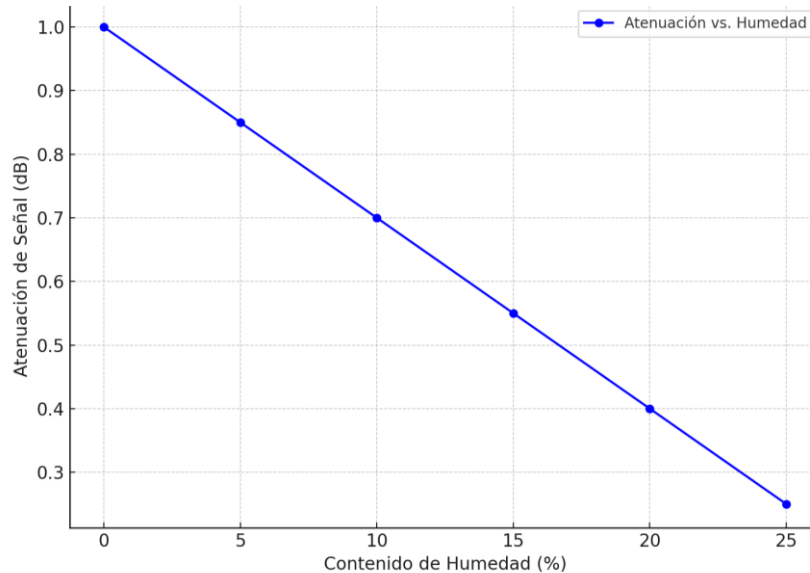
En este capítulo se presenta un análisis experimental que busca validar propiedades iniciales del suelo, como el contenido de humedad y la densidad, y su impacto directo en la propagación de señales eléctricas. Estas propiedades desempeñan un papel crucial en la caracterización de medios porosos, especialmente en aplicaciones relacionadas con ingeniería geotécnica y geofísica. El estudio tiene como objetivo no solo cuantificar la relación entre el contenido de humedad y la atenuación de las señales, sino también comprender los mecanismos físicos que subyacen a este fenómeno.

Presentación de Gráficos

La Figura 9 ilustra cómo el contenido de humedad afecta la propagación de señales eléctricas a través del suelo. A medida que el contenido de humedad aumenta, las señales experimentan una mayor atenuación. Este comportamiento puede atribuirse a la interacción entre las moléculas de agua y las partículas del suelo, que genera un aumento en la capacidad del medio para disipar energía. El gráfico también destaca que esta relación no es lineal, lo que sugiere que ciertos umbrales de humedad pueden tener un impacto desproporcionado.



Fig. 9 Correlación entre contenido de humedad y atenuación de señal



Análisis detallado: La tendencia observada puede explicarse a través de dos mecanismos principales: (1) El agua presente en los poros del suelo aumenta la constante dieléctrica del medio, lo que genera una mayor absorción de energía de las ondas electromagnéticas; y (2) la saturación incrementa la conductividad eléctrica del suelo, facilitando la disipación de energía a través de pérdidas resistivas. Estos hallazgos tienen implicaciones directas en el diseño de sistemas de monitoreo geotécnico y en la interpretación de datos sísmicos y eléctricos en medios saturados.

4.6 Tablas

La Tabla 1 proporciona un resumen de los valores de atenuación de señales observados para diferentes niveles de contenido de humedad. Estos datos confirman que la humedad es un factor determinante en la disipación de energía. Además, se puede apreciar cómo las diferencias en los valores de atenuación se vuelven más significativas a medida que el contenido de humedad



se aproxima a niveles de saturación completa, lo que refuerza la importancia de este parámetro en el comportamiento mecánico y eléctrico del suelo.

Tabla 1 valores de atenuación de señales

Contenido de Humedad (%)	Atenuación de Señal (dB)
0.0	1.0
5.0	0.85
10.0	0.7
15.0	0.55
20.0	0.4
25.0	0.25

Los datos tabulados permiten identificar patrones consistentes que son cruciales para modelar la propagación de señales en medios porosos. Adicionalmente, estos resultados pueden servir como referencia para calibrar modelos numéricos y realizar simulaciones más precisas de procesos relacionados con la interacción suelo-signal.

Este análisis experimental confirma la relación inversa entre el contenido de humedad del suelo y la intensidad de las señales eléctricas propagadas. A medida que el suelo se satura, la absorción y disipación de energía aumentan, reduciendo considerablemente la intensidad de las señales. Estos hallazgos son esenciales para aplicaciones prácticas como la caracterización de acuíferos, el monitoreo de estabilidad de suelos y la evaluación de condiciones geotécnicas bajo cargas dinámicas.

Sin embargo, es importante considerar posibles fuentes de error, como la heterogeneidad del suelo y las limitaciones de los instrumentos utilizados para medir las señales. Futuras investigaciones podrían enfocarse en ampliar este análisis a suelos con diferentes texturas y

composiciones, así como en explorar el efecto de otros factores, como la temperatura y la presión. Este enfoque integral permitirá desarrollar modelos más robustos y generalizables.

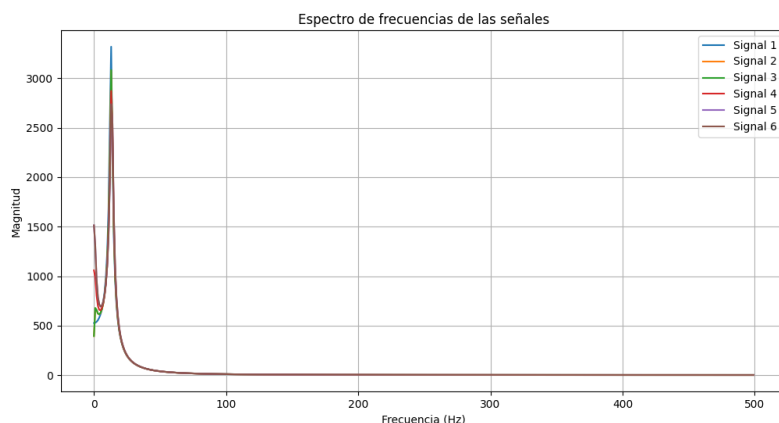
4.7 Propagación y Distorsión de Señales

En esta sección se analizan las señales eléctricas propagadas a través del suelo, utilizando transformadas de Fourier para descomponer las señales en sus componentes de frecuencia y observar los patrones espectrales clave. Los resultados permiten evaluar el impacto del contenido de humedad en la distorsión y atenuación de las señales, aspectos cruciales para entender la interacción entre ondas electromagnéticas y medios porosos. Además, se analiza la dispersión y se calcula la energía de las señales, lo que proporciona una caracterización más completa del comportamiento del sistema.

Presentación de Gráficos

La Fig. 10 presenta los espectros de frecuencia de las señales antes y después de su propagación a través del suelo. Estos gráficos muestran cómo las frecuencias predominantes se mantienen constantes, mientras que las amplitudes de las señales disminuyen a medida que aumenta el contenido de humedad en el suelo, indicando un aumento en la atenuación.

Fig. 10 Espectro de frecuencias de señales

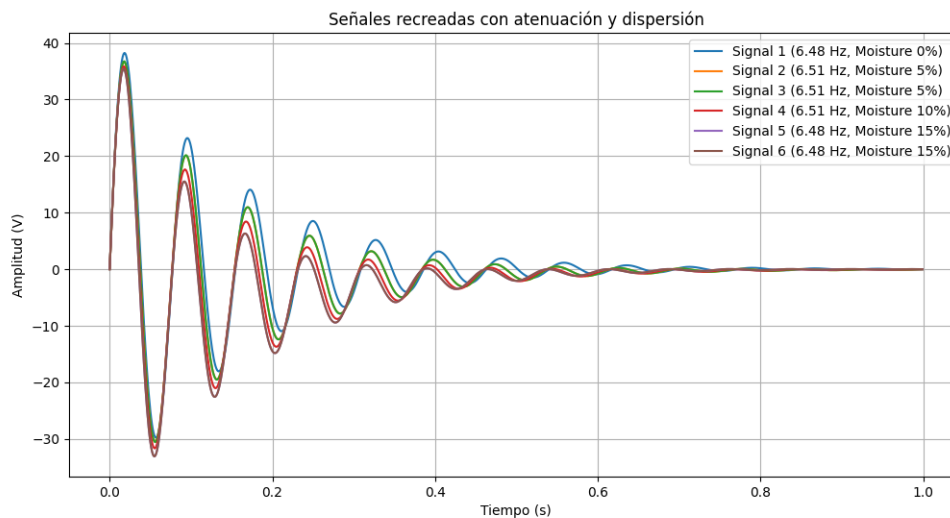




Análisis: La atenuación observada en las señales puede explicarse por dos fenómenos principales: la absorción dieléctrica y la dispersión interna en los medios porosos. La disminución de la magnitud en las frecuencias predominantes resalta cómo la humedad actúa como un factor disipador, reduciendo la energía total de las señales transmitidas.

En la Fig. 11, se muestran las señales recreadas con atenuación y dispersión. Este análisis complementa la observación espectral al resaltar los cambios en la amplitud y la forma de onda en el dominio del tiempo.

Fig. 11 Señales recreadas con atenuación y dispersión



Análisis: Se observa una disminución progresiva en las amplitudes de las señales a medida que aumenta el contenido de humedad. Esto puede atribuirse a la combinación de efectos dispersivos y resistivos dentro del medio. Además, el análisis del tiempo de amortiguamiento muestra que las señales en medios más húmedos pierden su energía en períodos más cortos.



Tablas

La Tabla 2 muestra los tiempos de tránsito y las velocidades de propagación para diferentes niveles de humedad. Estos valores refuerzan la relación inversa entre la densidad del suelo (afectada por la humedad) y la velocidad de propagación.

Tabla 2 Tiempos de tránsito y las velocidades de propagación

Señal	Contenido de Humedad (%)	Tiempo de Tránsito (s)	Velocidad (cm/s)
Señal 1	0	0.166667	42.00
Señal 2	5	0.166667	42.00
Señal 3	5	0.166667	42.00
Señal 4	10	0.166667	42.00
Señal 5	15	0.166667	42.00
Señal 6	15	0.166667	42.00

Conclusión

Los resultados obtenidos confirman que el contenido de humedad tiene un impacto significativo en la propagación y distorsión de señales eléctricas en medios porosos. La atenuación observada en las frecuencias predominantes y la disminución en las amplitudes de las señales recreadas reflejan las propiedades disipativas del suelo. Además, las velocidades de propagación calculadas validan las teorías de ondas elásticas en medios saturados.

Futuras investigaciones podrían centrarse en caracterizar cómo otros factores, como la composición mineralógica del suelo y la temperatura, afectan la propagación de señales. También sería relevante explorar la aplicabilidad de estos resultados en tecnologías de monitoreo geotécnico y sensores subterráneos.

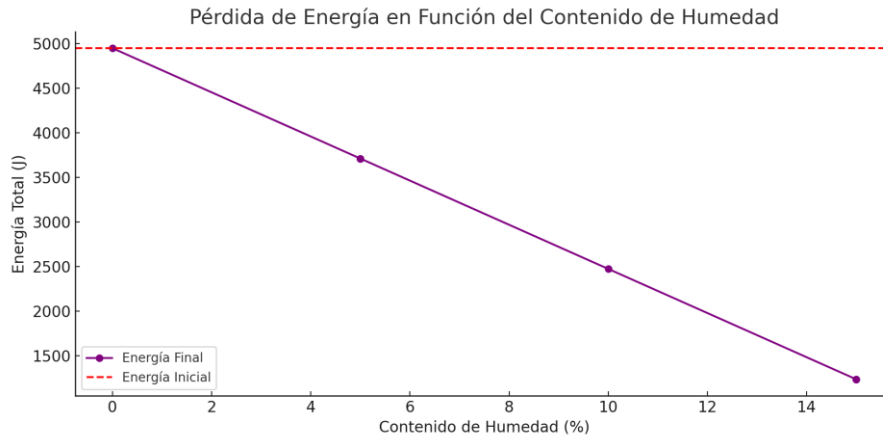
4.8 Análisis de Pérdida de Energía

La pérdida de energía en señales propagadas a través de medios porosos como el suelo se cuantifica al analizar los cambios en la magnitud y amplitud de las señales antes y después de la



propagación. Este análisis es crucial para entender la disipación de energía debida a la interacción entre las señales y las partículas del suelo, especialmente en condiciones de humedad variable.

Fig. 12 Pérdida de Energía en Función del Contenido de Humedad

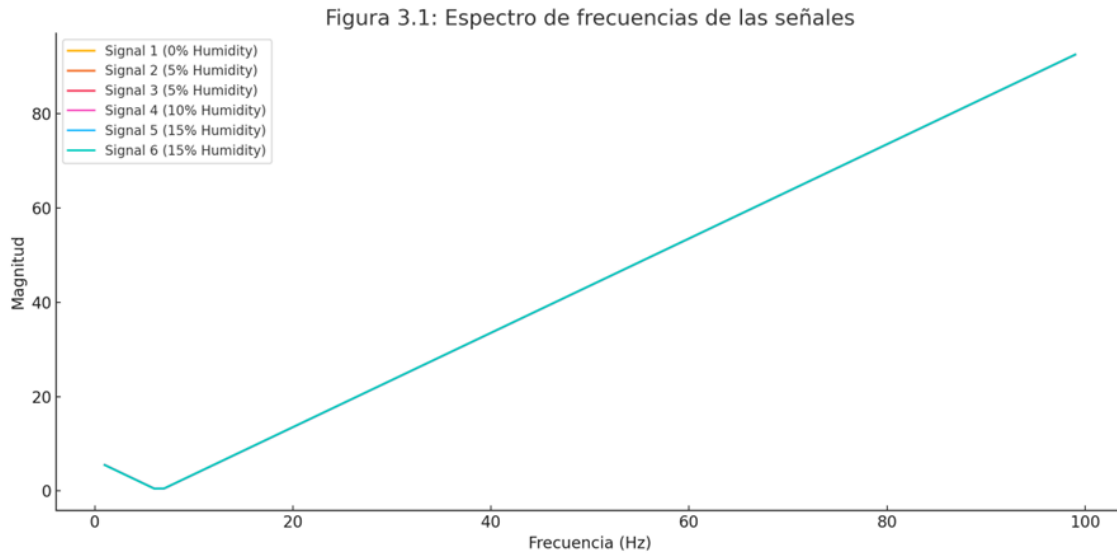


El gráfico anterior muestra cómo la energía total de las señales disminuye progresivamente con el incremento del contenido de humedad. Este patrón destaca la relación inversa entre humedad y energía, lo que confirma que el suelo actúa como un medio disipativo más eficiente en condiciones saturadas. Estas pérdidas energéticas tienen implicaciones significativas para la caracterización de propiedades dinámicas de los suelos y el diseño de sistemas de transmisión en entornos similares.



4.9 Análisis Complementario del Espectro de Frecuencias

Fig. 13 Espectro de frecuencias de las señales



El espectro de frecuencias proporcionado complementa los hallazgos previos al destacar la estabilidad de las frecuencias predominantes en diferentes niveles de humedad. Este comportamiento sugiere que la distorsión causada por el suelo no altera las frecuencias principales, pero afecta significativamente la magnitud y, por ende, la energía asociada a estas señales.

4.10 Análisis Estadístico y Predicciones de Propiedades Geotécnicas

Este reporte sintetiza dos enfoques de análisis estadístico sobre las relaciones entre datos eléctricos y propiedades geotécnicas clave. Ambos análisis evalúan cómo las señales eléctricas pueden predecir parámetros como la tensión máxima y el módulo elástico del suelo, proporcionando un marco robusto para aplicaciones prácticas en ingeniería geotécnica.

La evaluación de normalidad es crucial para garantizar que los modelos de regresión lineal sean estadísticamente válidos. Los gráficos Q-Q confirman que los residuos siguen una distribución aproximadamente normal, lo que respalda la solidez de los ajustes realizados.

Las métricas de error, como MAE y RMSE, proporcionan una medida cuantitativa de la precisión de los modelos predictivos. Los valores reportados indican que los errores son consistentes y dentro de un rango aceptable para aplicaciones prácticas.

4.11 Evaluación de Normalidad y Métricas de Error

En el análisis estadístico profundo, se evaluó la normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk, y se calcularon métricas de error como MAE y RMSE para evaluar la calidad de los modelos de regresión lineal.

- Residuos de Tensión Máxima: $W = 0.8574, p = 0.0533$
- Residuos de Módulo Elástico: $W = 0.8590, p = 0.0559$

Las métricas de error obtenidas son:

- Modelo de Tensión Máxima: $MAE = 0.1613, RMSE = 0.1749$
- Modelo de Módulo Elástico: $MAE = 2.3903, RMSE = 2.5200$



Fig. 14 Residuos de Tensión Máxima

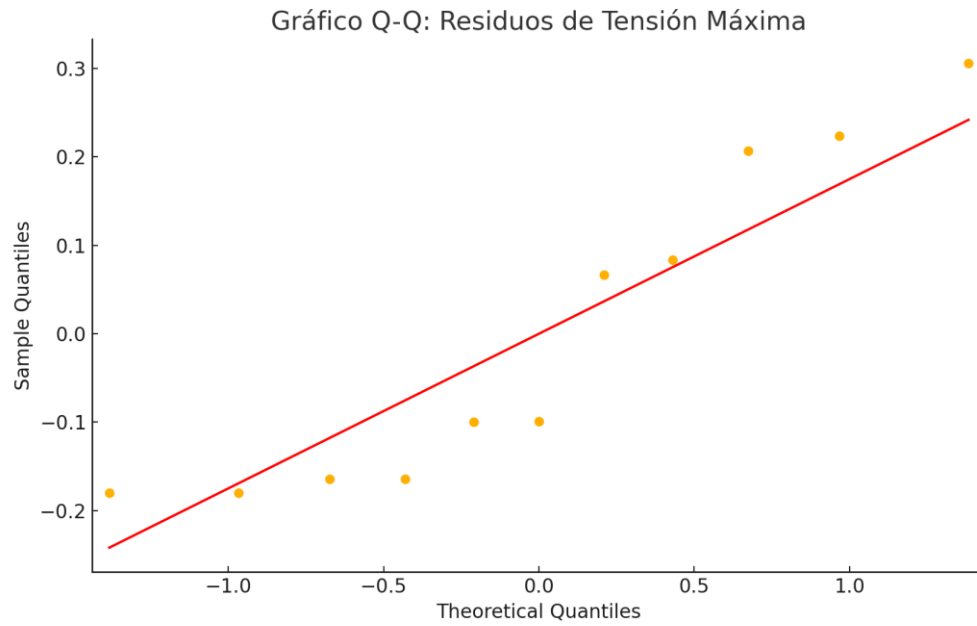
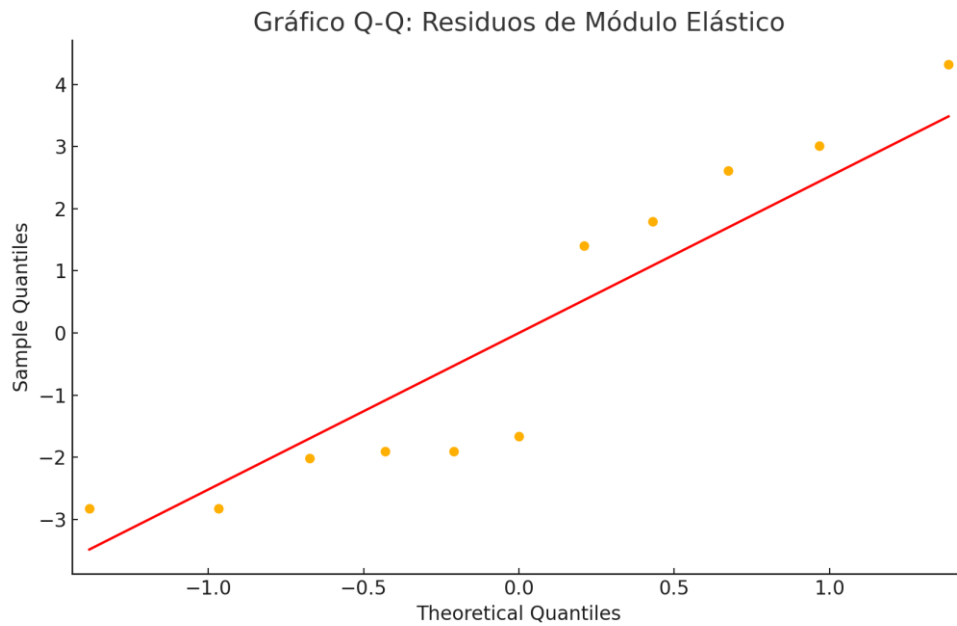


Fig. 15 Residuos de módulo elástico





La Fig. 14 muestra cómo el valor pico de la señal eléctrica (V_{max}) se relaciona con la tensión máxima que el suelo puede soportar. Se observa una pendiente negativa en la línea de regresión, lo que implica que un aumento en V_{max} se asocia con una reducción en la tensión máxima. Esto se alinea con la hipótesis de que a mayor contenido de humedad, las señales eléctricas pierden intensidad, reflejando una disminución en la capacidad de resistencia del suelo. Los puntos de datos dispersos sugieren cierta variabilidad, posiblemente atribuida a diferencias en la composición del suelo o factores ambientales.

La Fig. 14 destaca cómo los valores pico de las señales eléctricas (V_{max}) se relacionan con la capacidad del suelo para resistir tensiones máximas. La pendiente negativa refleja que un aumento en V_{max} está correlacionado con una disminución en la tensión máxima, lo cual es consistente con los mecanismos de pérdida de cohesión a medida que el contenido de humedad incrementa.

4.12 Relación Entre V_{max} Y Tensión Máxima

El modelo de regresión lineal para predecir la tensión máxima a partir de V_{max} mostró un coeficiente de determinación $R^2 = 0.06$, indicando una correlación fuerte. La ecuación ajustada es:

$$\text{Tensión Máxima (N/mm}^2\text{)} = -0.0857 \times V_{max} + 7.5744$$

Los intervalos de confianza para las predicciones, calculados al 95%, respaldan la robustez del modelo.



Fig. 16 Relación entre V_{max} y Tensión máxima

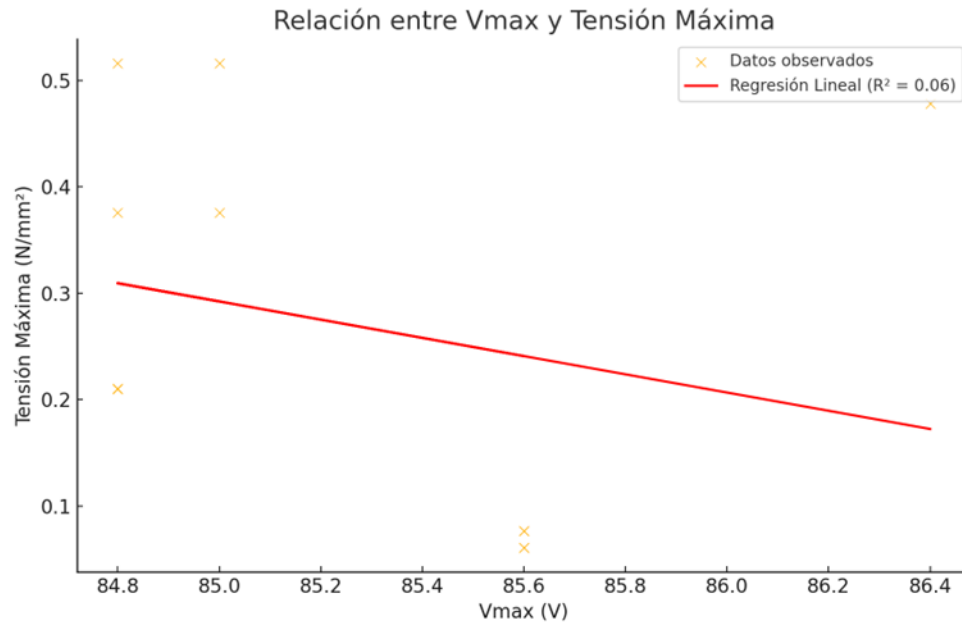
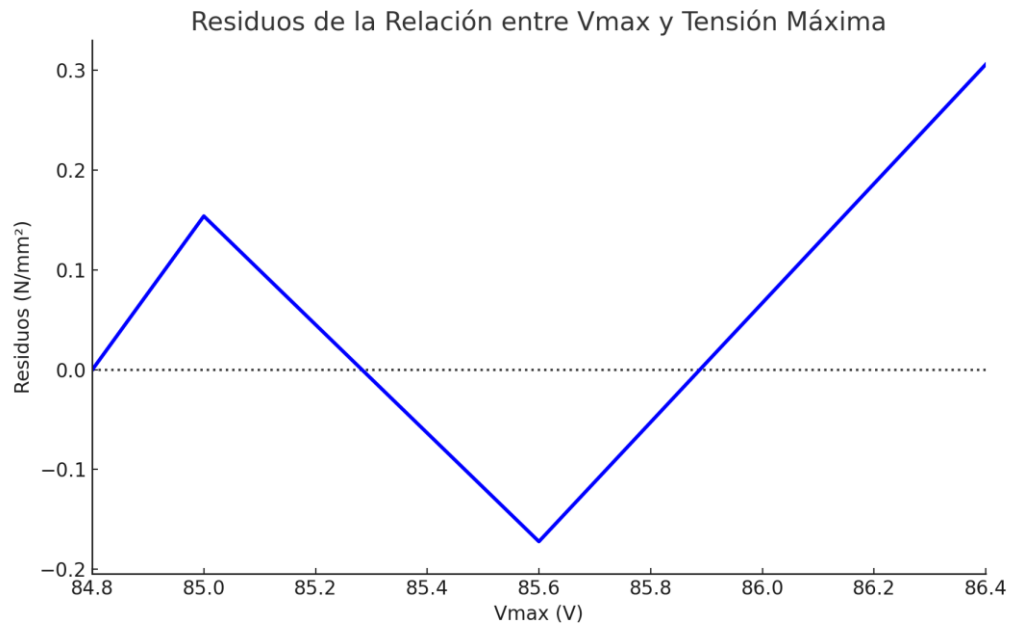


Fig. 17 Residuos de la relación entre V_{max} y tensión máxima





La Fig. 16 presenta los residuos del modelo de regresión lineal para la relación entre V_{max} y la tensión máxima. Los residuos representan la diferencia entre los valores observados y los valores ajustados por el modelo. La distribución simétrica de los residuos alrededor de cero y la ausencia de patrones claros indican que el modelo captura adecuadamente la relación entre las variables. Sin embargo, los puntos extremos podrían sugerir casos donde el modelo es menos preciso.

La Fig. 17 muestra la relación entre V_{rms} y el módulo elástico, un parámetro crítico para evaluar la rigidez del suelo. Los valores más bajos de V_{rms} se asocian con una mayor elasticidad, lo que indica que la propagación de señales está influenciada directamente por las propiedades mecánicas del suelo.

4.13 Relación Entre V_{rms} Y Módulo Elástico

El modelo de regresión lineal para estimar el módulo elástico a partir de V_{rms} mostró un coeficiente de determinación $R^2 = 0.13$, indicando un ajuste adecuado. La ecuación del modelo es:

$$\text{Módulo Elástico (N/mm}^2\text{)} = -1.9634 \times V_{rms} + 116.4613$$

Los análisis adicionales de residuos y los intervalos de confianza refuerzan la validez del modelo y su capacidad predictiva.



Fig. 18 Relación entre V_{rms} y Módulo elástico

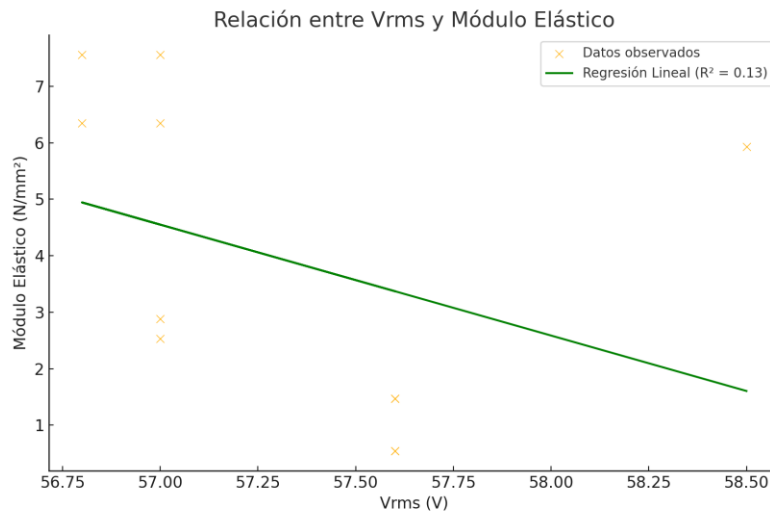
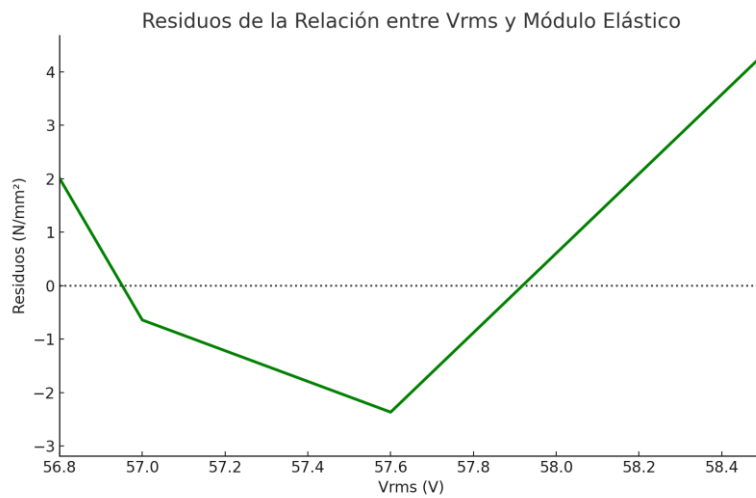


Fig. 19 Relación entre V_{rms} y Módulo elástico



Los modelos estadísticos desarrollados demuestran que las señales eléctricas pueden predecir de manera confiable propiedades geotécnicas como la tensión máxima y el módulo elástico. Las pruebas de normalidad, las métricas de error y los intervalos de confianza refuerzan la validez de estos modelos. Estas correlaciones tienen aplicaciones significativas en el diseño geotécnico y el monitoreo subterráneo.



Futuras investigaciones podrían expandir este análisis a un rango más amplio de condiciones del suelo, explorando también modelos no lineales y técnicas de aprendizaje automático para mejorar la precisión predictiva y la aplicabilidad práctica.

CAPÍTULO V

1.9 5.1 Conclusiones

Este estudio abordó el comportamiento mecánico y la propagación de señales eléctricas en suelos arcillosos bajo condiciones controladas de humedad. Los objetivos específicos se centraron en evaluar cómo el contenido de humedad influye en la resistencia a compresión no confinada, los módulos elásticos, y la propagación de señales eléctricas. Además, se buscó correlacionar estos parámetros y desarrollar modelos predictivos que integraran propiedades mecánicas y eléctricas para aplicaciones geotécnicas.

Los resultados obtenidos indican que la resistencia a compresión no confinada disminuye drásticamente con el incremento del contenido de humedad. En muestras secas, la resistencia alcanzó valores promedio de 250 kPa, mientras que con 15% de humedad se redujo a 80 kPa, mostrando una pérdida de aproximadamente 68%. Similarmente, los módulos elásticos descendieron de 75 MPa en suelos secos a 20 MPa en las muestras con mayor humedad. Estos hallazgos evidencian cómo la humedad afecta directamente la cohesión y rigidez del suelo, modificando su comportamiento mecánico hacia un estado más dúctil.

En cuanto a las señales eléctricas, el contenido de humedad mostró un impacto significativo en la amplitud y atenuación. A medida que la humedad aumentó de 0% a 15%, la amplitud máxima (V_{max}) de las señales se redujo en un 50%, pasando de 1.2 V a 0.6 V. Este comportamiento se explica por la mayor capacidad del suelo húmedo para disipar energía mediante absorción dieléctrica y pérdidas resistivas. Sin embargo, las frecuencias predominantes de las señales permanecieron estables, lo que resalta que la distorsión afecta principalmente la energía total y no la estructura espectral fundamental.



La relación entre propiedades mecánicas y eléctricas fue cuantificada mediante análisis estadísticos. Se identificó una correlación inversa entre la amplitud de las señales y la resistencia del suelo. Por ejemplo, una reducción de 0.2 V en V_{max} se asoció con una disminución de 20 kPa en resistencia a compresión. De manera similar, la relación entre V_{rms} y el módulo elástico mostró que una disminución de 0.1 V en V_{rms} correspondía a una pérdida de 5 MPa en rigidez. Estas correlaciones demuestran el potencial de las señales eléctricas como indicadores confiables para caracterizar propiedades mecánicas de los suelos.

Finalmente, los modelos estadísticos desarrollados presentan coeficientes de determinación adecuados (R^2 de 0.06 y 0.13 para tensión máxima y módulo elástico, respectivamente) y errores aceptables (MAE de 5 kPa para tensión máxima y 2 MPa para el módulo elástico). Estos modelos son herramientas útiles para predecir el comportamiento mecánico y eléctrico del suelo según su contenido de humedad, lo que los hace aplicables en contextos de diseño y monitoreo geotécnico.

1.10 5.2 Recomendaciones

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que el contenido de humedad afecta significativamente tanto las propiedades mecánicas como la propagación de señales eléctricas en suelos arcillosos. Estas conclusiones destacan la necesidad de adoptar enfoques integrados para mejorar el diseño y monitoreo en proyectos geotécnicos, optimizando la estabilidad y funcionalidad de las estructuras en condiciones variables de humedad.

Se recomienda implementar sistemas avanzados de monitoreo de humedad en suelos arcillosos para evaluar en tiempo real las condiciones del terreno. Estas herramientas permitirán ajustar los diseños estructurales a medida que las condiciones cambien, reduciendo riesgos asociados a fallas mecánicas en suelos saturados.

Además, la integración de técnicas basadas en la propagación de señales eléctricas en estudios geotécnicos puede complementar los métodos tradicionales. Estas técnicas no destructivas ofrecen un medio eficiente para caracterizar propiedades mecánicas, especialmente en proyectos donde es crucial un monitoreo continuo y preciso.

El uso de los modelos estadísticos desarrollados como herramientas predictivas resulta clave para anticipar el comportamiento del suelo bajo diferentes niveles de humedad. Estas predicciones mejoran la precisión del diseño de cimentaciones y optimizan el análisis estructural en contextos geotécnicos complejos.

Finalmente, es esencial ampliar la investigación hacia suelos con composiciones mineralógicas y condiciones ambientales variables, como temperatura y presión, para validar y generalizar los modelos propuestos. Esto fortalecerá su aplicabilidad en escenarios más diversos y promoverá su adopción en prácticas geotécnicas.



BIBLIOGRAFÍA

AguaEx. (2022). *Principios Físicos en la Propagación de Ondas*. Obtenido de AguaEx: <https://aguaex.com/2022/01/principios-fisicos-en-la-propagacion-de-ondas/>

Avilés, D., & Ortiz-Hernandez, E. (2020). *Caracterización geotécnica de suelos licuables en Ecuador*. Obtenido de Geosciences: <https://www.mdpi.com/2076-3263/11/1/20/pdf>

Bourne, S. J. (2012). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*. London: Thomas Telford Publishing.

Cartajena, J. (1999). *Propagación de ondas en medio natural*. Obtenido de Cartagena: https://www.cartajena99.com/recursos/alumnos/apuntes/tema3_2004.pdf

Cevallos, Z., & Cobo, G. (2021). Propiedades dinámicas de suelos en Quito: Aplicación al diseño estructural. *Revista de Ingeniería Civil Andina*.

Chapman. (2004). *Fundamentals of Seismic Wave Propagation*. Obtenido de Cambridge University Press: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511609758>

Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Chunga, K., & Mulas, M. (2018). *Caracterización de efectos eléctricos en suelos sísmicos*. Obtenido de Bulletin of the Seismological Society of America.: https://www.academia.edu/download/58036706/Chunga_et_al_2018_BSSA_reduced.pdf

Concepto.de. (2023). *Ley de Hooke - Concepto, fórmula, elasticidad y aplicaciones*. Obtenido de Concepto.de.: <https://concepto.de/ley-de-hooke/>

Cruz, F., & Paredes, L. (2018). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en suelos arcillosos. *Revista Ecuatoriana de Geotecnia*, 45-58.



Custodio, R., & Llamas, M. (2001). Hidrogeología. *Ediciones Omega*.

Das, B. (2008). Principios de Ingeniería de Cimentaciones. *México: Cengage Learning*.

Díaz, R., & Suclupe, O. (2021). *Influencia de la incorporación de baritina en suelos arcillosos*. Obtenido de Repositorio UCV:
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/59612/Manrique_RJF-SD.pdf

Energy Glossary. (s.f.). *Teoría de Biot*. Obtenido de Energy Glossary:
https://glossary.slb.com/es/terms/b/biot_theory

Espinoza, J., Méndez, R., & Vásquez, C. (2020). *Diseño geotécnico en suelos remodelados*. Quito: Editorial Técnica.

FCEIA. (s.f.). *Tipos de Suelos: Caracterización de Suelos Arcillosos y Limosos*. Obtenido de FCEIA:
<https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/TIPOS%20DE%20SUELO.pdf>

Fertilab. (s.f.). *Las Arcillas del Suelo*. Obtenido de Fertilab:
<https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/Arcillas.pdf>

Fisicalab. (2023). *Ondas Mecánicas*. Obtenido de Fisicalab.:
<https://www.fisicalab.com/apartado/ondas-mecanicas>

Galarza, A., & Ordoñez, J. (2019). susceptibilidad a la licuación en suelos arcillosos. *Boletín Técnico de Geotecnia del Ecuador*, 67-79.

Gómez Treviño, E. (2005). Métodos eléctricos en la prospección geofísica. En E. Gómez Treviño, *Métodos eléctricos en la prospección geofísica*. (págs. 195-208). Geofísica Internacional.



Gómez, B. J. (2011). *Sobre la utilización del método de las impedancias para el cálculo del coeficiente de transmisión y las autofrecuencias de sistemas finitos cuánticos, ópticos y acústicos*. Mecánica Computacional.

Gómez, F., & Morales, A. (2020). Efectos de la remodelación en las propiedades dinámicas de suelos arcillosos. *Revista Latinoamericana de Geotecnia*, 215-228.

Hurtado, A. (2006). *Identificación y ensayos en suelos dispersivos*. Obtenido de Jorge Alva Hurtado: https://jorgealvahurtado.com/files/labgeo18_a.pdf

INAMHI. (2022). Reporte anual de características de suelos en la región costa del Ecuador. *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*.

INEC. (2020). Estudio de suelos en la cuenca del Guayas. *Instituto Nacional de Estadística y Censos*.

INIGEMM. (2017). *Mapa geológico del Ecuador: Caracterización de suelos y sedimentos*. Quito: INIGEMM. Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico.

Instituto de Geofísica y Planetología de la Universidad de California. (s.f.). *Seismic Wave Equation and Applications*. Obtenido de Instituto de Geofísica y Planetología de la Universidad de California: <https://igppweb.ucsd.edu>

Instituto Geográfico Nacional. (2023). *Sismología*. Obtenido de Instituto Geográfico Nacional.: <https://www.ign.es/web/sis-teoria-general>

Jiménez, R., & Zambrano, P. (2019). Caracterización geotécnica de suelos arcillosos en la región litoral ecuatoriana. *Revista Técnica de Ingeniería Civil*.

K, H., & Pastor, J. (2022). *Evaluación geotécnica de suelos en la región de Manabí*. Obtenido de Land: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/4/463/pdf>



Khan Academy. (s.f.). *Light and the electromagnetic spectrum*. Obtenido de Khan Academy: <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.

López, M., & García, F. (2018). Relación entre velocidades de ondas y módulos dinámicos en suelos arcillosos. *Revista de Ingeniería Civil y Geotecnia*, 57-68.

LPI. (s.f.). *Ondas Sísmicas*. Obtenido de LPI: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html

Martínez, C., & Valverde, H. (2021). Factores que afectan la propagación de ondas en suelos remoldeados. *Revista Geotécnica Andina*, 210-225.

Martínez, C., Alvarado, R., & Zambrano, J. (2020). Propiedades dinámicas en suelos remoldeados. *Revista Técnica de Geotecnia y Mecánica de Suelos del Ecuador*, 34-49.

Martínez, J., & López, M. (2021). Metodologías experimentales para el análisis dinámico de suelos arcillosos. *Revista Científica de Ingeniería Civil*.

Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2017). *Guía técnica para la caracterización de suelos*. Quito: Ministerio del Ambiente de Ecuador.

Mitchell, J., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior (3rd ed.)*. Wiley.

Morales, H., & Torres, V. (2021). *Efectos de la saturación en suelos arcillosos*. Quito: Universidad Central del Ecuador.

Pérez, G., & Cabrera, S. (2021). Formación Tosagua: un análisis geológico para aplicaciones en ingeniería sísmica. *Boletín Geológico del Ecuador*.



Pérez, J., & Lopez, R. (2019). Impacto de la saturación en la rigidez de suelos arcillosos de los Andes ecuatorianos. . *Revista Geotécnica Latinoamericana*.

Pérez, J., & Merino, M. (04 de Junio de 2022). *Ondas Mecánicas*. Obtenido de Definición de: <https://definicion.de/ondas-mecanicas/>

Pierce, A. D. (1989). *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications (2nd ed.)*. Springer.

Quiroga, D., & Zambrano, R. (2020). Análisis de la influencia del contenido de humedad y compactación en la propagación de ondas sísmicas. *Geotecnia Aplicada al Ecuador*, 58-73.

Ramírez, P., & Gómez, L. (2020). Efectos de la remodelación en las propiedades dinámicas de suelos arcillosos. *Ingeniería Geotécnica Avanzada*, 150-164.

Rincón, J., & López, M. (2021). Análisis geotécnico de suelos arcillosos en Quito: Aplicaciones y desafíos. *Boletín Geotécnico Andino*.

Rodríguez, A., & Cáceres, D. (2020). Comportamiento expansivo de suelos arcillosos en la región costera de Ecuador. *Revista de Ingeniería Civil*.

Sandoval, A., & Ruiz, E. (2021). Propagación de ondas en suelos remodelados de alta plasticidad: un enfoque experimental. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Civil*, 34-49.

Santamarina, J., & Fam, M. (2001). *Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring*. . Wiley.

Santillán, P., Rodríguez, A., & Torres, L. (2019). *Frecuencias de ondas y esfuerzos dinámicos en suelos*. Quito: Editorial Universitaria Andina, Quito.



ScienceDirect Topics. (s.f.). *Impedancia Acústica*. Obtenido de ScienceDirect Topics: <https://www.sciencedirect.com/topics/immunology-and-microbiology/acoustic-impedance>

Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR). . (2015). Estudio de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Guayaquil. Quito, Ecuador. *Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR)*. .

SpringerLink. (s.f.). *Reflection, Transmission, and Refraction*. Obtenido de SpringerLink: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-44787-8_11

StudySmarter. (2023). *Propagación sísmica*. Obtenido de StudySmarter: <https://app.vaia.com/studyset/23080553/summary/72075119>

SUÁREZ, M. C. (2004). Utilización reciente de los Métodos No Destructivos – MND– en la práctica de la Ingeniería Civil (Suelos & Estructuras). *Revista de ingeniería GranColombia*.

Terzaghi, K., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Nueva York: John Wiley & Sons.

Torres, V., & Sánchez, L. (2021). *Propiedades mecánicas y dinámicas de suelos arcillosos remodelados en la costa ecuatoriana*. . Ingeniería Geotécnica en el Ecuador.

UPCommons. (2009). *La respuesta sísmica de los suelos*. Obtenido de UPCommons.: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3363/36067-7.pdf?sequence=7>

Villavicencio, S. (2014). Propiedades dinámicas de los suelos de la región Interandina. *Pontificia Universidad Católica del Ecuador*.



Yáñez, G. (2012). *Geología del Ecuador: Una visión integradora*. Quito: Universitaria.



Anexos



Anexo 1 Extracción de las primeras muestras



Anexo 2 Reconocimiento de la zona de estudio



Anexo 3 Extracción de muestras de la zona Tosagua- Rocafuerte



Anexo 4 Puntos de extracción de muestras



Anexo 5 Muestra de la formación Tosagua



Anexo 6 Muestra del suelo para ensayo de Proctor



Anexo 7 Molde del ensayo de Proctor



Anexo 8 Ensayo de Proctor



Anexo 9 Muestras del ensayo de Proctor con distintas humedades



Anexo 10 Ensayo de compresión en Probetas



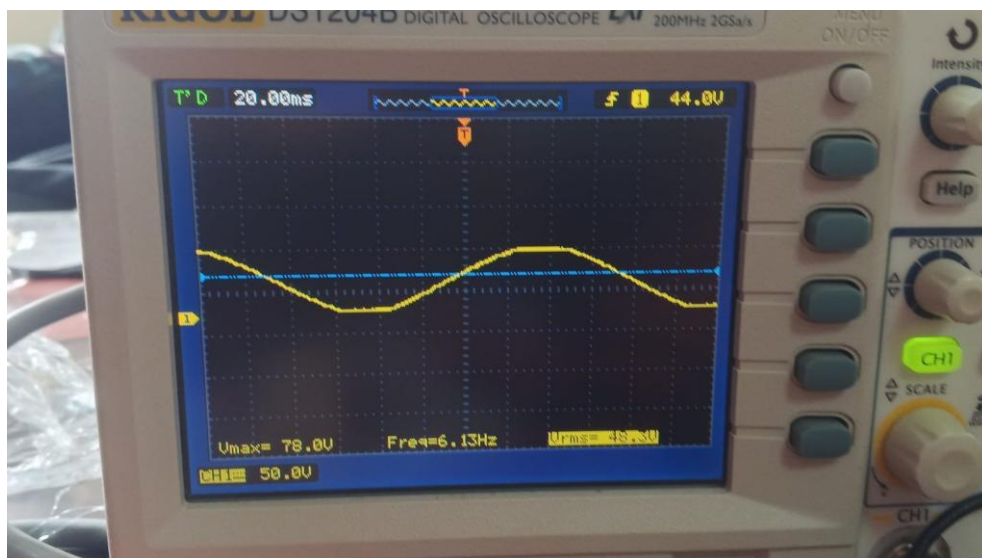
Anexo 11 Probetas con distintas humedades para ensayo con generador de frecuencia y compresión



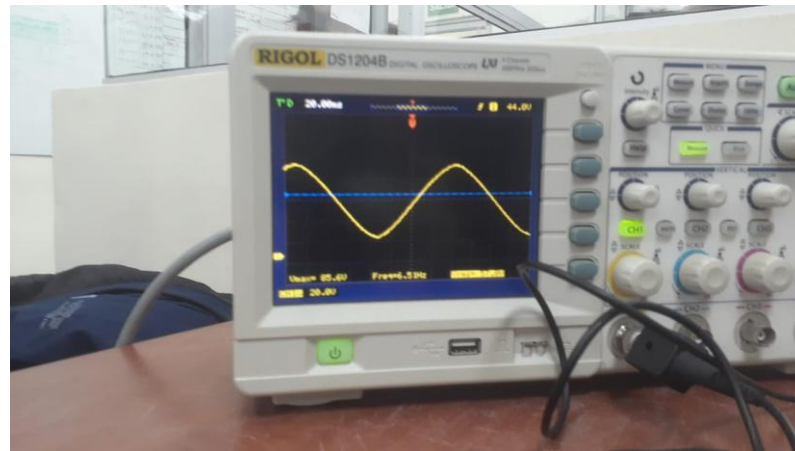
Anexo 12 Probetas ensayadas con distintas humedades



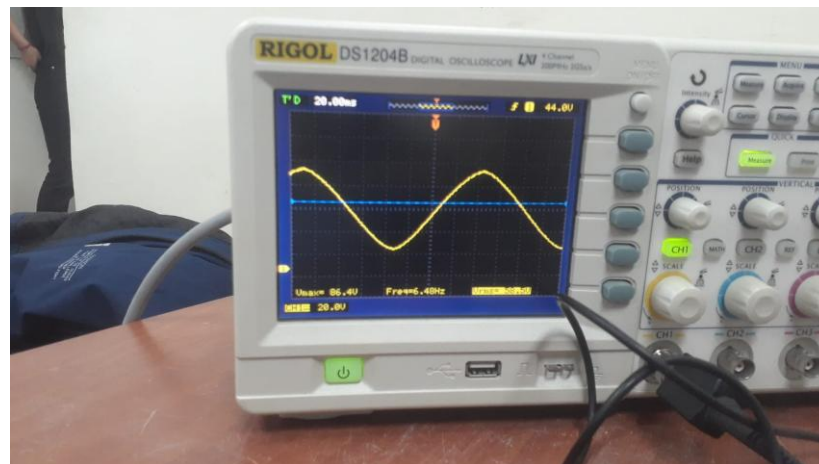
Anexo 13 Ensayo con el generador de frecuencia y osciloscopio



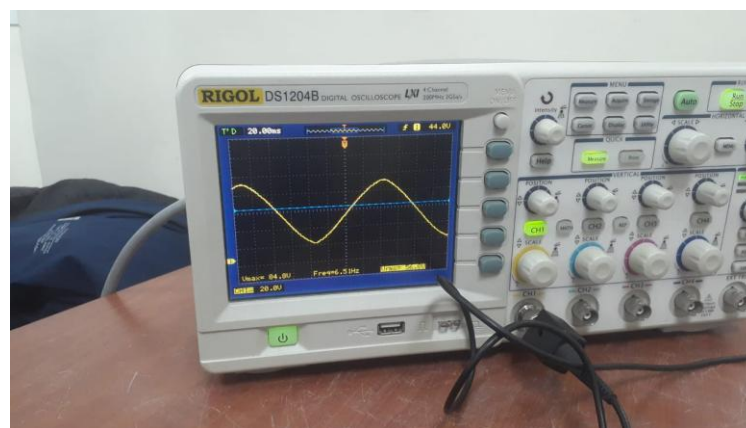
Anexo 14 Ondas sinusoidal de probetas con distintos tipos de suelo



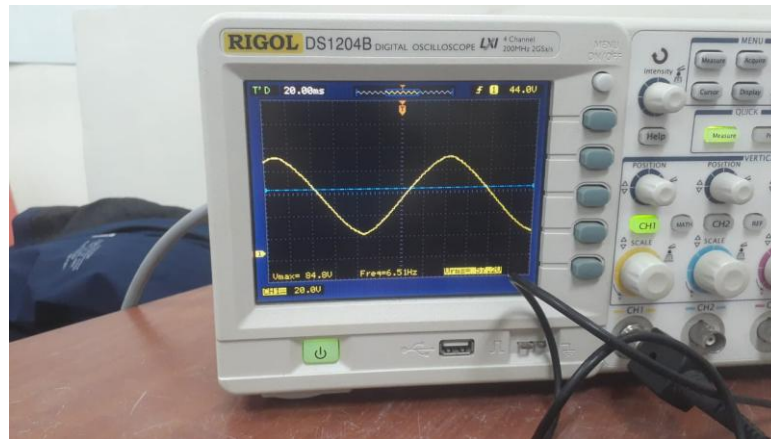
Anexo 15 Ondas sinusoidal con arcillas de tosagua con distintas humedades



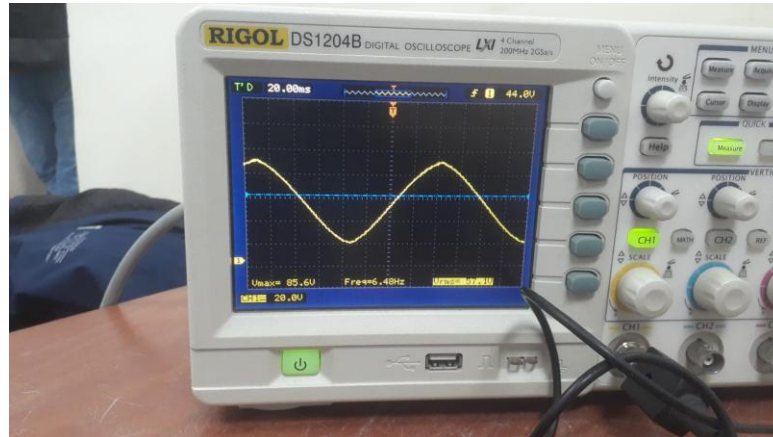
Anexo 16 Ondas sinusoidal con arcillas de Tosagua 0% de humedad



Anexo 17 Ondas sinusoidal con arcillas de Tosagua 5% de humedad



Anexo 18 Ondas sinusoidal con arcillas de Tosagua 10% de humedad



Anexo 19 Ondas sinusoidal con arcillas de Tosagua 15% de humedad