

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

“RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO CON FINES DE CIMENTACIÓN DEL LOCAL DEL CENTRO DE DESARROLLO CULTURAL DE LA COMUNIDAD DE SARAMURILLO, DISTRITO DE URARINAS, PROVINCIA DE LORETO, 2023”

Autores:

Medina Peláez, Percy Omar

Ríos Ríos, Gean Marcos

Asesor: Ing. Ulises Octavio Irigoin Cabrera M. Sc

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Ulises Irigoin', is written over a horizontal line that extends from the text 'M. Sc'.

Requisito para optar el título profesional de Ingeniero Civil

IQUITOS – PERÚ

2023

RESUMEN

En esta investigación del tipo descriptiva, se busca relacionar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos amazónicos con fines de cimentación de edificaciones, con los valores de resistividad eléctrica obtenido en las inmediaciones del sitio de implante.

Los resultados obtenidos aplicando el método de Wenner y los ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos, referidos a la estratigrafía y características físicas son muy similares; sin embargo, ha quedado demostrado que el método no convencional de resistividad eléctrica es mucho más eficiente.

Palabras Clave: Resistividad eléctrica; estratigrafía del suelo; propiedades físicas de los suelos.

ABSTRACT

DEDICATORIA

Dedico este informe de investigación a mi Padre Edgar Rios Perez , quien me guía por el buen camino para el fortalecimiento de mi profesión. A mi Madre eva rachel ríos Gonzales, por el apoyo constante y por el esfuerzo brindado, para que yo sea una buena persona y un profesional competente; ella ha sido el pilar fundamental para que yo pueda cumplir una de mis metas, que es la culminación de mis estudios universitarios. a mis hijos Marcus dylan ríos pezo y abby mikeyla Rachel, fueron mi motor y motivo para todo el esfuerzo y dedicación para culminar este proyecto profesional A mi hermano, Edgar Alexander, de quien siempre he recibido su apoyo y su confianza. A mis docentes por el apoyo recibido, para poder culminar mis estudios y para la elaboración de Tesis.

GEAN MARCOS RIOS

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada para mis padres pedro medina y mercedes Peláez, por su comprensión y ayuda en momentos malos y buenos. Me han enseñado a esforzarme por mis metas y perseverar siempre con buena voluntad. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi ética y mi empeño. Sin duda son mi ejemplo a seguir y mi motivación día a día para continuar creciendo personal y profesionalmente.

PERCY OMAR MEDINA

AGRADECIMIENTO

A dios por darme el conocimiento y la sabiduría para poder cumplir mis metas. A mis padres y a mi esposa e hijos por el apoyo incondicional que siempre me han brindado. Mi agradecimiento al Ing. Ulises Octavio Irigoín Cabrera M. Sc, asesor de tesis, por la buena orientación y el tiempo brindado, que fue fundamental para la elaboración de este informe de investigación. A mi familia, amigos y personas que estuvieron conmigo durante el proceso de mi carrera universitaria. a la empresa de geotécnica y electro servic por la confianza y la oportunidad de brindarme la información requerida para la elaboración de mi tesis. A los docentes, por los buenos consejos y por los conocimientos obtenidos, durante la carrera universitaria. Para todos los mencionados, un enorme agradecimiento.

GEAN MARCOS RIOS

AGRADECIMIENTO

Primeramente, mi sincero agradecimiento a mi asesor de Tesis al, Ing. Ulises Octavio Irigoín Cabrera M. Sc, por sus conocimientos, su orientación, su paciencia y su motivación han sido fundamentales para mi formación. También me gustaría agradecer los consejos recibidos a lo largo de los últimos años por otros profesores. Continuamente a mis padres, quienes me proporcionaron lo necesario para realizar mis estudios superiores Y, por último, en general a todos los familiares y amigos que de alguna manera me ayudaron a lo largo de estos años, para que pudiera culminar con éxito ésta meta. Para todos ellos, muchas gracias por todo.

PERCY OMAR MEDINA

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP

El presidente de Comité de Ética de la Universidad Científica del Perú - UCP
Hace constar que:

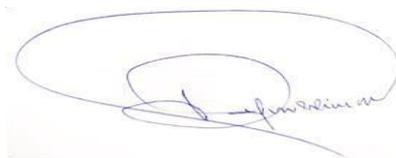
La Tesis titulada:

“RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO CON FINES DE CIMENTACIÓN DEL LOCAL DEL CENTRO DE DESARROLLO CULTURAL DE LA COMUNIDAD DE SARAMURILLO, DISTRITO DE URARINAS, PROVINCIA DE LORETO, 2023”

De los alumnos: **PERCY OMAR MEDINA PELÁEZ Y GEAN MARCOS RÍOS RÍOS**, de la Facultad de Ciencias e Ingeniería, pasó satisfactoriamente la revisión por el Software Antiplagio, con un porcentaje de **18% de similitud**.

Se expide la presente, a solicitud de la parte interesada para los fines que estime conveniente.

San Juan, 27 de Octubre del 2023.



Mgr. Arq. Jorge L. Tapullima Flores
Presidente del comité de Ética - UCP

Resultados_UCP_IngenieriaCivil_2023_Tesis_PercyMedina_G...

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

cybertesis.uni.edu.pe

Fuente de Internet

1%

2

Submitted to Universidad Andina Nestor
Caceres Velasquez

Trabajo del estudiante

<1%

3

16557801101891546621.googlegroups.com

Fuente de Internet

<1%

4

www.argentina.gob.ar

Fuente de Internet

<1%

5

ingenieriaciviltips.blogspot.com

Fuente de Internet

<1%

6

repositorio.unitepc.edu.bo

Fuente de Internet

<1%

7

Submitted to Universidad Nacional del Centro
del Peru

Trabajo del estudiante

<1%

8

myslide.es

Fuente de Internet

<1%



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Percy Omar Medina Felices
Título del curso:	Quick Submit
Título de la entrega:	Resultados_UCP_IngenieriaCivil_2023_Tesis_PercyMedina_Ge...
Nombre del archivo:	elate_y_R_m_R_m_2023_Informe_Final_de_Tesis_subsanada_...
Tamaño del archivo:	2.42M
Total páginas:	114
Total de palabras:	27,137
Total de caracteres:	141,917
Fecha de entrega:	27-oct-2023 10:01a. m. (UTC-0400)
Identificador de la entrega:	2209654594

1. Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. Contexto general

El presente informe tiene como objetivo principal describir el proceso de desarrollo de un sistema de gestión de recursos humanos (SGRH) para una empresa ficticia denominada "Empresa Ejemplo".

El sistema de gestión de recursos humanos (SGRH) es un sistema de información que permite a las empresas gestionar de manera eficiente y efectiva sus recursos humanos. Este sistema incluye funciones como el reclutamiento, la selección, el entrenamiento, el desarrollo profesional, el control de asistencia, el control de nómina, el control de vacaciones, el control de ausencias, el control de evaluaciones de desempeño, entre otros.

El objetivo de este informe es describir el proceso de desarrollo de un sistema de gestión de recursos humanos (SGRH) para una empresa ficticia denominada "Empresa Ejemplo". El informe se divide en tres partes: antecedentes, metodología y resultados.

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Con Resolución Decanal N°213-2023-UCP-FCEI de fecha 07 de Marzo de 2023, La FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP designa como Jurado Evaluador de la sustentación de tesis a los señores:

- | | |
|--|------------|
| • Ing. Félix Wong Ramírez, M.Sc. | Presidente |
| • Ing. Juan Jesús Ocaña Aponte, M. Sc. | Miembro |
| • Ing. Keuson Saldaña Ferreyra, Mg. | Miembro |

Como Asesor: Ing. Ulises Octavio Irigoin Cabrera, M. Sc.

En la ciudad de Iquitos, siendo las 19:30 horas del día Martes 21 de Noviembre del 2023, de manera presencial supervisado por el secretario académico del programa académico de Ingeniería civil de la facultad de Ciencias e Ingeniería de la Universidad Científica del Perú, se constituyó el Jurado para escuchar la sustentación y defensa de la Tesis: "**RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO CON FINES DE CIMENTACIÓN DEL LOCAL DEL CENTRO DE DESARROLLO CULTURAL DE LA COMUNIDAD DE SARAMURILLO, DISTRITO DE URARINAS, PROVINCIA DE LORETO, 2023**".

Presentado por los sustentantes:

**PERCY OMAR MEDINA PELÁEZ Y
GEAN MARCOS RÍOS RÍOS**

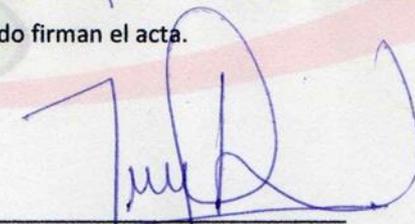
Como requisito para optar el título profesional de: **INGENIERO CIVIL**

Luego de escuchar la sustentación y formuladas las preguntas las que fueron: *ABSUELTAS*
El Jurado después de la deliberación en privado llegó a la siguiente conclusión:

La sustentación es:

Aprobada por unanimidad

En fe de lo cual los miembros del Jurado firman el acta.



Presidente



Miembro



Miembro

HOJA DE APROBACIÓN

Tesis sustentada en acto publico el día Martes 21 de Noviembre del 2023, a las 19:30 Horas, en las instalaciones de la UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ.



PRESIDENTE DEL JURADO
Ing. Félix Wong Ramírez, M.Sc.



MIEMBRO DEL JURADO
Ing. Juan Jesús Ocaña Aponte, M. Sc.



MIEMBRO DEL JURADO
Ing. Keuson Saldaña Ferreyra, Mg.



ASESOR
Ing. Ulises Octavio Irigoín Cabrera, M. Sc.

CONTENIDO

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
CONTENIDO	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
1.	1
1.1.	1
1.1.1.	1
1.2.	12
1.2.1.	12
1.2.2.	38
1.2.3.	45
1.2.4.	59
1.2.5.	66
1.2.6.	74
1.3.	76
2.	79
2.1.	79
2.2.	80
2.2.1.	80
2.2.2.	80
2.3.	81
2.3.1.	81
2.3.2.	81
2.4.	82
2.4.1.	82
2.4.2.	83
2.5.	83
2.5.1.	83
2.5.2.	83
3.	85
3.1.	85
3.1.1.	85
3.1.2.	85
3.2.	86

3.2.1.	86	
3.2.2.	86	
3.3.	86	
3.3.1.	86	
3.3.2.	87	
3.3.3.	88	
3.4.	90	
4.	99	
4.1.	99	
4.1.1.	99	
4.1.2.	100	
4.1.3.	100	
4.1.4.	103	
4.2.	105	
5.	108	
5.1.	108	
5.2.	109	
6.	111	
ANEXOS		114
ANEXO 1		114
ANEXO 2		115
ANEXO 3.		116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos de campo vs Norma Técnica	9
Tabla 2. Profundidad de exploración y de filtraciones o nivel freático	11
Tabla 3. Denominaciones de la compacidad	18
Tabla 4. Clasificación suelos en 04 grandes grupos en función de su granulometría.	25
Tabla 5. (SUCS); símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.	26
Tabla 6. Niveles de Materia Orgánica	33
Tabla 7. Tipo de edificación para investigación de suelos	33
Tabla 8. Número de puntos de investigación de suelo	34
Tabla 9. Criterios para identificar suelos aptos para construcción	35
Tabla 10. Relación de resistividad con características del suelo	41
Tabla 11. Valores de Resistividad en terrenos	45
Tabla 12. Resistividades medias en terrenos típicos	46
Tabla 13. Efecto de la humedad en la resistividad del terreno	48
Tabla 14. Efectos de la temperatura en la resistividad del terreno	50
Tabla 15. Resistividades de distintos tipos de agua	53
Tabla 16. Resistividad del suelo según su antigüedad	55
Tabla 17. Resistividad por constitución del suelo	55
Tabla 18. Resistividades referenciales de suelos naturales genéricos	56
Tabla 19. Naturaleza del terreno vs Rango de Resistividad eléctrica	56
Tabla 20. Comparación de los métodos de Wenner y Schlumberger	71
Tabla 21. Coordenadas UTM, Sistema WGS-84 Zona 18L	99
Tabla 22. Resistividad aparente para cada separación de electrodos	99
Tabla 23. Calicata C-1. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia	100
Tabla 24. Calicata C-1. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia	100
Tabla 25. Calicata C-2. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia	101
Tabla 26. Calicata C-2. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia	101
Tabla 27. Calicata C-3. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia	102
Tabla 28. Calicata C-3. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia	102
Tabla 29. Cuadro de resultados de tipos de suelos por estratos en calicatas	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva granulométrica de un suelo (Según Lambe, 1951).	21
Figura 2. Curvas granulométricas	22
Figura 3. Profundidad de desplante.	39
Figura 4. Resistividad de un cubo de determinado terreno de 1m de arista.	42
Figura 5. Representación de un suelo estratificado	46
Figura 6. Variación de la resistividad en función de la humedad y dos temperaturas distintas según Albrecht	49
Figura 7. Resistividad relativa, según la variación de temperatura del terreno.	50
Figura 8. Variación de la resistividad con la compacidad del terreno.	51
Figura 9. Influencia de la estratificación del terreno con dos capas en la resistividad.	54
Figura 10. Líneas de campo eléctrico y superficies equipotenciales	58
Figura 11. Ley de Ohm aplicado a la superficie de un suelo	59
Figura 12. Resistividad aparente vs profundidad usando método de sondeo	62
Figura 13. Aplicación correcta e incorrecta del método de Wenner	63
Figura 14. Variaciones laterales típicas en un terreno	63
Figura 15. Calicata eléctrica usando la configuración de Wenner	65
Figura 16. Configuración de Wenner.	68
<i>Figura 17. Configuración de Schlumberger</i>	70
Figura 18. Resistividad Media vs Espaciamiento	72
Figura 19. Curvas para “K” positivos	73
Figura 20. Curvas $p_1/p(a)$ vs h/a para “k” positivos	73
Figura 21. Curvas para “k” negativos	74
Figura 22. Curvas $p_1/p(a)$ vs h/a para “k” negativos	74
Figura 23. Operacionalización de Variables	84
Figura 24. Resistividad vs distancia	93
Figura 25. Definición de las dos capas de estratos	93
Figura 26. Intersección de las curvas “ $k \times h_1$ ” y “ $k \times h_2$ ”	95

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes del estudio

1.1.1. Antecedentes generales

Lavalle (2021), para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Eléctrico, en su tesis “Estudio comparativo de métodos de medición de la resistividad del terreno y propuesta de protocolo de medición”, llegó, entre otras, a las siguientes conclusiones:

Un protocolo de medición de resistividad del terreno, “Es en realidad una estrategia, y como toda estrategia, su fin es realizar algo de la mejor forma posible, basado en las buenas prácticas de normas nacionales como internacionales. El resultado de poseer un buen protocolo de medición posee un impacto positivo en la eficacia, eficiencia y confiabilidad de las medidas. Permite no sólo ahorrar tiempo y hacer una correcta interpretación de los resultados, sino también realizar los trabajos de manera segura, sin poner en riesgo a ninguna entidad ya sean personas o equipos”. (Lavalle, 2021, p.121).

“La resistividad eléctrica del terreno es un parámetro que varía con una gran cantidad de factores como la concentración de sales, humedad, temperatura, compactación, tipo de sustancias presentes y en general de la composición del terreno. Esta amplia gama de factores que la alteran hace posible que sus valores se puedan usar para identificar la estructura presente en el suelo y así determinar el tipo de mineral del que está compuesto. Posee gran cantidad de aplicaciones no solamente en el desarrollo y proyectos de sistemas de puesta a tierra, sino que también es una propiedad clave en la exploración minera, petrolera y masas de agua subterráneas. Actualmente su uso se ha expandido incluso en determinar la eficiencia del riego tecnificado en cuanto a la retención de humedad se refiere” (Lavalle, 2021, p.121).

“Cada fabricante de un equipo posee una serie de recomendaciones que no deben de pasar de irrelevantes al momento de realizar las

mediciones. [...]. Algunos entregan el valor de resistividad directamente (habiendo colocado previamente la distancia entre electrodos), más otros entregan solo el valor de resistencia, por lo que posterior a la medición, se precisa de un pre análisis para aplicar una fórmula matemática, acorde con la configuración que el fabricante emplee en su manual de usuario, para luego de ello encontrar la resistividad” (Lavalle, 2021, p.121).

“Los métodos tanto para medir la resistividad como para su posterior interpretación son muy variados en su forma. Elegir el adecuado y entender sus alcances y limitaciones es necesario para una buena aproximación. [...], el desarrollo del método de interpretación por curvas patrón, revolucionó el análisis de como ver la estructura equivalente del terreno, en cuanto a estratos y constitución de este se refiere. Lo novedoso de ello fue crear a partir de métodos matemáticos, curvas adimensionales que aproximarán de buena manera el terreno. El desarrollo de los computadores no redujo el uso de las curvas patrón, sino que lo ponderó” (Lavalle, 2021, p. 121-122).

Lavalle (2021), recomienda, para caracterizar verdaderamente un terreno, aparte de realizar un par de mediciones de dirección perpendicular entre ellas, también, realizar mediciones en direcciones auxiliares para descartar posibles variaciones laterales que podrían pasar desapercibidas con un solo par de mediciones. Asimismo, para la medición de resistividad aparente, recomienda aplicar la configuración de Wenner, teniendo en cuenta que sus variantes sobre cómo y dónde colocar los electrodos de potencial y corriente, poseen su propia fórmula de obtención de resistividad.

Lavalle (2021), precisa la diferencia existente entre resistencia eléctrica y resistividad, al señalar que mientras la resistencia depende de las características geométricas y no solamente del material en sí, la resistividad eléctrica es una propiedad o parámetro que es intrínseco a la materia que compone un determinado material y a las condiciones que este posea en un espacio físico; siendo exigente el cumplimiento de

protocolos claros y precisos en su medición, los cuales deben contemplar no solamente un correcto uso del equipo, sino también reunir información acerca de diversas propiedades del terreno a evaluar como temperatura, humedad, potencial de hidrogeno, compactación e incluso el último día de lluvia en la zona (Lavalle, 2021).

Quispilaya y Cruz (2018), en su trabajo de tesis “Propuesta del método no convencional Wenner de resistividad eléctrica para caracterización de suelos en institución educativa Libertador San Martín – Recuay 2018”, seleccionaron áreas de estudio en la zona de expansión de la Institución educativa para obtener las características, constitución y estructura del subsuelo en la edificación, para lo cual extrajeron muestras que fueron sometidas a ensayos en laboratorio de mecánica de suelos con el objetivo de determinar sus principales características para la clasificación de suelos SUCS; así también en las mismas áreas de las calicatas, se realizaron sondeos eléctricos verticales mediante mediciones de resistividad eléctrica por el Método Wenner utilizando un Telurómetro Megabras Digital MTD – 20KWe, las cuales fueron procesadas con el software IPI2WIN, y, llegaron a los siguientes resultados:

- “Los cortes geoelectricos predominantes en la Institución educativa Libertador San Martin fueron los de tipo H de tres capas $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ” (Quispilaya y Cruz, 2018).
- “El análisis de suelo utilizando el método Wenner de resistividad eléctrica permitió con buenos resultados obtener la clasificación de suelos, la determinación de espesores y la separación Litológica que son datos importantes para estimar profundidad de cimentación” (Quispilaya y Cruz, 2018).
- “La correlación entre el Método Wenner de Resistividad eléctrica y el convencional fue satisfactoria, al presentar resultados semejantes en cuanto a clasificación de suelos, estratigrafía y profundidad de cimentación” (Quispilaya y Cruz, 2018).

- “El tiempo y costo asociados al empleo del método Wenner de resistividad eléctrica en comparación con el método convencional fueron favorables con relaciones 7:1 y 2:1 en tiempo y costo respectivamente” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Las conclusiones principales de la investigación fueron:

- “Se logró determinar las características del suelo en la Institución Educativa “Libertador San Martín” mediante el empleo del Método Wenner de resistividad eléctrica a partir de valores de resistividad aparente tomados directamente en campo” (Quispilaya y Cruz, 2018).
- “El método Wenner de resistividad eléctrica ha resultado ser un buen método para obtener el corte geoelectrico y geológico del suelo sin necesidad de realizar excavaciones, esto contribuye a determinar la capa de suelo competente para la cimentación de una edificación, siendo este dato muy importante para la futura construcción” (Quispilaya y Cruz, 2018).
- “En los suelos de la Institución educativa Libertador San Martín existe una correlación satisfactoria entre el método Wenner de resistividad eléctrica y el método convencional de análisis de suelos, debido a que se obtuvieron resultados semejantes en cuanto a estratigrafía (9% de error), clasificación de suelos y profundidad de desplante” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Jiménez (2008), “en la tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas titulada “Elaboración de un plan de explotación de aguas subterráneas en una zona de la península de Santa Elena, mediante la interpretación de métodos resistivos” realizada en la Escuela Superior Politécnica del Litoral facultad de ciencias de la tierra – Ecuador tuvo como objetivo desarrollar una red de sondeos eléctricos verticales en la zona de Salinas, Zapotal,

Chanduy y Santo Tomas; así también, elaborar mapas de resistividad para la caracterización geoelectrica de los acuíferos subterráneos. Mediante la interpretación de valores de resistividad se logró identificar mejores áreas para la construcción de nuevos pozos, además se planteó un plan de explotación racional del recurso para satisfacer la demanda de agua en los sectores de interés. El marco teórico forma parte del aporte para la presente investigación” (Quispilaya y Cruz, 2018)

García y Otros (2011) “en la tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, titulada “Aplicación de la prospección geofísica utilizando el método Schlumberguer para exploración de agua subterránea en cantón Los Magueyes, colonia Santa Lucia, municipio de Ahuachapan” realizada en Universidad de El Salvador escuela de Ingeniería Civil facultad de ingeniería y arquitectura tuvieron como objetivo aplicar el método Schlumberger para determinar las características resistivas de los diferentes estratos y determinar la profundidad a la que se encuentra el posible acuífero, en este trabajo de graduación establecieron el procedimiento a seguir para la identificación de posibles mantos de agua subterránea utilizando el método Schlumberger y que estos a su vez puedan ser utilizados por ingenieros civiles en el estudio de acuíferos subterráneos en una zona determinada; se logró determinar también la posible litología de la zona. El marco teórico forma parte del aporte para la presente investigación” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Arias (2011) “en la tesis para optar el Grado de Maestría en Ingeniería Geotecnia, titulada “Exploración Geotécnica – Relaciones Geo eléctricas” realizada en Universidad Nacional de Colombia facultad de minas Escuela de Ingeniería Civil tuvo como objetivo proponer una metodología de investigación geotécnica en suelos de la zona central de Antioquia que incluya y se beneficie de los métodos geo eléctricos de investigación del subsuelo, se ha demostrado que mediante la prospección geo eléctrica y a través del registro de resistividad real, se puede relacionar la calidad geo mecánica de los materiales para diferentes proyectos de ingeniería. El marco teórico y desarrollo de objetivos forman parte del aporte para la presente investigación” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Toledo (2015) “en la tesis para optar el Título de licenciado en Física, titulada “Aplicación de métodos geoelectricos en la prospección geofísica” realizada en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos facultad de ciencias físicas tuvo como objetivo determinar la profundidad a la que se encuentra el posible acuífero a través de las características resistivas de los diferentes estratos que se encuentran sobre este; llegando a la conclusión de que en tomografía eléctrica se determinó el nivel del acuífero y suelo altamente conductivo a través de valores de resistividad, así mismo se determinó que la humedad relativa y la temperatura altera la resistividad de los suelos en una prospección geofísica. El marco metodológico forma parte del aporte para la presente investigación” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Huisa (2017) “en la tesis para optar el Título de Ingeniero Geofísico, titulada “Aplicación de los métodos de Resistividad Multielectrodo – Georadar y su modelización 2D para caracterizar el Subsuelo en la ampliación del terminal portuario general San Martin Región Ica” realizada en Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa facultad de geología, geofísica y minas Escuela profesional de ingeniería Geofísica tuvo como objetivo presentar el método de resistividad Multielectrodo y Georadar para la caracterización del subsuelo en investigaciones geotécnicas en la Ampliación del Terminal Portuario General San Martin Región Ica, obteniendo como resultado que en correlación a ensayos in-situ para este estudio, se ha demostrado la credibilidad del procedimiento de trabajo de campo realizándose un control de calidad de datos de adquisición en campo, procesamiento e interpretación adecuado para proyectos con finalidades de ampliación portuaria en zonas marítimas. El marco teórico forma parte del aporte para la presente investigación” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Para **Ramírez (2017)** “en la tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, titulada “Evaluación por métodos no convencionales de caracterización de suelos del distrito de morales, provincia de San Martín - región de San Martín” realizada en Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto

facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura tuvo como objetivo analizar las propiedades físicas de diferentes tipos de suelos delimitada dentro de la localidad de Morales, en el perímetro de los jirones: Jr. Oxapampa, Jr. José Gálvez, Jr. Callao, Psje. Las Flores, mediante el empleo de métodos de resistividad eléctrica, en el distrito de Morales – provincia de San Martín – región San Martín, llegando a la conclusión que mediante prospección geoelectrica y a través del registro de resistividad real, se puede relacionar la calidad geomecánica de los materiales para diferentes proyectos de ingeniería; pues existe una alta correlación estadísticamente significativa entre los resultados del método tradicional con el método no convencional. $r = 0,875$ ” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Baca y Wong (2022) en su trabajo de tesis titulada “Resistividad eléctrica del terreno y caracterización del suelo de fundación de la Institución Educativa N° 60778, distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas, Perú 2022”, determinaron las propiedades físicas del suelo de fundación de esta edificación, llegando a las siguientes conclusiones:

1. “Efectuar mediciones de resistividad eléctrica en el terreno de emplazamiento de la Institución Educativa N° 60788 utilizando el Método de Wenner, permitió determinar las características geológicas y propiedades físicas de los estratos del suelo, verificándose la existencia de un alto nivel de correlación entre el corte geoelectrico y geológico y las características físicas del suelo; con lo cual la hipótesis general de la investigación ha quedado contrastada afirmativamente. Concluyéndose que el método Wenner de resistividad eléctrica es un buen método para obtener el corte geoelectrico y geológico del suelo sin necesidad de realizar excavaciones, para determinar la capa de suelo competente para la cimentación superficial de una edificación” (Baca y Wong, 2022, p. 103).

2. “Los resultados en el terreno de emplazamiento de la Institución Educativa N° 60778 obtenidos para el corte geológico según perfiles del suelo de los estudios de prospección a través de la práctica de calicatas y determinación de perfil por el método convencional en laboratorios de Mecánica de Suelos, son idénticos en espesor de capa existe una variación de 5% y la homogeneidad e isotropía es muy similar que el corte geológico obtenido a partir de la asociación del corte geoelectrico y el corte geológico obtenido a partir de la medición de la resistividad con el empleo del Método de Wenner, con lo cual la hipótesis específica 1 ha quedado confirmada” (Baca y Wong, 2022, p. 103).

3. “Las características físicas de los suelos determinados a partir de los ensayos de medición de resistividad eléctrica por el Método de Wenner son idénticos a los obtenidos por medición de las características físicas a través de ensayos convencionales de métodos normalizados en los estudios de Mecánica de Suelos; quedando así confirmada la hipótesis específica 2. (Baca y Wong, 2022, p.103-104)

4. “Al comparar la eficiencia para la obtención de resultados de características de estratos y propiedades físicas y mecánicas del suelo en la Institución Educativa N° 60778, resulta que los tiempos y costos del Método de Wenner de resistividad eléctrica son menores que los empleados para su determinación por el Método convencional de la Mecánica de Suelos, siendo favorables en una relación de 8:1 y de 2:1, respectivamente; quedando de esta manera confirmada la hipótesis específica 3 (Baca y Wong, 2022, p.104)

1.1.2. Antecedentes específicos del estudio

Estudio de Suelos con fines de Cimentación del Proyecto “Resistividad eléctrica del terreno con fines de cimentación del local del Centro de Desarrollo Cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto – departamento de Loreto”, elaborado para el Gobierno Regional de Loreto, año 2021 por SECATP Consultoría y Capacitación.

El estudio contiene entre otros, los siguientes aspectos: Exploración del sitio, muestreo y registro de exploración. Descripción y generalización de los perfiles estratigráficos y profundidad de la napa freática.

Investigación de Campo

En esta etapa de prospección in situ, se elaboraron tres (3) calicatas de 3.00m de profundidad máxima de exploración C-1, C-2, C-3. Para caracterizar al suelo de fundación en el área del proyecto; se tomaron muestras de las capas de suelo encontrados, eliminando 0.20m de material contaminado con raíces y restos orgánicos, clasificado como Ts. Al costado de las calicatas se efectuó el ensayo D.P.L.

Tabla 1. Ensayos de campo vs Norma Técnica

Ítem	Descripción	Norma Técnica Peruana	A.S.T.M.
1	Calicatas y Técnicas de Muestreo	339.162	D-420
2	Preservación y transporte de suelos	339.151	D-4220
3	Descripción Visual - manual	339.150	D-2488
4	Penetrómetro Dinámico Ligero de punta - D.P.L.	339.159	DIN 4094

Fuente: SECATP Consultoría & Capacitación

En el estudio se usó la perforación manual: ASTM D 1452 y el Ensayo de Penetración Dinámica Ligera (DPL): ASTM D 3441; NTP 339.159;

DIN 4094. En la investigación el consultor describe haber efectuado la penetración a cabo cada 0.10m en tramos de 1.00m hasta llegar a la profundidad de tres (3.00m).

Las muestras de materiales obtenidas en los trabajos de campo fueron analizadas en el laboratorio, para determinar sus propiedades y características físico-mecánicas fundamentales.

A continuación, se describen los suelos por estratos de las tres calicatas:

Calicata N° 01

Los primeros 0.20m se eliminó, por ser material orgánico, con presencia de raíces. El primer estrato de 0.20m a 0.50m de profundidad, conformado por un estrato de limo inorgánico, de color marrón con matices gris, húmeda, porcentaje apreciable de partículas finas, de baja plasticidad, clasificada como (ML) A-4 (3); y finalmente entre 1.20m a 3.00m, conformado por un estrato de limo inorgánico, de color marrón con matices gris; húmeda, porcentaje apreciable de partículas finas, de baja plasticidad, clasificada como (ML) A-4 (5).

Calicata N° 02

Los primeros 0.20m se eliminó, por ser material orgánico con presencia de raíces. El primer estrato de entre 0.20m a 1.20m, conformado por un estrato de limo inorgánico, de color marrón con matices gris; húmeda, porcentaje apreciable de partículas finas, de baja plasticidad, clasificada como (ML) A-4 (3).

El segundo estrato entre 1.20m a 3.00m, conformado por limo inorgánico, de color marrón con matices gris; húmeda, porcentaje apreciable de partículas finas, de baja plasticidad, clasificada como (ML) A-4 (8).

Calicata N° 03

Los primeros 0.20m se eliminó, por ser material orgánico con presencia de raíces. El primer estrato de 0.20m a 0.60m, conformado por un estrato de limo inorgánico, de color marrón con matices gris; húmeda, porcentaje

apreciable de partículas finas, de baja plasticidad, clasificada como (ML) A-4 (7).

Y el segundo estrato, entre 1.20m a 3.00m, conformado por un estrato de limo inorgánico, de color marrón con matices gris; húmeda, porcentaje apreciable de partículas finas, de baja plasticidad, clasificada como (ML) A-4 (5).

Registro de la conformación del sub suelo del área de estudio Nivel freático y filtraciones de aguas subterráneas

Se observó nivel freático, durante la fecha de elaboración de los ensayos In-Situ, setiembre de 2021; presentándose precipitaciones pluviales durante los trabajos de campo; no obstante, en temporadas de crecientes máximas, el nivel freático puede presentarse al nivel explorado; de acuerdo a las exploraciones realizadas en campo no se observó filtraciones de agua, que se detallan en el siguiente cuadro:

Tabla 2. Profundidad de exploración y de filtraciones o nivel freático

Calicat a N°	Profundida d de exploració n (m)	Profundidad de filtraciones o nivel freático (m)	Condición de zona a máx. creciente extraordinaria
C-1	3.00	Se observó nivel freático a 0.60m	Zona no inundable
C-2	3.00	Se observó nivel freático a 0.60m	Zona no inundable
C-3	3.00	Se observó nivel freático a 0.60m	Zona no inundable

Fuente: SECATP Consultoría & Capacitación

1.2. BASES TEÓRICAS

1.2.1. Suelos

1.2.1.1. El origen de los suelos

La mayoría de los suelos que cubren la tierra están formados por la meteorización de las rocas. Los geólogos emplean el término meteorización de las rocas para describir todos los procesos externos, por medio de los cuales la roca experimenta descomposición química y desintegración física, proceso mediante el cual masas de roca se rompen en fragmentos pequeños. Los suelos que provienen de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas presentan características diferentes si la alteración es física o química. Y así, cuando el efecto alterativo de las rocas se lleva a cabo por un medio físico se produce un suelo con la misma composición de ellas (Crespo, 2007).

Esta fragmentación continua, debida a los agentes físicos como el sol, el agua, el viento y los glaciares, es un mero cambio físico y por eso se llama también meteorización mecánica (Jara, 2014). Por otra parte, la meteorización química de una roca para dar origen al suelo, es un proceso de descomposición, mediante el cual los minerales constitutivos de las rocas madre cambian su constitución mineralógica de él debido principalmente a los agentes químicos, como la oxidación, carbonatación, y la hidratación. (Crespo, 2007). La meteorización mecánica es el proceso por el cual las rocas se fracturan en piezas de menor tamaño bajo la acción de las fuerzas físicas, como la corriente de agua de los ríos, viento, olas oceánicas, hielo glacial, acción de congelación, además de expansiones y contracciones causadas por ganancia y pérdida de calor (Muelas s.f.), (Jara, 2014).

En la descomposición química, los minerales persistentes se transforman en minerales de composición y propiedades físicas diferentes. Es preciso indicar que la desintegración física completa 1a descomposición, ya que los minerales y partículas rocosas de menor tamaño producidos por meteorización mecánica son mucho más susceptibles al cambio químico que

los granos minerales firmemente soldados en grandes masas de roca compacta (Muelas s.f.), (Jara, 2014).

La meteorización química es el proceso de descomposición química de la roca original. Entre los distintos procesos de alteración química pueden citarse: la hidratación (paso de anhidrita a yeso), disolución (de los sulfatos en el agua), la oxidación (de minerales de hierro expuestos a la intemperie), la cementación (por agua conteniendo carbonatos), etc., (Jara, 2014).

Por ejemplo, la meteorización química de los feldespatos puede producir minerales arcillosos. Muy relacionada con la meteorización química se encuentra la meteorización biológica, producida fundamentalmente por la actividad bacteriana, originando putrefacciones en materiales orgánicos. (Muelas s.f.).

La acción conjunta o individual de estos procesos de meteorización da lugar a un perfil de meteorización de la roca en función de la profundidad (ver figura 1). En este perfil la roca sana ocupa la zona más profunda, transformándose gradualmente a suelo hacia la parte más superficial. (Muelas s.f.).

Así, por ejemplo, la observación de una trinchera recién abierta (una excavación para una carretera, una pared de cantera, etc.), a menudo revelará una sucesión de capas de diferentes materiales térreos. En la base del afloramiento puede haber roca compacta denominada roca firme; se encuentra todavía en su lugar de origen y está relativamente poco modificada.

La roca firme suele presentar innumerables grietas, denominadas juntas o diaclasas, que son consecuencia de esfuerzos principalmente asociados a una historia anterior de procesos tectónicos. Allí donde existen familias de juntas que se cruzan, la roca se desintegra fácilmente en bloques. (Muelas s.f.).

Por encima de la roca firme puede haber una capa de materia mineral blanda, denominada regolita. (El prefijo rego viene de la palabra griega que significa "manto".) La regolita puede formarse in situ por descomposición y desintegración de la roca firme inmediatamente subyacente; este tipo se denomina regolita residual o suelo residual. Si esta capa de partículas

minerales relativamente sueltas o blandas, dispuestas sobre la roca firme, es transportada por agentes tales como corrientes de agua, hielo, viento, olas, recibe el nombre de regolita transportada o suelo sedimentario (Muelas s.f.).

1.2.1.2. Tipos de Suelos

A. Suelos residuales

Los suelos residuales se originan cuando los productos de la meteorización de las rocas no son transportados como sedimentos, sino que, se acumulan in situ. Si la velocidad de descomposición de la roca supera a la de arrastre de los productos de descomposición, se produce una acumulación de suelo residual.

Entre los factores que influyen sobre la velocidad de alteración en la naturaleza de los productos de meteorización están el clima (temperatura y lluvia), el tiempo, la naturaleza de la roca original, la vegetación, el drenaje y la actividad bacteriana. Los suelos residuales suelen ser más abundantes en zonas húmedas, templadas, favorables al ataque químico de las rocas y con suficiente vegetación para evitar que los productos de meteorización sean fácilmente arrastrados. (Muelas s.f.).

Carrillo-Gil (1978), tratando sobre los ensayos de laboratorio de suelos residuales, señaló: “En el Perú, los suelos tropicales en un gran porcentaje son de tipo saprolíticos, esto es, suelos arcillosos mezclados con limo y arena principalmente. Algunos resultados de ensayos de resistencia al cortante efectuadas en los suelos del Perú indican valores muy dispersos; sin embargo, se ha encontrado que la prueba de la veleta practicada en el campo en los suelos saprolíticos que se encuentran muy fisurados, la medida de la resistencia al corte sin drenaje efectuada en el campo arroja siempre valores mucho más confiables que las ensayos de laboratorio, comprobándose que estos valores son mucho más altos en casi todos los casos que los obtenidos por otros medios, siendo el límite más bajo los resultados de los ensayos triaxiales rápidos y los más próximos los resultados de los ensayos de Compresión-No-Confinada, quizás debido a la

descompresión que sufren estos suelos al ser obtenidos en profundidad y a la alteración de los especímenes con el manipuleo, o los efectos de la succión en los suelos parcialmente saturados que hacen variar su resistencia al cortante” (Carrillo-Gil, 1978).

Carrillo-Gill (2016), al tratar sobre el tema de estabilización con cal de suelos residuales en la selva baja peruana, señaló: “De la investigación llevada a cabo con fines de estabilización con cal para algunos suelos saprolíticos de la amazonia peruana que permanentemente presentan contenidos, de humedad natural mucho mayores que el óptimo de compactación, se han encontrado algunos resultados de laboratorio para especímenes que presentan portancia tan baja como CBR de 1% a 5% en promedio, y que al mezclarse con cal se obtiene un aumento substancial en el valor del CBR para diferentes tiempos de curado, probablemente debido al desarrollo de la reacción puzolánica en el suelo, estableciéndose que con 5% a 6% de cal hidratada en peso es posible obtener un mínimo de 15% de CBR como resistencia inicial para las arcillas saprofíticas de la selva baja, y si se continua el curado, se encontró que después de un buen tiempo el CBR aumentó considerablemente llegando hasta valores mayores del 29% en 140 horas (Carrillo-Gil, et al, 1993). En la mayoría de los casos, la adición de 5%, a 6% de cal hidratada fue suficiente para lograr resistencias adecuadas para el diseño de pavimentos de carreteras, calles y aeródromos para aviones medianamente pesados que normalmente hacen servicio en las áreas selváticas del Perú”.

B. Suelos sedimentarios

La formación de los suelos sedimentarios puede explicarse más adecuadamente considerando la formación, el transporte y el depósito de los sedimentos. (Muelas s.f.).

El modo principal de la formación de sedimentos lo constituye la meteorización física y química de las rocas en la superficie terrestre. En general, las partículas de limo, arena y grava se forman por la meteorización

física de las rocas, mientras que las partículas arcillosas proceden de la alteración química de las mismas. (Muelas s.f.).

Según Muelas s.f, los sedimentos pueden ser transportados por cualquiera de los cinco agentes siguientes: agua, aire, hielo, gravedad y organismos vivos. El transporte afecta a los sedimentos de dos formas principales:

- a) Modifica la forma, el tamaño y la textura de las partículas por abrasión, desgaste, impacto y disolución;
- b) Produce una clasificación o graduación de las partículas.

Después de que, las partículas se han formado y han sido transportadas se depositan para formar un suelo sedimentario. Las tres causas principales de este depósito en el agua son la reducción de la velocidad, la disminución de la solubilidad y el aumento de electrolitos. Cuando una corriente de agua desemboca en un lago, océano, etc., pierde la mayor parte de su velocidad. Disminuye así la fuerza de la corriente y se produce una sedimentación. Cualquier cambio en la temperatura del agua o en su naturaleza química puede provocar una reducción en la solubilidad de la corriente, produciéndose la precipitación de algunos de los elementos disueltos. (Muelas s.f).

Muelas s.f, concluye que, el suelo es el resultado del proceso de meteorización de las rocas, con o sin transporte de los productos de alteración. Los suelos se caracterizan fundamentalmente por los siguientes aspectos:

- Los suelos están formados por partículas pequeñas (desde micras hasta algunos centímetros) e individualizadas que pueden considerarse indeformables.
- Entre estas partículas quedan poros con un volumen total del orden de magnitud del volumen ocupado por ellas (desde la mitad a varias veces superior).

- Un suelo en particular, es un sistema multifase (sólida, líquida y gaseosa).
- Los poros pueden estar llenos de agua (suelos saturados), o con aire y agua (suelos semisaturados), lo que condiciona la respuesta de conjunto del material.

En condiciones normales de presión y temperatura, el agua se considera incomprensible. (Muelas s.f).

1.2.1.3. Propiedades físicas y clasificación de los suelos

1. Propiedades Físicas

a) Relaciones peso-volumen

Como se mencionó anteriormente, el suelo constituye un sistema de tres fases diferenciadas: la sólida (partículas minerales), la líquida (agua generalmente) y la gaseosa (aire o gas). Un elemento de suelo natural se lo separa en sus tres fases para facilitar la deducción de las relaciones entre ellas (Das, 2001). Las propiedades físicas se expresan, básicamente, a partir de las relaciones peso-volumen, (relaciones en volumen y relaciones en peso), la densidad o compacidad relativa, granulometría y plasticidad. Las relaciones en volumen son: índice de huecos o poros, porosidad y grado de saturación; y, las relaciones en peso: Humedad, peso específico de las partículas sólidas, peso específico del agua, peso específico seco, peso específico aparente y peso específico saturado (Das, 2001).

b) Densidad o compacidad relativa

La densidad relativa es una magnitud muy empleada para caracterizar la compacidad de un suelo granular; y está definida como:

$$D_r = \frac{e_{máx} - e}{e_{máx} - e_{emín}} \times 100 = \frac{\gamma_{dmáx}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{dmín}}{\gamma_{dmáx} - \gamma_{dmín}} \times 100$$

Siendo:

$e_{m\acute{a}x}$: Índice de huecos del suelo en el estado más suelto

$e_{m\acute{i}n}$: Índice de huecos del suelo en el estado más denso

e : Índice de huecos in situ

γ_d : Peso específico seco in situ

$\gamma_{dm\acute{a}x}$: Peso específico seco en el estado más denso ($e_{m\acute{i}n}$)

$\gamma_{dm\acute{i}n}$: Peso específico seco en el estado más suelto ($e_{m\acute{a}x}$)

En la tabla siguiente se indican las denominaciones de la compacidad de los suelos granulares a partir de su densidad relativa:

Tabla 3. Denominaciones de la compacidad

Densidad relativa (%)	Denominación
0 - 15	Muy suelto
15 - 35	Suelto
35 - 65	Medio
65 - 85	Denso
85 - 100	Muy denso

Fuente: Das, 2001.

c) Granulometría

En cualquier masa de suelo, los tamaños de las partículas varían, es decir su distribución no es uniforme. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica, es decir, la distribución, en porcentaje, de los distintos tamaños dentro del suelo. (Muelas s.f).

La distribución granulométrica de partículas de tamaño superior a 0,08 mm se determina generalmente mediante un análisis granulométrico por tamizado. Para partículas de tamaño inferior al mencionado (0,08 mm) se emplea la granulometría por sedimentación. (Muelas s.f).

El análisis granulométrico por tamizado se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través

de una serie de tamices (cuyo tamaño de malla suele ir disminuyendo en progresión geométrica de razón 2), agitando el conjunto. La cantidad de suelo retenido en cada tamiz se pesa y se determina el porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz. (Muelas s.f).

El porcentaje de material que pasa por cada tamiz, determinado de la forma anterior, se representa en un gráfico semilogarítmico. El diámetro de la partícula se representa en una escala logarítmica (abscisas), y el porcentaje de material que pasa se representa en escala aritmética (ordenadas), (Muelas s.f).

Según Muelas s.f, una vez determinada dicha curva granulométrica, existen dos coeficientes que se utilizan para una mejor descripción de la granulometría de un suelo. Estos coeficientes son:

- **Coeficiente de uniformidad:** $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$
- **Coeficiente de curvatura:** $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$

El coeficiente de uniformidad representa la relación entre el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 60% de material y el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 10%. (Das, 2001).

El coeficiente de curvatura del suelo, también llamado de graduación, si adopta valores entre 1 y 3 se considera suelo bien graduado. Se determina dividiendo el cuadrado del diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 30% del material, entre el producto de los diámetros correspondientes a los tamices por los que pasa un 60% y un 10% del material. (Muelas s.f).

Das (2001), al tratar del análisis granulométrico con el hidrómetro, señala que: El análisis granulométrico por sedimentación (partículas de tamaño inferior a 0,08 mm) se lleva a cabo con el hidrómetro, y se basa en el principio de la sedimentación de las partículas de suelo en agua. Los hidrómetros están calibrados para mostrar la cantidad de suelo que está aún en suspensión en cualquier tiempo dado, t. El diámetro máximo de las partículas de suelo, aún, en suspensión en el tiempo t se determina mediante la ley de Stokes:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\gamma_w}} \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Donde:

D = diámetro de la partícula de suelo

G_s = peso específico de los sólidos

η = viscosidad del agua

γ_w = peso específico del agua

L = longitud efectiva (es decir, longitud medida de la superficie del agua en la probeta al centro de gravedad del hidrómetro.

t = tiempo

Las partículas de suelo con diámetros mayores que los calculados con la ecuación anterior se habrán asentado más allá de la zona de medición. Así, con lecturas tomadas en tiempos diferentes en el hidrómetro, el porcentaje de suelo más fino que un diámetro dado puede calcularse y prepararse, a partir de los diámetros, una gráfica de la distribución granulométrica de los suelos (Das, 2001).

Por su parte, Crespo Villalaz (2007), en su libro *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*, Sexta Edición, Limusa Noriega Editores, señala: Los Procedimientos para la determinación de los tamaños de partículas menores a 0.074 mm están basados en la Ley de Stokes, que da la velocidad de sedimentación de partículas sólidas esféricas en un líquido. La velocidad de sedimentación está dada por la fórmula:

$$v = \frac{2 \cdot g \cdot r^2 (D_a - D_w)}{9 \cdot \rho} = \frac{H}{t}$$

En la que:

v = Velocidad de caída de las partículas en cm/seg.

g = Aceleración de la gravedad en cm/seg²

r = Radio de la esfera en cm

D_a = Densidad absoluta del material en g/cm³

D_w = Densidad absoluta del agua en g/cm³.

ρ = Viscosidad absoluta del agua en g/cm.seg

H = Altura de caída de la esfera en cm

t = Tiempo transcurrido, en seg.

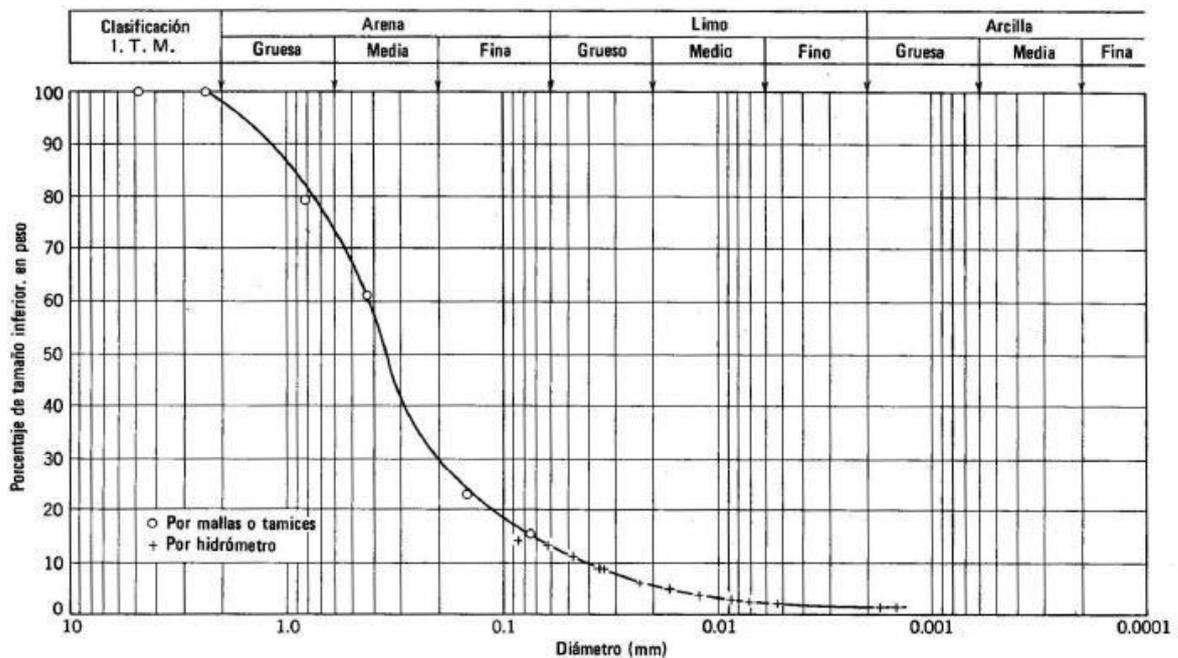
Con agua a 20°C, $\rho = 0.0101 \text{ g}/(\text{cm}.\text{seg})$ y con esferas de densidad absoluta de $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$, que es un valor medio entre los minerales que se encuentran en el suelo, la fórmula anterior se transforma, quedando así:

$$v = 35,613.86 r^2$$

Con los dos métodos de análisis granulométrico expuestos, tanto el por tamizado, como con el hidrómetro, puede determinarse la curva granulométrica completa de una muestra de suelo (ver curvas granulométricas adjuntas).

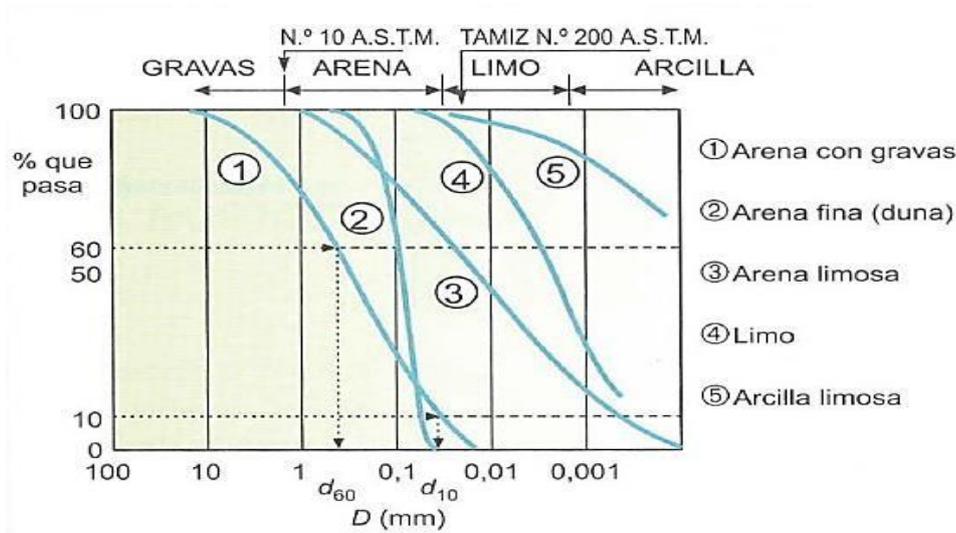
En función de la granulometría se clasifican los suelos en cuatro grandes grupos: gravas, arenas, limos y arcillas. Las arcillas, están constituidas por minerales de silicatos, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos, cuyas partículas tienen tamaños inferiores a 0.002mm .

Figura 1. Curva granulométrica de un suelo (Según Lambe, 1951).



Fuente: Lambe, 1951

Figura 2. Curvas granulométricas



Fuente: Muelas s.f.

d) Plasticidad

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, éste puede fluir como un semilíquido. Si el suelo se seca gradualmente, se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de agua (Das, 2001).

Los contenidos de humedad y los puntos de transición de unos estados a otros se denominan Límites de Atterberg (Lambe & Whitman, 1995). El concepto de que un suelo puede presentarse en varios estados, en función del contenido de humedad, se basa en que cuanto mayor sea la cantidad de agua que contiene un suelo, menor será la interacción entre partículas adyacentes y más se aproximará el comportamiento del suelo al de un líquido (Jara, 2014).

"Esta variación de la consistencia en función de la humedad (a la que se conoce como plasticidad) es propia de suelos finos (arcillas y limos), ya que los suelos gruesos (arenas y gravas) no retienen agua y se mantienen inalterables en presencia de ésta" (Jara, 2014).

La determinación de los Límites de Atterberg se lleva a cabo en laboratorio, definiéndose el límite plástico como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 3 mm de diámetro. El

límite líquido del suelo, se determina utilizando la copa de Casagrande (Designación de Prueba D -4318 de la ASTM) (Das, 2001). El significado físico de los límites de Atterberg y su utilización práctica se considerará en el Informe Final de Tesis.

Según Das (2001), la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como Índice de Plasticidad:

$$IP = LL - LP$$

El índice de liquidez o fluidez se define como:

$$I_L = \frac{W_n - W_p}{W_L - W_p}$$

El índice de plasticidad indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica, mientras que el índice de liquidez indica la proximidad de la humedad natural del suelo al límite líquido (Lambe & Whitman, 1995).

Con el fin de proporcionar una representación adecuada de la plasticidad de una muestra de suelo se emplea la denominada Carta de Plasticidad de Casagrande (Muelas, s.f.). La Carta de Plasticidad y la tabla de clasificación SUCS se presentarán en el Informe Final de Tesis. Muelas (s.f.), indica que, en el gráfico "Carta de Plasticidad de Casagrande", se representa la relación del límite líquido (abscisas) con el índice de plasticidad (ordenadas). Casagrande definió que los suelos con $LL > 50$ son de "alta plasticidad" (pueden admitir un mayor contenido de agua y por tanto pueden experimentar deformaciones plásticas mayores).

Los suelos con $LL < 50$ se denominan de "baja plasticidad". Complementariamente, el Ing. Casagrande, definió una línea A, que separa los suelos arcillosos de los más limosos. Así, a partir del criterio de alta y baja plasticidad y de la línea A, se pueden definir varias zonas en el gráfico anterior. Los suelos limosos y con apreciable contenido orgánico tienen un intervalo de humedad menor para pasar del estado semisólido al estado líquido (menor índice de plasticidad), situándose por debajo de la línea A. En el caso de las arcillas, dicho intervalo de

humedad es mayor, situándose por encima de 1a línea A. Se definen, por tanto, varios tipos de suelos: arcillas de alta plasticidad (CH), arcillas de baja plasticidad (CL), limos y suelos orgánicos de alta plasticidad (MH-OH) y limos y suelos orgánicos de baja plasticidad (ML-OL) (Muelas, s.f.).

2. Clasificación de suelos

Con el objeto de dividir los suelos en grupos de comportamiento semejante, con propiedades geotécnicas similares, surgen las denominadas clasificaciones de suelos. (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995).

La clasificación de suelos consiste, pues, en incluir un suelo en un grupo que presenta un comportamiento semejante. La correlación de unas ciertas propiedades con un grupo de un sistema de clasificación suele ser un proceso empírico puesto a punto a través de muchos años de experiencia. (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995).

La mayoría de las clasificaciones de suelos utilizan ensayos muy sencillos, para obtener las características del suelo necesarias para asignarlo a un determinado grupo (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995). Las propiedades ingenieriles básicas que suelen emplear las distintas clasificaciones son la distribución granulométrica, los Límites de Atterberg, el contenido en materia orgánica, etc.

“La clasificación de suelos constituye una ayuda valiosa para el ingeniero, le da indicaciones generales, transformando de manera empírica los resultados de la experiencia de campo. Sin embargo, el ingeniero debe ser precavido al utilizar las clasificaciones de suelos. La resolución de problemas de flujo, asentamiento o estabilidad únicamente a partir de clasificaciones puede llevarle a resultados desastrosos”. (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995).

Muelas (s.f), indica que los dos sistemas principales de clasificación de suelos actualmente en uso son el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el SUCS (Unified Soil Classification System). El primero se usa principalmente para la evaluación

cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción de explanadas de carreteras.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) fue presentado por Arthur Casagrande como una modificación y adaptación más general a su “Sistema de clasificación de aeropuertos” propuesto inicialmente en 1942 para aeropuertos y después, en 1952, revisado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros. Este sistema es el más extendido para la amplia variedad de problemas geotécnicos de ingeniería en los que intervienen suelos (permeabilidad, resistencia y compresibilidad de diversos tipos de suelos de cada grupo para su empleo en presas de tierra, canales, cimentaciones y pistas de aeropuertos). (Muelas, s.f)

El sistema SUCS clasifica los suelos en base a su granulometría, los Límites de Atterberg y el contenido en materia orgánica. A continuación, se muestra dicha clasificación, junto con los símbolos empleados en la misma, así como una descripción de las propiedades esperables de los grupos diferenciados según Muelas, (s.f), abarca solo gravas, arenas, suelos limosos y arcillosos.

Tabla 4. Clasificación suelos en 04 grandes grupos en función de su granulometría.

Tipo de Suelo	Descripción	Tamaño
Gravas	Los granos son observables directamente, existen grandes huecos entre las partículas y no retienen el agua.	80 mm. y 4,75 mm
Arenas	Estas son observables a simple vista y se mantienen inalterables en presencia de agua.	4,75 mm. y 0,075 mm
Limos	Retienen el agua y si se forma una pasta limo-agua y se coloca sobre la mano, al golpear con la mano se aprecia cómo el agua se exuda con facilidad.	0,075 mm y 0,002 mm
Arcillas	Son partículas de tamaño gel y están formadas por minerales silicatos, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos, unidas por enlaces covalentes débiles y pudiendo entrar las moléculas de agua entre las cadenas, produciendo aumentos de volumen, a veces muy importantes. Por tanto,	Tamaños inferiores a 0,002 mm

presentan una gran capacidad de retención de agua, con un porcentaje de huecos muy elevado (huecos pequeños, pero con una gran superficie de absorción en las partículas). Debido a que el tamaño de los huecos es muy pequeño (aunque el índice de huecos es elevado), exhiben unos tiempos de expulsión de agua muy elevados y una permeabilidad muy baja (Muelas s.f.).

Fuente: Crespo, 2007

Tabla 5. (SUCS); *símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.*

Símbolo de grupo	Criterios
CL	Inorgánico; LL<50; PI>7; Límites de Atterberg sobre o arriba de la línea A (véase zona CL en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
ML	Inorgánico; LL<50; PI<4; Límites de Atterberg debajo de la línea A (véase zona ML en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
OL	Orgánico; (LL no secado en horno) / (LL secado en horno) <0.75; LL <50 (véase zona OL en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
CH	Inorgánico; LL≥50; PI sobre o arriba de la línea A (véase zona CH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
MH	Inorgánico; LL≥50; PI debajo de la línea A (véase zona MH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
OH	Orgánico; (LL no secado en horno) / (LL secado en horno) <0.75; LL≥50 (véase zona OH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
CL-ML	Inorgánico; LL >50; 4≤PI≤7; Límites de Atterberg arriba de la línea A. Se grafica en la zona sombreada en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)

Fuente: (Das, 2001)

El **Sistema de Clasificación AASHTO**, clasifica a los suelos en tres principales categorías: Suelos granulares, suelos, finos y suelos orgánicos.

- Suelos granulares. Son suelos cuyo porcentaje que pasa el tamiz N° 200 es menor o igual al 35% del total de la muestra. Estos suelos constituyen los grupos A-1, A-2 y A-3.
- Suelos limo-arcilla o material fino. Son suelos cuyo porcentaje que pasa el tamiz N° 200 es mayor al 35% del total de la muestra.

Estos suelos constituyen los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.

- Suelos orgánicos. Son los suelos que están constituidos principalmente por materia orgánica. Este tipo de suelo constituye el grupo A-8.

Adopta el siguiente rango de tamaño de partículas:

- Cantos rodados. Son fragmentos de roca, usualmente redondeados por abrasión, que son retenidos en el tamiz de 3|| (75 mm).
- Grava. Es la fracción que pasa el tamiz de 3|| (75 mm) y es retenido en el tamiz N° 10 (2 mm).
- Arena. Es la fracción que pasa el tamiz N° 10 (2 mm) y es retenido en el tamiz N° 200 (0.075 mm).
- El limo y la arcilla. Son partículas que pasan el tamiz N° 200 (0.075 mm).

Establece un rango del índice de plasticidad que diferencia a los suelos limosos de los suelos arcillosos.

- El término limoso es aplicado a la fracción fina del suelo que tiene un índice de plasticidad de 10 o menos.
- El término arcilloso es aplicado cuando la fracción fina tiene un índice de plasticidad de 11 o más.

Considera solo la porción de suelo que pasa a través del tamiz de 75 mm. Si existieran partículas mayores (guijarros y cantos rodados), éstas son excluidas de la muestra de suelo que será clasificado, sin embargo, el porcentaje de ese material debe ser medido y anotado junto con el resultado de la clasificación.

Ecuación empírica del índice de grupo

$$IG = (F_{200} - 35)[0.2 + 0.005 (LL - 40)] + 0.01 (F_{200} - 15)(IP - 10)$$

Donde:

F_{200} = Porcentaje que pasa la malla N° 200, expresado como # entero

LL = Límite Líquido

IP = Índice de plasticidad

El primer término de la ecuación: “ $(F_{200} - 35) [0.2 + 0.005 (LL - 40)]$ ” es el índice parcial de grupo determinado con el límite líquido. El segundo término: “ $0.01 (F_{200} - 15)(IP - 10)$ ” es el índice parcial de grupo determinado con el índice de plasticidad. Sin embargo, también se puede determinar el índice de grupo a partir del ábaco mostrado para el cálculo del Índice de Grupo (Norma ASTM, 2003).

Si el suelo no es plástico y no se puede determinar el Límite líquido, entonces el índice de grupo (IG) será: $IG = 0$. Este es el caso de los suelos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3, en donde su índice de grupo siempre es cero.

Los índices de grupo de los suelos granulares están generalmente comprendidos entre 0 y 4, los correspondientes a los suelos limosos, entre 8 y 12 y los suelos arcillosos, entre 11 y 20, o más. Los valores del índice de grupo, se utilizan solo para comparar suelos dentro el mismo grupo y no entre grupos diferentes; así por ejemplo, no se pueden comparar un suelo A-3 (0) y un suelo A-2-7 (3), por el valor del índice de grupo; sin embargo, si se pueden comparar un suelo A-3 (0), con un suelo A-3 (3), donde por del valor del índice de grupo se puede deducir que el suelo A-3 (0) es de mejor calidad que el suelo A-3 (3), por tener este un valor del índice de grupo menor ($0 < 3$).

La ecuación empírica del índice de grupo diseñada para conseguir una evaluación aproximada de los suelos del mismo grupo, en los materiales granulares arcillosos, y los materiales limo arcillosos, se basa en las siguientes suposiciones:

- Los materiales que se encuentran en los grupos A-1-a, A-1-b, A-

2-4, A-2-5 y A-3 son apropiados para su uso como subrasantes cuando están adecuadamente drenados y compactados y el espesor de la capa de pavimento es moderado (base y carpeta de rodadura), así como también el tráfico que soportará sea adecuado; también este material puede lograrse por adiciones de pequeñas cantidades de ligantes naturales o artificiales.

- Los materiales granulares arcillosos de los grupos A-2-6 y A-2-7 y los materiales limosos y arcillosos de los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, pueden clasificarse para su utilización en subrasantes desde adecuadas como materiales de subbase equivalentes a las categorías A-2-4 y A-2-5, hasta regulares e inadecuadas hasta el punto de requerir una capa de subbase o una capa mayor de subbase que la requerida en el anterior caso (1), para proporcionar un adecuado soporte a las cargas de tráfico.
- Se supone que un 35% o más de material que pasa el tamiz N° 200 (0.0075 mm.) es crítico si se omite la plasticidad, pero el mínimo crítico es solo el 15% cuando se ve afectado por el IP mayor que 10.
- Se supone que el LL igual o mayor que 40% es crítico.
- Se supone que el IP igual o mayor que 10% es crítico.

a) Propiedades físicas y químicas de las arcillas

“Para entender mejor la respuesta que tendrán los suelos ante una estabilización es necesario conocer los aspectos físicos-químicos de éstos. De manera general se considera, que las partículas arcillosas tienen un tamaño del orden de las 2 micras (0.002 mm) o menores y presentan una actividad eléctrica importante que rige su comportamiento, dada su gran superficie específica en relación con su volumen, y aun con su masa” (Baca y Wong, 2022, p.66).

“En los suelos finos predominan las fuerzas eléctricas y están compuestos predominantemente por minerales cristalinos, algunos de los cuales tienen muy poca actividad superficial por lo que no contribuyen a los efectos conocidos como plasticidad y cohesión, como pueden ser el cuarzo y la calcita, por ejemplo. Por lo que, es imprescindible la clasificación de los suelos (SUCS, AASHTO), la determinación de la composición mineralógica del suelo y el material estabilizante y el análisis de los niveles de materia orgánica que contiene el suelo” (Baca y Wong, 2022, p.66).

b) Propiedades de los suelos granulares

“Los suelos clasificados dentro los grupos A-1, A-2 y A-3 según AASHTO o sus equivalentes según SUCS son materiales granulares de los cuales 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N° 200” (Baca y Wong, 2022, p.66).

“Adopta el siguiente rango de tamaño de partículas:

- Cantos rodados. Son fragmentos de roca, usualmente redondeados por abrasión, que son retenidos en el tamiz de 3” (75 mm).
- Grava. Es la fracción que pasa el tamiz de 3” (75 mm) y es retenido en el tamiz N° 10 (2 mm).
- Arena. Es la fracción que pasa el tamiz N° 10 (2 mm) y es retenido en el tamiz N° 200 (0.075 mm)” (Baca y Wong, 2022, p.67).

“El suelo granular no es plástico y no se puede determinar el Límite líquido, entonces el índice de grupo (IG) será: $IG = 0$. Este es el caso de los suelos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3, en donde su índice de grupo siempre es cero” (Baca y Wong, 2022, p.67).

“Aun utilizándose los valores del Índice de Grupo para comparar suelos

dentro del mismo grupo y no entre grupos diferentes, los índices de grupo de los suelos granulares están generalmente comprendidos entre 0 y 4, los correspondientes a los suelos limosos, entre 8 y 12 y los suelos arcillosos, entre 11 y 20, o más; así por ejemplo, si se pueden comparar un suelo A-3 (0), con un suelo A-3 (3), donde por el valor del índice de grupo se puede deducir que el suelo A-3 (0) es de mejor calidad que el suelo A-3 (3), por tener este un valor del índice de grupo menor ($0 < 3$)” (Baca y Wong, 2022, p. 67).

Baca y Wong (2022), afirma: “La ecuación empírica del índice de grupo diseñada para conseguir una evaluación aproximada de los suelos del mismo grupo, en los materiales granulares arcillosos, y los materiales limo arcillosos, se basa en las siguientes suposiciones:”

- “Los materiales que se encuentran en los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 son apropiados para su uso como subrasantes o si se encuentran conformando estratos a la profundidad apropiada para implante de cimentación, cuando están adecuadamente drenados y compactados” (Baca y Wong, 2022, p.67- 68)
- “Los materiales granulares arcillosos de los grupos A-2-6 y A-2-7 y los materiales limosos y arcillosos de los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, pueden clasificarse para su utilización como estratos para implante de cimentación, equivalentes a las categorías A-2-4 y A-2-5” (Baca y Wong, 2022, p.68).
- “Se supone que un 35% o más de material que pasa el tamiz N° 200 (0.0075 mm.) es crítico si se omite la plasticidad, pero el mínimo crítico es solo el 15% cuando se ve afectado por el IP mayor que 10. Se supone que el LL igual o mayor que 40% es crítico. Se supone que el IP igual o mayor que 10% es crítico “ (Baca y Wong, 2022, p.68).

c) Propiedades de los suelos residuales

Baca y Wong (2022) refieren propiedades de los suelos residuales y citan a Vásquez y Marín (2020): “En el Perú, los suelos tropicales en un gran porcentaje son de tipo saprolíticos, esto es, suelos arcillosos mezclados con limo y arena, principalmente.

Algunos resultados de ensayos de resistencia al cortante efectuadas en estos suelos indican valores muy dispersos; sin embargo, se ha encontrado que la prueba de la veleta practicada en los suelos saprolíticos que se encuentran muy fisurados, la medida de la resistencia al corte sin drenaje efectuada en el campo arroja siempre valores mucho más confiables que las ensayos de laboratorio, comprobándose que estos valores son mucho más altos en casi todos los casos que los obtenidos por otros medios, siendo el límite más bajo los resultados de los ensayos triaxiales rápidos y los más próximos los resultados de los ensayos de Compresión-No-Confinada, quizás debido a la descompresión que sufren estos suelos al ser obtenidos en profundidad y a la alteración de los especímenes con el manipuleo, o los efectos de la succión en los suelos parcialmente saturados que hacen variar su resistencia al cortante (Carrillo-Gil, 1978). (Vásquez y Marín, 2020)” (p.68).

1.2.1.4. Ensayos

a) Análisis de la materia orgánica

El ensayo de los niveles de contenido de materia orgánica que contiene un suelo se realiza por el método Walkley y Black. La materia orgánica es una mezcla heterogénea de sustancias de origen vegetal, animal y microbiana que, dentro del suelo, influyen sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas.

El método se basa en la oxidación por medio del Dicromato de Potasio que reacciona en un volumen con dos de Ácido Sulfúrico concentrado. El exceso de Dicromato de Potasio se determina valorando con solución de

Sulfato Ferroso Amoniaco en presencia como indicador Difenilamina Sulfúrica.

Previamente a la determinación de materia orgánica se debe estar seguros que no existen sales de cloro ya que pueden ser la fuente de error, en caso que existan se deben eliminar las sales solubles antes de la determinación.

En la **Tabla 6**, se muestra los Niveles de Materia Orgánica.

Tabla 6. Niveles de Materia Orgánica

Niveles de contenido	Porcentaje de materia orgánica
Bajo	0 - 2
Medio	2 - 4
Alto	Más de 4

b) Exploración geotécnica

Los métodos de exploración de suelos convencionales son: Calicatas, Sondeos, Penetrómetros, Ensayos geofísicos. Los depósitos naturales que forman todo tipo de suelo son tan variados que ningún método de exploración es ideal para todos los casos; esto significa que cada suelo requerirá probablemente de un procedimiento para investigarlo muy diferente del que necesitará otro subsuelo. Antes de proceder a explorar el suelo, es conveniente un análisis y observación preliminar de la zona para tener una información que, en muchos casos, evitará investigaciones costosas e innecesarias (Graneros & Tito, 2017) (Quispilaya y Cruz, 2018).

Según la norma E.050 para la investigación de suelos, las edificaciones se clasifican en tres tipos siendo A más exigente que el B y este que el C.

Tabla 7. Tipo de edificación para investigación de suelos

Tipo de edificación

Clase de estructura	Distancia mayor entre apoyos	Número de pisos (Incluido sótanos)			
		C	C	C	B
Aporticada de concreto	<12	C	C	C	B
Pórticos y/o muros de concreto	<10	C	C	B	A
Muros portantes de albañilería	<12	B	A	-	-
Bases de máquinas y similares	cualquiera	A	-	-	-
Estructuras especiales	cualquiera	A	A	A	A
Otras estructuras	cualquiera	B	A	A	A
Cuando la distancia sobrepasa la indicada, se clasificará en el tipo de edificación					
Tanques elevados y similares	≤ 9m de altura	>9m de altura			
	B	A			

Fuente: Norma E.050

“Para definir el número de puntos de investigación del suelo, se toma en cuenta el tipo de edificación y el área de la superficie que ocupará esta edificación” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Tabla 8. Número de puntos de investigación de suelo

Número de puntos de investigación	
Tipo de edificación	Número de puntos de investigación (n)
A	1 cada 225 m ²
B	1 cada 450 m ²
C	1 cada 800 m ²
Urbanizaciones para viviendas unifamiliares de hasta 3 pisos	3 por cada hectárea de terreno habilitado

Fuente: Norma E. 050

1.2.1.5. Criterios para calificación de suelos con fines urbanos

“La descripción e identificación de los suelos es de suma importancia para que el ingeniero pueda determinar si un suelo es apto o no para la construcción, se debe tener en cuenta diversos criterios” (Quispilaya y Cruz, 2018).

1.2.1.6. Distribución granulométrica

“Los tamaños de las partículas en general que conforman un suelo, varían en un amplio rango, La granulometría se refiere al tamaño de los elementos que componen el suelo, el tamaño de las partículas del suelo influye directamente en las propiedades de este (Das, 2001, p.2)” (Quispilaya y Cruz, 2018)

1.2.1.7. Textura y color del suelo

“La textura se refiere al tamaño que prevalecen en el sedimento del suelo, es por eso que los suelos pueden clasificarse en función a estas proporciones de prevalencia en suelo gravoso (suelo con prevalencia de gruesos), suelo arenoso, suelo arcilloso (si prevalece el tamaño fino arcilla o limos), etc.; los suelos de textura gruesa tienen mayor capacidad de carga y de esta manera son mejores que los suelos con prevalencia de finos. Según el color de los suelos se puede determinar la estabilidad de los mismos, son inestables los suelos de color negro, rojizo, amarillento y blanco, mientras que los de color gris son suelos más estables (PREDES, 2018)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

1.2.1.8. Consolidación del suelo

“Los suelos se consolidan con el tiempo y la exposición a fenómenos naturales, los suelos blandos son suelos sueltos y fáciles de excavar, son suelos no consolidados por lo tanto son de baja calidad para la edificación. Los suelos firmes, compactos y consolidados serán suelos duros y difíciles de excavar, este tipo de suelos son buenos para la edificación” (Quispilaya y Cruz, 2018).

1.2.1.9. Grado de saturación del suelo y nivel freático

“La calidad del suelo se ve afectado por la cantidad de agua que contiene, ante la presencia de agua los suelos gruesos son más estables que los suelos finos. La capa freática es la capa de agua subterránea y su nivel puede variar durante el año dependiendo de la época de estiaje o de lluvia (Cobeñas, 2017)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“Un suelo será malo si el nivel freático es superficial (a menos de 2 metros de profundidad desde la superficie del suelo) y será estable y bueno si el nivel freático es profundo” (Quispilaya y Cruz, 2018).

A continuación, en la tabla N° 6, se resume los criterios que se debe tomar en cuenta para calificar los suelos con fines urbanos:

Tabla 9. Criterios para identificar suelos aptos para construcción

Criterios utilizados	Suelo apto para construir	Suelo No apto para construir
Granulometría	Gruesas	Finas
Peso unitario	Pesado	Liviano
Nivel freático	Sin agua o profunda	Superficial
Material orgánico	Sin material orgánico	Con material orgánico
Colapsable	Estable	Colapsable
Color de suelo	Gris	Rojo, amarillo o blanco
Forma de partículas	Angulosas	Redondeadas
Pre consolidación	Compacto y firme	Blando o suelto
Plasticidad	No plástico	Plástico
Expansión	No expansivo	Expansivo
Dispersión	No dispersivo	Dispersivo

Fuente: (Palacios, 2015)

1.2.1.10. El suelo como elemento estructural de soporte de estructuras

El suelo o terreno cumple un papel importante como elemento estructural de soporte de estructuras, por este motivo antes de iniciar la construcción de una edificación, es de vital importancia conocer el tipo de suelo donde se construirá esta, puesto que nos guiará a que las estructuras que se construyan se apoyen en suelos de características competentes, preferentemente en suelos gruesos por ser considerados más estables que suelos finos (suelos limosos, arcillosos, orgánicos) ante la presencia de agua, pues estos sufren alteraciones convirtiéndose en suelos problemáticos, no aptos para la construcción.

El diseño de los cimientos para todo tipo de edificación requiere de estudios para analizar la disposición de los materiales en el subsuelo, categorizarlo de acuerdo al desempeño geotécnico evaluando sus propiedades físico-mecánicas con la finalidad de conocer el estrato que va a ofrecer resistencia a las cargas o esfuerzos transmitidos por la estructura a

la cimentación y se pueda determinar su comportamiento (Quispilaya y Cruz, 2018).

La falta de información al momento de ejecutar una obra de ingeniería civil puede desencadenar una serie de inconvenientes técnicos, estos daños se relacionan con la inestabilidad del suelo lo cual termina en asentamientos diferenciales, asentamientos y desplomos en estructuras desplantadas en suelos blandos (Quispilaya y Cruz, 2018).

La exploración del subsuelo por métodos directos conlleva el uso de varios recursos: económicos, por sus altos costos y tiempo prudente para la realización de los ensayos de laboratorio, por lo que es necesaria la búsqueda de otros métodos de exploración que sean rentables, fáciles de realizar y en un tiempo menor y con capacidad suficiente para dar solución a problemas de caracterización geotécnica, este es el caso del método de resistividad eléctrica. (Quispilaya y Cruz, 2018).

Ante esta realidad para lograr un crecimiento ordenado de las ciudades, para detectar suelos inestables, es de suma importancia para los ingenieros civiles y población el conocimiento del tipo de suelo o terreno antes de iniciar cualquier tipo de construcción, es así que se requiere de métodos no convencionales alternativos que permitan conocer la calidad de los suelos y así determinar el tipo de construcción que se podrá cimentar en este.

Este método alternativo debe ser económicamente viable también y prudente en tiempo de obtención de resultados para así para alentar a la población a realizar mínimamente este tipo de estudio de suelos y así puedan conocer el tipo de construcción apropiada para el tipo de suelo existente. (Quispilaya y Cruz, 2018).

El método de resistividad eléctrica, puede constituir una herramienta importante en la determinación de las características geotécnicas del suelo (Quispilaya y Cruz, 2018), siendo así se podría contar con una metodología rápida, de costo bajo para la caracterización de suelos y posterior determinación de la profundidad de desplante y/o capa freática en lugares donde se pretende construir edificaciones (Quispilaya y Cruz, 2018).

1.2.2. Cimentaciones

Las cimentaciones transmiten al suelo las cargas que soporta la estructura, de modo general existen dos tipos de cimentaciones: superficiales y profundas. Las cimentaciones superficiales son aquellas que se apoyan en capas superficiales o poco profundas del suelo, por tener suficiente capacidad portante o por tratarse de construcciones de importancia secundaria y relativamente livianas, en particular son superficiales cuando en el cálculo de la cimentación se tiene en cuenta la resistencia del suelo debajo del nivel de apoyo; estas se clasifican en: Zapatas (Aisladas, corridas, combinadas) y Losas de cimentación (Fierro & Segarra, 2018)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

1.2.2.1. Profundidad de Cimentaciones

La profundidad de cimentación “Df” debe estar ubicado en un estrato resistente, esta profundidad es la distancia vertical medida desde la superficie del terreno hasta el fondo o base de la cimentación, en forma amplia esta profundidad depende de la profundidad del estrato de suelo competente para soportar las cargas transmitidas por la cimentación, es decir la cimentación debe ser establecida en un estrato de suelo portante de resistencia y compresibilidad apropiadas para poder soportar las cargas sin que se presenten problemas de asentamientos excesivos ni tampoco fallas en la masa de suelo; los estratos que están debajo de esta profundidad de desplante o cimentación también deben tener suficiente resistencia y compresibilidad (Delgado, 2008).

Según la Norma Técnica E.050 para cimentaciones superficiales ($Df/B \leq 5$), la profundidad mínima de cimentación será de 80 cm en el caso de zapatas y cimientos corridos. Así mismo la cimentación no deberá ser colocada en desmontes, rellenos no controlados, en suelo orgánico, turba, los cuales

deben ser removidos en su totalidad antes de la construcción de la edificación.

La profundidad mínima a alcanzar “p” por cada punto de investigación de suelos será mínimo 3 m, excepto si se encuentra roca. Para cimentaciones superficiales la profundidad mínima se determina por las siguientes expresiones:

Edificación sin sótano

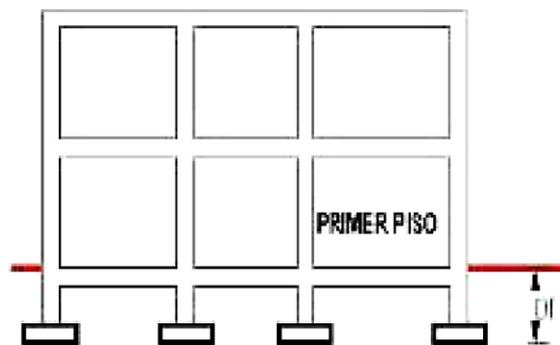
$$p = D_f + z$$

Edificación con sótano

$$p = h + D_f + z$$

Donde la profundidad de verificación “z” podrá ser 1 m como mínimo, si en el proceso de exploración de suelo se ubica el estrato resistente (Profundidad de cimentación). Normalmente esta profundidad de verificación es igual a 1.5 veces el ancho de la cimentación de mayor área prevista. La distancia entre el nivel de piso terminado del sótano y la superficie del terreno natural se denota por la letra h (Quispilaya y Cruz, 2018).

Figura 3. Profundidad de desplante.



Fuente: Norma E.050

1.2.2.2. Métodos de exploración de suelos con fines de cimentación

“La investigación o exploración del subsuelo consiste en determinar, tanto los estratos de depósitos que se encuentren debajo de una estructura, así como las propiedades físicas y mecánicas que presentan cada uno de estos estratos (Fierro & Segarra, 2018)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

La exploración del suelo consta de operaciones de campo y laboratorio, existen diversos métodos exploratorios sin embargo ningún método es el adecuado para todos los casos, entre estos tenemos a manera general los siguientes:

“**Calicatas:** son pozos a cielo abierto y permite la exploración in situ, se examinan los diferentes estratos llevando un registro completo y detallado de las condiciones del mismo como son el color, textura, espesores, humedad. En este método se hace una observación visual directa y da la posibilidad de tomar muestras de suelo ya sean alteradas o inalteradas, sin embargo están limitadas por la profundidad. Se debe tener presente que al realizar la excavación se alteran las condiciones naturales del terreno, por lo tanto la ubicación de los cimientos debe realizarse en otro punto diferente al de la calicata para evitar que estos se apoyen en terrenos removidos. Las calicatas son indicadas para terrenos duros, y recomendables para edificaciones pequeñas en terrenos homogéneos (Chavarria, 2017)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“**Sondeos:** es un ensayo in situ y consta de perforaciones de pequeño diámetro que aunque no sea posible la visión in situ del terreno, podemos obtener testigos de suelo perforado. Los sondeos pueden ser manuales o mecánicos y se emplean para alcanzar profundidades superiores a las calicatas (Chavarria, 2017)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“**Penetrómetros:** estos pueden ser estáticos (se inca por la presión de un tornillo sin fin) y dinámicos (se inca por una serie de golpes de una masa) y dan un registro continuo de la resistencia del terreno (Chavarria, 2017)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“**Métodos geofísicos:** se emplearon inicialmente en la exploración del suelo con fines geológicos, determinación de aguas subterráneas, minerales, etc; sin embargo poco a poco están siendo adaptados a las necesidades de la ingeniería civil. Estos métodos geofísicos mediante un parámetro físico como por ejemplo en sísmica por la velocidad de transmisión de las ondas o en geolétrica por la resistividad, intentan reconocer formaciones geológicas que se encuentran en profundidad. Existen diversas técnicas geofísicas que miden la resistividad de los materiales, siendo unas más modernas y precisas que otras (Arias, 2011)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Finalmente, ha de tenerse también en cuenta que existe una relación directa entre humedad, temperatura y salinidad respecto a resistividad, mientras que esta relación es inversa entre porosidad y resistividad. (Tabla 2).

Tabla 10. Relación de resistividad con características del suelo

Aumento de	Resistividad
Porosidad	Aumenta
Salinidad	Baja
Humedad	Baja
Temperatura	Baja

1.2.2.3. Resistividad eléctrica del terreno

La resistividad del terreno es la impedancia del medio en el que se encuentran los electrodos. Puede ser medida en unidades como: $\Omega \cdot m$, $\Omega \cdot cm$ u $\Omega \cdot mm$. Idealmente, esta medida corresponde a la resistencia que presenta un cubo de 1 metro cúbico imaginario de suelo o agua, entre sus paredes laterales (caras) y se representa por la letra griega ρ . (Lavalle, 2021).

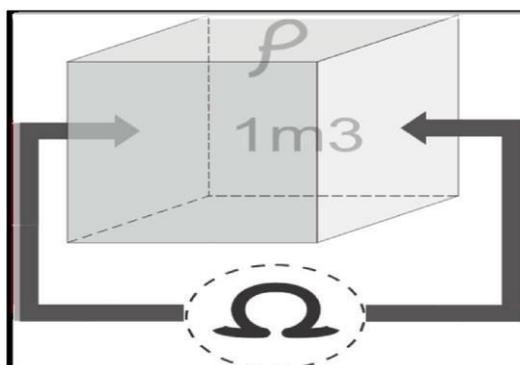
Es válido decir que los términos resistividad y resistencia son diferentes y están relacionados matemáticamente por una expresión en la que la resistencia está en función de la resistividad. La resistencia está relacionada con otras propiedades geométricas como la longitud y sección

del conductor mientras la resistividad es una propiedad más íntimamente ligada al material y es esta última la que tiende a variar con respecto a la temperatura, humedad y otras propiedades del medio por donde se transporta la corriente eléctrica. (Lavallo, 2021).

Los estudios de la resistividad del terreno no están ligados exclusivamente al campo eléctrico y a los sistemas de puesta a tierra dentro de éste; sino que también posee íntimas relaciones con el contenido mineralógico del suelo, presencia o no de masas freáticas o subterráneas de agua, tipología del suelo, sales disueltas, características y edades cronológicas de las rocas, entre otras muchas menciones a estudios vinculados. Por este motivo, la resistividad aporta una gran información a los científicos de diversas ramas y su cuantificación es esencial para las ingenierías eléctrica y civil, básicamente (Lavallo, 2021).

En la figura 20 se ilustra una representación de la medida de la resistividad de cierta muestra, nótese que la medida se da entre paredes o caras opuestas del cubo. La unidad de medida de la RESISTIVIDAD DEL SUELO (ρ) de un terreno es el $\Omega.m$ (óhm-metro). Es la resistencia teórica en Ohmios de un cubo de tierra de 1 m² de sección y de 1 m de longitud. La medida de la resistividad del terreno es afectada por una gran cantidad de factores y condiciones, algunos con un mayor impacto que otros (Lavallo, 2021).

Figura 4. Resistividad de un cubo de determinado terreno de 1m de arista.



Fuente: Lavallo (2021)

La resistividad toma sus unidades de la resistencia y las características geométricas del medio en el que se desea medir, como se demostrará a continuación:

$$R = \rho \frac{L}{S} \dots\dots\dots 1$$

$$\rho = \frac{R.S}{L} \dots\dots\dots 2$$

$$\left(\frac{\Omega.m^2}{m}\right) = \Omega.m \dots\dots\dots 3$$

Donde:

R= Resistencia (Ω)

P= Resistividad ($\Omega.m$)

L= Longitud (m)

S= Sección (m^2)

Es natural preguntarse ¿Por qué motivo emplear a la resistividad en lugar de la resistencia eléctrica - que es un parámetro mucho más utilizado en el ámbito eléctrico - para caracterizar el terreno como un buen conductor o no? La respuesta a esta interrogante yace en el concepto de cada una de las dos palabras.

Mientras la resistencia eléctrica es una propiedad que indica cuánta dificultad enfrenta el paso de electrones en su camino dentro de un conductor; la resistividad representa la resistencia eléctrica específica de un determinado material. Piénsese en dos materiales distintos sometidos a una misma temperatura.

Se podría hacer equivalentes dichas resistencias eléctricas modificando parámetros como por ejemplo la sección y/o longitud del conductor (el material con menor resistencia se podría incrementar en su longitud de tal forma que las resistencias lleguen a ser iguales).

Este juego de variables geométricas no es posible hacer con la resistividad, pues ésta es propiedad exclusiva e intrínseca del material y no depende de las características geométricas del medio conductor, aunque sí de otro factor como es la temperatura. Asimismo, la resistividad tiene como inversa a la conductividad eléctrica; en tanto, la resistencia tiene a la conductancia como propiedad en el sentido inverso. (Lavalle, 2021).

Se puede llegar a conocer mucho acerca del terreno en el cual se trabaja, con el solo hecho de conocer su resistividad. En las exploraciones petrolíferas, un valor pico de resistividad indica con una alta probabilidad, la presencia de una acumulación de petróleo en las profundidades. (Lavallo, 2021). Este valor extremadamente elevado se explica por la bajísima conductividad de la corriente eléctrica del petróleo en sí, éste como material, posee una resistividad de $10^{16} \Omega \cdot m$; y, de manera análoga, una resistividad de unos cuantos ohmios sugeriría la presencia de aguas subterráneas que muy a menudo son ricas en sales disueltas (Lavallo, 2021).

La Tierra matemáticamente es modelada como un gran conductor eléctrico esférico, y se dice que puede recibir como también aportar carga de una manera indeterminada. Es gracias a esta característica en la que se basan todos sistemas de puesta a tierra (Lavallo, 2021).

La medida de la resistividad eléctrica indica la capacidad del terreno para conducir la corriente eléctrica, es decir cuanto menor sea la resistividad, menor será la resistencia de la toma de tierra construida en esta área.

En un medio conductor homogéneo, isotrópico, el valor de la resistividad es igual en cualquier punto y dirección del medio. En el caso real de un terreno ubicado en cualquier parte del mundo es muy difícil, si no imposible, considerar la resistividad homogénea.

La naturaleza propia de su constitución y por estar sometido a los efectos climáticos hacen, que aun en el caso de tener un terreno constituido por un solo material existan variaciones de su resistividad respecto a la profundidad, principalmente por la variación del nivel freático y del grado de compactación del material.

La Resistividad del terreno; servicio que también realizamos en EDP PROYECTOS, varía considerablemente según las regiones y los tipos de terrenos. Es dependiente del grado de humedad y de la temperatura. Por lo tanto, el valor a medir puede variar según las estaciones y las condiciones de medida.

Teniendo en cuenta que los valores de la temperatura y la humedad son más estables al alejarse de la superficie de la tierra, entonces cuanto más profundo se instale el sistema de puesta a tierra más estable será el mismo a los cambios ambientales.

En resumen, la resistividad del suelo depende de:

- Tipo de suelo
- El porcentaje de humedad
- Su composición química
- La compactación del material
- La temperatura
- Estratificación del suelo
- La mezcla de diferentes tipos de materiales

Composición química y concentración de las sales disueltas en la humedad del suelo.

El tipo de suelo, composición química, estratificación y compactación del material son propiedades inherentes de la formación geológica del suelo en un sitio determinado; aunque no permanecen constantes su variación depende de cambios a largo plazo, por lo tanto, pueden asumirse como constantes a la hora de diseñar un sistema de puesta a tierra. Mientras que por el contrario el porcentaje de humedad, la temperatura, la composición química de las sales disueltas y su concentración son factores variables a la hora de considerar el diseño de un sistema de PAT. En la medida que el porcentaje de humedad por peso se incrementa, la resistividad del suelo disminuye hasta un cierto punto a partir del cual se hace casi independiente del grado de humedad.

1.2.3. Resistividad de terreno según material natural constituyente

El subsuelo está compuesto por estratos los cuales presentan diferentes valores de resistividad. En la tabla 7, se indica un rango de valores de la resistividad para

suelos según los materiales más usuales que lo constituyen (Quispilaya y Cruz 2018).

Tabla 11. Valores de Resistividad en terrenos

Terreno	Resistividad Media ($\Omega.m$)
Arcillas	1 - 10
Limos	10 - 100
Arenas	100 - 1000
Gravas	200 a más de 1000
Roca ígnea y metamórfica inalterada	Mayor a 1000

Fuente: Herrera (2018) en (Quispilaya y Cruz, 2018)

En Perú, el Código Nacional de electricidad – Utilización 2006, Anexo A2 presenta una tabla de tipo de suelos con los siguientes valores de resistividad de suelos.

Tabla 12. Resistividades medias en terrenos típicos

Terreno	Símbolo del terreno	Resistividad media ($\Omega.m$)
Grava de buen grado, mezcla de grava y arena	GW	600-1000
Grava de bajo grado, mezcla de grava y arena	GP	1000-2500
Grava con arcilla, mezcla de grava y arcilla	GC	200-400
Arena con limo, mezcla de bajo grado de arena con limo	SM	100-500
Arena con limo, mezcla de bajo grado de arena con arcilla	SC	50-200
Arena fina con arcilla de ligera plasticidad	ML	30-80
Arena fina o terreno con limo, terrenos elásticos	MH	80-300
Arcilla pobre con grava, arena, limo	CL	25-60
Arcilla inorgánica de alta plasticidad	CH	10-55

Fuente: Código Nacional de electricidad – Utilización 2006 Tabla A2-06

a) Resistividad aparente

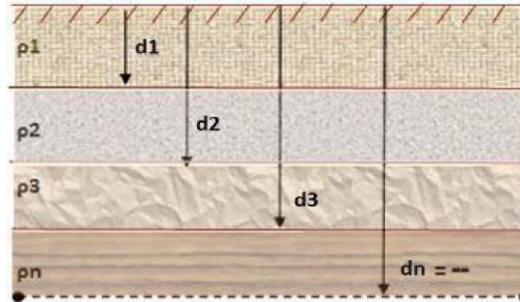
Según Cárdenas & Galvis (2011), la resistividad aparente ρ_a es el valor de resistividad obtenido de una medición directa del terreno (suelo heterogéneo), esta resistividad es una mezcla de las resistividades de diversos materiales. (Quispilaya y Cruz 2018)

El concepto de resistividad aparente surge en medios heterogéneos. La resistividad real coincidiría con la resistividad aparente solo en el caso cuando el terreno es homogéneo (Quispilaya y Cruz 2018).

En la práctica un terreno puede ser razonablemente representado por un modelo de estratos paralelos a la superficie del suelo, caracterizando cada

uno de ellos por su espesor y un valor constante de resistividad según la figura N° 9 (Quispilaya y Cruz 2018).

Figura 5. Representación de un suelo estratificado



Fuente: Quispilaya y Cruz (2011).

1.2.3.1. Factores que afectan la resistividad del terreno

Según Lavalle (2021), existen una gran cantidad de elementos que influyen en la resistividad del terreno, pero se describirá algunos de los más importantes.

a) Humedad

La humedad que posee el terreno determina fuertemente su resistividad. El agua que contiene el terreno, debido a su estado higrométrico, es la que influye. Siempre que se añada agua a un terreno disminuye la resistividad respecto a la que tendría en seco. En este aspecto, tener presente que el agua pura tiene una resistividad infinitamente alta, mientras que las sales presentes en forma natural en el terreno o disueltas en agua, bajan la resistividad del suelo. Es razonable, para el diseño de un sistema de puesta a tierra, se llegue con el electrodo hasta la capa freática, porque la resistencia no sólo es muy baja sino que también es estable.

“Uno de los factores más importantes en determinar la resistividad de los suelos es el contenido de agua presente. En las zonas geográficas donde no hay precipitaciones, la capacidad conductora es muy alta tanto en las capas superiores del suelo como también en las inferiores. Por lo contrario, en las zonas con precipitaciones normales las capas superiores poseen resistividades variables de acuerdo con el tipo del mineral constituyente, mientras que las

inferiores presentan muy bajas resistividades. De acuerdo con Ortuondo (1997), esto se debe que dependiendo del tipo de material del que el suelo esté constituido por ejemplo las arcillas, se tendrá una mayor capacidad de retención del agua y por lo tanto una baja resistividad” (Lavallo, 2021) en (Baca y Wong, 2022, p.).

A continuación, se muestran los efectos típicos del agua sobre dos tipos de terreno. Si ambos tipos están secos, las resistividades son alrededor de 10 Mega Ohm-m, siendo, ambos suelos, buenos aislantes. Sin embargo, al aumentar el contenido de humedad hasta el 30%, se aprecia una disminución drástica en la resistividad del terreno que se puede determinar por un factor aproximado de 100,000 veces del valor original.

Tabla 13. Efecto de la humedad en la resistividad del terreno

Contenido de humedad % por peso	Terreno superficial (Ohm-m)	Arcilla arenosa (Ohm-m)
0.0	10'000,000	10'000,000
2.5	2,500	1,500
5.0	1,650	430
10	530	220
15	210	130
20	120	100
30	100	80

Fuente: (Yanque, 2006)

La composición química de las sales disueltas y su concentración pueden variar naturalmente por efecto de la infiltración del agua de lluvias, y por las variaciones químicas en el material superficial del suelo. El agua al penetrar en el suelo arrastra nuevos elementos químicos y/o diluye la concentración de los existentes.

En 1965, H. J. Albrecht presentó la ecuación, que relaciona la resistividad del suelo, en función de la temperatura y humedad. El estudio presentado es una aproximación empírica, y a pesar de que se puede obtener de manera general con cierta independencia del tipo de mineral, es mejor emplearla para hacer comparaciones de cómo varía la resistividad con dichos parámetros (Lavallo, 2021).

$$\rho = \frac{1.3 \cdot 10^4}{(0.73 \cdot w^2 + 1)(1 + 0.03 \cdot T)}$$

Donde:

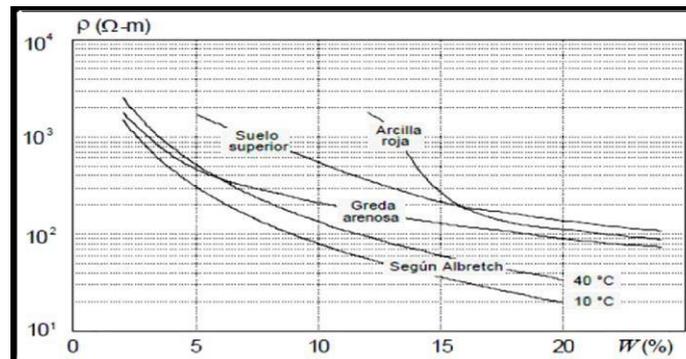
ρ = Resistividad ($\Omega \cdot m$).

W = Humedad del suelo (% en peso)

T = Temperatura ($^{\circ}C$; $T > 0$)

En la figura 21, se muestra la variación de la resistividad, en función de la humedad y temperatura del terreno.

Figura 6. Variación de la resistividad en función de la humedad y dos temperaturas distintas según Albrecht



Fuente: Ortuondo (1997) en. (Lavalle, 2021).

A mayor humedad disminuye la resistividad (Loachamin Nasimba, 2019). Cuando están completamente secos, casi todos los suelos tienen una resistividad del orden de aisladores perfectos. La resistividad disminuye rápidamente hasta que la humedad alcanza el 20% a partir de ese porcentaje sólo se consigue una leve disminución de valor con el aumento de la humedad. Inversamente, por debajo del 15% la resistividad aumenta con la disminución de la humedad. Decreciendo la humedad del 30% al 5% la resistividad aumenta alrededor de 400 veces (Loachamin Nasimba, 2019) en (Baca y Wong, 2022, p.)

b) Temperatura

La temperatura del terreno es otro factor determinante en la resistividad de los suelos. La tierra seca es un aislador excelente; al aire y al sol, las capas de arena seca de la superficie se acercan mucho a la condición de buen aislador. En general, el espesor de tales capas secas, solo alcanzan a medir entre 10 y 20 centímetros (Yanque, 2006).

Cuando el valor de la temperatura del suelo se encuentra por encima del punto de congelamiento y por debajo de los 100 grados Celsius, la agitación de las partículas, producida por el aumento de temperatura, dificulta la conducción de la electricidad y por ello aumenta la resistividad; asimismo, para temperaturas por debajo del punto de congelación del agua, la resistividad también se incrementa debido a que el hielo es un medio de baja conductividad. A temperaturas elevadas el agua comienza a evaporarse, lo que obviamente incrementa la resistividad (Lavalle, 2021).

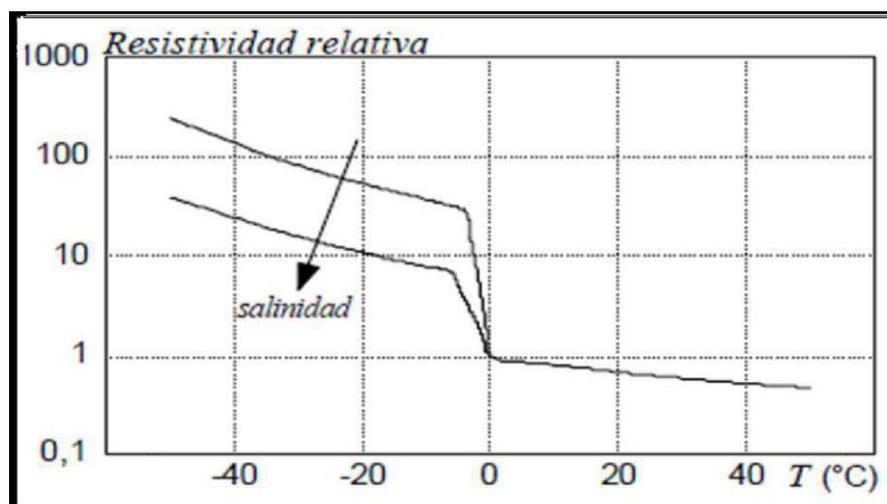
Tabla 14. Efectos de la temperatura en la resistividad del terreno

Temperatura °C	Temperatura °F	Resistividad (Ohm-m)
20	68	72
10	50	99
0 a -5	32 (agua)	138
0 a -5	32 (agua)	300
0 a -5	23	790
-15	14	3300

Fuente: Yanque (2006).

“En la **Figura 7**, se muestra la variación de la resistividad del terreno, cuando varía la temperatura. Aparecen dos curvas distintas porque éstas son creadas a partir de concentraciones de sales distintas” (Lavalle, 2021, p.).

Figura 7. Resistividad relativa, según la variación de temperatura del terreno.



Fuente: Ortuondo (1997).

“Al existir una mayor temperatura menor resistencia y mayor movimiento de electrones en el suelo donde al mismo tiempo reduce la polarización” (Loachamin Nasimba, 2019). “La resistividad crece muy lentamente a medida que la temperatura disminuye hasta llegar al punto de congelación del agua. Por debajo del punto de congelación la resistividad crece rápidamente al disminuir la temperatura. Esto tiene importancia en zonas frías donde en invierno el suelo se congela hasta una cierta profundidad.

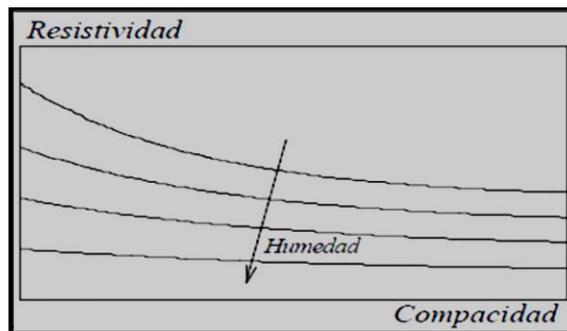
En éstos casos, el sistema de tierra debe instalarse por debajo del nivel de congelación si se pretende un valor aceptable de la resistencia a lo largo de todo el año; por ejemplo, la temperatura disminuye de 20°C a -19°C, la resistividad puede aumentar alrededor de 200 veces. Debido a que la temperatura como la humedad son más estables a mayor distancia de la superficie, se concluye que un sistema de tierra, para ser más efectivo en cualquier época, deberá ser construido con las jabalinas hincadas profundamente” (Baca y Wong, 2022, p.).

c) Compactación del suelo

La resistividad del suelo varía directamente con el grado de compactación; al ser menos compacto tendrá menos resistencia” (Loachamin Nasimba, 2019). Una mayor compactación del suelo disminuye la distancia entre las partículas, éstas estarán más contiguas entre sí. Es de esta forma que, si el terreno se encuentra saturado con agua, y es poco compacto, los espacios entre gránulos son menores y estarán llenos de agua, permitiendo así una mejor conductividad a través de la humedad contenida, pero una baja resistencia. A medida que se aumenta el contenido de humedad, se alcanza una especie de saturación ya que el agua envuelve la mayoría de las partículas y un mayor acercamiento entre éstas no influye en la conducción. (Loachamin Nasimba, 2019) en (Lavalle, 2021).

La **Figura 8**, muestra el comportamiento de la resistividad vs compactación del terreno, se observa que a medida que el grado de compactación del suelo aumenta, la resistividad disminuye” (Lavalle, 2021).

Figura 8. Variación de la resistividad con la compacidad del terreno.



Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021).

d) Concentración de sales disueltas

La concentración de sales disueltas en el terreno es un factor determinante en la resistividad del mismo. Al existir una mayor concentración de sal en el suelo, éste mejora su conductividad. En forma general, entonces, se podría establecer que mejor conductor es el terreno mientras mayor contenido de sal haya en él (Loachamin Nasimba, 2019).

Este parámetro afecta en la conducción eléctrica que se producirá en el suelo de ánodo hacia el cátodo, es decir a mayor salinidad existirá mayor conducción (Loachamin Nasimba, 2019).

Lavalle (2021), señala que de acuerdo a su composición, los suelos pueden tener cierta capacidad para conducir o no la electricidad. “Conocer la naturaleza del suelo es el primer paso para formarse una idea de la resistividad que posee. Es importante tener en cuenta que las resistividades típicas que se encuentran en diversas literaturas deben ser usadas de manera referencial y no pensar que dichos valores son decisivos” (Lavalle, 2021).

“La concentración de sales disueltas en el terreno posee una gran influencia en el valor de la resistividad del terreno, debido a la naturaleza conductiva de los iones que conforman dichas sales. Es así, que, dependiendo de la concentración de estas, la resistividad del terreno puede variar en amplios rangos de valores.

El agua pura posee una deficiente capacidad para conducir la electricidad. Esto ocurre porque no contiene iones que son los responsables de crear ese camino para que exista la conducción. Es por este motivo que el agua tridestilada

posee una alta resistividad que puede llegar incluso a los 100 000 Ω .m. Las aguas encontradas normalmente en el terreno no se encuentran químicamente puras y por lo tanto poseen cierta composición de sales. Esto hace que las aguas subterráneas posean una baja resistividad.

La **Tabla 15**, muestra diversos valores de resistividad de distintos tipos de aguas que, se encuentran en la naturaleza, tanto superficiales, como, subterráneas. Se puede apreciar como los valores van desde décimas hasta miles de ohmios por metro”. (Lavalle, 2021).

Tabla 15. Resistividades de distintos tipos de agua

Tipos de aguas	Resistividad (Ω.m)
Aguas de precipitaciones	30 - 1000
Aguas superficiales de lagos y ríos	
Aguas puras	3000
Aguas dulces	10 - 1000
Aguas salobres	2 - 10
Aguas de rocas ígneas	30 - 500
Aguas de rocas sedimentarias	10 - 100
Aguas de lagos salados	0.1 - 1
Aguas de los suelos	
Promedio	100
En suelos de rocas ígneas	30 - 150
En suelos de rocas sedimentarias	1
Aguas subterráneas	1 - 20
Agua marina a 30 grados Celsius	0.2

Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021).

Así mismo, Loachamin Nasimba (2019), precisa que un terreno seco, normalmente, tiene alta resistividad, pero un terreno húmedo también puede tenerla si no contiene sales solubles, es decir el agua es muy blanda. (Loachamin Nasimba, 2019).

e) Granulometría de los suelos

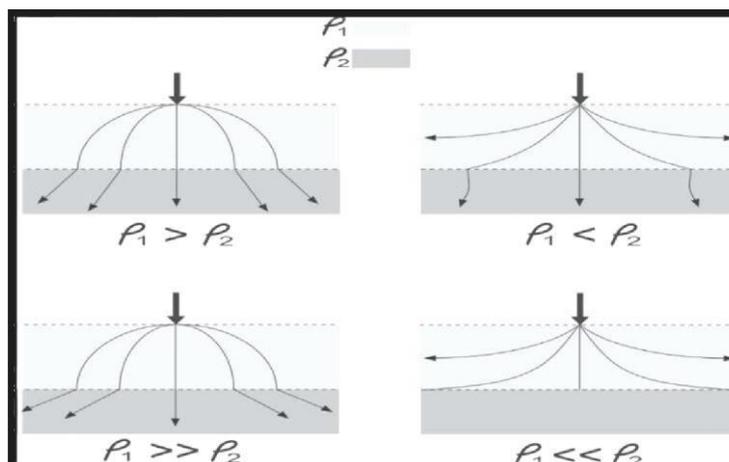
La granulometría de los suelos, es decir su composición y distribución del tamaño de los granos de un suelo es relevante en la resistividad y varía según las épocas del año. Esto se debe a que el agua producto de las lluvias estacionales, se acumula alrededor de los granos a causa de la tensión superficial. Esto significa que los suelos con granos pequeños tenderán a

acumular una mayor cantidad de agua y facilitaría el paso de la corriente eléctrica. Un suelo de diferentes tamaños de granos hace que los espacios intergranulares disminuyan, minimizando también la resistividad del terreno (Lavalle, 2021).

f) La estratificación del terreno

“Geológicamente, el suelo está formado por diferentes capas o estratos, que poseen a su vez, profundidades distintas. Estos estratos pueden estar formados por materiales diferentes y por tanto presentar distintas resistividades. Por este motivo, la corriente posee distintas maneras de dispersarse según las capas y la profundidad. La figura 24 ilustra cómo se dispersa la corriente en un suelo formado por dos capas” (Lavalle, 2021).

Figura 9. Influencia de la estratificación del terreno con dos capas en la resistividad.



Fuente: Osinergmin orienta (2014) en (Lavalle, 2021)

1.2.3.2. Anisotropía de la resistividad del terreno

“El término anisotropía significa que las propiedades no son uniformes en todas las direcciones. Por ello, en cierta dirección se obtendrá un valor que puede ser distinto en una dirección diferente. En referencia a la anisotropía de la resistividad, depende de la orientación en la que se encuentran los cristales como por ejemplo el grafito. Normalmente es un valor que tiene mucha implicancia porque para las mediciones la corriente se disipa por los caminos más fáciles” (Lavalle, 2021).

1.2.3.3. Valores típicos de resistividad del terreno

Como se mencionó anteriormente, la resistividad eléctrica del suelo es una propiedad intrínseca al tipo de material y sus condiciones físicas; por ello, los valores directamente medidos en campo, sirven para una buena caracterización del suelo (Lavallo, 2021).

Al revisar la literatura en busca de valores típicos para la resistividad de un suelo específico, se encuentra que la mayoría de éstos no coinciden; descartando el cumplimiento de protocolos obligatorios, es posible que esto ocurra, porque las condiciones ambientales de temperatura, humedad del suelo y otros presentes durante su medición, sean distintas para cada investigador. Existen muchas tablas de resistividades típicas del suelo sugeridas por diversos investigadores que toman en cuenta, su composición geológica y su antigüedad; por lo cual, se recomienda usar estos valores sólo como una aproximación teórica inicial, requiriéndose siempre de mediciones en campo, que en la práctica pueden arrojar resultados muy diferentes a los valores de resistividades proporcionados en diversos trabajos, como los que a continuación se presentan (Yanque, 2006).

1.2.3.4. Resistividad por edad

Tabla 16. Resistividad del suelo según su antigüedad

Edad cronológica	Resistividad del suelo (Ω -m)				
	Arenas húmedas	Arcillas	Areniscas	Granitos	Calizas
Cuaternario y terciario	1 a 10	5 a 50	10 a 200	500 a 2000	50 a 5000
Mesozoico	5 a 20	25 a 100	20 a 500	500 a 2000	100 a 10000
Carbonífero	10 a 40	50 a 300	50 a 1000	1000 a 5000	200 a 100000
Paleozoico	40 a 200	100 a 500	100 a 2000	1000 a 5000	1000 a 100000
Precámbrico	100 a 2000	300 a 5000	200 a 5000	5000 a 20000	1000 a 100000

Fuente: Casas (2010) en (Lavallo, 2021).

1.2.3.5. Resistividad por los elementos de constitución del suelo

Tabla 17. Resistividad por constitución del suelo

Clase de terreno	Resistividad ($\Omega\cdot m$)
Tierra pantanosa	50
Tierra arcillosa húmeda	100
Tierra arcillo-arenosa húmeda	200
Tierra arenosa seca	1000
Tierra de arenisca dura	2000
Suelo con estrato de roca	10000
Petróleo	10^{16}

Fuente. Casas (2010) en Lavalle (2021)

Tabla 18. Resistividades referenciales de suelos naturales genéricos

Tipo de suelo	ρ (Ohm-m)
Limos, Arcillas, Suelo Vegetal y de cultivo	10 -100
Tierra fina, Turbas, Fangos, Suelos Finos y Concretos Húmedos	100 - 300
Tierra aluvial, Arenas firmes, suelos secos y cimientos de concreto	300 - 800
Arena eólica, lecho de río, cascajo, areniscas secas	800 – 3 000
Rocas estratificadas, fracturadas, volcánicas	3 000 – 10 000
Suelos de feldespatos, micas, cuarzos, roca monolítica	5 000 – 30 000
Concreto ciclópeo estructural aéreo (seco).	10 0000 a más

Fuente: (Yanque, 2006)

Debido a la conformación estratificada del terreno, con capas superpuestas de características conductivas propias que obedecen a los procesos de meteorización, transporte y acumulación de productos sólidos a través de las edades geológicas, los valores extremos que se encuentran en la práctica pueden variar de algunas decenas de $\Omega\cdot m$, para terrenos orgánicos y húmedos a una decena de miles de $\Omega\cdot m$, para granitos secos, como lo indican ingenieros electricistas dedicados a las instalaciones de Puestas a Tierra (GigaWatt, 2015). Es razonable y necesaria, para efectos de construcción de infraestructura, la medición de este parámetro directamente en el terreno.

Tabla 19. Naturaleza del terreno vs Rango de Resistividad eléctrica

Naturaleza del terreno	Rango de Resistividad ($\Omega\cdot m$)
------------------------	---

Terrenos pantanosos	<30
Limo	20 a 200
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterado	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000

Fuente: (Giga Watt, 2015)

1.2.3.6. Potencial eléctrico en un espacio homogéneo producido por una corriente

La conductividad representa un fenómeno esencialmente electroquímico o electrolítico, y por lo tanto, depende de la cantidad de agua depositada o el nivel de humidificación existente. La tierra representa generalmente un mal conductor, por contener entre sus partículas gran cantidad de óxido de silicio y óxido de aluminio, que son altamente resistivos, pero gracias al amplio volumen disponible, se puede lograr a través de ella los niveles conductivos necesarios para su utilización auxiliar. Los suelos están compuestas principalmente, por óxidos de silicio y óxidos de aluminio que son buenos aislantes; sin embargo la

presencia de sales y agua contenida en ellos, mejora notablemente la conductividad de los mismos (Giga Watt, 2015).

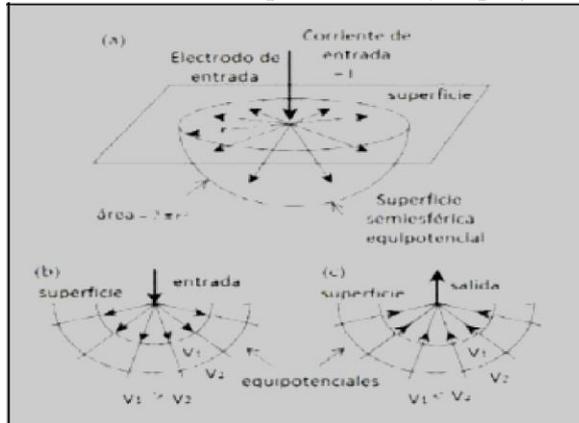
Para evaluar el potencial eléctrico en espacios homogéneos se tiene que asumir las siguientes condiciones (Cobeñas A, 2017):

“El subsuelo consiste en un número finito de capas de extensión lateral infinita separadas por una frontera plana y horizontal. Todas las capas poseen un espesor finito, salvo la última capa que se considera de un espesor infinito”. “Todas las capas son homogéneas e isotrópicas desde el punto de vista de su resistividad” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“Todas las inyecciones de corriente son puntuales, los únicos puntos de entrada de corriente al subsuelo son los electrodos habilitados para tal fin, cuyas dimensiones son despreciables a la escala de la experiencia” (Quispilaya y Cruz, 2018). “Según Estrada (2012), se tiene que considerar que la corriente se distribuye en todas las direcciones, si el medio o el suelo es homogéneo e isotrópico, por lo cual se asume que la intensidad de corriente se propaga radialmente. Como resultado a una distancia r tendremos una semiesfera (su otra mitad es el aire), que es el área que atraviesa las líneas de corriente” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Con ayuda de unos electrodos se introduce en el suelo homogéneo y de resistividad (ρ) una corriente (I) como se muestra en la Figura 10, el punto de contacto actúa como una fuente de corriente, a partir del cual, la corriente se dispersa hacia fuera y fluye en forma radial. Las líneas del campo eléctrico (E) se ubican paralelas al flujo de corriente y perpendicular a la superficie equipotencial (líneas de igual voltaje) que se encuentran en forma semiesférica.

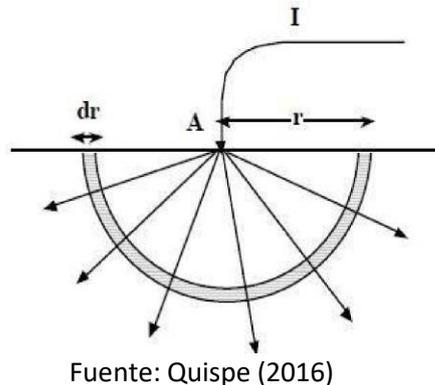
Figura 10. Líneas de campo eléctrico y superficies equipotenciales



Descripción: Líneas de campo eléctrico y superficies equipotenciales alrededor de un electrodo en un semiespacio uniforme. a) Superficie equipotencial semiesférica, b) líneas de campo radialmente hacia fuera alrededor de una fuente (entrada), c) líneas (salida).

Mediante la ley de Ohm calculamos la resistencia R que se opone al paso de esa corriente (I) en un casquete semiesférico de radio r y espesor “ dr ” como se muestra en la **Figura 11**.

Figura 11. Ley de Ohm aplicado a la superficie de un suelo



Fuente: Quispe (2016)

1.2.4. Tipos de prospecciones para medición de resistividad del terreno por una corriente

1.2.4.1. Usando la información geológica y muestras de suelo

A menudo donde se va a instalar tanques para almacenamiento de petróleo o derivados de éste, se deben realizar extensos trabajos de ingeniería civil. Este trabajo generalmente involucra prospecciones geológicas y estudios de Mecánica de Suelos y Mecánica de Rocas, - competencias de un Ingeniero Civil, que resultan en una cantidad

considerable de información sobre la naturaleza y configuración del sitio donde se va a cimentar la estructura de los tanques (Lavalle, 2021).

“La determinación de resistividad del terreno a partir de los valores de resistencia medidos entre caras opuestas de una muestra de suelo de dimensiones conocidas no se recomienda, ya que las resistencias interfaciales desconocidas de la muestra de suelo y los electrodos están incluidas en el valor medido. Una determinación es más precisa si se realiza una medición de resistencia de cuatro terminales de la muestra de suelo. Los terminales de potencial, encargados de medir el voltaje, deben ser pequeños, en relación con la sección transversal de la muestra, y deben estar lo suficientemente distantes de los terminales de corriente para asegurar una distribución de corriente casi uniforme en la muestra. Una distancia igual al ancho de la mayor sección transversal suele ser adecuada para el propósito de la determinación. Es difícil, y en algunos casos, imposible obtener una aproximación útil de la resistividad del suelo a partir de la resistividad medidas en muestras. Esto se debe a la dificultad de obtener muestras de suelo representativas y homogéneas, y que posean el mismo nivel de compactación del suelo original, junto con el contenido de humedad en la celda de prueba. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983)” (Lavalle, 2021).

“Estimaciones basadas en la clasificación del suelo conducen sólo a valores gruesamente aproximados de la resistividad. Por tanto, es necesario tomar mediciones directamente en el sitio donde quedará ubicada la puesta a tierra. Las técnicas para medir la resistividad del suelo son esencialmente las mismas cualquiera sea el propósito de la medida. Sin embargo, la interpretación de los datos recolectados puede variar considerablemente y especialmente donde se encuentren los suelos con resistividades no uniformes” (Giga Watt, 2015).

“Típicamente, los suelos poseen varias capas horizontales superpuestas, cada una teniendo diferentes resistividades. A menudo se presentan también cambios laterales de resistividad, pero más graduales a

menos que se configuren fallas geológicas. Por tanto, las mediciones de resistividad deben ser realizadas para determinar si hay alguna variación importante de la resistividad con la profundidad. Las diferentes técnicas de medida son descritas en detalle en la IEEE Std 81(1983) “IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potential of a ground system”. Para efectos de esta norma, se asume como adecuado el método de Wenner o método de los cuatro puntos. En caso de ser muy difícil su aplicación, podrá apelarse a otro método referenciado por la IEEE Std 80(2000)” (Giga Watt, 2015).

“Con objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario pasar corriente a través del mismo. La técnica básica empleada requiere el uso de por lo menos cuatro electrodos insertados en el terreno, utilizados para inyectar una corriente continua en la superficie del terreno entre dos electrodos y medir la tensión que aparece entre los electrodos de potencial colocados en el interior de la zona de inyección de la corriente”. (Giga Watt, 2015).

“La distancia de separación entre los electrodos depende de la amplitud de la zona en la cual se desea medir la resistividad. Si el subsuelo es uniforme, la resistividad medida es independiente de la separación de los electrodos utilizada en el ensayo” (Giga Watt, 2015).

“Con la información obtenida a partir de las medidas de resistividad aparente es posible realizar una modelización en estratos horizontales del terreno. Mediante las técnicas utilizadas en la estimación de estado se puede obtener una estimación paramétrica de las resistividades de todas las capas del modelo del terreno y de sus respectivos espesores. Un modelo uniforme debería ser usado solo cuando existe una moderada variación de la resistividad aparente”. (Giga Watt, 2015).

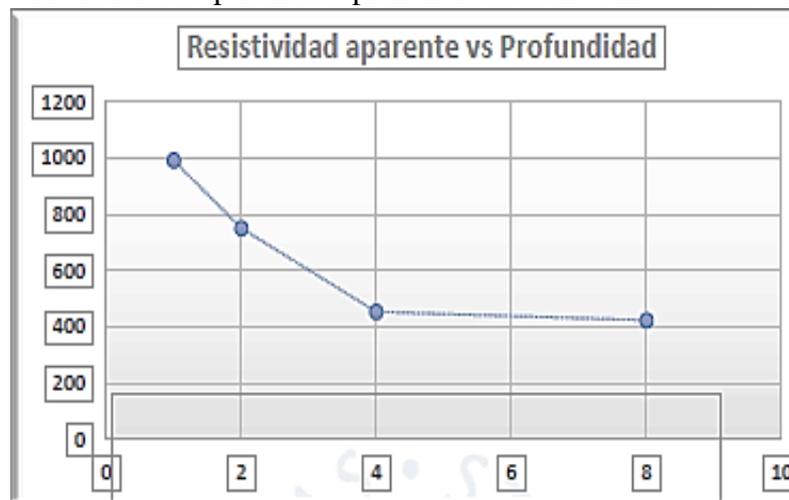
1.2.4.2. Sondeo eléctrico vertical

“El sondeo eléctrico vertical es el tipo de método más empleado para medir resistividad del terreno e incluso aproximar el espesor de los estratos que conforman el suelo. Mediante este tipo de medición, se elige un centro y una dirección de medición. Estas dos referencias se mantienen fijas hasta que la medición culmine.

Mediante el equipo de medición, que puede ser un telurómetro, se colocan los electrodos tomando como referencia el centro y dirección previamente establecidos, a una distancia entre ellos. El principio general de funcionamiento de este método básicamente consiste en inyectar corriente entre dos electrodos y al dispersarse la corriente en el suelo, medir la diferencia de potencial entre los dos electrodos restantes.

Una vez se obtengan los valores de resistividad, a este valor se le denomina resistividad aparente. De manera usual, para una mejor visualización de los resultados, se obtienen gráficos como el que se muestra a continuación en la figura 25. Lo normal es dibujar estos gráficos utilizando escalas logarítmicas en ambas coordenadas, para poder interpretarlos mediante curvas patrón, especialmente construidas para ello. Otros métodos de interpretación, menos usuales, pueden requerir de gráficos con otros tipos de escalas (Ortuondo, 1997) en (Lavalle, 2021).

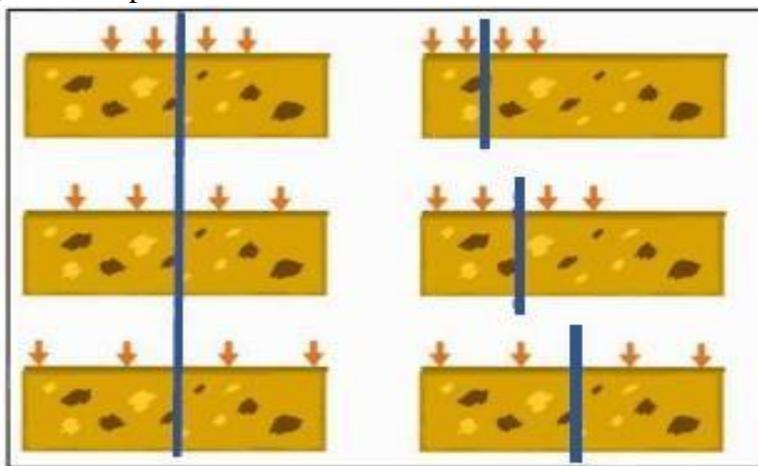
Figura 12. Resistividad aparente vs profundidad usando método de sondeo



Descripción: Resistividad aparente vs profundidad usando método de sondeo Vertical, con configuración de Wenner.
Fuente: (Lavalle, 2021).

Este método puede poseer distintas configuraciones entre los electrodos, dependiendo de la distancia entre ellos. Dichas configuraciones, pueden ser de Wenner, Schlumberger o azimutal. Sin embargo, las dos primeras son las más empleadas. **La figura 26** muestra la correcta e incorrecta aplicación de la configuración de Wenner, como se aprecia en la figura, la parte derecha cambia el centro de referencia de cada medición, cuando lo correcto debe ser mantener una simetría respecto a un mismo eje (parte izquierda) (Lavallo, 2021).

Figura 13. Aplicación correcta e incorrecta del método de Wenner

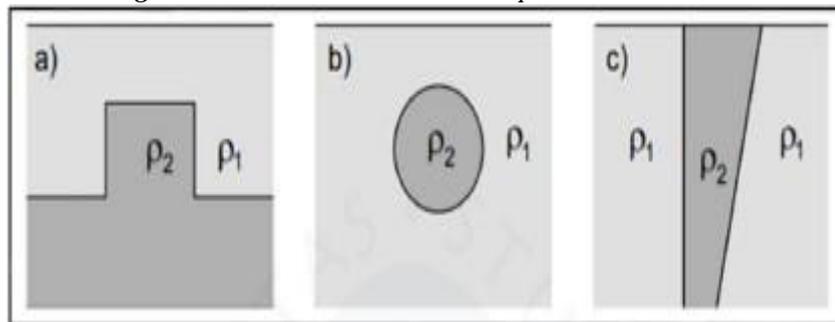


Fuente: (Lavallo, 2021).

1.2.4.3. Calicatas eléctricas

“Las calicatas eléctricas se emplean para averiguar la variación horizontal de la resistividad en el terreno. Estas variaciones laterales pueden ser por la presencia de acumulación de cierto material, diferente al del medio circundante. Permite detectar fallas geológicas. Entre otras aplicaciones, se encuentra su uso en la determinación de edificaciones y sitios arqueológicos enterrados. La figura 27 muestra las variaciones laterales típicas en el terreno y la forma en cómo se apreciarían haciendo un corte transversal” (Lavallo, 2021).

Figura 14. Variaciones laterales típicas en un terreno



Descripción: Variaciones laterales típicas en un terreno. a) Inclusión de un estrato en otro superior, b) acumulación de material diferente al alrededor, c) contactos de distintos materiales.

Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021).

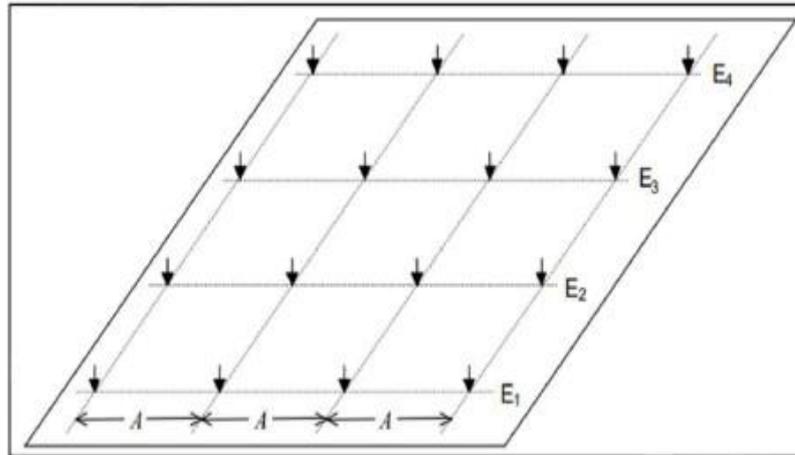
“Entre las muchas configuraciones de colocar los electrodos en este método, se explica a continuación y de manera breve, una manera, la calicata de dispositivo simétrico. Esta forma se puede realizar con las configuraciones de Wenner o Schulumberger, variando la distancia de los electrodos acorde con la configuración, y se realiza una secuencia de medición cada intervalo de tiempo aproximadamente constante. Todos los electrodos se desplazan de manera horizontal (perpendicular a la línea de ubicación de los electrodos)” (Lavalle, 2021).

“Este método carece de fundamento, si todos los estratos del suelo están ubicados de manera paralela entre sí, es decir si el suelo es perfectamente uniforme, debido a que todos los resultados medidos, serían iguales. No obstante, si el suelo presenta variaciones laterales, mientras más próximo está el conjunto de electrodos al punto de anomalía, más se modifica el valor de resistividad aparente medido. Al alejar los electrodos, disminuye el efecto de la anomalía horizontal y la resistividad aparente se acerca a la correspondiente a un suelo perfectamente estratificado. La figura 28, muestra la disposición de los electrodos en este método usando la configuración de Wenner” (Lavalle, 2021).

“Esta forma de medición no presta utilidad en la determinación de la composición de los suelos, si están formados por estratos idealmente paralelos a la superficie del terreno. Sin embargo, como en la realidad los

estratos tienen siempre algún grado de inclinación, el perfil eléctrico puede ser útil para cuantificar esta variación lateral. Si el terreno presenta anomalías laterales importantes, el perfil eléctrico es recomendable como complemento al sondeo eléctrico (Ortuondo, 1997) en Lavalle (2021).

Figura 15. Calicata eléctrica usando la configuración de Wenner



Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021)

1.2.4.4. Tomografía eléctrica resistiva

“El método de tomografía eléctrica resistiva nos permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y lateralmente. Se inyecta corriente continua al terreno mediante electrodos y para conocer la diferencia de potencial contra otros electrodos” (Lavalle, 2021).

La relación entre estas nos proporciona una resistividad que nos permite identificar con gran exactitud el material en el subsuelo.

Para la obtención de las imágenes en 2D o 3D, por cada medición, una corriente eléctrica, DC, se inyecta en el suelo a través de dos electrodos (A y B). El potencial resultante se mide entre dos electrodos (M y N). Un valor de resistividad aparente se deriva de la corriente inyectada, voltaje medido y el factor geométrico. Los datos medidos se invierten para producir un modelo de la distribución de la resistividad eléctrica real del subsuelo (solución no-única). La distribución de la resistividad eléctrica se correlaciona con la geología del subsuelo o se interpreta en términos

geológicos. La figura 29, ejemplifica una aplicación de la tomografía eléctrica resistiva y las gráficas que se generan en 2D. (Lavalle, 2021).

Según, Cartomex (2015), la profundidad de sondeo usualmente es mayor a 100 metros y sus aplicaciones para los estudios de resistividad son, básicamente para: exploración de minerales, exploración de aguas subterráneas, caracterización geotécnica, túneles y fugas de agua en presas, detección de cavidades, discontinuidades y fallas, estudios ambientales, entre otros muchas más aplicaciones (Cartomex, 2015).

1.2.5. Métodos de medición de la resistividad del suelo

“La resistividad eléctrica se mide haciendo pasar una corriente eléctrica en el terreno entre dos electrodos y la medición de la diferencia de potencial V generada por el paso de la corriente entre otros dos electrodos. La resistencia se calcula utilizando la ley de ohm, esta resistencia se multiplica por un factor geométrico en relación a la configuración de los electrodos para calcular la resistividad eléctrica del subsuelo afectado por el paso de la corriente (Gonzales, 2010)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“Cuando se utiliza corriente alterna (CA) en el suelo con frecuencias entre 2 y 100 kHz la conductividad eléctrica resulta independiente de la frecuencia, cumpliéndose la ley de Ohm (Cuñez Uvidia, 2015)”. (Quispilaya y Cruz, 2018).

“Los métodos Wenner y Schlumberger, son los de mayor uso, los cuales consisten en inyectar una corriente eléctrica al terreno, por medio de electrodos auxiliares dispuestos en el terreno en un arreglo geométrico, y de acuerdo a la medición de tensión obtenida sobre el terreno, se calcula la resistencia aparente del medio, con este valor calculado se puede obtener el valor de la resistividad del suelo. Para realizar estas mediciones, el equipo debe utilizar señales de prueba inferiores a 9 kHz o incluso menores a 3kHz (Sanz, Duque, & Gomez, 2010)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

1.2.5.1. Método de variación de profundidad

Este método, a veces llamado método de tres puntos, es una prueba de resistencia a tierra que se lleva a cabo varias veces, cada vez la profundidad de enterramiento del electrodo probado aumenta en un incremento dado y de ahí el nombre del método.

El propósito de esto es forzar más corrientes de prueba a través de la profundidad del suelo. El valor de resistencia medido reflejará la variación de resistividad a un aumento profundidad. Por lo general, el electrodo probado es una varilla. Se prefieren las varillas a otros tipos de electrodos porque ofrecen dos ventajas importantes:

- El valor teórico de la resistencia de la varilla de tierra es simple de calcular con precisión adecuada, por lo tanto, los resultados son fáciles de interpretar.
- La inserción de una varilla es en frecuencia una operación fácil de realizar.

El método de variación de profundidad proporciona información útil sobre la naturaleza del suelo en las proximidades de la varilla (de 5 a 10 veces la longitud de la varilla).

Si se debe investigar un gran volumen de suelo, es preferible utilizar el método de cuatro puntos, ya que la conducción de varillas largas no es práctica. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

1.2.5.2. Método de los cuatro puntos

En la práctica, es uno de los métodos más exactos para medir la resistividad promedio de grandes volúmenes de tierra no perturbada. Pequeños electrodos están enterrados verticalmente en la tierra, todos a la profundidad "b" y espaciados en una línea recta a intervalos "a" (a igual separación). Se pasa una corriente directa o de baja frecuencia de prueba I entre los dos electrodos externos y el potencial V entre los dos electrodos internos se mide con un potenciómetro o un voltímetro de alta impedancia. La razón V / I da la resistencia aparente R en ohmios. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

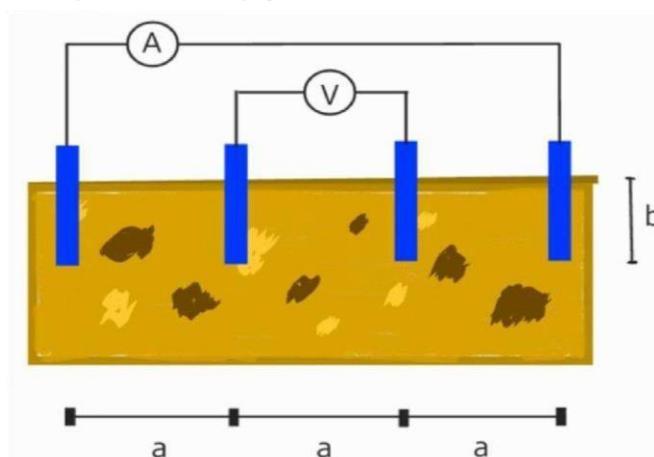
“Dentro del método existen tres tipos de configuraciones de los electrodos posibles: Configuración de Wenner; Configuración de Schlumberger; y, la Configuración azimutal” (Lavallo, 2021).

La mayoría de los dispositivos modernos, poseen de manera predefinida (usando una fórmula precargada al dispositivo, acorde con el método), la posibilidad de escoger las distancias de medición y con una profundidad de enterramiento ya estándar acorde con las varillas empleadas. El valor usual de dicha profundidad para las varillas es de 0.25 m” (Lavallo, 2021).

1.2.5.3. Configuración de Wenner

En esta configuración los electrodos están igualmente espaciados. La distancia “a” es la distancia entre dos electrodos adyacentes tal y como se muestra en la figura 30. En este método se dispone cuatro electrodos ubicados en línea recta y equidistante a una distancia “a”, simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del suelo. El mismo resulta el más seguro en la práctica para medir la resistividad promedio de volúmenes extensos de terrenos naturales. La profundidad máxima de los electrodos auxiliares, con la finalidad de no introducir mayores errores; generalmente es suficiente considerar entre 0,15 m a 0,20 m.

Figura 16. Configuración de Wenner.



Fuente: (Lavallo, 2021)

Dentro de esta configuración, se encuentran algunas variantes como por ejemplo Wenner alfa, Wenner beta o Wenner gamma. La variante más común es Wenner alfa. Las otras dos variantes se diferencian en el orden en el cual se colocan los electrodos de corriente y potencial. De acuerdo con dicho orden cada una de las variantes posee una fórmula distinta.

Aclarado lo anterior, la resistividad para Wenner alfa, en términos de las unidades en las que “a” y “b” están medidas es:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \left(\frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}}\right) - \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right)}$$

Se debe recalcar que la fórmula expresada en la ecuación anterior, para calcular ρ , no aplica a cualquier tipo de varilla ni a cualquier profundidad “b”, sino que aplica a pequeños electrodos, enterrados una profundidad “b”, con cables aislados. Sin embargo, cuando la profundidad es no mayor a 0.1a, (“b” profundidad pequeña en comparación a la distancia de separación entre electrodos “a”: $b \ll a$), se puede asumir que la profundidad $b=0$ y la fórmula se convierte en:

$$\rho = 2\pi aR$$

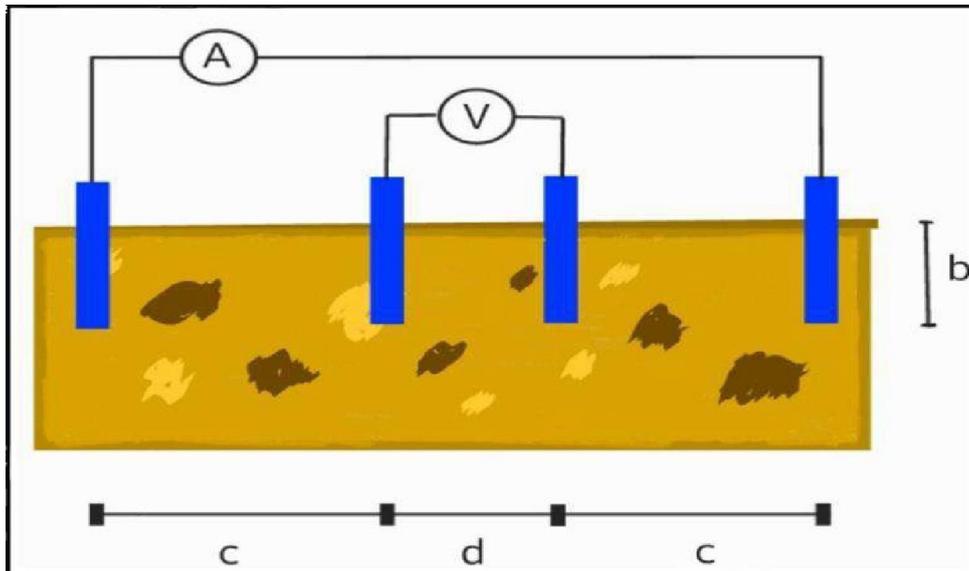
La ecuación simplificada anterior, entrega como resultado, la resistividad del suelo aproximada a una profundidad “a”, cuando “b” es despreciable. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

La resistividad obtenida como resultado de cualesquiera dos últimas ecuaciones, representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos. Se recomienda que se tomen lecturas en un eje perpendicular a todo eje de medición (Ortogonal: 90°) para que las estructuras metálicas subterráneas no afecten los valores. En este caso, se recomienda promediar las lecturas correspondientes de ambos ejes.

1.2.5.3.1. Configuración de Schullumberger

Esta configuración también llamada de arreglo de Schlumberger-Palmer, arreglo desigualmente espaciado surgió gracias a una debilidad de la configuración de Wenner. La figura 31, muestra cómo se disponen los electrodos en esta configuración.

Figura 17. Configuración de Schlumberger



Fuente: (Lavalle, 2021)

Uno de los defectos principales de la configuración de Wenner, es el abrupto decrecimiento en la magnitud del potencial entre los electrodos interiores, cuando su espaciamiento es incrementado a relativamente grandes valores. En ocasiones los instrumentos comerciales son inadecuados para medir un potencial tan bajo. Por este motivo, para medir resistividades con largos espaciamientos entre los electrodos de corriente se usa la configuración de Schlumberger con resultados satisfactorios. La fórmula usada en este caso puede ser fácilmente determinada.

En la mayoría de los casos, la profundidad de enterramiento de los electrodos suele ser aproximadamente 0.25 metros, la cual, para distancias muy grandes de medición, es pequeña en comparación a la separación de electrodos d y c .

En dicha situación, la resistividad puede ser calculada de una manera más rápida con la aplicación de la ecuación 2.6 que sigue a continuación:

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d}$$

Tabla 20. Comparación de los métodos de Wenner y Schlumberger

Concepto	Método de Wenner	Método de Schlumberger
Aplicación principal	Sondeos poco profundos (a<25m) para el diseño de puestas a tierra de corriente alterna. Exploración de suelos con fines de cimentación del tipo superficial o profundas	Sondeos profundos (a<100m) para el diseño de puestas a tierra de corriente continua. Exploración geológica de suelos y rocas
Requerimientos básicos	Buen contacto de los electrodos de medida con el suelo	Alta sensibilidad del instrumento
Instrumento de medidas requerido	Robusto Precisión normal <3%	Robusto Alta precisión <0.5%
Sensibilidad a variaciones laterales de la Resistividad	Pequeña	Compensada
Procedimiento	Clavado de cuatro electrodos equidistantes (a), se hace circular y mide una corriente (I) entre los dos laterales y los centrales miden (Vs).	Clavado de cuatro electrodos no equidistantes, se hace circular y mide una corriente (I) entre los dos laterales móviles (na) y los centrales fijos (a) miden (Vs)
Ejecución	Rápida y económica	Laboriosa

Fuente: (Gigawatt Ingenieros, 2015)

(Gigawatt Ingenieros, 2015), con relación a los dos métodos referidos en la tabla, llegan a las siguientes conclusiones:

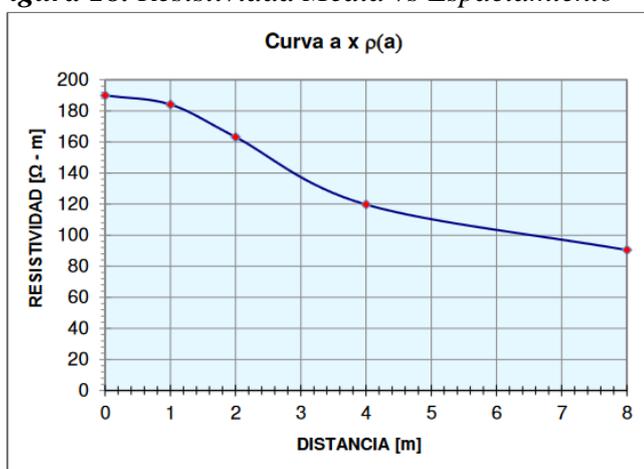
- El Método de Wenner da resultados más confiables que el Método de Schlumberger para distancias de medida pequeñas ($a < 25\text{m}$).
- Los instrumentos de medición que utilicen el Método de Wenner pueden tener menor sensibilidad que los que empleen el Método de Schlumberger, ya que a medida que se alejan los electrodos de Corriente, también lo hacen los de Potencial.
- Las medidas de Resistividad del Suelo más confiables, económicas y menos laboriosas se hacen empleando el Método de Wenner.

Para determinar la estratificación del suelo a través de mediciones de resistividad promedio basándose en los datos obtenidos aplicando el Método de Wenner, se puede usar una familia de curvas para lo cual existen varios métodos, más sin embargo, son muy utilizados dos: El de dos capas, y el de Pearson, para la estratificación de suelos de varias capas, como se detalla a continuación.

Método de dos capas usando Curvas

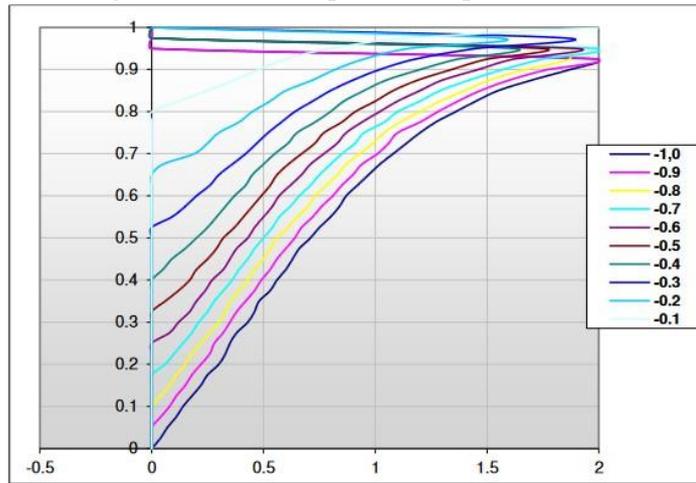
El rango de variación del coeficiente de reflexión K es pequeño, y está limitado entre -1 y $+1$. Entonces, se puede usar, una familia de curvas de $\rho(a)/\rho_1$ en función de h/a para una serie de valores de K negativos y positivos, cubriendo toda su gama de variación. En esta familia de curvas se tiene que identificar la curva característica.

Figura 18. Resistividad Media vs Espaciamiento



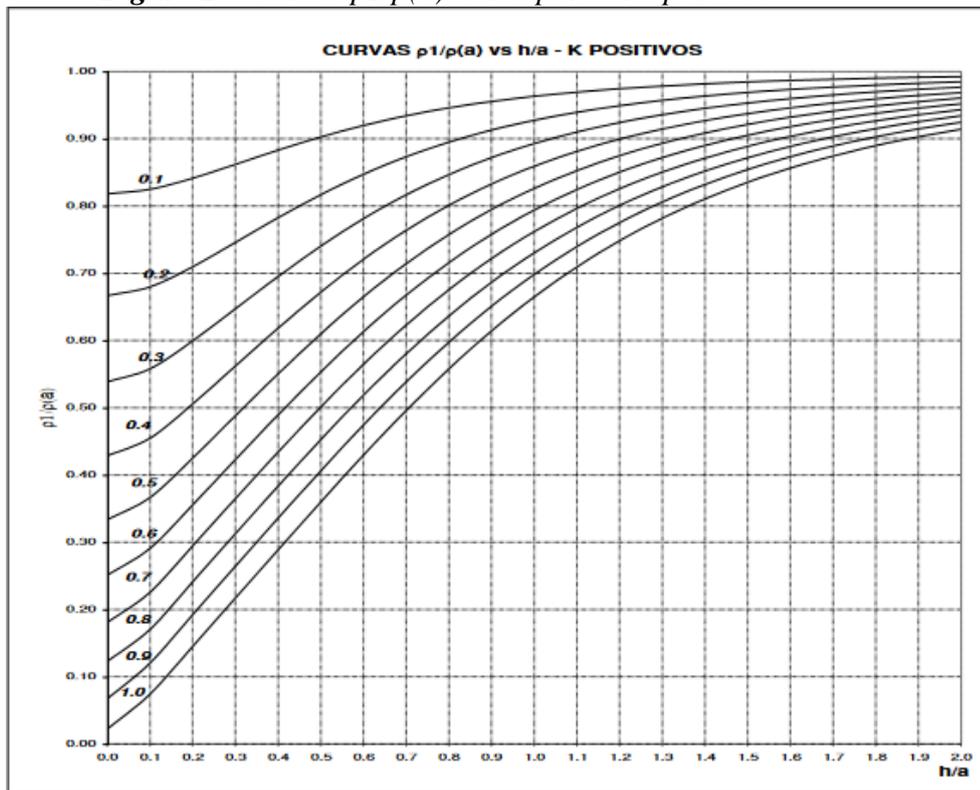
Fuente: (Gigawatt, 2015).

Figura 19. Curvas para “K” positivos



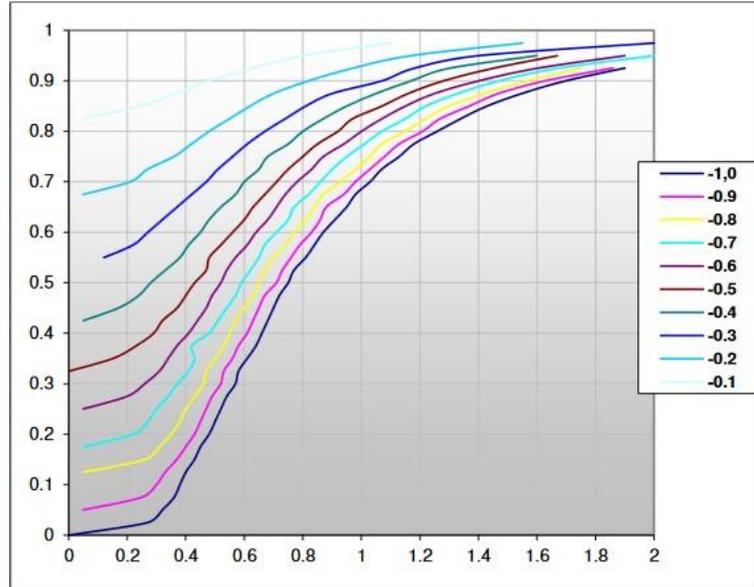
Fuente: (Gigawatt, 2015)

Figura 20. Curvas $p1/p(a)$ vs h/a para “k” positivos



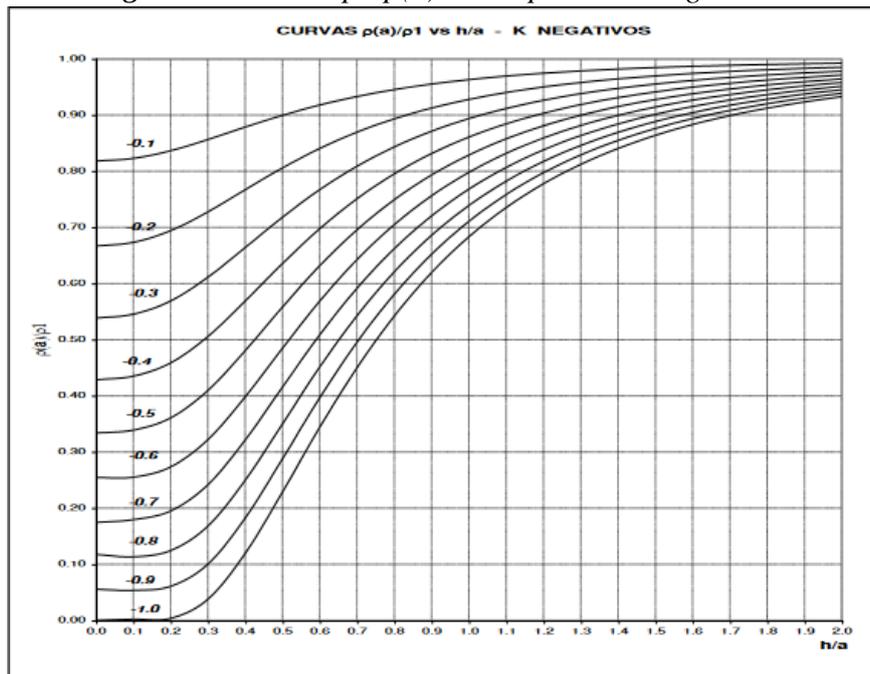
Fuente: (Gigawatt, 2015)

Figura 21. Curvas para “k” negativos



Fuente: (Gigawatt, 2015)

Figura 22. Curvas $p1/p(a)$ vs h/a para “k” negativos



Fuente: (Gigawatt, 2015)

1.2.6. Normatividad aplicada a la medición de la resistividad del suelo

Lavalle (2021) recomienda usar, además de las normativas mencionadas en el marco teórico, otras que tratan más explícitamente sobre la medición y los métodos de interpretar las mediciones. Se puede mencionar a las siguientes:

- *AIEE 81 Measuring Ground Resistance and Potential Gradients in the Earth (1962).*
- *ANSI C2 National Electric Safety Code (NESC) (2000).*
- *ANSI/IEEE 81 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance (1983).*
- *ASTM G57 Standard Test Method for Measurement Soil Resistivity (1995).*
- *IEC 60479-1 Effects of current on human beings. Part 1 General Aspects (2005).*
- *IEC 61557-1/9 Electrical Safety in low Voltage Distribution Systems up to 1000 V AC (Alternating current) and 1500 V DC (Direct Current) Equipment for Testing, Measuring of Protective Measures.*
- *NFPA 70 National Electrical Code (NEC) (2008).*

1.3. Definición de términos básicos

Carga eléctrica: Propiedad eléctrica de las partículas atómicas de las que se compone la materia, se mide en Coulombs C (Alexander & Sadiku, 2013, p.5).

Corriente eléctrica: Velocidad de cambio de la carga respecto al tiempo, medida en Amperes A (Alexander & Sadiku, 2013, p.5).

Isotropía: Propiedad de los cuerpos de que alguna magnitud física sea la misma en todas las direcciones, la resistividad de las rocas depende de la dirección que se considere es decir presentan un comportamiento anisótropo (Iakubovskii & Liajov, 1980).

Electrodo: Elemento conductor eléctrico en forma de varilla que generalmente es de acero bañado en cobre que se utiliza para la inyección de corriente al suelo y medición de diferencia de potencial (Iakubovskii & Liajov, 1980).

Dieléctrico: Material que tiene una alta resistividad eléctrica o que tiene una muy baja conductividad eléctrica pues este no posee ninguna carga eléctrica libre como los que se encuentran en los conductores (Alexander & Sadiku, 2013).

Conductividad eléctrica (σ): capacidad de un cuerpo para conducir una corriente a través de él mismo. Se puede definir la conductividad (σ) como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. Es el recíproco o inverso de la resistividad. Su unidad es el siemens.

Resistividad eléctrica (ρ) de un material: describe la dificultad que encuentra la corriente eléctrica a su paso por él. Es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una

sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas.

Resistividad del Suelo: Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo; se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo; su magnitud se expresa en (Ohm-m) o (Ohm-cm), es inversa a la conductividad.

Resistividad Aparente: resistividad obtenida con una medida directa en el suelo natural, bajo el esquema geométrico especificado por el método de cuatro (4) electrodos, aplicado con circuitos independientes de corriente y potencial, sólo es representativo para un punto de la característica del suelo estratificado.

Resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo: Esta resistencia eléctrica está determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor.

Resistencia Mutua de Electrodo: Fenómeno resistivo que aparece entre electrodos de puesta a tierra o puntos próximos en el suelo, mediante el cual, la corriente que se dispersa a través de uno de ellos, modifica el potencial del otro. Su unidad es el (Ohm).

Potencial Eléctrico: Diferencia de voltaje entre un punto y alguna superficie equipotencial que generalmente es la superficie del suelo, la cual es seleccionada arbitrariamente como de potencial cero o tierra remota. Un punto el cual tiene un potencial más alto que el cero se llama potencial positivo y en caso contrario potencial negativo.

Tierra Remota o Tierra de Referencia: Lugar o la zona de mínima resistencia, más próxima del suelo subyacente a una instalación eléctrica o a una puesta a tierra, respecto de las cuales se le atribuye por convención el Potencial cero.

Gravas: Suelo de material suelto precedentes de minerales y rocas fragmentadas de grano grueso, que suele encontrarse en los lechos y márgenes de los ríos, por consiguiente sufren desgaste de sus aristas. Su tamaño de partícula oscila entre 2mm (o 4.76mm) a 15 cm. (Lambe & Whitman, 2013).

Arenas: materiales precedentes de la desintegración de las rocas, de grano mediano (fino y grueso); la arena y grava tienen el mismo origen y suele encontrárselas juntas. El Φ de la partícula está entre 0,06 (ó 0,076 mm) a 2mm (ó 4,76mm) (Lambe & Whitman, 2013).

Limos: Pueden ser limo orgánico que se encuentra en los ríos y limo inorgánico como el que se encuentra en las canteras. Su tamaño de partícula oscila entre 0,002mm a 0,06mm (ó 0,074mm) (Lambe & Ehitman, 2013).

Arcillas: Suelos de grano muy fino cuya masa al ser mezclada con el agua tiene la propiedad de volverse plástica Su tamaño de partícula es menor de 0,002mm (Lambe & Whitman, 2013).

Turba: Suelos compuestos por materia orgánica de origen vegetal en diferentes estados de descomposición, son de color marrón oscuro a negro (Lambe & Whitman, 2013).

Relleno: Suelos procedentes de otros lugares que al ser depositados generalmente no han sido compactados, presentando un comportamiento mecánico deficiente (asentamientos impredecibles y/o excesivos (Lambe & Whitman, 2013).

Suelos Saprolíticos:

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción del problema

El suelo o terreno cumple un papel importante como elemento estructural de soporte de estructuras, por este motivo antes de iniciar la construcción de una edificación, es de vital importancia conocer el tipo de suelo donde se construirá esta, puesto que nos guiará a que las estructuras que se construyan se apoyen en suelos de características competentes, preferentemente en suelos gruesos por ser considerados más estables que suelos finos (suelos limosos, arcillosos, orgánicos) ante la presencia de agua, pues estos sufren alteraciones convirtiéndose en suelos problemáticos, no aptos para la construcción.

El diseño de los cimientos para todo tipo de edificación requiere de estudios para analizar la disposición de los materiales en el subsuelo, categorizarlo de acuerdo al desempeño geotécnico evaluando sus propiedades físico-mecánicas con la finalidad de conocer el estrato que va a ofrecer resistencia a las cargas o esfuerzos transmitidos por la estructura a la cimentación y se pueda determinar su comportamiento.

La falta de información al momento de ejecutar una obra de ingeniería civil puede desencadenar una serie de inconvenientes técnicos, estos daños se relacionan con la inestabilidad del suelo lo cual termina en asentamientos diferenciales, asentamientos y desplomos en estructuras desplantadas en suelos blandos.

La exploración del subsuelo por métodos directos conlleva el uso de varios recursos: económicos, por sus altos costos y tiempo prudente para la realización de los ensayos de laboratorio, por lo que es necesaria la búsqueda de otros método de exploración que sean rentables, fáciles de realizar y en un tiempo menor y con capacidad suficiente para dar solución a problemas de caracterización geotécnica, este es el caso del método de resistividad eléctrica.

Ante esta realidad para lograr un crecimiento ordenado de las ciudades, para detectar suelos inestables, es de suma importancia para los ingenieros civiles y población el conocimiento del tipo de suelo o terreno antes de iniciar cualquier

tipo de construcción, es así que se requiere de métodos no convencionales alternativos que permitan conocer la calidad de los suelos y así determinar el tipo de construcción que se podrá cimentar en este. Este método alternativo debe ser económicamente viable también y prudente en tiempo de obtención de resultados para así para alentar a la población a realizar mínimamente este tipo de estudio de suelos y así puedan conocer el tipo de construcción apropiada para el tipo de suelo existente.

El presente estudio pretende demostrar que el método de resistividad eléctrica, puede constituir una herramienta importante en la determinación de las características geotécnicas del suelo.

Por ello con el fin que se pueda contar con una metodología rápida, de costo bajo para la caracterización de suelos y posterior determinación de la profundidad de desplante y/o capa freática en lugares donde se pretende construir edificaciones hemos elaborado el presente estudio.

2.2. Formulación del problema

2.2.1. Problema general

¿Qué tipo de relación existe entre los valores de resistividad eléctrica obtenidos por el Método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico determinadas aplicando ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos en el terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, 2023”?

2.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son los valores de resistividad eléctrica obtenidos por el Método de Wenner en el terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, 2023?

- ¿Cuáles son las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico del terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, obtenidas a través de ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos?
- ¿Qué relación existe entre los valores de resistividad eléctrica obtenidos por el Método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico del terreno obtenidas a través de ensayos convencionales de Mecánica de Suelos en la cimentación del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto?
- ¿En qué medida resulta ventajoso el uso de mediciones de resistividad eléctrica utilizando el Método de Wenner para caracterización de suelos y determinación del perfil estratigráfico frente al método convencional de la Mecánica de Suelos?

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo general

Determinar el tipo de relación que existe entre los valores de resistividad eléctrica obtenidos por el Método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico determinadas aplicando ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos en el terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, 2023.

2.3.2. Objetivos específicos

- Determinar los valores de resistividad eléctrica utilizando el Método de Wenner en el terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de

Loreto

- Determinar las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico del terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, utilizando ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos
- Formular el modelo matemático que defina el tipo de relación existente entre los valores de resistividad eléctrica medidos utilizando el Método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico del terreno obtenidas a través de ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos en la cimentación del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto.
- Comparar en tiempos y costos la obtención de resultados de caracterización de suelos y determinación del perfil estratigráfico utilizando los valores de resistividad eléctrica aplicando el Método de Wenner y los ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos, en la cimentación del local del centro de desarrollo cultural de la comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general.

H: Existe relación entre los valores de resistividad eléctrica obtenidos por el método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico determinadas aplicando ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos en el terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto,

2023.

2.4.2. Hipótesis específicas

H1: El tipo de relación entre los valores de resistividad eléctrica obtenidos mediante la aplicación del método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico del terreno obtenidos a través de ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos en la cimentación del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, corresponde a una asociación.

- H2: Los tiempos y costos de obtención de resultados de caracterización de suelos y determinación del perfil estratigráfico utilizando los valores de resistividad eléctrica obtenidos aplicando el método de Wenner son menores en 25% que los empleados para su determinación a través de ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos, en la cimentación del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto.

2.5. Variables

2.5.1. Identificación de variables

- **Variable independiente X:** Resistividad Óhmica del Suelo.
- **Variable dependiente Y:** Espesor de los estratos y características físicas del suelo.
- **Variable Interviniente Z:** Propiedades mecánicas del suelo de fundación

2.5.2. Definición conceptual y operacional de variables

2.5.2.1. Definición conceptual de variables

- **Variable independiente X:** Resistividad del suelo se define como la resistencia que ofrece un cubo de 1 m de lado (lleno con el suelo que se desea analizar) al paso de la corriente (Moreno, Valencia, Cárdenas & Villa, 2007). Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de una corriente eléctrica, por lo que nos da una idea de lo buen o mal conductor que es; será un mal conductor si tiene un valor alto de resistividad, mientras que un valor bajo de la resistividad indicará que el material es un buen conductor.
- **Variable dependiente Y:** Características físicas del suelo de fundación del local del Centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto.
- **Variable Interviniente Z:** Propiedades mecánicas del suelo de fundación del local del centro de desarrollo cultural de la comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto.

2.5.2.2. Definición operacional de variables

Figura 23. Operacionalización de Variables

Variab	Indicadores genéricos	Instrumentos
Variable Independiente X: Resistividad óhmica del suelo	Valores de resistividad eléctrica	Instrumento de toma de datos. Valores de resistividad aparente del terreno. Diagnóstico. Informe de evaluación
Variable Dependiente Y: Espesor de los estratos y Características físicas del suelo	-Espesor de estrato -Clasificación del suelo década estrato. -Características físicas del suelo de fundación	Planos. Expediente técnico. Memoria de cálculo

Variable Interviniente Z:	Valores aproximados de esfuerzos del suelo de fundación.	Valores de esfuerzos
Propiedades mecánicas del suelo de fundación		

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de la investigación

3.1.1. Tipo de investigación

La investigación es del tipo aplicada, correlacional, comparativa. A continuación, se detalla:

Tabla 9. Tipo de investigación

Criterio	Tipo de Investigación
Finalidad	Aplicada
Estrategia o enfoque teórico metodológico	Cuantitativa
Objetivo (alcances)	Descriptiva
Fuente de datos	Primaria
Diseño de prueba de hipótesis	No experimental
Temporalidad	Transversal
Contexto donde se desarrolla	Campo (zona rural Loreto) y gabinete
Intervención disciplinaria	Multidisciplinaria

3.1.2. Diseño de la investigación

Su diseño corresponde al tipo no experimental.

Esquema:



Donde:

M: Muestra

O: Observaciones

Figura 10: Diseño de Investigación

Realizar la observación a cada variable en forma independiente y describirlas (medir cada variable independientemente).

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

Corresponde a los suelos con fines de capacidad portante del distrito de Urarinas, provincia de Loreto.

3.2.2. Muestra

La muestra está conformada por el suelo de fundación del Centro de Desarrollo Cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto.

3.3. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

3.3.1. Técnicas

Para desarrollar la presente investigación se aplicó como técnica la Observación y análisis documental; y, como su instrumento el cuestionario y las fichas de análisis de las referencias bibliográficas. Se utilizó la técnica de observación visual con los instrumentos de recolección de datos en la muestra, como paso fundamental, luego la identificación, clasificación, posterior análisis y evaluación de cada una de las propiedades físicas del terreno de fundación del Centro de Desarrollo Cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto.

Se hizo una revisión y análisis documental para proveer de base teórica y técnica, así como de los procedimientos y herramientas existentes en la literatura y otros generados como parte de la investigación. El análisis documental, para la obtención de la información secundaria, incluye diversas tesis doctorales, tesis de maestría y artículos científicos de publicación reciente, sobre caracterización de suelos a través de

mediciones de su resistividad eléctrica.

3.3.2. Instrumentos

Se utilizó: Lista de cotejo, las fichas de análisis documental de las referencias bibliográficas; cuadros de datos estadísticos, y otros formatos de los manual de ensayos de materiales y de uso de telurómetros; asimismo, se utilizó los formatos del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la Universidad Científica del Perú; y, del estudio de Mecánica de Suelos con fines de cimentación conformantes del Expediente Técnico para la ejecución de la obra en mención, realizado en un laboratorio de suelos y concreto de propiedad privada.

Los instrumentos: Guía de Observación, Lista de cotejo, formatos y cuadros de datos estadísticos.

Los equipos se utilizaron fueron:

- GPS
- Equipos de cómputo
- Cámaras fotográficas
- Celulares de alta gama
- Equipos: Telurímetro MTD 20KWe de fabricación brasilera, de escala de medición de resistencias entre: 0-20; 0-200; 0-2000 o 0-20k Ω y de Tensión de 0-200V. Con exactitud de medición de resistencias: $\pm 2\%$ del valor medio $\pm 1\%$ del fondo de escala; y, de medición de tensión: $\pm 2\%$ del valor medio $\pm 1\%$ del fondo de escala.
- Batería de automóvil de 12 V.
- Fuente de alimentación, para la red de 95 - 240 V.
- Cable de conexión para alimentar el cargador con batería externa (automóvil).
- Cinta métrica de material eléctricamente aislante
- Juego de 4 electrodos.

- Juego de 4 cables (conductores aislados flexibles para la conexión de los electrodos al aparato de medición).
- Manual de operación.
- Martillo de 2 kg
- Agua

3.3.3. Procedimientos de recolección de datos

- Se implementó la investigación con los insumos e instrumentos adecuados
- Se elaboró los instrumentos de recolección de datos.
- Se efectuó la toma de datos y recojo de información preliminar. Para la sistematización de los datos se usó los paquetes básicos de Micosoft, (Word, Excel); y, AUTOCAD.

Para llevar a cabo las mediciones de campo y obtener la resistividad aparente del terreno en estudio, se cumplió los siguientes pasos:

- Delimitación de la zona en estudio
- Marcación de un punto O que será el punto de simetrías para la ubicación de los electrodos de medición “a”.
- Establecimiento de las direcciones de medición, tratando de cubrir totalmente el área en estudio
- Selección de las distancias inter electródicas, para el dispositivo Wenner “a”.
- Recolección de lecturas del resistímetro.

Consideraciones en la medición usando el resistímetro

a) Prueba

- Los electrodos fueron bien alineados y estuvieron igualmente espaciados

- Los electrodos fueron clavados en el suelo a la misma profundidad de 0.30m. Se tuvo presente que la profundidad a la que se está midiendo (1m separación = 70% de profundidad).
- El equipo fue posicionado simétricamente con respecto a los electrodos.
- Los electrodos fueron limpiados, retirándose algunas trazas de óxido.
- Las baterías del equipo estuvieron con el 100% de carga
- Se anotó la condición de humedad del suelo

b) Seguridad y consideraciones de orden práctico.

- Los responsables de las lecturas y manejo del equipo durante todo el periodo de medición estuvieron con calzado dieléctrico.
- Se previó condiciones atmosféricas óptimas (cielo despejado y periodo de ausencia de lluvias, teniéndose así la situación más desfavorable en la conexión a tierra).
- Los conductores, conectores y los extremos exteriores de los electrodos auxiliares del equipo de medición, mostraban buen estado de conservación.
- En el área próxima a las instalaciones de puesta a tierra del sistema eléctrico de este local (edificación materia de la investigación), se efectuaron mediciones ortogonales, para eliminar así la influencia de los pozos a tierra y la varilla de cobre.
- Al encontrarse que el terreno estaba muy seco, se humedecieron los electrodos, con énfasis en los electrodos de corriente, para obtener un buen contacto entre el electrodo auxiliar y el terreno.

- Durante la toma de las medidas de campo, no existió ruido excesivo que pudo interferir con las lecturas debido a la gran longitud de los cables de los electrodos de prueba. Es decir se tuvo presente que el voltaje de interferencia debe estar dentro de la tolerancia del equipo de medición. Sobre el caso, de existir excesivo ruido, la recomendación técnica consiste en trenzar los cables que van hasta los electrodos de prueba, para cancelar los voltajes de modo común entre los dos conductores.
- Se averiguó sobre la existencia de cables de distribución de energía eléctrica que estuviesen enterrados en forma paralela a la línea de medición, dado a que se conoce que causan interferencia en las mediciones. De haberlo existido se sabía de antemano que la línea de medición tenía que hacerse perpendicular a los cables de distribución eléctrica.

Para llevar a cabo las mediciones de campo y obtener con fines de verificación de resultados de las propiedades físicas del suelo, se efectuó dos calicatas de 1.00m x 1.00m de hasta tres (3.00m) de profundidad, extrayéndose muestras alteradas.

De la información secundaria se tomó en cuenta los estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación, elaborados por “SECATP Consultoría y Capacitación”; se cumplió los siguientes pasos:

3.4. Procesamiento para el análisis de datos

Los datos obtenidos de la observación directa del suelo materia de investigación, y de las fichas de referencias bibliográficas fueron procesados mediante gráficos y tablas elaborados en el programa Microsoft Excel. Para su presentación y análisis de la información resultante se usó los paquetes básicos de Micosoft, (Word, Excel); y, AUTOCAD.

- Para procesar la información proveniente de los ensayos de granulometría, contenido de humedad y otros para la clasificación de suelos por el sistema SUCS, se usó el paquete de Microsoft EXCEL y Word y registro fotográfico.
- Para el análisis estadístico e interpretación de los resultados, se empleó la estadística descriptiva, conformada por las frecuencias, promedio, porcentajes, desviación estándar y varianza y el uso del paquete estadístico Microsoft EXCEL.

La información fue procesada en forma computarizada utilizando cuadros estadísticos, distribución de frecuencias según las variables a estudiar y los cruces de información estudiados, mediante el uso del Excel, cumpliéndose con el siguiente proceso:

- Verificación y procesamiento inicial de los datos.
- Cálculo de la resistividad aparente de acuerdo a la fórmula pertinente.
- Levantamiento de la curva de resistividad respectiva
- Cuando existieron puntos donde la lectura era dudosa se repitió la medición respectiva.

Para hacer el modelamiento a dos (2) capas se pudo usar el Modelo matemático usando el método de Wenner, sin embargo se usó el Método de Curvas. A continuación se ilustra ambos métodos:

Modelo matemático

$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right]$$

Donde:

V_p : Potencial de un punto p cualquiera de la primera capa respecto al infinito

ρ_1 : Resistividad de la primera capa

h : Profundidad de la primera capa

r : Distancias del punto p a la fuente de corriente

k : Coeficiente de reflexión

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1}$$

La variación del coeficiente de reflexión está limitado entre -1 y +1

$$-1 \leq K \leq +1$$

Para determinar la estratificación del suelo a través de mediciones de resistividad promedio basándose en los datos obtenidos aplicando el Método de Wenner, se puede usar una familia de curvas para lo cual se usa el método de dos capas, como se detalla a continuación:

Método de dos capas usando Curvas

El rango de variación del coeficiente de reflexión K es pequeño, y está limitado entre -1 y +1. Entonces, se puede usar, una familia de curvas de $\rho(a)/\rho_1$ en función de h/a para una serie de valores de K negativos y positivos, cubriendo toda su gama de variación. Se identificó la curva característica

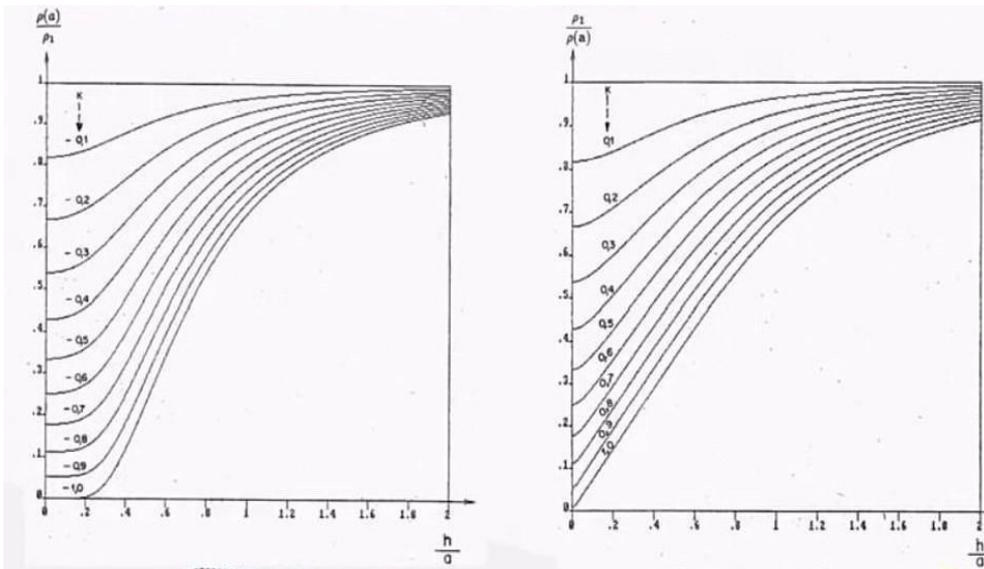
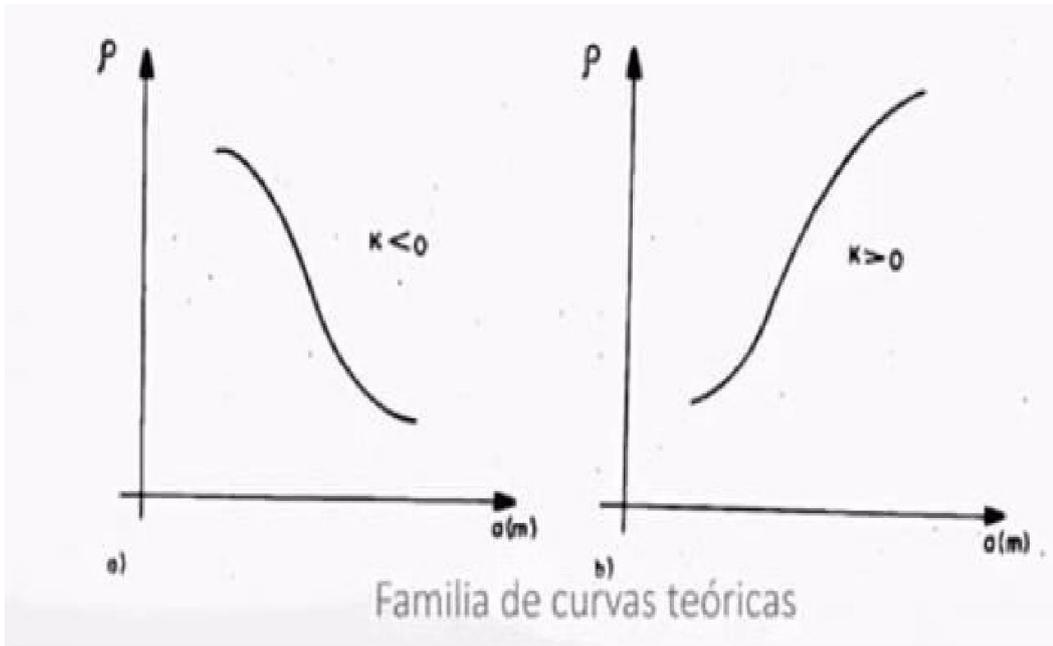
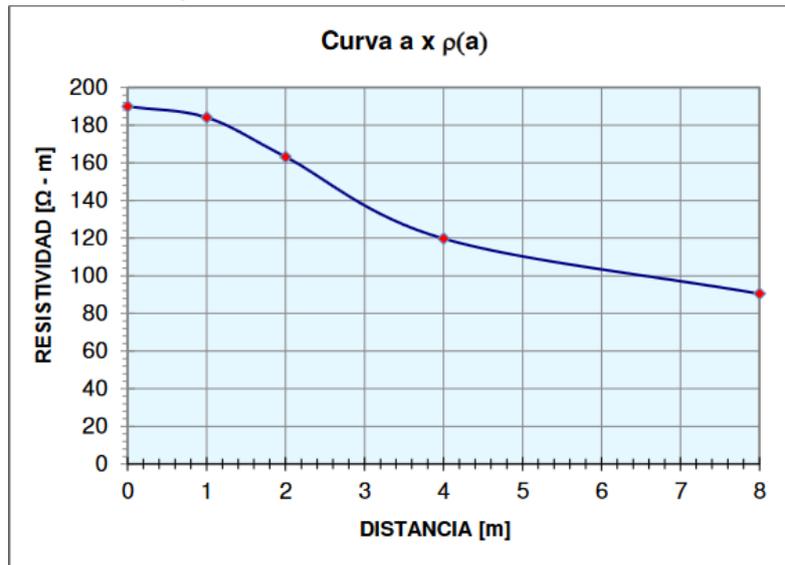
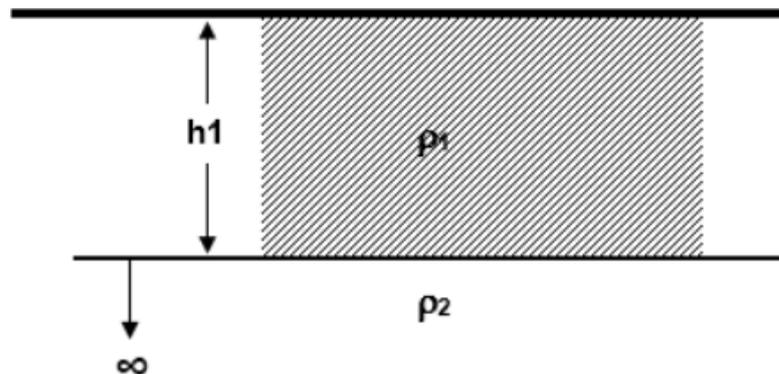


Figura 24. Resistividad vs distancia



Fuente: (Gigawatt, 2015)

Figura 25. Definición de las dos capas de estratos



Para el *modelamiento a dos capas*, se cumplieron los siguientes diez (10) pasos:

Paso 1: Graficar en el plano cartesiano X-Y la Resistividad Media vs Espaciamiento. Elaborar la curva $\rho(a)$ x(a) con los valores de **espaciamiento** en el eje X y los valores de Resistividad obtenida por el Método de Wenner el eje Y.

Paso 2: Proyectar (prolongar) la curva $\rho(a)$ x(a) elaborada en el paso anterior hasta cortar al eje de las ordenadas **ρa** para leer directamente el valor **$\rho 1$** , que constituye la primera camada.

Paso 3: Escoger un valor de la medición “espaciamento - resistividad”

Paso 4: Cálculo de la relación ρ vs a

Paso 5: Proyección y elaboración de tabla: $\frac{\rho a}{\rho_1}$ vs $\frac{h}{a}$, con lo cual se consigue h [m].

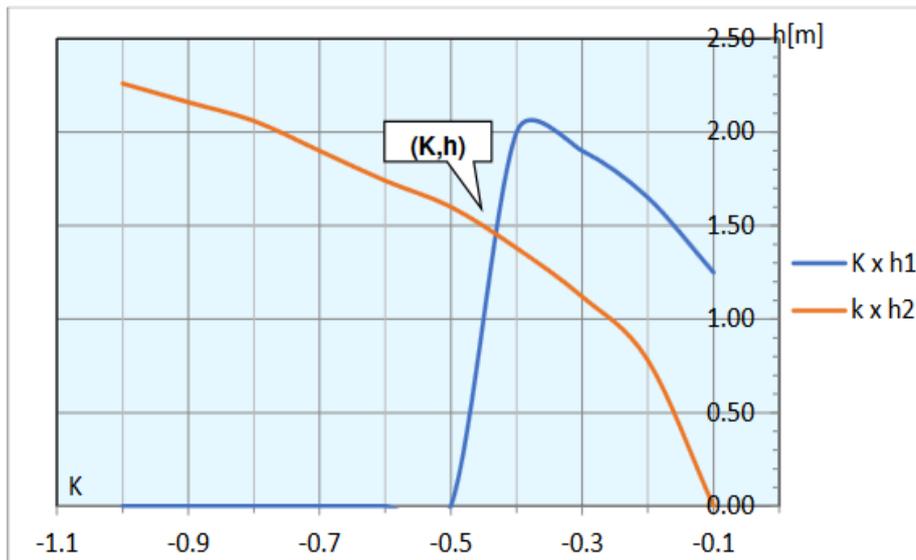
Paso 6: Cálculo de la relación **espaciamento – resistividad** con otra separación $a_2 \neq a_1$, y todo el proceso es repetido, resultando en una nueva curva.

Paso 7: Proyección y elaboración de tabla con nueva separación.

Paso 8: Trazado de curvas de altura.

Paso 9: Cálculo de ρ_2

Figura 26. Intersección de las curvas “ $k \times h_1$ ” y “ $k \times h_2$ ”



Fuente: (Gigawatt, 2015)

Paso 10: Finalmente se obtiene la Resistividad de las dos capas del terreno.

Materiales y Métodos

Geomorfología en el área de estudio

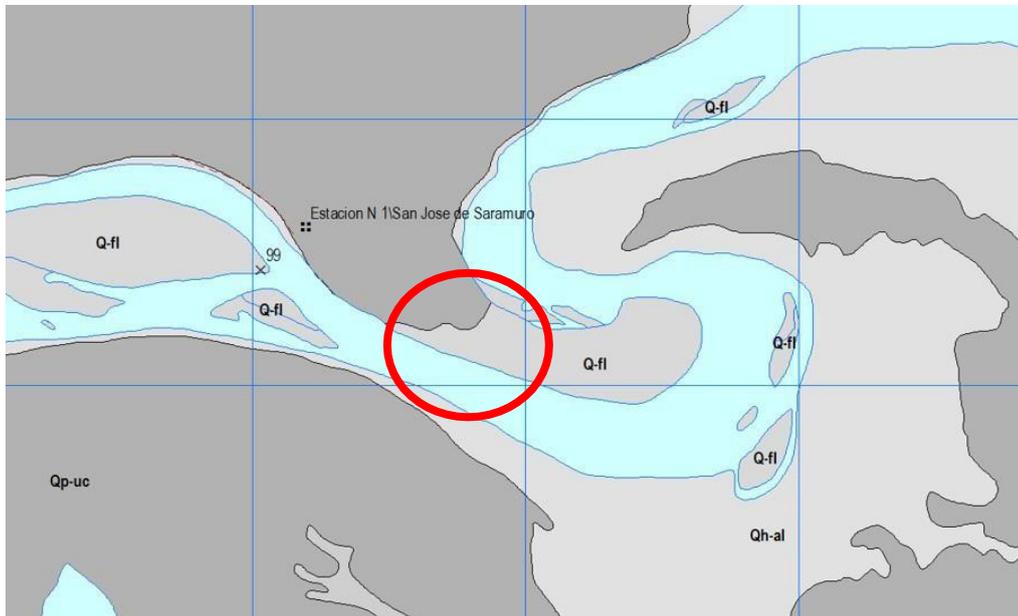
El área de estudio corresponde a Selva Baja. La zona es de terrazas bajas inundables con drenaje muy pobre y pobre; su relieve es relativamente depresionado y se ubica en las riberas del cauce del río Marañón, cuyo proceso característico es la inundación en periodos de crecientes muy altas, acarreando suelos limosos, arenosos y esporádicamente arcillosos, que son decantados o depositados al disminuir la energía de la inundación; y, en los periodos de vaciante van acumulándose estos materiales finos quedando expuestos a procesos de colmatación y consolidación.

Geología regional del área de estudio

La Estructura Geológica del área corresponde a la Cuenca Cretácea que se desarrolló en el Continente Sudamericano, se encuentra enmarcado en una serie de eventos cronológicos. Los sedimentos Cretáceos, mayormente han provenido de la erosión desde el oriente del Escudo Guayana-Brasileño y fueron depositados conformando ciclos transgresivos y regresivos. Existen inter estratificaciones con areniscas de potentes capas de lutitas, que han sido pre consolidados durante los movimientos tectónicos, han contribuido a fallamientos importantes que siempre siguen la dirección del buzamiento de las rocas sedimentarias afectadas; pero también en ciertas formaciones de las lutitas se presentan bien laminados con horizontes arenosos.

Debido a los diferentes factores clima-atmosféricos la meteorización ha sido el fenómeno más importante que ha modificado las propiedades geológicas iniciales, en tal grado que no dista mucho de ser verdaderos sedimentos sin litificación, presentando consolidación relativamente pequeña debido a la presencia de arcillas; estos procesos de transformación están íntimamente vinculados con la fracturación y lixiviación. Los sedimentos predominantes corresponden a limos, arenas oscuras, grises a pardas de grano fino a medio, limos y limo arcillitas y fragmentos líticos volcánico, que según el Mapa Geológico corresponden

al Depósito fluvial (Qh-fl). En la zona no se observa afloramientos rocosos, ni sedimentos del tipo de agregados gruesos. (Ministerio de Energía y Minas, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET, 1999)



LEYENDA

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	EDAD (MA)	UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	0.01	Depósito fluvial Q-fl Fragmentos rocosos heterométricos (arenas, cantos, bolos)
				Depósito biogénico Q-bi Limos, arenas intercaladas con niveles orgánicos
				Depósito aluvial Qh-al Arenas oscuras, grises a pardas de grano fino a medio, fragmentos líticos volcánicos, limos y limoarcillitas
		Depósito aluvial Qp-al Arenas, limos y gravas con matriz limosa y arcillosa		
		PLEISTOCENO	23.03	Formacion Ucamara Qp-uc Arenas gris oscuras de grano medio, subredondeados y mal seleccionadas, litoclástica, con abundantes fragmentos volcánicos

El área geológica corresponde al cuadrángulo 10-n – Yanayacu

Fuente: Mapa Geológico INGEMMET, Versión digital 1999.

Geodinámica del área de estudio

El área en estudio se ubica en una zona alta inundable solo en crecientes extraordinarias, no se prevén fenómenos de geodinámica externa ya que

en área no se han presentado fallas como hundimientos, levantamientos ni desplazamientos de la formación existente en la zona.

Sismicidad en del área de estudio

Según Silgado (1978), revisada la sismicidad histórica de la zona, desde 1555, no se encontró antecedentes de sismicidad destructiva en la zona; así como no se detectaron fallas activas ni evidencias tectónicas que hagan temer movimientos telúricos de riesgo para la infraestructura proyectada. De acuerdo al área sísmica donde se ubica la zona en estudio existe la posibilidad de que ocurran sismos de intensidades del orden III en la escala de Mercalli Modificada.

De acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones (R.N.E) el área de estudio corresponde a la Zona 1 (Resolución Ministerial N° 355-2018-Vivienda: 22/10/2018); y, de acuerdo a las normas de Diseño Sismo Resistente, al suelo de cimentación del presente estudio le corresponde la siguiente información:

Perfil del Suelo (S): S3 (Suelo Flexible con estrato de gran espesor)

Periodo Fundamental de Ampliación: $T_p=1.0s$

Factor de Ampliación del Suelo: $S=1.40$

Factor de Zona $Z= 0.10$

Calicatas de sondaje de espesor de estratos y tipo de suelo efectuados por los investigadores:

De las muestras de suelos de cada uno de los estratos de las dos (2) calicatas se efectuó su clasificación según SUCS y AASHTO, así como se elaboró los perfiles estratigráficos correspondientes, cumpliéndose los siguientes pasos:

- Contenido de humedad natural (ASTM D 2216).
- Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D 422)
- Límites de consistencia (ASTM D 4318)

- Clasificación de suelos mediante los sistemas SUCS y AASHTO
- Elaboración de perfil estratigráfico
- Evaluación de nivel freático

El tipo de cimentación y la capacidad admisible del suelo de fundación, así como el asentamiento teórico probable ha sido aproximado tomando en cuenta los resultados de los dos estudios en mención (Información secundaria).

4. Resultados y discusión de resultados

4.1. Resultados

Las tres series de mediciones de resistividad se efectuaron en las proximidades de las tres calicatas de prospección ejecutadas por SECATEP Consultoría y Capacitación, como parte del expediente técnico de la obra de “Construcción del local del Centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto”.

4.1.1. Cuadro de coordenadas UTM, Sistema WGS-84 Zona 18L

Tabla 21. Coordenadas UTM, Sistema WGS-84 Zona 18L

CUADRO DE COORDENADAS UTM, SISTEMA WGS-84 ZONA 18L			
PUNTO S	ESTE	NORTE	COTA (msnm)
1	679175	9574875	107
2	679102	9574881	107
3	679146	9574905	107
4	679129	9574942	105
5	679187	9574942	101

4.1.2. Resistividad aparente para cada separación de electrodos

Tabla 22. Resistividad aparente para cada separación de electrodos

RESISTIVIDAD APARENTE PARA CADA SEPARACIÓN DE ELECTRODOS				
PUNTO DE ESTUDIO	Resistencia R (Ω)	Distancia Separación a(m)	Profundidad b(m)	Resistividad ρ(Ω.m)
P-1	6	1,00	0.20	59.83
	1	2,00	0.20	14.83
	1	3,00	0.20	20.43
P-2	3	1,00	0.20	29.93
	1	2,00	0.20	14.83
	1	3,00	0.20	20.43
P-3	4	1,00	0.20	39.91
	1.5	2,00	0.20	22.24
	1	3,00	0.20	20.43
P-4	0.2	1,00	0.20	1.99
	0.4	2,00	0.20	5.93
	0.2	3,00	0.20	4.09
P-5	3.7	1,00	0.20	36.91
	1.3	2,00	0.20	19.27
	0.4	3,00	0.20	8.17

Aplicación directa de la fórmula

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \left(\frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}}\right) - \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right)}$$

Donde:

a= Distancia entre electrodos

ρ= Profundidad clavado de electrodo

4.1.3. Clasificación del suelo según SUCS y AASHTO

Tabla 23. Calicata C-1. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia

N°	Profundidad	% de	Análisis	L.L.	LP	IP
Muestr a	[m]	Humeda	Granulométric	ASTM	AST	
		d	o ASTM D-	D	M	
		ASTM	422	4318-	D431	
		D-2216	NTP 339.128	T89	8-T90	

M-1	0.20 – 1.20	22.73 22.37	% que pasa la malla N° es de 54.44%	No se determinó	No se determinó	No se determinó
Clasificación SUCS: (ML)						
Clasificación AASHTO: A-4 (3)						
Peso volumétrico(Norma ASTM D-2937): 1.80 gr/c ³						
Observaciones: Limo inorgánico, de color marrón con matices gris, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas (54.44% pasa la Malla N° 200).						

Tabla 24. Calicata C-1. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia

N° Muestra	Profundidad [m]	% de Humedad ASTM D-2216 NTP 339.127	Análisis Granulométrico ASTM D-422 NTP 339.128	L.L. ASTM D 4318-T89	LP ASTM D4318-T90 NTP 339.129	IP
M-2	1.20 – 3.00	16.86	% que pasa la malla N° 200 es de 60.13%	No se determinó	No se determinó	No se determinó
Clasificación SUCS: (ML)						
Clasificación AASHTO: A-4 (5)						
Peso volumétrico (Norma ASTM D-2937): 1.82 gr/c ³						
Observaciones: Limo inorgánico, de color marrón con matices gris, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas (el 60.13% pasa la malla N° 200).						

Tabla 25. Calicata C-2. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia

N° Muestra	Profundidad [m]	% de Humedad ASTM D-2216 NTP 339.127	Análisis Granulométrico ASTM D-422 NTP 339.128	L.L. ASTM D 4318-T89	LP ASTM D4318-T90 NTP 339.129	IP
M-1	0.20 – 1.40	21.21	% que pasa la malla N° es de 74.90%	No se determinó	No se determinó	No se determinó
Clasificación SUCS: (ML)						
Clasificación AASHTO: A-4 (3)						

Peso volumétrico (Norma ASTM D-2937): 1.85 gr/c ³
Observaciones: Limo inorgánico, de color marrón claro con matices gris, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas (74.90%).

Tabla 26. Calicata C-2. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia

N°	Profundidad [m]	% de Humedad	Análisis	L.L.	LP	IP
Muestra			Granulométrico ASTM D-422	ASTM D 4318-4318-T89	ASTM D4318-T90	
			NTP 339.128		NTP 339.12	
M-2	1.40 – 3.00	18.83	% que pasa la malla N° 200 es de 58.62%	No se determinó	No se determinó	No se determinó
Clasificación SUCS: (ML)						
Clasificación AASHTO: A-4 (8)						
Peso volumétrico (Norma ASTM D-2937): 1.85 gr/c ³						
Observaciones: Limo inorgánico, de color marrón claro con matices gris, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas (58.62%).						

Tabla 27. Calicata C-3. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia

N°	Profundidad [m]	% de Humedad	Análisis	L.L.	LP	IP
Muestra			Granulométrico ASTM D-422	ASTM D 4318-T89	ASTM D4318-T90	
			NTP 339.128			
M-1	0.20 – 1.20	23.74	% que pasa la malla N° 200 es de 90.80%	No se determinó	No se determinó	No se determinó
Clasificación SUCS: (ML)						
Clasificación AASHTO: A-4 (7)						
Peso volumétrico (Norma ASTM D-2937): 1.80 gr/c ³						

Observaciones: Limo inorgánico, de color marrón con matices gris, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas (70.76%).

Tabla 28. Calicata C-3. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia

N° Muestra	Profundidad [m]	% de Humedad	Análisis Granulométrico	L.L. ASTM	LP ASTM	IP
			ASTM D-2216	ASTM D 4318-T89	D4318-T90	
M-2	1.20 – 3.00	20.73	% que pasa la malla N° 200 es de 61.98%	No se determinó	No se determinó	No se determinó

Clasificación SUCS: (ML)
 Clasificación AASHTO: A-4 (5)
 Peso volumétrico (Norma ASTM D-2937): 1.83 gr/c³
 Observaciones: Limo inorgánico, de color marrón con matices gris, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas (61.98%).

Tabla 29. Cuadro de resultados de tipos de suelos por estratos en calicatas

Calicata	Muestra	Prof. [m]	Humedad [%]	Pasa Malla 200	Límites de Atterberg			SUCS	AASHTO
					LL	LP	IP		
C-1	M-1	0.20-1.20	22.37	54.44	No	No	No	ML	A-5(9)
	M-2	1.20-3.00	16.86	60.13	No	No	No	ML	A-4(6)
C-2	M-1	0.20-1.40	21.21	74.90	No	No	No	ML	A-5(9)
	M-2	1.40-3.00	18.83	58.62	No	No	No	ML	A-4(3)
C-3	M-1	0.20-1.20	23.74	70.76	No	No	No	ML	A-5(10)
	M-2	1.20-3.00	20.73	61.98	No	No	No	ML	A-4(5)

Fuente: SECATP Cosultoría & Capacitación

4.1.4. Clasificación de suelo según parámetros de Resistividad Eléctrica

Los datos obtenidos, fueron procesados y analizados gráficamente. De la compatibilización de los valores de resistividad encontrados y el uso apropiado de los nomogramas, arrojó un modelo que indica la presencia de dos estratos con su respectiva resistividad.

Para el SEV1 en la figura 46 se observa la curva de resistividades y valores “ρ” de resistividad de cada estrato, su espesor “d” y su profundidad tope

“h”. El primer estrato tiene un espesor de 0,50 m y una resistividad de 378 Ω .m que según la tabla 7 representaría una arena.

El segundo estrato de 676 Ω .m y espesor de 3,75 m a más representa también una arena. El espesor del segundo estrato se considera infinito; sin embargo, debido a que en la superficie la separación entre electrodo de corriente y potencial (distancia a) es igual a 8 m, entonces según el método Wenner los resultados son válidos hasta una profundidad de investigación z de 4, 15 m ($z = a * 0.519$). De esta manera a partir de los valores de resistividad se determinó el perfil de suelos de cada punto de sondeo.

La norma E.050 indica la profundidad de desplante para cimentaciones de edificaciones mayor a 0,80m, se está recomendando una profundidad de desplante promedio igual a 2,90 m medido desde el nivel de terreno natural para todos los puntos de investigación.

Los resultados del laboratorio de mecánica de suelos “SECATP” fueron los siguientes:

Para la **calicata C-1** el primer estrato está constituido por suelo tipo limo, clasificado según SUCS como ML y según AASHTO como A-5(9), con un espesor de 1.00 m entre 0.20m a 1.20m, y el segundo estrato está constituido por suelo tipo limo, clasificado según SUCS como ML y según AASHTO como A-4(6), con un espesor de 1.80 m entre 1.20m a 3.00m.

Para la **calicata C-2** el primer estrato está constituido por suelo tipo limo, clasificado según SUCS como ML y según AASHTO como A-5(9), con un espesor de 1.20 m entre 0.20m a 1.40m, y el segundo estrato está constituido por suelo tipo limo, clasificado según SUCS como ML y según AASHTO como A-4(3), con un espesor de 1.60 m entre 1.40m a 3.00m.

Para la **calicata C-3** el primer estrato está constituido por suelo tipo limo, clasificado según SUCS como ML y según AASHTO como A-5(10), con un espesor de 1.00 m entre 0.20m a 1.20m, y el segundo estrato está constituido por suelo tipo limo, clasificado según SUCS como ML y según AASHTO como A-4(5), con un espesor de 1.80 m entre 1.20m a 3.00m.

Se cotejaron los resultados del perfil de suelos de cada calicata, las resistividades y valores de “d” y “h” de los modelos de suelo del corte geoeléctricos y se obtuvo una correlación estratigráfica y de clasificación de suelos de ambos métodos para todos los puntos en investigación. En cuanto al espesor en comparación con el perfil estratigráfico se obtuvo un margen de error mínimo para cada punto de exploración, siendo el margen de variación promedio del 4%; y en cuanto a los tipos de suelos, clasificados tanto según SUCS como AASHTO, cumplen y se ajustan al suelo tipo arena.

A la luz de los resultados de clasificación de suelos, perfil estratigráfico, y localización de profundidad de desplante entre el método de resistividad eléctrica (geoeléctrico) y el método convencional (Mecánica de Suelos), podemos afirmar decir que existe una asociación del tipo correlacional entre ambos métodos; siendo el margen de error menor o igual al 4%.

El costo directo promedio de mercado, es de 2500 Soles por calicata, a todo costo, que incluye (movilización, y desmovilización, excavación de calicata, perfilado, análisis granulométrico por tamizado, contenido de humedad natural y otros). Por su parte el estudio caracterización de suelos mediante la resistividad eléctrica, conocido también como estudio geoeléctrico del suelo, es de 475 Soles por punto de sondeo; entonces, para este caso, resulta cinco veces más costoso efectuar un sondeo aplicando los métodos convencionales de la Mecánica de Suelos. En cuanto al tiempo, en campo no hay diferencia significativa, pero si en gabinete, donde el estudio por resistividad eléctrica representa la décima parte del convencional de clasificación de la Mecánica de Suelos, quedando confirmada positivamente la hipótesis 3.

4.2. Discusión de resultados

El modelo resultante de la prospección de suelos deducido a partir de las mediciones de resistividad eléctrica aplicando el Método de Wenner y vía procesamiento de nomogramas, corresponde a dos capas, coincidiendo

con los hallazgos de SECATP Consultoría y Capacitación. En ambos casos, en las tres calicatas, los resultados a los que se arribó coinciden tanto en espesor de estrato como en las características físicas de los suelos de cada capa. Asimismo, el segundo estrato si bien se considera de espesor infinito, tomando en cuenta que la separación “a” entre electrodo de corriente y electrodo de potencial es igual a 8 m, los resultados son válidos hasta una profundidad de investigación z de 4.15 m ($z = a*0.519$).

Según las lecturas de resistividad para la capa superior (primer estrato) de las calicata 01, 02 y 03 estuvieron comprendidas entre 20.43 y 40.18, lo cual corresponde a suelos limosos de muy baja plasticidad, clasificados según SUCS como (ML) y según AASHTO como A-5 (9) y A-5(10). Sin embargo, en la investigación de Quispilaya y Cruz (2018), los valores de resistividad obtenidos, fueron procesados y analizados con el programa IPI2WIN, para el SEV1 resultó un modelo de tres estratos; siendo su primer estrato de un espesor de 1.56m y una resistividad de 378 Ω .m que según la tabla 7 representaría una arena; y, el segundo estrato de 5,2 Ω .m y espesor de 3,75 m representa una arcilla; finalmente el tercer estrato, de espesor considerado infinito, con 676 Ω .m representa una arena y también por la distancia “a” de 8m, los resultados son válidos hasta una profundidad de investigación z de 4.15 m ($z = a*0.519$).

Nuestro estudio recomienda cimentar a partir de 1.70m medido desde el terreno natural; por su parte SECATP Consultoría y Capacitación, recomienda una profundidad de desplante de 1.50m a partir del nivel del terreno natural.

El costo directo promedio de mercado, por cada calicata, en estudio de suelos a la fecha de la presente investigación es de S/ 2500 Soles (Movilización y desmovilización, excavación de calicata, perfilado, análisis granulométrico por tamizado, contenido de humedad natural y otros para clasificación de suelos) por cada calicata. Por su parte el estudio geoelectrico a partir de los valores de resistividad del suelo, después del análisis de costos unitarios realizado es de S/475 soles por punto de

sondeo, lo que representa una relación de 5:1 y en tiempo de 10:1. Sin embargo, para Baca y Wong (2022), resulta que los costos y tiempos del Método de Wenner de resistividad eléctrica son menores que los empleados para su determinación por el Método convencional de la Mecánica de Suelos, en una relación de 2:1 y de 8:1; sin embargo, en la investigación de Quispilaya y Cruz (2018) la relación de costos y tiempos en ambos métodos resultó en una relación de 7:1 y de 2:1: Es decir, para todos los investigadores el método convencional de la Mecánica de Suelos es más caro y requiere más tiempo que el método indirecto del Método de Wenner.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

1. Las mediciones de resistividad eléctrica en las inmediaciones del emplazamiento de los elementos de cimentación del Centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, utilizando el Método de Wenner, permitió determinar las características de los estratos y las propiedades físicas de los suelo de cada estrato, verificándose la existencia de correlación entre el corte geoelectrico y el perfil estratigráfico y las características físicas del suelo determinados a través del método convencional de la Mecánica de Suelos; con lo cual la hipótesis general de la investigación ha quedado contrastada afirmativamente. Concluyéndose que el método Wenner de resistividad eléctrica es un método eficaz para obtener el perfil estratigráfico del suelo; evitándose las prospecciones a cielo abierto o calicatas, para determinar el nivel y capa de suelo competente para la cimentación superficial de edificaciones.
2. Los resultados en el terreno de emplazamiento del Centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto obtenidos para el perfil estratigráfico del suelo, a través de los estudios de prospección de calicatas por el método convencional de la Mecánica de Suelos, son idénticos en espesor de capa, y características físicas de los suelos, al existir una variación de 5% en el espesor de los estratos e idénticos resultados en las características físicas del suelo.
3. El modelo matemático que define el tipo de relación existente entre los valores de resistividad eléctrica medidos utilizando el Método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico del terreno obtenidas a través de ensayos convencionales de la Mecánica de suelos en la cimentación del

local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, corresponde a una **asociación**, y dado el nivel de similitud en los resultados de ambos métodos, se concluye que **existe correlación** entre los valores de resistividad eléctrica y las características físicas de los suelos; y, entre el espesor de los estratos del corte geoelectrico y el espesor de los estratos del perfil de suelos obtenido por los métodos convencionales, quedando confirmada la hipótesis secundaria 1.

4. Los tiempos y costos empleados para la obtención de los resultados de caracterización de suelos y determinación del perfil estratigráfico utilizando los valores de resistividad eléctrica aplicando el Método de Wenner y los ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos, en la cimentación del local del centro de desarrollo cultural de la comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, difieren para cada caso a favor del método indirecto de resistividad, en una relación de 5:1 y 10:1, respectivamente, resultando ser más eficiente el método indirecto, quedando confirmada la hipótesis específica 2.

5.2. Recomendaciones

A la luz de los resultados se recomienda:

- Para casos de prospección de suelos donde se conozca la presencia de mayor número de estratos, se debe realizar los sondeos eléctricos separando electrodos en superficie a mayor longitud para conseguir estudiar mayor profundidad de estrato en el estudio, pero no excederse de 12,50m de profundidad, longitud hasta la cual está garantizada la precisión de las medidas de resistividad según las restricciones técnicas establecidas del método de Wenner.

- Aplicar el método Wenner de resistividad eléctrica para estudios de prospección de suelos y cuando se requiera resultados inmediatos de sus características para formulación de proyectos de inversión pública o para elaboración de Términos de Referencia (TDR), de estudios definitivos de ingeniería referentes a cimentaciones de infraestructura.
- Proseguir con las investigaciones en esta línea y difundir en las instituciones públicas y privadas, la medición de resistividad eléctrica como alternativa a emplearse para la prospección de suelos por los ingenieros civiles; y, efectuar estudios en diversos lugares hasta lograr correlacionar los tipos de suelos establecidos según SUCS y AASHTO y sus características físicas con los valores de resistividad eléctrica, considerando los efectos de la humedad y el pH.

6. Referencias bibliográficas

1. Alexander, C., & Sadiku, M. (2013). Fundamentos de circuitos eléctricos. Mexico D.F.: Impresiones editoriales F.T. S.A. de C.V.
2. Arias, D. (2011). Exploracion Geotécnica - Relaciones Geoeléctricas. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellin, Colombia.
3. Arpi Deleg, Fausto Rubén & Marca Chuva, Juan Fernando. 2011. Implementación de un instrumento para prospección Geoeléctrica mediante el Método Wenner - Offset. (Tesis de Grado). Universidad de Cuenca. Facultad de ingeniería. Escuela de Ingeniería eléctrica, Cuenca, Ecuador.
4. Baca Ibaran, Carlos & Wong Aspajo, Jhosept Nikita. 2022. "Resistividad eléctrica del terreno y caracterización del suelo de fundación de la Institución Educativa 60778, distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas, Perú 2022". Tesis para optar el título profesional de ingeniero Civil. Universidad Científica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil, Iquitos, Perú. 116p.
5. Cartomex. 2015. Cartomex, Soluciones geográficas para decisiones inteligentes. Recuperado el 17 de abril de 2023, de <https://www.cartomex.com/tomografia-electricaresistivahtml> .
6. Casas Ospina, F. 2010. Tierras, Soporte de la seguridad eléctrica (Quinta ed.). (S.E. Ltda., Ed.) Bogotá D.C., Colombia: ICONTEC.
7. Cárdenas, V., & Galvis, G. (2011). Manual para la interpretacion del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del Método Wenner. (Tesis de grado). Universidad Tecnológica de Pereira Facultad de Tecnologías., Pereira, Colombia.

8. Cobeñas, A. (2017). Aplicación del Método Geofísico-Prospección eléctrica activo para determinar la profundidad de acuíferos subterráneos en la localidad El Virrey-Olmos-Lambayeque. (Tesis de grado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú.
9. Cuñez Uvidia, J. A. (2015). Comportamiento de la resistividad eléctrica de los suelos ante variaciones de humedad y grado de compactación. (Tesis de Grado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
10. Das, B. (2012). Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones. México D.F.: Data color impresores S.A.
11. Delgado, M. (2008). Ingeniería de Fundaciones. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. Fierro, J., & Segarra, M. (2018). Diseño Geotécnico de la cimentación de los tanques de digestión anaeróbica para la planta de tratamiento de aguas residuales de Guangarcucho. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
12. Gonzales, L. (2010). Ingeniería Geológica. Madrid, España: Pearson Educación S.A.
13. Graneros, A., & Tito, J. (2017). Caracterización geotécnica del suelo de la APV Ayllu Rau Rau, mediante la prueba estandar de penetración (SPT) con el cono de Peck para fines de cimentación en edificaciones 2016. (Tesis de pregrado). Universidad Andina del Cusco, Cusco, Perú.
14. Herrera, N. (2018). Evaluación de la unidad Hidrogeológica Tulcan para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo. (Tesis pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
15. Huisa, C. (2017). Aplicación de los métodos de Resistividad

Multielectrodo - Georadar y su modelización 2D para caracterizar el subsuelo en la ampliación del terminal portuario general San Martín Región Ica. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.

16. Juárez, E., & Rico, A. (2012). Mecánica de Suelos. México: Limusa S.A.

17. Lavallo Oliva Carlos Alberto. 2021. Estudio comparativo de métodos de medición de la resistividad del terreno y propuesta de protocolo de medición. Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Mayo de 2021. 138 p.

18. Lakubovskii, V., & Liajov, L. (1980). Exploración Eléctrica. España: Reverté S.A.

19. Lambe, T., & Whitman, R. (2013). Mecánica de suelos. México, D.F.: Limusa S.A.

20. Moreno, G., Valencia, J., Cárdenas, C., & Villa, W. (2007). Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra. Antioquia: Universidad de Antioquia.

21. Palacios, Marco. (2015). Urbanizar las laderas para proteger los valles: Lurín, Lima. Estudiante de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Artículo. Obtenido de: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/investigaterritorios/article/view/13977>. Recuperado: 07 de mayo 2023.

22. Peck, R., Hanson, W., & Thornburn, T. (2012). Ingeniería de Cimentaciones. México D.F.: Limusa S.A.

23. Pizarro Fuentes, Luis Rodrigo. (2014). Interpretación de

mediciones de resistividad de terreno por medio de curvas patrón. Tesis de Maestría para optar el grado de Magister en Ingeniería, mención en tecnologías de información. Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Escuela de Informática, Santiago de Chile. 2014.

24. Quispe, S. (2016). Prospección Geoeléctrica de agua subterránea mediante dispositivos móviles y Arduino. (Tesis de grado). Universidad Mayor de San Andrés Facultad de ciencias puras y naturales, La Paz, Bolivia.
25. Quispilaya Marmolejo Robinson y Cruz Chumpitaz William Jason. 2018. Propuesta del método no convencional Wenner de resistividad eléctrica para caracterización de suelos en institución educativa Libertador San Martín – Recuay 2018. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad Privada del Norte. Facultad de Ingeniería. Carrera de Ingeniería Civil. 2018. 137 p.
26. Ramírez, A. (2017). Evaluación por métodos no convencionales de caracterización de suelos del distrito de Morales, provincia de San Martín - región de San Martín. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú.
27. Ramírez Castaño, J. S., & Cano Plata, E. A. (2010). Sistemas de Puesta a tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Manizales: Blanecolor Ltda.
28. Yanque, M. (2006). Diseño de redes de puesta a tierra en subestaciones de corriente alterna. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima, Perú

ANEXOS

ANEXO 1

RESISTIVIDAD DE SUELOS, MÉTODO WENNER 4 BARRAS.

Equipos: Megger Nilsson, Metrawatt o similar

Accesorios: 4 barras, 4 cables, 1 martillo o masa, 1 cinta métrica.

1. Se revisa el terreno seleccionado. No debe haber tuberías, cables ni estructuras cercanas. No debe haber torres de alta tensión en un radio de 200 metros.
2. Se instalan las barras en una línea recta, con una separación entre cada dos barras consecutivas de 1 metro. Las barras se clavan hasta que queden firmes en el terreno.
3. Se conectan los cables, en un extremo de la barra y el otro al instrumento. Cuidado con los bornes de conexión: hay uno específico para cada barra. Siempre que sea posible utilice cables de diferentes colores para evitar errores de conexión.
4. Se efectúa la medición siguiendo el procedimiento indicado en el manual respectivo.
5. Se repite el procedimiento separando las barras dos metros entre sí.
6. Se repite el procedimiento separando las barras tres metros entre sí.
7. Se repite el procedimiento separando las barras cuatro metros entre sí.
8. Se toma nota de los valores de resistencia indicados por el instrumento.
9. Se calcula la resistividad utilizando la fórmula siguiente:

$$R = 2 \cdot R_o \cdot \pi \cdot L$$

Dónde: R= resistividad en ohms-cm R_o = Resistencia en ohms
 π = constante y L = distancia entre barras en cm. Interpretación de resultados:

ANEXO 2

Características del Telurómetro o Resistímetro

MTD 20KWe - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

APLICACIÓN

Medición de resistencias de puesta a tierra (con 3 bornes), resistividad del suelo por el método de Wenner (con 4 bornes) y tensiones presentes en el terreno.

MÉTODO DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA

El telurímetro inyecta en el terreno una corriente estabilizada electrónicamente (por lo que no se requieren ajustes previos a la medición), y mide con alta precisión la tensión que se desarrolla en el terreno por la circulación de esa corriente a través de la resistencia de difusión del electrodo hincado. La lectura de R es directa en el visor.

INMUNIDAD A LAS PERTURBACIONES

La frecuencia de operación cumple con la ecuación:

$$f_g = \frac{2n+1}{2} \times f_i$$

Donde:

f_g = frecuencia de la corriente generada por el telurímetro

n = número entero.

f_i = frecuencia industrial.

El cumplimiento de esta ecuación implica que la frecuencia de operación no coincide con ninguna armónica de la frecuencia industrial, lo cual permite, mediante el empleo de filtros adecuados, eliminar el efecto de las corrientes parásitas que suelen estar presentes en los terrenos estudiados.

FUNCIONAMIENTO COMO VOLTÍMETRO

En la función voltímetro, el equipo opera como voltímetro convencional de C.A. y permite verificar la presencia y medir las tensiones generadas por las corrientes parásitas.

ESCALAS DE MEDICIÓN

Resistencias: 0-20; 0-200; 0-2.000 e 0-20k Ω

Tensión: 0-200V-

EXACTITUD

Medición de resistencias: $\pm 2\%$ del valor medido $\pm 1\%$ del fondo de escala.

Medición de tensión: $\pm 2\%$ del valor medido $\pm 1\%$ del fondo de escala.

RESOLUCIÓN DE LECTURA

0,01 Ω en la medición de resistencia.

0,1V en la medición de tensión.

POTENCIA Y CORRIENTE DE SALIDA

Opera con una potencia de salida inferior a 0,5W y con una corriente inferior a 15 mA (pico a pico).

ALIMENTACIÓN

Batería recargable interna

CARGADOR DE BATERÍA

El circuito inteligente ajusta la carga de la batería a los parámetros optimizados para garantizar la máxima vida útil. Si alimenta por fuente externa para 95-240V- (provisto con el equipo) o de una batería del automóvil de 12V.

ALARMA ACÚSTICA

Advierte al operador cuando existen anomalías en el circuito de corriente que dificultan la obtención de un resultado confiable.

TEMPERATURA DE OPERACIÓN

-10°C a 50°C

TEMPERATURA DE ALMACENAMIENTO

-25°C a 65°C

HUMEDAD

95% RH (sin condensación)

ALTURA MÁXIMA

3000m sobre el nivel del mar

PESO DEL EQUIPO

Aprox. 2,3kg

DIMENSIONES

221 x 189 x 99mm.

ACCESORIOS INCLUIDOS

- Fuente de alimentación, para la red de 95 - 240V-
- Cable de conexión para alimentar el cargador con batería externa (automóvil o similar)
- 4 Jabalinas auxiliares de acero revestido en cobre
- Conjunto de 4 cables de medición
- Extractores de jabalinas
- Bolsa para los accesorios
- Manual de operación

ANEXO 3.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: “Resistividad eléctrica del terreno con fines de cimentación del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, 2023”.

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Metodología
<p>Problema General</p> <p>¿Qué tipo de relación existe entre los valores de resistividad eléctrica obtenidos por el Método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico determinadas aplicando ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos en el terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, 2023?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Determinar el tipo de relación que existe entre los valores de resistividad eléctrica obtenidos por el Método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico determinadas aplicando ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos en el terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, 2023.</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>H: Existe relación entre los valores de resistividad eléctrica del terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico determinado aplicando ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos en dicho terreno.</p>	<p>Variable independiente X:</p> <p>Resistividad Óhmica del suelo</p>	<p>Indicadores X</p> <p>Valores de resistividad del suelo</p>	<p>Tipo de Investigación:</p> <p>Aplicativo, de tipo comparativo.</p> <p>Diseño de Investigación: No experimental</p> <p>Esquema:</p> <div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 30px; margin: 0 auto; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> M O </div> <p>Donde:</p> <p>M: Muestra</p> <p>O: Observaciones</p>
<p>Problemas específicos</p> <p>1. ¿Cuáles son los valores de resistividad eléctrica, obtenidos por el Método de Wenner en el terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto?</p> <p>2. ¿Cuáles son las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico del terreno del</p>	<p>Objetivos Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar los valores de resistividad eléctrica, utilizando el Método de Wenner en el terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto. • Determinar las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico del terreno del 	<p>Hipótesis Específicas</p> <p>H1: El tipo de relación entre los valores de resistividad eléctrica y las características físicas de los suelos determinados aplicando ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos en el terreno del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto,</p>	<p>Variable dependiente Y:</p> <p>Espesor de los estratos y Características físicas del suelo</p>	<p>Indicadores Y</p> <p>-Espesor de estratos -Clasificación del suelo de cada estrato. -Características físicas del suelo de fundación</p> <p>Valores aproximados de</p>	

<p>local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, obtenidas a través de ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos?</p> <p>3. ¿Qué relación existe entre los valores de resistividad eléctrica obtenidos por el Método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico del terreno obtenidas a través de ensayos convencionales de Mecánica de Suelos en la cimentación del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto,?</p> <p>4. ¿En qué medida resulta ventajoso el uso de mediciones de resistividad eléctrica utilizando el Método de Wenner para caracterización de suelos y determinación del perfil estratigráfico frente al método convencional de la Mecánica de Suelos?</p>	<p>local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto, utilizando ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos.</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Formular el modelo matemático que defina el tipo de relación existente entre los valores de resistividad eléctrica obtenidos por el Método el Método de Wenner y las características físicas de los suelos del perfil estratigráfico del terreno obtenidas a través de ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos en la cimentación del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto. ● Comparar en tiempos y costos la obtención de resultados de caracterización de suelos y determinación del perfil estratigráfico utilizando el Método de Wenner de resistividad eléctrica y el Método convencional de la Mecánica de Suelos. 	<p>corresponde a una asociación.</p> <p>H2: Los tiempos y costos de determinación de las características físicas del suelo y determinación del perfil estratigráfico utilizando los valores de resistividad eléctrica obtenidos aplicando el Método de Wenner son menores en 25% que los empleados para su determinación a través de ensayos convencionales de la Mecánica de Suelos, en la cimentación del local del centro de desarrollo cultural de la Comunidad de Saramurillo, distrito de Urarinas, provincia de Loreto.</p>	<p>Propiedades mecánicas del suelo de fundación</p>	<p>esfuerzos del suelo de fundación</p>	
--	---	--	---	---	--