



Universidad Científica del Perú - UCP
Registrado en el Asiento N° A00010 de la Partida N° 11000310, Personas Jurídicas de Iquitos,
Superintendencia de los Registros Públicos - SUNARP

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:

**“PROPIEDADES FÍSICAS DE SUELOS ALUVIALES MEDIANTE
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA CON RESISTIVÍMETRO, DISTRITO
DE INDIANA, PROVINCIA DE MAYNAS, DEPARTAMENTO DE
LORETO, PERÚ 2022”**

Autores: Bach. Derteano Alván, Mario Kevín

Bach. Villacorta Soto, Pool Anderson

Asesor: Ing. Caleb Ríos Vargas MSc

San Juan Bautista – Loreto – Maynas –Perú

2023

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado con cariño para mis papas e hijos gracias, pues sin ellos no lo hubiera logrado; fueron quienes han creído siempre en mí para superar cada obstáculo que se presentó durante el camino universitario, espero contar siempre con su valioso apoyo moral que la que me fortalece.

M.K.D.A.

“En primer lugar dedico este trabajo de investigación, a mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. También son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos”.

P.A.V.S.

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento es en de forma intergrada a nuestra casa universitaria , Universidad Científica del Perú con su excelente Plana Docente, por su exigencia e inculcarnos los conocimientos en sus aulas.

Así mismo, agradecemos profundamente a nuestro asesor, por su dedicación y paciencia, sin sus conocimientos y experiencia no hubiera sido posible lograr llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos, lo llevaremos grabado para siempre en la memoria en nuestro futuro profesional.

Los autores.

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

El Vicerrector de Investigación e Innovación
de la Universidad Científica del Perú - UCP

Hace constar que:

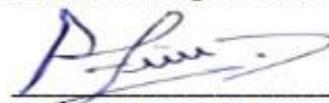
La Tesis titulada:

**"PROPIEDADES FÍSICAS DE SUELOS ALUVIALES MEDIANTE
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA CON RESISTIVÍMETRO, DISTRITO DE
INDIANA, PROVINCIA DE MAYNAS, DEPARTAMENTO DE LORETO,
PERÚ 2022"**

De los alumnos: **MARIO KEVÍN DERTEANO ALVÁN Y POOL ANDERSON
VILLACORTA SOTO**, de la Facultad de Ciencias e Ingeniería, pasó
satisfactoriamente la revisión por el Software Antiplagio, con un porcentaje de
14% de similitud.

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

San Juan, 03 de Agosto del 2023.



Dr. Álvaro Tresierra Ayala
VICERRECTOR DE INV. E INNOVACIÓN-UCP

CIRA/rf-e
249-2023

UCP_Ingenieriacivil_2023_Tesis_MarioDerteano_Poolvillacort...

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.ucp.edu.pe Fuente de Internet	10%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	revista.ismm.edu.cu Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	zonanosaturada.com Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	<1%
8	ria.utn.edu.ar Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.uach.mx Fuente de Internet	<1%

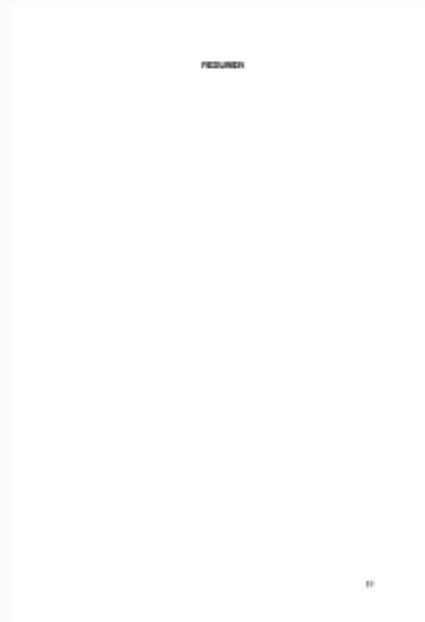


Recibo digital

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:	Mario Kevin Derteano Alván
Título del ejercicio:	Ingeniería Civil Mario Derteano y Pool Villacorta
Título de la entrega:	UCP_Ingenieriacivil_2023_Tesis_MarioDerteano_Poolvillacorta...
Nombre del archivo:	P_Ingenieriacivil_2023_Tesis_MarioDerteano_Poolvillacorta_V...
Tamaño del archivo:	1.7M
Total páginas:	142
Total de palabras:	32,659
Total de caracteres:	169,561
Fecha de entrega:	03-ago.-2023 11:21a. m. (UTC-0700)
Identificador de la entre...	2140919061



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Con Resolución Decanal N°967-2022-UCP-FCEI de fecha 18 de Octubre de 2022, 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. Ulises Octavio Irigoín Cabrera, M. Sc.
- Ing. Juan Jesús Ocaña Aponte, M. Sc.
- Ing. Keuson Saldaña Ferreyra, Mg.

Presidente
Miembro
Miembro

Como Asesor: Ing. Caleb Ríos Vargas, M. Sc.

En la ciudad de Iquitos, siendo las 20:00 horas del día Viernes 12 de Abril del 2024, 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: "PROPIEDADES FÍSICAS DE SUELOS ALUVIALES MEDIANTE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA CON RESISTIVÍMETRO, DISTRITO DE INDIANA, PROVINCIA DE MAYNAS, DEPARTAMENTO DE LORETO, PERÚ 2022".

Presentado por los Sustentantes:

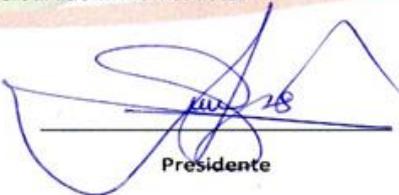
**MARIO KEVIN DERTEANO ALVAN Y
POOL ANDERSON VILLACORTA SOTO**

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

Contáctanos:

Iquitos - Perú
065 - 26 1088 / 065 - 26 2240
Av. Abelardo Quiñones Km. 2.5

Filial Tarapoto - Perú
42 - 58 5638 / 42 - 58 5640
Leoncio Prado 1070 / Martines de Compañon 933

Universidad Científica del Perú
www.ucp.edu.pe

HOJA DE APROBACIÓN

Tesis sustentada en acto publico el día Viernes 12 de Abril del 2024, a las 20:00 Horas, en las instalaciones de la UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ.



PRESIDENTE DEL JURADO

Ing. Ulises Octavio Irigoín Cabrera, M. Sc.



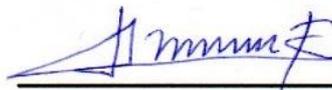
MIEMBRO DEL JURADO

Ing. Juan Jesús Ocaña Aponte, M. Sc.



MIEMBRO DEL JURADO

Ing. Keuson Saldaña Ferreyra, Mg.



ASESOR

Ing. Caleb Ríos Vargas, M. Sc.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD.....	4
ACTA DE SUSTENTACIÓN	7
HOJA DE APROBACIÓN.....	8
TABLA DE CONTENIDO	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE GRÁFICOS	12
RESUMEN.....	13
ABSTRACT	14
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	15
1.1. Antecedentes	15
1.1.1. Antecedentes de la investigación.....	15
1.2. Bases Teóricas	18
1.3. Definición de Términos Básicos	73
CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	74
2.1. Descripción del Problema	74
2.2. Formulación del Problema.....	75
2.2.1 Problema general	75
2.2.2 Problemas específicos	75
2.3. Objetivos	76
2.3.1. Objetivo general	76
2.3.2. Objetivos específicos	76
2.4. Justificación de la Investigación	76
2.5. Alcances y Limitaciones.....	77
2.6. Hipótesis de Trabajo	77
2.6.1. Hipótesis de trabajo.....	77
2.7. Variables	78
2.7.1. Identificación de variables	78
2.7.2. Operacionalización de Variables e Indicadores.....	78
2.8. MARCO TEÓRICO	80
2.8.1. Antecedentes de la investigación.....	80
2.8.2. Bases Teóricas.....	83
2.7. Definición de Términos Básicos	140
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	141
3.1. Metodología.	141

3.3.1. Tipo y Diseño de Investigación.....	141
3.3.1.1. Tipo de Investigación	141
3.3.2. Diseño de Investigación	141
3.3.3. Población y Muestra.	141
3.3.3.1. Población	141
3.3.4. Muestra.....	141
3.4. Técnicas, instrumentos y procedimiento de recolección de datos	142
3.4.1. Técnicas de recolección de datos.....	142
3.4.2. Instrumentos de Recolección de datos.....	142
3.4.3. Procedimientos de Recolección de datos.....	142
3.5. Procesamiento y análisis de datos	143
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	145
5. BIBLIOGRAFIA.....	155
ANEXOS.....	159
ANEXO N° 01. RESISTIVIDAD DE SUELOS, MÉTODO WENNER 4 BARRAS.	159
ANEXO N° 02: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TELURÍMETRO MEGABRAS DIGITAL MTD – 20KWE	160
ANEXO N° 03. MATRIZ DE CONSISTENCIA	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de resistividades en terrenos.....	19
Tabla 2. Resistividades medias en terrenos típicos	21
Tabla 3. Valores de resistividades en terrenos.....	85
Tabla 4. Resistividades medias en terrenos típicos	86
Tabla 5. Análisis Granulométrico muestra (M)-1	146
Tabla 6. Análisis granulométrico M-2.....	147
Tabla 7. Límite de Consistencia Muestra (M) -1	148
Tabla 8. Límite de Consistencia Muestra (M) -1	149
Tabla 9. Contenido de Humedad Muestra (M)-1	150
Tabla 10. Contenido de Humedad Muestra (M)-2	150
Tabla 11. Análisis de tamaño de partículas de suelo, Muestra (M)-2	151
Tabla 12. Análisis de tamaño de partículas de suelo, Muestra (M)-1	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Resistividad de un cubo de determinado terreno de 1m de arista.....	19
Figura 2. Estrato de Suelo	20
Figura 3. Representación de un suelo estratificado	22
Figura 4. Resistividad de un cubo de determinado terreno de 1m de arista.....	84
Figura 5. Estrato de Suelo	86
Figura 6. Representación de un suelo estratificado	88
Figura 7. Vista satelital del distrito de Indiana.	145

RESUMEN

El presente trabajo de investigación académica, denominado “Propiedades físicas de suelos aluviales mediante resistividad eléctrica con resistivímetro, distrito de Indiana, Provincia de Maynas, Departamento de Loreto, Perú 2022”, cumplió con su objetivo principal de determinar las propiedades de un suelo aluvial, representativo de la Amazonía Peruana.

El tipo de investigación fue descriptivo, y para la medición de realizaron pruebas a dos muestras tomadas in situ en la localidad de Indiana.

Los resultados demostraron que la resistividad del suelo aluvial es de $\rho=527.7$.

La Muestra 1, pertenece a una muestra alterada que no conserva sus características propias de origen. La Muestra 2 (M2), está compuesta por arcilla inorgánica, de color marrón, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas, de alta plasticidad, clasificada como (CH) A-7-6 (20); el límite líquido, LL = 65.64, LP = 23.99 e IP = 41.65. El porcentaje que pasa la malla N° 200 es de 88.97 % El promedio del porcentaje de Humedad del Suelo es 42.15 % La muestra M-2, tiene en su composición, 93.82% de arena.

Palabras Clave: Suelo aluvial, Telurómetro, propiedades de suelos.

ABSTRACT

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Antecedentes de la investigación

Este apartado contiene los estudios previos realizados a nuestro trabajo de investigación, los cuales, presentan resultados que evidencian la importancia del ensayo de resistividad eléctrica y su aplicación en suelos con fines de construcción.

Mediante procedimientos no destructivos adicionales, termografía y resistividad de suelos, se puede obtener un valor más confiable del método PCI convencional. A esta conclusión llegó el investigador luego de tomar 12 unidades de muestra de la totalidad de la avenida donde se aplicó el método PCI obteniendo un índice numérico que indica que el pavimento está en estado bueno. Sobre las mismas 12 unidades de muestra y tomando como base el PCI obtenido se aplica termografía y resistividad de suelos para confirmar la severidad y descubrir fallas no detectables a simple vista; con estos dos nuevos procedimientos aplicados se llegó a un índice numérico que indica que el estado del pavimento es malo (1).

En el año 2021, diversos autores realizaron investigaciones que cuantificaban las variaciones de la resistividad, el mismo que según resultados, tiene variación estacional durante el año dependiendo de la región. En este sentido mencionaban que la temperatura y humedad determinan los cambios resistivos. Así mismo, se comprobó que cuanto más superficial es el nivel freático la resistividad eléctrica del subsuelo es muy baja. Es por eso que proyecto PID MSTCACD 0008189TC, se estudió durante el año y para una geología y clima específico permitiendo las correlaciones entre resistividades y las propiedades geomecánicas del suelo (2).

Así mismo, la resistividad en suelos, también pueden ser aplicado en áreas con peligro de inundación, como el caso de la ciudad de La Rioja, en

el que se investigó utilizando herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante modelos digitales de elevación (MDE) con una resolución de 30 metros del área de estudio, a partir de la base de datos del United States Geological Survey (USGS) de los Estados Unidos, con el cual se procesaron las cuencas y redes de drenaje de la ciudad. Como resultado del análisis de estas redes de drenaje, se puede decir que la zona urbana presenta diferentes áreas con riesgo de inundación, afectando barrios, establecimientos educativos y de salud (3).

Al determinar las correlaciones entre propiedades índice y mecánicas con la resistividad eléctrica de los suelos granulares por el método de mínimos cuadrados, se estableció que los coeficientes de determinación varían desde 58 por ciento hasta 94 por ciento, indicando que existen buenas y excelentes correlaciones respectivamente entre las propiedades. Aceptando la probabilidad que los suelos pueden ser determinados mediante la aplicación del método de resistividad eléctrica o viceversa (4).

Por otro lado, el *“Estudios en la Zona No Saturada del Suelo Vol. XIV ZNS’19”*, al realizar la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), encontró que es posible observar diferencias en el estado físico del suelo laboreado en función de la tracción utilizada. Se aplicaron 3 tratamientos con un caballo y un tractor: Arado; Arado + Cultivador y Cultivador. Los resultados de la TRE permiten detectar diferencias antes y después del laboreo para ambos tipos de tracción con un aumento de la resistividad eléctrica (RE) de un 35% para la TA y de 24% para la TM a la profundidad 0,0-0,1 m, mientras que a la profundidad 0,1-0,2 m la RE se mantuvo prácticamente constante en la TA (-1%), disminuyendo un 24% en la TM (5).

En el mismo sentido, el año 2018, realizan una “Propuesta del método no convencional Wenner de resistividad eléctrica para caracterización de suelos en institución educativa libertador san martin – recuay 2018”, los resultados se obtuvieron después de realizar cortes geoelectricos predominantes en la Institución educativa Libertador San Martin y los que fueron los de tipo H de tres capas $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$. 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 (6).

Por otro lado, un investigador explica que las pruebas de resistividad eléctrica de suelos, son aplicables a aquellos que han pasado por un proceso de compactación, en relleno de terracerías y en materiales de la subestructura de pavimentos en el área de la construcción y puede ser utilizado también en el campo agrícola. En los resultados que obtenidos de los suelos ensayados, se observó que las curvas de Resistividad-Humedad que son de valores cercanos al eje de las abscisas, corresponden a suelos de granulometría uniforme (suelos mal graduados), estableciendo hipótesis para estudios futuros de la relación de la granulometría de los suelos con las curvas obtenidas en este estudio (7).

Al desarrollar modelos de resistividad eléctrica en las formaciones geológicas de mayor interés para los estudios ingeniero geológicos en la parte sur de Cuba occidental, se elaboró un procedimiento de generalización de información geoelectrica de archivo, cuyo resultado final fueron los referidos modelos geoelectricos. Se registraron 48 obras, con 895 sondeos eléctricos verticales, de ellos 317 (35,4 %) situados junto a perforaciones (paramétricos). Se definieron tres modelos para la formación Paso Real y uno para Capdevila, las más distribuidas en la región de estudio.

Los mayores valores promedio de resistividad eléctrica lo poseen las arenas cuarzosas superficiales del municipio Sandino ($1\ 241\ \Omega\cdot m$), mientras que en el horizonte inferior no exceden de $86\ \Omega\cdot m$, debido al aumento del grado de humedad y del contenido de arcilla de las rocas. Es decir, el espesor de los suelos arcillo-arenosos de cubierta son favorables en ambas formaciones geológicas, mientras que la determinación de la profundidad del nivel freático fue desfavorable (8).

1.2. Bases Teóricas

2.6.2.1. Resistividad eléctrica del terreno

La Norma Técnica RA6-014, “*Medida de resistividad eléctrica del suelo*”, habla sobre la Resistividad del Suelo, definiéndola como “*aquella que 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 (Ωm) o (Ωcm), es inversa a la conductividad*” (9, p. 6).

“La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno” (1). “[...] varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre, está determinado por: Sales solubles, composición propia del terreno, Estratigrafía, Granulometría, estado higrométrico, temperatura y compactación” (10).

“La resistividad eléctrica (ρ): 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” (9, p. 6).

La resistividad eléctrica (ρ) de un material describe la dificultad que encuentra la corriente eléctrica a su paso por el (11). Esta resistividad es variable, y se debe a una deformación lineal, siempre y cuando la deformación sea relativamente pequeña (12).

“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” (13, p.49).

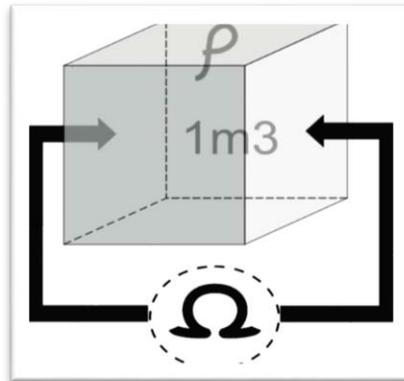


Figura 1. Resistividad de un cubo de determinado terreno de 1m de arista

Fuente: Lavalle (2021) (13).

2.6.2.2. Resistividad de terreno según material natural constituyente

Las propiedades físicas de los suelos, determinan en gran medida, la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta (14, p.2). Es de gran importancia investigar la resistividad del subsuelo cada vez que se tenga como objetivo conocer las características del mismo en donde se desea construir una estructura (6).

Tabla 1. Valores de resistividades 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) (15, p.38).

El subsuelo está compuesto por estratos que se han formado por el asentamiento paulatino de partículas de roca intemperizada o no, y a través de toda su profundidad se forman capas con características que pueden ser uniformes por sección, pero distintas entre una y otra (16)

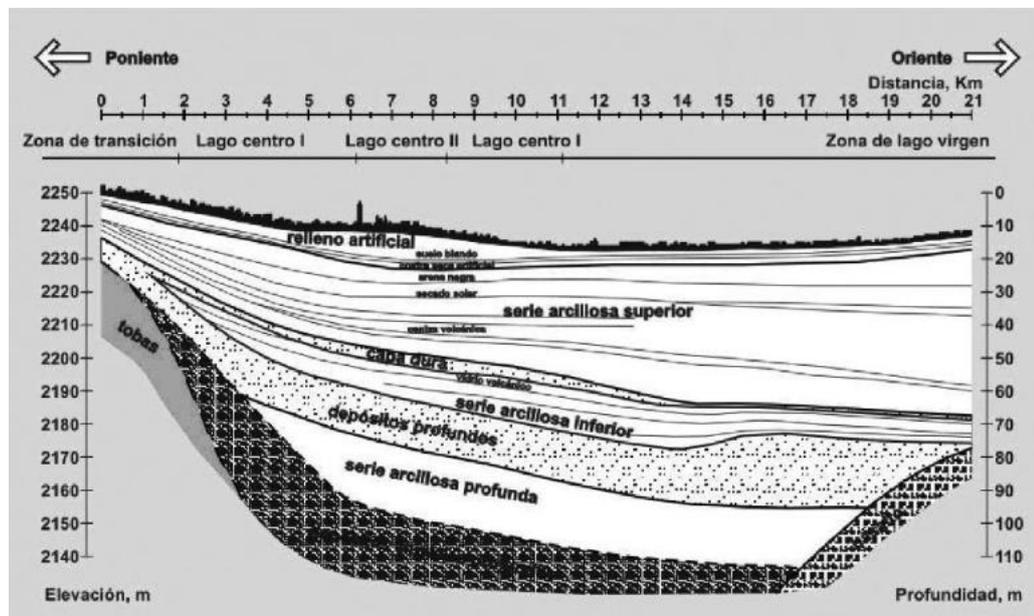


Figura 2. Estrato de Suelo

Fuente: Contreras (2012) (16, p.80)

Harper (2004). menciona que, según la naturaleza del terreno, los elementos a considerar son:

- a. Resistividad.
- b. Temperatura y Humedad: la resistividad de un terreno varía con la temperatura y el grado de humedad (17, p.169).

Por otro lado en Perú, el Código Nacional de electricidad (2006), Anexo A2 (18), indica que la resistividad del terreno varía con profundidades, el tipo y concentración de elementos químicos, humedad y temperatura. Por lo que en la Tabla A2-06, presenta valores referenciales de resistividad para tipos de terreno.

Tabla 2. 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 (18, p.658),

2.6.2.3. Resistividad aparente

Según la RA6-014, la resistividad aparente es la *“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”* (9, p. 2)

Del mismo modo, Cárdenas & Galvis (2011), la resistividad aparente ρ es el valor de resistividad obtenido de una medición en suelo heterogéneo (19), resultando la mezcla de las resistividades de diversos materiales, por lo que la resistividad real coincidiría con la resistividad aparente solo en el caso cuando el terreno es homogéneo (6).

La resistividad aparente dibujada en función de la distancia L (Schlumberger) o a (Wenner), es la base fundamental para la interpretación de resultados y la elaboración de un modelo estratificado para el suelo en estudio (20).

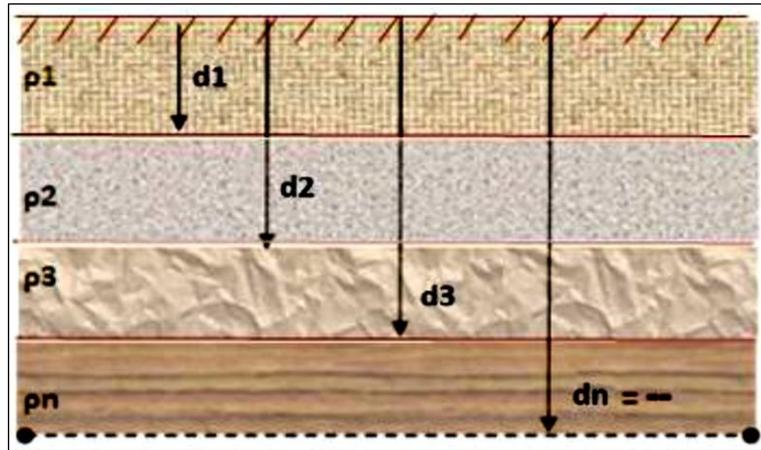


Figura 3. Representación de un suelo estratificado

Fuente: Tomado de Quispilaya y Cruz (2011) (6).

2.6.2.4. Factores que afectan la resistividad del terreno

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

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.

“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 1965, H. J. Albrecht presentó la ecuación 2.3, 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.

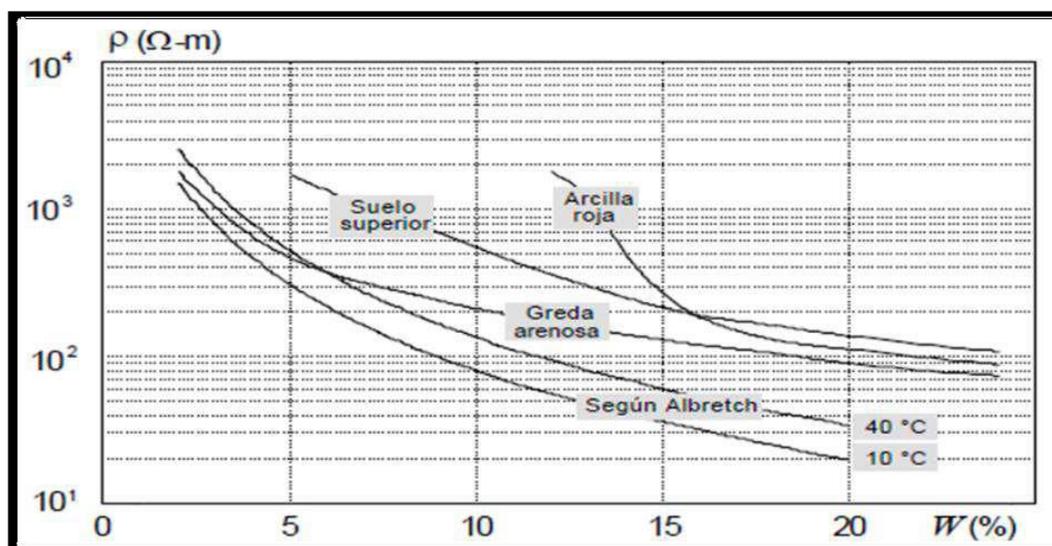


Figura 21. Variación de la resistividad en función de la humedad y dos temperaturas distintas según Albrecht.

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

A mayor humedad disminuye la resistividad y aumenta la corrosión (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 la resistividad con el aumento de la humedad. Inversamente, por debajo del 15% la resistividad aumenta dramáticamente con la disminución de la humedad. Decreciendo la humedad del 30% al 5% la resistividad aumenta alrededor de 400 veces (Loachamin Nasimba, 2019).

Temperatura

La temperatura del terreno también es un factor importante a considerar dentro del estudio de los factores que determinan 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 grosor de tales capas secas no es muy grande, alcanzan sólo entre 10 y 20 centímetros.

“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. En la figura 22, 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).

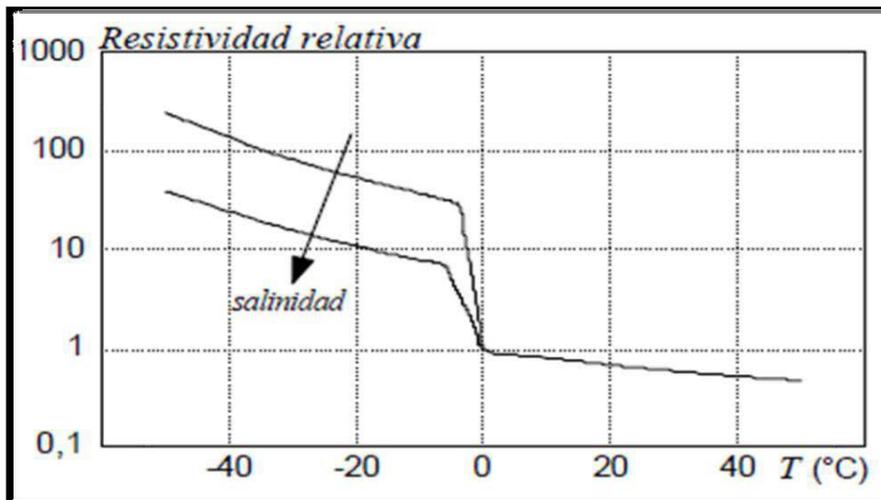


Figura 22. Resistividad relativa, según la variación de temperatura del terreno.

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.

Este es el propósito que se persigue cuando se llega con el electrodo hasta la capa freática, en este caso, la resistencia no sólo es muy baja sino que también es estable.

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), (Lavalle, 2021).

La figura 23 muestra el comportamiento de la resistividad con la compactación del terreno. Se puede observar que a medida que el grado de compactación aumenta, la resistividad disminuye” (Lavalle, 2021).

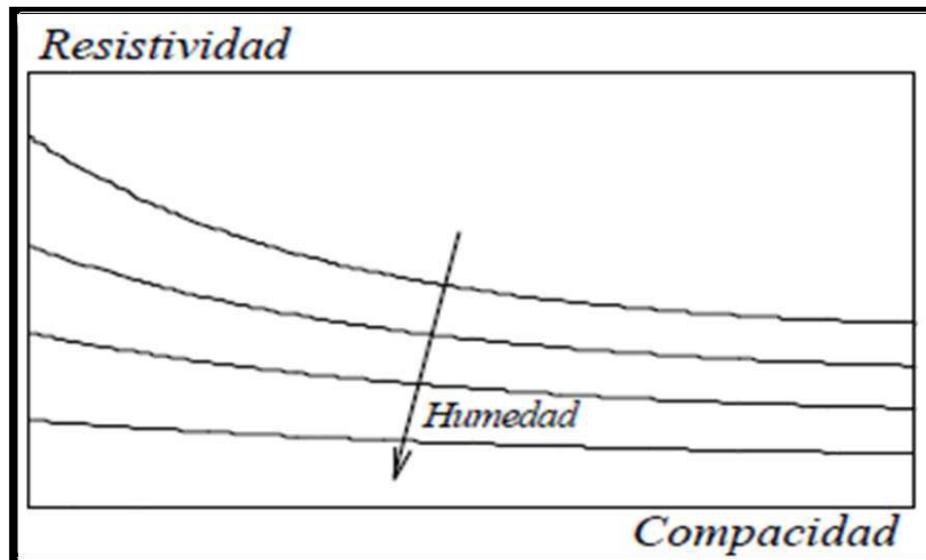


Figura 23. Variación de la resistividad con la compactación del terreno.
Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021).

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 $\Omega \cdot m$. 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 4 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”. (Lavallo, 2021)

Tabla 4. 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 Lavallo (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).

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 (Lavallo, 2021).

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” (Lavallo, 2021).

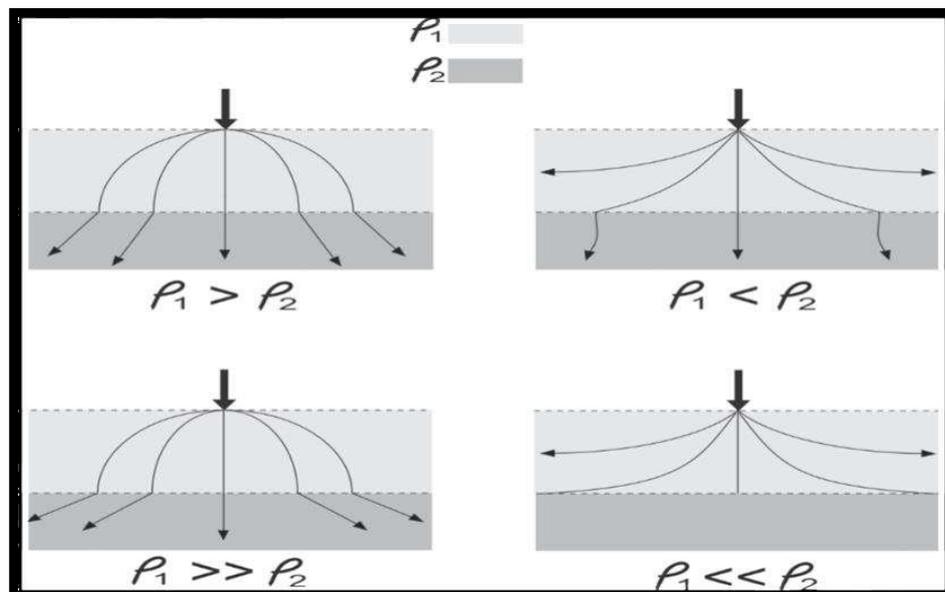


Figura 24. Influencia de la estratificación del terreno con dos capas en la resistividad.

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

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” (Lavallo, 2021).

2.6.2.5. Valores típicos de resistividad del terreno

2.6.2.5.1. Resistividad por edad

Tabla. Resistividad del suelo según su antigüedad

Edad cronológica	Resistividad del suelo ($\Omega\text{-m}$)				
	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).

2.6.2.5.2. Resistividad por los elementos de constitución del suelo

Tabla. Resistividad por constitución del suelo

Clase de terreno	Resistividad ($\Omega\text{-m}$)
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 Lavallo (2021)

Como se mencionó anteriormente, la resistividad eléctrica del suelo es una propiedad intrínseca al tipo de material y sus condiciones físicas, que puedan hacerla variar; por ello, sirve para una buena caracterización del suelo de acuerdo con los valores que se encuentren en su estudio (Lavallo, 2021).

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

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 isotropas 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.

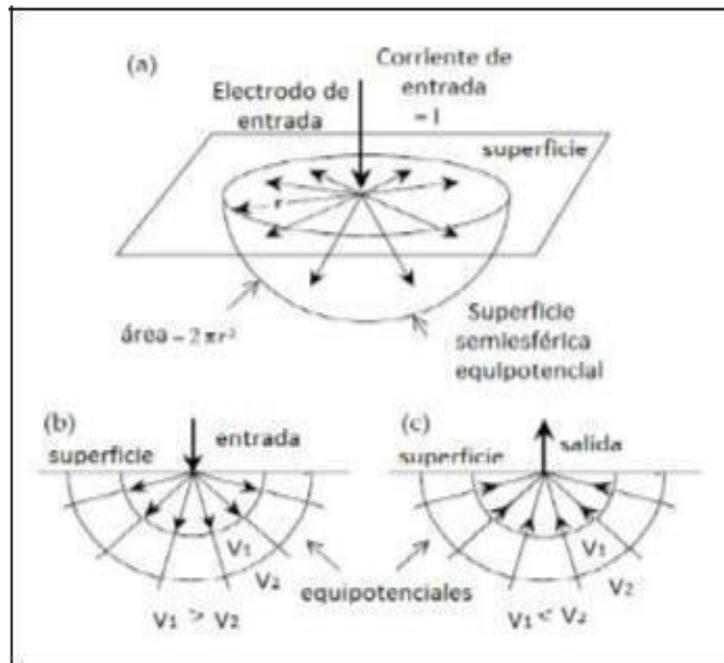


Figura 10. Líneas de campo eléctrico y superficies equipotenciales alrededor de un electrodo en un semiespacio uniforme. a) Superficie equipotencial semiesférica, b) líneas de campo radialmente hacia fuera alrededor de una fuente (entrada), c) líneas (salida).

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 N° 11.

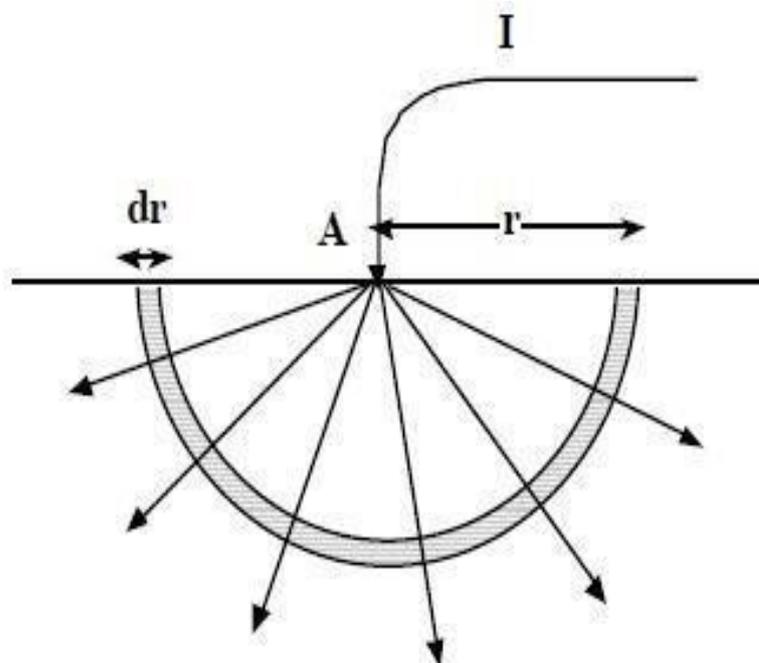


Figura 11. Ley de Ohm aplicado a la superficie de un suelo
Fuente: Quispe (2016)

2.6.2.7. Tipos de prospecciones para medición de resistividad del terreno

2.6.2.7.1. 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 (Lavallo, 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)” (Lavallo, 2021).

2.6.2.7.2. 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) (Lavallo, 2021).



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

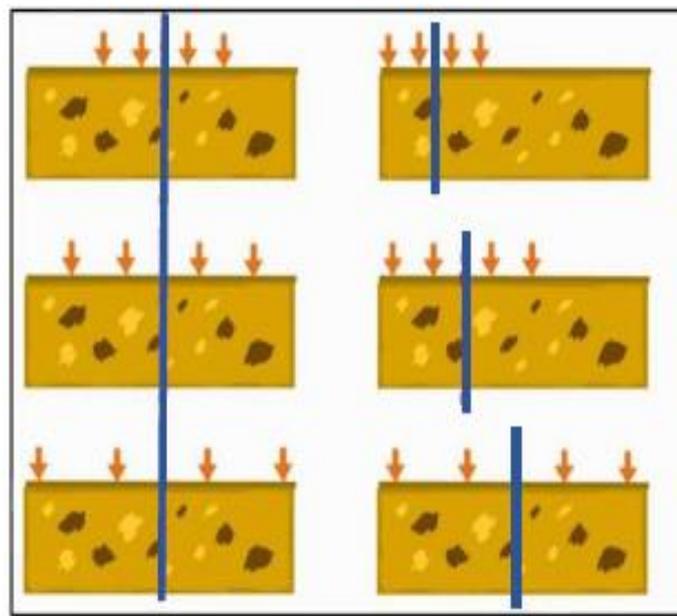


Figura . Aplicación correcta e incorrecta del método de Wenner.

Fuente: (Lavalle, 2021).

2.6.2.7.3. 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” (Lavalle, 2021).

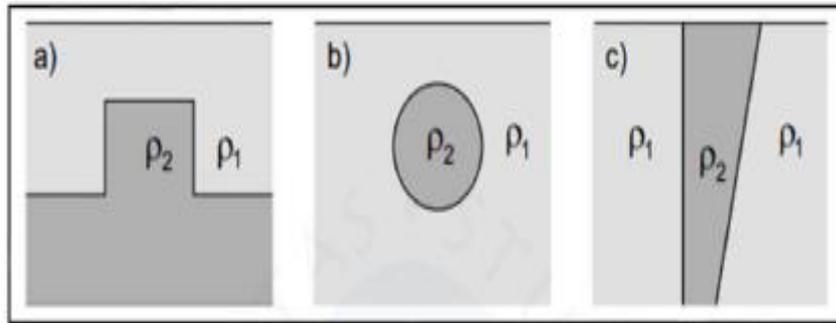


Figura 27. Variaciones laterales típicas en un terreno. a) Inclusión de un estrato en otro superior, b) acumulación de material diferente al alrededor, c) contactos de distintos materiales.

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).

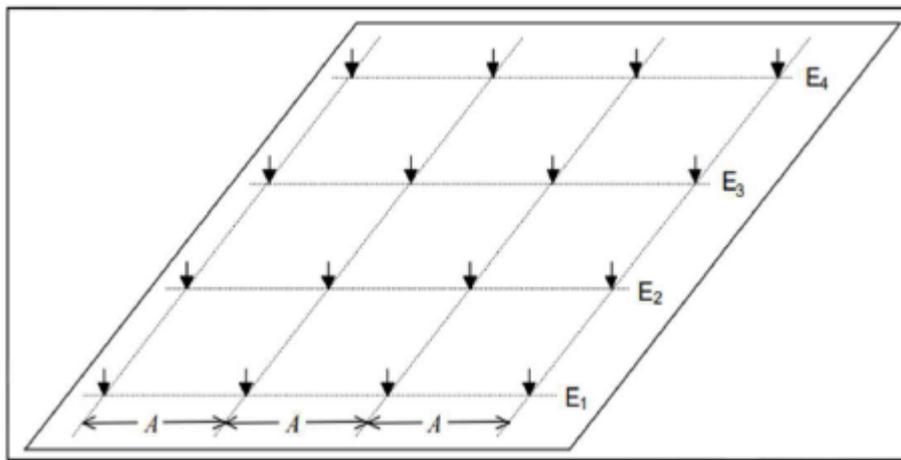


Figura 28. Calicata eléctrica usando la configuración de Wenner.
Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021)

2.6.2.7.4. 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. (Lavallo, 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).

2.6.2.7.5. 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).

2.6.2.7.6. Método de variación de la 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).

2.6.2.7.7. 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 en cuatro pequeños agujeros en la

tierra, todos a la profundidad “b” y espaciados en una línea recta a intervalos “a”. Se pasa una corriente 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. Entonces V / I da la resistencia R en ohmios. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

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” (Lavalle, 2021).

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

2.6.2.7.8. 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.

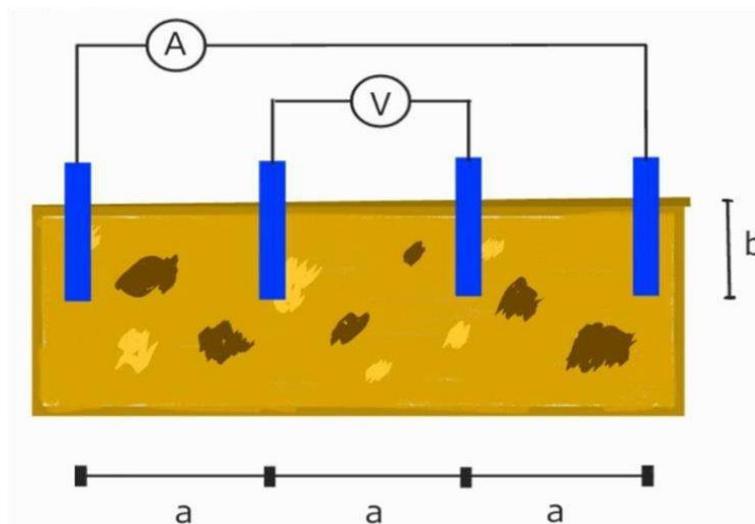


Figura 30. Configuración de Wenner.

Fuente: (Lavalle, 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:

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

Se debe recalcar que la fórmula expresada en la ecuación 2.4, 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, se puede asumir que la profundidad b=0 y la formula se convierte en:

$$\rho = 2\pi aR$$

La ecuación 2.5, 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).

2.6.2.7.9. Configuración de Schlumberger.

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.

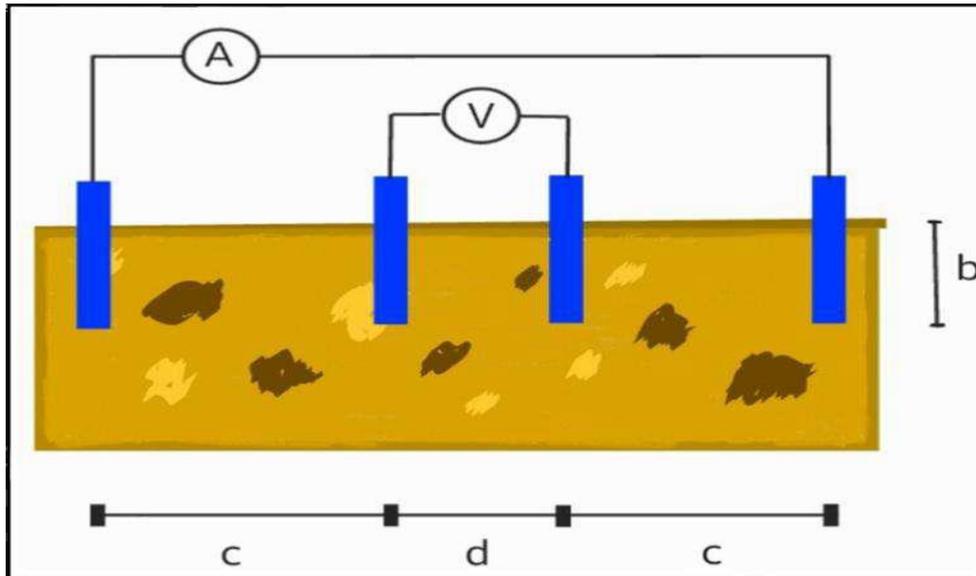


Figura 31. Configuración de Schlumberger.
Fuente: (Lavallo, 2021).

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:

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

2.6.2.8. Normativa 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).*

2.6.2.9. Suelos

Jara (2014), en su trabajo de tesis sobre “Efecto de la cal como estabilizante de una sub rasante de suelo arcilloso” haciendo referencia a Juárez y Rico (2005), manifiesta que “Es común creencia que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización; pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían "vectorialmente". En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y éste es un hecho del que se hace abundante aplicación” (Juárez y Rico, 2005).

2.6.2.9.1. 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 (Muelas s.f.).

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.).

2.6.2.10. 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”.

2.6.2.11. 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).

2.6.2.12. Propiedades físicas y clasificación de los suelos

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:

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \times 100 = \frac{\gamma_{d m\acute{a}x}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{d m\acute{i}n}}{\gamma_{d m\acute{a}x} - \gamma_{d m\acute{i}n}} \times 100$$

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

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

$\gamma_{d m\acute{i}n}$: 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 11. Denominaciones de la compacidad (Das, 2001)

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

Fuente: Das, 2001

a) Granulometría

En cualquier masa de suelo, los tamaños de las partículas varían considerablemente, 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:** $C_c = \frac{(D^2)_{30}}{D_{60} \times D_{10}}$

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

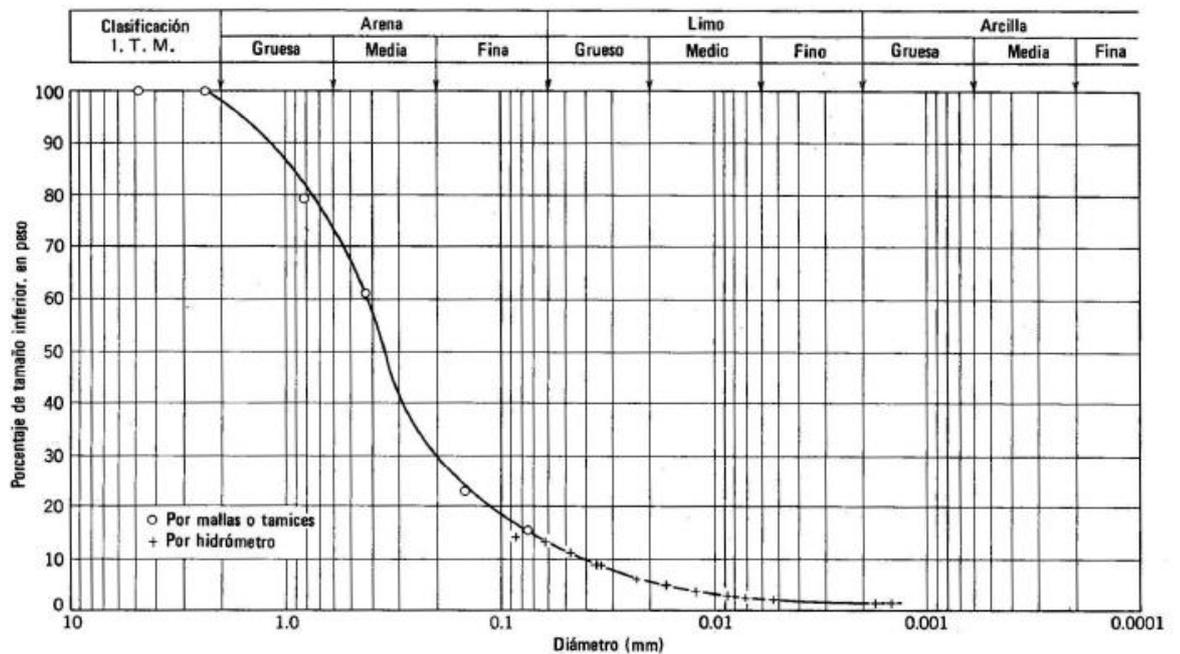
t = Tiempo transcurrido, en seg.

Con agua a 20°C, $\rho = 0.0101 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{seg})$ 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:

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

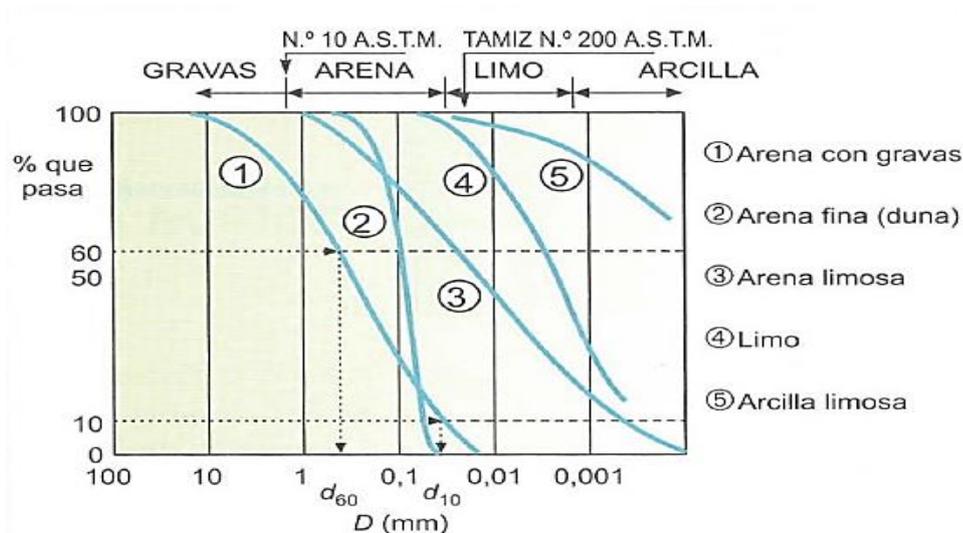
Con los dos métodos de análisis granulométrico expuestos, tanto el por tamizado, como con el hidrómetro, puede determinarse la curva granulométrica completa de una muestra de suelo (ver curvas granulométricas adjuntas).

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.



Gráfica N° 1. Curva granulométrica de un suelo (Según Lambe, 1951).

Fuente: Lambe, 1951



Gráfica N° 1. Curvas granulométricas

Fuente: Muelas s.f.

b) 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 la 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.).

e) 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 canteras. 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 12. Clasificación de los suelos en cuatro 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	Tamaños inferiores a 0,002 mm

	<p>moléculas de agua entre las cadenas, produciendo aumentos de volumen, a veces muy importantes. Por tanto, 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.).</p>	
--	---	--

Fuente: Crespo, 2007

Tabla 13. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (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; $(LL \text{ no secado en horno}) / (LL \text{ secado en horno}) < 0.75$; $LL < 50$ (véase zona OL en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI sobre o arriba de la línea A (véase zona CH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI debajo de la línea A (véase zona MH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
OH	Orgánico; $(LL \text{ no secado en horno}) / (LL \text{ secado en horno}) < 0.75$; $LL \geq 50$ (véase zona OH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
CL-ML	Inorgánico; $LL > 50$; $4 \leq PI \leq 7$; 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)

La clasificación AASHTO ASTM D 3282 – 94 se presentará en el Informe Final.

2.6.2.13. 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.

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.

2.6.2.14. 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 Amoniacal 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 4.05 se muestra los Niveles de Materia Orgánica.

Tabla 14. Niveles de Materia Orgánica

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

2.6.2.15. Clasificación de las arcillas

Los minerales cristalinos cuya actividad superficial es tal que se presenta plasticidad y cohesión, podemos denominarlos como arcillosos, existen aproximadamente 15 minerales de este tipo, pero se pueden agrupar en 3 grupos dominantes, a saber: Caolinita, Montmorilonita e Illita.

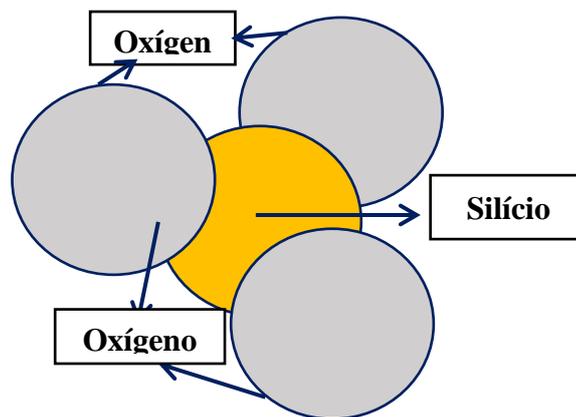
1. Caolinita

Debido a que las fuerzas de valencia en los átomos de oxígeno superiores, en la lámina de sílica, se encuentran insatisfechas, así como los espaciamientos que guardan entre si dichos oxígenos, resulta posible que la mencionada lámina se una a los de gibsita.

Se pueden unir láminas de este mismo tipo unas sobre otras para formar cristales de caolín conocidas como Caolinita, siendo las fuerzas que las unen del tipo hidrogeno y desarrolladas entre los iones oxígeno (0-2) y los iones hidroxilo (OH)-1. Esta unión es relativamente fuerte. Si se tienen diferentes estructuras en las láminas, se obtienen diferentes minerales arcillosos con la misma composición de caolín. Aunque las

láminas de sílica (fig. 2.2) y gibsita son capaces de extenderse en forma indefinida en la dirección horizontal (de los planos), se ha encontrado que las partículas de caolín que generalmente son de forma hexagonal, se presentan como partículas planas cuyos radios varían de 0.5 a 1.0 micras (Fernández, 1991).

La caolinita es un mineral eléctricamente neutro, pero bajo la presencia de agua se disocian algunos de los hidroxilos (OH)⁻¹ y pierden los iones hidrogeno (H⁺), dejando en consecuencia al cristal con una carga residual negativa que se equilibra con la atracción de algunos cationes intercambiables presentes en el agua, por ejemplo, Sodio (Na⁺) o Calcio (Ca⁺²). (Fernández, 1991).



Gráfica N° 3. La caolinita, mineral eléctricamente neutro

Fuente: Fernández, 1991

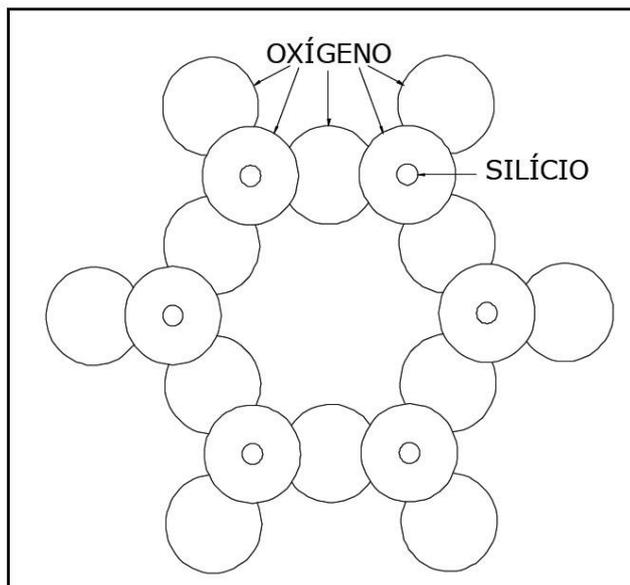
2. Montmorilonitas

En las láminas formadas por unidades tetraédricas y octaédricas frecuentemente ocurre lo que se conoce como sustitución isomorfa, que consiste en la sustitución de un átomo por otro. Si el agua contiene cationes tales como Sodio (Na⁺¹), Calcio (Ca⁺²), Potasio (K⁺¹) o similares, estos son atraídos a las unidades de tal manera que satisfacen casi totalmente a la carga negativa resultante de la solución isomorfa. El

problema es que estos cationes no quedan fijos en las láminas si no que se pueden intercambiar fácilmente.

El espesor de las láminas de la montmorilonita es del orden de 10 Angstroms ($1 \times 10^{-11}m$) y se colocan una sobre la otra como las hojas de un libro, teniéndose como liga entre las unidades a las atracciones mutuas de dos láminas hacia los cationes intercambiables anteriormente retenidos.

La unión catiónica en la montmorilonita depende del tipo de catión que se tenga presente, pero en lo general es débil, por lo que el agua puede entrar fácilmente entre las láminas de montmorilonita, ocasionando que se separen, no siendo difícil desasociar a las unidades estructurales de montmorilonita. Como resultado de lo anterior, los suelos que contengan cantidades considerables de montmorilonita presentan importantes características de expansión (Fernández, 1991).

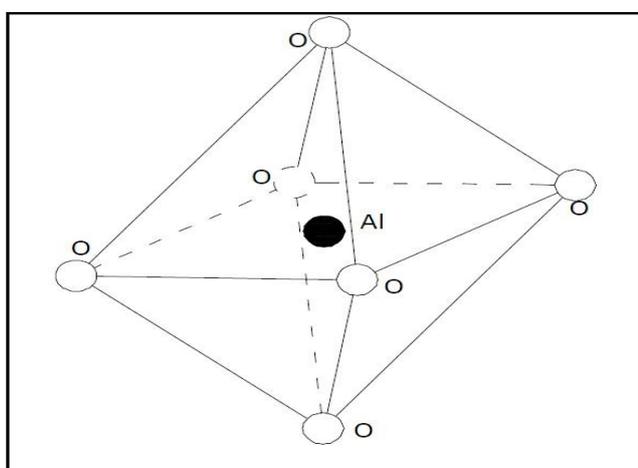


Gráfica N° 4. Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica.
Fuente: Fernández, 1991.

3. Illitas

La unidad estructural de la illita es muy semejante a la montmorilonita con la excepción de que siempre se presenta una sustitución isomorfa adicional de átomos de sílice (Si^{+4}) por átomos de aluminio (Al^{+3}) en la lámina de sílica (Fig.5), resultando con ello una carga residual negativa, más alta que la correspondiente a la de la lámina de montmorilonita. Sin embargo, una parte sustancia] de esta carga residual negativa se equilibra con cationes de potasio (K^{+1}) no intercambiables, lo que provee una liga fuerte entre las láminas de illita para constituir las partículas.

Las ligas mediante los Cationes no intercambiables (K^{+1}) son más débiles que las ligas de hidrogeno que unen a las unidades estructurales de la caolinita, pero son mucho más fuertes, que las ligas de los cationes intercambiables, que forman a los cristales de la montmorilonita. Esto se debe, en parte, al hecho de que los cationes (K^{+1}) se fijan entre las superficies de las láminas de sílica y en consecuencia se encuentran mucho más cerca del catión intercambiado que en el caso de la montmorilonita en donde el catión intercambiado queda en la lámina central. Debido a esto, la estructura de la illita no se expande por el paso del agua a través de sus láminas como ocurre en la montmorilonita (Fernández, 1991).



Gráfica N° 5. Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica
Fuente: Fernández, 1991

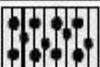
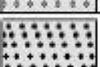
DIVISIONES MAYORES		SÍMBOLO		DESCRIPCIÓN
		SUCS	GRÁFICO	
SUELOS GRANULARES	GRAVA Y SUELOS GRAVOSOS	GW		GRAVA GRADUADA BIEN
		GP		GRAVA GRADUADA MAL
		GM		GRAVA LIMOSA
		GC		GRAVA ARCILLOSA
	ARENA Y SUELOS ARENOSOS	SW		ARENA GRADUADA BIEN
		SP		ARENA GRADUADA MAL
		SM		ARENA LIMOSA
		SC		ARENA ARCILLOSA
SUELOS FINOS	LIMOS Y ARCILLAS (LL < 50)	ML		LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
		CL		ARCILLA INORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD
		OL		LIMO ORGÁNICO O ARCILLA ORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD
	LIMOS Y ARCILLAS (LL > 50)	MH		LIMO INORGÁNICO DE ALTA PLASTICIDAD
		CH		ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD
		OH		LIMO ORGÁNICO O ARCILLA ORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD

Figura 3. Simbología de Suelos
Fuente: Norma E.050

2.6.2.16. 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 4. Tipo de edificación para investigación de suelos

Tipo de edificación					
Clase de estructura	Distancia mayor entre apoyos	Número de pisos (Incluido sótanos)			
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 5. 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

2.6.2.17. Criterios para calificar 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).

2.6.2.18. 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)

2.6.2.19. 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).

2.6.2.20. 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).

2.6.2.21. 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 6. 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)

2.6.2.22. 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 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. (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).

2.6.2.23. 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).

2.6.2.24. Profundidad de Cimentaciones

La profundidad de cimentación “Df” debe estar ubicada 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

Edificación con sótano

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).

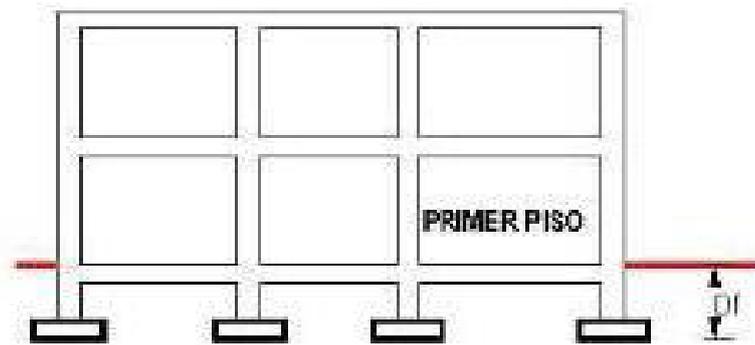


Figura 6. Profundidad de desplante.

Fuente: Norma E.050

2.6.2.25. 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 2. Relación de resistividad con características del suelo

Aumento de	Resistividad
Porosidad	Aumenta
Salinidad	Baja
Humedad	Baja
Temperatura	Baja

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).

CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción del Problema

En este trabajo enfocamos la problemática general que se da en los proyectos de construcción, para realizar estudios que nos permitan conocer las condiciones de los suelos en los que se desarrollará la ejecución física de un proyecto.

El enfoque se realiza tras la dificultad que se presenta en la región Loreto, para realizar los diferentes ensayos y desarrollar el trabajo de campo, debido a las condiciones geográficas. En este sentido, con el fin de minimizar tiempo, reducir costos y evitar métodos tradicionales que incluyen el traslado de equipos y maquinaria de mayor tamaño, se pretende realizar estudios de propiedades de suelos, mediante resistividad eléctrica con resistivímetro.

La muestra seleccionada son suelos aluviales ubicados en el distrito de Indiana, provincia de Maynas, región Loreto. Bajo el método de Wenner o método de los cuatro puntos, con resistivímetro.

“El suelo es un material no consolidado que está en constante cambio” (21), su composición y propiedades dependen de factores diversos que merecen ser estudiados para un determinado fin.

Por otro lado, en el ámbito de la construcción, este origina “cantidad de investigaciones geotécnicas” (22). Resaltando la importancia de los suelos en la ingeniería civil, y la necesidad de conocer su composición, toda vez que estos son la base fundamental para un proyecto de construcción.

En este sentido, en Loreto, departamento donde se desarrolló la investigación, los suelos son “Arcillitas del Terciario”, y “material aluvial antiguo” como lo mencionan en los “Estudios detallado de suelos de la zona “Fernando Loes” – Tamshiyacu (Region Loreto)”, por Escobedo et.al

(1994), y donde además la primera originó geoformas de Colinas bajas y lomadas, y la segunda hizo la predominancia de suelos originados a partir de materiales aluviales antiguos gruesos (areniscas), "...que han dado el origen a suelos profundos de textura gruesas, con acidez extrema, y con un contenido alto de aluminio en su composición; de fertilidad baja y de alta susceptibilidad a la erosión pluvial [...]"(23).

Estos suelos fueron agrupados, según consta en el "y Evaluación de Suelos en la Región De Loreto" por Rodríguez et.al (1994), en Suelos Aluviales Recientes, Suelos Aluviales Subrecientes, Suelos de Materiales Residuales (24).

2.2. Formulación del Problema.

2.2.1 Problema general

¿Cuáles son las propiedades físicas de suelos aluviales, mediante resistividad eléctrica con resistivímetro, distrito de Indiana, provincia de Maynas, departamento de Loreto, Perú 2022?

2.2.2 Problemas específicos

1. ¿Cómo es la composición estratigráfica de suelos aluviales, distrito de Indiana, provincia de Maynas, departamento de Loreto, Perú 2022?
2. ¿Cuáles son las condiciones que determinan la capacidad de resistividad eléctrica de suelos aluviales, distrito de Indiana, provincia de Maynas, departamento de Loreto, Perú 2022?
3. ¿Cuál es la capacidad de carga de suelos aluviales, distrito de Indiana, provincia de Maynas, departamento de Loreto, Perú 2022?

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo general

Determinar las propiedades físicas de suelos aluviales, mediante resistividad eléctrica con resistivímetro, distrito de Indiana, provincia de Maynas, departamento de Loreto, Perú 2022.

2.3.2. Objetivos específicos

1. Obtener la composición estratigráfica de suelos aluviales, distrito de Indiana, provincia de Maynas, departamento de Loreto, Perú 2022.
2. Conocer las condiciones que determinan la capacidad de resistividad eléctrica de suelos aluviales, distrito de Indiana, provincia de Maynas, departamento de Loreto, Perú 2022.
3. Obtener la capacidad de carga de suelos aluviales, distrito de Indiana, provincia de Maynas, departamento de Loreto, Perú 2022.

2.4. Justificación de la Investigación

La presente investigación se justifica por las siguientes razones:

- Teórica:

El proyecto de investigación se justifica teóricamente porque propone conocer las propiedades físicas del suelo mediante la resistividad eléctrica con resistivímetro.

- Práctica:

La justificación práctica adquiere su valor, toda vez que, el método aplicado para lograr los objetivos del proyecto, se realizará

minimizando tiempo y costo en conocer las propiedades de suelos aluviales en el área de estudio.

2.5. Alcances y Limitaciones

- Esta investigación se enfoca estrictamente en los suelos aluviales. Limitando su aplicación en otros que no cumplan estas condiciones.
- No se incluye en el proyecto la formulación de una propuesta de protocolo de medición de resistividad; tampoco se presentará la discusión para selección del método de medición de resistividad más óptimo para investigaciones similares.
- Los estudios de la resistividad para el caso de la muestra, constituida por terrenos aluviales, no están referidos exclusivamente al campo eléctrico; si no, que está relacionado con otros factores que pretendemos descubrir. Por este motivo, la resistividad aporta una gran información a los científicos de diversas ramas y su cuantificación es esencial (13).

2.6. Hipótesis de Trabajo

2.6.1. Hipótesis de trabajo

H₀: Las propiedades físicas de suelos aluviales tienen alto valor de resistividad eléctrica según mediciones con el resistivímetro.

Para la prueba estadística de la Hipótesis se plantea:

- **Hipótesis Alternativa (H₁):** La resistividad de suelos aluviales varía según su profundidad.

2.7. Variables

2.7.1. Identificación de variables

- **Variable independiente:** X_1 : Propiedades Físicas de suelos aluviales.
- **Variable dependiente:** Y_1 : Resistividad Eléctrica de los suelos aluviales.

2.7.2. Operacionalización de Variables e Indicadores

Definición:

Variable	Descripción
X_1 : Propiedades físicas de suelos aluviales.	Características de un 1m ³ de suelo aluvial de reciente deposición, con manto freático cerca de la superficie, extraído de Indiana.
Y_1 : Resistividad Eléctrica de los suelos aluviales.	Resistencia específica de 1m ³ de suelo, a cierta profundidad. Procesado en un grupo de medidas tomadas en campo. Para su medición se asume que dicho suelo es un conductor semi infinito que limita con el aire. Su unidad en el sistema MKS es el $\Omega.m$.

Operacionalización de Variables

Variables	Indicadores genéricos	Indicadores	Índices	Instrumentos
Variable independiente X: Propiedades Físicas	Espesor de estratos Minerales constituyentes del material de cada estrato de suelo Caracterización física del suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de suelo • Contenido de humedad • Temperatura • Compactación • Profundidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Granular/fino (específica según valores y clasificación) • % • °C • % • m 	Instrumento de toma de datos.
Variable dependiente Y: Resistividad Eléctrica	Valores de resistividad	<ul style="list-style-type: none"> • Resistividad eléctrica • Capacidad de carga 	<ul style="list-style-type: none"> • $\rho(\Omega.m)$ • Kg/cm² 	Instrumento de toma de datos. Valores de resistividad del terreno. Diagnóstico. Informe de evaluación

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

2.8. MARCO TEÓRICO

2.8.1. Antecedentes de la investigación

Este apartado contiene los estudios previos realizados a nuestro trabajo de investigación, los cuales, presentan resultados que evidencian la importancia del ensayo de resistividad eléctrica y su aplicación en suelos con fines de construcción.

Mediante procedimientos no destructivos adicionales, termografía y resistividad de suelos, se puede obtener un valor más confiable del método PCI convencional. A esta conclusión llegó el investigador luego de tomar 12 unidades de muestra de la totalidad de la avenida donde se aplicó el método PCI obteniendo un índice numérico que indica que el pavimento está en estado bueno. Sobre las mismas 12 unidades de muestra y tomando como base el PCI obtenido se aplica termografía y resistividad de suelos para confirmar la severidad y descubrir fallas no detectables a simple vista; con estos dos nuevos procedimientos aplicados se llegó a un índice numérico que indica que el estado del pavimento es malo (1).

En el año 2021, diversos autores realizaron investigaciones que cuantificaban las variaciones de la resistividad, el mismo que según resultados, tiene variación estacional durante el año dependiendo de la región. En este sentido mencionaban que la temperatura y humedad determinan los cambios resistivos. Así mismo, se comprobó que cuanto más superficial es el nivel freático la resistividad eléctrica del subsuelo es muy baja. Es por eso que proyecto PID MSTCACD 0008189TC, se estudió durante el año y para una geología y clima específico permitiendo las correlaciones entre resistividades y las propiedades geomecánicas del suelo (2).

Así mismo, la resistividad en suelos, también pueden ser aplicado en áreas con peligro de inundación, como el caso de la ciudad de La Rioja, en el que se investigó utilizando herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante modelos digitales de elevación (MDE) con una resolución de 30 metros del área de estudio, a partir de la base de datos del United States Geological Survey (USGS) de los Estados Unidos, con el cual se procesaron las cuencas y redes de drenaje de la ciudad. Como resultado del análisis de estas redes de drenaje, se puede decir que la zona urbana presenta diferentes áreas con riesgo de inundación, afectando barrios, establecimientos educativos y de salud (3).

Al determinar las correlaciones entre propiedades índice y mecánicas con la resistividad eléctrica de los suelos granulares por el método de mínimos cuadrados, se estableció que los coeficientes de determinación varían desde 58 por ciento hasta 94 por ciento, indicando que existen buenas y excelentes correlaciones respectivamente entre las propiedades. Aceptando la probabilidad que los suelos pueden ser determinados mediante la aplicación del método de resistividad eléctrica o viceversa (4).

Por otro lado, el “*Estudios en la Zona No Saturada del Suelo Vol. XIV ZNS’19*”, al realizar la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), encontró que es posible observar diferencias en el estado físico del suelo laboreado en función de la tracción utilizada. Se aplicaron 3 tratamientos con un caballo y un tractor: Arado; Arado + Cultivador y Cultivador. Los resultados de la TRE permiten detectar diferencias antes y después del laboreo para ambos tipos de tracción con un aumento de la resistividad eléctrica (RE) de un 35% para la TA y de 24% para la TM a la profundidad 0,0-0,1 m, mientras que a la profundidad 0,1-0,2 m la RE se mantuvo prácticamente constante en la TA (-1%), disminuyendo un 24% en la TM (5).

En el mismo sentido, el año 2018, realizan una “Propuesta del método no convencional Wenner de resistividad eléctrica para caracterización de suelos en institución educativa libertador san martin – recuay 2018”, los resultados se obtuvieron después de realizar cortes geoelectricos

predominantes en la Institución educativa Libertador San Martín y los que fueron los de tipo H de tres capas $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$. 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 (6).

Por otro lado, un investigador explica que las pruebas de resistividad eléctrica de suelos, son aplicables a aquellos que han pasado por un proceso de compactación, en relleno de terracerías y en materiales de la subestructura de pavimentos en el área de la construcción y puede ser utilizado también en el campo agrícola. En los resultados que obtenidos de los suelos ensayados, se observó que las curvas de Resistividad-Humedad que son de valores cercanos al eje de las abscisas, corresponden a suelos de granulometría uniforme (suelos mal graduados), estableciendo hipótesis para estudios futuros de la relación de la granulometría de los suelos con las curvas obtenidas en este estudio (7).

Al desarrollar modelos de resistividad eléctrica en las formaciones geológicas de mayor interés para los estudios ingeniero geológicos en la parte sur de Cuba occidental, se elaboró un procedimiento de generalización de información geoeléctrica de archivo, cuyo resultado final fueron los referidos modelos geoeléctricos. Se registraron 48 obras, con 895 sondeos eléctricos verticales, de ellos 317 (35,4 %) situados junto a perforaciones (paramétricos). Se definieron tres modelos para la formación Paso Real y uno para Capdevila, las más distribuidas en la región de estudio.

Los mayores valores promedio de resistividad eléctrica lo poseen las arenas cuarzosas superficiales del municipio Sandino ($1\ 241\ \Omega \cdot m$), mientras que en el horizonte inferior no exceden de $86\ \Omega \cdot m$, debido al aumento del grado de humedad y del contenido de arcilla de las rocas. Es decir, el espesor de los suelos arcillo-arenosos de cubierta son favorables en ambas formaciones geológicas, mientras que la determinación de la profundidad del nivel freático fue desfavorable (8).

2.8.2. Bases Teóricas

2.6.2.26. Resistividad eléctrica del terreno

La 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 (25). 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.

“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 (Ωm) o (Ωcm), es inversa a la conductividad. La resistividad eléctrica (ρ): 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” (9, pp. 6–014).

La Norma Técnica RA6-014, *“Medida de resistividad eléctrica del suelo”*, habla sobre la Resistividad del Suelo, definiéndola como *“aquella que 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 (Ωm) o (Ωcm), es inversa a la conductividad” (9, p. 6).*

“La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno” (1). “[...] varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre,

está determinado por: Sales solubles, composición propia del terreno, Estratigrafía, Granulometría, estado higrométrico, temperatura y compactación” (10).

“La resistividad eléctrica (ρ): 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” (9, p. 6).

La resistividad eléctrica (ρ) de un material describe la dificultad que encuentra la corriente eléctrica a su paso por el (11). Esta resistividad es variable, y se debe a una deformación lineal, siempre y cuando la deformación sea relativamente pequeña (12).

“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” (13, p.49).

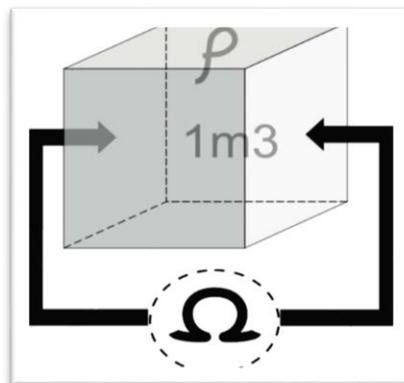


Figura 4. Resistividad de un cubo de determinado terreno de 1m de arista

Fuente: Lavalle (2021) (13).

2.6.2.27. Resistividad de terreno según material natural constituyente

Las propiedades físicas de los suelos, determinan en gran medida, la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta (14, p.2). Es de gran importancia investigar la resistividad del subsuelo cada vez que se tenga como objetivo conocer las características del mismo en donde se desea construir una estructura (6).

Tabla 3. Valores de resistividades 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) (15, p.38).

El subsuelo está compuesto por estratos que se han formado por el asentamiento paulatino de partículas de roca intemperizada o no, y a través de toda su profundidad se forman capas con características que pueden ser uniformes por sección, pero distintas entre una y otra (16)

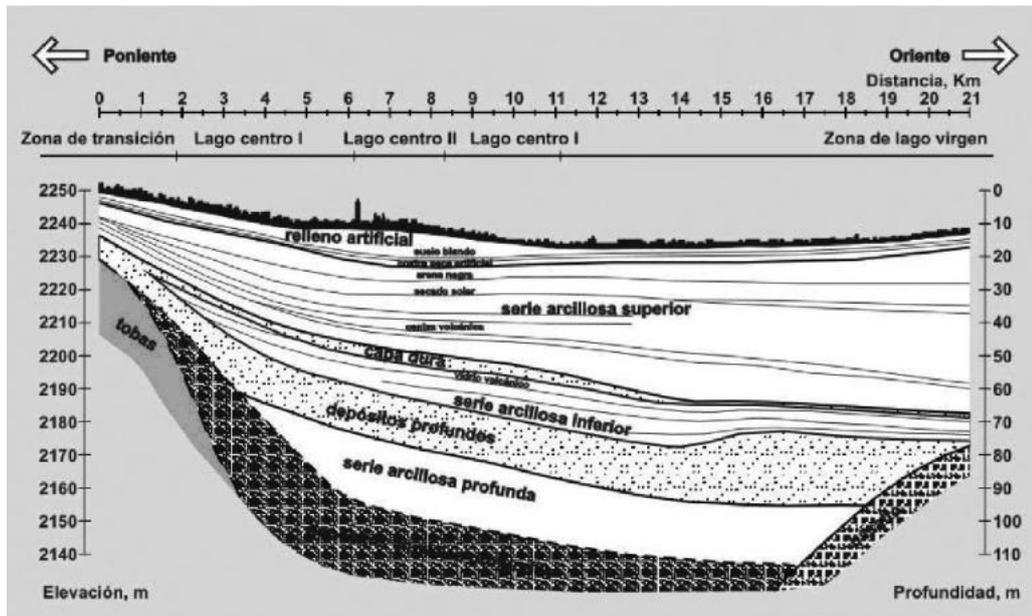


Figura 5. Estrato de Suelo

Fuente: Contreras (2012) (16, p.80)

Harper (2004). menciona que, según la naturaleza del terreno, los elementos a considerar son:

- c. Resistividad.
- d. Temperatura y Humedad: la resistividad de un terreno varía con la temperatura y el grado de humedad (17, p.169).

Por otro lado en Perú, el Código Nacional de electricidad (2006), Anexo A2 (18), indica que la resistividad del terreno varía con profundidades, el tipo y concentración de elementos químicos, humedad y temperatura. Por lo que en la Tabla A2-06, presenta valores referenciales de resistividad para tipos de terreno.

Tabla 4. Resistividades medias en terrenos típicos

Terreno	Símbolo del terreno	Resistividad media (Ω.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 (18, p.658),

2.6.2.28. Resistividad aparente

Según la RA6-014, la resistividad aparente es la *“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”* (9, p. 2)

Del mismo modo, Cárdenas & Galvis (2011), la resistividad aparente ρ es el valor de resistividad obtenido de una medición en suelo heterogéneo (19), resultando la mezcla de las resistividades de diversos materiales, por lo que la resistividad real coincidiría con la resistividad aparente solo en el caso cuando el terreno es homogéneo (6).

La resistividad aparente dibujada en función de la distancia L (Schlumberger) o a (Wenner), es la base fundamental para la interpretación de resultados y la elaboración de un modelo estratificado para el suelo en estudio (20).

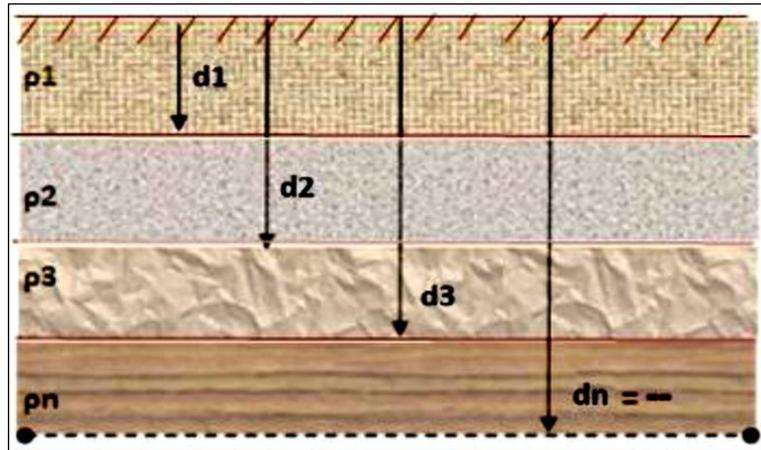


Figura 6. Representación de un suelo estratificado

Fuente: Tomado de Quispilaya y Cruz (2011) (6).

2.6.2.29. 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.

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.

“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” (Lavalle, 2021).

En 1965, H. J. Albrecht presentó la ecuación 2.3, 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. (Lavalle, 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.

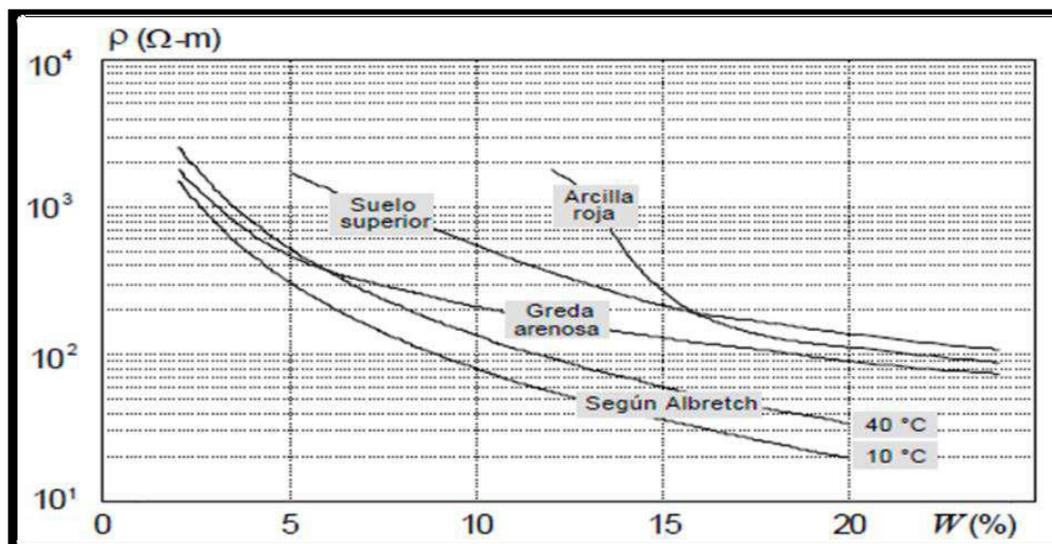


Figura 21. Variación de la resistividad en función de la humedad y dos temperaturas distintas según Albrecht.

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

A mayor humedad disminuye la resistividad y aumenta la corrosión (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 la resistividad con el aumento de la humedad. Inversamente, por debajo del 15% la resistividad aumenta dramáticamente con la disminución de la humedad. Decreciendo la humedad del 30% al 5% la resistividad aumenta alrededor de 400 veces (Loachamin Nasimba, 2019).

Temperatura

La temperatura del terreno también es un factor importante a considerar dentro del estudio de los factores que determinan 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 grosor de tales capas secas no es muy grande, alcanzan sólo entre 10 y 20 centímetros.

“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. En la figura 22, 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).

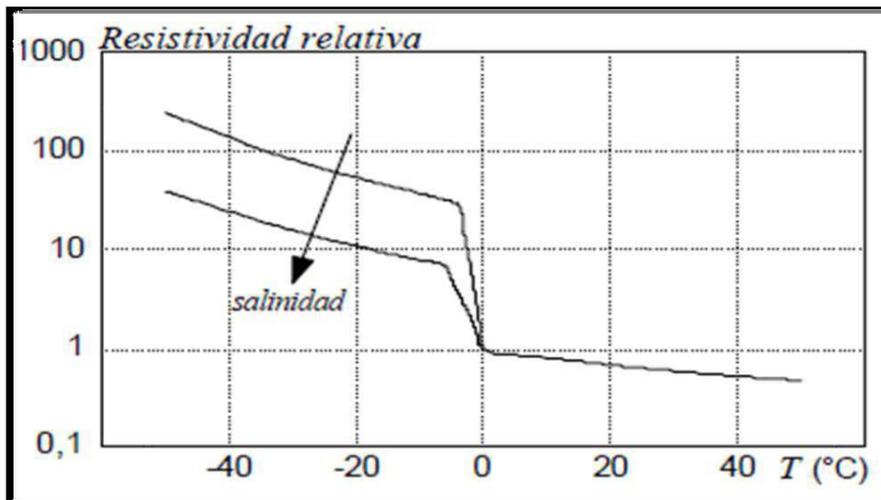


Figura 22. Resistividad relativa, según la variación de temperatura del terreno.

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.

Este es el propósito que se persigue cuando se llega con el electrodo hasta la capa freática, en este caso, la resistencia no sólo es muy baja sino que también es estable.

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), (Lavalle, 2021).

La figura 23 muestra el comportamiento de la resistividad con la compactación del terreno. Se puede observar que a medida que el grado de compactación aumenta, la resistividad disminuye” (Lavalle, 2021).

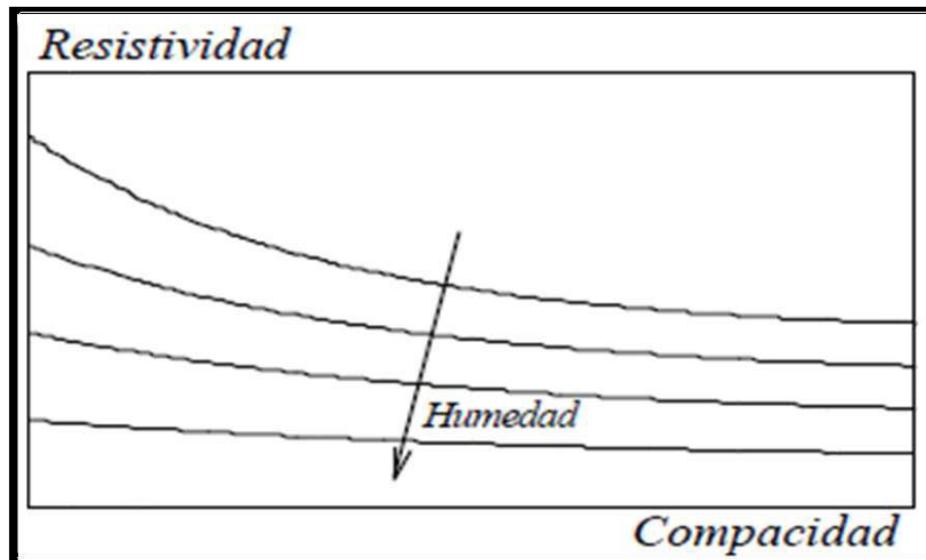


Figura 23. Variación de la resistividad con la compactación del terreno.
Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021).

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 $\Omega \cdot m$. 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 4 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”. (Lavallo, 2021)

Tabla 4. Resistividades de distintos tipos de agua

Tipos de aguas	Resistividad ($\Omega.m$)
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 Lavallo (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).

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 facilitarían 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 (Lavallo, 2021).

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” (Lavallo, 2021).

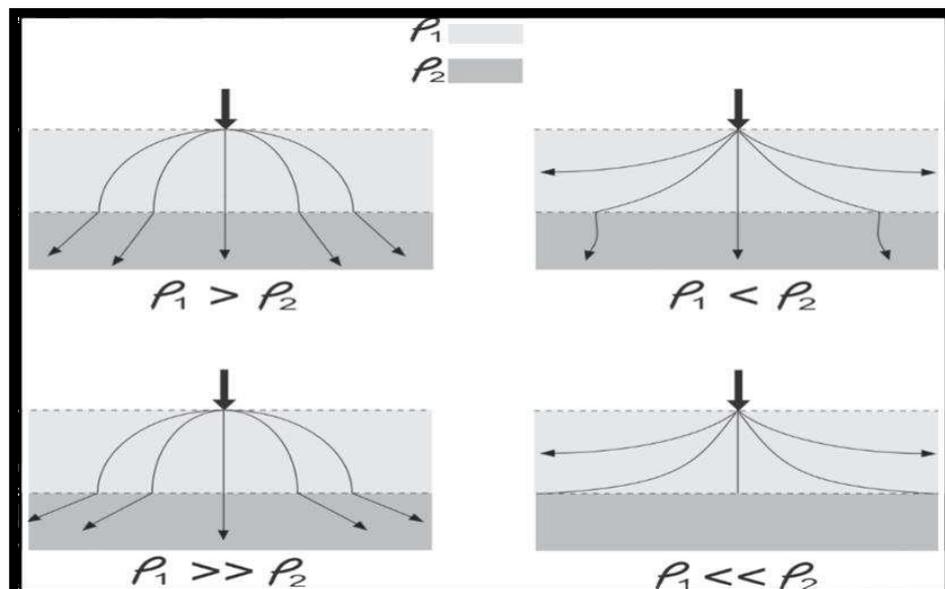


Figura 24. Influencia de la estratificación del terreno con dos capas en la resistividad.

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

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” (Lavallo, 2021).

2.6.2.30. Valores típicos de resistividad del terreno

2.6.2.30.1. Resistividad por edad

Tabla. Resistividad del suelo según su antigüedad

Edad cronológica	Resistividad del suelo ($\Omega\text{-m}$)				
	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).

2.6.2.30.2. Resistividad por los elementos de constitución del suelo

Tabla. Resistividad por constitución del suelo

Clase de terreno	Resistividad ($\Omega\text{-m}$)
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 Lavallo (2021)

Como se mencionó anteriormente, la resistividad eléctrica del suelo es una propiedad intrínseca al tipo de material y sus condiciones físicas, que puedan hacerla variar; por ello, sirve para una buena caracterización del suelo de acuerdo con los valores que se encuentren en su estudio (Lavallo, 2021).

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

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 isotropas 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.

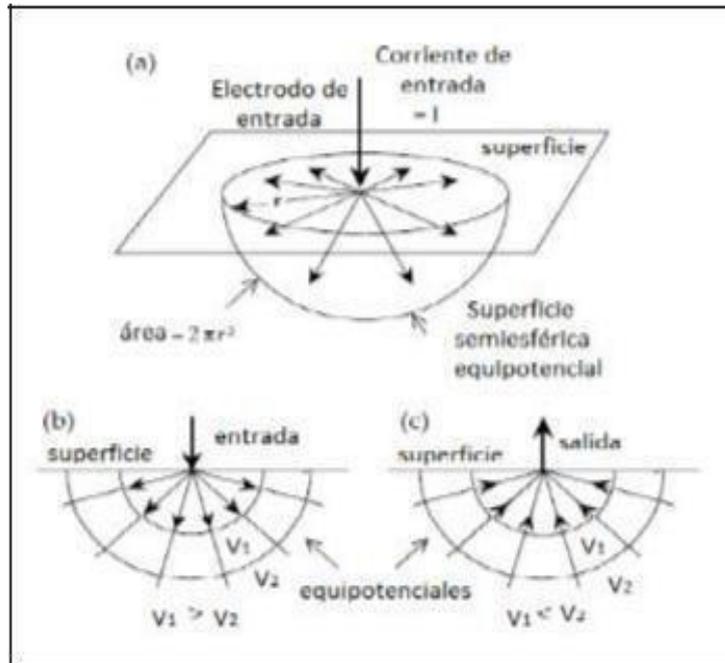


Figura 10. Líneas de campo eléctrico y superficies equipotenciales alrededor de un electrodo en un semiespacio uniforme. a) Superficie equipotencial semiesférica, b) líneas de campo radialmente hacia fuera alrededor de una fuente (entrada), c) líneas (salida).

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 N° 11.

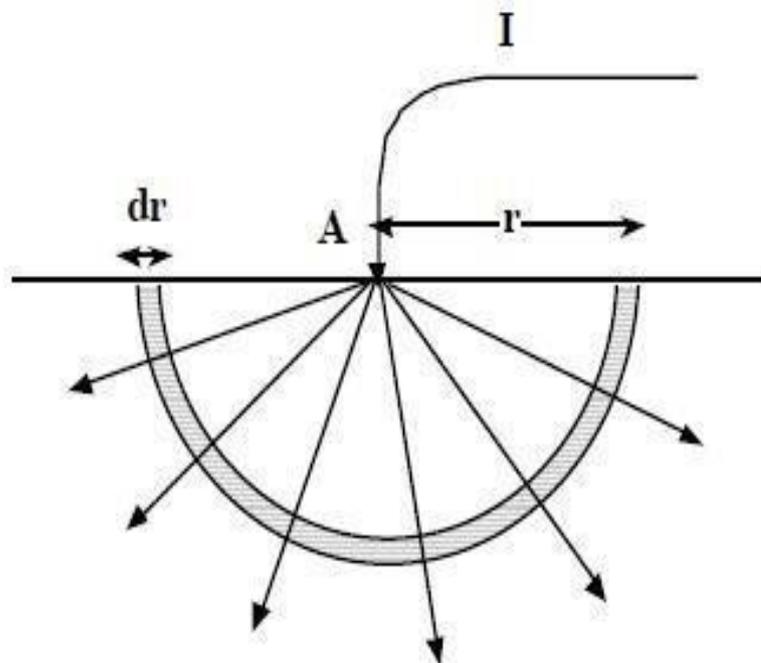


Figura 11. Ley de Ohm aplicado a la superficie de un suelo
Fuente: Quispe (2016)

2.6.2.32. Tipos de prospecciones para medición de resistividad del terreno

2.6.2.32.1. 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 (Lavallo, 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)” (Lavallo, 2021).

2.6.2.32.2. 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) (Lavalle, 2021).



Figura. 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) (Lavalle, 2021).

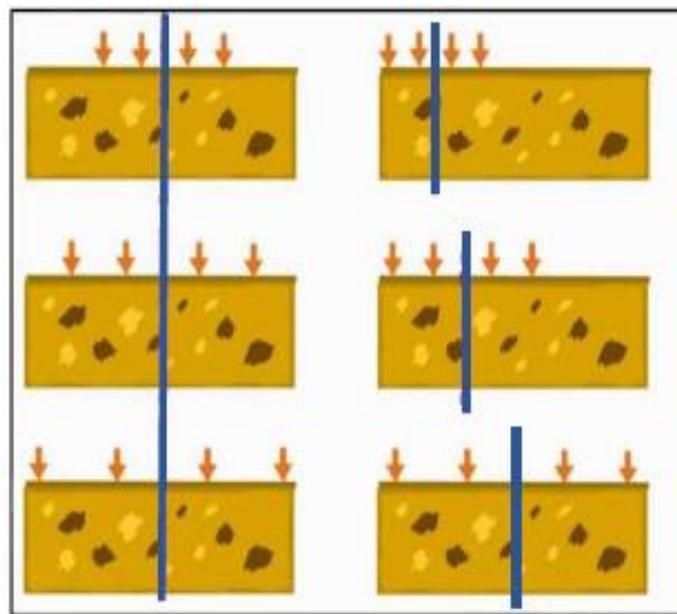


Figura . Aplicación correcta e incorrecta del método de Wenner.

Fuente: (Lavalle, 2021).

2.6.2.32.3. 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” (Lavalle, 2021).

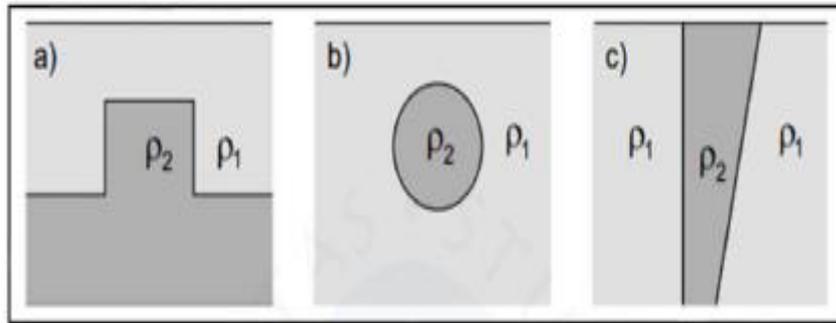


Figura 27. Variaciones laterales típicas en un terreno. a) Inclusión de un estrato en otro superior, b) acumulación de material diferente al alrededor, c) contactos de distintos materiales.

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).

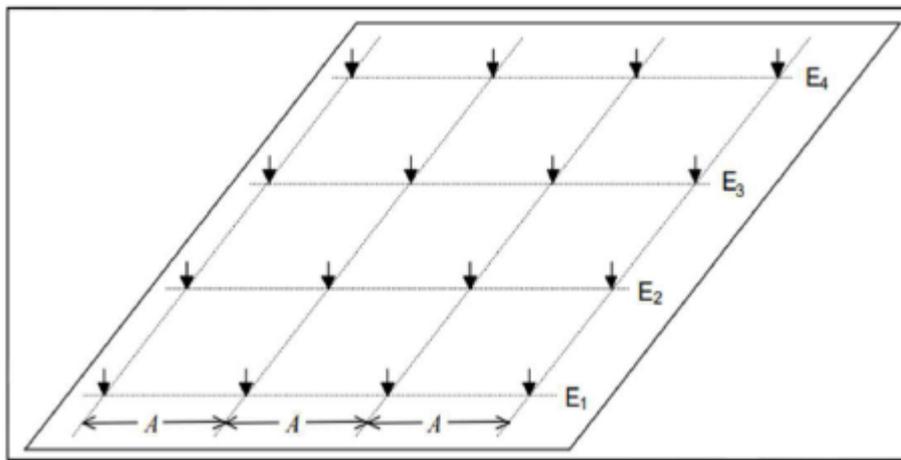


Figura 28. Calicata eléctrica usando la configuración de Wenner.
Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021)

2.6.2.32.4. 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. (Lavallo, 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).

2.6.2.32.5. 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).

2.6.2.32.6. Método de variación de la 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).

2.6.2.32.7. 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 en cuatro pequeños agujeros en la

tierra, todos a la profundidad “b” y espaciados en una línea recta a intervalos “a”. Se pasa una corriente 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. Entonces V / I da la resistencia R en ohmios. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

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” (Lavalle, 2021).

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

2.6.2.32.8. 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.

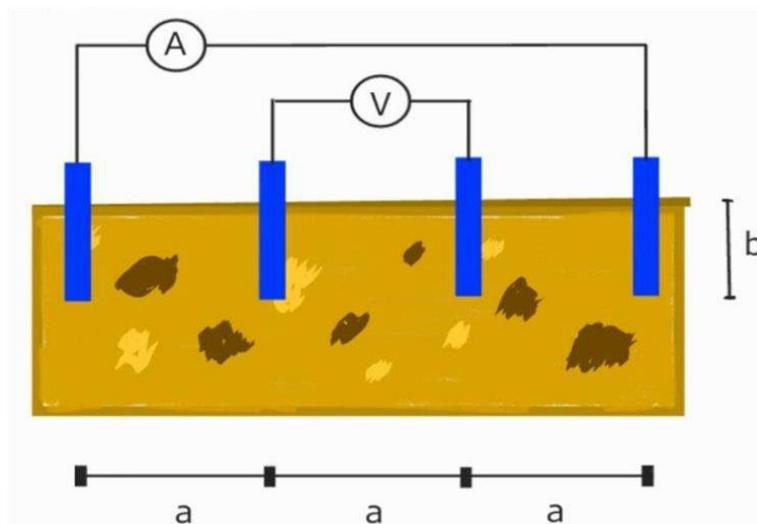


Figura 30. Configuración de Wenner.

Fuente: (Lavalle, 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:

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

Se debe recalcar que la fórmula expresada en la ecuación 2.4, 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, se puede asumir que la profundidad b=0 y la formula se convierte en:

$$\rho = 2\pi aR$$

La ecuación 2.5, 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).

2.6.2.32.9. Configuración de Schlumberger.

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.

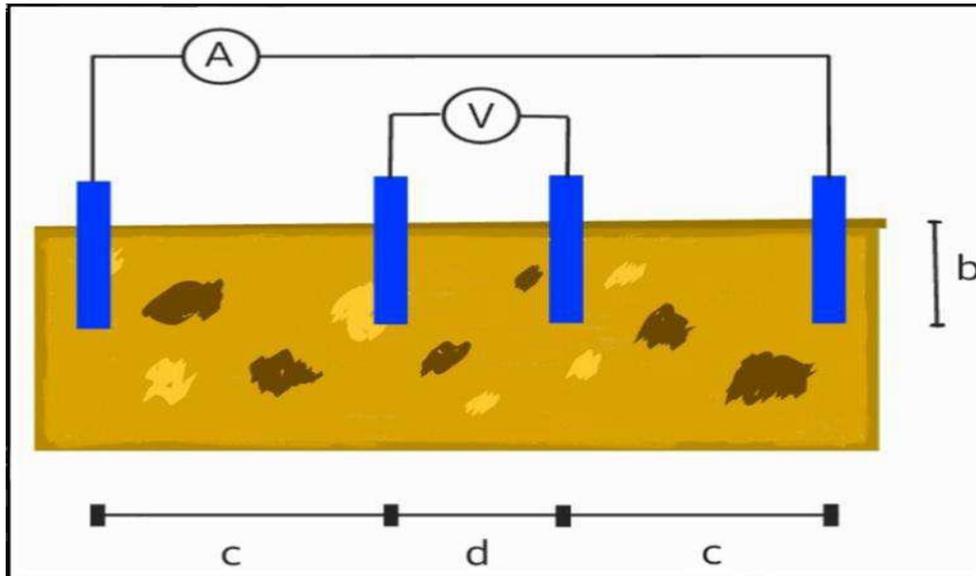


Figura 31. Configuración de Schlumberger.
Fuente: (Lavallo, 2021).

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:

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

2.6.2.33. Normativa 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).*

2.6.2.34. Suelos

Jara (2014), en su trabajo de tesis sobre “Efecto de la cal como estabilizante de una sub rasante de suelo arcilloso” haciendo referencia a Juárez y Rico (2005), manifiesta que “Es común creencia que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización; pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían "vectorialmente". En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y éste es un hecho del que se hace abundante aplicación” (Juárez y Rico, 2005).

2.6.2.34.1. 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 (Muelas s.f.).

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.).

2.6.2.35. 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 saprofiticas 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”.

2.6.2.36. 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).

2.6.2.37. Propiedades físicas y clasificación de los suelos

a) Relaciones peso-volumen

Como se mencionó anteriormente, el suelo constituye un sistema de tres fases diferenciables: 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:

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \times 100 = \frac{\gamma_{d m\acute{a}x}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{d m\acute{i}n}}{\gamma_{d m\acute{a}x} - \gamma_{d m\acute{i}n}} \times 100$$

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 11. Denominaciones de la compacidad (Das, 2001)

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 considerablemente, 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:** $C_c = \frac{(D^2)_{30}}{D_{60} \times D_{10}}$

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

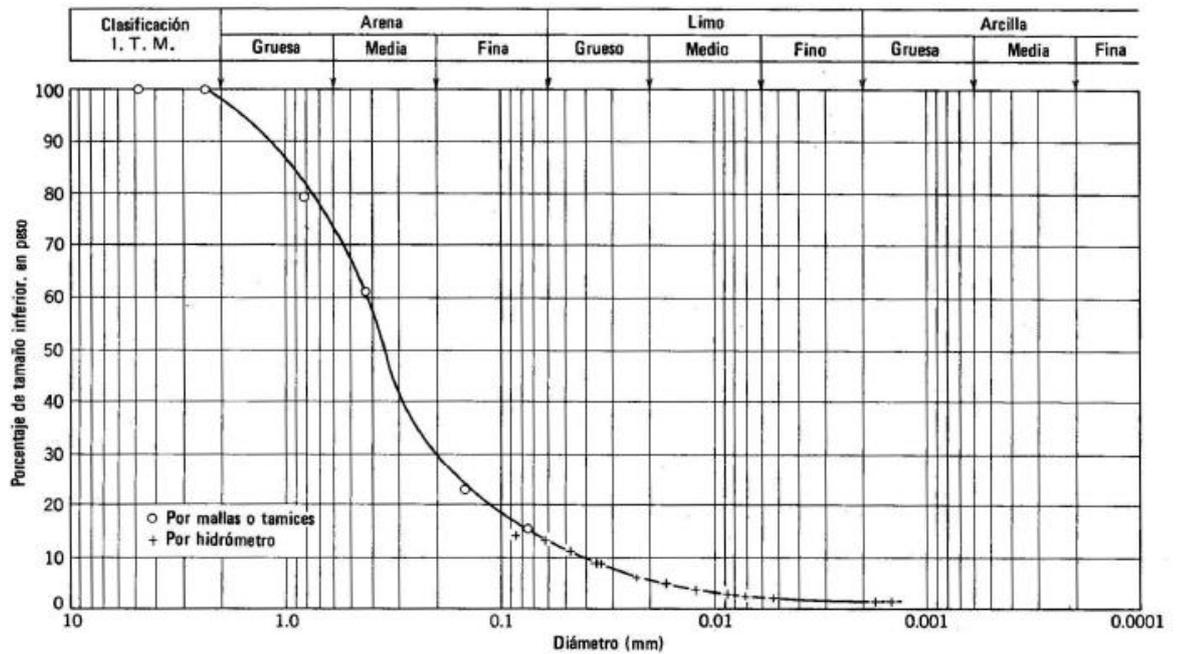
D_w = Densidad absoluta del agua en g/cm³.
 ρ = Viscosidad absoluta del agua en g/cm.seg
 H = Altura de caída de la esfera en cm
 t = Tiempo transcurrido, en seg.

Con agua a 20°C, $\rho = 0.0101$ g/(cm.seg) y con esferas de densidad absoluta de 2.65 g/cm³, que es un valor medio entre los minerales que se encuentran en el suelo, la fórmula anterior se transforma, quedando así:

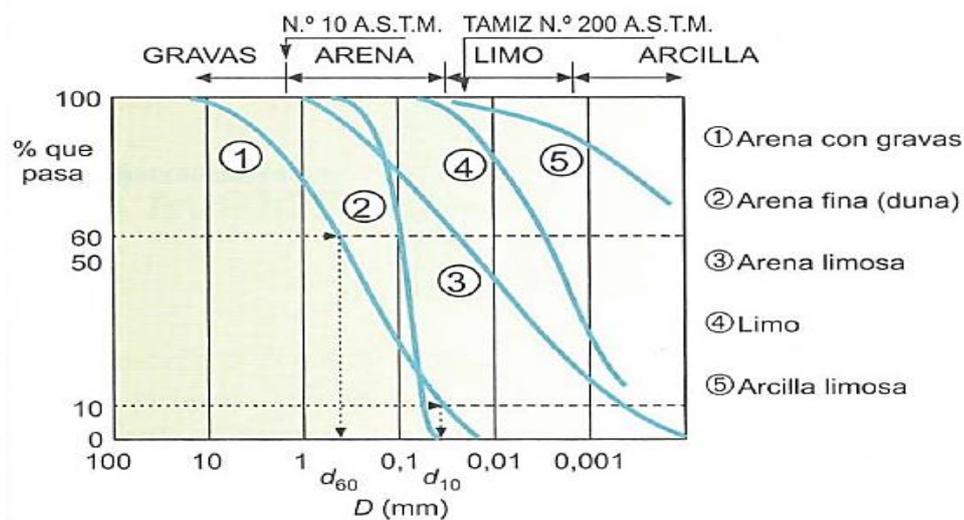
$$v = 35,613.86 r^2$$

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.



Gráfica N° 1. Curva granulométrica de un suelo (Según Lambe, 1951).
Fuente: Lambe, 1951



Gráfica N° 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 la 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.).

e) 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 canteras. 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 12. Clasificación de los suelos en cuatro 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, 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.).	Tamaños inferiores a 0,002 mm

Fuente: Crespo, 2007

Tabla 13. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (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)

La clasificación AASHTO ASTM D 3282 – 94 se presentará en el Informe Final.

2.6.2.38. 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.

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.

2.6.2.39. 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 Amoniacal 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 4.05 se muestra los Niveles de Materia Orgánica.

Tabla 14. Niveles de Materia Orgánica

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

2.6.2.40. Clasificación de las arcillas

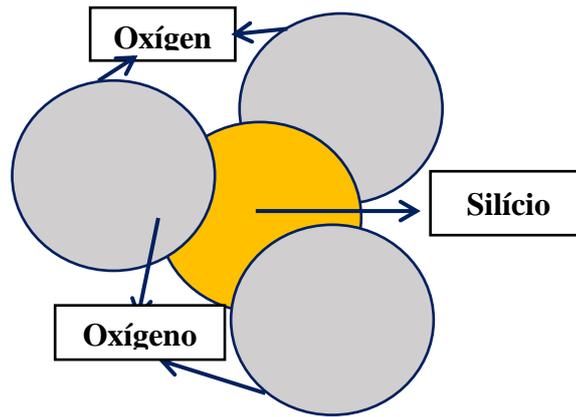
Los minerales cristalinos cuya actividad superficial es tal que se presenta plasticidad y cohesión, podemos denominarlos como arcillosos, existen aproximadamente 15 minerales de este tipo, pero se pueden agrupar en 3 grupos dominantes, a saber: Caolinita, Montmorilonita e Illita.

1. Caolinita

Debido a que las fuerzas de valencia en los átomos de oxígeno superiores, en la lámina de sílica, se encuentran insatisfechas, así como los espaciamientos que guardan entre si dichos oxígenos, resulta posible que la mencionada lámina se una a los de gibsita.

Se pueden unir láminas de este mismo tipo unas sobre otras para formar cristales de caolín conocidas como Caolinita, siendo las fuerzas que las unen del tipo hidrogeno y desarrolladas entre los iones oxígeno (O^{2-}) y los iones hidroxilo (OH^{-1}). Esta unión es relativamente fuerte. Si se tienen diferentes estructuras en las láminas, se obtienen diferentes minerales arcillosos con la misma composición de caolín. Aunque las láminas de sílica (fig. 2.2) y gibsita son capaces de extenderse en forma indefinida en la dirección horizontal (de los planos), se ha encontrado que las partículas de caolín que generalmente son de forma hexagonal, se presentan como partículas planas cuyos radios varían de 0.5 a 1.0 micras (Fernández, 1991).

La caolinita es un mineral eléctricamente neutro, pero bajo la presencia de agua se disocian algunos de los hidroxilos (OH^{-1}) y pierden los iones hidrogeno (H^{+}), dejando en consecuencia al cristal con una carga residual negativa que se equilibra con la atracción de algunos cationes intercambiables presentes en el agua, por ejemplo, Sodio (Na^{+}) o Calcio (Ca^{+2}). (Fernández, 1991).



Gráfica N° 3. La caolinita, mineral eléctricamente neutro

Fuente: Fernández, 1991

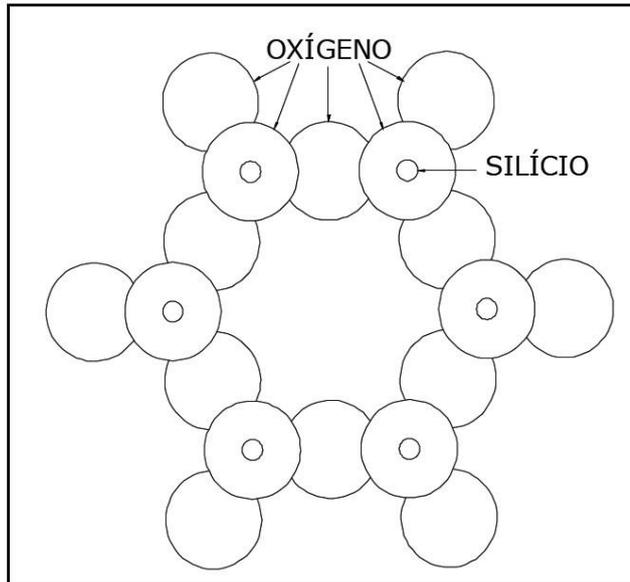
2. Montmorilonitas

En las láminas formadas por unidades tetraédricas y octaédricas frecuentemente ocurre lo que se conoce como sustitución isomorfa, que consiste en la sustitución de un átomo por otro. Si el agua contiene cationes tales como Sodio (Na^{+1}), Calcio (Ca^{+2}), Potasio (K^{+1}) o similares, estos son atraídos a las unidades de tal manera que satisfacen casi totalmente a la carga negativa resultante de la solución isomorfa. El problema es que estos cationes no quedan fijos en las láminas si no que se pueden intercambiar fácilmente.

El espesor de las láminas de la montmorilonita es del orden de 10 Angstroms ($1 \times 10^{-11}\text{m}$) y se colocan una sobre la otra como las hojas de un libro, teniéndose como liga entre las unidades a las atracciones mutuas de dos láminas hacia los cationes intercambiables anteriormente retenidos.

La unión catiónica en la montmorilonita depende del tipo de catión que se tenga presente, pero en lo general es débil, por lo que el agua puede entrar fácilmente entre las láminas de montmorilonita, ocasionando que se separen, no siendo difícil desasociar a las unidades estructurales de montmorilonita. Como resultado de lo anterior, los suelos que contengan

cantidades considerables de montmorilonita presentan importantes características de expansión (Fernández, 1991).



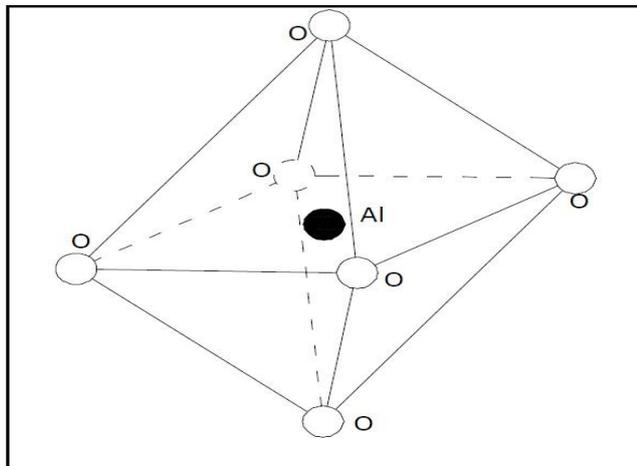
Gráfica N° 4. Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica.
Fuente: Fernández, 1991.

3. Illitas

La unidad estructural de la illita es muy semejante a la montmorilonita con la excepción de que siempre se presenta una sustitución isomorfa adicional de átomos de sílice (Si^{+4}) por átomos de aluminio (Al^{+3}) en la lámina de sílica (Fig.5), resultando con ello una carga residual negativa, más alta que la correspondiente a la de la lámina de montmorilonita. Sin embargo, una parte sustancial de esta carga residual negativa se equilibra con cationes de potasio (K^{+1}) no intercambiables, lo que provee una liga fuerte entre las láminas de illita para constituir las partículas.

Las ligas mediante los Cationes no intercambiables (K^{+1}) son más débiles que las ligas de hidrogeno que unen a las unidades estructurales de la caolinita, pero son mucho más fuertes, que las ligas de los cationes intercambiables, que forman a los cristales de la montmorilonita. Esto se

debe, en parte, al hecho de que los cationes (K+1) se fijan entre las superficies de las láminas de sílica y en consecuencia se encuentran mucho más cerca del catión intercambiado que en el caso de la montmorilonita en donde el catión intercambiado queda en la lámina central. Debido a esto, la estructura de la Illita no se expande por el paso del agua a través de sus láminas como ocurre en la montmorilonita (Fernández, 1991).



Gráfica N° 5. Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica
Fuente: Fernández, 1991

DIVISIONES MAYORES		SÍMBOLO		DESCRIPCIÓN
		SUCS	GRÁFICO	
SUELOS GRANULARES	GRAVA Y SUELOS GRAVOSOS	GW		GRAVA GRADUADA BIEN
		GP		GRAVA GRADUADA MAL
		GM		GRAVA LIMOSA
		GC		GRAVA ARCILLOSA
	ARENA Y SUELOS ARENOSOS	SW		ARENA GRADUADA BIEN
		SP		ARENA GRADUADA MAL
		SM		ARENA LIMOSA
		SC		ARENA ARCILLOSA
SUELOS FINOS	LIMOS Y ARCILLAS (LL < 50)	ML		LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
		CL		ARCILLA INORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD
		OL		LIMO ORGÁNICO O ARCILLA ORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD
	LIMOS Y ARCILLAS (LL > 50)	MH		LIMO INORGÁNICO DE ALTA PLASTICIDAD
		CH		ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD
		OH		LIMO ORGÁNICO O ARCILLA ORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD

Figura 3. Simbología de Suelos
Fuente: Norma E.050

2.6.2.41. 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 4. Tipo de edificación para investigación de suelos

Tipo de edificación					
Clase de estructura	Distancia mayor entre apoyos	Número de pisos (Incluido sótanos)			
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 5. 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

2.6.2.42. Criterios para calificar 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).

2.6.2.43. 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)

2.6.2.44. 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).

2.6.2.45. 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).

2.6.2.46. 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 6. 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)

2.6.2.47. 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 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. (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).

2.6.2.48. 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).

2.6.2.49. Profundidad de Cimentaciones

La profundidad de cimentación “Df” debe estar ubicada 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

Edificación con sótano

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).

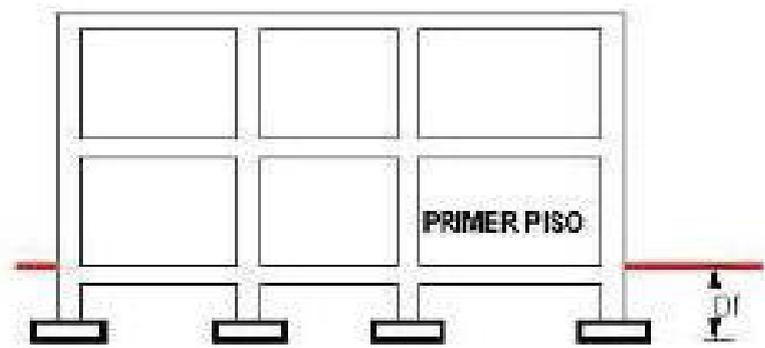


Figura 6. Profundidad de desplante.

Fuente: Norma E.050

2.6.2.50. 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 2. Relación de resistividad con características del suelo

Aumento de	Resistividad
Porosidad	Aumenta
Salinidad	Baja
Humedad	Baja
Temperatura	Baja

2.7. 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).

Suelos Aluviales: Son suelos recientes o de reciente deposición y carecen de modificaciones de los agentes externos (agua, clima, etc.). Se ubican en áreas ligeramente inclinadas o casi a nivel en las planicies costeras y valles interiores en donde el manto freático está cerca de la superficie y el drenaje por lo general es pobre. Son suelos de alta productividad permitiendo agricultura intensiva y mecanizada, aptos para toda clase de cultivos. Es factible el uso de riego.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Metodología.

3.3.1. Tipo y Diseño de Investigación.

3.3.1.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación es descriptivo, puesto que se describe la resistividad de un suelo aluvial del distrito de Indiana, de acuerdo a la profundidad de aplicación del resistivímetro.

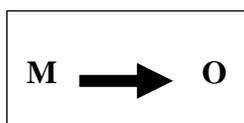
Según Rebeca Landeau, se tiene:

- a. Según la finalidad: Es Investigación tecnológica, porque, resuelve problemas prácticos de la vida cotidiana.
- b. Según su Carácter: Es Investigación No experimental, porque realiza no manipulación activa y control sistemático de variables para controlar los fenómenos y estudiar las relaciones de causalidad (26).

3.3.2. Diseño de Investigación

El diseño de investigación es Descriptivo Simple.

Esquema:



Donde:

M: Muestra
O: Observaciones

3.3.3. Población y Muestra.

3.3.3.1. Población

Suelos aluviales.

3.3.4. Muestra

La muestra está conformada por suelos aluviales del distrito de Indiana.

3.4. Técnicas, instrumentos y procedimiento de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos fueron la observación, para la selección de suelo y el cuestionario para la recopilación de datos.

En este sentido, es preciso mencionar que se realizó un trabajo conjunto entre la evaluación visual y los instrumentos de recolección y/o toma de datos.

3.4.2. Instrumentos de Recolección de datos

Los instrumentos de evaluación fueron la guía de observación y la lista de cotejo, formatos y cuadros de datos estadísticos.

Los materiales utilizados fueron:

- GPS
- Equipos de cómputo
- Cámaras fotográficas
- Celulares de alta gama
- Equipos: Megger Nilsson, Metrawatt o similar
- 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)
- Martillo de 2 kg
- Pala

3.4.3. Procedimientos de Recolección de datos

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

- Delimitar la zona en estudio
- Marcar un punto O que será el punto de simetrías para la ubicación de los electrodos de medición “a”.
- Establecer las direcciones de medición, tratando de cubrir totalmente el área en estudio
- Seleccionar las distancias interelectródicas. Para el dispositivo Wenner “a”.
- Recoger la información.

La recolección de datos se realizó en tres etapas:

Trabajo de Gabinete:

- Planificación de trabajo y selección de toma de muestra en el distrito de Indiana.

Trabajo de campo:

- Etapa de extracción de toma de muestra del suelo a investigar. Aplicación de plan de trabajo e instrumento de medición.
- Etapa de pruebas de laboratorio para conocer las propiedades de la muestra de 1m³ de suelo.

Trabajo de Gabinete:

Recopilación de datos obtenidos y procesamiento de información

3.5. Procesamiento y análisis de datos

La recopilación de datos, su procesamiento y análisis de la información se realizó de forma mecánica y computarizada.

- Para la recopilación inicial de los datos y procesamiento de la información se usó los paquetes básicos de escritorio de Micosoft, (Word, Excel, PPT, Etc); asimismo, AUTOCAD, WaterCad, EPANET y otros.

- Para el análisis e interpretación de los datos, y análisis estadísticos, se empleó la estadística descriptiva, conformada por las frecuencias, promedio, porcentajes, desviación estándar y varianza y el uso del paquete 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.

- Verificación y procesamiento inicial de los datos.
- Calcular la resistividad aparente de acuerdo a la fórmula pertinente.
- Levantar la curva de resistividad respectiva
- Si existieran puntos dudosos se repetirá la medición respectiva.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Este capítulo muestra la determinación de las propiedades físicas de suelos aluviales, mediante resistividad eléctrica con resistímetro.

Esta muestra fue tomada en el distrito de Indiana, provincia de Maynas, departamento de Loreto, Perú 2022.

Ubicación:

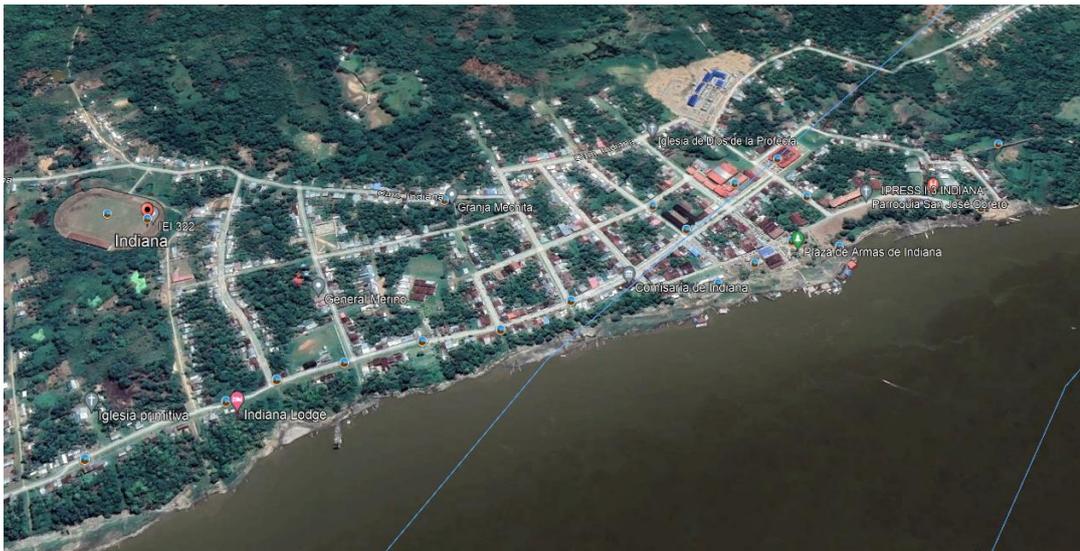
País : Perú

Departamento: Loreto

Provincia : Maynas

Distrito : Indiana

Figura 7. Vista satelital del distrito de Indiana.



Accesibilidad:

Para llegar al distrito de Indiana, desde la ciudad de Iquitos, se realiza un viaje de vía fluvial de aproximadamente 20 min. Siendo el único modo de llegar.

Así mismo, el lugar es completamente accesible en esta modalidad.

4.1. Propiedades del suelo:

1. Análisis granulométrico

Tabla 5. Análisis Granulométrico muestra (M)-1

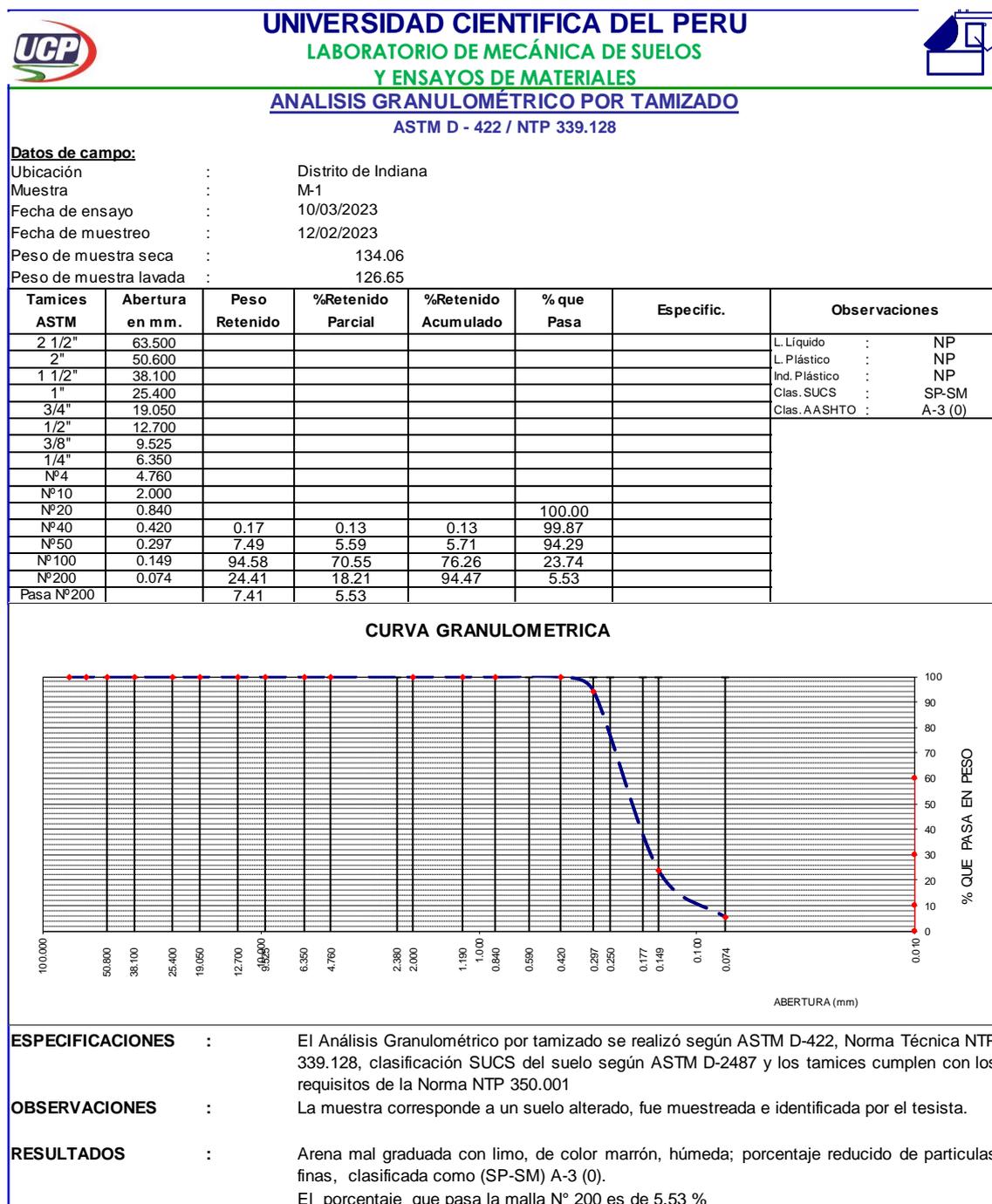
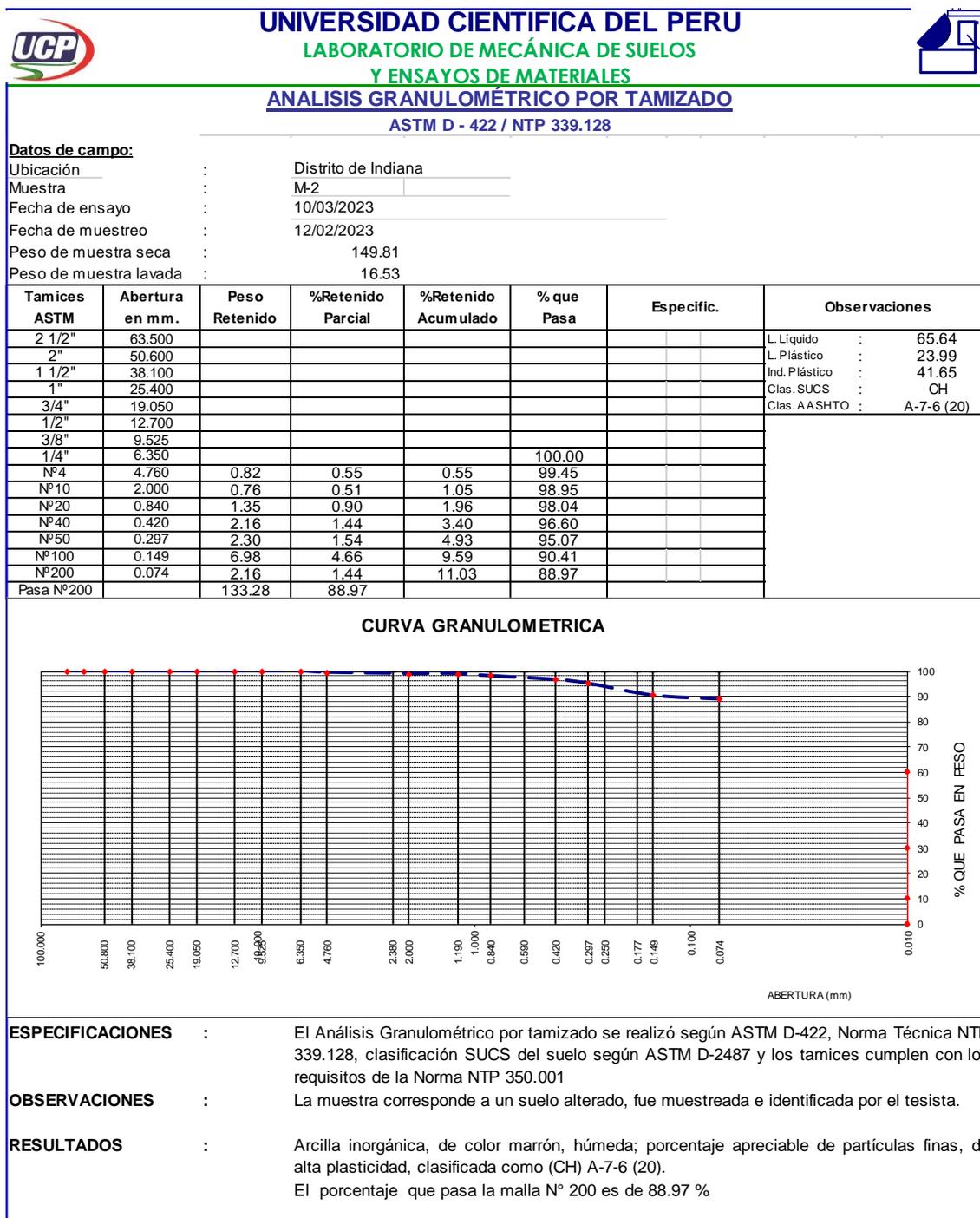


Tabla 6. Análisis granulométrico M-2



2. Límite de Consistencia

Tabla 7. Límite de Consistencia Muestra (M) -1

 UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE MATERIALES			
LIMITES DE CONSISTENCIA			
ASTM D-4318 / NTP 339.129			
Datos de Campo		Resultados	
Ubicación	Distrito de Indiana	Límite Líquido	NP
Muestra	M-1	Límite Plástico	NP
		Ind. Plástico	NP
		Clas. SUCS	SP-SM
		Clas. AASHTO	A-3 (0)
Límite Líquido	ASTM D 4318 - T 89		
ENSAYO Nº	1	2	3
Nº de Golpes			
R + Suelo Hum.			
R + Suelo Seco			
Peso de la Tara			
Peso de agua			
Peso de S. Seco			
% de Humedad			
Límite Plástico	ASTM D 4318 - T 90		
ENSAYO Nº	1	2	3
R + Suelo Hum.			
R + Suelo Seco			
Peso de la Tara			
Peso de agua			
Peso de S. Seco			
% de Humedad			
CURVA DE FLUJO			
			
ESPECIFICACIONES	:	Los Límites de consistencia está especificado según las Normas ASTM D 4318 - T89 para limite liquido y limite plástico ASTM D 4318 - T 90, NTP 339.129.	
OBSERVACIONES	:	La muestra corresponde a un suelo alterado, fue muestreada e identificada por el tesista.	
RESULTADOS	:	En los ensayos realizados a la muestra no se obtuvieron limites de consistencia.	

Tabla 8. Límite de Consistencia Muestra (M) -1



UNIVERSIDAD CIENTIFICA DEL PERU
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS
Y ENSAYOS DE MATERIALES

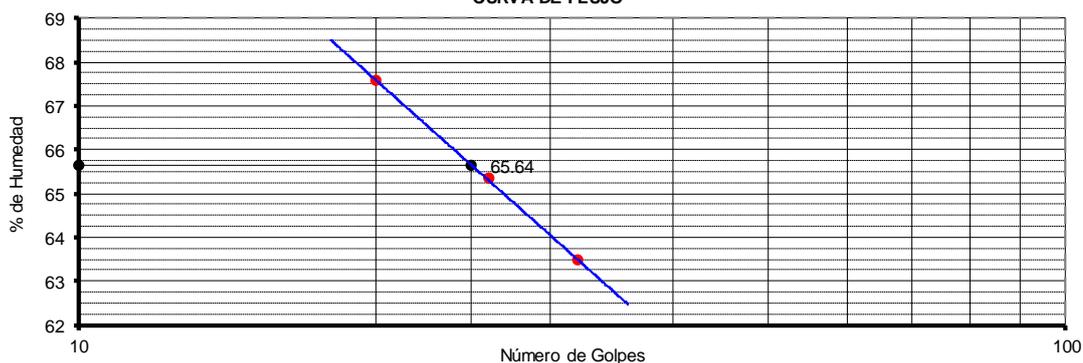


LIMITES DE CONSISTENCIA

ASTM D-4318 / NTP 339.129

Datos de Campo		Resultados	
Ubicación	Distrito de Indiana	Límite Líquido	65.64
Muestra	M-2	Límite Plástico	23.99
		Ind. Plástico	41.65
		Clas. SUCS	CH
		Clas. AASHTO	A-7-6 (20)
Límite Líquido	ASTM D 4318 - T 89		
ENSAYO Nº	1	2	3
Nº de Golpes	20	26	32
R + Suelo Hum.	45.76	57.86	58.85
R + Suelo Seco	43.26	55.58	56.33
Peso de la Tara	39.56	52.09	52.36
Peso de agua	2.50	2.28	2.52
Peso de S. Seco	3.70	3.49	3.97
% de Humedad	67.57	65.33	63.48
Límite Plástico	ASTM D 4318 - T 90		
ENSAYO Nº	1	2	3
R + Suelo Hum.	60.02	54.46	47.97
R + Suelo Seco	58.68	53.25	46.68
Peso de la Tara	53.07	48.23	41.31
Peso de agua	1.34	1.21	1.29
Peso de S. Seco	5.61	5.02	5.37
% de Humedad	23.89	24.10	24.02

CURVA DE FLUJO



ESPECIFICACIONES	:	Los Límites de consistencia está especificado según las Normas ASTM D 4318 - T89 para limite liquido y limite plástico ASTM D 4318 - T 90, NTP 339.129.
OBSERVACIONES	:	La muestra corresponde a un suelo alterado, fue muestreada e identificada por el tesista.
RESULTADOS	:	En los ensayos realizados a la muestra se obtuvo LL = 65.64, LP = 23.99 e IP = 41.65.

3. Contenido de Humedad

Tabla 9. Contenido de Humedad Muestra (M)-1

 UNIVERSIDAD CIENTIFICA DEL PERU LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE MATERIALES 			
<u>CONTENIDO DE HUMEDAD</u> ASTM D-2216 / NTP 339.127			
Datos de campo:			
Ubicación	:	Distrito de Indiana	
Muestra	:	M-1	
ENSAYO N°	1	2	3
PESO DE SUELO HUMEDO + TARA (gr.)	134.24	100.64	121.20
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr.)	128.53	96.52	116.39
PESO DE LA TARA	50.10	30.70	46.79
PESO DEL AGUA	5.71	4.12	4.81
PESO DE SUELO SECO	78.43	65.82	69.60
% DE HUMEDAD	7.28	6.26	6.91
PROMEDIO DE HUMEDAD (%)	6.82		
ESPECIFICACIONES	:	El contenido de humedad del suelo se realizó según las Normas ASTM D-2216 y NTP 339.127	
OBSERVACIONES	:	La muestra corresponde a un suelo alterado, fue muestreada e identificada por el tesista.	
RESULTADOS	:	El promedio del porcentaje de Humedad del Suelo es 6.82 %	

Tabla 10. Contenido de Humedad Muestra (M)-2

 UNIVERSIDAD CIENTIFICA DEL PERU LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYOS DE MATERIALES 			
<u>CONTENIDO DE HUMEDAD</u> ASTM D-2216 / NTP 339.127			
Datos de campo:			
Ubicación	:	Distrito de Indiana	
Muestra	:	M-2	
ENSAYO N°	1	2	3
PESO DE SUELO HUMEDO + TARA (gr.)	127.37	161.27	173.91
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr.)	103.74	126.75	137.26
PESO DE LA TARA	48.22	45.95	48.23
PESO DEL AGUA	23.63	34.52	36.65
PESO DE SUELO SECO	55.52	80.80	89.03
% DE HUMEDAD	42.56	42.72	41.17
PROMEDIO DE HUMEDAD (%)	42.15		
ESPECIFICACIONES	:	El contenido de humedad del suelo se realizó según las Normas ASTM D-2216 y NTP 339.127	
OBSERVACIONES	:	La muestra corresponde a un suelo alterado, fue muestreada e identificada por el tesista.	
RESULTADOS	:	El promedio del porcentaje de Humedad del Suelo es 42.15 %	

Tabla 11. Análisis de tamaño de partículas de suelo, Muestra (M)-2

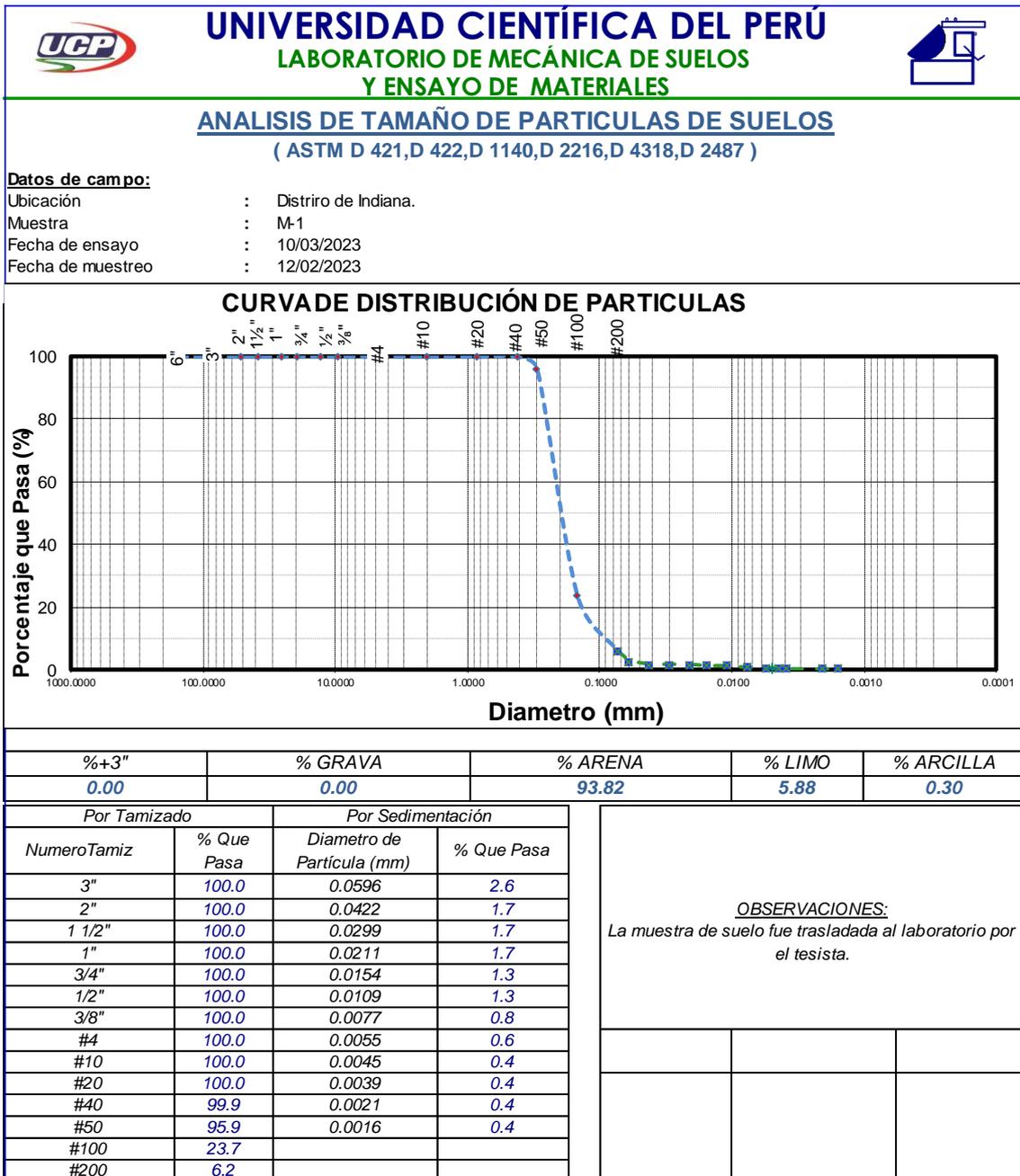
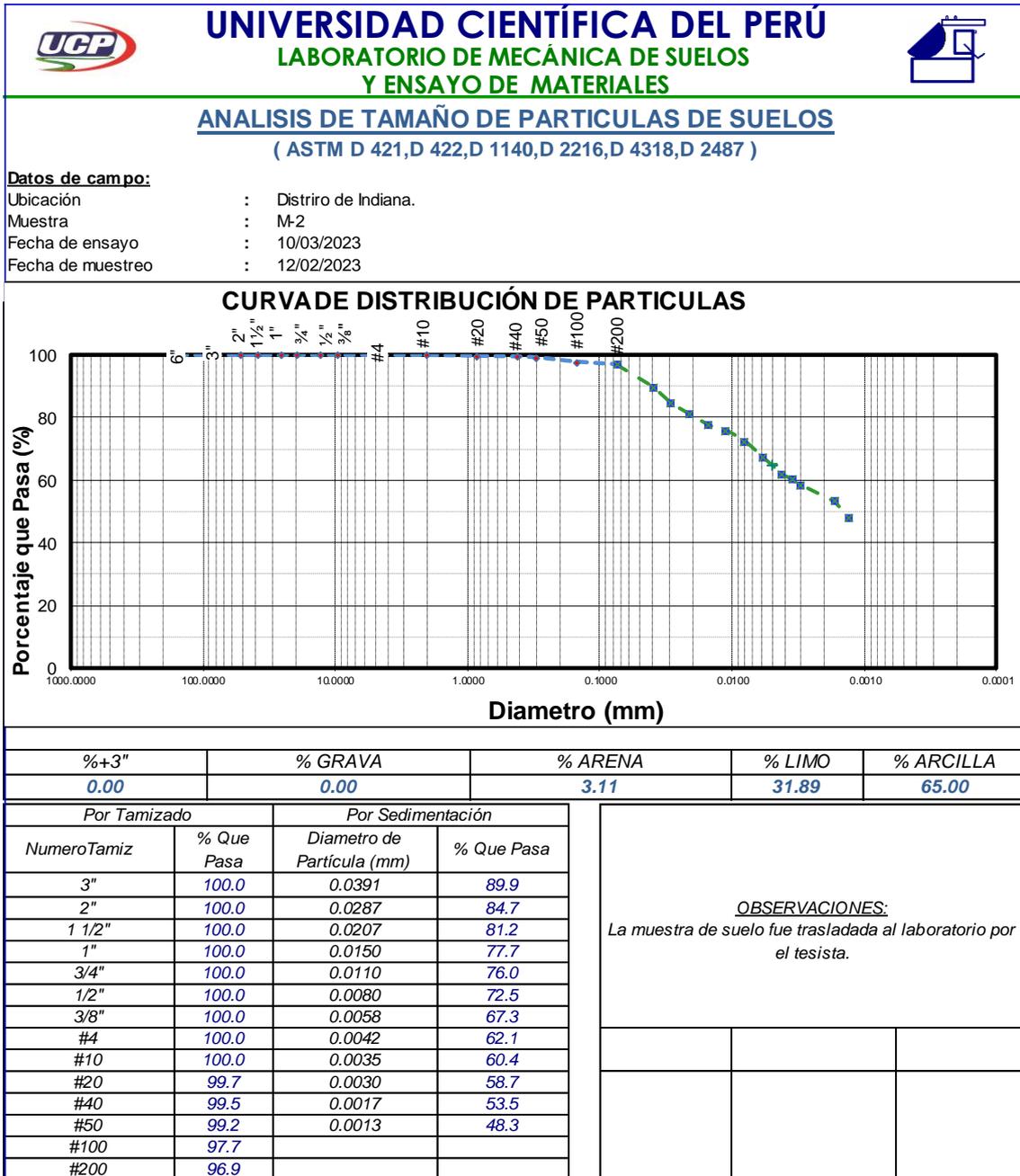


Tabla 12. Análisis de tamaño de partículas de suelo, Muestra (M)-1



4.2. Capacidad de resistividad eléctrica del suelo

Lectura: Telurómetro

Distancia Total: 15mt

Distancia	Omh	Carga de suelo
5m	20	0.05
5m	2000	0.18
5m	200	16.8
	20	10.26

Fórmula de Aplicación:

$$\rho = 2\pi x R \dots \dots \text{Distancia}$$

$$\rho = 2\pi x 16.8 x 5$$

$$\rho = 527.787$$

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN, RECOMENDACIONES

5.1. Discusión

5.2. Conclusión

- Según las pruebas de laboratorio se determinó que el suelo es alterado, es decir, la muestra M-1, no refleja, como se encontraba el suelo en su estado natural antes del muestreo.
- La resistividad térmica del suelo aluvial, 527.8.

Está compuesta por arena mal graduada con limo, de color marrón, húmeda; porcentaje reducido de partículas finas, clasificada como (SP-SM) A-3 (0).

El promedio del porcentaje de Humedad del Suelo es 6.82 %

La muestra M-1 tiene en su composición 65% de arcilla.

- La muestra M-2, está compuesta por arcilla inorgánica, de color marrón, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas, de alta plasticidad, clasificada como (CH) A-7-6 (20).

LL = 65.64, LP = 23.99 e IP = 41.65.

El porcentaje que pasa la malla N° 200 es de 88.97 %

El promedio del porcentaje de Humedad del Suelo es 42.15 %

La muestra M-2, tiene en su composición, 93.82% de arena.

- La composición estratigráfica está dentro del Horizonte C.

5.3. Recomendaciones

- Se recomienda seguir investigando sobre estos suelos aluviales, con fines de cimentación, en el departamento de Loreto, Perú.

BIBLIOGRAFIA

1. ENRIQUEZ VERA, Joe Willian and FLORES ESPINOZA, Jhonataan. Evaluación de la termografía y la resistividad eléctrica de suelos como procedimientos adicionales para la mejora en la precisión del método PCI de la avenida Tacna del distrito de San Miguel. . 2022.
2. HERNÁN, Chury Mario Rafael, VIVIANA, Venturino and SILVIA, Delaloye. Estudio de la variación de la resistividad eléctrica del suelo a lo largo del año. *Actas de las Jornadas*. 2021. P. 7.
3. MERCADO, Selene Tripp. LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES. . P. 96.
4. MACAS BUSTAMANTE, Jimmy Damián. *Análisis de las correlaciones entre propiedades índice y mecánicas con la resistividad eléctrica de suelos granulares en la zona 1 de la ciudad de Ambato*. . B.S. thesis. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ..., 2020.
5. DAFONTE DAFONTE, Jorge, GARCÍA-TOMILLO, Aitor, FIGUEIREDO, Tomás de, BARBIERI, R. S., FONSECA, Felícia, RODRIGUES, João, ARAÚJO, Izabela, VARGAS, Rodrigo J., BANDEIRA, Douglas H. and MONTANARI, R. Tomografía de Resistividad Eléctrica para detectar impactos cambios en las propiedades físicas del suelo, resultantes del laboreo con tracción animal y motorizada. *Estudios en la Zona No Saturada del Suelo*. 2019. Vol. 14, p. 57–61.
6. QUISPILAYA MARMOLEJO, Robinson and CRUZ CHUMPITAZ, William Jason. Propuesta del método no convencional Wenner de resistividad eléctrica para caracterización de suelos en Institución Educativa Libertador San Martín–Recuay 2018. . 2018.
7. BENÍTEZ PAZ, ROMMEL FERNANDO. *DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS A TRAVÉS DE PRUEBAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA*. . PhD Thesis. Universidad Autónoma de Chihuahua, 2018.

8. GARCÍA-GUTIÉRREZ, José Antonio and SACASAS-LEÓN, Carlos. Modelos de resistividad eléctrica en formaciones geológicas del sur de Cuba occidental. *Minería y Geología*. Online. June 2017. Vol. 33, no. 2, p. 128–143. [Accessed 8 August 2022]. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1993-80122017000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=en
9. RA6-014. *Norma Técnica: Mediciones para el sistema de puesta a tierra*. 2019.
10. ARAUJO, S and CÁRDENAS, C. *Análisis de fisuras y grietas en pavimentos rígidos mediante resistividad eléctrica*. . Cuenca, Colombia : Universidad de Cuenca, 2016.
11. PEREZ, Socrates Pedro Muñoz, CARRASCO, Jorge Alberto Nunton and BUSTAMANTE, Jean Pool Portocarrero. Una revisión del comportamiento mecánico del concreto con adición de fibras de acero de neumáticos reciclados. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*. 2022. Vol. 24, no. 02, p. 18–18.
12. RAMÍREZ, Leonel Germán Corona, JIMÉNEZ, Griselda Stephany Abarca and CARREÑO, Jesús Mares. *Sensores y Actuadores*. . Grupo Editorial Patria, 2014. ISBN 978-607-438-936-4. Google-Books-ID: wMm3BgAAQBAJ
13. LAVALLE OLIVA, Carlos Alberto. Estudio comparativo de métodos de medición de la resistividad del terreno y propuesta de protocolo de medición. . 2021.
14. RUCKS, L., GARCÍA, F., KAPLÁN, Abraham, PONCE DE LEÓN, J. and HILL, M. Propiedades físicas del suelo. *Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay*. 2004.
15. HERRERA RAMÍREZ, Nataly Lisseth. *Evaluación de la unidad hidrogeológica Tulcán para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo*. . B.S. thesis. Quito: UCE, 2018.

16. CONTRERAS, Alejandro Rojas. *Proyecto Arquitectónico En Zonas Sísmicas*. . Palibrio, 2012. ISBN 978-1-4633-3008-8. Google-Books-ID: Hw2DwATtCsC
17. HARPER, Gilberto Enríquez. *Instalaciones y montaje electromecánico / Installations and Electromechanic Assemblying*. . Editorial Limusa, 2004. ISBN 978-968-18-5778-3.
18. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. *Código Nacional de Electricidad*. 2006.
19. CÁRDENAS VALENCIA, Juan David and GALVIS GARCÍA, Esteban. Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del método de Wenner. . 2011.
20. BRICEÑO, J. Hildemaro. *Resistividad del terreno*. 2012. Departamento de Potencia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
21. JIMÉNEZ, Ana Cecilia Arias. *Suelos tropicales*. . Euned, 2001.
22. DELGADO, Pedro A. Hernández. La caracterización geotécnica del terreno. Un enfoque moderno. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*. 2009. Vol. 3, no. 1.
23. ESCOBEDO TORRES, Roger, BENDAYÁN ACOSTA, León, ROJAS RODRÍGUEZ, Carlos, RODRÍGUEZ ACHUNG, Fernando and MARQUINA PICÓN, Luis. Estudios detallados de suelos de la zona Fernando Lores-Tamshiyacu (Región Loreto). . 1994.
24. RODRÍGUEZ ACHUNG, Fernando, BENDAYÁN ACOSTA, León and ROJAS RODRÍGUEZ, Carlos. Estudio de inventario y evaluación de suelos en la región de Loreto. . 1994.
25. IBARRA, Marco Antonio Inzunza, MORENO, Segundo Felipe Mendoza, VALENCIA, Ernesto Alonso Catalán, CASTORENA, Ma Magdalena Villa, COHEN, Ignacio Sánchez and LÓPEZ, Abel Román. Productividad del Chile

jalapeño en condiciones de riego por goteo y acolchado plástico. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 2007. Vol. 30, no. 4, p. 429–436.

26. LANDEAU, Rebeca. *Elaboración de trabajos de investigación*. . Editorial Alfa, 2007.

ANEXOS

ANEXO N° 01. 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:

$$R = 2 * R_0 * \square * L$$

Dónde: R= resistividad en ohms-cm R_0 = Resistencia en ohms

\square = constante y L = distancia entre barras en cm. Interpretación de resultados:

ANEXO N° 02: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TELURÍMETRO MEGABRAS DIGITAL MTD – 20KWE

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. 2,3 kg

DIMENSIONES

221 x 189 x 99 mm.

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

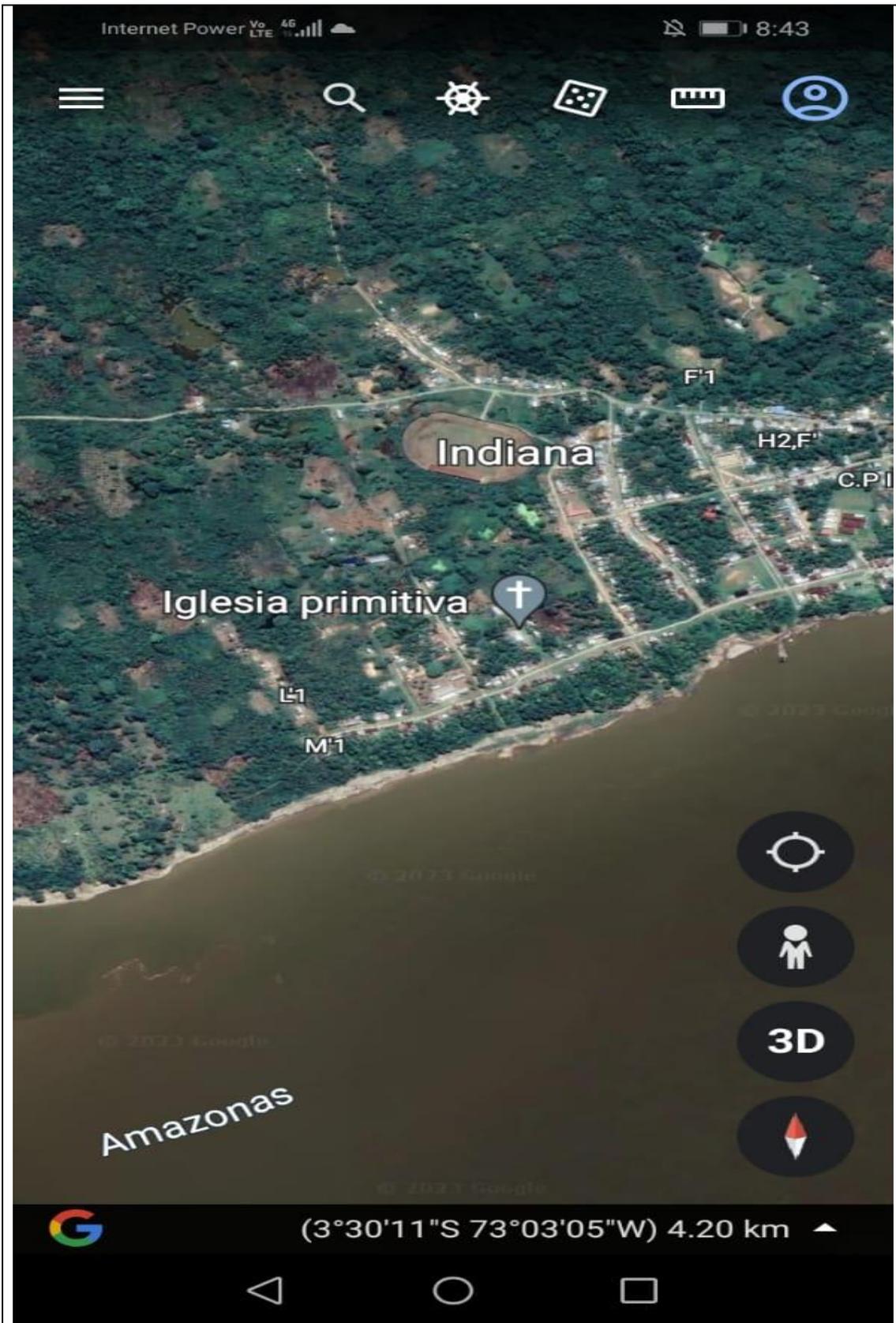
ANEXO N° 04. PANEL DE FOTOS



Telurómetro de toma de datos



Área de toma de datos



Ubicación de lugar de muestra y toma de datos.