

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“COMPORTAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS SUELOS ANTE VARIACIONES DE HUMEDAD Y GRADO DE COMPACTACIÓN”

Tesis previa a la obtención del
Título de Ingeniero Civil

AUTOR:

Javier Alvaro Cuñez Uvidia

DIRECTOR:

Ing. Benigno Alfredo Vázquez López, MSc.

Cuenca - Ecuador

2015



RESUMEN

La determinación de las características y propiedades del suelo es esencial en el diseño y construcción de cualquier obra civil. En este estudio se ha propuesto investigar la técnica de resistividad eléctrica como una herramienta para determinar las propiedades del suelo, considerando que son rápidas, no destructivas y de costos adecuados, en comparación a los métodos convencionales. Mediante un ensayo experimental se midió la resistividad del suelo utilizando un resistímetro que suministra corriente continua y un dispositivo plástico de propio desarrollo, conformado por un cilindro [$L=100$ cm y $\varnothing = 16$ cm] y tapones de PVC, para las mediciones se realizaron seis orificios, espaciados cada 15cm. En esta investigación se identificaron varias relaciones entre la resistividad (ρ) y las propiedades geotécnicas del suelo, tales como: el tamaño de las partículas, relación de vacíos, porosidad y límites de Atterberg (LL, LP e IP) en pruebas *in situ*. Mientras tanto, mediante ensayos de laboratorio se estableció varias correlaciones con diferentes contenidos de humedad (w) y pesos específicos (γ) bajo condiciones sueltas y compactas, en total se efectuaron 44 mediciones de resistividad. El incremento de la cantidad de agua y energía de compactación provocó una disminución en la resistividad eléctrica de los suelos, una fuerte relación entre estos parámetros fueron presentados claramente ($\rho \propto 1/w$; $\rho \propto 1/\gamma$), mediante una función potencial. Además se determinaron resistividades óptimas como parámetros de control en mediciones de campo: para la arcilla de alta plasticidad (CH: $\rho = 20 \Omega m$), seguido del suelo areno limoso (SM: $\rho = 13 \Omega m$) y por último los limos de baja plasticidad (ML: $\rho = 7 \Omega m$). La resistividad del suelo ha demostrado ser un buen predictor indirecto de diversas propiedades del suelo.

Palabras clave: Resistividad eléctrica de los suelos, caracterización geotécnica, contenido de agua, método geofísico, peso específico, propiedades de los suelos, Formación Mangán, Arcillas Varvadas.



ABSTRACT

Determining the characteristics and properties of the soil is essential in the design and construction of all civil works. This study has proposed to investigate the electrical resistivity technique as a tool for determining soil/ground properties, considering that are fast, non-destructive and adequate cost, compared to conventional methods. Using an experimental test soil resistivity was measured using a resistivimeter which gives continuous current and supplying a plastic device development itself, consisting of a cylinder [L=100cm y $\varnothing = 16$ cm] and PVC caps for measurements conducted six holes, spaced every 15 cm. In this study several relationships between the resistivity (ρ) and the geotechnical properties of the soil, such as: The particle size, void ratio, porosity and Atterbeg's limits (LL, LP and IP) *in situ* testing, were identified. Meanwhile, in laboratory tests, several correlations were established with different moisture contents (w) and specific weight (γ), and loose compact under conditions and in total 44 resistivity measurements, were made.

Increasing the amount of water and energy compaction caused a decrease in the electrical resistivity of the soil/ground, a strong relationship among these parameters was presented clearly ($\rho \propto 1/w$; $\rho \propto 1/\gamma$), by a potential function. Furthermore, resistivities were determined as optimal control parameters field measurements: for high plasticity clay (CH: $\rho = 20 \Omega\text{m}$), followed by sandy loam soil (SM: $\rho = 13 \Omega\text{m}$) and finally the silt of low plasticity (ML: $\rho = 7 \Omega\text{m}$). The soil resistivity has proven to be a good predictor of various properties of the soil/ground.

Keywords: *electric resistivity of soils, geotechnical characterization, water content, geophysical method, specific weight, soil properties, Mangán Training, Varvadas Clays.*



CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
CONTENIDO.....	4
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE SÍMBOLOS	8
AGRADECIMIENTO	11
DEDICATORIA.....	12
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Justificación	16
1.3 Objetivos.....	18
1.4 Organización de tesis	18
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Prospección geofísica.....	19
2.2 Métodos de resistividad eléctrica	20
2.2.1 Introducción.....	20
2.2.2 Principios básicos.....	21
2.2.3 Configuración de los electrodos y factores geométricos	25
2.2.4 Sondeo eléctrico vertical (SEV).....	30
2.2.5 Método de interpretación.....	30
2.2.6 Factores que influyen en el valor de la resistividad en suelos	31
2.2.7 Resistividades de algunos materiales naturales	34
2.3 Métodos geotécnicos.....	35
2.3.1 Características del suelo	35
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	41
3.1 Área de investigación	41
3.1.1 Geología.....	42
3.1.2 Tipos de suelos	43
3.2 Análisis de investigación experimental.....	44
3.2.1 Análisis de datos geotécnicos	45
3.2.2 Análisis de datos medidos la resistividad eléctrica	50
3.3 Análisis estadístico	55
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	57



4.1 Clasificación de los suelos.....	57
4.2 Determinación de las propiedades físicas de los suelos.....	60
4.3 Valores de resistividad eléctrica en laboratorio	61
4.3.1 Resistividad eléctrica obtenida en campo.....	62
4.4 Correlación entre la resistividad y el contenido de humedad.....	64
4.5 Correlación entre la resistividad y el peso específico	72
4.6 Comparación de gráficas resultantes	78
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
5.1 Conclusiones	82
5.2 Recomendaciones	84
Bibliografía	85
Anexos	89
Anexo A. Tabla de ecuaciones y coeficientes de correlación.....	90
Anexo B. Correlación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación	91
Anexo C. Medición de la resistividad eléctrica en laboratorio.....	93
Anexo D. Medición de la resistividad eléctrica en campo	96
Anexo E. Granulometría por tamizado y límites de Atterberg.....	97
Anexo F. Granulometría por hidrómetro.....	100
Anexo G Humedad natural y peso volumétrico.....	103
Anexo H. Gravedad específica de los sólidos.....	104
Anexo I. Compactación Próctor Modificado	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Parámetros utilizados en la definición de la resistividad (Gabarrón, 2013).	21
Figura 2.2 Curva de conductividad para suelos arcillosos (Rinaldi y Cuestas, 2002).	23
Figura 2.3 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 de campo radialmente hacia dentro alrededor de un sumidero (salida) (Lowrie, 2007).	24
Figura 2.4 Forma generalizada de la configuración de los electrodos para medir la resistividad (Reynolds, 1997).	25
Figura 2.5 Configuraciones de los electrodos: a) Wenner, b) Schlumberger, c) Dipolo – dipolo (Lowrie, 2007).	27
Figura 2.6 Sección de la señal contribución para la configuración Wenner (Reynolds, 1997).	28
Figura 2.7 Método del cilindro Wenner (BS 1377-3, 1990).	29
Figura 2.8 Sondeo eléctrico vertical Wenner (Molina, 2006).	30
Figura 2.9 Relación entre el contenido de humedad y la resistividad eléctrica para diferentes suelos. (Amarillo: arcilla, Rojo: marga y Negro: arena (Hassan, 2014).	33
Figura 2.10 Diagrama de los componentes de suelo (Liu y Evett, 2008).	37
Figura 2.11 Efectos de la energía de compactación sobre una arcilla limosa (Liu y Evett, 2008).	40
Figura 3.1 Mapa de ubicación de los sitios de muestras y análisis experimental: a) Provincia del Azuay, b) Cantón Cuenca, c) Parroquias Cuenca y Turi.	41
Figura 3.2 Mapa Geológico de las zonas de recolección de las muestras y ensayos de campo (IGM, ÑV-E Azogues Hoja 73; NV-F Cuenca Hoja 53).	42
Figura 3.3 Determinación de la masa del frasco volumétrico más lechada.	45
Figura 3.4 Análisis granulométrico por: a) Tamizado e b) Hidrométrico.	47
Figura 3.5 a) Ensayo del límite líquido y b) Ensayo del límite plástico según la norma ASTM 4318.	48
Figura 3.6 Ensayo de compactación Próctor Modificado: a) Herramientas b) Muestra enrazada y pesada.	49
Figura 3.7 Equipos del Resistivímetro PASI modelo 16SG24-N.	50
Figura 3.8 Accesorios del Resistivímetro PASI modelo 16SG24-N.	51
Figura 3.9 Resistividad eléctrica, a) Peso del material, b) Compactación, c) Configuración y medición.	53
Figura 3.10 Medición de la resistividad eléctrica en campo del suelo A (CH: Arcilla de alta plasticidad), sector Miraflores.	54
Figura 4.1 Curva de distribución del tamaño de partículas de los suelos A, B y C.	58
Figura 4.2 Localización de los puntos en la carta de plasticidad.	59
Figura 4.3 Relación entre los valores de resistividad y los Límites de Atterberg: 1) Resistividad eléctrica medida en campo, ρ (Ωm); 2) LL, (%); 3) LP, (%) y 4) IP, (%).	64
Figura 4.4 Correlación entre el contenido de humedad y la resistividad de tres tipos de suelos en condiciones sueltas y compactadas: a) Suelo A (CH: arcilla de alta plasticidad), b) Suelo B (ML: limo de baja plasticidad), y c) Suelo C (SM: arena limosa).	70
Figura 4.5 Correlación entre el peso específico y la resistividad eléctrica de los suelos en condiciones sueltas y compactadas: a) Arcilla de alta plasticidad (CH), b) Limo de baja plasticidad (ML), c) Arena limosa (SM).	75
Figura 4.6 Correlación entre el contenido de humedad y la resistividad eléctrica de los suelos A, B y C en condiciones: a) sueltas y compactadas: b) 10 golpes, c) 20 golpes y d) 35 golpes.	79
Figura 4.7 Correlación entre el peso específico y la resistividad eléctrica de los suelos A, B y C en condiciones a) sueltas y compactadas: b) 10 golpes, c) 20 golpes y d) 35 golpes.	80



LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Factores geométricos de las diferentes configuraciones (Hassan, 2014).</i>	27
<i>Tabla 2.2 Valores características de resistividad eléctrica (Reynolds, 1997).</i>	35
<i>Tabla 2.3 Gravedad específica de algunos suelos (Das, 2001b).</i>	38
<i>Tabla 3. 1 Designación de los sitios de muestreo.</i>	41
<i>Tabla 3.2 Rangos del peso específico de la Formación Mangán y Arcillas Varvadas (Basabe, 1998).</i>	43
<i>Tabla 3.3 Clasificación del suelo basado en el tamaño de grano (Liu y Evett, 2008).</i>	49
<i>Tabla 3.4 La energía de compactación transformada en número de golpes.</i>	52
<i>Tabla 4.1 Distribución del tamaño de las partículas y límites de Atterberg de tres tipos de suelos.</i>	57
<i>Tabla 4.2 Varias propiedades físicas de los suelos A, B y C.</i>	60
<i>Tabla 4.3 Resultados de la medida de resistividad eléctrica y humedad en campo.</i>	63
<i>Tabla 4.4 Valores de resistividad eléctrica del suelo, contenido de humedad y peso específico.</i>	66



LISTA DE SÍMBOLOS

w = Contenido de humedad del suelo (Porcentaje)

G_s = Gravedad específica de los sólidos

γ = Peso específico del suelo en kN/m^3

γ_d = Peso específico seco del suelo en kN/m^3

S_r = Grado de saturación del suelo (Porcentaje)

$\gamma_{d\text{max}}$ = Peso específico seco máximo del suelo en kN/m^3

w_{op} = Contenido de humedad óptima (Porcentaje)

e = Relación de vacíos

R = Resistencia (ohm)

ρ = Resistividad eléctrica del suelo ($\text{ohm} - \text{m}$)

σ = Conductividad eléctrica del suelo ($\text{siemens} - \text{m}$)

a = Distancia entre dos electrodos consecutivos en el método Wenner (m)

A = Área de la sección transversal de la muestra a ensayar (m^2)

L = Distancia entre dos electrodos internos (m)

V = Diferencia de potencial entre los electrodos internos (voltios)

I = Corriente que fluye entre electrodos exteriores (amperios)

ΔV = Caída de tensión entre los dos electrodos interiores del modelo (voltios)

k = Factor geométrico (m)

r = Coeficiente de correlación de Pearson

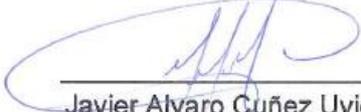
r_s = Coeficiente de correlación de Spearman

R^2 = Coeficiente de determinación (Porcentaje)



Yo, Javier Alvaro Cuñez Uvidia, autor de la tesis “**Comportamiento de la resistividad eléctrica de los suelos ante variaciones de humedad y grado de compactación**” reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 26 de octubre del 2015



Javier Alvaro Cuñez Uvidia
CI: 0603622176



Yo, Javier Alvaro Cuñez Uvidia, autor de la tesis “Comportamiento de la resistividad eléctrica de los suelos ante variaciones de humedad y grado de compactación”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de octubre del 2015



Javier Alvaro Cuñez Uvidia
CI: 0603622176



AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional durante todo el proceso académico. También mi profunda gratitud a quienes contribuyeron en la elaboración de este tema de investigación al Ing. Alfredo Vázquez por sus continuas observaciones, ideas y sugerencias. A la Universidad de Cuenca por permitirme utilizar su infraestructura, equipos y herramientas del Laboratorio de Mecánica de Suelos con el apoyo incondicional del laboratorista Arq. Stalin Cabrera quien asesoró los ensayos geotécnicos realizados para este estudio.

A la empresa Geo & Geo por la colaboración de sus equipos y personal técnico, de manera especial al Sr. Ángel Loja debido a su gran apoyo logístico y manejo de equipos.

Sin la ayuda de todos ustedes no hubiese sido posible el desarrollo de este tema de estudio en el campo de la Geofísica.



DEDICATORIA

A mi familia, principalmente a mis padres por su gran apoyo, paciencia y deseos de superación. Y para Diana, por la reciente felicidad que ha dado a mi vida.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Las propiedades y características del suelo son una de las principales preocupaciones de los ingenieros civiles, debido a que soportan el peso de las estructuras, siendo de vital importancia para el diseño y construcción de las obras ingenieriles. Tradicionalmente, se han utilizado los métodos geotécnicos en la determinación de las propiedades del suelo, lo que implica extensa carga de trabajo y altos costos económicos siendo además invasivos a su entorno natural.

Los ensayos geotécnicos bajo condiciones de laboratorio nos permiten determinar de manera directa varias propiedades básicas del suelo como: el tamaño de las partículas de suelo, contenido de humedad, peso específico, gravedad específica de los sólidos, la resistencia, etc. Pero presentan limitaciones cuando se tiene una gran cantidad de muestras, los procedimientos a realizar tienden a ser tediosos, demorados y repetitivos. También, puede destacarse la alteración de las propiedades del suelo durante la toma de muestras.

Mientras tanto, para las pruebas de campo como los ensayos de penetración, perforaciones y calicatas, también se presentan inconvenientes debido a que se necesitan equipos voluminosos y pesados, afectando considerablemente en los costos del proyecto y en los tiempos de ejecución, especialmente en terrenos montañosos. Además, la escala de los ensayos *in situ* no alcanza a representar todo el macizo de suelo, lo que debe tomarse en cuenta en su interpretación y extrapolación de resultados (González de Vallejo *et al.*, 2002). Por tal razón, para resolver o minimizar estos problemas se necesita de técnicas alternativas que nos proporcionen información adicional a los métodos convencionales. El subsuelo en la naturaleza presenta diferentes propiedades físicas, impidiéndonos generalizar las características de una zona a pesar de pertenecer a la misma formación geológica, siendo más evidente en proyectos específicos.

En general, los estudios de factibilidad en proyectos de obras civiles se basan mayoritariamente en exploraciones del subsuelo poco detalladas. Los trabajos *in situ* representan un punto crítico en la estimación de costos debido a la insuficiente investigación de los estudios geológico-geotécnicos sufriendo demoras por esta causa. Por lo tanto, los estudios en muchas ocasiones quedan incompletas, los cuales necesitan ser complementados mediante métodos indirectos representados por técnicas geofísicas. Cabe mencionar que estas nuevas técnicas no son un sustituto de los métodos directos en la evaluación de un sitio determinado (McDowell *et al.*, 2002).

El Austro ecuatoriano y en particular la cuenca del río Paute tiene como uno de sus mayores peligros naturales *los terrenos inestables*, así lo demostró el desastre de “La Josefina” (Basabe, 1998), algunas formaciones geológicas son frágiles o incompetentes, las cuales favorecen a la inestabilidad. En esta investigación se analiza dos formaciones



geológicas: Formación Mangán (lutitas y areniscas fino-granulares) y Arcillas Varvadas (arcillas) las cuales son muy sensibles a los cambios de humedad. Estos suelos en condiciones saturadas y con sobrecarga son inestables y colapsables (Basabe, 1998).

El contenido de agua en un suelo se determina a través de un sencillo y rutinario ensayo de laboratorio mediante métodos convencionales. Este parámetro es de gran importancia para entender las propiedades geotécnicas del suelo, la dificultad se presenta cuando se obtiene una gran cantidad de muestras que necesitan ser analizadas en un rango de tiempo limitado. Además, en la naturaleza la humedad del suelo puede variar ampliamente causando cambios significativos en la presión de poros, lo cual afecta a la resistencia del suelo, por lo tanto, el contenido de agua es un factor importante cuando se considera la estabilidad y la capacidad de servicio a largo plazo de las estructuras ingenieriles construidas en tierra.

El suelo en estado natural no siempre es apto para soportar el peso de las estructuras como, puentes, carreteras, presas, siendo necesario incrementar el peso específico del suelo mediante la compactación, para mejorar la resistencia del suelo y la capacidad de carga (Das, 2001a). Es muy frecuente observar problemas asociados a la mala aplicación de los principios de compactación en obras civiles (daños estructurales, asentamientos diferenciales, fallas en rellenos, etc.). La subcompactación provoca asentamientos debido a que un relleno no alcanza la estabilidad requerida para soportar una estructura. Mientras que, la sobrecompactación del suelo es susceptible al agrietamiento, adquiriendo características indeseables. Por lo tanto, la determinación del contenido de humedad y peso específico del suelo son de gran importancia en el control de la calidad de compactación, pero la ejecución de los ensayos implica una extensa carga de trabajo influyendo significativamente en los costos.

Para la exploración subsuperficial, los métodos geofísicos se presentan como una alternativa en la medición de las propiedades del suelo. Los problemas pueden surgir durante la aplicación, debido a que los métodos geofísicos aún no han sido totalmente explorados por los ingenieros civiles debido a la falta de exposición y experiencia en este campo a nivel mundial, ocasionando una gran desconfianza en la utilización de estos métodos debido a la mala interpretación de los resultados.

Algunas de las razones se deben: “a la mala planificación de los estudios geofísicos efectuados por ingenieros, los cuales ignoran las técnicas” y “el exceso de optimismo por parte de los geofísicos”, lo cual conduce a la mala reputación de estas técnicas (Clayton *et al.*, 1995; Abidin *et al.*, 2011). La solución para esta dificultad es adquirir un buen asesoramiento geológico durante la planificación y ejecución de la investigación.

Entre las técnicas geofísicas, los métodos geoelectrónicos pueden ser utilizados para medir varios parámetros geotécnicos de forma indirecta, pero presenta una importante limitación y es que las propiedades físicas del suelo necesitan ser correlacionadas con las mediciones de resistividad eléctrica lo cual no resulta ser tan fácil como parece requiriendo experiencia y juicio.

En muy pocos proyectos de obras civiles se utilizan los métodos geoelectricos, debido al desconocimiento de esta valiosa herramienta. Por lo tanto, en esta investigación se utilizó la resistividad eléctrica (ρ) para determinar el contenido de humedad (w) y peso específico (γ) mediante las correlaciones de (w vs ρ) y (γ vs ρ) aplicado a tres diferentes tipos de suelo, cuyos valores de resistividad varían dependiendo de su origen y características.

Actualmente en el país, la técnica y aplicación del método de geoelectrico no ha sido muy difundida evidenciándose pocos estudios como se muestra a continuación:

Montalván *et al.*, (2008) Caracterización geoelectrica del acuífero de la cuenca del Río Olón para propuesta de plan de explotación, ESPOL-FICT, 161p.

Vázquez, (2013). Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo. Proyecto de graduación de *Ing. Civil, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería.*

Cabe mencionar que esta última investigación se fundamentó en analizar varias técnicas geofísicas para detectar, caracterizar y monitorear problemas de movimientos de masas con el objetivo de implementar Sistemas de Alerta Temprana (SAT) en la ciudad de Cuenca e identificar las ventajas, desventajas y limitaciones de cada uno de los métodos.

Por lo tanto, en el Ecuador no se ha encontrado bibliografía relacionada específicamente al tema de investigación propuesta, pero internacionalmente existen varios estudios que han determinado el contenido de humedad y peso específico para diferentes tipos de suelo, por ejemplo: Abidin *et al.* (2013) en Malasia, trabajaron con arena limosa y grava arenosa; Bhatt y Jain (2014) en la India, utilizaron arena; Fallah-Safari *et al.* (2013) en Irán, ocuparon cinco muestras distintas de arcillas y finalmente Aiassa (2008) en Argentina, utilizó suelos limosos. Estos estudios son bastante contemporáneos, motivo por el cual esta investigación experimental será de gran valor científico e inicio para futuras investigaciones.

Se plantea como hipótesis que la resistividad eléctrica se relaciona con el contenido de humedad (w vs ρ) y peso específico (γ vs ρ), mediante un modelo curvilíneo, representado mediante una función potencial. El objetivo es comprobar estas interrogantes utilizando información geotécnica y geoelectrica. En este sentido, surgen preguntas tales como: ¿Será esta técnica una alternativa adecuada para la determinación de las propiedades del suelo?, en el caso de ser así: ¿Podrá la resistividad eléctrica mostrar alguna relación entre las propiedades anteriormente mencionadas que permita cuantificarlos?

Consecuentemente, el objetivo de la presente investigación experimental fue determinar si existe o no alguna correlación entre las propiedades físicas y los valores de resistividad eléctrica de los tres tipos de suelo, bajo condiciones sueltas y compactadas, para éste último parámetro, se modificó la energía de compactación.

1.2 Justificación

Uno de los aspectos más importantes en la ingeniería geotécnica corresponde a la estabilidad de las estructuras tales como: carreteras, túneles, taludes, puentes, presas, etc., al igual que una precisa determinación de las propiedades del suelo es esencial en el diseño y construcción de cualquier obra civil. Los cambios estacionales en el contenido de humedad causan variaciones en la presión de poros, por lo tanto, es de gran importancia la supervisión *in situ* del contenido de agua. Una determinación más precisa del contenido de agua en suelos no saturados es crucial para comprender las propiedades geotécnicas y el comportamiento de las estructuras de tierra. Mientras tanto, la determinación del peso específico de un suelo mediante los métodos de compactación es de gran importancia, debido a que nos permite saber si un terreno puede o no garantizar la estabilización de una estructura. Este método se ve limitado al momento de realizar una gran cantidad de ensayos en el laboratorio, afectando directamente en los costos de la obra y el tiempo de ejecución. Además, la ejecución de un mejor control de compactación disminuye la probabilidad de aparición de problemas asociados a la sobrecompactación y subcompactación.

Para contrarrestar estas dificultades, se propone el uso de métodos geofísicos, los cuales ofrecen superar algunos de los problemas inherentes a las técnicas convencionales en el estudio del suelo (Clayton *et al.*, 1995).

Los métodos geofísicos aplican varios principios básicos de la física para el estudio de la tierra y son ampliamente utilizados en la minería, petróleo, hidrología, arqueología e ingeniería ambiental y geotécnica. Estos métodos se caracterizan por ser ensayos rápidos y no destructivos. Además, proporcionan una caracterización a gran escala de las propiedades físicas en condiciones inalteradas (Abidin *et al.*, 2011).

Los métodos geoelectrónicos por su parte, han sido utilizados con éxito en el campo de la ingeniería civil y tienen el potencial de ser integrados con los métodos convencionales para producir información confiable, mejorando la eficacia en los proyectos de investigación. Además, estos métodos permiten explorar grandes extensiones de suelo siendo menos caros que la exploración convencional por medio de barrenos. Sin embargo, en muchos casos, la interpretación definitiva de los resultados tiende a ser difícil. Por esta razón, se recomienda utilizar estos procedimientos únicamente para trabajos preliminares (Das, 2001b).

Los métodos geoelectrónicos permiten una medición rápida de las propiedades eléctricas del suelo, directamente de la superficie de la tierra a cualquier profundidad, sin la alteración del suelo mediante métodos mecánicos (Abidin *et al.*, 2011). Éste método es ampliamente utilizado en investigaciones geotécnicas en laboratorio e *in situ*. Todos los materiales, incluyendo los suelos y rocas tienen una propiedad intrínseca descrita por la Ley de Ohm, la cual gobierna la relación entre intensidad de corriente y el gradiente del potencial eléctrico, conocida como resistencia eléctrica.

El método geoelectrico es una de las técnicas de exploración geofísicas más antiguas y comúnmente utilizados (Reynolds, 1997). Las investigaciones subsuperficiales mediante los métodos de exploración eléctrica presentan muchas modalidades cada uno con su propio campo de aplicación, ventajas y defectos.

A continuación, se presentan algunas aplicaciones más importantes y difundidos, de los métodos geoelectricos (Orellana, 1972, p.35).

- Investigaciones tectónicas para la búsqueda de petróleo.
- Estudios para la localización de aguas subterráneas.
- Estudios complementarios para cartografía geológica bajo recubrimiento.
- Estudios de cuencas carboníferas.
- Localización de yacimientos de otros minerales útiles.
- Investigaciones de firmes, cimentaciones y desprendimientos de tierras para Ingeniería civil.
- Localización y ubicación aproximada de materiales de construcción.
- Investigaciones a profundidad muy reducida para la localización de objetos y edificaciones enterradas, como guía y ayuda para investigaciones arqueológicas.
- Estudios de zonas muy profundas de la corteza terrestre.
- Estudios geotérmicos.

Por lo tanto, este método proporciona una alternativa eficaz en la evaluación del suelo mediante ensayos efectuados en el laboratorio e *in situ*. En consecuencia, es cada vez más importante recopilar información generada por estos métodos para mejorar la comprensión superficial del suelo. En efecto, la aplicación de estos métodos geoelectricos permite caracterizar varias propiedades del suelo e identificar correlaciones con la geología, el desarrollo de esta área de investigación es un reto para los futuros años.

Además, cabe indicar que el monitoreo de la compactación del suelo a través de la resistividad eléctrica juega también un papel importante en la construcción de obras civiles. El comportamiento ingenieril del suelo como: la compactación, capacidad de carga, asentamientos, fundiciones, etc., presentan una relación directa con el contenido de agua presente en ella. Por tal razón, esta investigación presenta un intento de correlación del contenido de humedad, el peso específico y el valor de la resistividad eléctrica que se obtienen a través de ensayos de laboratorio y comparados con resultados tomados en campo, de tres diferentes tipos de suelos.

En resumen, la ejecución de esta investigación se justifica, debido a que no se han encontrado estudios realizados mediante estos métodos geoelectricos en el país y específicamente en la zona austral que permita un mejor entendimiento sobre el comportamiento de las propiedades físicas del suelo, impulsando así un mejor manejo y entendimiento de nuevas técnicas de monitoreo que tienen primordial importancia en la geotecnia y/o las obras de ingeniería civil.

1.3 Objetivos

➤ **Objetivo general**

Analizar las propiedades físicas de diferentes tipos de suelos del Austro, mediante el empleo de métodos de resistividad eléctrica.

➤ **Objetivo específicos**

1. Analizar la correlación entre la resistividad eléctrica y el contenido humedad de tres diferentes tipos de suelo de la región.
2. Analizar la correlación entre la resistividad eléctrica y el peso específico de tres diferentes tipos de suelo de la región.

1.4 Organización de tesis

El “**Capítulo 1**” muestra el problema que motivó realizar esta investigación, así como la justificación de este estudio y algunas aplicaciones de los métodos geoelectricos. Finalmente, se analizan los objetivos planteados, seguido de la organización de la tesis.

El “**Capítulo 2**” contiene los conceptos fundamentales del método de resistividad eléctrica, donde se especifica la configuración Wenner como herramienta para el estudio y la ecuación que la gobierna. Se cita varios factores que influyen en el valor de la resistividad eléctrica del suelo, así como también, varios métodos geotécnicos necesarios para caracterizar las propiedades de suelo.

El “**Capítulo 3**” describe la metodología, en donde consta el área de investigación, la descripción geológica, la preparación de las muestras de suelos, el análisis experimental de los datos geotécnicos y las mediciones de resistividad eléctrica, a lo que se incluye el análisis estadístico que se utiliza para determinar las correlaciones que se efectúan en la sección 4.

El “**Capítulo 4**” presenta los resultados obtenidos mediante la aplicación de los métodos convencionales en donde se determina la clasificación de los suelos con sus respectivas propiedades físicas características. Además, se indica la comparación entre el contenido de humedad, peso específico y la resistividad eléctrica de las distintas muestras.

En el “**Capítulo 5**” se da a conocer las conclusiones y recomendaciones del estudio.

Finalmente, todos los resultados de los ensayos geotécnicos y geoelectricos se presentan en los anexos, además, se incluye un breve análisis entre el grado de saturación y la resistividad eléctrica, denotando una importante correlación entre estos dos parámetros.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Prospección geofísica

La geofísica es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas que estudia las propiedades físicas de la Tierra (Orellana, 1972). Ésta a su vez, se divide en dos partes: 1.- Geofísica Pura: esta se encarga del estudio de la gravedad, el magnetismo, la electricidad, la conductividad eléctrica y la sismología terrestre. 2.- Geofísica aplicada denominada también prospección geofísica o de “exploración”, se dedica a la aplicación de la geofísica pura, esta técnica se investiga a pocos kilómetros de profundidad entre (0 –10 km) a partir de mediciones realizadas por instrumentos colocados en la superficie terrestre o en el interior de sondeos.

González de Vallejo *et al.* (2002) manifestaron que cada método geofísico explora distintas propiedades del terreno como por ejemplo: gravimetría (densidad), magnético (susceptibilidad magnética), eléctricos (resistividad), electromagnéticos (conductividad eléctrica y permeabilidad magnética), sísmico (velocidad de propagación de ondas sísmicas). La eficacia de los métodos geofísicos depende de la finalidad de la investigación debido a que no se puede establecer alguna relación de superioridad entre ellos. Las técnicas geofísicas, no proporcionan información geológica o características mecánicas del suelo de manera directa, pero los parámetros físicos obtenidos como: densidad, parámetros elásticos, resistividad, parámetros acústicos, etc., pueden ser correlacionados la cual nos permite la calibración de los modelos con los métodos de muestreo directo como las perforaciones. Una de las ventajas que nos proporcionan los métodos geofísicos es que pueden abarcar amplios volúmenes de investigación, debido a que son rápidas y fáciles de emplear en todo tipo de terreno incluso en zonas montañosas, además de ser técnicas no invasivas.

Para poder aplicar un método geofísico en una prospección, es necesario que se presente dos condiciones importantes:

- Presencia de contrastes significativos, es decir, anomalías que se pueden detectar y medir; y,
- Que estos contrastes puedan ser correlacionadas con la geología del subsuelo.

“Los métodos eléctricos de prospección geofísica, también denominados geoeléctricos estudian, por medio de mediciones efectuadas en la superficie del terreno, la distribución en profundidad de alguna magnitud electromagnética, como es la resistividad (ρ)” (de la Rosa, 2013).

Los métodos geoeléctricos comprenden una variedad de técnicas que emplean fuentes naturales (corriente que existe en la naturaleza) o artificiales (corriente artificialmente) aplicadas al suelo. A su vez, según el tipo de corriente que circulen a través del suelo se subdividen en corriente continua y alterna.

2.2 Métodos de resistividad eléctrica

2.2.1 Introducción

La resistividad eléctrica es uno de los métodos de exploración geofísica más antiguos, siendo desarrollados a principios de 1900, aunque no fue hasta 1970 cuando se generalizó el uso de estas técnicas, debido a la carencia de tecnología apropiada para procesar y analizar los datos (Reynolds, 1997). La primera aproximación práctica de los métodos eléctricos lo desarrolló Schlumberger en 1912 al inyectar corriente al suelo mediante una fuente artificial y posteriormente en 1925 Wenner y él, idean la configuración de cuatro electrodos (tetraelectrónico), base de la prospección actual. El método de resistividad eléctrica utiliza corriente continua o corriente alterna de baja frecuencia para investigar las propiedades eléctricas (resistividad) del subsuelo (Reynolds, 1997).

En el método de resistividad, las corrientes eléctricas generadas artificialmente se introducen en el suelo y las diferencias de potencial son medidas en la superficie. Las desviaciones del patrón de la diferencia de potencial esperado para un suelo homogéneo proporcionan información sobre la forma y propiedades eléctricas de las heterogeneidades subsuperficiales (Kearey, 2002). En cuanto mayor contraste eléctrico se presente entre la heterogeneidad y la matriz del suelo más fácil es la detección (Samouëlian *et al.*, 2005). “La resistividad eléctrica de los suelos puede ser considerado como un sustituto de la variabilidad de las propiedades físicas del suelo” (Banton *et al.*, 1997).

La resistividad es una propiedad física de un material, que describe su capacidad para resistirse al paso de la corriente eléctrica, la cual depende de la naturaleza y el estado físico del cuerpo considerado. Contrario a la resistividad, la conductividad es una medida que representa la capacidad de un cuerpo, permitir el paso de corriente eléctrica a través de él. La conducción eléctrica tiene lugar debido al movimiento de cargas, las cuales son desplazadas de la condición de equilibrio original bajo la aplicación de un potencial eléctrico. Sin embargo, la densidad de la carga depende del campo eléctrico aplicado y de la resistividad del material.

El método de resistividad eléctrica se utilizó por primera vez para la exploración de petróleo, gas y prospección de yacimientos minerales conductivos (oro), posteriormente se encontró diversas aplicaciones en el campo de la ingeniería como por ejemplo: la minería, agricultura, arqueología, medioambiente, hidrogeología y geotecnia (Loke *et al.*, 2013; Siddiqui y Osman, 2012).

Los métodos de resistividad eléctrica pueden utilizarse como una importante herramienta para caracterizar las propiedades del suelo (contenido de agua, saturación, relación de vacíos, densidad) sin necesidad de excavar, por lo tanto, es más rápido y relativamente barato en comparación a los métodos geotécnicos.

2.2.2 Principios básicos

El objetivo principal de la realización de los ensayos eléctricos es determinar la distribución de resistividades eléctricas que hay en el subsuelo mediante mediciones desde la superficie, para ello es necesario conocer algunos parámetros.

2.2.2.1 Resistividad real

La resistividad de un material se define como la resistencia entre las caras opuestas de un cubo unitario del material, (Kearey, 2002; Reynolds, 1997). En la Figura 2.1 se muestra un cubo eléctricamente uniforme, de longitud (L) a través del cual pasa una corriente (I), resultando así en una diferencia de potencial (V) entre sus caras opuestas (Reynolds, 1997).

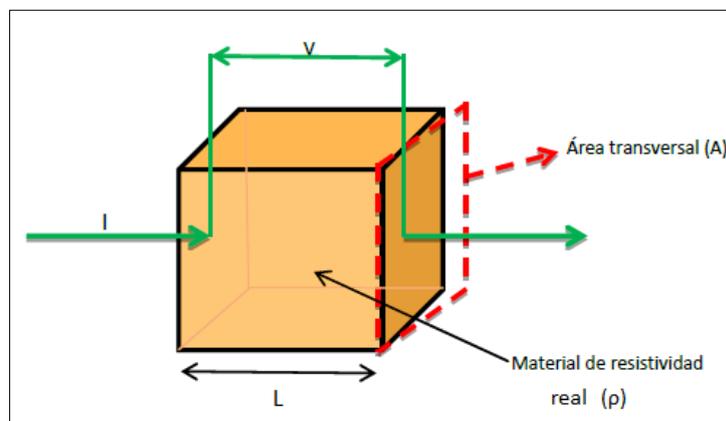


Figura 2.1 Parámetros utilizados en la definición de la resistividad (Gabarrón, 2013).

Para un material dado la resistencia (R) es proporcional a la longitud (L) e inversamente proporcional a la sección transversal (A) del conductor. Ésta relación es expresada por la ecuación 1.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

La constante de proporcionalidad (ρ) se la denomina resistividad “real” del conductor. Según el sistema de unidades elegido, la resistividad se puede medir en ohmios-metro (Ωm) u ohmios-centímetro (Ωcm). La magnitud inversa de la resistividad, $\sigma = 1/\rho$ se denomina conductividad eléctrica y sus unidades están en siemens-metro (Sm/m) o siemens-centímetro (Sm/cm).

La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. De acuerdo con la ley de Ohm la resistencia (R) del conductor se define como la relación entre la diferencia de potencial (V) para la corriente (I) aplicada, como se muestra en la ecuación 2. La resistencia se mide en *ohm* (Ω).



$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

Si se sustituye la ecuación 2 por la resistencia (R) en la ecuación 1 y reorganizamos los términos obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{V}{L} = \rho \frac{I}{A} \quad (3)$$

La relación V/L puede ser expresada como campo eléctrico (E), al suponer que el gradiente de potencial es constante a lo largo de la longitud del conductor, las unidades están dadas en voltios/metros (V/m). Mientras que, la relación I/A es la corriente por unidad de área de la sección transversal del conductor y se denomina densidad de corriente (J) con sus unidades amperios/metro² (A/m²). Ahora la ley de Ohm puede ser escrita mediante la ecuación 4:

$$E = \rho J \quad (4)$$

➤ Conductividad Eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad física de un material que describe la habilidad para resistir el flujo de la corriente eléctrica, magnitud inversa a la conductividad eléctrica. La corriente eléctrica puede ser propagada en las rocas y minerales por medio de tres mecanismos: a) electrolítica, b) electrónica (óhmica); y c) conducción dieléctrica.

- a. Conducción electrolítica.- es el transporte de electricidad por medio de una conducción iónica (por moléculas que contienen un exceso o deficiencia de electrones). Éste método de conducción en suelos y rocas es el más común donde la corriente se mueve a través de los iones del agua de poro. La corriente fluye más lentamente que la conducción óhmica.
- b. Conducción electrónica.- la corriente es transportada rápidamente por los electrones móviles libres en los metales. La alta conductividad de los metales, es por lo tanto, explicado por el gran número de electrones libres en su estructura.
- c. Conducción dieléctrica.- se produce en materiales aislantes, cuando es aplicada una corriente alterna externa, provocando que los electrones se desplacen ligeramente con respecto al núcleo. La conducción dieléctrica en el suelo puede ser despreciable, cuando se utiliza corriente directa (CD) o corriente alterna (CA) de baja frecuencia (Reynolds, 1997).

El fenómeno de conducción eléctrica en los materiales se da como resultado del movimiento de cargas eléctricas, desde su posición de equilibrio original bajo la aplicación de un potencial eléctrico (Aiassa, 2008). La conducción eléctrica ocurre como resultado del movimiento de los iones, las propiedades eléctricas de los suelos están principalmente controlados por el contenido de agua en los poros. Además, la conducción

de la corriente electrolítica se ve afectado por la temperatura y la salinidad del agua de poros, (Hassan, 2014; Samouëlian *et al.*, 2005).

En suelos gruesos los iones pueden desplazarse a través de los poros con pequeña interacción, por lo tanto, la carga superficial de las partículas es despreciable. La conducción eléctrica está gobernada principalmente por la naturaleza del fluido de los poros, relación de vacíos y grado de saturación. Mientras que la conducción eléctrica para suelos finos resulta más compleja, debido al desarrollo de doble capa difusa alrededor de las partículas de arcilla con carga superficial negativa. La doble capa difusa se divide en el denominado plano de corte, el cual separa los iones interiores de los exteriores, (Aiassa, 2008).

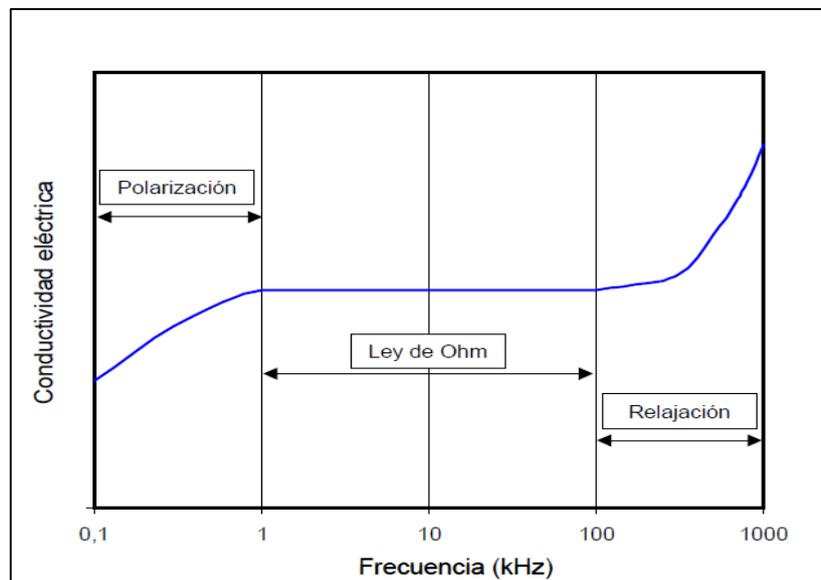


Figura 2.2 Curva de conductividad para suelos arcillosos (Rinaldi y Cuestas, 2002).

Cuando se utiliza corriente alterna (CA) la conductividad eléctrica del suelo depende de la frecuencia aplicada (Aiassa, 2008). Para frecuencias (>100 kHz) la conductividad eléctrica de los iones de doble capa se incrementa, presentándose una dependencia de la frecuencia y provocando el efecto de relajación de la doble capa. Mientras que, para suelos con frecuencias (<100 kHz) la conductividad resulta independiente de la frecuencia. No obstante, para frecuencias inferiores a (<2 kHz) se produce el efecto de polarización de los electrodos. (Rinaldi y Cuestas, 2002) utilizaron corriente alterna y manifestaron que la conductividad eléctrica del suelo resulta independiente de la frecuencia cuando se encuentra en el rango de 2 a 100 kHz, cumpliéndose la ley de Ohm. En la Figura 2.2 se muestra una típica curva de conductividad en suelos arcillosos.

Mientras tanto, cuando se suministra corriente continua al suelo, esta no presenta ninguna frecuencia. El cumplimiento de la ley de Ohm permite, determinar la resistencia de una columna de suelo, debido a que es considerado como un campo eléctrico unidimensional, midiendo la diferencia de potencial entre dos puntos, y la determinación la corriente entre los mismos.

2.2.2.2 Flujo de corriente en suelo homogéneo

Se introduce una corriente (I) en la superficie de una semiesfera uniforme, homogénea y de resistividad (ρ) como se muestra en la Figura 2.3.a. 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. La densidad de corriente (J) es igual a la corriente (I) dividida para el área de superficie ($2\pi r^2$) para un hemisferio de radio (r), sobre el cual la corriente es distribuida. Así la densidad de corriente disminuye con el incremento de la distancia (r) de la fuente de corriente, (Lowrie, 2007; Reynolds, 1997).

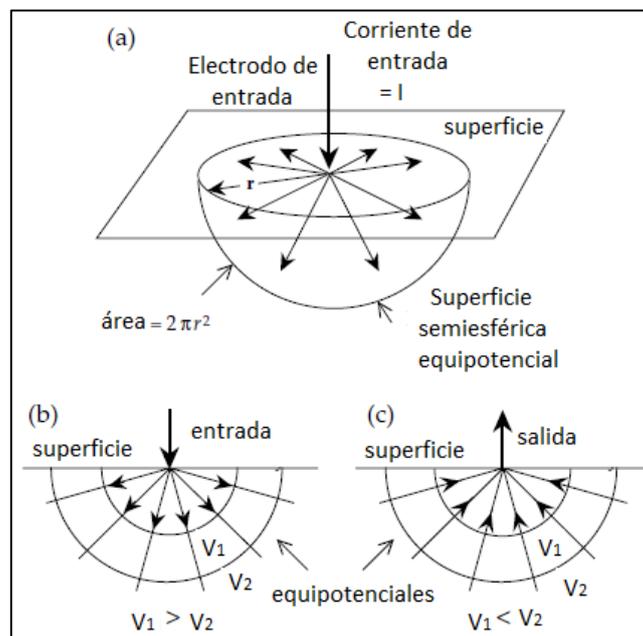


Figura 2.3 Líneas de campo eléctrico y superficies equipotenciales alrededor de un electrodo en un semiespacio uniforme. a) Superficie equipotencial semiesférica, b) líneas de campo radialmente hacia fuera alrededor de una fuente (entrada), c) líneas de campo radialmente hacia dentro alrededor de un sumidero (salida) (Lowrie, 2007).

La diferencia de potencial entre dos puntos ubicados sobre la superficie puede ser descrita por un gradiente potencial ($-\delta V / \delta x$) el cual es negativo, debido a que disminuye en la dirección del flujo de corriente (Reynolds, 1997). El campo eléctrico (E) puede escribirse a través del gradiente de un potencial eléctrico escalar:

$$E = -\frac{\delta V}{\delta r} \quad (5)$$

Reemplazamos la ecuación 5 en la ecuación 4 obtenemos: la diferencia de potencial (δV) a través de una superficie semiesférica de espesor incremental (δr), dada por:

$$\frac{\delta V}{\delta r} = -\rho \cdot J = -\rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad (6)$$

Por lo tanto, el voltaje (V_r) a una distancia (r) desde una fuente de corriente puntual es obtenido por integración:

$$V_r = \int \delta V = - \int \rho \frac{I}{2\pi r^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (7)$$

La constante de integración es cero, ya que, $V_r = 0$, cuando, $r = \infty$ como lo manifiesta, (Kearey, 2002). Si el suelo es un semiespacio uniforme, las líneas de campo eléctrico alrededor de un electrodo fuente, que suministra corriente al suelo, se dirigen radialmente hacia fuera, Figura 2.3.b. Mientras que, alrededor de un electrodo sumidero, donde la corriente fluye fuera del suelo, las líneas de campo están dirigidas radialmente hacia el interior, Figura 2.3.c. Las superficies equipotenciales alrededor de un electrodo fuente o sumidero son hemisferios, si consideramos el electrodo de forma aislada. El voltaje alrededor de una fuente es positivo y disminuye como $1/r$ al aumentar la distancia. El signo de la corriente (I) es negativa en un sumidero, donde la corriente fluye fuera del suelo. Por lo tanto, el voltaje alrededor de un sumidero es negativo y aumenta (llegando a ser menos negativo) como $1/r$ al aumentar la distancia desde el sumidero. Podemos utilizar estas observaciones para calcular la diferencia de voltaje entre un segundo par de electrodos a distancias conocidas de la fuente y sumidero (Lowrie, 2007).

2.2.3 Configuración de los electrodos y factores geométricos

2.2.3.1 Método de los cuatro electrodos

Para una fuente y caída de corriente, el potencial V_P en cualquier punto P en el suelo es igual a la suma de voltajes, de manera que: $V_P = V_A + V_B$ donde V_A y V_B son las contribuciones potenciales de los dos electrodos A (+I) y B (-I) como se muestra en la Figura 2.4

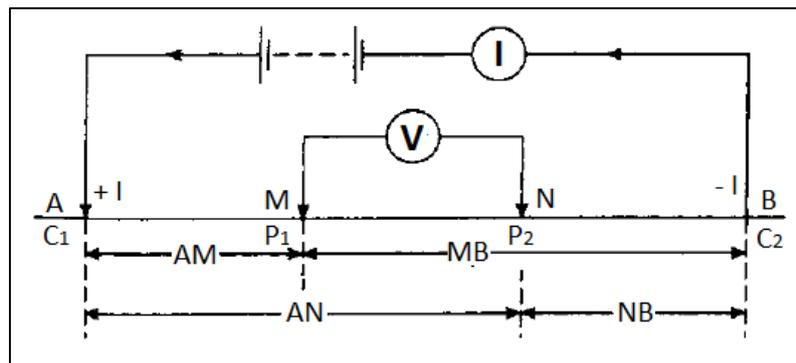


Figura 2.4 Forma generalizada de la configuración de los electrodos para medir la resistividad (Reynolds, 1997).

Los voltajes en los electrodos M y N son:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] \quad V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \quad (8)$$

Sin embargo, es mucho más fácil medir la diferencia de voltaje δV_{MN} , el cual puede ser reescrita como:

$$\delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\} \quad (9)$$

Reordenado esto para que la resistividad ρ es el sujeto:

$$\rho = \frac{2\pi\delta V_{MN}}{I} \left\{ \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\}^{-1} \quad (10)$$

La expresión anterior consta de dos partes, el primer término representa la resistencia (R ; unidades en “ Ω ”) y el segundo término describe la geometría de la configuración del electrodo conocido como factor geométrico (K ; unidades en “m”), el cual depende del arreglo de los electrodos.

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1} \quad (11)$$

La resistividad aparente (ρ_a) y la resistividad real (ρ) únicamente coinciden cuando el subsuelo se considera absolutamente homogéneo.

$$\rho_a = RK, \text{ donde } R = \frac{\delta V}{I} \quad (12)$$

En realidad, el suelo bajo la superficie no se ajusta a un medio homogéneo y por lo tanto, la resistividad obtenida ya no es la resistividad real, pero, la resistividad aparente incluso puede ser negativa. Es muy importante recordar que la resistividad aparente no es una propiedad física del subsuelo a diferencia de la resistividad real. Consecuentemente, todos los datos de campo de resistividad son resistividad aparente mientras que, las técnicas de interpretación son resistividades reales.

Finalmente, la **resistividad aparente** es el valor obtenido como producto de la resistencia medida (R) y el factor geométrico (K) para una configuración dada de electrodos, de acuerdo con la ecuación 12. El factor geométrico toma en cuenta la configuración geométrica de los electrodos (Reynolds, 1997). El suelo en la naturaleza tiene características heterogéneas debido a que se encuentran formados por suelos con diferentes resistividades, obteniéndose resultados aparentes (ρ_a), los cuales son distintos a los reales (ρ). Además, es importante recordar que la resistividad aparente no es una propiedad física del suelo.

2.2.3.2 Configuraciones de los electrodos

Las configuraciones constan generalmente de cuatro electrodos, se ubican en una misma recta y se ordenan de la siguiente manera (A M N B). La pareja de electrodos A “y” B

suministran “corriente” y son los responsables de inyectar la electricidad en el subsuelo, mientras que, los electrodos M “y” N son “de potencial” y se emplea para medir el voltaje generado en el subsuelo por la corriente inyectada.

Las configuraciones utilizadas para determinar la resistividad eléctrica se diferencian entre sí por la distancia y posición de los electrodos de “corriente” respecto a los de “potencial” (Rodríguez, 2005).

Las configuraciones comúnmente utilizadas son las de Wenner, Schlumberger y Dipolo – Dipolo, caracterizándose el uso de los cuatro electrodos. En la Figura 2.5 se observa esquemáticamente las tres configuraciones mencionadas anteriormente.

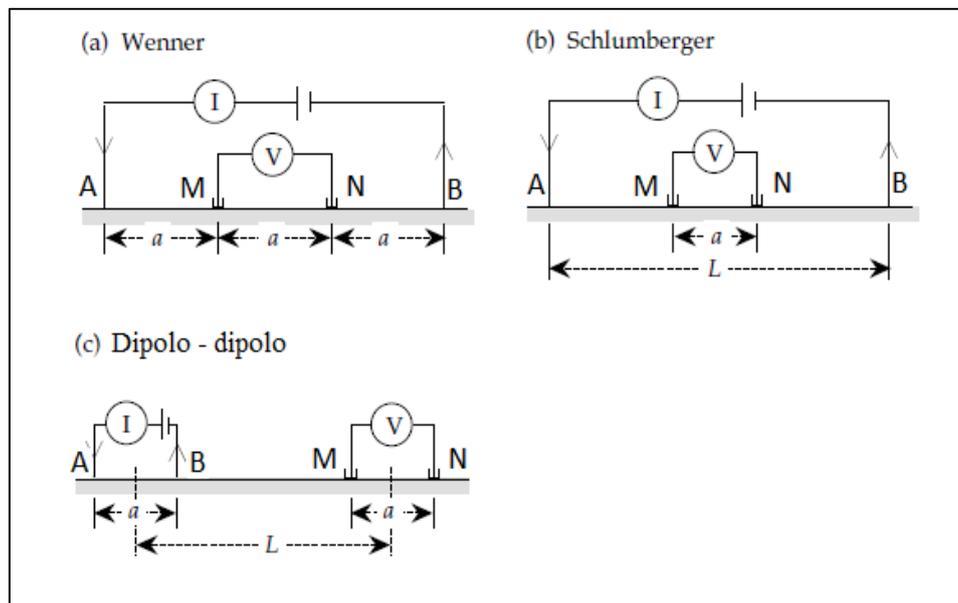


Figura 2.5 Configuraciones de los electrodos: a) Wenner, b) Schlumberger, c) Dipolo – dipolo (Lowrie, 2007).

La configuración Wenner presenta distancias iguales entre todos los electrodos $AM = MN = NB$. En la configuración Schlumberger la distancia MN es menor que la distancia entre los electrodos de corriente AB. Finalmente, en la configuración Dipolo – Dipolo la distancia entre los electrodos de corriente con los de potencial son iguales $AM = NB$, mientras que la distancia entre el par de electrodos centrales MN difiere (Figura 2.5) mayor detalle de las dos últimas configuraciones se puede encontrar en (Reynolds, 1997; Orellana, 1972; Lowrie, 2007). Para cada configuración se obtuvo un factor geométrico como se describe en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Factores geométricos de las diferentes configuraciones (Hassan, 2014).

Configuración	Factor geométrico (K)
Wenner	$2\pi a$
Schlumberger	$\pi n(n+1)a$
Dipolo-Dipolo	$\pi n(n+1)(n+2)a$

La **Configuración Wenner** propuesta en esta investigación es ampliamente utilizada debido a que tiene una geometría simple, por lo tanto, fácil de usar. Tal configuración está conformada por cuatro electrodos alineados y simétricos con respecto al punto de medición, de modo que $AM = AN = a$, y $MB = NB = 2a$. La profundidad de la medición depende de la distancia entre electrodos pero no del tamaño de los mismos. Además, esta configuración minimiza los problemas de contacto entre los electrodos y el suelo. Insertando los valores previamente determinados en la ecuación 10, se obtuvo que el coeficiente geométrico se simplifica a lo expresado en la ecuación 12.

$$K = 2\pi \left\{ \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right] - \left[\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right] \right\}^{-1} = 2\pi \left[\frac{2}{a} - \frac{2}{2a} \right]^{-1} = 2\pi a \quad (13)$$

Por lo tanto la resistividad aparente (ρ_a) en una configuración Wenner es:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (14)$$

En la Figura 2.6, se muestra la “**señal de contribución**” para la configuración Wenner observándose las curvas de contorno de las contribuciones hechas por cada unidad de volumen de la subsuperficie para el voltaje medido en la superficie, (Reynolds, 1997). Las señales de contribución de mayor magnitud ocurren en lugares muy próximos a los electrodos de medición, ya que, a medida que se acercan a ellos se obtienen valores muy altos.

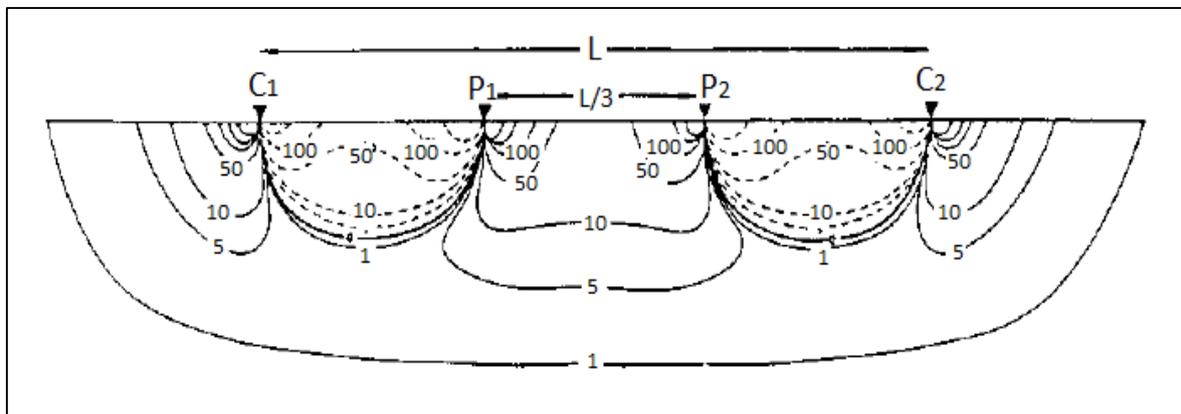


Figura 2.6 Sección de la señal contribución para la configuración Wenner (Reynolds, 1997).

Por otra parte, las señales de contribución cercanas a la superficie del terreno, positiva o negativa se cancelan entre sí, por lo que, las únicas contribuciones son las que provienen de lugares más profundos, presentándose señales largamente aplanados como se puede observar en la primera unidad de contorno de la Figura 2.6. Lo que significa que para medios de estratificación horizontal, el arreglo Wenner tiene una alta resolución vertical (Reynolds, 1997).

Las configuraciones unidimensionales de cuatro electrodos se utilizan comúnmente en el laboratorio para la calibración de la resistividad eléctrica y para el campo en sondeo eléctrico vertical (Samouëlian *et al.*, 2005).

A escala de laboratorio, el método de cuatro electrodos esta descrito en la norma ASTM G57 (2012) y BS 1377 – 3 (1990). La norma ASTM G57 (2012) utiliza un recipiente rectangular para la medición de la resistividad del suelo denominada caja de Miller, a pesar que es fácil de utilizar, la geometría y la forma de la caja no ofrece la flexibilidad en los procedimientos necesarios para el desarrollo de las correlaciones entre el contenido de humedad, peso específico y resistividad. Mientras tanto, la norma BS 1377 – 3 (1990) presenta una celda estándar de forma cilíndrica para medir la resistividad, mediante la cual se puede realizar la medición de forma rápida. Por lo tanto, el método del cilindro Wenner fue adoptado para el trabajo de laboratorio en esta tesis.

En la Figura 2.7 se muestra la configuración de medición de acuerdo al método de cuatro electrodos. Los dos electrodos exteriores se utilizan para inyectar la corriente y la diferencia de potencial es medido entre los dos electrodos interiores.

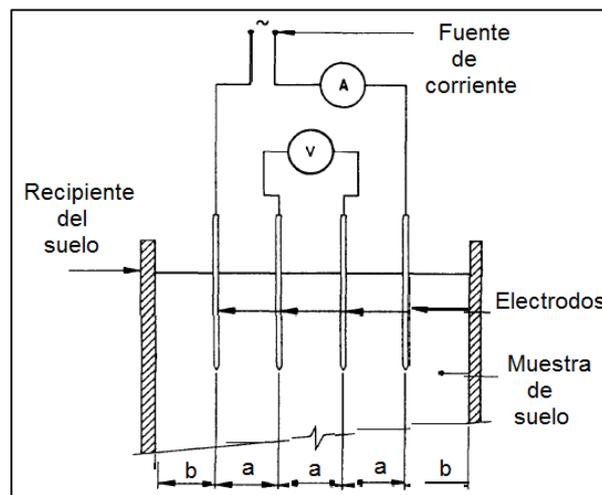


Figura 2. 7 Método del cilindro Wenner (BS 1377-3, 1990).

En la configuración Wenner, la resistividad es relativamente sensible a los cambios verticales del subsuelo, especialmente bajo el centro del arreglo, mientras que, la sensibilidad disminuye en el caso de los cambios horizontales. En general, esta configuración es muy eficiente para estructuras horizontales, pero relativamente pobre en la detección de cuerpos delgados y verticales (de la Rosa, 2013).

En cuanto a la profundidad de investigación, suele ser aproximadamente 0,5 veces el espaciamiento entre electrodos “a”. Comparado con otras configuraciones, el arreglo de Wenner tiene una profundidad de investigación un poco limitada (Loke, 1999).

2.2.4 Sondeo eléctrico vertical (SEV)

El sondeo eléctrico vertical (SEV) permite determinar el número de capas del subsuelo, mediante la variación de las resistividades con respecto a la profundidad, a partir de la medida de la diferencia de potencial en la superficie, (Orellana, 1972). La principal aplicación de este método tiene lugar en regiones cuya estructura geológica presenta estratos horizontales. El SEV permite obtener perfiles verticales de relacionando la resistividad con profundidad.

El método consiste en separar de manera sucesiva los electrodos de corriente y/o potencial (o ambos) del punto central, con el objetivo de aumentar profundidad de investigación. Hay varias configuraciones de los electrodos que pueden usarse para el sondeo eléctrico vertical (Wenner, Schlumberger y Dipolo - Dipolo), la configuración Schlumberger es la más utilizada debido a que únicamente se mueven los electrodos de corriente A y B.

La profundidad a investigar depende de la penetración, distribución de corriente y la configuración electrodica, y para cada una de ellas la variación de las distancias se hace en diferentes proporciones.

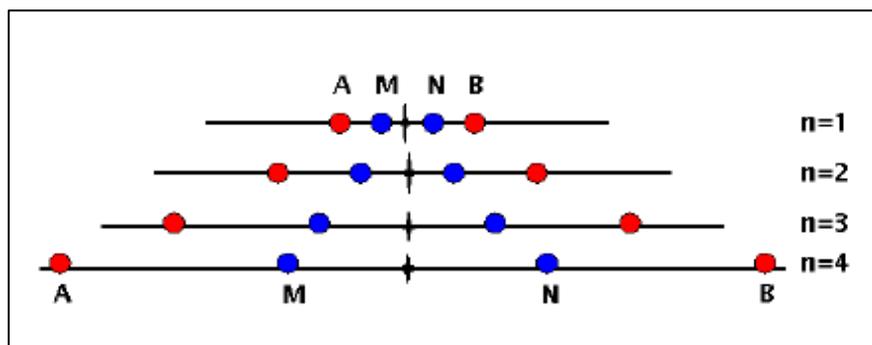


Figura 2.8 Sondeo eléctrico vertical Wenner (Molina, 2006).

Para la **configuración Wenner** los cuatro electrodos tienen que ser movidos a una nueva posición, incrementándose la separación entre los electrodos, las distancias AM, MN y NB se ven afectados por un factor “n”. Manteniéndola constante durante todas las mediciones. La distancia utilizada para realizar los perfiles de resistividad es AM (Molina, 2006), como se ilustra en la Figura 2.8.

2.2.5 Método de interpretación

Los valores de resistividad eléctrica pueden obtenerse a través de una sencilla relación ($\rho = 2\pi aR$), la cual estará en función de la diferencia de potencial aplicada (ΔV), intensidad de corriente (I) y la separación de los electrodos (a).

En esta investigación experimental efectuada en el laboratorio, al suelo se considera homogéneo e isotrópico, presentándose en condiciones ideales, la cual rara vez se encuentra en la práctica. Mientras tanto, en las mediciones de campo se consideran que

las resistividades no cambian con la profundidad, tal suposición es muy necesario en la evaluación de los datos obtenidos debido a que el suelo en condiciones naturales es heterogéneo.

La interpretación de los resultados de resistividad eléctrica es inherentemente subjetiva y depende principalmente de las habilidades, experiencia y conocimientos de quien analiza los datos (ASTM G57, 2012). Además, tales resultados necesitan ser complementados con información geológica y/o geotécnica independiente.

La interpretación de los resultados de esta investigación se enfocó en la correlación de la resistividad eléctrica del suelo con el contenido de humedad y peso específico. Estas relaciones son de gran importancia para caracterizar las propiedades físicas del suelo.

2.2.6 Factores que influyen en el valor de la resistividad en suelos

La resistividad eléctrica del suelo está en función de varias propiedades, entre los que se incluye el contenido de agua (grado de saturación), compactación (densidad), composición del fluido de poros (concentración de sales y solutos), constituyentes sólidos (forma y tamaño de las partículas, mineralogía), disposición de vacíos (porosidad, distribución y conectividad de poros) y temperatura (Samouëlian *et al.*, 2005; Hassan, 2014). Estos parámetros afectan a la resistividad eléctrica de diferentes grados y maneras.

Por su parte, el aire es un medio aislante (*i.e.* infinitamente resistivo), la resistividad de una solución en agua se encuentra en función de la concentración iónica, mientras que la resistividad de los granos sólidos se relaciona con la densidad de cargas eléctricas en la superficie de los constituyentes (Samouëlian *et al.*, 2005, p.5).

Mediante investigaciones experimentales se ha logrado establecer correlaciones entre resistividad eléctrica y cada una de las características del suelo.

❖ Porosidad

En suelos saturados, la variación de la resistividad eléctrica con la porosidad puede ser representada mediante la ley de Archie.

$$\rho_o = a\rho_w\eta^{-m} \quad (15)$$

Donde tenemos: ρ_o = resistividad del suelo, ρ_w = resistividad eléctrica del fluido de los poros, η = porosidad (dado como la fracción de poros llenos de fluido), a y m constantes empíricas que dependen del tipo de suelo. Ésta relación empírica se determinó a través de mediciones de laboratorio sobre muestras de arena limpia, siendo aplicable únicamente a suelos con un bajo contenido de arcillas. Además, se considera que todos los poros están llenos de agua, excluyendo la posibilidad de que estén llenos de aire (Gabarrón, 2013). Finalmente, se supuso que la conducción eléctrica únicamente se produce debido a la presencia del fluido en los poros.

❖ Contenido de agua

El contenido de agua de los poros del suelo por sí misma es muy importante, ya que la forma de transmisión de corriente en la gran mayoría de los suelos es de tipo electrolítico, de forma que se necesita de la existencia de agua en el suelo para que los iones se puedan desplazar y transmitir la corriente (Gabarrón, 2013).

La relación entre el contenido de agua y la resistividad, viene dada por una modificación de la ley de Archie (ecuación 15), en el caso de suelos no saturados, la disminución del grado de saturación fue acompañada por un incremento de la resistividad debido a la sustitución parcial del agua de los poros por aire. La ley de Archie para suelos no saturados se expresa de la siguiente manera:

$$\rho = \rho_o S_r^{-b} \quad (16)$$

Donde la (ρ) es la resistividad del suelo no saturado, (S_r) el grado de saturación y (b) parámetro relacionado con el grado de saturación. Por lo tanto, la resistividad eléctrica depende del grado de saturación, o contenido de agua en los poros del suelo.

La relación entre la humedad y resistividad se obtiene mediante curvas de calibración, para la cual se ha propuesto numerosas ecuaciones. Hassan (2014) detalló que varios autores han implementado distintas modificaciones a la ley de Archie para estimar el contenido de agua (polinomial, exponencial y potencial). Por ejemplo: McCarter (1984) y Fukue *et al.* (1999) estimaron el contenido agua, en arcillas mediante una función potencial.

Basados en un extenso estudio experimental, Shah y Singh, (2005) propusieron una generalización de la ley de Archie para suelos de grano fino expresado como:

$$\rho = \rho_w \theta^{-m} \quad (17)$$

Donde ρ es la resistividad del suelo, θ el contenido volumétrico de agua, ρ_w es un parámetro de ajuste relacionada con la resistividad del agua de poro “y” m es constante. Calamita *et al.* (2012) correlacionaron la resistividad eléctrica con el contenido de agua volumétrico, resaltando la función potencial como se muestra en la Figura 2.9, (citado por Hassan, 2014, p.44). Estos estudios mostraron que al incrementar el contenido de agua en el suelo la resistividad eléctrica disminuye, aplicado a diferentes tipos de suelo.

Samouëlian *et al.* (2005) manifestaron que, para suelos con un contenido de agua < 15%, la resistividad eléctrica disminuye rápidamente con el incremento del contenido de agua.

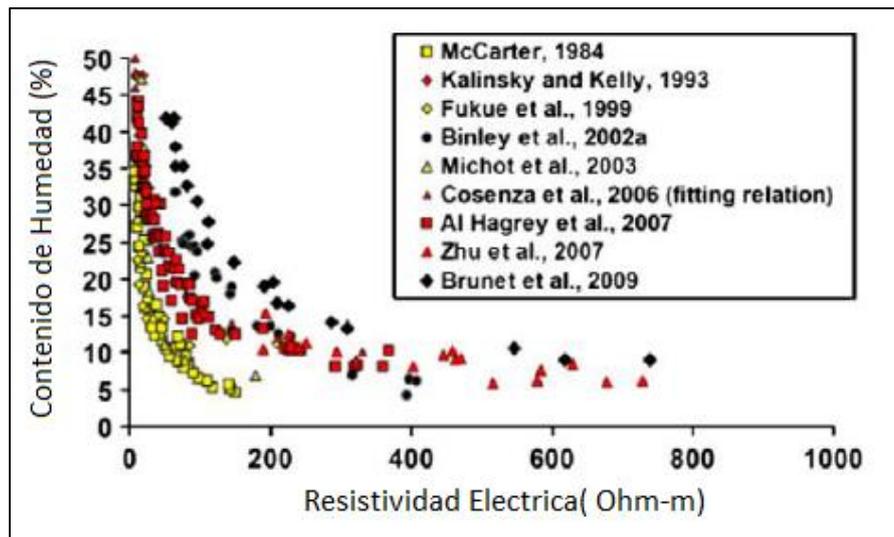


Figura 2.9 Relación entre el contenido de humedad y la resistividad eléctrica para diferentes suelos. (Amarillo: arcilla, Rojo: marga y Negro: arena (Hassan, 2014).

❖ Compactación

La densidad aparente del suelo depende de la cantidad relativa de aire y componentes sólidos en un volumen dado de suelo. Si la densidad aparente disminuye la cantidad de aire aumenta llenándose en la porosidad e incrementando la resistividad eléctrica en varios cientos de ohm-m (condiciones secas y sueltas del suelo). En cambio, si la densidad aparente aumenta, el contenido de aire y la resistividad eléctrica también disminuyen. La resistividad eléctrica es muy sensible a cualquier variación en la densidad del suelo.

Seladji *et al.* (2010) manifestaron que ante un incremento en la densidad del suelo la resistividad eléctrica disminuye como consecuencia del cambio de porosidad. Además, la conductancia eléctrica se incrementará debido a que los microporos estarían más conectados al tener un mayor de contacto entre las partículas de suelo, esta investigación se efectuó en suelos arcillosos.

Abu-Hassanein *et al.* (1996) estudiaron la influencia de las condiciones de compactación del suelo en la resistividad eléctrica, referidas a la humedad y energía de compactación, en suelos arcillosos y limosos. Los resultados indicaron que, la resistividad eléctrica de suelos compactados en rama seca es mayor que la de suelos compactados en rama húmeda. La humedad de compactación juega un papel importante, debido a que, la resistividad eléctrica es más sensible a las variaciones de humedad inferiores al óptimo, mientras que en rama húmeda la resistividad eléctrica resulta independiente a la humedad de compactación. De igual forma, la influencia de la energía de compactación resulta más significativa en rama seca, donde a mayor energía de compactación menor resistividad eléctrica. Mientras que, cuando se compacta en la rama húmeda, la resistividad eléctrica es independiente de la energía de compactación (citado por Aiassa, 2008, p.86).

❖ Composición del fluido de poro

La resistividad del fluido de los poros está siendo controlada por la concentración de sales disueltas en el suelo. Al existir mayor concentración de sal en el suelo, la conductividad se incrementa (disminuyendo la resistividad). Varios autores han reportado una fuerte relación entre la resistividad y la salinidad.

Aiassa (2008) manifestó que la conductividad eléctrica también depende de la movilidad de los iones presentes en el fluido de los poros, por lo que la estimación del contenido de humedad mediante mediciones de resistividad, requiere el conocimiento de la concentración de iones disueltos. La presencia de distintos iones en una solución (H⁺, OH⁻, Na⁺, Cl⁻, etc.) afectan de manera diferente a la conductividad, debido a que cada ion presenta diferente movilidad (Samouëlian *et al.*, 2005).

❖ Temperatura

Samouëlian *et al.* (2005) manifestaron que se produce agitación iónica con el incremento de la temperatura, mientras que la viscosidad del fluido disminuye. Por lo tanto, en un suelo la resistividad eléctrica disminuye con el incremento de la temperatura del suelo (Aiassa, 2008).

Las mediciones de resistividad eléctrica deben realizarse bajo temperatura controlada de 25°C, o bien efectuar la corrección de los resultados mediante la siguiente expresión,

$$\rho_T = \frac{\rho_{25^\circ C}}{1 + \alpha(T - 25^\circ C)} \quad (18)$$

donde ρ_T = resistividad eléctrica a la temperatura (T), $\rho_{25^\circ C}$ = resistividad eléctrica a 25°C y el factor de corrección ($\alpha = 0,0202^\circ C^{-1}$).

2.2.7 Resistividades de algunos materiales naturales

Los diferentes materiales que componen el subsuelo en la naturaleza presentan un amplio rango de resistividades, valores que oscilando desde $1,6 \times 10^{-8} \Omega m$ para la plata pura hasta los $10^{16} \Omega m$ del sulfuro puro (Reynolds, 1997). Mientras tanto, una roca se comporta como un aislante eléctrico con resistividades que van desde $10^5 - 10^7 \Omega m$.

Las rocas ígneas y metamórficas, influenciados por el grado de fractura y el porcentaje de agua que rellenan tales fracturas presentan altos valores de resistividad, al igual, que las rocas sedimentarias debido a su porosidad, característica que permite almacenar un mayor contenido de agua en los poros. Para este último caso, el rango de resistividades suele ser bastante amplio, ya que depende del grado de porosidad de la roca y la salinidad de la fase líquida del suelo. Reynolds (1997) en su libro presenta una lista completa de los materiales geológicos más comunes con sus respectivas resistividades.

Los sedimentos sueltos sin consolidar presentan valores de resistividad inferiores a los de las rocas sedimentarias. Además, los suelos también presentan una amplia variación

en las resistividades (ρ), la resistividad de las arenas es superior al de los limos y arcillas, como se observa en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Valores características de resistividad eléctrica (Reynolds, 1997).

Tipo de suelo	Resistividad (Ωm)
Arcilla	1 – 100
Limo	10 - 150
Arena	10 – 1000
Arena arcillosa / arcilla arenosa	30 – 215
Arenisca	50 – 10^7

Reynolds (1987), realizó una investigación en el norte de África, el cual mediante la interpretación de las resistividades pudo evaluar, que el material cerca de la superficie es una arena arcillosa o una arcilla arenosa. La resistividad para materiales arenosos está cerca de 100 Ωm y decrece con el incremento del contenido de arcilla cercano a 40 Ωm hasta llegar a ser la arcilla un constituyente dominante. La arcilla casi libre de arena se encuentra entre el rango de 1 a 10 Ωm . Según Orellana (1972), las arenas impregnadas de agua salada presentan resistividades inferiores a los resultados obtenidos en la Tabla 2.2 y puede descender hasta 0,1 Ωm .

2.3 Métodos geotécnicos

2.3.1 Características del suelo

❖ *Distribución granulométrica*

En la naturaleza la forma y tamaño de las partículas del suelo varían considerablemente (Liu y Evett, 2008; Das, 2001a). Las propiedades de un suelo están muy influenciadas por el tamaño de sus partículas y la distribución del tamaño de grano a lo largo de la masa del suelo. Generalmente, se utilizan dos métodos para determinar la distribución del tamaño de las partículas del suelo: análisis por tamizado y análisis hidrométrico. Además, estos dos métodos pueden combinarse en el caso de un suelo que tenga granos finos y gruesos.

➤ **Análisis por tamizado**

Las propiedades de un suelo están muy influenciadas por el tamaño de sus partículas y distribución del tamaño de grano en la masa del suelo. Por lo tanto, en muchas aplicaciones de ingeniería, no es suficiente saber que un suelo está dado por arcilla, limo, arena o grava, (Liu y Evett, 2008).

El análisis de tamizado consiste en sacudir una cantidad determinada de suelo seco, a través de un conjunto de mallas estandarizadas utilizando un vibrador mecánico. La

cantidad de suelo retenido en cada malla se pesa y se determina el porcentaje acumulado del suelo que pasa a través de cada malla.

➤ **Análisis hidrométrico**

El análisis granulométrico mediante el uso del hidrómetro se basa en el principio de sedimentación de las partículas de suelo en agua. Se fundamenta en la dispersión de una muestra de suelo en agua, tales partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por facilidad, se asume formas esféricas de las partículas de suelo, por lo tanto, la velocidad caída se expresa por la ley de Stokes (ecuación 19).

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\gamma_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (19)$$

Dónde: D = diámetro de la partícula del suelo, G_s = peso específico de los sólidos del suelo, η = viscosidad del agua, γ_w = peso específico del agua, t = tiempo y L = longitud efectiva (longitud medida desde la superficie del agua en la probeta al centro de gravedad del hidrómetro).

❖ **Relaciones volumétricas y gravimétricas**

Para desarrollar las relaciones volumétricas y gravimétricas separamos al suelo en tres fases (*i.e.* sólido, agua y aire) como se muestra en la Figura 2.10. Las relaciones volumétricas comúnmente usadas para las tres fases en un elemento de suelo son relaciones de vacíos, porosidad y grado de saturación. Mientras tanto, las relaciones gravimétricas más comunes son el contenido de humedad, el peso específico y peso específico seco (Das, 2001a). Estas relaciones son empleadas en muchos cálculos de problemas de suelos, como son: la determinación de la estabilidad de las masas de suelo, la estimación de los asentamientos de los edificios o para especificar el grado de compactación necesario en la construcción de terraplenes.

➤ **Relación de los vacíos (e)**

Es la relación entre el volumen de aire y el volumen total (aire, agua y sólidos). La relación de vacíos está presentado por la ecuación 20,

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (20)$$

donde V_s = volumen de sólidos, V_v = volumen de vacíos.

➤ **Porosidad (η)**

Se define como la razón del volumen de vacíos al volumen de sólidos,

$$\eta = \frac{V_v}{V} \quad (21)$$

donde V_v = volumen de vacíos, V = volumen total.

➤ **Grado de saturación (S_r)**

Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos,

$$S_r(\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (22)$$

donde V_w = volumen de agua, V_v = volumen de vacíos.

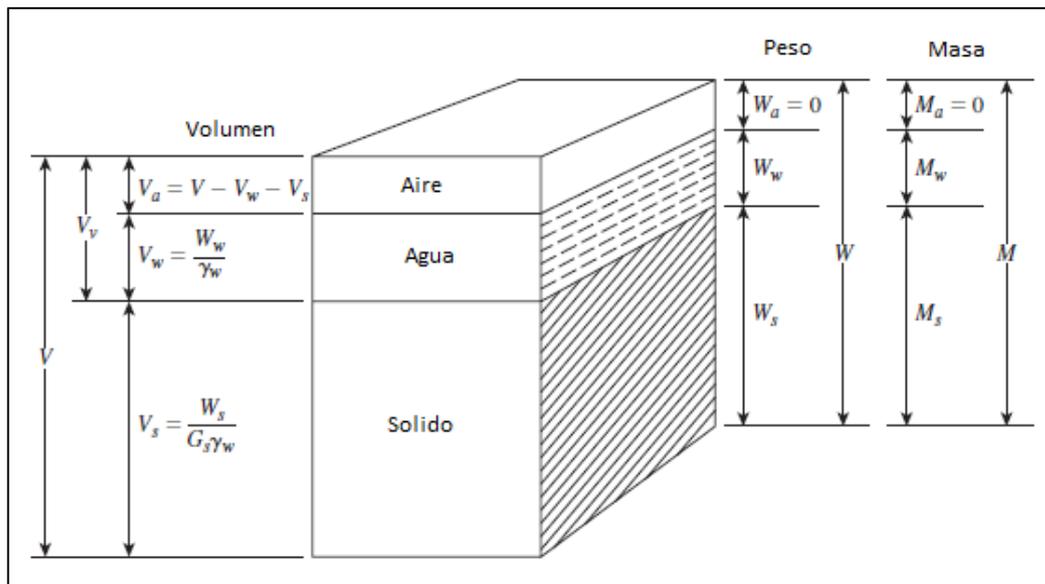


Figura 2.10 Diagrama de los componentes de suelo (Liu y Evett, 2008).

➤ **Contenido de humedad (w)**

La cantidad de agua presente en el suelo es uno de los parámetros más importantes que necesita saber un ingeniero geotécnico y civil. El contenido de humedad es la relación entre la masa de agua contenida en los espacios de los poros del suelo o roca y las partículas de masa sólida del material, donde W_s = peso de sólidos, W_w = peso de agua.

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (23)$$

➤ **Peso específico (γ)**

Es el peso de los sólidos incluido el del agua por unidad de volumen total del suelo, como se observa en la Figura 2.10,

$$\gamma = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w + V_a} = \frac{W}{V} \quad (24)$$

donde W = peso total del suelo, V = peso total del suelo.

➤ **Peso específico seco (γ_d)**

Es el peso de los sólidos por unidad de volumen total del suelo, como se observa en la Figura 2.10,

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (25)$$

donde W_s = peso de los sólidos, V = volumen total del suelo.

❖ **Gravedad específica del suelo (G_s)**

La gravedad específica es llamada también “densidad de los sólidos o peso específico relativo” y se define como la relación entre la masa de una unidad de volumen de los sólidos de un suelo y la masa del mismo volumen de agua a 20°C. La gravedad específica de la mayoría de partículas minerales constituyentes de un suelo, varía entre 2,60 a 2,90; como se observa en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Gravedad específica de algunos suelos (Das, 2001b).

Tipo de suelo	G_s
Arena de Cuarzo	2,64 - 2,66
Limo	2,67 - 2,73
Arcilla	2,70 - 2,90
Yeso	2,60 - 2,75
Loes	2,65 - 2,73
Turba	1,30 - 1,90

❖ **Compactación**

La compactación es un proceso de densificación del suelo mediante la aplicación de energía mecánica, lo cual implica reducción en la relación de vacíos, cambio de volumen por expulsión de aire de poros e incremento del peso específico seco (Aiassa, 2008). A continuación se presenta tres efectos en el suelo debido a la compactación: (1) un incremento de la resistencia al corte de los suelos, (2) una disminución en el futuro asentamiento del suelo, (3) disminución en la permeabilidad (Liu y Evett, 2008).

“Estos efectos son beneficiosos en la construcción de terraplenes para carreteras, presas de tierra y muchas estructuras de la ingeniería. La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. La compactación también disminuye la cantidad de asentamientos indeseables de las estructuras, e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes” (Das, 2001a). Hay varios factores que afectan a la compactación del suelo, los cuales, pueden ser categorizados como contenido de humedad, esfuerzo de compactación y el tipo de suelo.

Contenido de humedad.- la humedad de compactación tiene un efecto dominante en muchas de las propiedades de los suelos compactados. La humedad en el suelo produce un efecto dual de capilaridad y lubricación. En suelos relativamente secos (*i.e.* poca humedad) predomina la capilaridad, provocando una elevada resistencia de fricción la cual se opone a la fuerza de compactación. Al aumentar el contenido de humedad en el suelo mediante el mismo método y energía de compactación, las partículas se van ordenando de mejor manera debido a la lubricación del agua adicional, reduciéndose la resistencia al corte. Si continuamos incrementando el contenido de agua en el suelo se llegara hasta un “punto” donde las pequeñas cantidades de aire no puedan ser reducidas por la compactación, en este “punto” el suelo tiene el máximo peso específico seco (γ_{dmx}) y humedad óptima (w_{op}). Posteriormente, si se adiciona más humedad en la muestra, los vacíos igualan el volumen de contenido de agua y aire dando como resultado un suelo compactado con mayor cantidad de vacíos y menor peso unitario seco, llegando este suelo a la saturación.

El peso específico de compactación (γ) se calcula como se expresa en la ecuación 26,

$$\gamma = \frac{W}{V_{(m)}} \quad (26)$$

donde W = peso del suelo compactado en el molde, $V_{(m)}$ = volumen del molde, γ = peso específico de compactación.

El peso específico seco (γ_d) puede ser calculado, sabiendo el peso específico (γ) y el contenido de agua en el suelo compactado,

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad (17)$$

donde w = porcentaje de humedad, γ_d = peso específico seco máximo.

El contenido de agua bajo el cual se alcanza el máximo peso específico (γ_{dmx}) se llama contenido de humedad óptima (w_{op}) y se ilustra en la Figura 2.11.

El tipo de suelo.- tiene una gran influencia, debido a la distribución del tamaño de grano, forma de los granos del suelo, la gravedad específica de los sólidos del suelo y la cantidad y tipo de minerales arcillosos presentes. Finalmente, el esfuerzo de compactación.- también influye debido que intervienen varias condiciones, como el número de golpes, número de capas, el peso del martillo, y la altura de caída.

Si el esfuerzo de compactación por volumen unitario del suelo es alterado, la curva de agua-peso específico también cambiará. En la Figura 2.11 se ilustra la influencia de la energía de compactación de una arcilla arenosa: con el número de golpes por incremento de capa (*i.e.* energía de compactación por unidad de volumen), los incrementos de los valores de peso específico seco y contenido de humedad óptima.

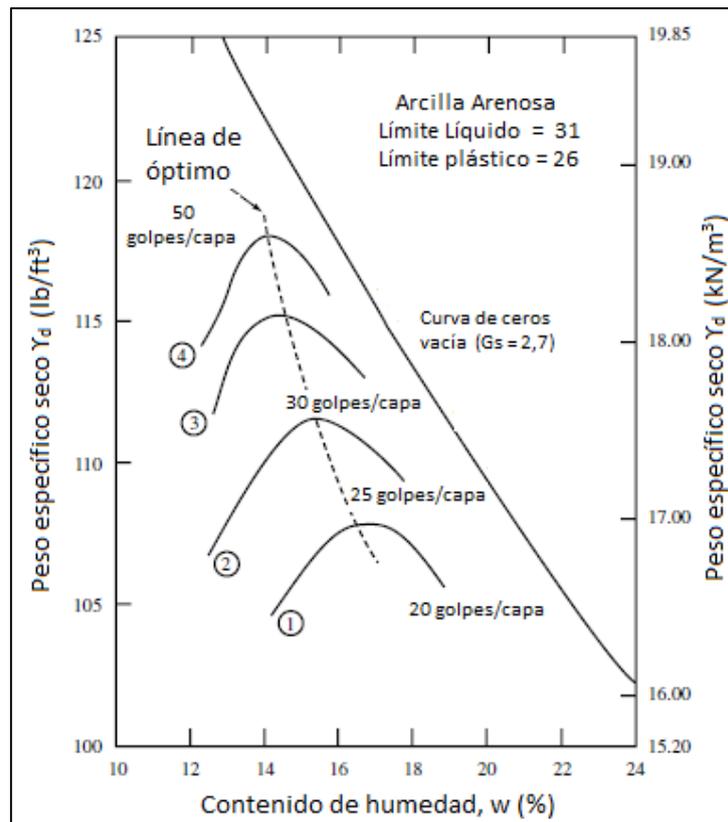


Figura 2.11 Efectos de la energía de compactación sobre una arcilla limosa (Liu y Evett, 2008).

La energía aplicada durante la compactación con un martillo que cae de una cierta altura está dada por la ecuación 28. De esta forma,

$$E_c = \frac{N_g * N_c * P_m * H_c}{V_m} \quad (28)$$

donde E_c = energía de compactación, N_g = número de golpes por capa, N_c = número de capas, P_m = peso del martillo, H_c = altura de caída del martillo, V_m = volumen del molde.

Los ensayos de compactación más utilizados bajo condiciones de laboratorio le corresponden al Próctor Estándar y al Próctor Modificado con una energía de 591,3 kN-m/m³ y 2696,0 kN-m/m³, respectivamente. Das. (2001) manifestó que la diferencia fundamental entre los dos ensayos es que el Próctor modificado “representa mejor las condiciones de campo”. Además, el peso específico seco máximo (γ_{dmax}) se ve incrementado acompañado de una disminución del contenido de humedad óptima (w_{op}), en comparación al Próctor Modificado.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Área de investigación

Los sitios de recolección de las muestras de suelo y mediciones de resistividad eléctrica realizadas en campo, se ubicaron en la parroquia Cuenca (sector Miraflores) y en la parroquia Turi (sector la Cárcel), pertenecientes al cantón Cuenca capital de la provincia del Azuay ubicada al sur del Ecuador, como se observa en la Figura 3.1. Mientras que, la investigación experimental se ejecutó en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

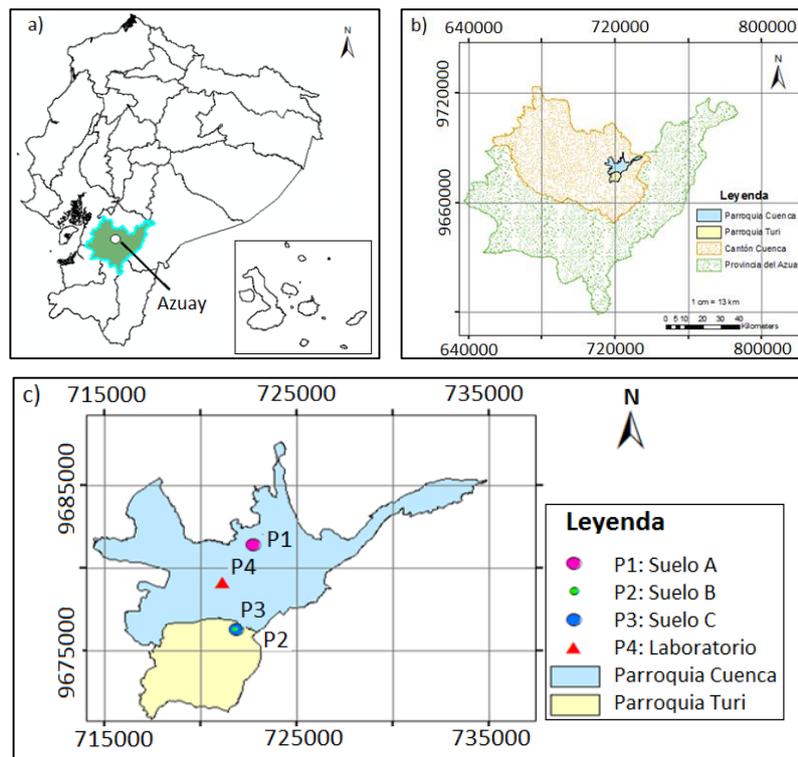


Figura 3.1 Mapa de ubicación de los sitios de muestras y análisis experimental: a) Provincia del Azuay, b) Cantón Cuenca, c) Parroquias Cuenca y Turi.

En la Tabla 3.1 se ubican los sitios de recolección de muestras de acuerdo con la geología del terreno.

Tabla 3.1 Designación de los sitios de muestreo.

Código	Sector	Formación	Litología
P1 (Suelo A)	Miraflores	Arcillas Varvadas	arcillas Varvadas
P2 (Suelo B)	La Cárcel	Mangán	lutitas
P3 (Suelo C)		Mangán	areniscas

3.1.1 Geología

En los sitios de recolección de muestras se identificó a la Formación Mangán (Mm) y Arcillas Varvadas, como se observa en la Figura 3.2 y se especifica en la Tabla 3.1. Basabe, (1998) describió a estos suelos como macizos de muy baja resistencia, terrenos cohesivos de mediana o baja resistencia y friccionantes sueltos.

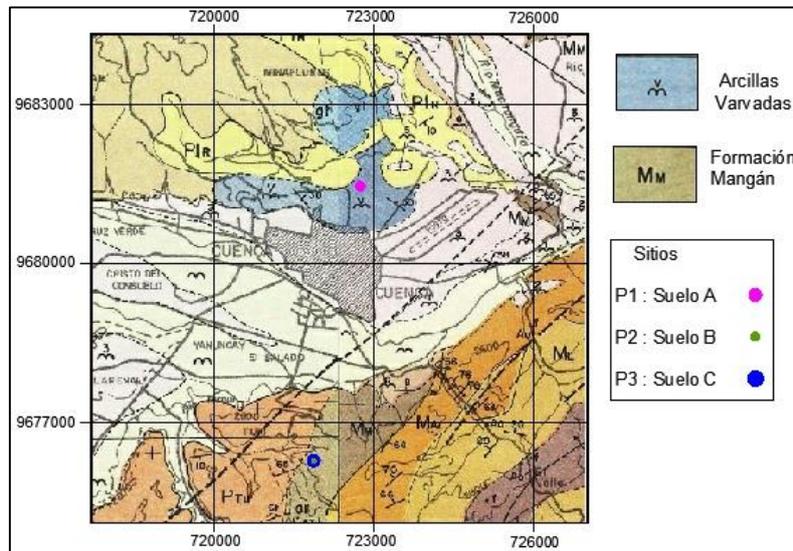


Figura 3.2 Mapa Geológico de las zonas de recolección de las muestras y ensayos de campo (IGM, ÑV-E Azogues Hoja 73; NV-F Cuenca Hoja 53).

❖ Arcillas Varvadas (Qv)

Las arcillas Varvadas son de origen lacustre, su edad geológica se remonta al pleistoceno. Un depósito de arcillas, limos y limolitas finamente estratificados de color habano claro a habano oscuro, oxidados y fragmentados se ubican al norte del cantón Cuenca, la estratificación que presenta es de origen estacional. Con respecto al comportamiento geotécnico, estas arcillas son sensibles a la saturación y al remoldeo, en estado seco este suelo tiene una tendencia de mediana a baja consistencia. Además, presenta baja resistencia al corte paralelamente a la estratificación y en estado húmedo. Son depósitos incompetentes y presentan alta expansibilidad, algunos parámetros físicos de las arcillas Varvadas (Qv), se presenta en la Tabla 3.2.

El rango de susceptibilidad al movimiento del suelo se encuentra entre mediano y alto. En estado seco es deleznable y colapsable en pendientes bajas a moderadas, en estado saturado y con sobrecarga. Para cimentaciones se recomienda reemplazo de suelos, para muros de contención control de drenaje superficial y subterráneo.

❖ Formación Mangán (Mm)

La edad de la Formación Mangán se dio a inicio del Mioceno -Tardío, se considera como la secuencia más importante y la primera de la serie más joven de la cuenca sedimentaria de Cuenca (Basabe, 1998). Litológicamente hay una secuencia de limolitas, lutitas y

areniscas fino-granulares. Bristow (1973) señala que en la parte inferior todos los suelos son de color claro; en la parte media se encuentran lutitas asociadas con vetas de carbón y en la parte superior aflora una arenisca tobácea grueso café.

Con respecto al comportamiento geotécnico, la Fm. Mangán tiene una alternancia finogranular dura-blanda, predominando los estratos fisiles (las lutitas son sensibles a la humedad), en los cuales las condiciones de saturación disminuyen la resistencia al corte hasta la rotura; roturas limitadas por los estratos competentes. Sin embargo, en zonas con predominio de materiales fisiles, todo el macizo puede estar involucrado en grandes zonas inestables cuando se desarrollan grandes presiones de poros. Basabe (1998) presentó algunos parámetros físicos de la Formación Mangán, las cuales se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Rangos del peso específico de la Formación Mangán y Arcillas Varvadas (Basabe, 1998).

Clasificación SUCS	Formación Mangán		Arcillas Varvadas
	ML – CL	SC	ML – CL
γ (kN/m ³)	18 – 21	21 – 22	13 – 16

ML-CL: facie fina fisil e incompetente; SC: facie granular

Actualmente la Fm. Mangán es altamente susceptible a movimientos del terreno debido a los estratos incompetentes y la sobrecarga, sobretodo la saturación de sus materiales fisiles. La susceptibilidad se ve incrementada por la mala utilización y cortes inadecuados del terreno. El material de la Fm. Mangán puede ser utilizado en rellenos al mezclar las lutitas con las areniscas. Además, son de fácil excavación con maquinaria pesada.

3.1.2 Tipos de suelos

❖ Arcillas Varvadas

Las arcillas Varvadas presentan un alto contenido de finos, se caracterizan por tener aproximadamente el mismo espesor consecutivamente. Las varvas son capas estrictamente formadas durante una ciclicidad anual, estas se forman durante el congelamiento - descongelamiento de la superficie de los lagos originados de la fusión glaciaria. La resistencia al corte a lo largo de las varvas horizontales son mucho menor que transversalmente. La conductividad hidráulica es mayor en la dirección horizontal que vertical (Mitchell y Soga, 2005).

❖ Lutitas

Las rocas sedimentarias compuestas por partículas del tamaño de arcillas y limos se les denominan lutitas, y a ellas pertenecen las limolitas, arcillolitas y lodolitas. Desde el punto de vista de la estabilidad de taludes las lutitas son uno de los materiales más complejos. “De acuerdo con el grado de solidificación las lutitas varían en su comportamiento. Las

lutitas de grado bajo tienden a desintegrarse después de varios ciclos de secado y humedecimiento” (Suárez, 1998).

Varias clases de lutitas son muy resistentes pero la mayoría presentan una resistencia al cortante, de mediana a baja. Las lutitas pueden ser arcillosas, limosas, arenosas o calcáreas de acuerdo con los tamaños y composición de las partículas. En ocasiones tienen una presencia de roca cementada y en otras el de un suelo con capas relativamente sueltas. Las arcillolitas son las lutitas con alto contenido de arcilla, lo cual las hace muy fítiles y susceptibles a deslizamiento.

❖ Areniscas

Las areniscas son una forma de arena endurecida por procesos geológicos. Se clasifican de acuerdo con el tamaño de sus granos como fina, media o gruesa y de acuerdo con la naturaleza de los materiales cementantes. El tamaño de las partículas varía de 60 μm . a varios mm y están cementados por otros minerales, con frecuencia por el cuarzo precipitado. Las areniscas aunque tienden a ser resistentes, en ocasiones son relativamente débiles cuando su cementación ha sido pobre. El comportamiento de la arenisca meteorizada depende de la clase de cemento, (Suárez, 1998).

3.2 Análisis de investigación experimental

El objetivo de este estudio fue establecer relaciones entre las propiedades geotécnicas y la resistividad eléctrica de tres diferentes tipos de suelos. El material fue obtenido en distintos sectores de la ciudad de Cuenca, como se señala en la sección 3.1.

Las propiedades físicas del suelo como: el contenido de humedad, la gravedad específica de los sólidos, la granulometría y los límites de Atterberg (Límite líquido, Límite plástico), se determinaron mediante ensayos geotécnicos efectuados en el laboratorio. Además, mediante el ensayo de compactación Próctor Modificado se determinó el peso específico seco máximo y la humedad óptima, para cada uno de los suelos propuestos en esta investigación.

La resistividad eléctrica también fue medida en el laboratorio, el contenido de agua en el suelo se modificó de condiciones secas a húmedas aplicando una energía de compactación determinada. Las mediciones de resistividad eléctrica se las realizaron en condiciones sueltas y compactas. En condiciones sueltas únicamente varía la cantidad de agua en el suelo, mientras que en condiciones compactas varía el contenido de humedad y la energía de compactación. Un extenso programa experimental de laboratorio se ejecutó para alcanzar los objetivos del presente estudio. Finalmente, entre los ensayos efectuados también se realizó una medida de resistividad eléctrica en el campo.

3.2.1 Análisis de datos geotécnicos

3.2.1.1 Propiedades físicas

❖ Contenido de humedad

El contenido de humedad (w) fue definida como la relación del peso del agua en una muestra para el peso de los sólidos. Se eligió una muestra representativa del suelo y se determinó su peso húmedo, posteriormente se colocó en el horno. Una vez seco el material fue pesado, ensayo realizado bajo la norma ASTM D 2216. Este método también se utilizó para determinar el contenido de humedad de los límites de Atterberg (LL y LP) y compactación.

❖ Peso específico

El peso específico (γ) se define como peso total (sólidos + agua) dividido por el volumen total. Se inicia cortando la muestra de suelo en forma de prisma rectangular y se pesa (W_m), esta se cubre con parafina y se pesa $W(m+p)$, nuevamente este espécimen se pesa sumergida en agua $W(m+p)_s$, restamos $W(m+p) - W(m+p)_s$ y dividimos para el peso específico del agua (γ_w) obteniendo el volumen de la muestra más parafina. Ahora restamos $W(m+p) - (W_m)$ y dividimos para el peso específico de la parafina (γ_p) obtenido el volumen de la parafina. Finalmente, restamos los dos resultados obtenidos y determinamos el volumen de la muestra, al dividir el peso para el volumen de la muestra tendremos el peso específico del suelo de una muestra inalterada.

❖ Gravedad específica de los sólidos

La gravedad específica de los sólidos del suelo, G_s , fue definida como la relación del peso unitario del material dado para el peso unitario del agua. Los tres tipos de suelo utilizados en esta investigación se caracterizan por un tamaño de grano fino. Todo el material paso por el tamiz No.4 (4,75 mm), requisito previo para utilizar este procedimiento.



Figura 3.3 Determinación de la masa del frasco volumétrico más lechada.

Posteriormente, se utilizó un picnómetro previamente calibrado, en este instrumento de vidrio se introdujo una muestra de suelo y se agregó agua hasta formar una lechada,

posteriormente se extrajo el aire atrapado entre las partículas de suelo mediante un baño María y se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente (20 °C) como y lo especifica la norma ASTM D 854 y se observa en la Figura 3.3.

Inmediatamente se determinó y registro la masa del picnómetro (suelo + agua), dicha mezcla fue colocada en el horno, para luego medir la masa seca de los sólidos del suelo. Este procedimiento se efectuó dos veces por cada una de las muestras de suelo y se obtuvo un valor promedio.

La gravedad específica de los sólidos fue utilizada en el análisis granulométrico en el método por hidrómetro y el peso específico del suelo.

❖ **Distribución del tamaño de partículas**

La distribución del tamaño de partículas es una de las características más importantes en el suelo con respecto a las implicaciones en la ingeniería, entre las cuales nos indica como el suelo interactúa con el agua. La distribución del tamaño de las partículas gruesas y finas se determinó de acuerdo con la norma ASTM D 422.

La distribución del tamaño de las partículas gruesas $>$ a 0,075 mm (tamiz No 200) fue determinado mediante una separación mecánica por tamizado. Mientras que, para las partículas finas menores $<$ a 0,075 mm se determinó por sedimentación a través de un análisis hidrométrico. Las fracciones de material gruesos (retenido en la malla No 200) y finos (pasa la malla No 200) fueron utilizados para la clasificación del suelo.

Los resultados obtenidos fueron presentados en un gráfico semilogarítmico conocido como curva de distribución de tamaño de partículas. La abscisa correspondiente a la distribución del tamaño de las partículas se representó a escala logarítmica, mientras que, el porcentaje de finos se utilizó a escala aritmética. Por lo tanto, el gráfico permitió leer con facilidad el porcentaje de partículas de arena, limo y arcilla en cada muestra de suelo.

❖ **Análisis granulométrico por tamizado**

Se pesó 500 g de muestra y se determinó el contenido de humedad, inmediatamente el suelo fue lavado y la mezcla (agua + suelo) se colocó sobre la malla No 200, con el fin de eliminar el contenido de finos disueltos en el agua. El suelo fue secado al horno y la distribución del tamaño de las partículas se llevó a cabo utilizando el juego de tamices estándar US (# 4, 10, 40, 100, 200 y fondo) como se observa en la Figura 3.4.a. Posteriormente se agitó durante 5 minutos en la tamizadora mecánica y se pesó el material retenido en cada tamiz. Se calculó el % retenido parcial, el % retenido acumulado, el % que pasa y se dibuja la curva granulométrica.

❖ **Análisis granulométrico por hidrómetro**

El procedimiento se basó en la sedimentación de las partículas del suelo en una probeta de agua. Fue expresado por la ley de Stokes, la cual manifiesta que la velocidad de sedimentación del suelo está basada sobre el tamaño, forma y peso de las partículas del

suelo y viscosidad del agua. Por lo tanto, el análisis hidrométrico mide los cambios de la gravedad específica de un suelo suspendida en agua durante un tiempo determinado.



Figura 3.4 Análisis granulométrico por: a) Tamizado e b) Hidrométrico.

Se utilizó una muestra de suelo que pasó el tamiz N°200 (75 μm) y se pesó la cantidad de 50 g. Se determinó las correcciones por defloculante y punto cero (Cd) y la corrección por menisco (Cm). La muestra se colocó en una cápsula de 250 ml y se agregó 125 ml de una solución que es un agente dispersante (hexametáfosfato de sodio + agua) y se dejó reposar durante 24 horas. Posteriormente la lechada suelo-agua se colocó en un vaso dispersante y se agitó mecánicamente durante 1 minuto, se transfirió el material en suspensión a un cilindro de sedimentación de 1000 ml y se completó con agua a una temperatura de 20°C. Antes de iniciar el ensayo, se agitó el cilindro de sedimentación volteándolo de arriba hacia abajo, con el objetivo de remover los sedimentos del fondo y lograr una suspensión uniforme. Se colocó el cilindro de sedimentación sobre la mesa y se introdujo el hidrómetro para tomar lecturas a 30, 60 y 120 segundos después se extrajo el hidrómetro de la suspensión colocándose en un cilindro con agua limpia. También se registró la temperatura de la suspensión mediante un termómetro, este procedimiento se continuó realizando para tiempos de: 4; 8; 15; 30; 60; 120; 240; 360; 1260; 2310 min. Éste procedimiento se muestra en la Figura 3.4.b.

➤ Límites de Atterberg

Para determinar los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) de las muestras del suelo se utilizó la norma ASTM D 4318.

❖ Límite líquido

Las muestras de los suelos para este ensayo pasaron a través del tamiz N°40 (425 μm). Se utilizó el dispositivo de Casagrande para determinar el límite líquido y una herramienta de corte estándar. Se eligió una cierta cantidad de suelo, la cual fue colocada en un recipiente y mezclada con agua. Posteriormente, se amasó repetidamente una porción

del suelo y se colocó en el dispositivo. Mediante la herramienta de corte estándar se efectuó una ranura en el centro del dispositivo que se encuentra el suelo. La copa del dispositivo se levanta y se deja caer desde una altura de 10 mm. Se continuó con el proceso hasta que la ranura se cerró alrededor de 12 mm.

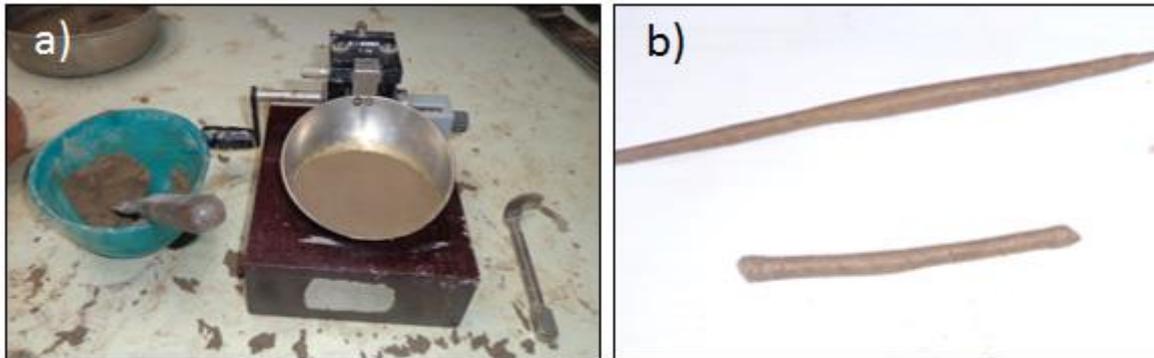


Figura 3.5 a) Ensayo del límite líquido y b) Ensayo del límite plástico según la norma ASTM 4318.

El ensayo se repitió cinco veces y posteriormente se graficó el contenido de humedad en función del número de golpes. El límite líquido (LL) correspondió al contenido de humedad a 25 golpes y la intersección con la recta. Éste procedimiento se realizó para los tres tipos de suelos propuestos en esta investigación. En la Figura 3.5.a se observa el material ubicado en el dispositivo de Casagrande.

❖ Límite plástico

Para determinar el límite plástico se utilizó residuos de material del ensayo anterior (LL), una cantidad entre (20 a 30) g de suelo, de ahí se seleccionó una pequeña porción aproximadamente de 2 g, este material fue amasado y enrollado con la palma de la mano hasta hacer un hilo de un diámetro de 3,2 mm (1/8 pul), este procedimiento se realizó sobre un pedazo de papel para disminuir el contenido de agua del suelo hasta que aparezca grietas en él, o se quiebre bajo la presión del amasado, como se ilustra en la Figura 3.5.b.

❖ Índice de plasticidad

Se determina mediante la diferencia entre el límite líquido (LL) y el líquido plástico (LP).

❖ Clasificación del suelo

Las muestras de los suelos fueron clasificadas de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), utilizando los resultados de los ensayos granulométricos (tamices e hidrómetro) y de los límites de consistencia (límites líquidos, límites plásticos e índices de plasticidad).

La arena incluye todas las partículas menores que el tamiz No. 4 (4,75 mm) y mayores que el No. 200 (0,075 mm). Los granos menores al tamiz No. 200 se identificó como contenido de finos, los cuales se subdividieron en limos > 0,002 mm y arcillas < 0,002

mm, aunque es muy difícil de clasificarlos, ya que existen suelos más finos que 0,002 mm que no necesariamente son arcillas, este sistema es usado usualmente por los ingenieros geotécnicos. Mayor detalle se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Clasificación del suelo basado en el tamaño de grano (Liu y Evett, 2008).

Sistema de Clasificación Unificada (SUCS)	Grano Grueso				Grano fino	
	Grava Fina	Arena Gruesa	Arena Media	Arena Fina	Limo	Arcilla
Apertura (mm)	19,0 - 4,75	4,75 - 2,00	2,00 - 0,425	0,425 - 0,0075	Fino < 0,075	
No. de malla	(3/4 pul. - No.4)	(No.4 - No.10)	(No.10 - No.40)	(No.40 - No.200)	(limo o arcilla)	

❖ Compactación

La compactación es la densificación del suelo por remoción del aire, lo que requiere energía mecánica (Das, 2001a).

El ensayo de compactación Próctor Modificado consistió en tomar una cantidad de 5500 g de suelo, que pasó a través del tamiz No 4 (4,75 mm) se mezcló con agua hasta producir cinco muestras de suelo con diferente contenido de humedad. Se ensambló el molde, la base y el collar de extensión, todo el conjunto fue pesado antes del ensayo.



Figura 3.6 Ensayo de compactación Próctor Modificado: a) Herramientas b) Muestra enrazada y pesada.

El suelo fue compactado en cinco capas, para cada uno se aplicó 56 golpes utilizando un molde de (152,4 mm) de diámetro, a una altura de caída del pisón de 457,2 mm y peso de pisón de 44,5 N. Posteriormente el collar del molde fue retirado y el suelo adicional por encima del molde fue removido, Figura 3.6.a. La masa del molde + suelo fue medido en la balanza, Figura 3.6.b. Finalmente, se extrajo una pequeña muestra del suelo compactado para determinar el contenido de humedad.

Este procedimiento se repitió en cinco ocasiones y se obtuvo la curva de compactación, de donde se determinó el contenido de humedad óptimo (w_{op}) y peso específico seco máximo (γ_{max}). Este ensayo se realizó 4basado en la norma ASTM D1557, método C.

3.2.2 Análisis de datos medidos la resistividad eléctrica

Materiales y equipos

➤ Equipo geoelectrico

El equipo geoelectrico utilizado fue un resistivímetro marca PASI modelo 16SG24-N. Éste dispositivo es un sistema combinado entre la reflexión/refracción sísmica y tomografía eléctrica. Se utiliza principalmente para localizar cavidades, estudios de contaminación por agua salada en los acuíferos costeros, monitoreo de deslizamientos y represas.

El equipo utilizado para medir la resistividad eléctrica de los suelos está constituido por:

- ❖ Resistivímetro PASI modelo 16SG24-N (CPU).- se encarga de ejecutar de forma automática toda la secuencia de las medidas predeterminadas (tipo de dispositivo electrónico, espaciamiento y número de electrodos, número de medidas a realizar), verifica el buen estado de las conexiones, almacena digitalmente todos los valores de resistividad. El interior del equipo contiene un milivoltímetro y miliamperímetro.
- ❖ Link. Box (control de gestión).- es un equipo de retransmisión, que determina el funcionamiento de cada electrodo.
- ❖ Energizador (P – 100T).- genera suficiente energía para el ensayo.
- ❖ Batería.- es la fuente de alimentación de todo el sistema.



Figura 3.7 Equipos del Resistivímetro PASI modelo 16SG24-N.

- ❖ Electrodos de acero inoxidable.- barras metálicas a modo de electrodos cuyo número variará en función del problema, con una longitud ($L = 50$ cm) y diámetro de ($\varnothing = 1$ cm). conectar los electrodos.
- ❖ Conectores (o terminales).- son pequeños cables de cobre con pinzas en los extremos, se encargan de conectar los electrodos al cable eléctrico

- ❖ Cable multiconductor.- tiene una longitud de 85 m, con conexiones cada 5 m, para conectar los electrodos.

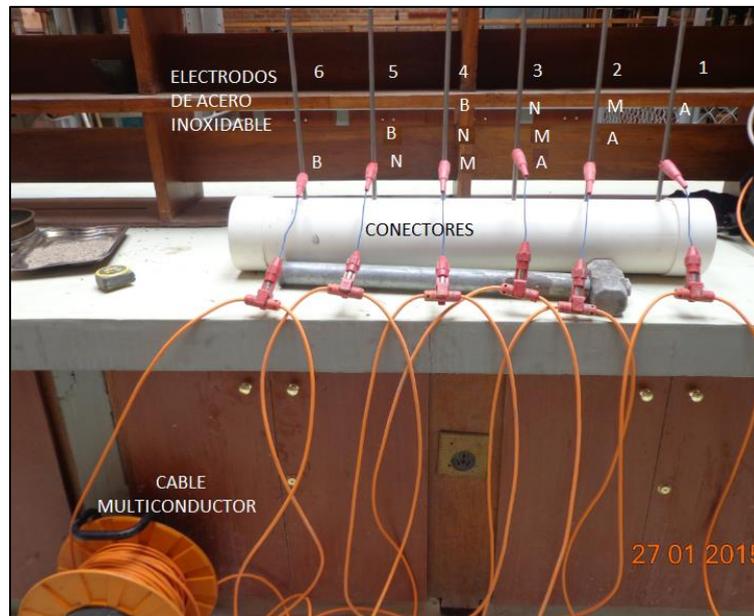


Figura 3.8 Accesorios del Resistivímetro PASI modelo 16SG24-N.

Las mediciones de resistividad eléctrica se efectuaron mediante el resistivímetro marca PASI (Torino - Italia), este equipo tiene una memoria interna que almacena la información de las lecturas realizadas en cada uno de los ensayos. Presenta una pantalla táctil que nos permite elegir varias opciones según la necesidad de la investigación, para nuestro caso se eligió la configuración Wenner, el número de electrodos y el número de medidas a realizar.

De acuerdo con la configuración Wenner, los electrodos de corriente se ubicaron a los extremos y se los designó con las letras (A “y” B), mientras tanto, los electrodos de voltaje se los identificó con las letras (M “y” N), Figura 3.8. Para esta investigación se usó 6 electrodos, ubicados de derecha a izquierda, lo que nos permitió identificar el grupo de electrodos utilizados en cada medición. Se realizaron tres lecturas de resistividad en la secuencia que muestra la Figura 3.8.

Para medir la diferencia del voltaje y transmitir la corriente eléctrica a los electrodos, se utilizó un cable multiconductor que fue conectado al (Link Box) y a cada uno de los electrodos mediante los bornes del cable y conectores, como se muestra en la, Figura 3.9.c. Los electrodos utilizados son de acero inoxidable, este material minimiza el efecto de polarización del electrodo y mantiene un buen contacto con el suelo.

Medición en laboratorio

El sistema empleado para esta investigación consistió en un tubo de cloruro de polivinilo (PVC) de alta resistencia con las siguientes dimensiones: diámetro ($\Phi = 16$ cm) y longitud ($L = 100$ cm), a lo largo del cilindro se realizaron seis agujeros equidistantes a una

distancia de ($a = 15$ cm) entre cada orificio dividiendo al tubo en cinco partes y dejando a los extremos un espacio de 12,5 cm. Los extremos del cilindro fueron presionados a través de tapones PVC ($\Phi = 16$ mm) para evitar que no se disgregue el material y crear un campo eléctrico unidimensional a través de la muestra.

Previamente, los suelos (A, B y C) fueron disgregados, cada material pasó a través del tamiz No. 4 para posteriormente ser pesada en una balanza con capacidad de 50 kg, como se observa en la Figura 3.9.a. Mientras tanto, una probeta graduada de 1000 ml fue utilizada para medir la cantidad de agua. Finalmente, para obtener las muestras de suelo con diferentes contenidos de humedad, la mezcla entre el material y el agua fue homogeneizada en una concretera, las condiciones del suelo cambiaron de secas a húmedas.

Las mediciones de resistividad eléctrica se realizaron variando el contenido de humedad del suelo aproximadamente de 5 a 35% y energía de compactación correspondiente a condiciones sueltas y compactas (10, 20 y 35) golpes, como se detalla en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 La energía de compactación transformada en número de golpes.

Energía de compactación (KN-m/m ³)	# de golpes
0	Suelto
101,18	10
202,37	20
354,16	35

La compactación del material en el interior del tubo PVC se efectuó con el pisón utilizado en el Próctor Modificado (peso de pisón = 44,5 N y altura de caída del pisón = 457,2 mm) Figura 3.9.c, el material fue colocado en 10 capas con un espesor aproximado de 10 cm por capa. Mientras tanto, las muestras en condiciones sueltas que se introdujo en el tubo PVC únicamente estuvieron afectadas por el contenido de humedad sin utilizar ninguna energía para compactar.

En el laboratorio se efectuó la medición de la resistividad eléctrica del suelo de acuerdo con la norma (BS 1377-3, 1990).

1. Las muestras de suelo, previamente homogenizado, se colocó en el interior del cilindro de PVC se tapó y pesó, en condiciones sueltas y compactas Figura, 3.9.b.
2. Se insertaron los electrodos a una profundidad de 7,5 cm en la muestra de suelo a través de los agujeros efectuados previamente en el tubo PVC.
3. El equipo geoelectrico y accesorios fueron conectados, los conectores y el cable multiconductor fueron acoplados a los electrodos y conectados al resistivímetro (CPU), como se muestra en la Figura 3.9.c.
4. Los electrodos fueron conectados en orden (A, M, N, B), las mediciones de resistividad se ejecutaron en secuencia, para la primera lectura el resistivímetro

únicamente registró a los electrodos (1, 2, 3, 4), en la segunda lectura (2, 3, 4, 5) y tercera lectura (3, 4, 5, 6), como se muestra en la Figura 3.8. En el caso, que los electrodos no estén haciendo contacto con el suelo o se encuentren conectados inapropiadamente, los resultados de resistividad eléctrica serán inválidos.



Figura 3.9 Resistividad eléctrica, a) Peso del material, b) Compactación, c) Configuración y medición.

5. Mediante el resistímetro, se eligió la configuración Wenner, # de electrodos = 6, # de lecturas = 3 y se designó el nombre del archivo donde se almacenaron los resultados.
6. La corriente eléctrica fue suministrada por una batería, la cual fue transmitida al resistímetro, energizador (P- 100T) y Link Box, este último equipo se encarga distribuir la corriente al cable multiconductor y a su vez a los electrodos mediante los conectores, como se observa en la Figura 3.9.c. Además el Link Box especifica cuál de los electrodos mide la corriente y voltaje.
7. Como resultado de la medición se obtuvo los valores de corriente, voltaje y resistencia de cada uno de los ensayos, las cuales, fueron almacenadas con el nombre del archivo previamente determinado en el equipo.
8. Posteriormente, la resistencia medida se multiplicó por el factor geométrico ($k=2\pi a$) correspondiente a ($k = 0,942$) de la configuración Wenner, para obtener la resistividad de la muestra.

Medición en Campo

Se realizó una sola medición de resistividad eléctrica *in situ*, de los lugares especificados en la investigación, como se muestra en la Figura 3.10, con el propósito de comparar con los resultados obtenidos en el laboratorio. Además, se tomó varias muestras de suelo para determinar el contenido de humedad, debido a que la resistividad del suelo puede variar con respecto al contenido de humedad. A continuación se detalla el procedimiento utilizado.

1. Movilización a los sitios de estudio y toma de muestras para determinar el contenido de humedad.
2. Despliegue de equipos (resistivímetro PASI, batería, energizador y Link Box), accesorios (electrodos, conectores, cable multiconductor).

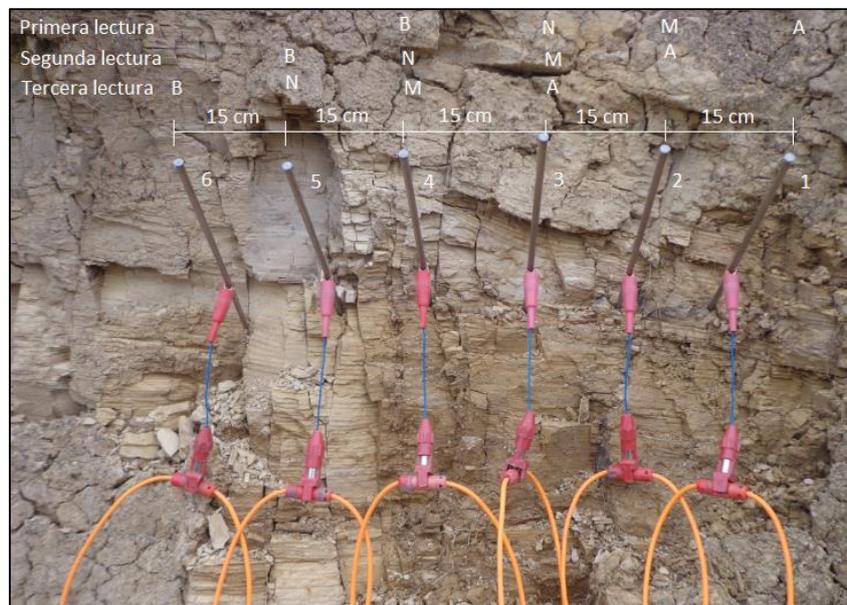


Figura 3.10 Medición de la resistividad eléctrica en campo del suelo A (CH: Arcilla de alta plasticidad), sector Miraflores.

3. Colocamos seis electrodos a una distancia de 15 cm cada uno, mediante un martillo/combo a una profundidad de 7,5 cm aproximadamente, simulando las condiciones de laboratorio.
4. Realizamos las conexiones de los equipos y accesorios de la misma forma que se realizó en laboratorio.
5. Se encendió los equipos y desde la pantalla digital del resistivímetro se eligió la configuración Wenner, el número de electrodos (seis), la secuencia de los electrodos y la designación del archivo de almacenamiento de resultados.
6. La corriente eléctrica pasa desde la batería al resistivímetro, energizador (P- 100T) Link Box y electrodos mediante el cable multiconductor, realizada las mediciones estas se almacenaron en el resistivímetro.
7. Finalizadas las mediciones, se recolectaron los equipos y accesorios utilizados, y nos trasladamos al siguiente sitio de estudio.

3.3 Análisis estadístico

Para evaluar la influencia de algunas propiedades del suelo sobre la resistividad eléctrica se debe analizar estadísticamente su correlación. Para tal propósito se utilizó el *software*: SPSS™ versión 20.

Una correlación, se entiende como el grado de variación conjunta existente entre dos o más variables. El “**coeficiente de correlación de Pearson**” nos permitió determinar si las variables siguen o no una distribución lineal, siendo válido para variables cuantitativas, se lo representó con la letra (r) y su valor oscila entre -1 “y” +1, cuanto más se aleja de cero, más fuerte es la relación entre las dos variables. El valor (+1) indica una relación lineal perfecta positiva y (-1) indica una relación lineal perfecta negativa, si el valor es 0 la relación es nula.

Se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}}$$

r = coeficiente de correlación lineal.

$$x = X - \bar{X} ; y = Y - \bar{Y}$$

En el caso que se incumpla la distribución normal o se requiera comprobar la existencia de algún otro tipo de correlación más fuerte entre variables se recomienda utilizar el “**coeficiente de correlación de Spearman**”, válido para variables cualitativas (ordinales). Éste coeficiente es una medida no paramétrica, la cual puede ser aplicada como alternativa al de Pearson. Al igual que el caso anterior, el rango de valores se encuentra entre [-1 “y” 1] y se interpretan de la misma manera. Además, este coeficiente también nos indica si hay o no linealidad y se ha designado de la siguiente manera: r_s .

Se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}$$

r_s = coeficiente de correlación por rangos de Spearman

d = diferencia entre los rangos (X menos Y)

n = número de datos

Una vez obtenidos los resultados de la correlación, se realizó una regresión para averiguar qué tipo de distribución se ajusta mejor a las variables y obtener la ecuación que la rige. Para estimar los parámetros de ajuste de las regresiones lineales y no lineales se utilizó el criterio de los mínimos cuadrados.

Regresión lineal

Si las dos variables X, Y se relacionan según un modelo de línea recta, se habla de regresión lineal simple:

$$Y = a_0 + a_1X$$

Regresión no lineal

La “Función polinomial” es de segundo grado y para determinar los parámetros de distribución (a_0, a_1, a_2) se seguirá un razonamiento similar al modelo de regresión lineal, utilizando el procedimiento de ajuste de mínimos cuadrados.

$$Y = a_0 + a_1X + a_2X^2$$

El problema de ajustar un modelo potencial y exponencial se reduce al de una función lineal, mediante el uso de logaritmos.

Para la “Función Potencial” se presenta las siguientes ecuaciones:

$$Y = \alpha \cdot X^\beta$$

$$\log Y = \text{Log} \alpha + \beta \cdot \log X$$

Mientras tanto, las ecuaciones para la “Función exponencial” se presentan a continuación:

$$Y = \alpha \cdot \beta^X$$

$$\ln Y = \alpha + \beta \cdot X$$

Además, se determinó el “**coeficiente de determinación**”, que es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson (*i.e* $R^2 = r^2$), el cual describe la porción de la varianza total de los datos observados que pueden ser explicados por el modelo. Los valores del (R^2) se encuentran en el rango entre 0 y 1 el resultado más cercano a 1 indica el mejor ajuste y está dada por la siguiente ecuación:

$$R^2 = \frac{([N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2])^2}{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Los ensayos de laboratorio y campo se realizaron sobre muestras de suelo recogidas en las zonas especificadas para el estudio, con el objetivo de determinar varias correlaciones entre la resistividad eléctrica y las algunas propiedades geotécnicas. El propósito de este capítulo es presentar los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, posteriormente se presenta de manera detallada y conjunta todos los datos obtenidos.

4.1 Clasificación de los suelos

En esta investigación, se realizaron varios ensayos para determinar la granulometría del suelo y los límites de Atterberg (límites líquidos y límites plásticos), procedimientos necesarios para la clasificación de los suelos.

Los tres tipos de suelos utilizados en este estudio, pasaron el tamiz No 4 (4,75 mm) evidenciándose la ausencia de grava. La distribución granulométrica de los suelos de grano grueso (arenas) se obtuvo a través del ensayo mecánico por tamizado. Mientras tanto, la distribución granulométrica de los suelos de grano fino (limos y arcillas) se determinó mediante el ensayo con el hidrómetro.

Las muestras de suelo obtenidas para este estudio, se designaron de forma alfabética a las Arcillas Varvadas se identificó como suelo A, el suelo B y el suelo C correspondieron a las lutitas y areniscas respectivamente. Estos dos últimos tipos de suelos pertenecen a la Formación Mangán. De las curvas de distribución del tamaño de partículas se obtuvieron los porcentajes de arena, limo y arcilla de cada uno de los suelos, los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Distribución del tamaño de las partículas y límites de Atterberg de tres tipos de suelos.

Tipos de suelos	Suelo A	Suelo B	Suelo C
Fracción de gruesos			
Arena (4,750 - 0,075 mm) (%)	0,22	9,52	64,74
Fracción de finos			
Limo (0,075 - 0,002mm) (%)	67,09	82,76	34,48
Arcilla (<0,002mm) (%)	32,69	7,72	0,78
Total de finos (%)	99,78	90,48	35,26
Límites de Atterberg			
Límite líquido, LL (%)	65,10	47,59	37,75
Límite plástico, LP (%)	30,30	30,62	29,63
Índice de plasticidad, IP (%)	34,78	16,97	8,12
Clasificación del suelo (SUCS)	CH	ML	SM
Designación	arcilla de alta plasticidad	limo de baja plasticidad	arena limosa

El suelo tipo A presentó el mayor contenido de finos de todas las muestras ensayadas, con un valor del 99,78%, de los cuales, la cantidad de limos superó al de las arcillas en un 67,09 y 32,69% respectivamente. Mientras tanto, el suelo tipo B al igual que el caso

anterior presentó un alto contenido de finos que alcanzó el 90,48%, prevaleciendo el contenido de limos con un 82,76% y en menor cantidad las arcillas con un valor del 7,72%.

Contrario a los resultados anteriormente obtenidos, el suelo tipo C presentó un alto contenido de partículas gruesas con un porcentaje del 64,74% de arenas, seguido de un 34,48% de limos y una escasa cantidad de arcillas. En la Figura 4.1 se muestra las curvas de distribución del tamaño de partícula para los tres tipos de suelos.

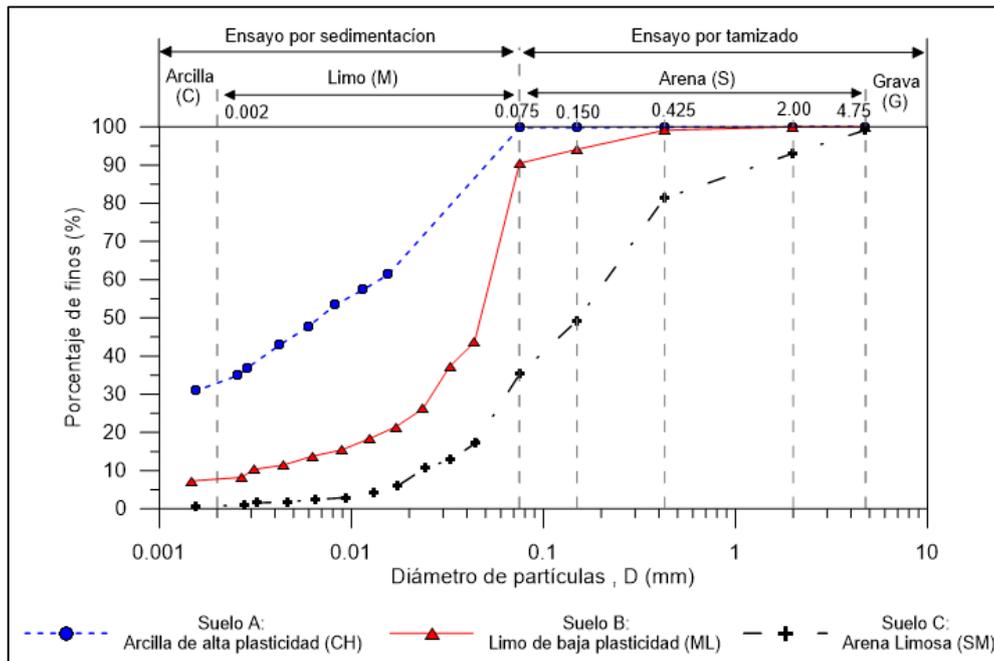


Figura 4.1 Curva de distribución del tamaño de partículas de los suelos A, B y C.

La granulometría únicamente proporciona una primera aproximación para la identificación del suelo, pero a veces queda poco claro. Por lo tanto, también es necesario determinar los límites de Atterberg (límites líquido y plástico) para identificar el tipo de suelo y su naturaleza cohesiva.

Varios factores pueden influir en los resultados de los límites de consistencia tales como la forma y el tamaño de las partículas. En la Tabla 4.1, se muestra a detalle los resultados de los Límites de Atterberg de los tres tipos de suelo, se determinó que el suelo tipo A presentó el mayor valor del límite líquido (LL= 65,10%) seguido de los suelos tipo B y C con valores de (LL = 47,59%) y (LL = 37,75%) respectivamente. Mientras tanto, los resultados de los límites plásticos de los suelos variaron entre un 29,63 y un 30,62%.

Los suelos con un alto contenido de finos, fueron directamente clasificados por medio de la carta de plasticidad conociendo el límite líquido (LL) y el índice plástico (IP). Según los resultados obtenidos el suelo A se ubicó sobre la línea A, mientras tanto, para los suelos B y C los porcentajes fueron < al 20% y se ubicaron bajo la Línea A, como lo muestra la Figura 4.2. Varios factores como la forma y el tamaño de las partículas del suelo pueden influir en el resultado de los Límites de Consistencia. De acuerdo con Whitlow (2001), las

propiedades ingenieriles de los suelos finos (limos y arcillas) están mayormente influenciados por su forma más que por el tamaño de la partícula. Los limos y las arcillas tienen forma de escamas, las cuales al mezclarse con otro material provoca a que el contenido de humedad cambie, afectando el resultado de los límites de Atterberg.

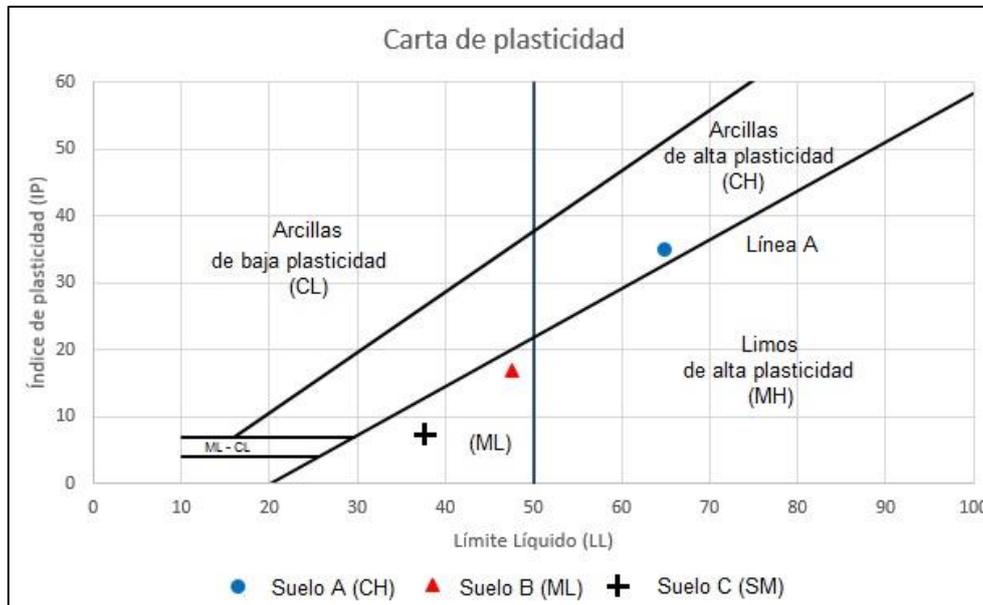


Figura 4.2 Localización de los puntos en la carta de plasticidad.

Para determinar los tipos de suelos de esta investigación, se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), propuesta inicialmente por Casagrande en 1942 y basado en la norma ASTM D 2487, este sistema es aplicado a todo trabajo geotécnico. Los resultados de los ensayos granulométricos y límites de Atterberg fueron necesarios para clasificar el tipo de suelo de cada sitio de muestreo.

Para los suelos A y B, el porcentaje de material que pasa el tamiz No 200 (0,075 mm) superó el 90% (i.e. alto contenido de finos), razón por la cual, la clasificación se basó en la carta de plasticidad como se muestra en la Figura 4.2.

Según la SUCS y los resultados obtenidos en la Tabla 4.1, el suelo A se clasificó como una arcilla de alta plasticidad (CH), este suelo pertenece a un Depósito Cuaternario identificado como "Arcillas Varvadas". Mientras tanto, el suelo B se identificó como un limo de baja plasticidad (ML). Finalmente, el suelo C se designó como una arena limosa (SM), caracterizándose por un alto contenido de arenas. Los suelos B y C litológicamente corresponden a las (ML: lutitas) y (SM: areniscas) respectivamente, las cuales pertenecen a la Formación Mangán.

Basabe (1998), realizó un estudio Geológico – Geotécnico en (terrenos inestables) de la zona austral del Ecuador particularmente en la cuenca del río Paute, a través del proyecto PRECUPA el cual, clasificó varios tipos de suelo en la que se incluye la zona de estudio de nuestra investigación. Se comparó los resultados del proyecto PRECUPA con los de

éste estudio, Tabla 4.1; coincidiendo únicamente el limo de baja plasticidad (ML) en las dos investigaciones. Mientras tanto, los suelos A y C no coinciden con las designaciones del tipo de suelo, posiblemente se deban a que los dos estudios se ejecutaron en distintos sitios o porque en nuestro estudio se tomó una sola muestra.

4.2 Determinación de las propiedades físicas de los suelos

Mediante relaciones gravimétricas se determinó el contenido de humedad (w), peso específico (γ) y peso específico seco (γ_d) de los tres tipos de suelo utilizados en esta investigación. Para determinar el contenido de humedad (w) el procedimiento se basó en la norma ASTM D 2216, el ensayo se repitió en dos ocasiones y se obtuvo un promedio. Las muestras inalteradas de los tres tipos de suelos se tomaron en campo el mismo día y llevadas al laboratorio para ser medidas. En la Tabla 4.2, se muestra que la arcilla de alta plasticidad (CH) presentó mayor humedad ($w = 23,34\%$), seguido por el limo de baja plasticidad (ML) ($w = 22,55\%$). Éste par de suelos (CH y ML) presentaron un alto contenido de finos, atribuyéndose mayor humedad. Finalmente, la arena limosa (SM) presentó la menor humedad ($w = 18,17\%$), ante la mayor cantidad de granos de arena.

El peso específico (γ) y peso específico seco (γ_d) se determinaron de las muestras inalteradas tomadas en campo, basados en el procedimiento especificado en la sección 3.2.1. Se encontró que el limo de baja plasticidad (ML) presentó el mayor peso específico (suelo B: $\gamma = 21,32 \text{ kN/m}^3$; $w = 22,55\%$), seguido por arena limosa (SM) correspondientes a (Suelo C: $\gamma = 19,44 \text{ kN/m}^3$; $w = 18,17\%$). Finalmente, la arcilla de alta plasticidad (CH), mostró el valor más bajo de todos los pesos específicos analizados (suelo A: $\gamma = 16,63 \text{ kN/m}^3$; $w = 23,34\%$), mayor detalle en la Tabla 4.2. Utilizando los valores del peso específico y contenido de humedad (w) previamente mencionadas, se determinaron los resultados del peso específico seco (ML: $\gamma_d = 17,39 \text{ kN/m}^3$), (SM: $\gamma_d = 16,45 \text{ kN/m}^3$) y (CH: $\gamma_d = 13,49 \text{ kN/m}^3$), como se observa en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Varias propiedades físicas de los suelos A, B y C.

Ensayos de laboratorio									
Suelos	Clasificación (SUCS)	Relaciones gravimétricas y volumétricas						Próctor Modificado	
		w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	G _s	e	η (%)	W _{op}	γ_{dmax} (kN/m ³)
A	CH	23,34	16,63	13,49	2,67	0,95	48,55	22,50	16,10
B	ML	22,55	21,32	17,39	2,80	0,58	36,68	22,00	16,13
C	SM	18,17	19,44	16,45	2,75	0,64	39,03	18,40	17,28

El peso específico de cada uno de los suelos difiere significativamente debido a sus propias características físicas (contenido de humedad, porosidad, relación de vacíos, grado de saturación, granulometría, etc.). En la Tabla 4.2 se puede observar que la mayor relación de vacíos y porcentaje de porosidad correspondió al menor valor de peso específico en el suelo A (arcillas de alta plasticidad).

Para determinar la gravedad específica de los sólidos de las tres clases de suelos de esta investigación, se utilizó el método del picnómetro bajo la norma ASTM D 854. El suelo A (CH) presentó un ($G_s = 2,67$) correspondiente al menor valor, seguido del suelo C (SM: $G_s = 2,75$) y finalmente, el suelo B (ML: $G_s = 2,80$) el cual presentó el mayor valor de gravedad específica de todas las muestras como se observa en la Tabla 4.2. El valor de G_s para los tipos de suelos (ML) y (SM) muestra una diferencia (0,05), posiblemente se debió a que pertenecen a la misma formación geológica y los sitios de muestro se ubican a una corta distancia pero, difieren en el porcentaje de finos.

Conocido el valor de la gravedad específica de los sólidos, la relación de vacíos y la porosidad pudieron ser determinadas utilizando las ecuaciones matemáticas citadas en la sección 2.3.1. La relación de vacíos (e) y porosidad (η) nos permite determinar la capacidad portante del suelo, las cuales dependen del grado de compactación o consolidación. Se encontró que la mayor relación de vacíos (e) y porosidad (η) se produjo en el suelo A (CH: $e = 0,95$; $\eta = 48,55\%$), seguido del suelo C (SM: $e = 0,64$; $\eta = 39,03\%$) y suelo B (ML: $e = 0,56$; $\eta = 36,68\%$), la variación de estos dos parámetros en los tres tipos de suelos fue evidente. Estos resultados pueden indicar que los suelos han experimentado diferentes grados de compactación, la cual puede ser observada y verificada a través de los resultados de los pesos específicos.

Físicamente, la relación de vacíos y porosidad puede indicarnos que las condiciones en las que se encontraba el suelo fueron densas o viceversas, tales parámetros presentan una gran influencia sobre la variación del peso específico de los suelos, como lo manifiesta (Abidin *et al.*, 2014a).

Para determinar el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptima de los tres tipos de suelos propuestos en esta investigación, se utilizó un ensayo de compactación dinámico correspondiente al Próctor Modificado bajo la norma ASTM D 1557 y una energía de compactación constante de 2696 kN/m^3 .

El suelo C correspondiente a una arena limosa (SM) presentó el mayor peso específico seco máximo y menor contenido de humedad óptima ($\gamma_{dmax} = 17,28 \text{ kN/m}^3$; $w = 18,40\%$), seguido por el suelo B (ML: limo de baja plasticidad; $\gamma_{dmax} = 16,13 \text{ kN/m}^3$; $w = 22,00\%$). Finalmente, el mayor contenido de humedad y menor peso específico seco máximo estuvo determinada por el suelo A definida como (CH: arcilla de alta plasticidad; $\gamma_{dmax} = 16,10 \text{ kN/m}^3$; $w = 22,50\%$), como se muestra en la Tabla 4.2.

4.3 Valores de resistividad eléctrica en laboratorio

Entre los resultados obtenidos en esta investigación experimental se relacionó la resistividad eléctrica (ρ) con el contenido de humedad (w) y peso específico (γ). Los valores de la resistividad eléctrica fueron determinadas mediante la medición de la diferencia de potencial eléctrico como consecuencia de la propagación de corriente directa a través de la muestra de suelo (pruebas en laboratorio) o subsuelo (pruebas en campo). En la (Tabla 4.4, pg.66) se presentan los valores de resistividad eléctrica

máximos y mínimos obtenidos en el laboratorio de los tres tipos de suelos investigados, estos resultados se obtuvieron basados en la norma, BS 1377 – 3 (1990).

Los mayores valores de resistividad eléctrica en todos los suelos se presentaron en condiciones sueltas con bajo contenido de humedad y peso específico, para el suelo C (SM: arena limosa tenemos, $\rho = 1451,12 \Omega\text{m}$, $w = 7,51\%$, $\gamma = 11,76 \text{ kN/m}^3$), el suelo A (CH: arcilla de alta plasticidad tenemos, $\rho = 1006,86 \Omega\text{m}$, $w = 8,57\%$, $\gamma = 9,9 \text{ kN/m}^3$) como se muestra en la (Tabla 4.4, pg.66). Finalmente, la resistividad del suelo B (ML: limo de baja plasticidad) no fue determinado debido a la pérdida de información almacenada en el resistivímetro.

Mientras tanto, las resistividades más bajas se mostraron en condiciones compactas con un alto contenido de humedad y peso específico y, para el suelo B (ML: $\rho = 5,10 \Omega\text{m}$, $w = 30,13\%$, $\gamma = 17,13 \text{ kN/m}^3$), seguido del suelo C (SM: $\rho = 9,36 \Omega\text{m}$, $w = 26,98\%$, $\gamma = 17,86 \text{ kN/m}^3$) y el suelo A (CH: $\rho = 11,50 \Omega\text{m}$, $w = 24,57\%$, $\gamma = 16,39 \text{ kN/m}^3$).

4.3.1 Resistividad eléctrica obtenida en campo

En el campo, las mediciones de resistividad eléctrica (ρ) y contenido de humedad (w) de los suelos investigados, se efectuó en una sola ocasión. Las dimensiones y procedimiento utilizado en campo fueron la misma que se aplicó en el laboratorio, se eligió seis electrodos ubicados a una profundidad de 7,5 cm y equidistantes cada 15 cm, como se mostró en la Figura 3.10.

En la Tabla 4.3 se muestra los resultados de las mediciones entre la resistividad eléctrica y el contenido de humedad obtenidas en campo, de los suelos investigados. El suelo A presentó los mayores valores de estos parámetros (CH: arcilla de alta plasticidad; $\rho = 49,54 \Omega\text{m}$; $w = 34,82\%$), seguido por valores intermedios del suelo C (SM: arena limosa, $\rho = 11,53 \Omega\text{m}$; $w = 33,15\%$). Finalmente, los valores más bajos se obtuvieron del suelo B (ML: limo de baja plasticidad, $\rho = 5,48 \Omega\text{m}$; $w = 22,60\%$).

Los resultados obtenidos confirmaron que el contenido de agua juega un papel importante sobre la resistividad eléctrica de los suelos ensayados, donde además otras propiedades geotécnicas también se citan como influyentes (tamaño de las partículas, límites de Atterberg). Basados en la Tabla 4.1 y Tabla 4.3 se comparó los resultados de resistividad eléctrica y el tamaño de las partículas de suelo.

Como se mencionó en la sección 4.1, los suelos A y B contienen mayor contenido de finos (CF) en comparación al suelo C que presentó mayor cantidad de gruesos. De acuerdo a Abidin, *et al.* (2013), una porción cuantitativa de agua y partículas de distintos tamaños puede influir sobre los resultados de resistividad del suelo. Abidin, *et al.* (2012) manifestaron que los suelos con un alto contenido de finos (limos y arcillas) exhiben bajos valores de resistividad mientras que los suelos con gran cantidad de partículas gruesas (arenas y gravas) exhiben mayor resistividad eléctrica.

En el caso del suelo A (CH: arcilla de alta plasticidad) mostró una particularidad contraria a las conclusiones de las referencias anteriores, este suelo presentó un alto contenido de finos y resistividad eléctrica ($\rho = 49,54 \Omega\text{m}$; $CF = 99,48\%$) en comparación a los otros suelos. Esta tendencia nos indica que la arcilla de alta plasticidad podría estar sujeta a otros factores (relación de vacíos, composición mineralógica) con mayor influencia en su comportamiento. Fallah-Safari, *et al.* (2013) en su investigación mostraron, que las arcillas con una elevada relación de vacíos de aire presentaron altos valores de resistividad eléctrica.

Tabla 4.3 Resultados de la medida de resistividad eléctrica y humedad en campo.

Muestra de suelo	Suelo A (CH)	Suelo B (ML)	Suelo C (SM)
Resistividad eléctrica en campo, ρ (Ωm)	49,54	5,48	11,53
Contenido de Humedad, w (%)	34,82	22,60	33,15

Mientras tanto, al analizar únicamente el suelo B (ML: limo de baja plasticidad; $\rho = 5,48 \Omega\text{m}$; $CF = 90,48\%$) y el suelo C (SM: arena limosa; $\rho = 11,53 \Omega\text{m}$; $CF = 35,26\%$) se observó que a mayor contenido de finos menor resistividad eléctrica y viceversa. Por lo tanto, se puede concluir que los valores de resistividad medida en campo está influenciado por el tamaño de las partículas del suelo concordando con el estudio de varios autores (Chik y Islam, 2012a; Abidin *et al.*, 2012; Hazreek *et al.*, 2015).

Samouëlian *et al.* (2005) manifestaron que la conductividad eléctrica está relacionada con el tamaño de las partículas por la densidad de la carga eléctrica en la superficie de los constituyentes sólidos. En suelos arcillosos, las cargas eléctricas situadas en la superficie de las partículas de arcilla conducen mayor conductividad eléctrica, que en los suelos de textura gruesa debido a la magnitud de la superficie específica (Fukue *et al.*, 1999).

En la Figura 4.3 se presenta la relación entre la resistividad eléctrica medida en campo y los límites de Atterberg (LL: límite líquido, LP: límite plástico e IP: índice plástico). De acuerdo con Abidin *et al.* (2014a) los límites de Atterberg están estrictamente gobernadas por el contenido de finos en el suelo, reflejando la mineralogía de las arcillas y las porciones de arcilla, limo y contenido orgánico.

Al comparar el resultado de los suelos B y C se mostró que la resistividad más baja medida en campo se adjudicó al suelo B (ML: limo de baja plasticidad) y correspondió a los valores más altos de $LL = 47,59\%$, $LP = 30,62\%$ e $IP = 16,97\%$. Contrario a este comportamiento, el suelo C (SM: arena limosa) presentó mayor resistividad ($\rho = 11,53 \Omega\text{m}$) y menores valores de $LL = 37,75\%$, $LP = 29,63\%$ e $IP = 8,12\%$, como se observa en la Figura 4.3.

Por lo tanto, la relación general entre la resistividad eléctrica medida en campo y los Límites de Atterberg puede ser establecido como $\rho \propto 1 / LA$, concordando con la expresión determinado por (Abidin *et al.*, 2014a).

Mientras tanto, los resultados del suelo A (CH: arcilla densa de alta plasticidad) difiere en comparación a los suelos B y C siendo inconsistente con la relación propuesta por (Abidin, *et al.*, 2014a), debido a que presenta una mayor resistividad eléctrica ($\rho = 49,54 \Omega\text{m}$) al igual que elevados valores de $LL = 65,10\%$, $LP = 30,30\%$, e $IP = 34,78\%$ de los tres suelos investigados. El comportamiento de este suelo hace suponer que fue influenciado por otras propiedades físicas (composición mineralógica y/o forma de las partículas). Abu-Hassanein *et al.* (1996) estudiaron varios suelos arcillosos, en la que concluyeron que a mayor Límite Líquido menor resistividad eléctrica del suelo, tendencia que concuerda con los resultados de (Chik *et al.*, 2012b).

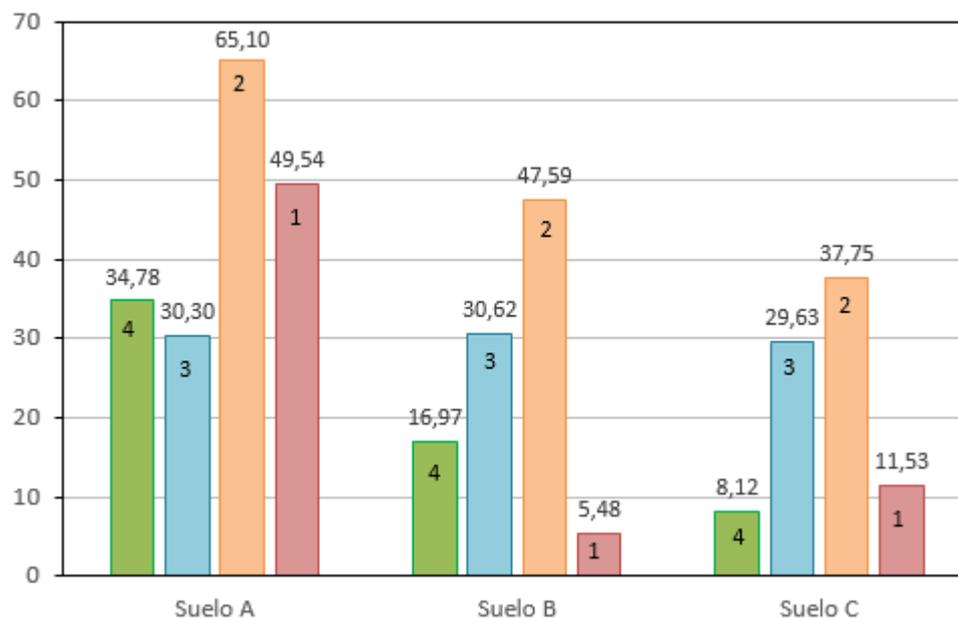


Figura 4.3 Relación entre los valores de resistividad y los Límites de Atterberg: 1) Resistividad eléctrica medida en campo, ρ (Ωm); 2) LL, (%); 3) LP, (%) y 4) IP, (%).

Se recomienda realizar una mayor cantidad de mediciones en campo para confirmar los resultados obtenidos en cada uno de los suelos, debido a que no se pueden proponer conclusiones definitivas basadas en un solo dato. Además, (la porosidad, el grado de saturación, la concentración de sal en el fluido de poro, el tamaño de grano y la temperatura) también pueden influir en el valor de la resistividad eléctrica de los suelos.

4.4 Correlación entre la resistividad y el contenido de humedad

Para determinar la relación entre la resistividad eléctrica (ρ), el contenido de humedad (w) y el peso específico (γ), se utilizaron regresiones lineales (función lineal) y no lineales (funciones potencial y polinomial), los cuales representaron la mejor curva de ajuste correspondientes a los datos obtenidos en laboratorio.

En el caso de las regresiones lineales se utilizó el “coeficiente de correlación de Pearson (r)”. Mientras tanto, para las regresiones no lineales se aplicó el “coeficiente de correlación de Spearman (r_s)”, debido a que presentaron una correlación más fuerte entre las

variables. Ambos coeficientes de correlación se interpretaron de manera semejante y los resultados obtenidos fueron comparados si ($r_s > r$) se indica como una regresión no lineal, caso contrario se definirá como una regresión lineal. El coeficiente de determinación (R^2) describe la proporción de la varianza total en los datos observados que pueden ser explicados por el modelo, (Legates y McCabe, 1999). Los resultados obtenidos de los coeficientes de determinación (R^2), coeficientes de correlación de Pearson (r), coeficiente de correlación de Spearman (r_s) y ecuaciones se detallan en el Anexo A.

Uno de los objetivos de esta investigación fue determinar la relación entre la resistividad eléctrica del suelo (ρ) y el contenido de humedad (w). Para lograr este propósito fue necesario realizar varias mediciones de resistividad, incrementando la cantidad de agua en el suelo y la energía de compactación de manera progresiva.

La cantidad de agua utilizada para obtener los diferentes contenidos de humedad varió de 2500 a 4000 cm^3 , especificándose el incremento en cada una de las muestras, procedimiento realizado en los tres tipos de suelos, mayor detalle en el Anexo C. Por lo tanto, el contenido de humedad no varió significativamente bajo condiciones sueltas y/o compactas. La energía de compactación utilizada para medir la resistividad fue de 101,18 kN/m^3 , 202,37 kN/m^3 y 354,16 kN/m^3 las cuales correspondieron a 10, 20 y 35 golpes respectivamente, como se muestra en la Tabla 4.4.

Ésta investigación experimental ha mostrado una tendencia curvilínea entre los valores de resistividad eléctrica (ρ) y contenido de humedad (w). El comportamiento de este par de parámetros demostró una correlación potencial correspondiente a una regresión no lineal, como se muestra en la (Figura 4.4, pg.70). Una vez hallada las ecuaciones nos fijaremos en su coeficiente de determinación (R^2). Aquellos valores cuyo R^2 fueron mayor a 0,85; evidenciaron una buena relación entre el contenido de humedad y la variación de la resistividad. Mediante el ensayo de compactación Próctor Modificado se obtuvo la humedad óptima (w_{op}) y el peso específico seco máximo (γ_{dmax}), parámetros que nos permitió limitar horizontalmente el contenido de humedad en la (Figura 4.4, pg.70) y el peso específico en la (Figura 4.5, pg.75) en cada uno de los suelos de este estudio.

En las Figuras 4.4.a, 4.4.b, y 4.4.c se muestran la correlación entre el contenido de humedad (w) y la resistividad (ρ) de los suelos A, B y C respectivamente. En cada grafico se ubicó una línea horizontal representada por el valor de la humedad óptima (w_{op}) previamente determinado mediante el Próctor Modificado, con el propósito de identificar, si el porcentaje de humedad de la muestra de suelo ensayado se ubica en la rama seca o húmeda. Además, se incluyó una línea vertical en la abscisa de cada gráfico para delimitar el valor de resistividad. Las abscisas fueron representadas a escala semilogarítmica con el propósito de mejorar la apreciación de los resultados de estos dos parámetros (w y ρ) bajo condiciones sueltas y compactas.

En general, se observa que el incremento de la cantidad de agua sobre el suelo influye de manera directa sobre los valores de resistividad, siendo más notorio en condiciones sueltas al presentarse un mayor rango de resistividades. Mientras tanto, en condiciones

denzas la energía de compactación también se incluye como un factor adicional en la variación de la resistividad. Para los suelos A y B se realizaron cuatro pruebas en condiciones sueltas y doce en condiciones compactas, mientras que, para el suelo C el número de ensayos fue de tres y nueve respectivamente.

Tabla 4.4 Valores de resistividad eléctrica del suelo, contenido de humedad y peso específico.

Energía de compactación (kN-m/m ³)	Tipo de Suelo	Suelo A			Suelo B			Suelo C		
	Litología	Arcillas Varvadas arcilla de alta plasticidad (CH)			Lutitas limo de baja plasticidad (ML)			Areniscas arena limosa (SM)		
	SUCS	ρ	w	γ	ρ	w	γ	P	w	γ
# de golpes		(Ω m)	(%)	(kN/m ³)	(Ω m)	(%)	(kN/m ³)	(Ω m)	(%)	(kN/m ³)
0	Suelto	1006,86	8,57	9,90	-----	13,10	13,03	1451,12	7,51	11,76
	Suelto	259,40	13,58	10,64	-----	17,26	10,20	82,87	17,48	9,86
	Suelto	100,69	24,57	10,25	39,67	21,32	9,51	38,62	27,42	11,03
	Suelto	40,30	32,09	10,25	29,10	31,13	8,64			
101,18	10	102,03	8,47	12,00	49,9	11,99	14,44	382,36	7,34	13,22
	10	39,12	15,86	12,59	15,12	17,97	12,98	23,03	16,52	13,66
	10	19,54	24,91	13,95	8,21	21,77	14,10	10,67	27,97	17,32
	10	16,51	32,35	14,10	6,68	30,34	15,61			
202,37	20	57,27	8,44	12,78	37,35	12,65	14,93	303,62	7,20	13,71
	20	26,15	15,86	13,66	10,65	16,67	14,10	17,81	16,44	15,08
	20	14,19	25,16	15,47	6,28	22,95	15,47	9,96	26,89	17,66
	20	14,91	31,24	14,83	5,13	29,06	16,74			
354,16	35	43,92	8,22	13,17	29,52	12,58	15,32	274,14	7,43	14,10
	35	-----	18,14	14,49	8,60	17,56	15,03	14,70	16,16	16,05
	35	11,50	24,57	16,39	5,17	22,73	16,74	9,36	26,98	17,86
	35	11,83	30,62	16,34	5,10	30,13	17,13			

El suelo A (CH: arcilla de alta plasticidad), bajo condiciones sueltas presentó amplios rangos de resistividad, los cuales fueron disminuyendo significativamente de 1006,86 a 40,30 Ω m, mientras que, el contenido de humedad se fue incrementando de 8,57 a 32,09% como se observa en la Figura 4.4.a. Este suelo en condiciones secas y sueltas presentan una elevada resistividad (ρ), al incrementar la cantidad de agua en el suelo ensayado la (ρ) disminuyó, observándose una clara correlación y tendencia entre estos dos parámetros, Tabla 4.4 y Figura 4.4.a. Además, mediante el contenido de humedad y la resistividad se obtuvo una curva de ajuste representada por la siguiente ecuación: $w = 160,46\rho^{-0.43}$ con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,98$.

Mientras tanto, en condiciones densas los valores y el rango de resistividades disminuyeron significativamente con respecto a las condiciones sueltas. Entre las curvas obtenidas en la Figura 4.4.a, también se observó la relación entre (w) y (ρ) sometidas a diferentes energías de compactación (EC). La resistividad eléctrica presentó una mayor

variación cuando se aplicó una baja (EC) y viceversa, a 10 golpes la resistividad cambia de 102,03 – 16,51 Ωm , a 20 golpes varia de 57,27 – 14,91 Ωm , y a 35 golpes fluctúa entre 43,92 – 11,83 Ωm . Estos resultados evidenciaron un rango de resistividades más limitado ante un incremento de la (EC) en un intervalo de humedades similar a las condiciones sueltas. La energía de compactación presentó menor influencia sobre las muestras secas mientras que al aumentar el contenido de humedad en el suelo se observó una mayor influencia de estos dos factores, como se explica a continuación.

En la Figura 4.4.a se ubicó el valor de la humedad óptima ($w_{op} = 22,13\%$) y se pudo apreciar que los valores con ($> \rho$ y $< w$) se ubicaron en la rama seca. Mientras tanto, los valores que se situaron sobre la (w_{op}) presentaron ($< \rho$ y $> w$) las cuales pertenecen a la rama húmeda, el detalle numérico se especifican en la Tabla 4.4. Analizados los datos obtenidos en la Figura 4.4.a, se sugiere que la resistividad de 20 Ωm sean considerado como restrictivo para evaluar las mediciones de resistividad tomadas en campo, debido a que los valores inferiores a este resultado se asemejan mejor a las condiciones reales.

Los resultados ubicados en la rama seca presentaron los mayores valores de resistividad eléctrica (ρ), contrario a lo que pasa en la rama húmeda como se muestra en la Figura 4.4.a, mostrando la influencia del contenido de humedad y energía de compactación. En la rama húmeda se observó que para una energía de compactación de 10 golpes la resistividad fue disminuyendo, mientras se incrementaba el contenido de humedad. Comportamiento que difiere al comparar con la energía de compactación de 20 y 35 golpes debido a que las humedades cercanas a la (w_{op}) correspondieron a las resistividades eléctricas mínimas, para 20 golpes le correspondió una ($\rho = 14,19 \Omega\text{m}$; $w = 25,16\%$) y 35 golpes ($\rho = 11,50 \Omega\text{m}$; $w = 24,57\%$) como se muestra en la Figura 4.4.a y Tabla 4.4, si continuamos incrementado los contenidos de humedad (w) los valores de resistividades (ρ) también aumentaron, lo cual supuso que los valores superiores a la humedad óptima pueden llegar a tener una menor influencia en la resistividad eléctrica.

La única medición de resistividad con su respectivo contenido de humedad realizada en campo ($\rho = 49,54 \Omega\text{m}$; $w = 34,82\%$) se incluyó en la Figura 4.4.a y se observó que difiere significativamente con respecto a los valores obtenidos en laboratorio, este valor hace suponer la influencia de la relación de vacíos y fisuras observadas *in situ*, dando como resultado una elevada resistividad (Figura 3.10, pg. 55).

En la Figura 4.4.a se mostró las distintas curvas de ajuste con sus respectivas ecuaciones y caracterizadas por la función potencial, diferenciadas únicamente por la energía de compactación. Asimismo, se determinó el coeficiente de determinación (R^2), el cual varió entre [0,96 a 0,99] evidenciando buenos ajustes, estos resultados deberían ser utilizados de manera preliminar debido a la baja cantidad de datos utilizados.

McCarter, (1984) mediante ensayos de laboratorio investigó la respuesta de la resistividad a diferentes contenidos de humedad en varias muestras de arcillas. Éste autor observó que la resistividad disminuye bruscamente con el incremento de contenido

de humedad, concluyendo que la resistividad está en función del contenido de humedad y grado de saturación.

En el suelo tipo B (ML: limo de baja plasticidad) según la tendencia que los suelo A y C se asume que los mayores valores de resistividad se produjeron en condiciones sueltas, correspondientes a humedades de 13,10 y 17,26%, resultados que no se pudieron obtener debido a la pérdida de información consecuentemente no se obtuvo la ecuación de ajuste Figura 4.4.b

Mientras tanto, en condiciones densas los valores de resistividad disminuyeron con respecto a las condiciones sueltas. En la Figura 4.4.b se observó tres curvas con similar tendencia a diferente energía de compactación, representadas por una función potencial. Los ensayos de laboratorio se efectuó en un contenido de humedad que va entre 11,99 a 30,34% mostrándose un limitado rango de resistividades, a 10 golpes variaron de 49,90 a 6,68 Ωm , a 20 golpes fluctuaron de 37,35 a 5,13 Ωm y a 35 golpes cambiaron de 29,52 a 5,10 Ωm .

La energía de compactación presentó mayor influencia sobre muestras húmedas cercanas o superior a la humedad óptima (w_{op}) en comparación al suelo seco, las cuales muestran un mayor rango de resistividades. En la Figura 4.4.b se colocó el valor de la humedad óptima ($w_{op} = 22,00\%$) representada con una línea horizontal, todas las resistividades (ρ) que tuvieron humedades (w) inferiores a la (w_{op}) se ubicaron en la rama seca. Mientras que, las (ρ) con (w) superiores pertenecen a la rama húmeda. Además, según los datos obtenidos se sugiere que la resistividad de 7 Ωm sea considerado como un valor limitante para evaluar las mediciones de (ρ) tomadas en campo.

En la rama seca, las resistividades del suelo variaron de 49,90 a 8,60 Ωm correspondientes a las humedades 11,99 y 17,56% respectivamente, en las cuales se observó un amplio rango de resistividades, en comparación a los valores de la rama húmeda, Tabla 4.4. Mientras tanto, los resultados de la rama húmeda, presentaron los valores más bajos de resistividad encontrándose en el rango de 6,28 a 5,10 Ωm correspondiente a los contenidos de humedad de 22,95 a 30,13% para 20 y 35 golpes, respectivamente. Mientras que, para 10 golpes se presentó una clara excepción ($\rho = 6,68 \Omega\text{m}$; $w = 30,34\%$) lo cual se evidenció la influencia del agua sobre los resultados de resistividad. Por su parte, la energía de compactación tendió a ser despreciable a mayor contenido de humedad, como se observa en la Figura 4.4.b confirmando las conclusiones obtenidas por (Abu-Hassanein *et al.*, 1996). Además, los valores de resistividad eléctrica y contenido de humedad tomados en campo ($\rho = 5,48 \Omega\text{m}$; $w = 22,60\%$) se ubicaron sobre humedad óptima y a la izquierda del límite de resistividad sugerida, como se observa en la Figura 4.4.b.

Finalmente, al analizar todos los resultados obtenidos en la tabla 4.4, se observó que la relación entre la resistividad eléctrica y el contenido de humedad son inversamente proporcionales entre sí. Las muestras de suelo ensayadas a diferentes energías de compactación presentan las siguientes ecuaciones: $w_{10} = 58,02\rho^{-0.41}$, $w_{20} = 48,21\rho^{-0.39}$ y

$w_{35} = 49,22p^{-0.42}$, para 10, 20 y 35 golpes respectivamente. Mientras tanto, los coeficientes de determinación (R^2) correspondientes a las diferentes curvas de ajuste fluctuaron entre 0,85 a 0,92. Cabe mencionar que este suelo presentó el intervalo de resistividades más bajas en comparación a la arcilla de alta plasticidad (CH) y la arena limosa (SM), como se muestra en la Figura 4.4.a y Figura 4.4.c. De acuerdo con Rinaldi y Cuestas (2002) y Rinaldi (2013) sus investigaciones fueron realizadas en Argentina sobre depósitos Loessicos, los cuales mostraron un alto contenido de limos. Los autores manifestaron que la medición de la resistividad eléctrica (ρ) en los depósitos de Loess tiene una significativa dependencia del contenido de agua (w).

En el caso del suelo C (SM: arena limosa) al igual que el suelo A, presentó amplios rangos de resistividad eléctrica (ρ) bajo condiciones sueltas, las cuales disminuyeron significativamente de 1451,12 a 38,62 Ωm , mientras que, el contenido de humedad (w) se fue incrementando de 7,51 a 27,42%, Tabla 4.4. El suelo en condiciones secas y sueltas el valor de la resistividad fue mayor a ($> 1000 \Omega\text{m}$), mientras tanto, que al incrementar la cantidad de agua (superior a la humedad óptima) la resistividad fue menor a ($< 50 \Omega\text{m}$), como se muestra en la Figura 4.4.c. Se observó una gran influencia del contenido de humedad con respecto a la resistividad eléctrica. La correlación entre estos dos parámetros (w) vs (ρ) fue representada por la ecuación: $w = 87,35p^{-0.34}$ con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,98$.

Bajo condiciones densas, la resistividad eléctrica disminuyó significativamente en comparación a los elevados valores que presentó este parámetro en condiciones sueltas, lo cual fue más evidente en estado seco, lo que permitió observar la influencia de la energía de compactación sobre las resistividades eléctricas medidas en el suelo. En la Figura 4.4.c, se observó las relaciones entre la resistividad eléctrica (ρ) y el contenido de humedad (w) sometidas a diferentes energías de compactación, a 10 golpes la resistividad está en el rango de 382,36 – 10,67 Ωm , a 20 golpes varió de 303,62 – 9.96 Ωm , y a 35 golpes fluctuó entre 274,14 – 9,36 Ωm , en un rango de humedades similar al de las condiciones sueltas, Tabla 4.4.

En la Figura 4.4.c. se ubicó el valor de la humedad óptima ($w_{op} = 18,40\%$) mediante una línea horizontal, se observa que los valores con mayor resistividad presentan bajo contenido de humedad y se ubican en la rama seca. Mientras tanto, al incrementar la cantidad de agua sobre el suelo, las resistividades disminuyeron de manera delimitada y se ubicaron en la rama húmeda. Analizados los resultados en la Figura 4.4.c se sugiere una resistividad de 13 Ωm sea considerado como un valor restrictivo para evaluar las mediciones de resistividad tomadas en campo.

El suelo en la rama seca presentó un amplio rango de resistividades correspondientes a bajos contenidos de humedad, este comportamiento podría ser atribuido a otros factores, tales como la relación de vacíos y grado de saturación. Ante un bajo contenido de humedad en el suelo se produjo menor grado de saturación y mayor relación de vacíos provocando altos valores de resistividad, tales datos únicamente fueron afectados por la energía de compactación.

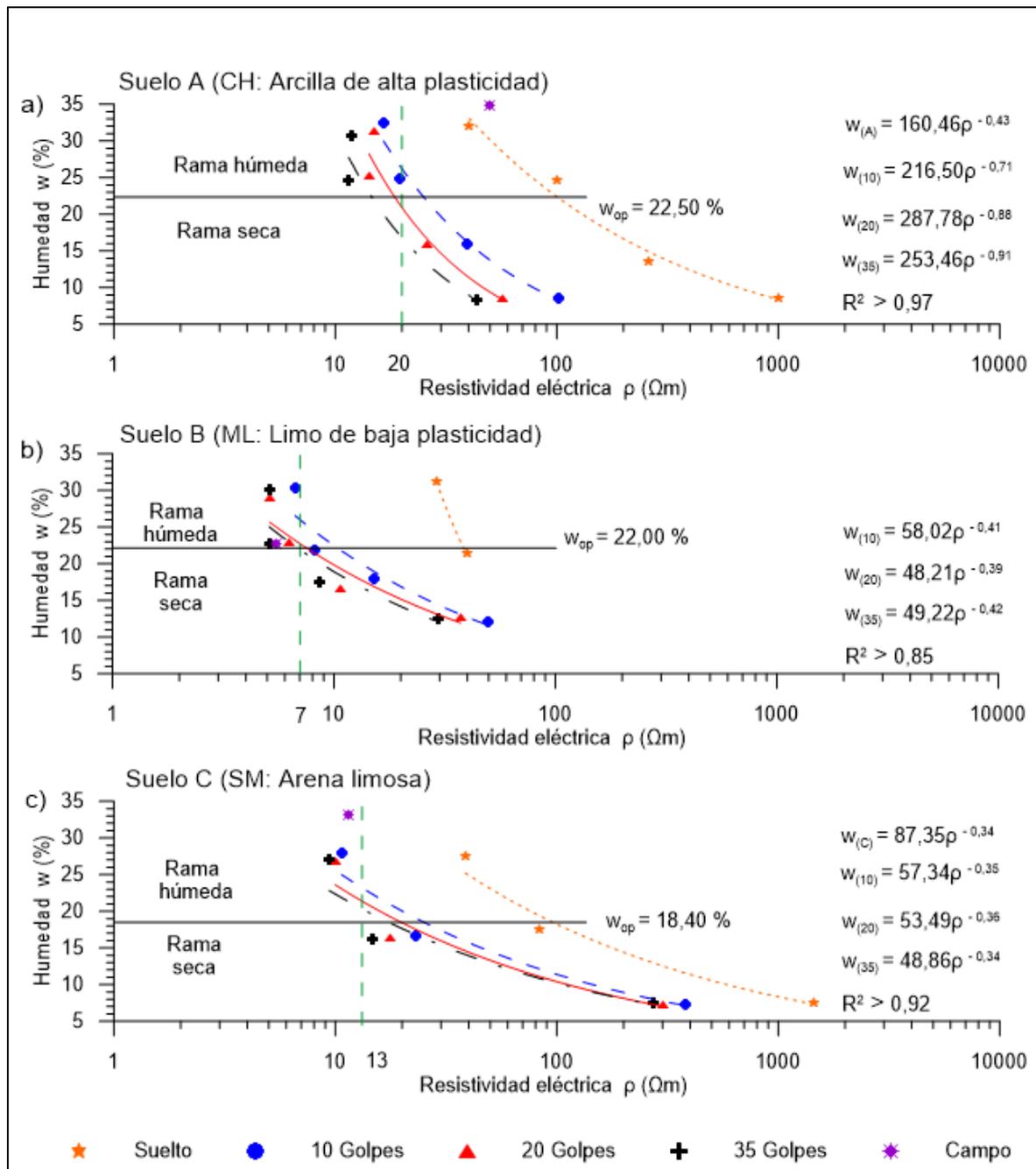


Figura 4.4 Correlación entre el contenido de humedad y la resistividad de tres tipos de suelos en condiciones sueltas y compactadas: a) Suelo A (CH: arcilla de alta plasticidad), b) Suelo B (ML: limo de baja plasticidad), y c) Suelo C (SM: arena limosa).

En la rama húmeda se observó que al incrementar el contenido de humedad (w) los valores de la resistividad (ρ) no cambiaron significativamente y presentaron poca influencia de la energía de compactación como se muestra a continuación: a 10 golpes ($\rho = 10,67 \Omega m$; $w = 27,97\%$), a 20 golpes ($\rho = 9,96 \Omega m$; $w = 26,89\%$) y finalmente, a 35 golpes ($\rho = 9,36 \Omega m$; $w = 26,98\%$). La resistividad únicamente varió en $1,31 \Omega m$, confirmando la baja influencia de la energía de compactación al incrementar la cantidad de agua sobre la muestra. Además, se incluyó la medida tomada en campo ($w = 33,15\%$)

y $\rho = 11,53 \Omega m$), la cual varió únicamente en la humedad, mientras que, la resistividad se ubicó en el mismo rango de los resultados obtenidos en laboratorio, Figura 4.4.c.

En la Figura 4.4.c se mostró, tres curvas de ajuste similares representadas por la función potencial en condiciones compactas. Las ecuaciones obtenidas se presentan a continuación: $w_{10} = 57,34\rho^{-0.35}$, $w_{20} = 53,49\rho^{-0.36}$, $w_{35} = 48,86\rho^{-0.34}$ correspondiente a 10, 20 y 35 golpes respectivamente. Mientras tanto, los coeficientes de determinación (R^2) estuvieron en el rango de 0,96 a 0,92 lo cual nos indica una buena correlación entre la resistividad y el contenido de humedad.

De acuerdo, a los resultados obtenidos se observó que al incrementar el contenido de humedad en el suelo se produjo una disminución de la resistividad eléctrica, tendencia que tuvo concordancia con algunas investigaciones realizadas alrededor del mundo sobre muestras de arena limosa (Abidin *et al.*, 2013; Hazreek *et al.*, 2015; Osman y Siddiqui, 2014) la cual, puede ser representada usando la relación general $\rho \propto 1/w$.

En general, las resistividades de los tres tipos de suelo investigados, que se ubicaron en la rama seca presentaron mayor variabilidad en comparación a la rama húmeda. Estas variaciones están relacionadas con las propiedades físicas propias de cada suelo.

Los suelos en condiciones sueltas y compactas se diferencian en la cantidad de aire, agua y sólidos que poseen. Bryson y Bathe (2009) señalaron que la conducción eléctrica en arenas limpias se produce casi exclusivamente en el fluido de poro, denominada como: "conducción electrolítica", mientras que en el caso de las arcillas se produce en los poros y en la *interfaz* entre las partículas del suelo y el agua de los poros, denominada como: "conductividad superficial". La conducción superficial también se produce a través del contacto grano a grano de las partículas de suelo adyacentes que contienen considerable porcentaje de finos. Fallah-Safari *et al.* (2013) manifestaron que los suelos con un alto contenido de finos también presentan mayor superficie específica, la cual mejora la conducción superficial.

En los resultados de los suelos A, B y C se observaron, que la resistividad eléctrica se redujo a medida que el contenido de agua y energía de compactación se incrementaron, como se muestra en la Figura 4.4. Por lo tanto, a través del análisis de los resultados obtenidos en la Tabla 4.4, se estableció que la resistividad eléctrica obtenida en laboratorio es inversamente proporcional al contenido de humedad ($\rho \propto 1/w$). Abidin *et al.* (2013) señalaron que en condiciones sueltas y estado seco, el suelo presentará un alto contenido de poros y aire, provocando un incremento en el valor de la resistividad debido a la dificultad de propagación de corriente, por la poca interacción entre la carga eléctrica y los iones presentes en el suelo. Mientras que cuando el suelo está húmedo disminuye la resistividad y aumenta la conductividad eléctrica debido a la formación de películas de agua alrededor de la superficie del suelo. Tales películas actúan como un puente entre la carga eléctrica y los iones presentes en el suelo.

A pesar de la baja cantidad de ensayos realizados y datos obtenidos, se determinó una buena correlación entre el contenido de humedad y la resistividad eléctrica del suelo. Las diferentes relaciones empíricas encontradas en este estudio fueron representadas mediante la función potencial y expresada mediante la siguiente ecuación.

$$w = a\rho^b$$

donde:

w (%) = contenido de humedad

ρ (Ω m) = resistividad eléctrica

a, b = constantes

Las constantes (a, b) varían en cada uno de los suelos, debido a la influencia de la energía de compactación y el peso específico.

Autores como McCarter (1984) y Yan *et al.* (2012) concluyeron que el contenido de humedad no puede ser utilizado solo como un criterio para la determinación de la resistividad eléctrica del suelo, debido a que el suelo en campo puede tener un contenido idéntico de agua pero diferentes grados de saturación. Además, manifestaron que la compactación también juega un rol importante en la resistividad.

Debido a la importancia de relacionar el grado de saturación y la resistividad, se determinó algunas correlaciones que fueron detalladas en el Anexo B, a pesar de no ser parte de la investigación. Las ecuaciones correspondientes a cada suelo ensayado se muestran a continuación: suelo A: $Sr_A = 156,38\rho^{-0,41}$, suelo B: $Sr_B = 120,22\rho^{-0,41}$ y suelo C: $Sr_C = 138,46\rho^{-0,35}$ en un rango de coeficientes de determinación (R^2) de (0,77 a 0,89), las cuales se consideraron como aceptables. El aumento en el grado de saturación del suelo mejorar la continuidad del agua de poros y conducción eléctrica causando una disminución de resistividad. Abu-Hassanein *et al.* (1996) analizaron cuatro diferentes suelos con un alto contenido de arcillas y diferentes grados de saturación, los cuales observaron que la resistividad eléctrica es inversamente proporcional al grado de saturación ($\rho \propto 1/Sr$); además, distinguió que ambos parámetros son independientes al esfuerzo de compactación.

4.5 Correlación entre la resistividad y el peso específico

Para determinar la correlación entre la resistividad (γ) y el peso específico (ρ) de los suelos A, B y C, se utilizaron tres diferentes energías de compactación (10, 20 y 35 golpes) y aproximadamente diez capas de suelo hasta llenar totalmente el cilindro PVC para cada ensayo. En general, los tres tipos de suelo en condiciones sueltas presentaron menor peso específico en comparación a las condiciones compactas, Figura 4.5 y Tabla 4.4. El suelo en condiciones sueltas tuvieron mayor cantidad de vacíos ocupados por aire que por agua, contribuyendo a un menor peso específico, mientras que, en condiciones compactas se redujo la cantidad de vacíos debido al incremento de la energía de compactación siendo necesario añadir mayor cantidad de suelo dando como resultado

un mayor peso específico. Además, se encontró que la resistividad del suelo es sensible al contenido de humedad y condiciones de compactación.

Los suelos en condiciones sueltas presentaron elevados valores de resistividad y bajos pesos específicos. Además, se observó una disminución de la resistividad eléctrica al incrementarse el contenido de humedad, llenando varios espacios entre las partículas del suelo con agua, evidenciando la influencia de este parámetro en condiciones sueltas. Hassan (2014) señaló que, eléctricamente la discontinuidad del agua de poro a un bajo contenido de humedad provoca una resistividad relativamente alta, mientras que, al aumentar el contenido de agua en el suelo la continuidad del agua de los poros mejora, causando una rápida disminución de la resistividad. Los suelos A y C presentaron un ajuste lineal, mientras que, en el suelo B (ML: limo de baja plasticidad) no se pudo determinar el ajuste debido a que dos datos de resistividad correspondientes a la rama seca no pudieron ser obtenidos, como se muestra en la Figura 4.5.b.

Para enfatizar la influencia del esfuerzo de compactación, en la Figura 4.5 se presentó la relación entre el peso específico y la resistividad utilizando diferentes energías de compactación, cambiando el número de golpes de 10 a 35. La correlación de este par de parámetros se determinó mediante la función potencial para los suelos A (CH: arcilla de alta plasticidad) y C (ML: limo de baja plasticidad) y para el suelo B el ajuste se obtuvo a través de una función polinomial. Además, se obtuvieron las ecuaciones y coeficientes de determinación correspondientes a las curvas de ajuste.

Mediante el ensayo Próctor Modificado aplicado a cada uno de los suelos se obtuvo tres diferentes pesos específicos secos (γ_{dmax}), los cuales nos permitió limitar horizontalmente las Figuras 4.5.a, 4.5.b y 4.5.c. Por otra parte, los pesos específicos determinados a través de las relaciones volumétricas (Tabla 4.2, pg.60), se relacionaron con las resistividades obtenidas en campo (Tabla 4.3, pg.63) y fueron ubicadas en la Figura 4.5 para cada caso, con el propósito de comparar entre los resultados medidos en laboratorio y campo. En la Figura 4.5 las abscisas se representaron a escala semilogarítmica y las ordenadas a escala aritmética, con el objetivo de tener una mejor apreciación de los datos de peso específico (γ) y resistividad (ρ), en condiciones sueltas y compactas. Además, sobre las abscisas de la Figura 4.5, se incluyó una línea vertical que limita la resistividad, ubicado bajo criterio personal y basado en los resultados de la relación (w) vs (ρ). La importancia de esta restricción se refleja en una mejor evaluación e interpretación de las mediciones tomadas en campo.

El suelo A (CH: arcilla de alta plasticidad) bajo condiciones sueltas presentaron un amplio rango de resistividades afectados únicamente por el contenido de humedad (w) en un intervalo entre 8,22 a 32,35%. En condiciones secas la resistividad (ρ) se incrementó ampliamente, mientras que en condiciones húmedas la (ρ) disminuyó, manteniéndose los valores del peso específico (γ) en un rango constante 9,90 a 10,64 kN/m³, (Tabla 4.4. pg.66). Mientras tanto, el suelo en condiciones húmedas presentó mayor adherencia superficial entre las partículas, ocasionando encapsulamiento de los granos secos y un

aumento en la relación de vacíos. En general, el peso específico en condiciones sueltas fueron los más bajos, en comparación a las compactas, Figura 4.5.a.

La arcilla de alta plasticidad (CH) en condiciones densas presentó una disminución de la resistividad eléctrica debido al incremento del esfuerzo de compactación (número de golpes). En la Figura 4.5.a se mostró la relación entre el peso específico (γ) y la resistividad (ρ), el continuo aumento del contenido de humedad acompañado de la energía de compactación provocó un incremento del peso específico.

En condiciones húmedas, la resistividad eléctrica del suelo es más sensible al esfuerzo de compactación provocando un mayor peso específico, contrario a lo que pasa en condiciones secas donde no se muestra significativos cambios en el peso específico. Las resistividades ($\rho > 20 \Omega\text{m}$) presentaron elevados valores de resistividad 102,03 a 26,15 Ωm , correspondientes a un bajo peso específico 12,00 a 13,66 kN/m^3 y contenido de humedad 8,47 a 15,86% respectivamente, tales resultados se ubicaron en la rama seca, en estas condiciones las arcillas fueron más difíciles de remoldear. En cambio, las resistividades ($\rho < 20 \Omega\text{m}$) se ubicaron en la rama húmeda, varios resultados de (ρ) se ubicaron debajo del peso específico seco máximo ($\gamma_{\text{dmax}} = 16,10 \text{ kN/m}^3$), Figura 4.5.a, para un esfuerzo de compactación de 10 y 20 golpes las resistividades disminuyeron de 19,54 a 11,50 Ωm , provocándose el incremento del peso específico desde 13,95 a 16,39 kN/m^3 en intervalo de humedades entre 24,91 a 32,35% respectivamente, como se muestra en la (Tabla 4.4. pg. 66).

En la rama húmeda de la Figura 4.5.a, los valores de peso específico y resistividad que se situaron sobre (γ_{dmax}), no presentaron cambios significativos al ser aplicados un esfuerzo de compactación de (35 golpes). La resistividad más baja correspondió al mayor peso específico ($\rho = 11,50 \Omega\text{m}$; $\gamma = 16,39 \text{ kN/m}^3$; $w = 24,57\%$), contrario al resultado anterior el contenido de humedad y resistividad se incrementaron, mientras que, el peso específico disminuyó ($\rho = 11,83 \Omega\text{m}$; $\gamma = 16,34 \text{ kN/m}^3$; $w = 30,62\%$). Además, en la Figura 4.5.a se incluyó la medida tomada en campo ($\rho = 49,54 \Omega\text{m}$; $\gamma = 13,49 \text{ kN/m}^3$), valor que resultó inesperado debido a que se ubicó en la rama seca, lo que hizo suponer una elevada relación de vacíos y deficiencia entre el contacto suelo-electrodo.

McCarter (1984) realizó su investigación en dos clases de arcillas (Cheshire y Londres) e identificó que la reducción de la relación de vacíos en la estructura del suelo tiene un efecto significativo sobre la resistividad.

Abu-Hassanein *et al.* (1996) indicaron que la resistividad es sensible a las condiciones de compactación, quienes determinaron que a mayor esfuerzo de compactación menor resistividad del suelo. Por lo tanto, el incremento del peso específico a un cierto contenido de humedad está asociado con la reducción del espacio de poros, remoldeo de los terrones de arcilla y reorientación de las partículas, dando como resultado un aumento en la conducción eléctrica en un mayor peso específico.

En la Figura 4.5.a, se observó que las curvas de ajuste fueron representadas por la función potencial para los diferentes esfuerzos de compactación ensayadas, a 10 golpes y 20 golpes se obtuvieron las siguientes ecuaciones: $\gamma = 18,17\rho^{-0,09}$; $\gamma = 21,14\rho^{-0,13}$ respectivamente, con un coeficiente de determinación de ($R^2 = 0,94$) en ambos casos. Finalmente, a 35 golpes la ecuación fue: $\gamma = 24,48\rho^{-0,16}$ con un $R^2 = 1$ llegando a ser un ajuste perfecto, este resultado debe ser utilizado con mucho cuidado, ya que se necesita mayor cantidad de datos para confirmar este ajuste.

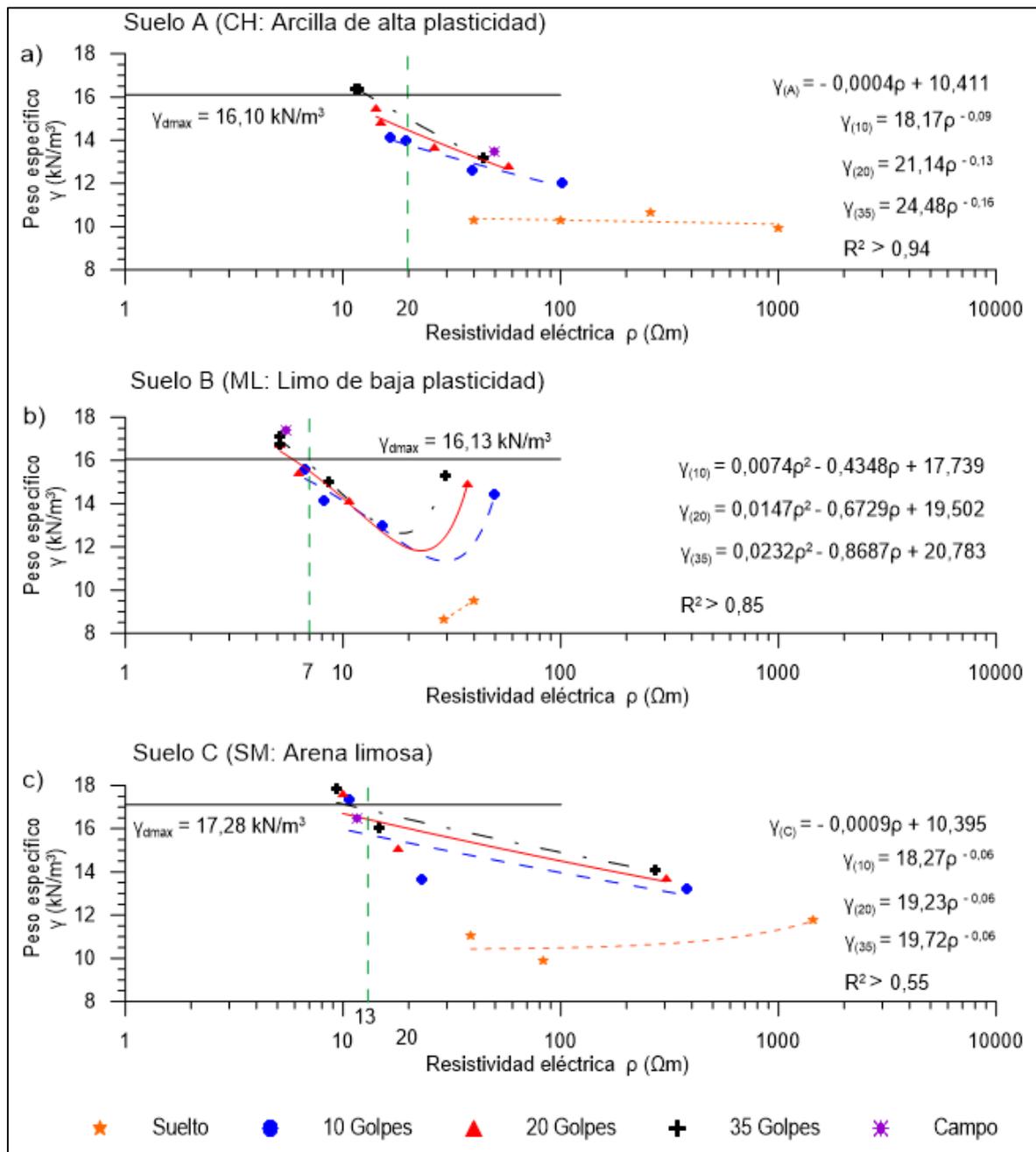


Figura 4.5 Correlación entre el peso específico y la resistividad eléctrica de los suelos en condiciones sueltas y compactadas: a) Arcilla de alta plasticidad (CH), b) Limo de baja plasticidad (ML), c) Arena limosa (SM).

El suelo B (ML: limo de baja plasticidad) en condiciones sueltas, no pudo ser determinada la ecuación de ajuste ni el (R^2) debido a problemas en la medición de la resistividad. Sin embargo, se obtuvo los resultados del peso específico que fluctuaron de 13,03 a 8,6 kN/m^3 con una disminución progresiva, lo que supone un comportamiento similar a la resistividad, lo cual sugirió un ajuste lineal con una pendiente más inclinada en comparación a los de los suelos A y C. La suposición anterior fue respaldada mediante observaciones realizadas en laboratorio, al incrementar el contenido de humedad la cantidad de suelo que ingreso al cilindro de PVC disminuyó, atribuyéndole esta conducta a las características cementantes del suelo siendo el agua quien provocó un encapsulamiento de las partículas secas, mientras que superficialmente presentaron una gran adherencia entre las partículas ocasionando vacíos de aire.

Mientras tanto, en condiciones densas al aumentar el esfuerzo de compactación la resistividad del suelo disminuyo, como consecuencia del incremento del contenido de humedad observándose un incremento en el peso específico. En la Figura 4.5.b se presenta la correlación entre el peso específico (γ) y la resistividad (ρ) estos resultados fueron ajustadas mejor a una función polinomial, tendencia que fue diferente a los suelos A y C, debido a que este suelo sometido a un bajo contenido de humedad (11,99 a 12,65%) presentó altos valores de resistividad 49,90 a 29,52 Ωm y pesos específicos 14,44 a 15,32 kN/m^3 para los diferentes esfuerzos de compactación de 10, 20 y 35 golpes, tal comportamiento se le atribuye a la escasa cantidad de agua, gravedad específica de los sólidos y elevado contenido de finos presentes en el suelo, dando como resultado un escaso efecto de la energía de compactación.

Posteriormente, se incrementó la cantidad de agua en la muestra de suelo, observándose un aumento en el contenido de humedad y peso específico, mientras disminuyó la resistividad con una clara influencia de la compactación, esta tendencia se mantuvo en la rama seca y debajo del peso específico seco máximo ($\gamma_{\text{dmax}} = 16,13 \text{ kN/m}^3$) como se observa en la Figura 4.5.b.

Los resultados de peso específico (γ) y resistividad (ρ) que se ubicaron sobre el (γ_{dmax}), evidenciaron la poca influencia del contenido de humedad y esfuerzo de compactación sobre los valores de resistividad obtenidos en laboratorio: para 20 golpes ($\rho = 5,13 \Omega\text{m}$; $\gamma = 16,74 \text{ kN/m}^3$; $w = 29,06\%$) y 35 golpes ($\rho = 5,17 \Omega\text{m}$; $\gamma = 16,74 \text{ kN/m}^3$; $w = 22,73\%$); ($\rho = 5,10 \Omega\text{m}$; $\gamma = 17,13 \text{ kN/m}^3$; $w = 30,13\%$), Tabla 4.4. Además, se colocó la medida tomada en campo ($\rho = 5,48 \Omega\text{m}$; $\gamma = 17,39 \text{ kN/m}^3$) observándose valores muy similares a los obtenidos en laboratorio, todos estos resultados se ubicaron en la rama húmeda.

(Rinaldi, 2013) en su investigación concluyó que la resistividad de los Loess tiene una dependencia significativa del contenido de humedad y es poco influenciado por la densidad.

(Abu-Hassanein *et al.*, 1996) investigaron la influencia entre la resistividad y el esfuerzo de compactación para diferentes tipos de suelos arcillosos y limosos. Los resultados indicaron que las resistividades eléctricas de los suelos compactados en la rama seca

son mayores que en la rama humedad. Por lo tanto, la resistividad es más sensible a los valores inferiores a la humedad óptima (w_{op}), mientras que para valores superiores a la (w_{op}), la resistividad eléctrica resulta independiente de la humedad de compactación (rama húmeda).

Finalmente, el suelo C (ML: arena limosa) bajo condiciones sueltas presentan el mayor rango de resistividades, afectadas únicamente por el contenido de humedad, los cuales fluctuaron entre 7,20 a 27,97%. La resistividad (ρ) en condiciones secas fue elevada, al incrementar una determinada cantidad de agua sobre el espécimen a ensayar, los valores de resistividad disminuyeron bruscamente, mientras que, los resultados del peso específico no mostraron ningún cambio significativo, variando entre 9,86 a 11,76 kN/m³, siendo los más bajos en comparación a los compactados, Tabla 4.4 y Figura 4.5.c. Mediante una función lineal se obtuvo la correlación entre el peso específico y resistividad representada por la ecuación: $\gamma = 0,0009\rho + 10,395$, acompañado de un bajo coeficiente de determinación ($R^2 = 0,60$), este valor no es concluyente debido a la escasa cantidad de datos utilizados.

Mientras tanto, en condiciones densas del suelo, se observa una disminución de la resistividad debido al incremento del esfuerzo de compactación (10, 20 y 35 golpes). Además, como consecuencia del incremento del contenido de humedad (w) el peso específico (γ) también aumento, Figura 4.5.c. El suelo en la rama seca resultó ser más sensible al esfuerzo de compactación, mientras que, este efecto reflejó ser menos significativo en condiciones húmedas, como se muestra a continuación. Ampliar

Las resistividades ($\rho > 13 \Omega m$) presentaron un rango de resistividades que van de 382,36 a 14,70 Ωm , correspondientes a un amplio intervalo de pesos específicos (13,22 a 16,05 kN/m³) y bajos contenidos de humedad 7,34 a 16,16% respectivamente, estos resultados se ubicaron en la rama seca. Mientras tanto, al agregar mayor cantidad de agua sobre la muestra de suelo se observó un incremento del peso específico y una significativa disminución de la resistividad, confirmando la influencia del contenido de humedad y el esfuerzo de compactación, tal comportamiento únicamente fue válido para valores inferiores al peso específico seco máximo ($\gamma_{dmax} = 17,28$ kN/m³). Mientras tanto, para las resistividades ($\rho < 13 \Omega m$) y superiores al (γ_{dmax}) se pudo observar la poca influencia del esfuerzo del compactación, como lo muestra la Figura 4.5.c. La resistividad más baja correspondió al mayor peso específico: para 10 golpes ($\rho = 10,67 \Omega m$; $\gamma = 17,32$ kN/m³), 20 golpes ($\rho = 9,96 \Omega m$; $\gamma = 17,66$ kN/m³) y 35 golpes ($\rho = 9,36 \Omega m$; $\gamma = 17,86$ kN/m³) en un limitado rango de humedades de 27,97 a 26,89%, como se presenta en la (Tabla 4.4. pg. 66).

Además, en la Figura 4.5.c se colocó la medida tomada en campo ($\rho = 11,53 \Omega m$; $\gamma = 16,45$ kN/m³) presentando menor peso específico y mayor resistividad con respecto a los datos obtenidos en el laboratorio este resultado se ubicó en la rama húmeda, debajo de la (γ_{dmax}). La función potencial se ajustó mejor a los diferentes esfuerzos de compactación ensayadas: para 10, 20 y 35 golpes se obtuvieron las siguientes ecuaciones: $\gamma = 18,27\rho$

$0,06$, $\gamma = 19,23\rho^{-0,06}$; $\gamma = 19,72\rho^{-0,06}$, respectivamente. Los coeficientes de determinación (R^2) fluctuaron entre (0,55 a 0,88), lo que nos indicó una baja correlación entre estos dos parámetros (γ) y (ρ) especialmente cuando el suelo tiene escasa cantidad de agua.

Abidin *et al.* (2013) analizaron una arena limosa y establecieron correlaciones entre la resistividad con el contenido de humedad y densidad. Estos autores, manifestaron el suelo en condiciones secas y sueltas contiene una elevada cantidad de poros y vacíos de aire, provocando un incremento en el valor de la resistividad, debido a la dificultad de propagación de la corriente eléctrica a través del suelo.

4.6 Comparación de gráficas resultantes

En la Figura 4.6.a, 4.6.b, 4.6.c y 4.6.d se observaron las correlaciones entre el contenido de humedad (w) y la resistividad eléctrica (ρ) de los suelos A, B y C, manteniéndose los esfuerzos de compactación constante para condiciones sueltas (0 golpes) y compactas (10, 20 y 35 golpes), la curva que mejor se ajustó estos dos parámetros (w y ρ) se obtuvo mediante la función potencial para los diferentes tipos de suelos ensayados. En la Figura 4.6.a, los suelos en condiciones sueltas presentaron una disminución significativa de la resistividad eléctrica al incrementarse la cantidad de agua sobre las muestras ensayadas.

En los suelos A (CH: arcilla de alta plasticidad) y C (SM: arena limosa) se observó un amplio rango de resistividades afectados únicamente por el contenido de humedad, el suelo A cambio de ($\rho = 1006,86 \Omega\text{m}$; $w = 8,57\%$) hasta ($\rho = 40,30 \Omega\text{m}$; $w = 32,09\%$), mientras tanto, el suelo C varió de ($\rho = 1451,12 \Omega\text{m}$; $w = 7,51\%$) a ($\rho = 38,62 \Omega\text{m}$; $w = 27,42\%$). A pesar, que el suelo B (ML: limo de baja plasticidad) únicamente realizó dos mediciones y no se obtuvo ningún ajuste, se pudo observar que este suelo presentó la misma tendencia que los suelos A y C.

Mientras tanto, los suelos en condiciones densas también presentaron una clara disminución en los valores de resistividad debido al incremento del contenido de agua y esfuerzo de compactación. En la Figura 4.6.b se observó que el suelo C presentó la mayor variación en la resistividad con $371,39 \Omega\text{m}$, seguido del suelo A con $85,52 \Omega\text{m}$ y finalmente, el suelo B con $43,22 \Omega\text{m}$, para un esfuerzo de compactación de 10 golpes. La tendencia de las curvas de los suelos B y C, son muy similares pero desfasadas, comportamiento que lo mantuvo para 20 y 35 golpes. En la Figura 4.6.c se mostró que a 20 golpes la variación de las resistividades fue menor que a 10 golpes, ubicándose los suelos en el siguiente orden: $293,66 \Omega\text{m}$, $43,08 \Omega\text{m}$, $32,22 \Omega\text{m}$ correspondiente a los suelos C, A y B respectivamente. Finalmente, a 35 golpes los valores de resistividad siguen disminuyendo pero la variación es más restringida para el suelo C con $264,78 \Omega\text{m}$, seguido del suelo A con $32,09 \Omega\text{m}$ y el suelo C con $24,42 \Omega\text{m}$, como se muestra en la Figura 4.6.d.

El limo de baja plasticidad (ML) correspondiente al suelo B, presentó la más baja resistividad y la variación más limitada de todos los suelos, en un rango de humedades constantes, contrario a lo manifestado anteriormente, la arena limosa (suelo C) presentó

los más altos y amplios rangos de resistividades. Mientras tanto, el rango de resistividades intermedias se la adjudicó a la arcilla de alta plasticidad (suelo A), observándose los mayores valores de (ρ) en condiciones húmedas. Mediante los resultados obtenidos, se pudo observar clara influencia de la energía de compactación y el contenido de agua, sobre los valores de resistividad.

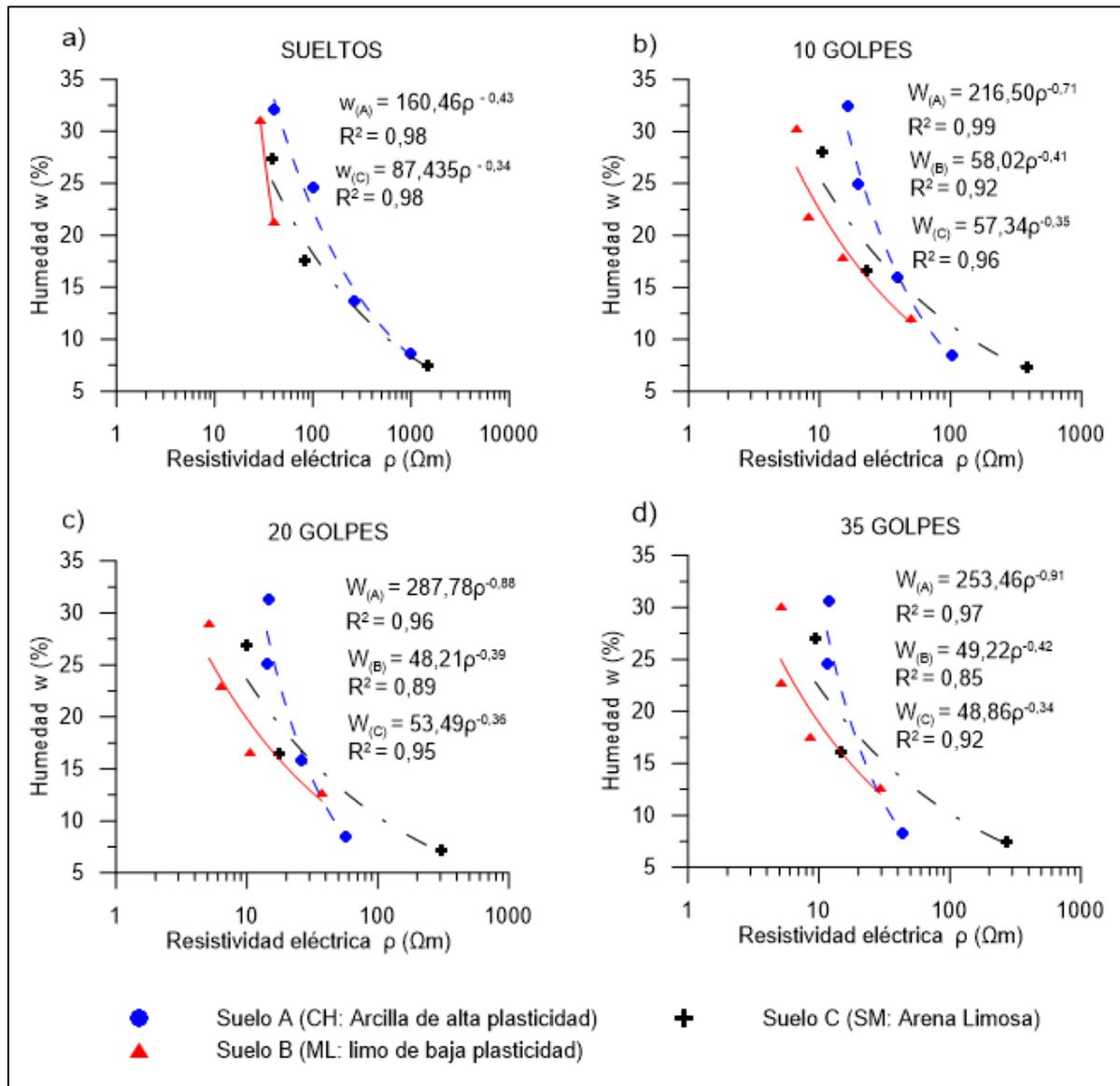


Figura 4.6 Correlación entre el contenido de humedad y la resistividad eléctrica de los suelos A, B y C en condiciones: a) sueltas y compactadas: b) 10 golpes, c) 20 golpes y d) 35 golpes.

Además, al analizar únicamente al suelo B (ML) y suelo C (SM) pertenecientes a la Formación Mangán podríamos suponer que el contenido de partículas finas y gruesas también influyen en los valores de resistividad. Según Hazreek *et al.* (2015), las partículas finas permiten una fácil propagación de la corriente produciendo baja resistividad, mientras que la fracción de partículas gruesas produce alta resistividad debido a la dificultad de la propagación de la corriente. Contrarios a lo expuesto previamente, en la

Figura 4.6.d, tenemos al suelo A (arcillas de alta plasticidad) que a pesar de contener un gran contenido de finos el valor de la resistividad es superior al de los suelos C y B en condiciones de mayor contenido de humedad. Por ejemplo, el suelo A ($\rho = 11,50 \Omega\text{m}$; $w = 24,57\%$), suelo B ($\rho = 5,17 \Omega\text{m}$; $w = 22,73\%$) y el suelo C ($\rho = 9,36 \Omega\text{m}$; $w = 26,98\%$), por lo tanto, se asume que la arcilla de alta plasticidad es influenciada por la composición mineralógica.

La correlación entre el peso específico (ρ) y la resistividad (γ) presentaron una tendencia para los suelos en condiciones sueltas y dos tendencias diferentes para las condiciones compactas, como se observa en la Figura 4.7.

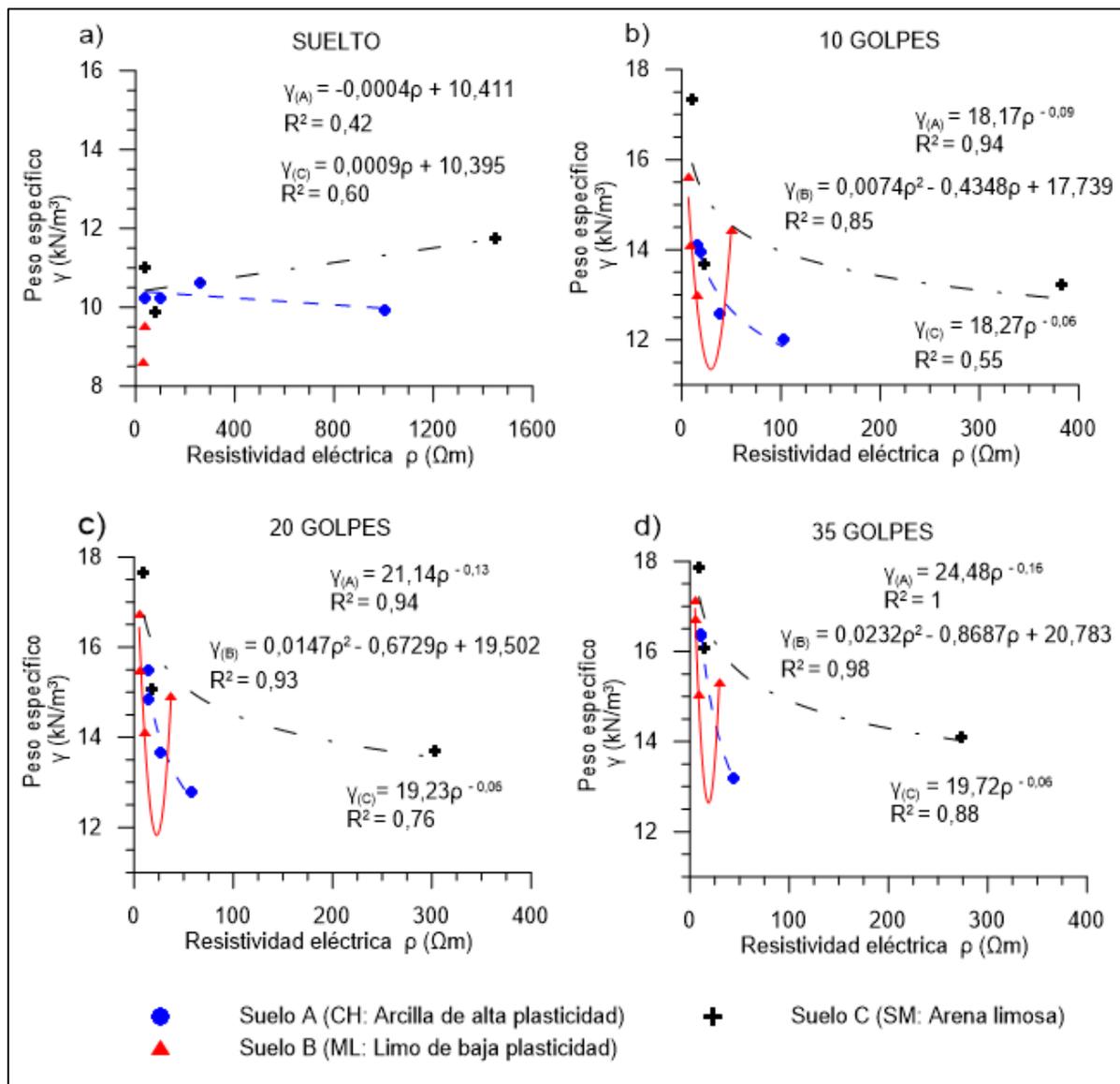


Figura 4.7 Correlación entre el peso específico y la resistividad eléctrica de los suelos A, B y C en condiciones a) sueltas y compactadas: b) 10 golpes, c) 20 golpes y d) 35 golpes.

Los suelos A y C en condiciones sueltas se ajustaron mejor a una función lineal, mientras que en el suelo B no se realizó ningún ajuste por falta de datos. En la Figura 4.7.a, se observó que al incrementar el contenido de humedad, la resistividad disminuyó significativamente, con poca variabilidad del peso específico, para los suelos A y C correspondieron los valores de $0,74 \text{ kN/m}^3$ y $1,9 \text{ kN/m}^3$ respectivamente, el mayor cambio del peso específico lo obtuvo el suelo C (SM: arena limosa). En la Figura 4.7.a se observa una escasa cantidad de datos ajustados a los suelos A y C, incluido un bajo coeficiente de determinación (R^2) se concluye que hay poca correlación entre el peso específico y resistividad.

Mientras tanto, en condiciones compactas la curva de ajuste para el suelo A (CH: arcillas de alta plasticidad) y el suelo C (SM: arena Limosa) se obtuvo mediante la función potencial y el suelo B (ML: limo de baja plasticidad) a través de una función polinomial. En las Figuras 4.7.b, 4.7.c y 4.7.d. se presentan los resultados de la resistividad y peso específico de los tres tipos de suelos ensayados (A, B y C) manteniéndose la energía de compactación constante, en condiciones densas se observó el incremento del peso específico acompañado de un aumento progresivo del contenido de humedad (w) y una clara disminución en los valores de resistividad eléctrica al incrementarse el esfuerzo de compactación.

En la Figura 4.7.b, a un esfuerzo de compactación de (10 golpes) se muestra la relación entre la resistividad eléctrica (ρ) y el peso específico (γ) de los tres tipos suelos ensayados, el espécimen del suelo C (SM: arena limosa) presentó mayor variabilidad en los parámetros de (ρ) y (γ) ($\rho = 371,69 \text{ } \Omega\text{m}$; $\gamma = 4,10 \text{ kN/m}^3$), seguido del suelo A (CH: arcilla de alta plasticidad) y suelo B (ML: limo de baja plasticidad) con valores de ($\rho = 85,52 \text{ } \Omega\text{m}$; $\gamma = 2,63 \text{ kN/m}^3$) y ($\rho = 43,22 \text{ } \Omega\text{m}$ $\gamma = 4,10 \text{ kN/m}^3$), respectivamente.

En la Figura 4.7.c, se incrementó el esfuerzo de compactación de 10 a 20 golpes, los cuales presentaron el mismo orden y comportamiento que el caso anterior: el suelo C mostró una variación en la resistividad y peso específico de (SM: $\rho = 293,66 \text{ } \Omega\text{m}$; $\gamma = 3,95 \text{ kN/m}^3$), seguido del suelo A (CH: $\rho = 42,36 \text{ } \Omega\text{m}$; $\gamma = 2,69 \text{ kN/m}^3$) y el suelo B (ML: $\rho = 32,22 \text{ } \Omega\text{m}$ $\gamma = 2,64 \text{ kN/m}^3$).

Finalmente, en la Figura 4.7.d se observa que al incrementar del esfuerzo de compactación (EC) a 35 golpes, las resistividades se redujeron aún más en comparación a 10 y 20 golpes, manteniéndose la misma tendencia y orden de los tres tipos de muestras, donde la variación de la resistividad y peso específico son menores a los casos anteriores, el suelo C (SM: $\rho = 264,78 \text{ } \Omega\text{m}$; $\gamma = 3,76 \text{ kN/m}^3$), seguido del suelo A (CH: $\rho = 32,09 \text{ } \Omega\text{m}$; $\gamma = 3,22 \text{ kN/m}^3$) y suelo B (ML: $\rho = 24,42 \text{ } \Omega\text{m}$ $\gamma = 2,1 \text{ kN/m}^3$) respectivamente.

Estos resultados al ser analizados en conjunto, muestran que la energía de compactación y contenido de humedad son factores que influyen sobre la resistividad eléctrica de los suelos, reflejándose en el incremento del peso específico y la disminución de la resistividad, debido a que se presenta un mayor contacto del área superficial de las partículas, lo cual provoca una rápida conductividad eléctrica.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El propósito de este estudio es demostrar que la resistividad eléctrica puede ser potencialmente útil en la determinación del comportamiento del suelo. En esta investigación experimental se determinó la resistividad eléctrica del suelo bajo diferentes contenidos de humedad y energía de compactación, es decir, condiciones sueltas y compactas (10, 20 y 35 golpes). Las mediciones de la resistividad eléctrica se efectuaron en el laboratorio y se tomó una lectura en campo para cada uno de los tres tipos de suelo.

Los resultados del ensayo indicaron que el contenido de humedad y peso específico han influido significativamente en la resistividad eléctrica de los suelos.

- Los resultados obtenidos indican que las resistividades eléctricas son sensibles a las variaciones del contenido de humedad cualquiera que sea la textura del suelo. Además, la resistividad eléctrica medida en el laboratorio es inversamente proporcional al contenido de humedad ($\rho \propto 1/w$) y se correlacionan mediante una función potencial.
- En la rama seca se presentan los mayores rangos de resistividad eléctrica en comparación a la rama húmeda evidenciando la influencia del contenido de humedad y energía de compactación.
- Los mayores valores de resistividad eléctrica de los suelos se obtuvieron en condiciones sueltas y con un bajo contenido de humedad siendo influenciado por la presencia de vacíos de aire.
- En condiciones compactas, cuando el contenido de humedad se encuentra en valores superiores a la óptima (w_{op}), la resistividad eléctrica resulta independiente a la humedad de compactación.
- Las resistividades eléctricas más bajas le correspondieron al limo de baja plasticidad (ML), seguido de la arena limosa (SM) y la arcilla de baja plasticidad (CH), respectivamente, debido a que dejan de influir el contenido de humedad y la energía de compactación.
- Mediante el análisis de la información obtenida entre el contenido de humedad y la resistividad eléctrica, se determinaron resistividades óptimas en cada uno de los suelos para ser utilizados como parámetros de control en las mediciones de campo. Por ejemplo, a la arcilla alta plasticidad (CH: $\rho = 20 \Omega m$), la arena limosa (SM: $\rho = 13 \Omega m$) y finalmente, para el limo de baja plasticidad (SM: $\rho = 7 \Omega m$).
- A pesar del escaso número de ensayos realizados, la medición de la resistividad eléctrica se presenta como una alternativa para medir indirectamente el contenido de humedad mediante correlaciones.

- Al igual que el contenido de humedad, la energía de compactación (*i.e.*, 10, 20 y 35 golpes) también influye en los valores de resistividad eléctrica. El incremento del peso específico provoca una disminución de la resistividad eléctrica del suelo, siendo estos dos parámetros inversamente proporcionales como se relaciona a continuación ($\rho \propto 1/\gamma$).
- El suelo en condiciones sueltas no presenta cambios significativos en los valores del peso específico, mientras que la resistividad eléctrica disminuye, debido al incremento del contenido de humedad. La correlación entre el peso específico y la resistividad no son tan claras debido al reducido número de ensayos realizados, pero se ajustó mejor a una función lineal.
- La influencia de la energía de compactación resulta más significativa en la rama seca, donde a mayor energía de compactación menor resistividad eléctrica.
- Por otro lado, cuando se compacta en la rama húmeda, es decir, sobre el peso específico seco máximo (γ_{dmax}), la resistividad eléctrica tiende a ser independiente a la energía de compactación.
- La correlación entre el peso específico y la resistividad eléctrica de la arcilla de baja plasticidad (CH) y la arena limosa (SM) se ajustaron mejor a una función potencial, mientras que, limo de baja plasticidad (ML) a una función polinomial, en este caso se observa que la primera medida de estos dos parámetros (γ) y (ρ) con un bajo contenido de humedad no presenta ninguna tendencia provocando una distinción en la determinación de la función.

En la presente investigación debido a los resultados obtenidos se observó que el grado de saturación también puede ser correlacionado con la resistividad eléctrica. Por lo tanto, en el Anexo B se realizó un pequeño análisis de estos dos parámetros y se concluyó que:

- En cada tipo de suelo, al aumentar el grado de saturación la resistividad eléctrica del suelo disminuye, dando como consecuencia una correlación inversamente proporcional entre estos dos parámetros, actuando de manera independiente a la energía de compactación, comportamiento que concuerda con varios estudios (Abu-Hassanein et al., 1996; Aiassa, 2008; Kibria, 2011).

Basados en los valores de las resistividades eléctricas medidos en campo y varias propiedades físicas obtenidas mediante ensayos geotécnicos se concluye que:

- La resistividad es directamente proporcional a la relación de vacíos (e) y porosidad (η) e inversamente, al peso específico (γ) y gravedad específica de los sólidos (G_s), en los tres tipos de suelo.
- Los resultados de los límites a Atterberg y el contenido de partículas finas se comportaron inversamente proporcional a la resistividad eléctrica tomada en campo en los suelos B (limo de baja plasticidad) y C (arena limosa).

5.2 Recomendaciones

Se recomienda ampliar los sitios de investigación que presenten diferentes tipos de suelo, con el propósito de obtener una mayor cantidad de resistividades de control y comparar la influencia de los parámetros previamente analizados en este trabajo.

Además, efectuar estudios complementarios a esta investigación experimental que permita mejorar el conocimiento de las propiedades geotécnicas del suelo que influyen en el valor de la resistividad eléctrica. Dentro de estos estudios podemos mencionar los siguientes:

- Correlación entre la resistividad eléctrica con el tamaño de las partículas del suelo y los límites de Atterberg.
- Correlación entre la resistividad eléctrica con el grado de saturación y la relación de vacíos de aire.
- Correlación de la resistividad eléctrica con contenido de humedad y peso específico bajo diferentes métodos de compactación (Próctor Estándar, Modificado y Reducido)
- Comparación entre la resistividad eléctrica y propiedades físicas del suelo (contenido de humedad y peso específico) mediante mediciones realizadas en campo y laboratorio.

Para medir la resistividad eléctrica a escala de laboratorio puede ser utilizado un enfoque unidimensional (1D) debido a que el suelo se considera homogéneo, pero a escala de campo las mediciones no son lo suficientemente precisos (Loke et al., 2013). Por lo tanto, en los últimos 35 años se han producido mejoras importantes en los métodos de la resistividad obteniéndose enfoques bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D), los cuales presentan un mejor desempeño, ya que la resistividad real para un medio determinado cambia en todas las direcciones debido a la anisotropía y heterogeneidad del subsuelo. Por lo tanto, un enfoque bidimensional (2D) para medir la resistividad eléctrica del suelo a escala de campo es una buena alternativa, por ejemplo la tomografía eléctrica.

Se recomienda realizar mediciones de resistividad eléctrica mediante tomografías eléctricas en presas existentes en nuestro país, con el objetivo de evaluar su comportamiento e identificar zonas de mayor o menor densidad incluyéndose posibles zonas de flujo de agua a través del cuerpo de las presas. Además, pueden ser utilizadas para evaluar el grado de compactación y/o identificar zonas de mayor velocidad de infiltración del agua en diferentes tipos de rellenos, por ejemplo: presas de tierra o terraplenes.

Bibliografía

- [1] Abidin, M. H. Z., Saad, R., Ahmad, F., Wijeyesekera, D. C., & Baharuddin, M. F. T. (2011). "Application of Geophysical Methods in Civil Engineering" *Malaysian Technical Universities International Conference on Engineering and Technology*. http://www.researchgate.net/profile/Mohd_Hazreek_Zainal_Abidin/publication/216175351_Application_of_Geophysical_Methods_in_Civil_Engineering/links/0912f513f272e9a6f4000000.pdf
- [2] Abidin, M. H. Z., Wijeyesekera, D. C., Ahmad, F., Saad, R., & Baharuddin, M. F. T. (2013). "Correlation of Soil Box Resistivity Test on a Different Moisture Content and Density for Silty SAND and Gravelly SAND". *Information Engineering Letters*, 3. <http://doi.org/10.5729/iel.vol3.issue2.1>
- [3] Abidin, M. H. Z., Saad, R., Ahmad, F., Wijeyesekera, D. C., & Baharuddin, M. F. T. (2014). "Correlation Analysis Between Field Electrical Resistivity Value (ERV) and Basic Geotechnical Properties (BGP)". *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 51(3), 117-125. <http://doi.org/10.1007/s11204-014-9264-x>
- [4] Abidin, M. H. Z., Ahmad, F., Wijeyesekera, D. C., & Saad, R. (2014). "The Influence of Basic Physical Properties of Soil on its Electrical Resistivity Value under Loose and Dense Condition". *Journal of Physics: Conference Series*, 495(1), 012014. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/495/1/012014>
- [5] Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., & Blotz, L. (1996). "Electrical Resistivity of Compacted Clays". *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5), 397-406. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:5\(397\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:5(397))
- [6] Aiassa, G. (2008). "*Caracterización de procesos de infiltración en estado no saturado sobre suelos limosos compactados*". PhD tesis, Universidad Nacional de Córdoba, Disponible en línea: http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/aiassa/TDoctoral_Gonzalo_Aiassa.pdf
- [7] Archie, G. E. (1942). "The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics". *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng*, 146, 54–62.
- [8] ASTM G57. (2012). "*Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*". ASTM International. <http://www.astm.com>
- [9] Banton, O., Cimon, M.-A., & Seguin, M.-K. (1997). Mapping Field-Scale Physical Properties of Soil with Electrical Resistivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61(4), 1010-1017.
- [10] Basabe, P. (1998). "Prevención de Desastres Naturales en la Cuenca del Paute (PRECUPA 1994-1998)". Cooperación Ecuador- Suiza, Informe Final. Capítulo B Geología - Geotecnia (terrenos inestables), Cuenca.
- [11] Bhatt, S., & Jain, P. K. (2014). "Correlation between electrical resistivity and water content of sand—a statistical approach". *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 115 - 121.
- [12] Bristow, C. (1973). *Guide to the geology of the Cuenca Basin, southern Ecuador*. Ecuadorian Geological and Geophysical Society, Quito. 54p.

- [13] Bryson, S., & Bathe, A. (2009). "Determination of Selected Geotechnical Properties of Soil Using Electrical Conductivity Testing". *Geotechnical Testing Journal*, 32(3), 101632. <http://doi.org/10.1520/GTJ101632>.
- [14] BS 1377 - 3. (1990). "Methods of test for soils for civil engineering purposes". Part 3: Chemical and electro-chemical tests – BSI British Standards.
- [15] Calamita, G., Brocca, L., Perrone, A., Piscitelli, S., Lapenna, V., Melone, F., & Moramarco, T. (2012). "Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites". *Journal of Hydrology*, 454, 101–112.
- [16] Chik, Z., & Islam, S. T. (2012a). "Finding soil particle size through electrical resistivity in soil site investigations". *Electro. J. Geotech. Eng.*, (17), 1867–1876.
- [17] Chik, Z., Islam, S. M. T., Sanusi, H., & Mustafa, M. M. (2012b). "Expert idea on liquid limit and plastic limit estimation with soil resistivity profile". *The Online Journal of Science and Technology*, October 2012, Volume 2, Issue 4, 19 - 23. <http://www.tojsat.net/index.php/tojsat/article/view/62>
- [18] Clayton, C. R. ., Matthews, M. C., & Simons, N. E. (1995). *Site investigation* (2nd ed.). Blackwell Science Ltd. Disponible online: <http://geotechpedia.com/Publication/Show/80/Chapter-4-Subsurface-exploration-Engineering-Geophysics>
- [19] Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning Latin Am.
- [20] Das, B. M. (2001). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. 4ª. Edición, Ed. Thomson. México.
- [21] De la Rosa, M. (2013). "*Procesamiento avanzado de datos de resistividad eléctrica para aplicaciones geotécnicas*". Tesis de grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.
- [22] Fallah-Safari, M., Hafizi, M. K., & Ghalandarzadeh, A. (2013). "The relationship between clay geotechnical data and clay electrical resistivity". *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 54(1), 23–38.
- [23] Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., & Taya, N. (1999). "The micro-structures of clay given by resistivity measurements". *Engineering geology*, 54(1), 43–53.
- [24] Gabarrón, M. (2013). "*Evaluación de la técnica de tomografía eléctrica para la estimación de propiedades fisicoquímicas de residuos mineros*". Tesis de Master. Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia. Disponible online: <http://repositorio.bib.upct.es:8080/jspui/handle/10317/3787>
- [25] González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. España: Prentice Hall.
- [26] Hassan, Asem, A. (2014). *Electrical resistivity method for water content characterisation of unsaturated clay soil*. Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/10806/>
- [27] Hazreek, Z. A. M., Aziman, M., Azhar, A. T. S., Chitral, W. D., Fauziah, A., & Rosli, S. (2015). "The Behaviour of Laboratory Soil Electrical Resistivity Value under Basic Soil Properties Influences". En *IOP Conference Series: Earth and*

- Environmental Science* (Vol. 23, p. 012002). IOP Publishing. Available online: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/23/1/012002>
- [28] Kearey, P. Brooks, Michael, Hill, Ian. (2002). *An introduction to geophysical exploration*. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- [29] Kibria, G. (2011). "Determination of geotechnical properties of clayey soil from resistivity imaging (RI)". The University of Texas at Arlington, Texas. Available online: <https://uta-ir.tdl.org/uta-ir/handle/10106/6144>
- [30] Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of «goodness-of-fit» Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241. <http://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- [31] Liu, C., & Evett, J. (2008). *Soils and Foundations* (7 th ed.). New Jersey: Prentice Hall. Available online: <https://www.waterstones.com/book/soils-and-foundations/cheng-liu/jack-b-evett/9780132221382>
- [32] Loke, M. H. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *A practical guide to 2-D and 3-D surveys*, 2. Available online: <http://www.geomatrix.co.uk/tools/application-notes/Lokenote.pdf>
- [33] Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., & Wilkinson, P. B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135-156. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017>
- [34] Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press.
- [35] McCarter, W. J. (1984). The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Geotechnique*, (34), 263–267.
- [36] Mitchell, J., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behaviour*. Available online: <https://www.scribd.com/doc/190691890/38-Fundamentals-of-Soil-Behaviour-3rd-Edition-James-K-mitchell-Kenichi-Soga>
- [37] Molina, W. (2006). *Comparación de los métodos 1-d y 2-d de resistividad eléctrica por medio de sondeos tipo Wenner, Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD y RES2dINV*. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- [38] Montalván, F., Carrión, P., Fun-Sang, B., Romero, S., & Jiménez, S. (2008). Caracterización geoelectrica del acuífero de la cuenca del Río Olón para propuesta de plan de explotación. *Revista Tecnológica ESPOL*, 31 - 38.
- [39] Orellana, E. (1972). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Paraninfo.
- [40] Osman, S. B. S., & Siddiqui, F. I. (2014). Possible Assessment on Sustainability of Slopes by Using Electrical Resistivity: Comparison of Field and Laboratory Results (pp. 69 - 73). Prague, Czech Republic. Available online: <http://inase.org/library/2014/prague/bypaper/EEED-BIO/EEED-BIO-12.pdf>
- [41] Reynolds, J. M. (1987). The role of surface geophysics in the assessment of regional groundwater potential in northern Nigeria. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 4(1), 185–190.
- [42] Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley.

- [43] Rinaldi, V. (2013). Application of electrical resistivity for the control of water content and density in loess. *Advances in Unsaturated Soils* (pp. 165 - 169). Taylor & Francis Group, London. Available online: <https://books.google.com.ec/books?id=CgsYuhQijZgC&pg=PR11&dq=advances+in+unsaturated+soil+caicedo+2013>
- [44] Rinaldi, V., & Cuestas, G. (2002). "Ohmic Conductivity of a Compacted Silty Clay". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(10), 824-835. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:10\(824\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:10(824)).
- [45] Rodríguez, M. (2005). Geofísica aplicada a la obra civil. Método geoelectrico y sísmica de refracción. Casos prácticos (pp. 1-68). España. Disponible online: <http://www.lapisspecularis.org/Articulos/geofisicaObraCivil.pdf>
- [46] Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). "Electrical resistivity survey in soil science: a review". *Soil and Tillage Research*, 83(2), 173–193.
- [47] Seladji, S., Cosenza, P., Tabbagh, A., Ranger, J., & Richard, G. (2010). "The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation". *European journal of soil science*, 61(6), 1043–1055.
- [48] Shah, P. H., & Singh, D. N. (2005). "Generalized Archie's law for estimation of soil electrical conductivity". *Journal of ASTM International*, 2(5), 1–20.
- [49] Siddiqui, F. I., & Osman, S. B. S. (2012). "Integrating geo-electrical and geotechnical data for soil characterization international". *J Appl Phys Math*, 2, 104–106.
- [50] Suarez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. http://www.academia.edu/8925280/DESLIZAMIENTOS_Y_ESTABILIDAD_DE_TALUDES_EN_ZONAS_TROPICALES
- [51] Vázquez, A. V. (2013). Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo, Proyecto de graduación de *Ing. Civil*, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería. Cuenca.
- [52] Whitlow, R. (2001). *Basic Soil Mechanics* (4 th ed.). United Kingdom: Prentice Hall. Available online: <https://www.scribd.com/doc/106254333/Basic-Soil-Mechanics-Roy-Whitlow-2001>
- [53] Yan, M., Miao, L., & Cui, Y. (2012). Electrical Resistivity Features of Compacted Expansive Soils. *Marine Georesources & Geotechnology*, 30(2), 167-179. <http://doi.org/10.1080/1064119X.2011.602384>



Anexos

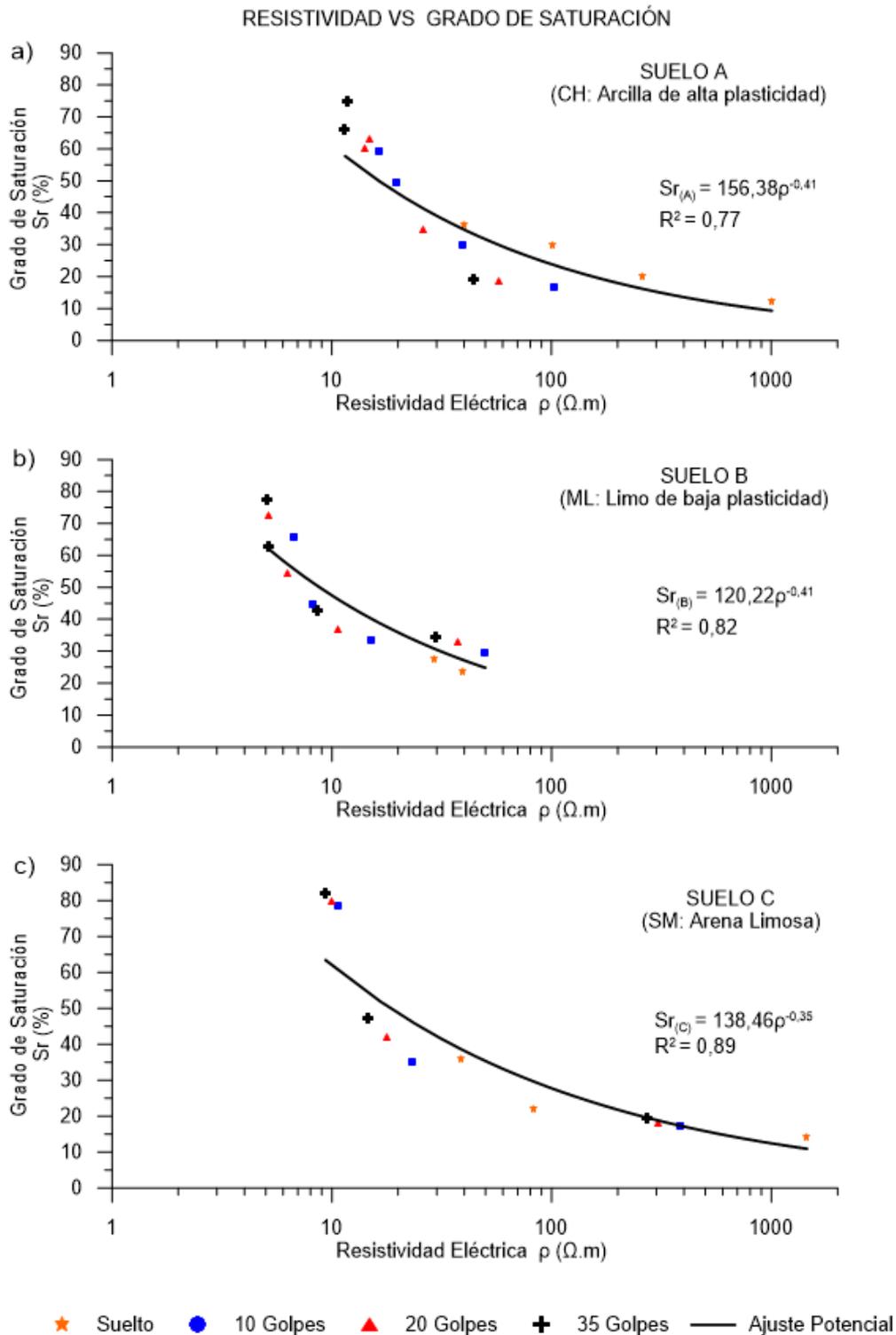
ANEXOS



Anexo A. Tabla de ecuaciones y coeficientes de correlación

Tipo de Suelo	Parámetros	Condiciones	Número de Golpes	Coeficientes de Correlación		Coeficiente de Determinación (R2)	Ecuación
				Pearson (r)	Spearman (r _s)		
Arcilla de alta plasticidad (CH)	Humedad	Sueltas	0	-0,83	-1,00	0,98	$w = 160,46\rho^{-0,43}$
		Compactas	10	-0,89	-1,00	0,99	$w = 216,50\rho^{-0,71}$
			20	-0,90	-0,80	0,96	$w = 287,78\rho^{-0,88}$
			35	-0,96	-0,50	0,97	$w = 253,46\rho^{-0,91}$
	Peso específico	Sueltas	0	-0,65	-0,20	0,42	$\gamma = -0,0004\rho + 10,411$
		Compactas	10	-0,89	-1,00	0,94	$\gamma = 18,17\rho^{-0,09}$
			20	-0,91	-1,00	0,94	$\gamma = 21,14\rho^{-0,13}$
			35	-1,00	-1,00	1,00	$\gamma = 24,48\rho^{-0,16}$
Limos de baja plasticidad (ML)	Humedad	Sueltas	0	-----	-----	-----	-----
		Compactas	10	-0,83	-1,00	0,92	$w = 58,02\rho^{-0,41}$
			20	-0,81	-1,00	0,89	$w = 48,21\rho^{-0,39}$
	Peso específico	Sueltas	0	-----	-----	-----	-----
		Compactas	10	-0,07	-0,40	0,85	$\gamma = 0,0074\rho^2 - 0,4348\rho + 17,739$
			20	-0,37	-0,80	0,93	$\gamma = 0,0147\rho^2 - 0,6729\rho + 17,739$
35	-0,59	-0,80	0,98	$\gamma = 0,0232\rho^2 - 0,8687\rho + 20,783$			
Arena limosa (SM)	Humedad	Sueltas	0	-0,88	-1,00	0,98	$w = 87,35\rho^{-0,34}$
		Compactas	10	-0,85	-1,00	0,96	$w = 57,34\rho^{-0,35}$
			20	-0,86	-1,00	0,95	$w = 53,49\rho^{-0,36}$
			35	-0,84	-1,00	0,92	$w = 48,86\rho^{-0,34}$
	Peso específico	Sueltas	0	0,78	0,50	0,60	$\gamma = -0,0009\rho + 10,395$
		Compactas	10	-0,61	-1,00	0,55	$\gamma = 18,27\rho^{-0,06}$
			20	-0,78	-1,00	0,76	$\gamma = 19,23\rho^{-0,06}$
			35	-0,89	-1,00	0,88	$\gamma = 19,72\rho^{-0,06}$

Anexo B. Correlación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación



Anexo B. Relación entre la resistividad eléctrica y la saturación de tres tipos de suelos: a) Arcilla de alta plasticidad, b) Limo de baja plasticidad y c) Arena limosa.

De acuerdo a la tendencia de los datos ensayados en los tres tipos de suelo, se pudo observar que los suelos A y C correspondientes a la arcilla de alta plasticidad (CH) y arena Limosa (SM) respectivamente, mostraron los valores más altos de resistividad eléctrica (A: 1006,86 Ωm y C: 1451,12 Ωm) con un bajo grado de saturación (A: 12,23% y C: 14,19%) respectivamente, Figura Anexo B (a y b). Para el suelo B (limo de baja plasticidad, ML), a pesar de carecer de dos datos en condiciones sueltas y baja saturación, suponemos un comportamiento similar al resto de suelos analizados pero con menor resistividad, Figura Anexo B (b). Mientras tanto, las resistividades más bajas de los suelos A, B y C presentan valores de 11,50 Ωm ; 5,10 Ωm ; 9,36 Ωm , respectivamente, correspondientes a un grado de saturación de (A: 74,79%; B: 77,60% y C: 81,78%).

Para los tres tipos de suelo se observó que la mejor curva de ajuste se obtuvo mediante una función potencial, correspondiendo las ecuaciones y coeficientes de determinación de la siguiente manera: para el suelo A: $S_r = 156,38p^{-0,41}$ y un $R^2 = 0,77$, el suelo B: $S_r = 120,22p^{-0,41}$ y un $R^2 = 0,82$; y por último el suelo C: $S_r = 138,46p^{-0,35}$ y un $R^2 = 0,89$. Las correlaciones obtenidas entre estos dos parámetros son bastante aceptables.

De acuerdo a la ley de Archie, un incremento en la resistividad va acompañada de una reducción en el grado de saturación del suelo, debido a la sustitución parcial del agua por aire en el interior de los poros. Por lo tanto, la variación de la resistividad del suelo puede ser interpretado por medio del grado de saturación. La Figura Anexo B, muestra la relación entre la resistividad y el grado de saturación de los especímenes, en condiciones sueltas y compactadas. Se pudo observar que al incrementar el grado de saturación disminuye la resistividad del suelo y que, a bajo grado de saturación, la resistividad cambia más rápidamente, como se muestra en la Figura B, varias investigaciones respaldan esta tendencia, (Abu-Hassanein *et al.*, 1996; McCarter, 1984; Yan *et al.*, 2012; Aiassa, 2008).

Además a bajo grado de saturación, la continuidad del agua de poros necesaria para la conducción de la corriente no alcanza un nivel satisfactorio. Por lo tanto, la resistividad es relativamente alta y cambia rápidamente. El aumento del grado de saturación mejora la continuidad del agua de poros y la conducción eléctrica, causando una disminución en la resistividad.

McCarter (1984) manifestó, que cuando se la saturación se acerca al 100%, las trayectorias eléctricas están bien alcanzadas por la corriente eléctrica. Por lo tanto, la influencia del contenido de agua sobre la resistividad llega a ser insignificante.

Los valores altos de los coeficientes de correlación obtenidos de la relación resistividad vs grado de saturación, sugiere que la resistividad está fuertemente correlacionado con el grado de saturación del suelo.

Anexo C. Medición de la resistividad eléctrica en laboratorio

Suelo A: (CH: Arcilla de alta plasticidad)

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:		TESIS				Descripción de material:				ARCILLAS VARVADAS				Clasificación (SUCS):			
Ubicación:		Provincia del Azuay, Sector "MIRAFLORES"				Fecha:				26/01/2015				(CH) Arcilla de Alta Plasticidad			
Geometría del cilindro						Características eléctricas						Norma ASTM G57-06 (Re aprobado 2012)					
Diámetro :		0,16	m	Volumen :		2,01E-02	m	Corriente		50	(mA)						
Longitud :		1,00	m	Peso del molde :		2,60	Kg										
Ensayo de Resistividad Eléctrica																	
Cantidad de agua (cm3)	# de Golpes	Peso volumétrico			Resistividad				Humedades								
		Peso. suelo + Molde (Kg)	Peso Suelo (Kg)	peso específico del suelo (KN/m ³)	R1 (Ω.m)	R2 (Ω.m)	R3 (Ω.m)	RT (Ω.m)	# de Tarro	Peso tarro (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)	Humedad promedio w (%)	Humedad total w (%)		
estado natural	Suelto	22,9	20,3	9,90	496,48	1083,92	1440,17	1006,86	140	41,40	49,20	48,60	8,33	8,57	8,42		
		13	44,50	61,80	60,40	8,81											
	10	27,2	24,6	12,00	89,19	115,47	101,44	102,03	172	50,20	59,10	58,40	8,54	8,47			
		88	39,30	53,50	52,40	8,40											
	20	28,8	26,2	12,78	54,57	61,02	56,22	57,27	75	36,80	56,10	54,60	8,43	8,44			
		68	43,30	57,40	56,30	8,46											
	35	29,6	27	13,17	39,79	39,92	52,05	43,92	46	43,90	65,70	64,10	7,92	8,22			
		27	38,70	59,10	57,50	8,51											
2500cc	Suelto	24,4	21,8	10,64	267,82	266,56	243,82	259,40	177	48,00	68,30	65,80	14,04	14,22	15,62		
		54	41,90	57,80	55,80	14,39											
	10	28,4	25,8	12,59	39,92	39,92	37,52	39,12	32	47,80	55,60	54,40	18,18	16,59			
		95	35,20	51,30	49,20	15,00											
	20	30,6	28	13,66	28,55	24,89	25,01	26,15	17	39,60	54,80	52,90	14,29	15,37			
		23	48,90	67,30	64,70	16,46											
	35	32,3	29,7	14,49	-----	-----	-----	-----	158	49,80	76,20	72,50	16,30	16,29			
		2	44,00	54,00	52,60	16,28											
3000cc	Suelto	23,6	21	10,25	98,66	101,32	102,08	100,69	15	44,80	58,90	56,10	24,78	24,57	24,81		
		27	39,70	59,10	55,30	24,36											
	10	31,2	28,6	13,95	18,82	19,83	19,96	19,54	48	40,90	63,30	58,80	25,14	24,91			
		121	41,90	61,10	57,30	24,68											
	20	34,3	31,7	15,47	14,53	14,02	14,02	14,19	22	48,90	77,30	71,60	25,11	25,18			
		150	45,70	70,50	65,50	25,25											
	35	36,2	33,6	16,39	11,48	11,47	11,53	11,50	16	39,00	59,80	55,70	24,55	24,57			
		75	36,80	59,10	54,70	24,58											
2700 cc	Suelto	23,6	21	10,25	34,61	38,78	47,50	40,30	88	39,30	56,60	52,40	32,06	32,09	31,58		
		46	43,90	69,40	63,20	32,12											
	10	31,5	28,9	14,10	15,29	18,19	16,04	16,51	47	47,70	72,10	66,30	31,18	32,35			
		68	43,30	66,40	60,60	33,53											
	20	33	30,4	14,83	13,01	15,79	15,92	14,91	27	38,70	61,10	55,80	30,99	31,24			
		89	35,00	56,30	51,20	31,48											
	35	36,1	33,5	16,34	10,41	13,14	11,95	11,83	31	47,00	60,40	57,10	32,67	30,62			
		172	50,20	61,90	59,30	28,57											

Javier Cuñez
Ensayos de laboratorio





ARCILLA B (ML: Limo de baja plasticidad)

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:		TESIS			Descripción de material:			LUTITAS			Clasificación (SUCS):				
Ubicación:		Provincia del Azuay, Sector "MIRAFLORES"			Fecha:			02/02/2015			(ML) LIMO DE BAJA PLASTICIDAD				
Geometría del cilindro				Características eléctricas				Norma ASTM G57-06 (Re aprobado 2012)							
Diámetro :	0,16	m	Volumen :	2,01E-02	m	Corriente	50						(mA)		
Longitud :	1,00	m	Peso del molde :	2,60	Kg										
Ensayo de Resistividad Eléctrica															
Cantidad de agua (cm3)	# de Golpes	Peso volumétrico			Resistividad				Humedades						
		Peso. Suelo + Molde (Kg)	Peso Suelo (Kg)	peso específico del suelo (KN/m3)	R1 (Ω.m)	R2 (Ω.m)	R3 (Ω.m)	RT (Ω.m)	# de Tarro	Peso tarro (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)	Humedad promedio w (%)	Humedad total w (%)
estado natural	Suelto	29,3	26,7	13,03	-----	-----	-----	-----	47	47,7	78,6	75,1	12,77	13,10	12,46
		172	50,3	76,5	73,4	13,42									
	10	32,2	29,6	14,44	51,16	49,65	48,89	49,90	27	38,7	79,4	74,8	12,74	11,99	
		15	44,9	75,6	72,5	11,23									
	20	33,2	30,6	14,93	38,66	37,39	36,00	37,35	68	43,3	64,1	61,7	13,04	12,65	
		2	44	61,4	59,5	12,26									
	35	34	31,4	15,32	29,18	30,82	28,55	29,52	23	40,9	58,1	56,3	11,69	12,09	
									12	39,3	74,4	70,5	12,50		
2500cc	Suelto	23,5	20,9	10,20	-----	-----	-----	-----	27	39,6	65,9	62	17,41	17,26	
		16	38,9	77,9	72,2	17,12									
	10	29,2	26,6	12,98	15,41	14,78	15,16	15,12	158	49,7	69,7	66,6	18,34	17,97	
		22	48,9	74,3	70,5	17,59									
	20	31,5	28,9	14,10	10,21	10,74	11,02	10,65	177	48	66,9	64,3	15,95	16,67	
		46	43,9	68,2	64,6	17,39									
	35	33,4	30,8	15,03	8,97	8,48	8,36	8,60	54	41,9	62,6	59,5	17,61	17,56	
									88	39,3	58,1	55,3	17,50		
2700 cc	Suelto	22,1	19,5	9,51	35,50	40,05	43,46	39,67	121	42	67,4	63,1	20,38	21,32	
		48	40,9	74,4	68,3	22,26									
	10	31,5	28,9	14,10	8,25	8,09	8,29	8,21	140	41,5	69,2	64,2	22,03	21,77	
		150	45,7	74,5	69,4	21,52									
	20	34,3	31,7	15,47	6,47	6,32	6,06	6,28	75	36,7	71,7	65,3	22,38	22,95	
		56	47,1	74,4	69,2	23,53									
	35	36,9	34,3	16,74	5,27	5,17	5,08	5,17	89	35	74,8	67,6	22,09	22,73	
									13	44,4	70,8	65,8	23,36		
4000 cc	Suelto	20,3	17,7	8,64	33,10	29,81	24,38	29,10	70	42,25	62,81	57,85	31,79	31,13	
		31	48,4	74,61	68,49	30,46									
	10	34,6	32	15,61	7,00	6,48	6,56	6,68	96	46,69	75,79	69,08	29,97	30,34	
		5	42,92	71,57	64,84	30,70									
	20	36,9	34,3	16,74	5,02	5,12	5,26	5,13	75	36,73	77,46	68,57	27,92	29,06	
		82	43,5	83,13	73,94	30,19									
	35	37,7	35,1	17,13	4,78	5,14	5,38	5,10	22	48,89	65,74	61,86	29,92	30,13	
									146	41,51	59,25	55,12	30,35		

Javier Cunez
Javier Cunez
Ensayos de laboratorio





SUELO C (SM: arena limosa)

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:		TESIS			Descripción de material:				ARENISCAS		Clasificación (SUCS):				
Ubicación:		Provincia del Azuay, Sector "MIRAFLORES"			Fecha:				02/02/2015		(SM) ARENA LIMOSA				
Geometría del cilindro					Características eléctricas			Norma ASTM G57-06 (Re aprobado 2012)							
Diámetro :	0,16	m	Volumen :	2,01E-02	m	Corriente	50							(mA)	
Longitud :	1,00	m	Peso del molde :	2,60	Kg										
Ensayo de Resistividad Eléctrica															
Cantidad de agua (cm ³)	# de Golpes	Peso volumétrico			Resistividad				Humedades						
		Peso suelo+ Molde (Kg)	Peso Suelo (Kg)	peso específico del suelo (KN/m ³)	R1 (Ω.m)	R2 (Ω.m)	R3 (Ω.m)	RT (Ω.m)	# de Tarro	Peso tarro (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)	Humedad promedio w (%)	Humedad total w (%)
estado natural	Suelto	26,7	24,1	11,76	1258,26	1490,71	1604,40	1451,12	54	41,8	60	58,7	7,69	7,51	7,35
		46	43,9	64,4					63	7,33					
	10	29,7	27,1	13,22	342,36	430,79	373,94	382,36	22	48,9	72,2	70,5	7,87	7,34	
		172	50,2	70,6					69,3	6,81					
	20	30,7	28,1	13,71	289,30	308,25	313,30	303,62	68	43,2	78,6	76,3	6,95	7,20	
		140	41,4	65,9					64,2	7,46					
	35	31,5	28,9	14,10	257,72	282,98	281,72	274,14	75	36,7	60,8	59,1	7,59	7,43	
		177	47,9	71,5					69,9	7,27					
4000cc	Suelto	22,8	20,2	9,86	80,47	82,49	85,65	82,87	140	41,5	56,34	54,13	17,51	17,48	16,65
		22	48,9	65,13					62,72	17,44					
	10	30,6	28	13,66	23,24	23,37	22,49	23,03	32	47,25	66,32	63,57	16,85	16,52	
		54	41,92	71,2					67,12	16,19					
	20	33,5	30,9	15,08	17,81	17,56	18,07	17,81	2	43,96	59,29	57,11	16,58	16,44	
		150	45,73	71,22					67,72	15,92					
	35	35,5	32,9	16,05	14,65	14,78	14,65	14,70	82	43,49	77,56	72,76	16,40	16,16	
		82	43,49	77,56					72,76	16,40					
4000 cc	Suelto	25,2	22,6	11,03	36,00	39,54	40,30	38,62	75	36,75	52,16	48,81	27,78	27,42	27,32
		5	42,91	62,77					58,54	27,06					
	10	38,1	35,5	17,32	10,57	10,71	10,71	10,67	46	43,93	86,94	77,53	28,01	27,97	
		67	42,7	71,09					64,89	27,94					
	20	38,8	36,2	17,66	10,07	10,02	9,79	9,96	15	44,84	78,64	71,35	27,50	26,89	
		96	46,7	78,17					71,62	26,28					
	35	39,2	36,6	17,86	9,39	9,35	9,35	9,36	68	43,35	82,62	74,31	26,84	26,98	
		172	50,28	77,85					71,97	27,11					


Javier Cuñez
Ensayos de laboratorio



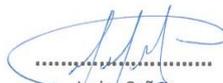
Anexo D. Medición de la resistividad eléctrica en campo

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:	TESIS		Fecha:		03/02/2015		
Humedades naturales (ensayo de resistividad)					ASTM- 2216		
Suelo	Clasificación (SUCS)	# de Tarro	Peso Tarro (g)	Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)	Humedad (%)	Humedad total (%)
A	Arcilla de alta plasticidad	98	41,7	65,8	59,6	34,64	34,82
		96	46,6	65,5	60,6	35,00	
B	Limo de baja plasticidad	32	47,2	58,5	56,4	22,83	22,60
		5	42,8	60,3	57,1	22,38	
C	Arena Limosa	82	43,4	60,4	56,3	31,78	33,15
		67	42,6	57,8	53,9	34,51	

RESISITIVIDAD ELÉCTRICA EN CAMPO					ASTM G-57		
Proyecto:	Tesis		Distancia entre electrodos :			a (m)	0,15
Fecha:	03/02/2015		Coeficiente geométrico Wenner:			K (m)	0,94
Suelo	Clasificación (SUCS)	# de Mediciones	V[V]	I[A]	V/[ohm]	R[ohm*m]	R[ohm*m] promedio
A	Arcilla de alta plasticidad	1	2,86	0,049410	57,80	54,48	49,54
		2	2,45	0,049402	49,60	46,75	
		3	2,49	0,049409	50,30	47,41	
B	Limo de baja plasticidad	1	0,31	0,049447	0,31	5,89	5,48
		2	0,31	0,049433	0,31	5,83	
		3	0,25	0,049408	0,25	4,70	
C	Arena Limosa	1	0,69	0,049454	14,10	13,29	11,53
		2	0,53	0,049426	10,80	10,18	
		3	0,58	0,049440	11,80	11,12	


 Javier Cuñez
 Ensayos de laboratorio



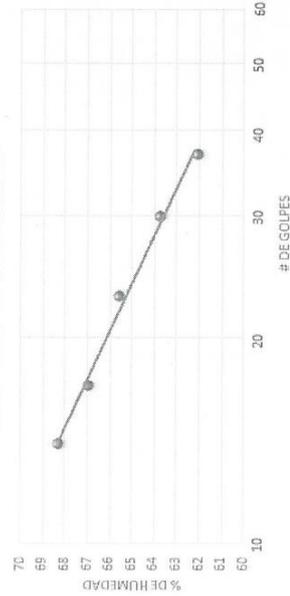
Anexo E. Granulometría por tamizado y límites de Atterberg

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:	TESIS		Provincia del Azuay, Sector "MIRAFLORES"		Descripción de material:		"ARCILLAS VARIVADAS" Suelo Tipo A (CH)	
Ubicación:	ENSAYO DE CLASIFICACION		GRANULOMETRIA		Fecha:		05/12/2014	
Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso Retenido Parcial (g)	Peso Retenido Corregido (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado	% Pasa	
PASA N°4	4,75	0	0	0	0,00	0,00	100,00	
N°10	2	0	0	0	0,00	0,00	100,00	
N°40	0,425	0,34	0,34	0,34	0,08	0,08	99,92	
N°100	0,15	0,39	0,39	0,73	0,09	0,17	99,83	
N°200	0,075	0,22	0,22	0,95	0,05	0,22	99,78	
PASA N°200		0,03	429,12	430,07	99,78	100,00	0,00	
Peso húmedo inicial de material (g)		500	Peso inicial corregido por humedad (g)		430,07			
Humedad del material (%)		16,26	Sumatoria de peso retenido (g)		429,95			
Peso seco después del lavado (g)		1,1	Error (g)		0,12		Error (%)	
CLASIFICACION SUCS		Humedad Natural		16,26		%		
		Limite Líquido		65,10		%		
(CH) Arcilla de alta plasticidad		Limite plástico		30,33		%		
		Índice plástico		34,78		%		

HUMEDAD VS # DE GOLPES



Javier Cúñez
Ensayos de laboratorio

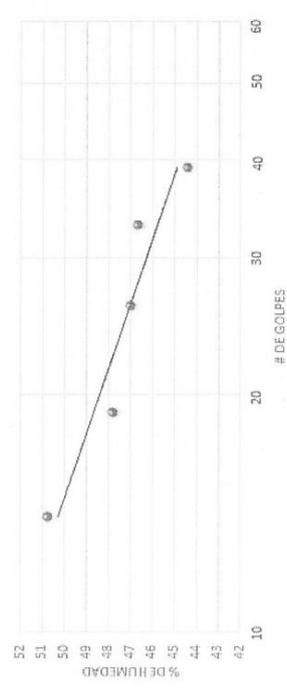


UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:		TESIS		LUTITAS* Suelo Tipo B			
Ubicación:		Provincia del Azuay, Sector "TURI"		5/12/2014			
		DESCRIPCIÓN DE MATERIAL:		ASTM D 2487			
		FECHA:					
ENSAYO DE CLASIFICACION							
GRANULOMETRIA							
Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso Retenido Parcial (g)	Peso Retenido Corregido (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje Retenido Acumulado	% Pasa
PASA N°4	4,75	0	0	0	0,00	0,00	100,00
N°10	2	0	0	0	0,00	0,00	100,00
N°40	0,425	3,95	3,95	3,95	0,91	0,91	99,09
N°100	0,15	21,86	21,67	25,62	4,97	5,87	94,13
N°200	0,075	15,92	15,92	41,54	3,65	9,52	90,48
PASA N°200		0,91	394,8	436,34	90,48	100,00	0,00
Peso húmedo inicial de material (g)		500		Peso inicial corregido por humedad (g)		436,34	
Humedad del material (%)		14,59		Sumatoria de peso retenido (g)		436,53	
Peso seco después del lavado (g)		42,45		Error (g)		0,19	
				Error (%)		0,04	
LIMITES PLASTICOS							
N° Tarro	N° Golpes	Peso de Tarro	Peso Húmedo	Peso Seco	% de Humedad	% Promedio	
13	-----	44,38	69,41	66,21	14,66	14,59	
27	-----	39,60	57,58	55,28	14,67		
50	-----	43,48	60,59	58,43	14,45		
LIMITE LIQUIDO							
27	39	39,61	52,13	48,28	44,41	47,59	
117	33	46,05	59,80	56,06	46,69		
38	26	45,32	56,86	53,17	47,01		
50	19	43,46	54,00	50,59	47,83	50,75	
74	14	45,89	54,92	51,88	50,75		
LIMITE PLASTICO							
13	-----	44,40	47,88	47,05	31,32	30,62	
67	-----	42,67	45,55	44,89	29,73		
5	-----	42,87	45,97	45,24	30,80		

HUMEDAD VS # DE GOLPES



Javier Cúñez
Ensayos de laboratorio

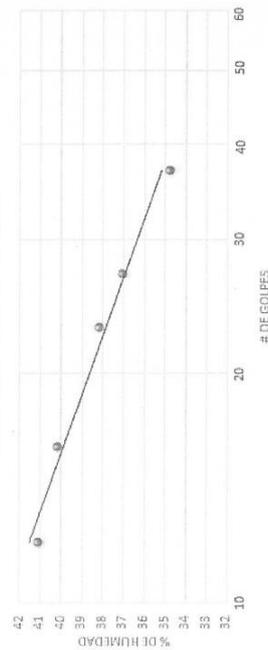
CLASIFICACION SUCS	Humedad Natural	%
	14,59	%
	47,59	%
(ML) Limo de baja plasticidad	30,62	%
	16,97	%

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

Proyecto:		TESES		"ARENISCAS" Suelo Tipo C			
Ubicación:		Provincia del Azuay, Sector "TURI"		05/12/2014			
		DESCRIPCIÓN DE MATERIAL:		ASTM D 2487			
		FECHA:					
ENSAYO DE CLASIFICACION							
GRANULOMETRIA							
Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso Retenido Parcial (g)	Peso Retenido Corregido (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado	% Pasa
PASA N°4	4,75	3,56	3,56	3,56	0,85	0,85	99,15
N°10	2	25,35	25,35	28,91	6,04	6,89	93,11
N°40	0,425	49,65	49,65	78,56	11,83	18,72	81,28
N°100	0,15	135,05	134,13	212,69	31,96	50,68	49,32
N°200	0,075	59,02	59,02	271,71	34,06	64,74	35,26
PASA N°200		2,8	148	419,71	35,26	100,00	0,00
Peso húmedo inicial de material (g)		500		Peso inicial corregido por humedad (g)		419,71	
Humedad del material (%)		19,13		Sumatoria de peso retenido (g)		420,63	
Peso seco después del lavado (g)		274,51		Error (g)		0,92	
				Error (%)		0,22	
CLASIFICACION SUCS		Humedad Natural		19,13		%	
(SM) Arena Limosa		Limite Líquido		37,75		%	
		Limite plástico		29,63		%	
		Indice plástico		8,12		%	

HUMEDAD VS # DE GOLPES



Javier Cuñez
Ensayos de laboratorio

Anexo F. Granulometría por hidrómetro

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO											
Proyecto:	TESIS		Descripción del material:			Suelo Tipo A "ARCILLAS VARVADAS"			ASTM D-422		
Ubicación:	Provincia del Azuay, sector "Miraflores"		Fecha:			08/12/2014					
CALIBRACIÓN DEL HIDRÓMETRO											
Hidrómetro			Defloculante : Hexametáfosfato de Sodio					Gs de los sólidos :		2,67	
Corrección por Meñiscos:			Corrección por Defloculante:					Factor de Corrección:		0,996	
Lec. del borde Superior:	Lbs	0	Lectura en el agua:			Lec. agua	1000,0	Masa seca (g):		50	
Lec. del borde Inferior:	Lbi	1	Lectura en el agua + defloculante			Lec. agua+ deflo	1003,5	Corregido por hidrómetro:			
Lbi - Lbs :	Cm (+)	1	(Lec. Agua + deflo) - Lec. Agua			Cd (-)	3,5	Cm-Cd		-2,5	
Corrección por temperatura:		T (°C)	16	19	21	21,5	22	23			
		Ct	-0,5	-0,9	0,2	0,30	0,4	-0,9			
Fecha	Tiempo transcurrido (t) min	T (°C)	Lectura real del hidrómetro	Lectura corregida del hidrómetro. (Rc)	% que pasa	Hidrómetro o corregido por menisco (R)	L (cm)	vL/t	K	% que pasa (referido al % que pasa N° 200)	D (mm)
lunes 08/12/2014	0,25	21	36	33,70	67,13	37	10,4	6,44981	0,01340	67,13	0,08643
	0,5	21	36	33,70	67,13	37	10,4	4,56070	0,01340	67,13	0,06111
	1	21	36	33,70	67,13	37	10,4	3,22490	0,01340	67,13	0,04321
	2	21	35	32,70	65,14	36	10,6	2,30217	0,01340	65,14	0,03085
	4	21,5	34	31,80	63,35	35	10,7	1,63554	0,01332	63,35	0,02179
	8	21,5	33	30,80	61,35	34	10,9	1,16726	0,01332	61,35	0,01555
	15	21,5	31	28,80	57,37	32	11,2	0,86410	0,01332	57,37	0,01151
	30	21,5	29	26,80	53,39	30	11,5	0,61914	0,01332	53,39	0,00825
	60	22	26	23,90	47,61	27	12	0,44721	0,01324	47,61	0,00592
	120	23	24	22,20	44,22	25	12,4	0,32146	0,01309	44,22	0,00421
272	22,8	21	19,20	38,25	22	12,9	0,21778	0,01312	38,25	0,00286	
360	21	20	17,50	34,86	21	13	0,19003	0,01340	34,86	0,00255	
Martes 09/12/2014	1126	16	18	15,00	29,88	19	13,2	0,10827	0,01427	29,88	0,00154
	1779	19	16	12,60	25,10	17	13,5	0,08711	0,01377	25,10	0,00120

Javier Cuñez
Ensayos de laboratorio





UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO												
Proyecto:	TESIS		Descripción del material:			Suelo Tipo B "LUTITAS"			ASTM D-422			
Ubicación:	Provincia del Azuay, sector "Turi"		Fecha:			11/12/2014						
CALIBRACIÓN DEL HIDRÓMETRO												
Hidrómetro			Defloculante : Hexametáfosfato de Sodio					Gs de los sólidos :		2,8		
Corrección por Meniscos:			Corrección por Defloculante:					Factor de Corrección:		0,97		
Lec. del borde Superior:	Lbs	0	Lectura en el agua:			Lec. agua	1000,0	Masa seca (g):		50		
Lec. del borde Inferior:	Lbi	1	Lectura en el agua + defloculante			Lec. agua+ deflo	1003,5	Corregido por hidrómetro:				
Lbi - Lbs :	Cm (+)	1	(Lec. Agua + deflo) - Lec. Agua			Cd (-)	3,5	Cm-Cd		-2,5		
Corrección por temperatura:		T (°C)	16	19	21	23	24					
		Ct	-0,9	-0,3	0,2	0,70	1					
Fecha	Tiempo transcurrido (t) min	T (°C)	Lectura real del hidrómetro	Lectura corregida del hidrómetro (Rc)	% que pasa	Hidrómetro corregido por menisco (R)	L (cm)	vL/t	K	% que pasa (referido al % que pasa N° 200)	D (mm)	
Martes 09/12/2014	0,25		32	29,50	57,23	33	10,9	6,60	0,01307	51,78	0,0863	
	0,5		31	28,50	55,29	32	11,1	4,71	0,01307	50,03	0,0616	
	1	20	30	27,50	53,35	31	11,2	3,35	0,01307	48,27	0,0437	
	2	20	26	23,50	45,59	27	12,4	2,49	0,01307	41,25	0,0325	
	4	20	19	16,50	32,01	20	13	1,80	0,01307	28,96	0,0236	
	8	20	16	13,50	26,19	17	13,5	1,30	0,01307	23,70	0,0170	
	15	20,5	14	11,60	22,50	15	13,8	0,96	0,01299	20,36	0,0125	
	30	21	12	9,70	18,82	13	14,2	0,69	0,01291	17,03	0,0089	
	60	21	11	8,70	16,88	12	14,3	0,49	0,01291	15,27	0,0063	
	120	23	9	7,20	13,97	10	14,7	0,35	0,01261	12,64	0,0044	
	240	24	8	6,50	12,61	9	14,8	0,25	0,01246	11,41	0,0031	
360	19	8	5,20	10,09	9	14,8	0,20	0,01323	9,13	0,0027		
Miércoles 10/12/2014	1290	16	8	4,60	8,92	9	14,8	0,11	0,01374	8,07	0,0015	
	1830	20	7,5	5,00	9,70	8,5	14,4	0,09	0,01307	8,78	0,0012	
Jueves 11/12/2014	2310	16	7	3,40	6,60	8	15	0,08	0,01307	5,97	0,0011	

Javier Cuñez
Ensayos de laboratorio





UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO												
Proyecto:	TESIS		Descripción del material:			Suelo Tipo C"ARENISCAS"			ASTM D-422			
Ubicación:	Provincia del Azuay, sector "Turi"		Fecha:			11/12/2014						
CALIBRACIÓN DEL HIDRÓMETRO												
Hidrómetro			Defloculante : Hexametáfosfato de Sodio					Gs de los sólidos :		2,75		
Corrección por Meniscos:			Corrección por Defloculante:					Factor de Corrección: a		0,98		
Lec. del borde Superior:	Lbs	0	Lectura en el agua:			Lec. agua	1000,0	Masa seca (g):		50		
Lec. del borde Inferior:	Lbi	1	Lectura en el agua + defloculante			Lec. agua+ deflo	1003,5	Corregido por hidrómetro:				
Lbi - Lbs :	Cm (+)	1	(Lec. Agua + deflo) - Lec. Agua			Cd (-)	3,5	Cm-Cd		-2,5		
Corrección por temperatura:		T (°C)	21	22	24	20	16					
		Ct	0,1	0,20	1	0	-0,9					
Fecha	Tiempo transcurrido (t) min	T (°C)	Lectura real del hidrómetro	Lectura corregida del hidrómetro (Rc)	% que pasa	Hidróm. corregido por menisco (R)	L (cm)	vL/t	K	% que pasa (referido al % que pasa N° 200)	D (mm)	
Miércoles 11/12/2014	0,25		35	32,60	63,90	36	10,60	6,51	0,0132	57,81	0,0857	
	0,5		34	31,60	61,94	35	10,70	4,63	0,0132	56,04	0,0609	
	1	20,5	30	27,60	54,10	31	11,40	3,38	0,0132	48,95	0,0444	
	2	20,5	23	20,60	40,38	24	12,50	2,50	0,0132	36,53	0,0329	
	4	20,5	17	17,10	33,52	18	13,50	1,84	0,0132	30,33	0,0242	
	8	21	12	9,70	19,01	13	14,30	1,34	0,0131	17,20	0,0175	
	15	21	9	6,70	13,13	10	14,80	0,99	0,0131	11,88	0,0130	
	30	21	7	4,70	9,21	8	15,20	0,71	0,0131	8,34	0,0093	
	60	22	6	3,90	7,64	7	15,30	0,50	0,0129	6,92	0,0065	
	120	22	5	2,90	5,68	6	15,50	0,36	0,0129	5,14	0,0047	
Jueves 11/12/2014	240	24	4	2,50	4,90	5	15,60	0,25	0,0126	4,43	0,0032	
	360	20	4	1,50	2,94	5	15,60	0,21	0,0133	2,66	0,0028	
	1260	16	4,5	1,10	2,16	5,5	15,55	0,11	0,0139	1,95	0,0015	


Javier Cuñez
Ensayos de laboratorio



Anexo G Humedad natural y peso volumétrico.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:		TESIS					
Fecha:		11/12/2014					
Humedades naturales				ASTM D 2216			
Suelo	Clasificación (SUCS)	# de Tarro	Peso Tarro (g)	Peso Húmedo (g)	Peso Seco (g)	Humedad (%)	Humedad total (%)
A	Arcilla de alta plasticidad	74	47,5	61,2	58,6	23,42	23,34
		31	48,3	58,9	56,9	23,26	
B	Limo de baja plasticidad	25	41,3	52,6	50,6	21,51	22,55
		62	44,2	64,1	60,3	23,60	
C	Arena Limosa	6	46,6	68,2	64,9	18,03	18,17
		61	40,3	66,8	62,7	18,30	

Peso volumétrico del suelo natural							
Clasificación (SUCS)	Peso (g)	Volumen		γ (g/cm ³)	γ (g/cm ³)	γ (KN/m ³)	γ seco (KN/m ³)
		V1 (cm ³)	V2(cm ³)				
Arcilla de alta plasticidad	107,40	370	432	1,73	1,70	16,63	13,49
	104,00	340	400	1,73			
	84,30	300	352	1,62			
Limo de baja Plasticidad	215,40	320	425	2,05	2,17	21,32	17,39
	135,70	310	368	2,34			
	170,20	330	410	2,13			
Arena Limosa	187,30	310	400	2,08	1,98	19,44	16,45
	190,40	345	440	2,00			
	120,80	310	375	1,86			


 Javier Cuñez
 Ensayos de laboratorio



Anexo H. Gravedad específica de los sólidos

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:		TESIS		
Ubicación:		Provincia del Azuay, Sector "MIRAFLORES"		
Descripción de material:		"ARCILLAS VARVADAS" Suelo Tipo A (CH)	ASTM D 854	
Fecha:		06/12/2014		
PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS				
Nomenclatura		Unidades	Valores	
f =	Matraz	#	1	2
W _{fs} =	Peso del Matraz + Agua + Muestra a T°C	g	711	698
T°C =	Temperatura a °C	°C	20	20
W _{fw} =	Peso del Matraz + Agua a T°C (curva de calibración)	g	673	631
W _s	Peso del suelo seco	g	60,98	106,5
γ _w	Peso específico del agua a T°C	g/cm ³	1	1
G _s	Peso específico de los sólidos del suelo		2,65	2,70
G _s	Peso específico de los sólidos del suelo promedio		2,67	

Proyecto:		TESIS		
Ubicación:		Provincia del Azuay, Sector "TURI"		
Descripción de material:		"LUTITAS" Suelo Tipo B (ML)	ASTM D 854	
Fecha:		18/11/2014		
PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS				
Nomenclatura		Unidades	Valores	
f =	Matraz	#	1	2
W _{fs} =	Peso del Matraz + Agua + Muestra a T°C	g	777	700
T°C =	Temperatura a °C	°C	20	20
W _{fw} =	Peso del Matraz + Agua a T°C (curva de calibración)	g	673	631
W _s	Peso del suelo seco	g	161,51	106,59
γ _w	Peso específico del agua a T°C	g/cm ³	1	1
G _s	Peso específico de los sólidos del suelo		2,81	2,79
G _s	Peso específico de los sólidos del suelo promedio		2,80	


 Javier Cuñez
 -Ensayos de laboratorio

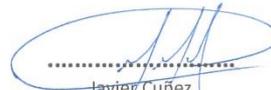




UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:	TESIS			
Ubicación:	Provincia del Azuay, Sector "TURI"			
Descripción de material:	"ARENISCAS" Suelo Tipo C	ASTM D 854		
Fecha:	18/11/2014			
PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS				
Nomenclatura		Unidades	Valores	
f =	Matraz	#	1	2
Wfsw =	Peso del Matraz + Agua + Muestra a T°C	g	746	724
T°C =	Temperatura a °C	°C	20	20
Wfw =	Peso del Matraz + Agua a T°C (curva de calibración)	g	673	631
Ws	Peso del suelo seco	g	115,18	145,47
γw	Peso específico del agua a T°C	g/cm ³	1	1
Gs	Peso específico de los sólidos del suelo		2,73	2,77
Gs	Peso específico de los sólidos del suelo promedio		2,75	


.....
Javier Cuñez
Ensayos de laboratorio



Anexo I. Compactación Próctor Modificado

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:	TESIS		Descripción de material:	"ARCILLAS VARVADAS" Suelo Tipo A (CH)			
Ubicación:	Provincia del Azuay, Sector "MIRAFLORES"		Fecha:	23/11/2014			
COMPACTACION PROCTOR MODIFICADO				ASTM D-1557			
DATOS DEL MOLDE				CARACTERISTICAS DEL ENSAYO			
Ensayo:		C	tipo	Peso del Molde:	P Mol. =	5887	g
Molde:	# =	1	unidad	Peso del Martillo:	P Mart. =	4535,92	g
Diámetro :	Φ =	15,45	cm	Altura de Caída:	HC =	45,72	cm
Longitud:	L =	11,78	cm	# de Capas:	# =	5	capas
Área :	A =	187,48	cm ²	Golpes por capa:	gps/cap	56	golpes
Volumen:	V =	2208,47	cm ³	Material Pasante:	# =	4	tamiz

DATOS PARA LA CURVA

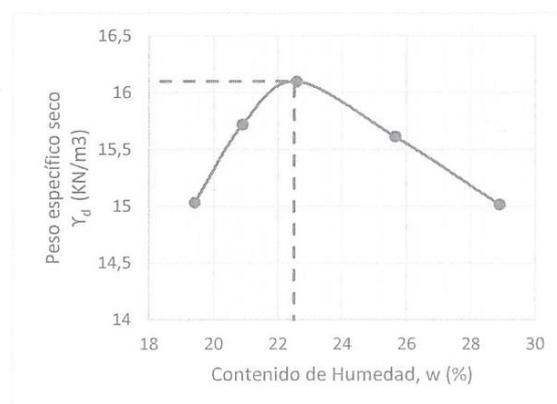
Muestra # :	1	2	3	4	5
W. Mol. + SUE. HUM. (gr)	9928	10165	10329	10303	10244
Humedad Prom. (%)	19,42	20,90	22,58	25,65	28,90
Dens. Humedad (gr/cm ³)	1,83	1,94	2,01	2,00	1,97
Dens. Seca (gr/cm ³)	1,53	1,60	1,64	1,59	1,53

CONTENIDO DE HUMEDAD

Muestra #:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Capsula	50	13	74	158	5	67	62	160	190	150
Peso de Cap. (g)	43,48	44,39	45,88	49,72	42,89	42,65	44,47	50,47	49,58	45,71
Cap. + Suelo Hum. (g)	72,14	74,30	81,11	83,24	64,41	69,23	71,54	80,24	77,11	65,85
Cap. + Suelo Seco. (g)	67,36	69,56	75,08	77,39	60,49	64,28	66,08	74,09	70,85	61,4
Conten. Humedad (%)	20,02	18,83	20,65	21,14	22,27	22,88	25,27	26,04	29,43	28,36
Humedad promedio (%)	19,42		20,90		22,58		25,65		28,90	

RESULTADOS		
Peso Unitario máximo del suelo		
$\gamma_{d \max} =$	16,10	KN/m ³
Contenido Optimo de Humedad		
$w_{op} =$	22,50	%

Javier Cuñez
Ensayos de laboratorio



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:	TESIS		Descripción de material:	"LUTITAS" Suelo Tipo B (ML)			
Ubicación:	Provincia del Azuay, Sector "TURI"		Fecha:	23/11/2014			
COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO			ASTM D-1557				
DATOS DEL MOLDE			CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO				
Ensayo:		C	tipo	Peso del Molde:	P Mol. =	5887	g
Molde:	# =	1	unidad	Peso del Martillo:	P Mart. =	4535,92	g
Diámetro :	Φ =	15,45	cm	Altura de Caída:	HC =	45,72	cm
Longitud:	L =	11,78	cm	# de Capas:	# =	5	capas
Área :	A =	187,48	cm ²	Golpes por capa:	gps/cap	56	golpes
Volumen:	V =	2208,47	cm ³	Material Pasante:	# =	4	tamiz

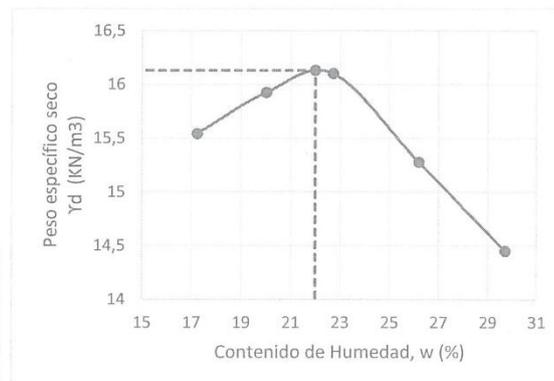
DATOS PARA LA CURVA

Muestra # :	1	2	3	4	5
W. Mol. + SUE. HUM. (gr)	9985	10189	10335	10227	10107
Humedad Prom. (%)	17,23	20,00	22,72	26,19	29,71
Dens. Humedad (gr/cm ³)	1,86	1,95	2,01	1,97	1,91
Dens. Seca (gr/cm ³)	1,58	1,62	1,64	1,56	1,47

CONTENIDO DE HUMEDAD

Muestra #:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Capsula	38	77	27	50	150	160	15	158	190	25
Peso de Cap. (g)	45,34	42,01	39,59	43,48	45,71	50,47	44,78	49,71	49,62	40,06
Cap. + Suelo Hum. (g)	62,69	60,72	64,35	79,34	64,85	72,32	73,42	73,69	72,08	54,49
Cap. + Suelo Seco. (g)	60,15	57,96	60,19	73,41	61,32	68,26	67,45	68,86	66,76	51,3
Conten. Humedad (%)	17,15	17,30	20,19	19,81	22,61	22,82	26,33	26,05	31,04	28,38
Humedad promedio (%)	17,23		20,00		22,72		26,19		29,71	

RESULTADOS		
Peso Unitario máximo del suelo		
$\gamma_{d \max} =$	16,13	KN/m ³
Contenido Óptimo de Humedad		
$w_{op} =$	22,00	%



Javier Cuñez
 Ensayos de laboratorio

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
laboratorio.suelos@ucuenca.edu.ec

Proyecto:	TESIS		Descripción de material:	"ARENISCAS" Suelo Tipo C. (SM)			
Ubicación:	Provincia del Azuay, Sector "TURI"		Fecha:	23/11/2014			
COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO				ASTM D-1557			
DATOS DEL MOLDE				CARACTERISTICAS DEL ENSAYO			
Ensayo:		C	tipo	Peso del Molde:	P Mol. =	5887	g
Molde:	# =	1	unidad	Peso del Martillo:	P Mart. =	4535,92	g
Diámetro :	Φ =	15,45	cm	Altura de Caída:	HC =	45,72	cm
Longitud:	L =	11,78	cm	# de Capas:	# =	5	capas
Área :	A =	187,48	cm ²	Golpes por capa:	gps/cap	56	golpes
Volumen:	V =	2208,47	cm ²	Material Pasante:	# =	4	tamiz

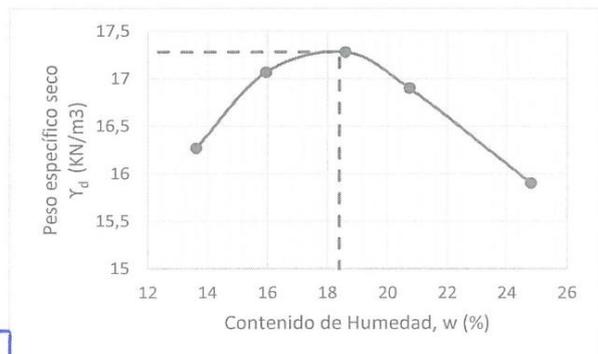
DATOS PARA LA CURVA

Muestra # :	1	2	3	4	5
W. Mol. + SUE. HUM. (gr)	10048	10342	10500	10480	10355
Humedad Prom. (%)	13,62	15,95	18,60	20,73	24,80
Dens. Humedad (gr/cm ³)	1,88	2,02	2,09	2,08	2,02
Dens. Seca (gr/cm ³)	1,66	1,74	1,76	1,72	1,62

CONTENIDO DE HUMEDAD

Muestra #:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Capsula	13	158	5	62	150	74	67	50	160	190
Peso de Cap. (g)	44,41	49,72	42,88	44,48	45,71	45,88	42,67	43,49	50,46	49,58
Cap. + Suelo Hum. (g)	75,34	67,91	85,12	71,49	73,96	69,16	72,54	74,82	68,47	74,12
Cap. + Suelo Seco. (g)	71,65	65,72	79,3	67,78	69,53	65,51	67,43	69,42	64,85	69,3
Conten. Humedad (%)	13,55	13,69	15,98	15,92	18,60	18,59	20,64	20,83	25,16	24,44
Humedad promedio (%)	13,62		15,95		18,60		20,73		24,80	

RESULTADOS		
Peso Unitario maximo del suelo		
$\gamma_{d \max} =$	17,28	KN/m ³
Contenido Optimo de Humedad		
$w_{op} =$	18,40	%



Javier Cuñez
 Ensayos de laboratorio

UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ingeniería

Laboratorio de Suelos