

**OBTENCIÓN DE UNA IMAGEN BIDIMENSIONAL POR EL MÉTODO DE  
RESISTIVIDAD D.C. DE TRES TIPOS DE SUELOS DE LA REGIÓN,  
VARIANDO LOS PARÁMETROS DE GRANULOMETRÍA Y HUMEDAD.**

**BELLANIRIZ MARQUINEZ GRUEZO  
LEONARDO PADILLA ORBES**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2008**

**OBTENCIÓN DE UNA IMAGEN BIDIMENSIONAL POR EL MÉTODO DE  
RESISTIVIDAD D.C. DE TRES TIPOS DE SUELOS DE LA REGIÓN, VARIANDO  
LOS PARÁMETROS DE GRANULOMETRÍA Y HUMEDAD.**

**AUTORES**

**BELLANIRIZ MARQUINEZ GRUEZO  
LEONARDO PADILLA ORBES**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
INGENIERO CIVIL**

**OMAR PAREDES CHAMORRO, M.Sc.  
Director**

**HUGO CORAL MONCAYO, I.c. M.Sc. Ph.D.  
Codirector**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2008**

“Las ideas y conclusiones aportadas en el trabajo de Grado son responsabilidad exclusiva de sus autores”.

Artículo 1º. Del acuerdo N° 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

**Jurado Presidente**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**San Juan de Pasto, Agosto de 2008**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean manifestar sus agradecimientos:

OMAR PAREDES CHAMORRO, M. Sc. Profesor Titular del Departamento de Electrónica de la Universidad de Nariño y Director de la Investigación, por sus orientaciones, aportes y constante motivación.

FRANCISCO CORAL ASAIN, Ingeniero Civil, por brindarnos su capacidad, voluntad y orientarnos en la etapa final de entrega del trabajo de grado.

A los asesores Ing. HUGO CORAL y al Ing. JAVIER MORENO, gracias por su colaboración en el proceso de revisión y aprobación del anteproyecto.

A los laboratoristas de suelos e hidráulica, respectivamente, GUSTAVO PONCE Y ROBERTO GARCIA, gracias por su colaboración en la orientación para la realización de todos los laboratorios que se utilizaron durante la etapa del proyecto.

## DEDICATORIA

Doy gracias a:

A **JESUS NAZARENO**, por guiarme siempre y haberme dado la oportunidad de cumplir mis metas propuestas. Estoy segura seguiré contando con sus bendiciones en mi vida profesional y en todo momento de mi vida.

A mis queridos padres **ELVIRA MARIA GRUEZO DE MARQUINEZ** y **HERMENEGILDO MARQUINEZ**, quienes de manera incondicional me han apoyado en todos los momentos de mi vida.

A mi segunda madre, mi hermana **NELLYS ALICIA**, por compartir conmigo uno a uno mis triunfos y fracasos.

A mis hermanos **HERBERTH, HERNANDO, IVAN, STELLA, KAREN, LUCERO**, a mis sobrinos, especialmente **CRISTIAN** y **GISSETH**, porque eternamente podré contar con ustedes.

A mi tía **ROSA ESPIRITU GRUEZO**, aunque no esté a mi lado, siempre la llevaré en mi corazón.

A mi adorable novio **FRANCISCO CUATÍN**, por comprenderme y apoyarme en todo momento especialmente en mi vida estudiantil.

A ellos la realidad de un sueño concedido y un éxito alcanzado.

**BELLANIRIZ MARQUINEZ GRUEZO**

## DEDICATORIA

Este triunfo va dedicado, a:

**DIOS** que siempre ha estado conmigo para guiarme por el camino del bien y me ha dado las fuerzas necesarias para seguir adelante y cumplir con mis metas tanto a nivel profesional como personal.

A mi madre, **MARIA VIRGINIA ORBES** y en memoria de mi padre **FRANCISCO CENON PADILLA CASANOVA**, quiero que sepas que siempre te llevaré en lo más profundo de mi corazón. Gracias a ustedes por el apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida, por la formación recibida y por inculcarme muchos valores, que me han permitido alcanzar las metas que me propongo.

A mis hermanos **PEDRO ANTONIO, GERMAN ENRIQUE, LUIS ALBERTO, GILBERTO RAMIRO, RUBY MIRELLA, CLARA ROSA Y NUBIA INES**, a mi tío **GILBERTO PADILLA**, que es como mi segundo padre y en fin a todos mis sobrinos y demás familiares; que me han brindado la fuerza y el ánimo necesarios para lograr mis objetivos; por ser también los mejores amigos en los buenos y malos momentos.

**LEONARDO PADILLA ORBES**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	20
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	23
1.3 OBJETIVOS	23
1.3.1 Objetivo general.	23
1.3.2 Objetivos específicos:	23
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1 MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	24
2.1.1 Método de resistividad eléctrica D.C	25
2.3 RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GRAVIMÉTRICAS DE UN SUELO.	35
3. RESULTADOS Y ANALISIS	39
3.1 ENSAYOS REALIZADOS	39
3.1.1 Contenido de humedad (Normas ASTM D2216-71).	39
3.1.2 Análisis granulométrico	37
3.1.3 Peso unitario de los agregados finos (Norma ICONTEC 92).	45
3.1.4 Peso específico y absorción de agregados finos (NORMA ICONTEC	47
3.1.5 Determinación de la densidad y absorción de agregados gruesos (ripió de triturado) - Norma Icontec 176:	49
3.1.6 Relación de vacíos (e) y porosidad (n):	50
3.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD APARENTE POR EL MÉTODO DE RESISTIVIDAD D.C. PARA CADA TIPO DE SUELO, VARIANDO LOS PARÁMETROS DE GRANULOMETRÍA Y HUMEDAD.	52
3.2.1 Materiales y equipo:	52
3.2.2 Calculo de volumen y peso requerido de cada tipo de suelo:	56
3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES	62

4.	TOMOGRAFÍA GEOÉLECTRICA	66
4.1	TOMOGRAFIAS GEOELÉCTRICAS	66
4.1.1	Arena blanca, humedad 11%.	66
4.1.2	Arena blanca, humedad 34%.	68
4.1.3	Arena blanca, humedad 42%.	68
4.1.4	Granito (arrocillo) humedad 5%.	71
4.1.5	Granito (arrocillo) humedad 11%.	73
4.1.6	Superposición de suelos:	74
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
5.1	CONCLUSIONES	79
5.2	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA	82

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Gráfico de las márgenes de variación más comunes en algunas rocas, minerales y químicos (resistividad en Ohm – metro).....	28
Tabla 2. Valores de Resistividad aparente de algunos materiales.....	28
Tabla 3. Valores de velocidad de litologías más importantes .....	34
Tabla 4. Datos para la determinación del contenido de humedad. ....	39
Tabla 5. Contenido de humedad para cada tipo de suelo.....	39
Tabla 6. Datos para análisis granulométrico de cada tipo de suelo. ....	40
Tabla 7. Coeficientes obtenidos de la curva granulométrica.....	44
Tabla 8. Datos para la determinación del peso unitario compactado para cada tipo de suelo.....	46
Tabla 9. Datos para la determinación del peso unitario suelto para cada tipo de suelo .....	46
Tabla 10. Resultados de los pesos unitario suelto y compactado para cada tipo de suelo. ....	46

Tabla 11. Datos para la determinación del peso específico y absorción de la arena blanca y el granito (arrocillo).....	48
Tabla 12. Datos para la determinación de la densidad y absorción del ripio de triturado.....	50
Tabla 13. Resultados relaciones volumétricas y gravimétricas de los 3 tipos de suelos. ....	51
Tabla 14. Volumen y peso requerido para cada tipo de suelo .....	56
Tabla 15. Datos para la variación de humedad de cada tipo de suelo.....	60
Tabla 16. Agua agregada para llegar a la humedad respectiva (Arena blanca). ...	61
Tabla 17. Agua agregada para llegar a la humedad respectiva .....	61
Tabla18. Agua agregada para llegar a la humedad respectiva (ripio de triturado).	61
Tabla 19. Datos para la verificación de las humedades tomando cuatro.....	62
Tabla 20. Resultados de la verificación de humedades para el granito.....	62

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Disposición de los circuitos de medida método geoelectrico de WENNER.	30
Figura 2. Etapas seguidas en el proceso de inversión Geoelectrico (Marescot, 2003)	32
Figura 3. Propagación de las ondas P y (b) Propagación de las ondas S.	33
Figura 4. Principio de magnometría	35
Figura 5. Curva Granulométrica Arena Blanca.	41
Figura 6. Curva granulométrica granito (Arrocillo)	42
Figura 7. Curva granulométrica ripio de triturado.	43
Figura 8. Fases del suelo	50
Figura 9. Ejemplo de una tomografía geoelectrica	66
Figura 10. Tomografía arena blanca, humedad 11%.	67
Figura 11. Tomografía arena blanca, humedad 34%.	69
Figura 12. Tomografía arena blanca, humedad 42%.	70
Figura 13. Tomografía granito (arrocillo), humedad 5%.	72
Figura 14. Tomografía granito (arrocillo), humedad 11%.	74
Figura 15. Superposición de suelos (A).	76
Figura 16. Superposición de suelos (B).	78

## LISTA DE FOTOS

	<b>Pág.</b>
Foto 1. Tanque donde se depositaron los tipos de suelos.....	53
Foto 2. Electrodo espaciados cada 10 cm .....	53
Foto 3. Fuente poder .....	54
Foto 4. Multímetros digitales .....	54
Foto 5. Arena blanca.....	55
Foto 6. Granito (Arrocillo).....	55
Foto 7. Muestra representativa de 300 gr. ....	58
Foto 8. Muestra representativa secada en la estufa .....	58
Foto 9. Distribución uniforme del agua para cada material.....	59
Foto 10. Vaciado del material con bandeja al tanque. ....	59
Foto 11. Colocación de electrodo cada 10 cm .....	60
Foto 12. Electrodo espaciados cada 10 cm .....	63
Foto 13. Inducción de corriente eléctrica al material.....	63

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. VALORES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE .....	78

## GLOSARIO

**Amperímetro:** Aparato que sirve para medir el número de amperios de una corriente eléctrica.

**Amperio:** Es la unidad de intensidad de corriente eléctrica. Forma parte de las unidades básicas en el Sistema Internacional de Unidades. Equivale a una intensidad de corriente, la cual al circular por dos conductores paralelos, rectilíneos de longitud infinita, de sección circular despreciable y separados entre sí, en el vacío, a una distancia de un metro, produce una fuerza entre los conductores de  $2 \times 10^{-7}$  newton por cada metro de conductor. Se representa con el símbolo A.

**Conductividad:** Propiedad que tienen los cuerpos de transmitir calor o electricidad.

**Densidad relativa:** Es una propiedad de los suelos y se emplea normalmente en gravas y arenas, es decir, en suelos que contienen casi exclusivamente partículas mayores a 0.074 mm (malla #200). Indica el grado de compacidad (compactación) de un suelo y se puede emplear tanto para suelos en estado natural como para rellenos compactados artificialmente.

**Electrodo:** Componente de un circuito eléctrico que conecta el cableado convencional del circuito a un medio conductor como un electrolito o un gas.

**Exploración geofísica:** Tiene por objeto detectar y localizar las masas de tierra y rocas de subsuelo, obtener algunas de sus dimensiones, determinar propiedades físicas y otras características como el nivel freático.

**Geofísica:** Estudia la tierra desde el punto de vista de la física y su objetivo de estudio está conformado por todos los fenómenos relacionados con la estructura, condiciones físicas e historia evolutiva de la tierra.

**Grado de saturación:** Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos. Indica la cantidad de agua en volumen que contiene un suelo.

**Granulometría:** Es la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen el suelo, se determina mediante el análisis granulométrico. Este método determina cuantitativamente la distribución del tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo.

**Gravedad específica:** Está definida como la relación entre el peso unitario seco del suelo y el peso unitario del agua. Propiedad fundamental necesaria para la definición de algunas propiedades físicas de los suelos; depende de la composición mineralógica de las partículas que constituyen el suelo.

**Homogéneo:** Pertenece o relativo a un mismo género, poseedor de iguales caracteres.

**Humedad:** Se define como humedad al contenido de agua presente en una masa de suelo. El contenido de agua o humedad es expresado en porcentaje y es la relación entre el peso del agua contenida en los espacios vacíos y el peso de la fracción sólida; cuando la muestra a ensayar es inalterada, comúnmente se conoce como humedad natural.

**Impedancia:** Mide la oposición de un circuito o de un componente eléctrico al paso de una corriente eléctrica alterna sinusoidal. El concepto de impedancia generaliza la ley de Ohm en el estudio de circuitos en corriente alterna (AC).

**Ley de ohm:** Se define como la cantidad de corriente que fluye por un circuito formado por resistencias puras y es directamente proporcional a la fuerza electromotriz aplicada al circuito, e inversamente proporcional a la resistencia total del circuito.

**Método de resistividad eléctrica D.C:** Son los utilizados en estudios geofísicos que involucran la inyección de corriente a partir de electrodos ubicados en la superficie del terreno.

**Multímetro:** Es un instrumento electrónico de medida que combina varias funciones en una sola unidad. Las más comunes son las de voltímetro, amperímetro y ohmetro.

**Nivel freático:** Es la diferencia entre la superficie libre del terreno y la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea.

**Ohmio:** Unidad de resistencia eléctrica del Sistema Internacional, equivalente a la resistencia eléctrica que da paso a una corriente de un amperio cuando entre sus extremos existe una diferencia de potencial de un voltio. (Símbolo  $\Omega$ ).

**Ohmio por metro:** Es la unidad de valores de resistividad aparente.

**Peso unitario:** Es la comparación del peso total de la muestra con relación a su volumen total. Normalmente varía entre 1.5 a 2 t/m<sup>3</sup>, en gravas varía entre 2.1 a 2.2 t/m<sup>3</sup>.

**Porosidad:** Se refiere a la medida del espacio intersticial entre grano y grano, la cual representa la relación entre el volumen poroso y el volumen total de la roca.

**Potencia:** Cantidad de energía producida o consumida por unidad de tiempo.

**Prospección:** Es la exploración del subsuelo basada en las características del terreno y encaminada a descubrir yacimientos minerales, petrolíferos, aguas subterráneas, etc.

**Pseudosecciones:** Es un conjunto de medidas de Resistividad Aparente que conforman un arreglo en dos dimensiones, es decir, un perfil de resistividad.

**Refracción Sísmica:** Es un método donde se mide el tiempo de propagación de ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación.

**Relación de vacíos:** La relación de vacíos o huecos es la medida del volumen de los vacíos con respecto al volumen de las partículas sólidas.

**Resistividad aparente:** Es un método basado en la medición de la resistividad del suelo, donde se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, debido a que el suelo no es completamente uniforme en cuanto a su composición. La resistividad aparente del terreno es una función de la resistencia y de la geometría del electrodo.

**Resistividad eléctrica:** Es un método geofísico que se basa en la capacidad del suelo o las rocas para conducir electricidad. Esto depende de las sales que haya en el agua que ocupa los espacios porosos de la tierra y rocas. Por tanto la resistencia de los suelos y las rocas al paso de la electricidad depende en gran parte de la densidad y la humedad del suelo.

**Tomografía geoelectrica:** Son imágenes bidimensionales de resistividades y profundidades, producto de un problema de inversión numérica. Estas nos muestran una gama de colores, los cuales se vinculan con las resistividades aparentes de los materiales existentes en el subsuelo.

**Voltaje:** Cantidad de voltios que actúan en un aparato o sistema eléctrico.

**Voltio:** Unidad que mide la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. El potencial eléctrico está relacionado con la energía potencial eléctrica.

**Voltímetro:** Es un instrumento que sirve para medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico.

## RESUMEN

El tema que compete a esta investigación es “OBTENCIÓN DE UNA IMAGEN BIDIMENSIONAL POR EL MÉTODO DE RESISTIVIDAD D.C. DE TRES TIPOS DE SUELO DE LA REGIÓN, VARIANDO LOS PARÁMETROS DE GRANULOMETRÍA Y HUMEDAD” ; consistió en aplicar corriente eléctrica, a través de electrodos a dos tipos de suelo (arena blanca y granito); mediante el cual se obtuvo un perfil del suelo y se pudo observar indirectamente mediante mediciones de resistividad aspectos de la constitución del suelo como: propiedades granulométricas y de humedad, relación de vacíos, porosidad.

Este método se basa en la capacidad del suelo para conducir electricidad; por lo tanto la resistencia de los suelos al paso de la electricidad depende en gran parte de la densidad y la humedad. La resistividad eléctrica de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera, se puede definir la conductividad como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material.

Para el estudio del material se realizó ensayos de laboratorio como: granulometría, porosidad, relación de vacíos, grado de saturación, humedad, peso unitario, gravedad específica y densidad relativa.

Para el proyecto se construyó un tanque rectangular en vidrio de 4 mm de espesor y marco en madera; con las siguientes dimensiones; ancho: 0.25 m, alto: 0.70 m y largo: 2.40 m; donde se colocó cada material y se ubicó en la superficie 24 electrodos espaciados cada 10 cms.

Luego se implementó el método de resistividad D.C, sobre cada una de las muestras de suelo, mediante el arreglo Wenner y se evaluaron sus resultados en el software IPIWIN 32 para obtener la gráfica bidimensional respectiva.

## ABSTRACT

The subject that is incumbent on to this investigation is "OBTAINING OF a BIDIMENSIONAL IMAGE BY the METHOD OF RESISTIVITY D.C. OF THREE TYPES OF GROUND OF THE REGION, VARYING THE GRANULOMETRIA AND THE HUMIDITY PARAMETER" ; it consisted of applying electrical current, to traverse of electrodes to two types of ground (white sand and granite); by means of as a profile of the ground was obtained and it was possible indirectly to be observed by means of measurements of resistivity aspects of the constitution of the ground like: grain sized properties and of humidity, relation of emptinesses, porosity.

This method is based on the capacity of the ground to lead electricity; therefore the resistance of grounds to the passage of the electricity to a great extent depends on the density and the humidity. The electrical resistivity of a material describes the difficulty that finds the current to its passage by him. Of equal way the conductivity like the facility can be defined that finds the current to its passage by him. Of equal way the conductivity like the facility can be defined that finds the electrical current when crossing the material.

For the study of the material several tests of laboratory were made like: granulometría, porosity, relation of emptinesses, degree of saturation, humidity, unitary weight, specific gravity and relative density.

For the accomplishment of this project a rectangular glass tank was constructed; where each material was placed and cms was located in the surface 24 each 10 spaced electrodes.

Soon the method of resistivity D.C was implemented, on each one of the ground samples, by means of the Wenner adjustment and their results in software IPIWIN 32 were evaluated to obtain the respective bidimensional graph.

## INTRODUCCIÓN

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, debido a que el suelo no es completamente uniforme en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina "Resistividad Aparente".

Los métodos para hallar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, se convierten en un gran problema, ya que la acción mecánica del hombre como presión, perforaciones, contribuyen a la degradación del suelo. Los métodos no destructivos tienen la ventaja de ser más rápidos, económicos y sobre todo, convenientes en esta época en que se ha tomado conciencia sobre los problemas ambientales, puesto que no destruye la zona de prueba, así mismo los equipos que se emplean se pueden transportar con facilidad y no es necesario construir caminos de acceso para equipos pesados.

Las medidas de resistividad eléctrica del suelo son habituales en las prospecciones geofísicas. Su finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas. La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del suelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente aplicada.

El objetivo de la mayor parte de los estudios actuales de resistividad eléctrica es obtener modelos de resistividad real del subsuelo.

En la primera etapa del estudio, se trabajó con dos tipos de suelos, Arena Blanca y Granito (arrocillo); provenientes de la cantera toro alto y el depósito mármoles de putumayo, respectivamente. A los cuales se les realizó ensayos de laboratorio, con el fin de obtener diferentes parámetros como: granulometría, porosidad, relación de vacíos, grado de saturación, humedad, peso unitario, gravedad específica y densidad relativa.

En la segunda etapa, se construyó un tanque rectangular en vidrio con marcos en madera; donde se depositó los volúmenes de cada tipo de suelo y posteriormente se realizó variaciones de porcentaje de humedad. El método aplicado en este proyecto, es un método eléctrico alternativo denominado "Resistividad D.C.", específicamente consiste en aplicar corriente eléctrica, a través de electrodos en la superficie del suelo; mediante el cual y siguiendo la metodología propia del mismo, se realizaron mediciones de corriente y voltaje; los datos obtenidos fueron evaluados en el software IPIWIN 32 y de esta forma se obtuvieron las tomografías correspondientes.

La técnica de la tomografía eléctrica emplea los valores de resistividad aparente medidos con los dispositivos geoelectricos sobre la superficie del terreno, para generar imágenes del suelo donde se representan estas resistividades de las diferentes zonas del suelo.

## 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

“El suelo es un medio esencial discontinuo, multifásico, particulado y de calidad no controlada”, sobre el cual se pueden realizar diferentes ensayos para evaluar propiedades tales como permeabilidad, compresibilidad y también para conocer su resistencia y deformación”.<sup>1</sup>

Las ventajas de emplear métodos no destructivos consisten en que son más rápidos, económicos y sobre todo, convenientes en ésta época en que se ha tomado conciencia sobre los problemas ambientales, puesto que no destruye la zona de prueba, así mismo los equipos que se emplean se pueden transportar con facilidad.

Hay diversos métodos geofísicos que permiten la detección de estructuras desde la superficie. Entre los más importantes están el gravimétrico, el magnético, el sísmico, el georadar y los métodos eléctricos.

El tema que compete a esta investigación se refiere específicamente a un método eléctrico alternativo denominado “Resistividad D.C.” el cual consiste en aplicar corriente eléctrica, a través de electrodos en la superficie del suelo.

El suelo y subsuelo se convierten en medios conductores debido a la presencia de agua y proporcionan una resistividad eléctrica que depende de la resistividad de los materiales que se componen. En el problema directo se estudia el potencial originado en la superficie, debido a la corriente eléctrica que fluye a través del mismo, lo cual también permite estimar, incluso, la influencia de objetos hundidos a determinadas profundidades en el subsuelo.

El problema inverso, que es el problema que compete a estudio, compara el algoritmo para la obtención de imágenes bidimensionales “reales” con la distribución de la resistividad eléctrica aparente de las muestras de suelo. Para realizar está comparación se debe conocer exactamente el tipo de suelo con sus propiedades granulométricas y de humedad para poder identificar en forma aproximada el tipo de suelo tratado y establecer una relación entre ellos.

Desafortunadamente y para nuestra región estos datos no existen por ser una técnica relativamente desconocida en su aplicación, este trabajo permitirá

---

<sup>1</sup> CORAL, Hugo. Geotecnia I. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto: 1999 p. 4 - 6.

empezar a formar una base de datos para el futuro y lograr su aplicación en obras de ingeniería, tales como cimentaciones, estructuras hidráulicas, niveles freáticos altos y problemas de socavaciones.

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

¿Cómo las imágenes bidimensionales obtenidas a partir de las medidas de resistividad eléctrica aparente se relacionan con el tipo de suelo y los parámetros de granulometría y humedad, usando el método de resistividad D.C.?

## **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo general.** Obtener imágenes bidimensionales de la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo y relacionarlas con los parámetros de granulometría y humedad de tres muestras de suelo.

### **1.3.2 Objetivos específicos:**

- Obtener para cada tipo de suelo la granulometría, porosidad, relación de vacíos, grado de saturación, humedad, peso unitario, gravedad específica y densidad relativa; de acuerdo a especificaciones previamente establecidas.
- Utilizar diferentes muestras de suelo, variando los parámetros de granulometría y humedad.
- Implementar el método de resistividad D.C., a cada tipo de suelo, mediante el arreglo Wenner y evaluar sus resultados.
- Obtener imágenes bidimensionales de resistividad eléctrica aparente versus profundidad usando el software IPIWIN 32.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Los orígenes de los métodos que miden la impedancia o resistencia eléctrica del subsuelo se remontan al siglo XVIII con los trabajos realizados por Gray y Wheeler en 1720 sobre la resistividad de las rocas y el descubrimiento de que el suelo es conductor. Brown patentó en 1883 un sistema de prospección eléctrica con dos electrodos. Unos veinte años más tarde (1902), Daft y Williams obtuvieron otra patente basada en el empleo de baja frecuencia. Un año después, el ruso E.S. Ragozin publica su monografía “Aplicación de la electricidad en búsqueda de yacimientos mineros”, donde anticipa muchas de las ideas que habrían de aplicarse más tarde. En 1913 Conrad Schlumberger realiza el estudio tectónico de la cuenca silúrica de Calvados (Francia). En 1915, él mismo y el americano Frank Wenner, independientemente, idean el dispositivo tetraelectródico que será la base del progreso ulterior.

En 1938 se efectuaron los primeros sondeos eléctricos profundos (más de un kilómetro de penetración). Este método tuvo parte destacada en el descubrimiento de los yacimientos petrolíferos o de gas (en la antigua URSS) de Buguruslán, Saratov, Beshkiria. Desde entonces, el método eléctrico fue adoptado en la URSS como el de empleo más general en la prospección petrolera.

Los métodos utilizados para obtener imágenes son diferenciales (representan el cambio de la impedancia con el tiempo o la frecuencia) y de un solo paso. En cambio, en la prospección geoeléctrica, los métodos utilizados son, en su mayoría, absolutos e iterativos.

El reconocimiento del suelo implica ante todo una idea de la descripción física de los materiales propiamente dicha como espectro visual, color, consistencia, estructura. Esta descripción puramente física debe ser completada para la determinación de las distintas categorías del terreno; espesor de las capas, inclinación, estratificación, nivel freático, etc.

Todas estas determinaciones constituyen lo que se llama Reconocimiento Geológico y emplea métodos destructivos y no destructivos.

Dentro de los métodos no destructivos se encuentran: los geofísicos, entre los cuales están el de la Resistividad Eléctrica D.C; el de la Refracción Sísmica, el electromagnético, el gravimétrico, entre otros. El objetivo de una exploración geofísica es detectar y localizar las masas de tierra y rocas de subsuelo, obtener

algunas de sus dimensiones, determinar propiedades físicas y otras características como el nivel freático.

En 1915, Wenner desarrolló los fundamentos para los métodos de resistividad eléctrica utilizados en la geofísica aplicada; presentó un método destinado a dar un valor a la resistencia aparente de un material del suelo entre dos electrodos.

El método de Resistividad Eléctrica D.C. se basa en la capacidad del suelo o las rocas para conducir electricidad. Esto depende de las sales que haya en el agua y que ocupan los espacios porosos de la tierra y las rocas. Por tanto la resistencia de los suelos y las rocas al paso de la electricidad depende en gran parte de la densidad y la humedad del suelo. Esas resistencias características se pueden utilizar para localizar e identificar las condiciones y los materiales del subsuelo.

Las investigaciones geoeléctricas, han centrado sus objetivos en establecer la resistividad real de las capas en el subsuelo, la cual está ligada con los contenidos de mineral y fluidos, la cantidad está relacionada con la porosidad y el grado de saturación, la aplicación de la geoeléctrica ha estado direccionada a la exploración de aguas, recursos mineros y geotécnica, en los últimos tiempos ha tenido una aplicación ambiental.

Los métodos geofísicos se han aplicado sobre todo a cuestiones de geología y minería, en mucha menor escala a mecánica de suelos; para realizar investigaciones preliminares de lugares, para localizar presas de tierra o para determinar perfiles de roca basal.

**2.1.1 Método de resistividad eléctrica D.C.** La resistividad eléctrica de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera, se puede definir la conductividad como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica aparente que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor.

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ( $\Omega$ -m). La conductividad se define como el inverso de la resistividad.

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el siemens (S). La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad o presión.

Estrictamente hablando, todos los cuerpos son eléctricamente conductores dado que permiten, en mayor o menor medida, el paso de portadores de cargas eléctricas.

Estos portadores pueden ser electrones o iones, hecho que permite distinguir entre dos tipos de conductividad: electrónica e iónica. Los cuerpos con conductividad electrónica se clasifican en metales y semiconductores. Los cuerpos con conductividad iónica se conocen como electrolitos si no presentan forma gaseosa.

El mecanismo de la conductividad de los metales puede imaginarse como debido a que los electrones de valencia de sus átomos pueden moverse libremente entre la red cristalina que estos forman sin vinculación a ninguno determinado. La facilidad de movimiento de los electrones y su gran número redundan en una conductividad muy elevada.

Los minerales semiconductores son muchos y de gran importancia práctica. Su resistividad depende de su contenido en impurezas, a veces en grado extremo. Además, su conductividad aumenta con la temperatura. Por ello, no cabe esperar que la resistividad de una especie mineralógica determinada pueda representarse por un dato único, sino que puede variar dentro de límites amplios. En general, los telurios y los arseniuros son conductores muy buenos. Los sulfuros suelen entrar también entre los conductores buenos, con excepciones como la blenda y el cinabrio. Los óxidos y los compuestos de antimonio suelen ser malos conductores, con la excepción de la magnetita. Ahora bien, estos minerales no suelen aparecer en la naturaleza de forma individual, sino en asociaciones, y junto con una ganga frecuentemente aislante (cuarzo, calcita, etc.), por lo que la resistividad conjunta del filón puede variar mucho de unos casos a otros.

En los cuerpos dieléctricos o aisladores, los electrones están fuertemente ligados. Esto puede deberse a que existen enlaces covalentes o iónicos. En este último caso la red cristalina forma un electrolito sólido. La mayoría de los minerales pertenecen a este grupo. A temperaturas normales las resistividades son muy altas, generalmente superiores a  $170 \Omega\text{m}$ . Son minerales dieléctricos el azufre, la blenda, la calcita, el cinabrio, el cuarzo, las micas y el petróleo entre otros.

Entre otros minerales, además, figuran los más importantes constituyentes de las rocas, las cuales se comportarían como aisladoras sino fuera por la presencia de electrolitos.

El agua pura es muy poco conductora a causa de su muy reducida disociación. La resistividad del agua destilada es de unos  $10^5 \Omega\text{m}$ . Por lo que puede considerarse como aislante. Las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan, sin embargo, conductividad apreciable, pues siempre tiene disuelta alguna sal, generalmente NaCl. Así las aguas de lagos y arroyos de alta montaña varían entre  $10^3 \Omega\text{m}$  y  $3 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$ , las aguas subterráneas tienen resistividades de 1 a  $20 \Omega\text{m}$ , y las aguas marinas tienen una resistividad de unos  $0,2 \Omega\text{m}$ .

Si la resistividad en las rocas depende únicamente de los minerales constituyentes, habría de considerarse como aislantes en la inmensa mayoría de los casos, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc., lo son prácticamente. Solo en el caso de que la roca contuviera minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora, es decir, solo lo serían las minas metálicas. Afortunadamente, todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupadas total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que, en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos. La resistividad de las rocas puede variar en un margen muy amplio en función del contenido del agua, de la salinidad de esta y del modo de distribución de los poros.

“El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que la resistividad del suelo aparte de depender de su composición intrínseca, dependa de otros factores externos como la temperatura, la humedad, presión, etc., que pueden provocar que un mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo. De entre todos los factores, la humedad es el más importante; además, es la que se puede alterar más fácilmente mediante la lluvia o el riego del suelo. Diferentes grados de humedad para un mismo terreno darían lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo. Una limitación del método resistivo es su alta sensibilidad a pequeñas variaciones de la conductividad cerca de la superficie, debido por ejemplo al contenido de humedad. Hablando en términos electrónicos, el nivel de ruido es alto. Una topografía accidentada puede tener un efecto similar, ya que el flujo de corriente se concentra en los valles y se dispersa en las colinas. Como resultado se distorsionan las superficies equipotenciales produciendo falsas anomalías”.<sup>2</sup>

A continuación se muestra un gráfico de las márgenes de variación más comunes en algunas rocas, minerales y químicos (tabla 1); como también los valores de resistividad aparente más comunes, de algunos materiales (tabla 2).<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Medida de la Resistividad Eléctrica. <http://petrus.upc.es/wwwdib/tesis/mgasulla/>

<sup>3</sup> ALH Geofísica. <http://www.alhgeofisica.com.ar/> 5k

Tabla 1. Gráfico de las márgenes de variación más comunes en algunas rocas, minerales y químicos (resistividad en Ohm – metro)

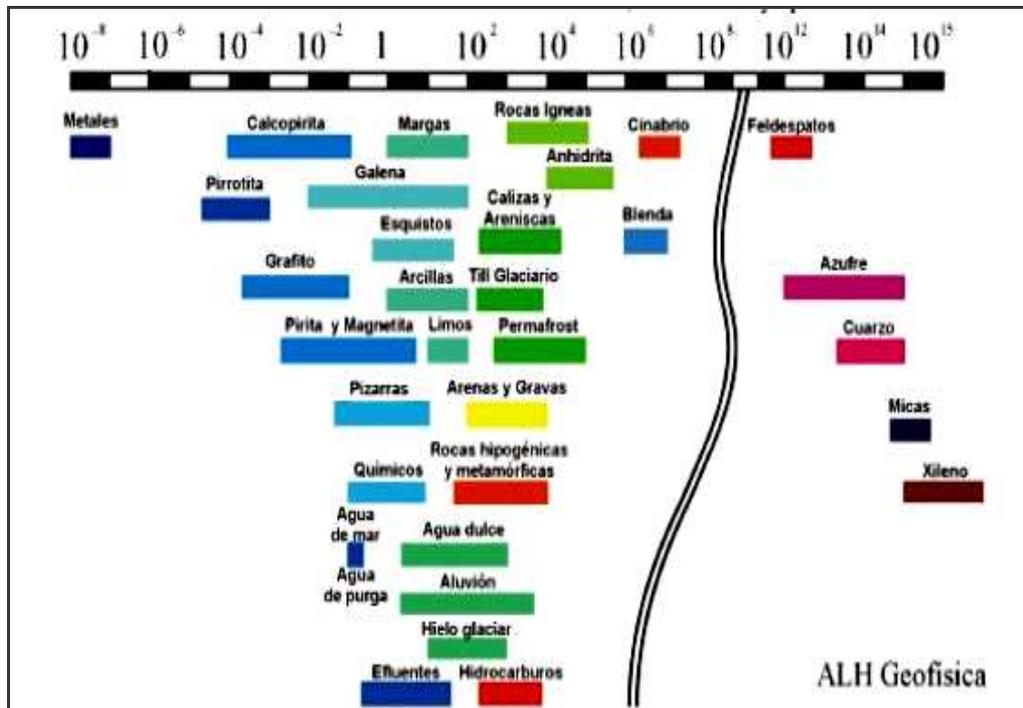


Tabla 2. Valores de Resistividad aparente de algunos materiales.

EJEMPLOS DE RESISTIVIDAD DE ROCAS, SUELOS Y MINERALES (LOKE, 2004)			
MATERIAL	RESISTIVIDAD ( $\Omega$ - m)	MATERIAL	RESISTIVIDAD ( $\Omega$ - m)
Granito	$6 \cdot 10^3 - 10^6$	Arcilla	1 – 100
Esquisto	$30 - 10^4$	Marga	4 – 90
Mármol	$100 - 4 \cdot 10^8$	Depósitos aluviales	10 – 900
Cuarcita	$100 - 3 \cdot 10^8$	Agua dulce	10 – 100
Pizarra	$800 - 5 \cdot 10^7$	Agua marina	0.3
Caliza	$70 - 7 \cdot 10^3$	Esquisto gráfico	$10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}$
Arenisca	$10 - 6 \cdot 10^3$	Carbón antracítico	$10^{-3} - 2 \cdot 10^5$

**Medida de la resistividad eléctrica aparente del suelo.** La evaluación de la resistividad se realiza en la práctica induciendo una corriente eléctrica continua (I) al terreno mediante dos electrodos (A y B), a diferentes longitudes de separación

del centro (O), ya que la profundidad de flujo (profundidad de investigación) aumenta al hacer cada vez mayor la separación de los electrodos y midiendo la diferencia de potencial  $V$ , generada al pasar la corriente a través del subsuelo entre los electrodos M y N. Entonces para una intensidad de corriente  $I$  y diferencia de potencia  $V$ , la resistividad aparente  $\rho_a$  es:

$$\rho_a = \frac{KV}{I} = KR \quad (1)$$

Donde:

$\rho_a$  = Resistividad aparente en ohm - m

$K$  = Factor geométrico que depende del tipo de arreglo según la disposición de los electrodos de corriente y voltaje. El tipo de arreglo se escoge, dependiendo de las condiciones topográficas del terreno, el tipo de prospección a realizar y la profundidad de investigación.

$V = \Delta V$  = Diferencia de potencial, en voltios

$I$  = Corriente eléctrica continua, en amperios

$R$  = Resistencia media de conducción en ohm

**Arreglo wenner.** Con el objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y del tipo de suelo, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

La medida de la “Resistividad Eléctrica Aparente” del suelo natural, se basa en la aplicación del principio de Caída de Potencial, bajo condiciones geométricas simplificadas que fijan la equidistancia entre los (4) electrodos de medida necesarios, (2) de corriente (C1 y C2) y (2) de Potencial (P1 y P2), que deben ser colocados en línea recta a distancias (a); desde los cuales se mide la Resistencia Media de Conducción (R) del segmento de suelo (P1, P2) de longitud (a), que se opone a la circulación de la corriente inyectada (I) entre los extremos (C1, C2), de longitud (3a). (fig 1).

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi} F(r_n) \quad \text{Luego } \rho_a = 2\pi R \frac{1}{F(r_n)}$$

“Los Electrodo de Medida, colocados en forma equidistante con un intervalo (a) propio para cada medida, deben ser clavados en el suelo firme a una profundidad

máxima ( $b = a/20$ ), con la finalidad de no introducir mayores errores; generalmente es suficiente considerar entre 0.15 m a 0.25 m; de otro lado, tomando la expresión básica, que incluye el factor de forma  $F(r_n)$ , con las respectivas distancias ( $R_1$ ,  $R_2$ ) y ( $r_1$ ,  $r_2$ ), entre los electrodos de corriente y los electrodos de potencial; se deduce:<sup>4</sup>

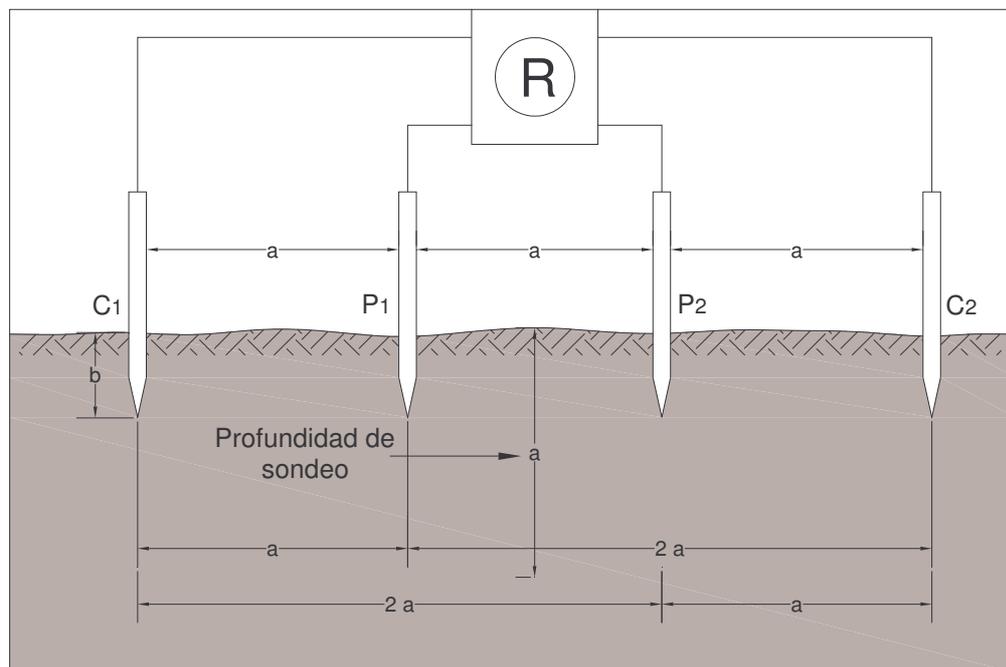
$$R = \frac{\rho\alpha}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right] \quad \text{Para} \quad r_1 = R_2 = a; \quad r_2 = R_1 = 2a$$

$a$  = Distancia entre electrodos en metros.

$b$  = Profundidad a la cual están enterrados los electrodos en metros.

$$R = \frac{\rho a}{2\pi} \times \frac{1}{a} \quad \text{luego} \quad \rho a = 2\pi R a \quad (2)$$

**Figura 1. Disposición de los circuitos de medida método geoelectrico de WENNER.**



<sup>4</sup> Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra. <http://vppx134.vp.ehv.es/fisica/agustin/geoelec/presec1.html>.

En la figura 1, se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores.

EL Método WENNER, tiene la ventaja de ser sencillo y más preciso para fines de uso eléctrico que otros métodos basados en el mismo principio, dado que no exigen instrumentos de alta sensibilidad, son ideales para despliegues cortos (pequeña profundidad) tales como los que se necesitan para Puestas a Tierra y las variaciones laterales en este caso no le afectan; se aplican a todo tipo de suelos.

**Tomografía Geoeléctrica.** En la práctica de los métodos geoeléctricos, la técnica de estudio del subsuelo más aplicada es la que se conoce como “Tomografía Geoeléctrica”.

La tomografía es una técnica empleada para obtener una sección de un sólido. El término deriva de la palabra griega “τομοσ” que significa “sección” o “rebanada”. El uso de la palabra tomografía en la literatura geofísica es relativamente reciente. Aunque durante décadas se han empleado técnicas para crear representaciones del subsuelo (pseudosecciones de resistividad, etc.), estas representaciones se denominan “tomogramas”. La tomografía es un término habitualmente reservado para representar mediante imágenes los valores internos de un objeto a partir de sus proyecciones medidas desde el exterior del objeto. Probablemente la aplicación más conocida de la tomografía sea en medicina, donde la técnica del scanner tomográfico computarizado (TAC), se aplica habitualmente para obtener imágenes en sección del cuerpo humano (Sharma, 1997).

La técnica de la tomografía eléctrica emplea los valores de resistividad aparente medidos con los dispositivos geoeléctricos sobre la superficie del terreno, para generar imágenes del subsuelo donde se representan los valores de la resistividad verdadera de las diferentes zonas del subsuelo. La relación entre la resistividad aparente y la resistividad verdadera, es una relación compleja. Para determinar la resistividad verdadera del subsuelo a partir de los valores de la resistividad aparente, se aplica la técnica de la “inversión” (Loke, 2004).

El objetivo de la inversión geofísica eléctrica es, como se acaba de indicar, encontrar un modelo de distribución de resistividades verdaderas en el subsuelo, que genere una respuesta similar a los valores de resistividad aparente medidos.

Las relaciones matemáticas entre los valores de resistividad aparente medidos y la resistividad verdadera del subsuelo se obtienen a partir de métodos de elementos finitos o diferencias finitas.

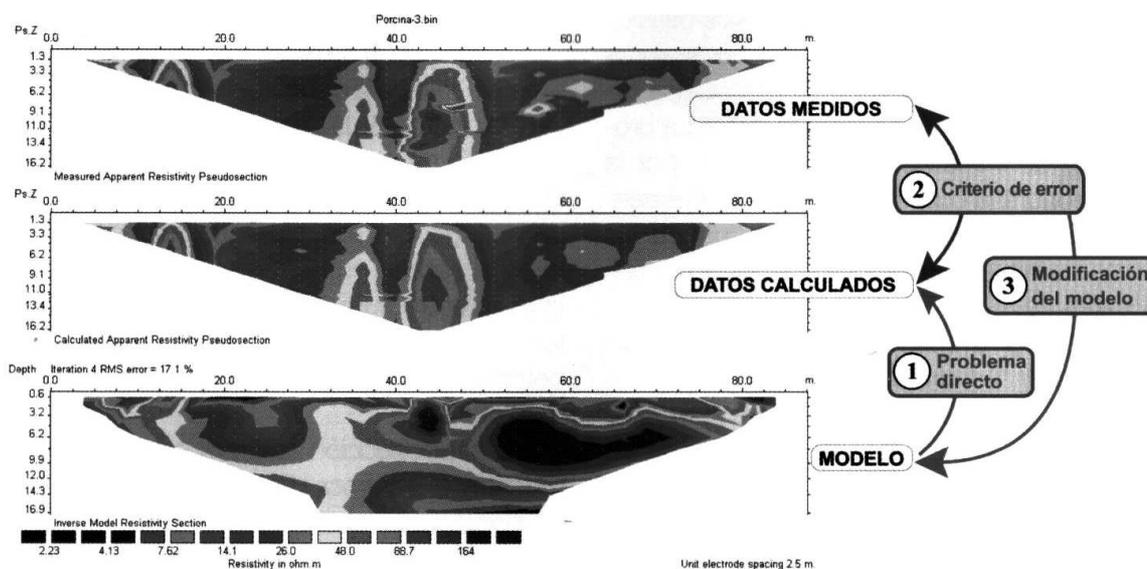
El procedimiento de generación de una tomografía eléctrica mediante inversión, parte de los datos de resistividad aparente medidos, representados en forma de

pseudoperfil. A continuación se genera un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo, y resolviendo lo que se define como “cálculo del problema directo”, se llega al modelo de resistividades aparentes que se derivaría del mismo. Estas resistividades aparentes se comparan con las realmente medidas, y se calcula el error cometido. A través de este error se modifica el modelo hipotético real de resistividades verdaderas, y se repite el proceso anterior.

De este modo, tras una serie de iteraciones, se consigue un modelo de resistividades verdaderas del subsuelo que da explicación a las resistividades aparentes medidas.

En el esquema de pseudosecciones que se incluye a continuación (fig 2), se detalla el procedimiento de inversión para la obtención de una Tomografía Eléctrica.

**Figura 2. Etapas seguidas en el proceso de inversión Geoeléctrico (Marescot, 2003)**

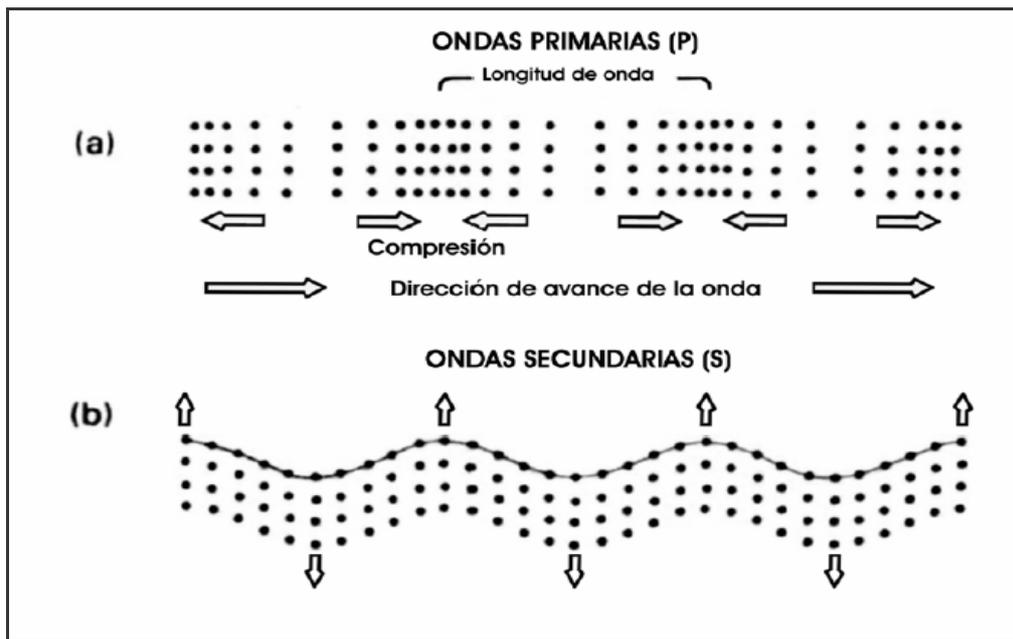


**Método de Refracción Sísmica.** En el siglo XIX, el estudio de los terremotos, permitió conocer que consistían en la propagación en todas direcciones de ondas elásticas. Mas tarde se conoció que el foco del seísmo generaba ondas de compresiones longitudinales o primarias (Ondas P) y ondas de cizalla transversales o secundarias (Ondas S).

Así mismo, se comprobó que cuando las Ondas P y S alcanzaban la superficie del terreno, se generaban ondas superficiales de interfase, de tipo Rayleigh (Ondas R) y tipo Love (Ondas L).

Las Ondas P son las más rápidas, ya que son las primeras que se observan. A continuación se registran las Ondas S, y finalmente llegan las Ondas Rayleigh y la Ondas Love, (fig 3). De este modo, se verifica que  $V_P > V_S > V_R > V_L$ .

**Figura 3. (a) Propagación de las ondas P y (b) Propagación de las ondas S.**



La refracción sísmica es un método de prospección geofísica, que estudia la respuesta del terreno cuando se propaga a través de él una onda de compresión (Onda P) producida por medios mecánicos en la superficie.

El parámetro físico que se analiza es la velocidad de propagación de la onda  $V_p$  a través de los materiales del subsuelo en función de la compacidad de los mismos. Al incidir una Onda P sobre una superficie de separación entre dos medios se generan seis ondas diferentes: Onda P refractada, onda P reflejada, onda S refractada, onda S reflejada, onda Rayleigh y onda Love. Lo mismo sucede cuando llega la onda S, por lo que en total se generan doce ondas diferentes.<sup>9</sup>

En el método de refracción sísmica se emplean sólo las ondas refractadas, pero sólo se observan las primeras llegadas de las ondas, que son ondas P, ya que son las más rápidas. A lo largo de la superficie se instalan geófonos, que captarán las

<sup>9</sup> Geofísica aplicada a la Obra Civil .<http://www.geoconsult.es>

oscilaciones provocadas por las sucesivas ondas que van llegando. El tiempo que las ondas tardan en alcanzar el geófono desde que son emitidas, es registrado.

La representación gráfica de los tiempos que tardan las ondas en alcanzar los geófonos, en función de las distancias al origen de la fuente, se denomina “Dromocrona”. Esta gráfica está compuesta a su vez de varias gráficas (al menos dos rectas y una parábola), que representa cada una a una onda distinta.

A continuación se presentan los valores de velocidad de litologías más importantes, (tabla 3).

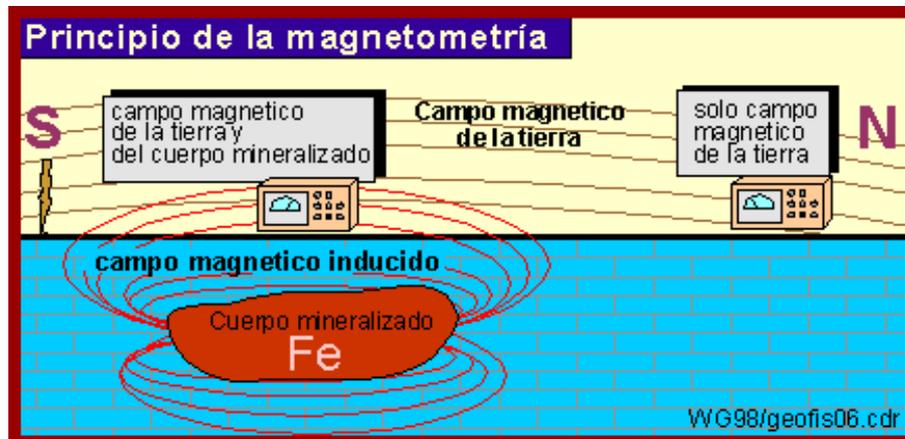
**Tabla 3. Valores de velocidad de litologías más importantes**

<b>VELOCIDAD DE LAS ONDAS P EN LAS LITOLOGIAS MAS COMUNES (García, 2003)</b>			
Tierra suelta	250 – 400 m/s	Pizarras	2500 – 4500 m/s
Limos y arenas flojas	350 – 500 m/s	Margas	2500 – 4500 m/s
Arenas y gravas sueltas	400 – 900 m/s	Calizas	3000 – 5500 m/s
Arenas y gravas sueltas saturadas	1500 – 1800 m/s	Areniscas	2000 – 4500 m/s
Agua	1450 – 1600 m/s	Granitos	3500 – 5500 m/s
Arcillas	900 – 2500 m/s	Sal	4000 – 5000 m/s

**.Método Magnético:** El método magnético es un método geofísico relativamente simple en su aplicación. El campo magnético de la tierra afecta también yacimientos que contienen magnetita (Fe); estos yacimientos producen un campo magnético inducido, es decir su propio campo magnético, (fig 4). Un magnetómetro mide simplemente las anomalías magnéticas en la superficie terrestre y estas pueden ser producto de un yacimiento.

**Aplicación:** El método magnético es el método geofísico de prospección más antiguo aplicable en la prospección petrolífera, en las exploraciones mineras y de artefactos arqueológicos.

Figura 4. Principio de magnetometría



En la prospección petrolífera el método magnético da informaciones acerca de la profundidad de las rocas pertenecientes al basamento. A partir de estos conocimientos se puede localizar y definir la extensión de las cuencas sedimentarias ubicadas encima del basamento, que posiblemente contienen reservas de petróleo.

“En las exploraciones mineras se aplica el método magnético en la búsqueda directa de minerales magnéticos y no magnéticos asociados con los minerales, que ejercen un efecto magnético mensurable en la superficie terrestre. Además el método magnético se puede emplear en la búsqueda de agua subterránea”.<sup>10</sup>

### 2.3 RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GRAVIMÉTRICAS DE UN SUELO.

Para el estudio del material es necesario conocer ciertos parámetros, como: granulometría, porosidad, relación de vacíos, grado de saturación, humedad, peso unitario, gravedad específica y densidad relativa.

**Granulometría.** Permite una distribución de los tamaños de las partículas que constituyen el suelo, se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra representativa del material en fracciones de igual tamaño de partículas y cuyas características deben ajustarse a la norma ICONTEC 32, ASTM – D421 – 58 y ASTM – D422 – 63.

<sup>10</sup> Métodos geoelectrónicos. <http://www.geovirtual.cl/geologíageneral/ggcap01e.htm>.

**Humedad o contenido de agua:** Es la relación porcentual que existe entre el peso del agua contenida en el suelo y el peso de los sólidos. El agregado fino aumenta de volumen cuando está húmedo, la humedad superficial mantiene separada las partículas produciendo el aumento de volumen conocido como “hinchamiento o expansión de agregado fino”. La expansión varía con la humedad y la granulometría, las arenas finas se expanden más que las gruesas para una humedad dada.

La humedad se determina de acuerdo a la norma ICONTEC 237 y se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad ; \quad \text{Donde:} \quad (3)$$

$W_w$ : Peso del Agua

$W_s$ : Peso de Sólido

**Porosidad (n):** Es la fracción en porcentaje del volumen de vacíos al volumen total de suelo. En general nos proporciona un dato preciso si es un suelo denso o suelto. Teóricamente puede variar entre cero a cien; para el primer caso se tendrá un suelo compuesto solamente por fase sólida y para el segundo caso se tendrá un sistema completamente vacío. En la práctica los valores dependen de la forma de acomodamiento de las partículas para suelos no cohesivos.

$$n = \frac{V_v}{V_m} * 100 \quad ; \quad \text{Donde:} \quad (4)$$

$V_v$ : Volumen Vacíos

$V_m$ : Volumen Total

**Relación de vacíos (e):** Es la relación existente entre el volumen de vacío y el volumen de sólidos de un suelo. Teóricamente varía entre cero a infinito. Prácticamente puede ser mayor de 0.25 en arenas muy densas y de partículas de tamaños pequeñas y 15 para arcillas altamente compresibles o expansivas.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad ; \quad \text{Donde:} \quad (5)$$

$V_v$ : Volumen Vacíos

$V_s$ : Volumen Sólidos

**Grado de saturación (Sr):** Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos. Indica la cantidad de agua en volumen que contiene un suelo. Varía desde  $S_r = 0\%$  (para un suelo seco), hasta  $S_r = 100\%$  (suelo saturado).

$$Sr = \frac{V_w}{V_v} * 100 \quad ; \quad \text{Donde:} \quad (6)$$

$V_w$  : Volumen Agua  
 $V_v$  : Volumen Vacíos

**Peso Unitario ( $\gamma_m$ ):** Es la relación existente entre el peso de la muestra y el volumen de la misma. Normalmente varía entre 1.5 a 2 t/m<sup>3</sup>. En gravas varía entre 2.1 a 2.2 t/m<sup>3</sup>.

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \quad ; \quad \text{Donde:} \quad (7)$$

$W_m$  : Peso Muestra  
 $V_m$  : Volumen Muestra

En mecánica de suelos utilizamos varios tipos de estas relaciones:

Peso unitario natural es la comparación del peso total de la muestra con relación a su volumen total. Se expresa en las siguientes unidades: g/cm<sup>3</sup>, Kg/dm<sup>3</sup>, t/m<sup>3</sup> y KN/m<sup>3</sup>. Peso unitario seco es la relación por cociente entre el peso de las partículas sólidas y el volumen total. Se utilizan las mismas unidades que en el peso unitario natural.

**Gravedad Específica de los sólidos ( $G_s$ ):** Está definida como la relación entre el peso unitario sólido del suelo y el peso unitario del agua. Propiedad fundamental necesaria para la definición de algunas propiedades físicas de los suelos; depende de la composición mineralógica de las partículas que constituyen el suelo.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad ; \quad \text{Donde:} \quad (8)$$

$\gamma_s$  : Peso Unitario de Sólidos  
 $\gamma_w$  : Peso Unitario del Agua

**Densidad relativa ( $D_r$ ):** Es una propiedad de los suelos y se emplea normalmente en gravas y arenas, es decir, en suelos que contienen partículas mayores a 0.074 mm (malla #200).

Indica el grado de compacidad (compactación) de un suelo y se puede emplear tanto para suelos en estado natural como para rellenos compactados artificialmente.

El uso de la densidad relativa es importante en mecánica de suelos debido a la correlación directa que ella tiene con otros parámetros como por ejemplo: el

ensayo Proctor, el ensayo C.B.R y otros relacionados con la capacidad de soporte de un suelo.

$$Dr = \frac{emáximo - e}{emáximo - emínimo} \quad (9)$$

*emáximo*: Relación de vacíos en su estado más suelto.

*e*: Relación de vacíos del suelo en su estado natural en el terreno.

*emínimo*: Relación de vacíos en su estado más compacto que puede obtenerse en laboratorio.

### 3. RESULTADOS Y ANALISIS

#### 3.1 ENSAYOS REALIZADOS

**3.1.1 Contenido de humedad (Normas ASTM D2216-71).** El contenido de agua o humedad es expresado en porcentaje y es la relación entre el peso del agua contenida en los espacios vacíos y el peso de la fracción sólida; cuando la muestra a ensayar es inalterada, comúnmente se conoce como humedad natural.

**Procedimiento:** Se pesó el recipiente, luego se colocó una muestra representativa de suelo en su estado natural y se volvió a pesar todo el conjunto. Después se dejó secar la muestra en la estufa durante un periodo de 18 horas a una temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Luego se retiró la muestra del horno y se determinó el peso del recipiente más el del suelo seco; se calculó el contenido de humedad  $w$ . La diferencia entre el peso de suelo húmedo más el del recipiente y el peso de suelo seco más el del recipiente es el peso del agua  $W_w$  que estaba presente en la muestra. La diferencia entre el peso de suelo seco más el del recipiente y el peso del recipiente solo es el peso de los sólidos en el suelo  $W_s$ . Para el cálculo de la humedad se utiliza la siguiente expresión:

$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100 ; \text{ Donde:}$$

$W_w$ : Es el peso del agua presente en la masa de suelos en gr.

$W_s$ : Es el peso de los sólidos en el suelo en gr.

Los datos que obtuvimos para cada tipo de suelo fueron:

**Tabla 4. Datos para la determinación del contenido de humedad.**

Datos	Arena Blanca	Granito	Ripio
Peso del recipiente (gr)	78,70	78,70	95.5
Peso muestra (gr)	600	605,80	514.5
Peso muestra seca, $W_s$ (gr)	539,10	594,30	507.2

**Tabla 5. Contenido de humedad para cada tipo de suelo.**

Resultados	Arena Blanca	Granito	Ripio
Contenido de Humedad (%)	13.23	2.23	1.77

### 3.1.2 Análisis granulométrico (Normas ASTM – D421 – 58 y ASTM – D422 – 63):

**MÉTODO DE TAMIZADO O MECÁNICO.** El análisis granulométrico consiste en dividir una muestra representativa del material en fracciones de igual tamaño de partículas. Permite una distribución de los tamaños de las partículas que constituyen el suelo.

**PROCEDIMIENTO:** Se seleccionó una muestra representativa de cada tipo de suelo, lo cual se hizo mediante un cuarteo y se dejó secar dichas muestras en el horno durante un periodo de 18 horas a una temperatura de  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Una vez secas las muestras se tomó un peso para cada una de 610 gramos. Se colocó la muestra sobre el tamiz # 200 y se procedió cuidadosamente a lavarla con agua través de éste, hasta que el agua saliera totalmente limpia. Luego se llevó la muestra nuevamente al horno por un periodo de 18 horas.

Una vez seca la muestra se la pesó y se la hizo pasar por una serie de tamices: No. 4, No. 8, No.16, No. 30, No. 40, No. 50, No. 100, No. 200 y el fondo. Se colocaron las mallas en orden ascendente y se vació la muestra sobre la primer malla, la cual se tapó herméticamente, luego se procedió a colocar el juego de mallas en un agitador mecánico durante cinco minutos, el cual sacude las mallas con una rotación horizontal aplicando regularmente golpes secos en dirección vertical.

Luego se retira la serie de mallas del agitador mecánico, procediendo a vaciar la porción retenida en cada malla sobre el recipiente. Para cada malla se obtuvo el peso correspondiente de la porción retenida en él.

Los resultados del análisis granulométrico para cada tipo de suelo, fueron:

**Tabla 6. Datos para análisis granulométrico de cada tipo de suelo.**

<b>DATOS</b>	<b>Arena Blanca</b>	<b>Granito</b>	<b>Ripio</b>
Peso del recipiente (gr)	78,5	80	95.5
Peso muestra seca + recip. (gr)	600	600	610
Peso muestra seca, $W_s$ (gr)	521.5	489.3	514.5

Figura 5. Curva Granulométrica Arena Blanca.

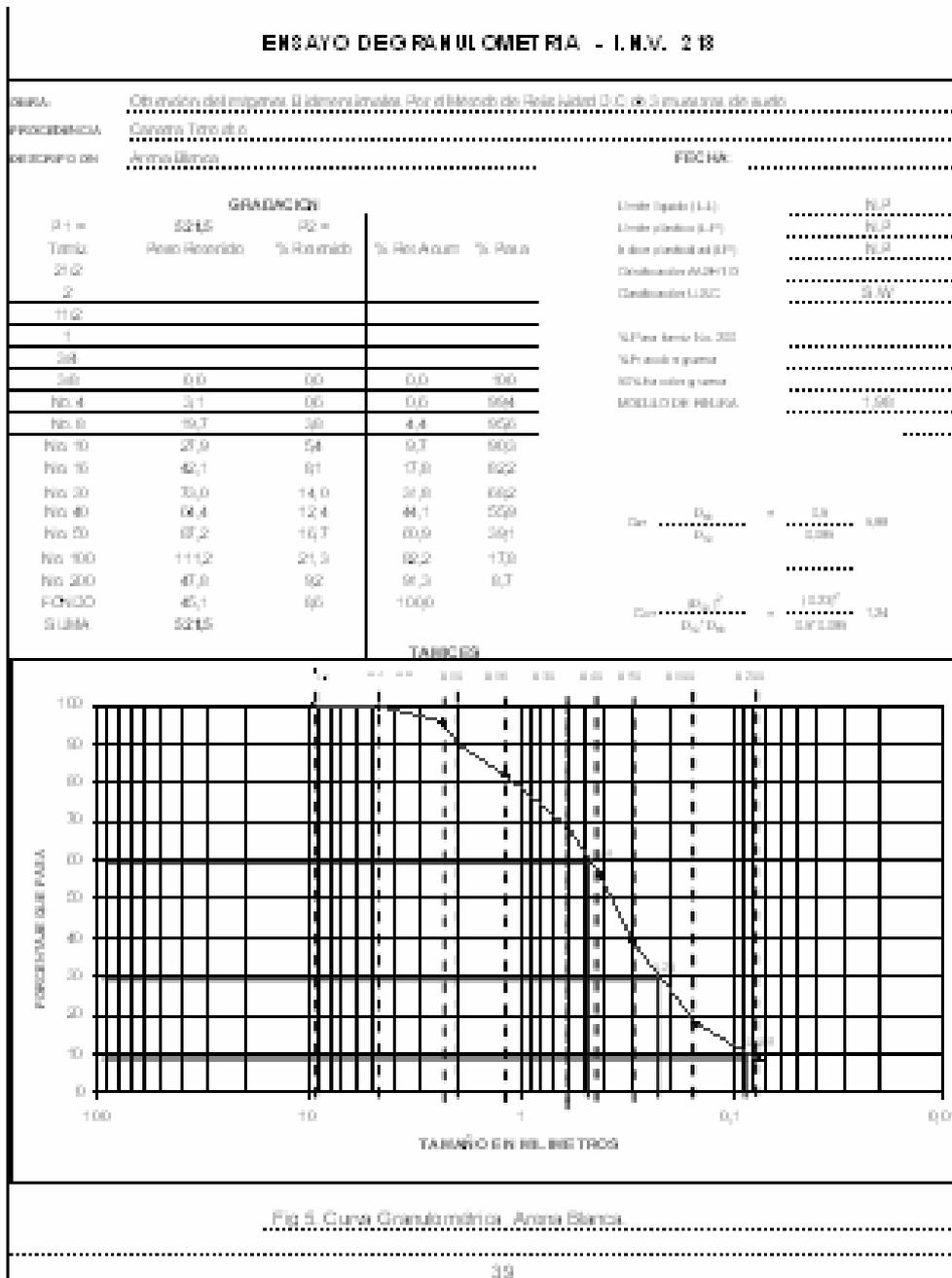


Figura 6. Curva granulométrica granito (Arrocillo)

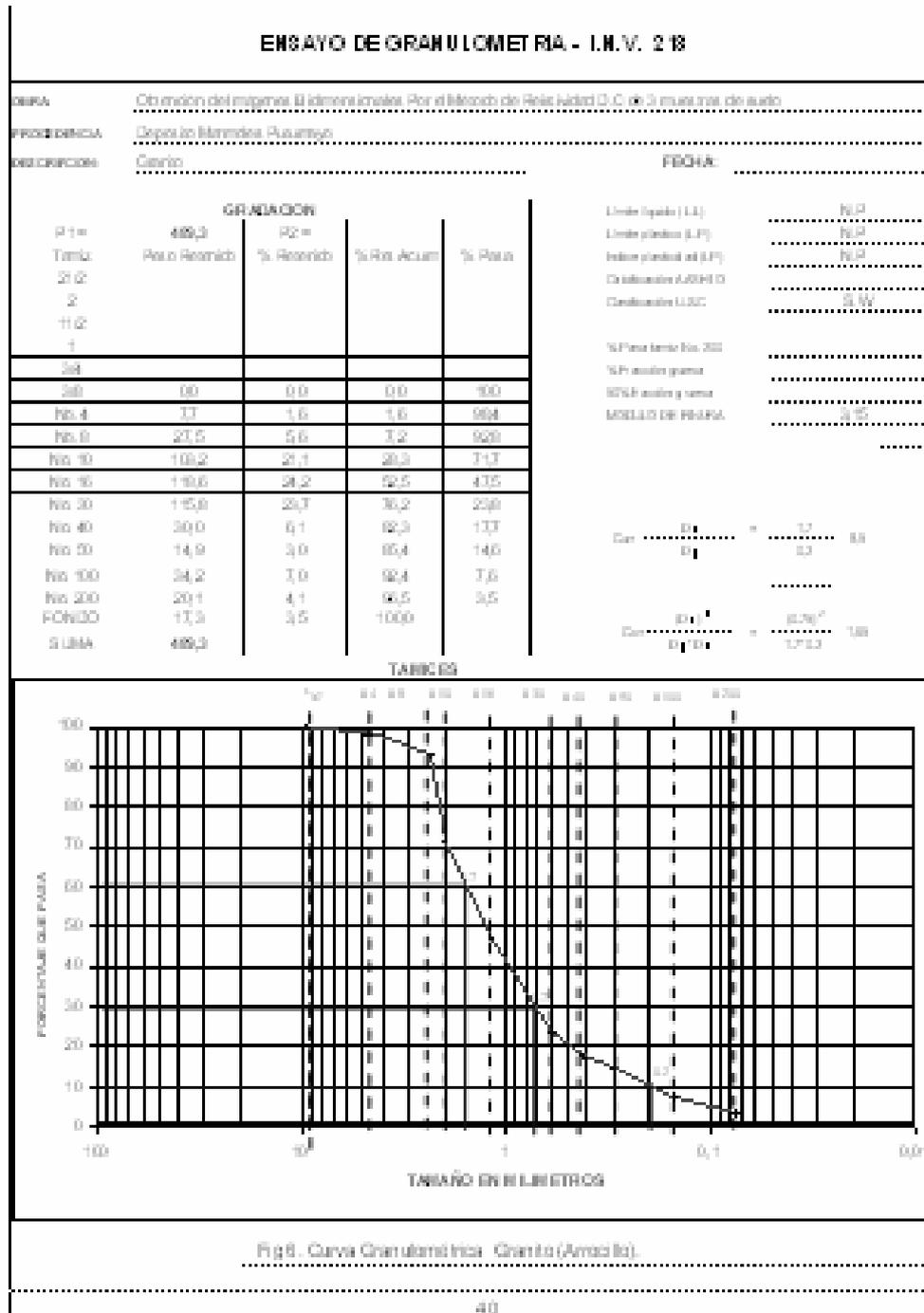
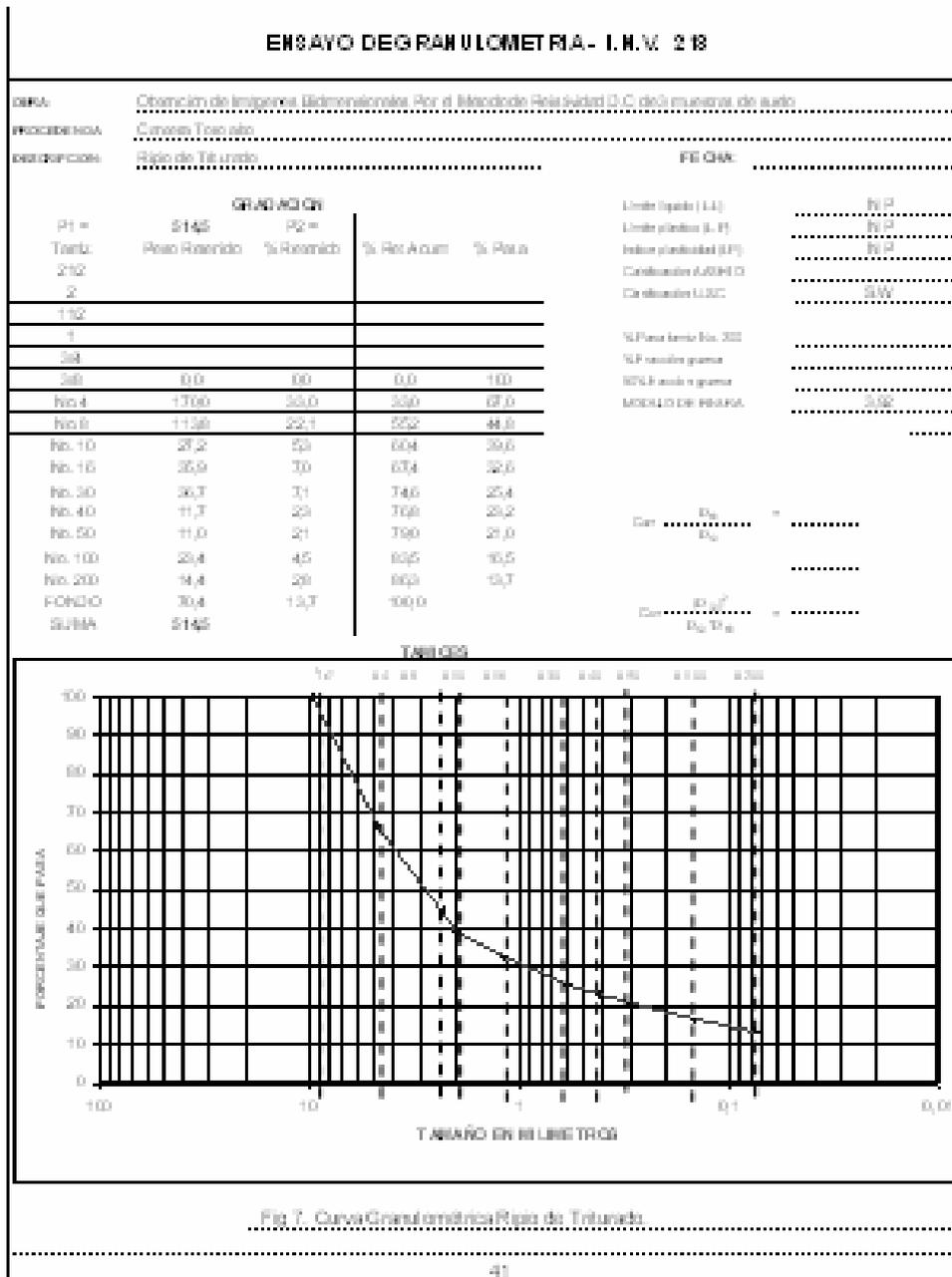


Figura 7. Curva granulométrica ripio de triturado.



## ✓ COEFICIENTES OBTENIDOS DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA

- **Diámetro efectivo ( $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ ):** El D se refiere al tamaño del grano, o diámetro aparente, de la partícula de suelo y el subíndice (10, 30, 60) denota el porcentaje de material más fino.

- **Coefficiente de uniformidad (CU):** Indica si el material es bien gradado o mal gradado, es decir informa sobre la variación del tamaño de los granos.

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (10)$$

- **Coefficiente de Curvatura (CC):** Indica una medida de la forma de la curva entre  $D_{10}$  y  $D_{60}$ .

$$CC = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (11)$$

Los datos obtenidos de los coeficientes de uniformidad y el de curvatura para cada material, fueron:

**Tabla 7. Coeficientes obtenidos de la curva granulométrica.**

Coeficientes	Arena Blanca	Granito
Coefficiente de Uniformidad	5.88	8.5
Coefficiente de Curvatura	1.24	1.65

En el Ripio debido a que más del 12% del material pasa a través del tamiz # 200, no se calculan los coeficientes de uniformidad y de curvatura (según normas ASTM – D421 – 58 y ASTM - D422 - 63).

Según resultados obtenidos de los Coeficientes de Uniformidad y de Curvatura; se puede decir que el granito tiene una mejor gradación que la arena blanca; ya que según figura 6, se observa que el  $D_{10}$  y  $D_{60}$  están más separados.

“Cuando los valores de CC son menores que 1, indican que falta una serie de diámetros entre los tamaños correspondientes a  $D_{10}$  y  $D_{60}$ . Valores grandes de CU, indican que los diámetros  $D_{10}$  y  $D_{60}$ , difieren en tamaño apreciablemente”<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> CORAL, Hugo. Geotecnia I. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto: 1999. p. 81 - 83.

**3.1.3 Peso unitario de los agregados finos (Norma ICONTEC 92).** La masa unitaria se define como la relación que existe entre el peso de una muestra de agregado compuesta de varias partículas y el volumen que ocupan esas partículas agrupadas dentro de un recipiente de volumen conocido. De tal manera que al colocar el agregado dentro del recipiente se tendrá un acomodamiento de las partículas en donde el menor número de espacios entre partícula y partícula depende del tamaño, la granulometría, la forma y la textura del agregado.

**Peso unitario compactado (Método de Apisonado).** Es el grado de acomodamiento de las partículas del agregado cuando se ha sometido a vibración, ya que esta mejora el acomodamiento y aumenta la masa unitaria.

**Procedimiento:** Se colocó el agregado en el recipiente cilíndrico, en tres capas aproximadamente de igual volumen hasta colmarlo. Se emparejó cada una de las capas con la mano y se apisonó con 25 golpes distribuidos uniformemente, utilizando el extremo semiesférico de la varilla.

Una vez colmado el recipiente se enrasó la superficie con la varilla usándola como regla y se determinó la masa del recipiente.

**Peso unitario suelto.** La masa unitaria suelta de un material es aquella que se encuentra en estado normal de reposo; ya que el volumen que ocupa es mayor, por lo tanto su masa unitaria es menor.

**Procedimiento:** Se colocó el material dentro de un recipiente cilíndrico utilizando una bandeja pequeña, de tal forma que el agregado se descargue a una altura no mayor de 50 mm, por encima del borde hasta colmarlo.

Luego se enrasó la superficie del agregado con una regla y se determinó la masa del recipiente lleno en kg.

Masa Unitaria =  $P_s / V_r$  ; donde:

$P_s$ : Peso suelto del suelo en gr

$V_r$  = Volumen del recipiente en  $cm^3$ .

Los datos que se obtuvieron para cada tipo de suelo, fueron:

**Tabla 8. Datos para la determinación del peso unitario compactado para cada tipo de suelo.**

No. Ensayos	Compactado (gr)		
	Peso - Arena Blanca	Peso - Arrocillo	Peso - Ripio
1	2286	3360	3364
2	2286	3384	3366
3	2308	3380	3362
4	2332	3382	3367
5	2286	3356	3374
6	2344	3354	3372
<b>Promedio</b>	2307	3369,33	3367,50

**Tabla 9. Datos para la determinación del peso unitario suelto para cada tipo de suelo**

No. Ensayos	Suelto (gr)		
	Peso - Arena Blanca	Peso - Arrocillo	Peso - Ripio
1	2259	3320	3280
2	2254	3366	3200
3	2248	3346	3326
4	2253	3356	3254
5	2257	3364	3230
6	2249	3352	3206
<b>Promedio</b>	2253,33	3350,66	3249.33

**Tabla 10. Resultados de los pesos unitario suelto y compactado para cada tipo de suelo.**

Resultados	Peso Unitario (gr/cm <sup>3</sup> )		
	Arena Blanca	Granito	Ripio
Compactado	1,08	1,57	1.62
Suelto	1,05	1,57	1.62

### 3.1.4 Peso específico y absorción de agregados finos (NORMA ICONTEC 237):

**Peso Específico.** Es el peso de la unidad de volumen del agregado.

$$Pe = \frac{G}{(v - Ga - (500 - G))} \quad ; \text{ Donde:} \quad (12)$$

G = Peso de la muestra seca en gramos.

Ga = Peso o volumen de agua añadida a la muestra para completar el volumen de la probeta, expresada en gr o en cm según el caso.

v = Volumen de la probeta en cm<sup>3</sup>.

**Peso Específico Aparente Seco.** Es la relación entre el peso en el aire del agregado seco y el volumen de las partículas incluyendo sus poros naturales. Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Pm = \frac{G}{v - Ga} \quad (13)$$

**Peso Específico Aparente Saturado.** Es la relación entre el peso en el aire del agregado saturado y seco superficialmente y el volumen de las partículas incluyendo sus poros naturales.

Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Ps = \frac{500}{v - Ga} \quad (14)$$

#### **Absorción:**

Es la cantidad de agua absorbida por el agregado después de ser sumergido 24 horas en ésta, expresada como un porcentaje del peso seco.

Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{500 - G}{G} * 100 \quad (15)$$

**Procedimiento:** Se sumergió totalmente la muestra en un recipiente con agua durante 24 horas; luego se extendió la muestra sobre una superficie no absorbente, y se dejó al aire libre por unos días hasta que los agregados finos estén sueltos.

Se colocó la muestra en un molde cónico, dejando caer libremente el pisón sobre la superficie de ésta desde una altura aproximadamente de 1cm durante 25 veces, alisamos la superficie de la muestra y se levanta el molde verticalmente sin girarlo. Si existe humedad libre el cono conserva su forma y se repite el ensayo a intervalos frecuentes hasta que el cono formado por la muestra se derrumba parcialmente al separar el molde. Lo cual indica que se ha alcanzado una condición de saturado con superficie seca.

Luego se colocó 500 gramos de la muestra preparada en una probeta y se llenó con agua a 20°C hasta cerca de 1000 cm<sup>3</sup>, luego se hizo girar la probeta hasta eliminar las burbujas de aire. Para que el material se sedimente se lo dejó por espacio de 15 minutos en reposo; luego se pesó el conjunto y se determinó por diferencia el peso del agua añadida.

Se retiró la muestra de la probeta y se desecó a 100 ó 110 °C hasta que su peso sea constante, se enfría y se pesa.

Los datos y resultados para cada tipo de suelo se detallan a continuación:

**Tabla 11. Datos para la determinación del peso específico y absorción de la arena blanca y el granito (arrocillo).**

Datos	Arena Blanca		Granito (Arrocillo)	
	No. de Ensayos			
	1	2	1	2
Peso recipiente (gr)	76.4	62.2	80	78.7
Peso muestra + recip. (gr)	576.4	562.2	578.7	580
Volumen Probeta (cm <sup>3</sup> )	1000	1000	1000	1000
Peso probeta (gr)	725.1	701.4	712.9	693.5
Peso probeta + muestra (gr)	1924.7	1905.5	1916.4	1921.3
Volumen del agua añadida (cm <sup>3</sup> )	746.5	732.5	703.5	728.3
Peso muestra seca + recip. (gr)	432.1	408.6	530.34	528.67

### 3.1.5 Determinación de la densidad y absorción de agregados gruesos (ripió de triturado) - Norma Icontec 176:

**Densidad nominal.** Se define como la masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado con exclusión de sus poros saturables y no saturables.

Se determina mediante la siguiente expresión:

$$D_n = M / (M_s - M_i)$$

**Densidad aparente.** Se define como la masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, incluyendo los poros saturables y no saturables.

$$D_a = M / (M_s - M_i)$$

Donde:

M : Masa en gramos de la muestra seca.

M<sub>s</sub>: Masa en gramos de la muestra saturada interiormente y seca superficialmente.

M<sub>i</sub> : Masa en gramos de la muestra sumergida en agua.

**Procedimiento:** Se lava cuidadosamente los componentes de la muestra para eliminar el polvo o material adherido a sus superficies y se sumerge en agua durante 24 horas. Luego se saca la muestra del recipiente de inmersión y se la envuelve en una toalla hasta eliminar las películas visibles de agua en las superficies de los componentes de la muestra.

Se coloca la muestra en estado de saturación interna y seca superficialmente en la canasta y determinamos su peso sumergido en agua, a una temperatura de 20 a 25 °C. Luego se coloca la muestra en el horno a una temperatura entre 100 y 110 °C; dejamos enfriar hasta la temperatura del medio ambiente entre 20 y 25 °C.

Los datos obtenidos para la determinación de la densidad y absorción para el caso del ripio de triturado fueron:

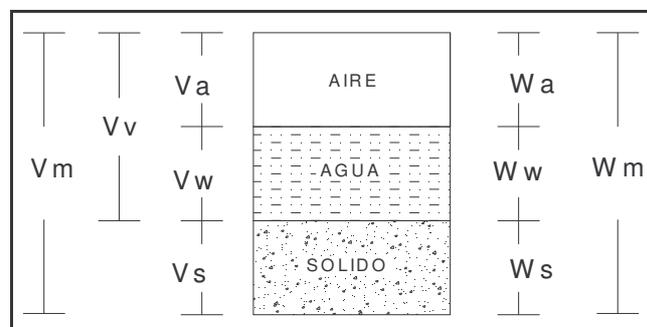
**Tabla 12. Datos para la determinación de la densidad y absorción del ripio de triturado.**

Datos	Ripio de Triturado
Peso muestra saturada interiormente y seca superficialmente (gr)	342.70
Peso recipiente No.1 (gr)	78.5
Peso canasta sumergida (gr)	533.30
Peso muestra No. 1 sumergida (gr)	244.20
Peso muestra No. 1 seca (gr)	412.90

**Fases del Suelo:** El suelo es la capa más superficial de la litosfera o corteza externa que es la parte sólida de la Tierra. Está formado por una mezcla variable de minerales, materia orgánica, soluciones acuosas y aire.

La *fase sólida*, puede ser mineral u orgánica, es la predominante y está rodeada de partículas acuosas que forman la *fase líquida*. La *fase gaseosa* ocupa el espacio de poros entre las partículas de suelo que no tienen agua, (fig 8). Las tres fases están interrelacionadas entre sí y con las variables de temperatura, presión y luz.

**Figura 8. Fases del suelo**



### 3.1.6 Relación de vacíos (e) y porosidad (n):

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{Y} \quad n = \frac{V_v}{V_m} * 100 \quad \text{Donde:} \quad (16)$$

$V_v$  : Volumen Vacíos  
 $V_s$  : Volumen Sólidos  
 $V_m$  : Volumen Total

**Procedimiento:** Se tomó una muestra de 600 grs de cada tipo de suelo; colocándola en el horno a una temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas; una vez seca la muestra se hizo la diferencia entre el peso de la muestra antes y después de llevarla al horno, obteniendo de esta manera el peso del sólido. Luego se calculó el volumen de los sólidos el cual corresponde a la siguiente expresión:

$$V_s = \frac{W_s}{G_s * \gamma_w} \quad \text{Donde:} \quad (17)$$

$W_s$  : Peso seco de los sólidos (grs)

$G_s$  : Gravedad específica de los sólidos del suelo

$\gamma_w$  : Peso unitario del agua, en condiciones usuales de campo y de laboratorio, es aproximadamente igual a  $1.0 \text{ (grs/cm}^3\text{)}$

Luego definimos,  $V_v = V_w + V_a$ ;  $V_w = W_w$  Donde:

$V_w$  : Volumen del agua

$V_a$  : Volumen del aire presente en la masa de suelo

Los resultados obtenidos de las relaciones volumétricas y gravimétricas fueron:

**Tabla 13. Resultados relaciones volumétricas y gravimétricas de los 3 tipos de suelos.**

<b>Relaciones Volumétricas y Gravimétricas</b>	<b>A. Blanca</b>	<b>Granito</b>	<b>Ripio</b>
Peso Específico (gr/cm <sup>3</sup> )	1.35	0.85	2.08
Peso Unitario Seco (gr/cm <sup>3</sup> )	1.59	1.34	4.55
P. unit. Satur. y de superf. Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.76	1.92	3.71
Absorción (%)	42.45	11.07	2.48
Porosidad (n); %	25.01	37.95	4.49
Relación de Vacíos (e)	0.33	0.61	0.70
Humedad (W); %	13.23	2.23	1.77
Vol. total de la muestra del suelo (Vm); cm <sup>3</sup>	386.15	620.12	201.4
Vol. de la fase Gaseosa (Va); cm <sup>3</sup>	61.99	229.35	81.53
Vol. de la fase Líquida (Vw); cm <sup>3</sup>	34.60	5.99	2.05
Vol de la fase Sólida (Vs); cm <sup>3</sup>	289.56	384.78	117.82
Peso total de la muestra de suelo (Wm); gr	600	605,80	514.5
Peso de la fase Sólida (Ws); gr	539,1	594,30	507.2

### 3.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD APARENTE POR EL MÉTODO DE RESISTIVIDAD D.C. PARA CADA TIPO DE SUELO, VARIANDO LOS PARÁMETROS DE GRANULOMETRÍA Y HUMEDAD.

El trabajo se realizó en el Laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño. Se construyó un tanque rectangular en vidrio y el marco en madera; donde se colocaron dos tipos de suelo; para este caso se tomó la arena blanca y el granito (arrocillo).

El dimensionamiento del tanque se hizo con base a una profundidad de investigación, la cual se tomó de 40 cm. La longitud se obtuvo mediante la siguiente relación del arreglo de wenner:

$$\frac{Z_e}{L} = 0.173 \quad \text{Donde:} \quad (18)$$

$Z_e$  : Profundidad

$L$  : Longitud

$$L = \frac{Z_e}{0.173} = \frac{40\text{cm}}{0.173} = 231.21\text{cm} \approx 240\text{cm}$$

Para una longitud de 240 cm, se colocaron en la superficie 24 electrodos espaciados cada 10 cms.

Se implementó el método de resistividad D.C, sobre cada una de las muestras de suelo, mediante el arreglo Wenner y se evaluaron sus resultados en el software IPIWIN 32 para obtener la gráfica bidimensional respectiva.

#### 3.2.1 Materiales y equipo:

**Tanque:** De forma rectangular en vidrio de 4 mm de espesor y marco en madera; con las siguientes dimensiones; ancho: 0.25 m, alto: 0.70 m y largo: 2.40 m; donde se depositaron los diferentes tipos de suelo, (foto1).

**Foto 1. Tanque donde se depositaron los tipos de suelos**



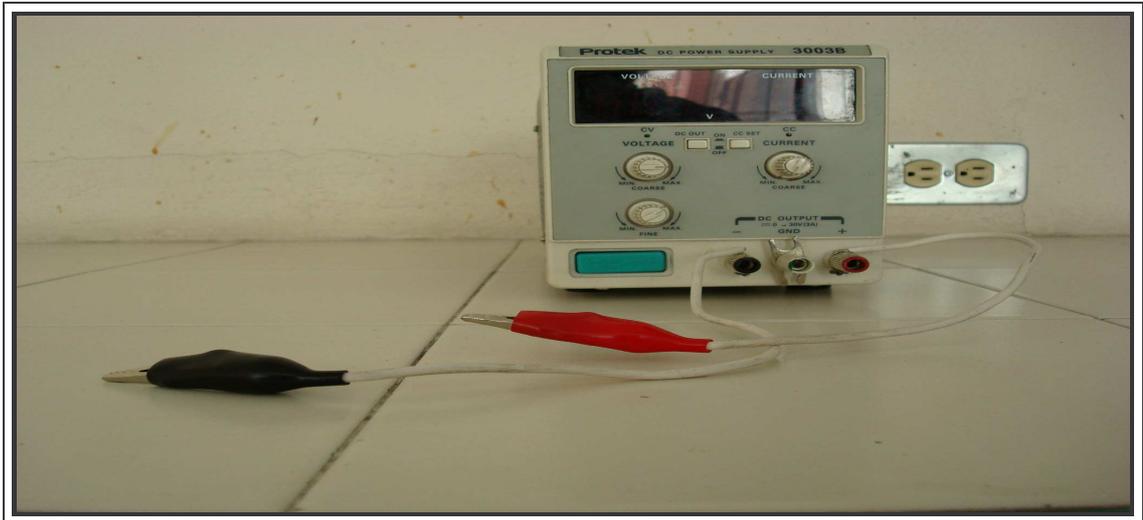
**Electrodos:** Los electrodos son de acero inoxidable de 3/8" y de 30 cm. de alto, (foto2); se los utilizó como medio para inducir corriente eléctrica a cada tipo de suelo a una separación y profundidades predeterminadas.

**Foto 2. Electrodo espaciados cada 10 cm**



**Fuente de Poder:** Se utilizó una fuente de 30 voltios; es el elemento activo que proporciona una corriente eléctrica y genera una diferencia de potencia, (foto 3).

**Foto 3. Fuente poder**



**Multímetros digitales:** Registra una determinada corriente y un voltaje, generada al pasar la corriente a través del subsuelo, (foto 4).

**Foto 4. Multímetros digitales**



**Tipos de suelos utilizados:** Arena Blanca, Granito y Ripio de Triturado.

Inicialmente, para la escogencia del material se realizaron los respectivos ensayos de laboratorio a la arena blanca, (foto 5); granito (arrocillo), (foto 6); ripio de triturado, granito # 1 y arena negra y en base a su granulometría y que cumplieran con la característica de ser bien gradados se escogieron los tres primeros.

**Foto 5. Arena blanca**



**Foto 6. Granito (Arrocillo)**



### 3.2.2 Cálculo de volumen y peso requerido de cada tipo de suelo:

#### -Volumen del Tanque

$$V_{\text{tan}} = 2.40 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.70 \text{ m}$$

$$V_{\text{tan}} = 0.42 \text{ m}^3 \approx 420000 \text{ cm}^3$$

En el diseño experimental se calculó el volumen para cada material, teniendo en cuenta que la altura requerida debe ser el 20% del largo del tanque.

$$\text{Altura requerida} = 2.40 \text{ m} \times 0.20 = 0.48 \text{ m} \approx 0.50 \text{ m}$$

**Tabla 14. Volumen y peso requerido para cada tipo de suelo**

Datos	A. Blanca	Granito	Ripio
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	1,05	1,52	1.57
Volumen del material (m <sup>3</sup> )	0,30	0,30	0.30
Peso del material (kg)	315	417	479.5

**Variación de parámetros de granulometría:** En la clasificación de los suelos para usos de ingeniería se acostumbra utilizar análisis granulométricos, éste es un ensayo para determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa total de suelo. Obviamente, para obtener un resultado significativo, la muestra de masa de suelo debe ser representativa, la cual se debe tomar por cuarteo sucesivos.

Para el proyecto se utilizó el método de Tamizado Mecánico basado en las normas de Ensayos de INVIAS, concretamente la I.N.V. 213. Con la cual se determinó las gradaciones a 3 tipos de agregados (arena blanca, granito y ripio de triturado). Estos agregados también arrojaron distintos pesos específicos, porcentajes de absorción y diferentes relaciones de vacíos; demostrando así la variación no solo granulométrica del material sino su composición y comportamiento.

Uno de los parámetros obtenidos de las curvas granulométricas de los materiales analizados, es el MODULO DE FINURA. Como su nombre lo indica, es una medida de la finura de un material. Las arenas según el módulo de finura se clasifican así:

Arenas Finas	MF	entre	0.5	y	1.5
Arenas Medias	MF	entre	1.5	y	2.5
Arenas Gruesas	MF	entre	2.5	y	3.5

Módulos de finura mayores de 3.5 corresponden a arenas mezcladas con gravas; a mayor proporción de grava mayor Módulo de Finura. Este parámetro sirve para controlar la uniformidad, en cuanto a la granulometría de un agregado que se suministra periódicamente a una determinada obra.

EL MODULO DE FINURA, se lo halla con la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en la serie de tamices, cuyas aberturas son la mitad de la anterior, iniciando con el tamiz de 3" , hasta el tamiz No.100. La serie de tamices es la siguiente: 3" , 1" , 1/2" , 3/4" , 3/8" , No.4 , No.8 , No.16 , No.30 , No.50 , No.100.

Observando el módulo de finura que presentaron los 3 tipos de suelos, podemos clasificarlos de la siguiente manera:

- a. La Arena Blanca corresponde a una arena media, (MF= 1.98).
- b. El granito a una arena gruesa, (MF=3.15).
- c. El Ripio de Triturado a una arena mezclada con grava, (MF=3.92).

**Variación de parámetros de humedad:** Mediante una prueba en el laboratorio, se logró establecer la cantidad de agua requerida para los diferentes porcentajes de humedades; que consistió en tomar una muestra representativa de 300 gr, (foto 7); de cada tipo de suelo y se le agregó 10 ml de agua, revolviéndolo y posteriormente secándolo en la estufa, (foto 8).

Se calculó la humedad y se hizo una relación con base a todo el material que se iba a utilizar. Para la arena blanca los porcentajes de humedad a utilizar fueron de 11%, 34% y 42%; para el granito 5% y 11%; para el ripio se trabajó con la máxima absorción de 2.48% ya que con poca agua se saturaba más fácilmente. Siendo los intervalos de porcentaje de humedad en la arena blanca mayores que las del granito y el ripio; por su mayor grado de absorción.

**Foto 7. Muestra representativa de 300 gr.**



**Foto 8. Muestra representativa secada en la estufa**



Una vez obtenida la cantidad de agua para los distintos porcentajes de humedad de cada tipo de suelo; se agregó uniformemente a una altura de 25 cm, utilizando para este fin una regadera, (foto 9).

**Foto 9. Distribución uniforme del agua para cada material.**



Luego se revolvió el material y se lo vació al tanque, (foto 10); utilizando una bandeja de aluminio mediana, a una altura de 20 cm. y sin compactarlo.

**Foto 10. Vaciado del material con bandeja al tanque.**



Después se colocaron los 24 electrodos a una separación de 10 cm. y clavados a una profundidad de 10 cm, (foto 11).

**Foto 11. Colocación de electrodos cada 10 cm**



Las humedades se fueron variando dependiendo del grado de absorción de cada tipo de suelo. Para la arena blanca se varió la humedad cada 10% ya que tenía el mayor grado de absorción, el granito (arrocillo) se varió cada 5% y para el ripio se trabajó con su absorción máxima de 2.48%.

En la siguiente tabla, se resumen los datos utilizados en la variación de porcentajes de humedad para cada tipo de suelo.

**Tabla 15. Datos para la variación de humedad de cada tipo de suelo.**

Datos	Arena Blanca	Granito	Ripio
Peso recipiente	96.70	96.70	90.7
P. muestra + recip.	300	300	300
P. muestra + recip.+ 10ml de agua	310	309,10	310
P.muestra seca + recip. (horno)	295.53	299,10	295.6

Los resultados obtenidos del agua requerida para la respectiva variación de porcentajes de humedad de cada tipo de suelo, se resumen a continuación:

- % absorción arena blanca = 42.45%
- % absorción arrocillo – granito = 11.07%
- % absorción ripio de triturado = 2.48%

**Tabla 16. Agua agregada para llegar a la humedad respectiva (Arena blanca).**

<b>Agua agregada (lt)</b>	<b>Humedad (%)</b>
14.43	11.07
28.86	23.89
43.49	34.14
57.92	41.90

**Tabla 17. Agua agregada para llegar a la humedad respectiva (Granito - arrocillo)**

<b>Agua agregada (lt)</b>	<b>Humedad (%)</b>
14.07	5
28.14	11.22

**Tabla 18. Agua agregada para llegar a la humedad respectiva (ripio de triturado).**

<b>Agua agregada (lt)</b>	<b>Humedad (%)</b>
5.64	2.15

**Verificación de Humedades.** La humedad es un parámetro muy importante ya que define el contenido de agua presente en una masa de suelo; un material es más absorbente cuando presenta mayor porosidad y mayor relación de vacíos.

Para la verificación de humedades se probó con uno de los materiales, en este caso seleccionamos el granito ya que posee una absorción intermedia.

Inicialmente se tomó un volumen de 0.30 m<sup>3</sup> de granito y se le adicionó la cantidad de agua para llegar al primer porcentaje de humedad que era del 5%. Luego se revolvió el material y posteriormente se lo depositó en el tanque. Se tomaron varias muestras representativas cada 60 cm a lo largo del tanque, con el fin de verificar si la humedad era homogénea en el material. Los resultados obtenidos fueron:

**Tabla 19. Datos para la verificación de las humedades tomando cuatro muestras representativas para el granito.**

<b>Datos</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 4</b>
Peso del recipiente (gr)	92	84	81	70
Peso de la muestra + recip.(gr)	392	384	381	330
Peso de la muestra seca (gr)	378	370.2	369.4	318

**Tabla 20. Resultados de la verificación de humedades para el granito**

<b>Resultado</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 4</b>
<b>Humedad ( % )</b>	4.90	4.80	4.74	4.88

Según los resultados obtenidos de humedades, se puede observar una mínima variación de los datos de las diferentes muestras tomadas, puesto que se está trabajando con un material heterogéneo que varía en forma, textura y composición; siendo estos resultados son muy cercanos al 5% deseado para el ensayo.

### **3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES**

Se procedió a tomar medidas experimentales relacionadas con la resistividad del material, variando los parámetros de humedad; sin embargo para el caso del ripio de triturado la absorción era mínima (2.48%) y la humedad se alojaba en el fondo del tanque, lo cual implicó una conductividad alta, presentándose un corto circuito en la fuente.

Por su composición mineralógica, el ripio posee poca porosidad y los vacíos son mayores, lo cual hace que sea más denso y por consiguiente se sature fácilmente; por esta razón y para este material no se pudo variar las humedades impidiendo continuar con las medidas de resistividades.

De esta manera se descarta el ripio de triturado, del trabajo de investigación; debido a que no sirve para el proyecto en mención mas sin embargo puede ser provechoso como un buen agregado en obras civiles.

Una vez determinado el material para el estudio (arena blanca y granito), se utilizó una fuente y dos multímetros, con el fin de inducir corriente eléctrica continua al material, (fig 13) y obtener los valores de corriente y voltaje, (ver anexos) ; y posteriormente los valores de la resistividad aparente (ver anexos).

El procedimiento de las mediciones se hizo inicialmente y de una forma continua, cada cuatro electrodos hasta cubrir la totalidad de los mismos, (fig 12). Posteriormente, se fueron intercalando en forma sucesiva.

**Foto 12. Electrodo espaciados cada 10 cm**



**Foto 13. Inducción de corriente eléctrica al material.**



Esta parte de la metodología se realiza en tiempo real y en forma totalmente experimental. Los valores de resistividad aparente se introducen en un momento posterior a un algoritmo de un computador utilizando el software IPIWIN 32, el cual fue facilitado por el CENTRO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES ubicado en la UNIVERSIDAD DE NARIÑO.

El software toma puntos de resistividades aparentes y empieza hacer unas combinaciones y mediante iteraciones, se obtiene la imagen bidimensional correspondiente a cada tipo de suelo. El software se describe a continuación.

### - TEORÍA DEL PROBLEMA DE INVERSION EN EL SOFTWARE UTILIZADO

La rutina de inversión usada según el programa está basada en el método de suavizado por mínimos cuadrados (deGroot-Hedlin y Constable 1990, Sasaki 1992). El método de suavizado por mínimos cuadrados está basado en la ecuación siguiente:

$$(J^T J + uF) d = J^T g$$

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad ; \text{ Donde:}$$

$f_x$  = Filtro horizontal

$f_z$  = Filtro vertical

$J$  = Matriz de derivadas parciales

$u$  = Factor de amortiguamiento

$d$  = Vector de perturbación

$g$  = Vector de discrepancia

Una ventaja de este método consiste en que el factor de amortiguamiento y filtros pueden ser ajustados para satisfacer los tipos diferentes de datos. El programa se apoya una nueva puesta en práctica del método de suavizado por mínimos cuadrados basado en una técnica de optimización de cuasi Newton (Loke y Barker 1996a).

Esta técnica es más de 10 veces más rápida que el método de suavizado por mínimos cuadrados convencional para datos grandes y requiere menos memoria. También se puede usar el método de Gauss-Newton convencional en este programa. Es mucho lento que el método de cuasi Newton, pero en áreas con los contrastes de resistividad grandes de mayor que 10:1, esto da ligeramente mejores resultados. Una tercera opción en este programa es que se puede usar el método de Gauss-Newton para las 2 o 3 primeras iteraciones, después de lo cual el método de cuasi Newton es usado. En muchos casos, esto proporciona el mejor compromiso (Loke y Dahlin 2002).

El modelo de 2-D usado según este programa divide la subsuperficie sobre un número de bloques rectangulares. El objetivo de este programa es de determinar la resistividad de los bloques rectangulares que producirán una pseudosección de resistividad evidente que está de acuerdo con las medidas reales. Para los arreglos de Wenner y Schlumberger, el grosor de la primera capa de bloques es puesto en 0.5 veces el espaciado de electrodo. Para otros arreglos, el grosor es puesto a aproximadamente 0.9, 0.3 y 0.6 veces el espaciado de los electrodos, respectivamente. El grosor de cada capa subsecuente más profunda, normalmente es aumentado en el 10 % (o el 25 %). Las profundidades de las capas también pueden ser cambiadas a mano por el usuario.

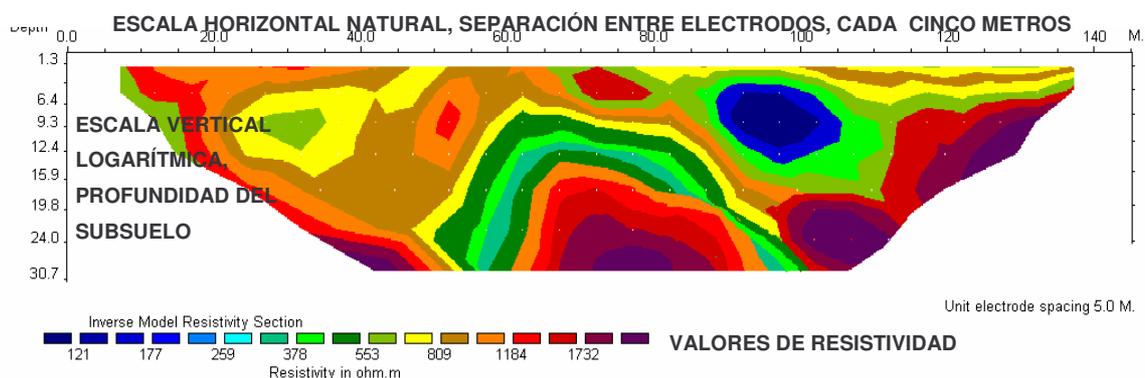
El método de optimización básicamente trata de reducir la diferencia entre los valores de la resistividad medida y calculada ajustando la resistividad de los bloques modelos. Una medida de esta diferencia está dada por la raíz cuadrática media (RMS) del error. Sin embargo el modelo con el error posible RMS más bajo a veces puede mostrar variaciones grandes y poco realistas en los valores de resistividad de los modelos y no siempre podría ser "el mejor" modelo de una perspectiva geológica. En general, el acercamiento más prudente es de escoger el modelo en la iteración después de lo cual el error RMS no se cambia considerablemente; lo cual ocurre entre las 3as y 5as iteraciones.

## 4. TOMOGRAFÍA GEOÉLECTRICA

### 4.1 TOMOGRAFÍAS GEOELÉCTRICAS

Las TOMOGRAFÍAS GEOELECTRICAS, son imágenes bidimensionales de resistividades y profundidades, producto de un problema de inversión numérica. Estas nos muestran una gama de colores, (fig 9); los cuales se vinculan con las resistividades aparentes de los materiales existentes en el subsuelo. En la parte superior horizontal tenemos una escala natural, la cual está dividida en segmentos, que corresponden a la distancia entre electrodos (0.10 metros). En la parte izquierda vertical existe una escala logarítmica, que corresponde a las profundidades del terreno, y en la parte inferior una serie de cuadros de diferentes colores, que representan las resistividades aparentes encontradas.

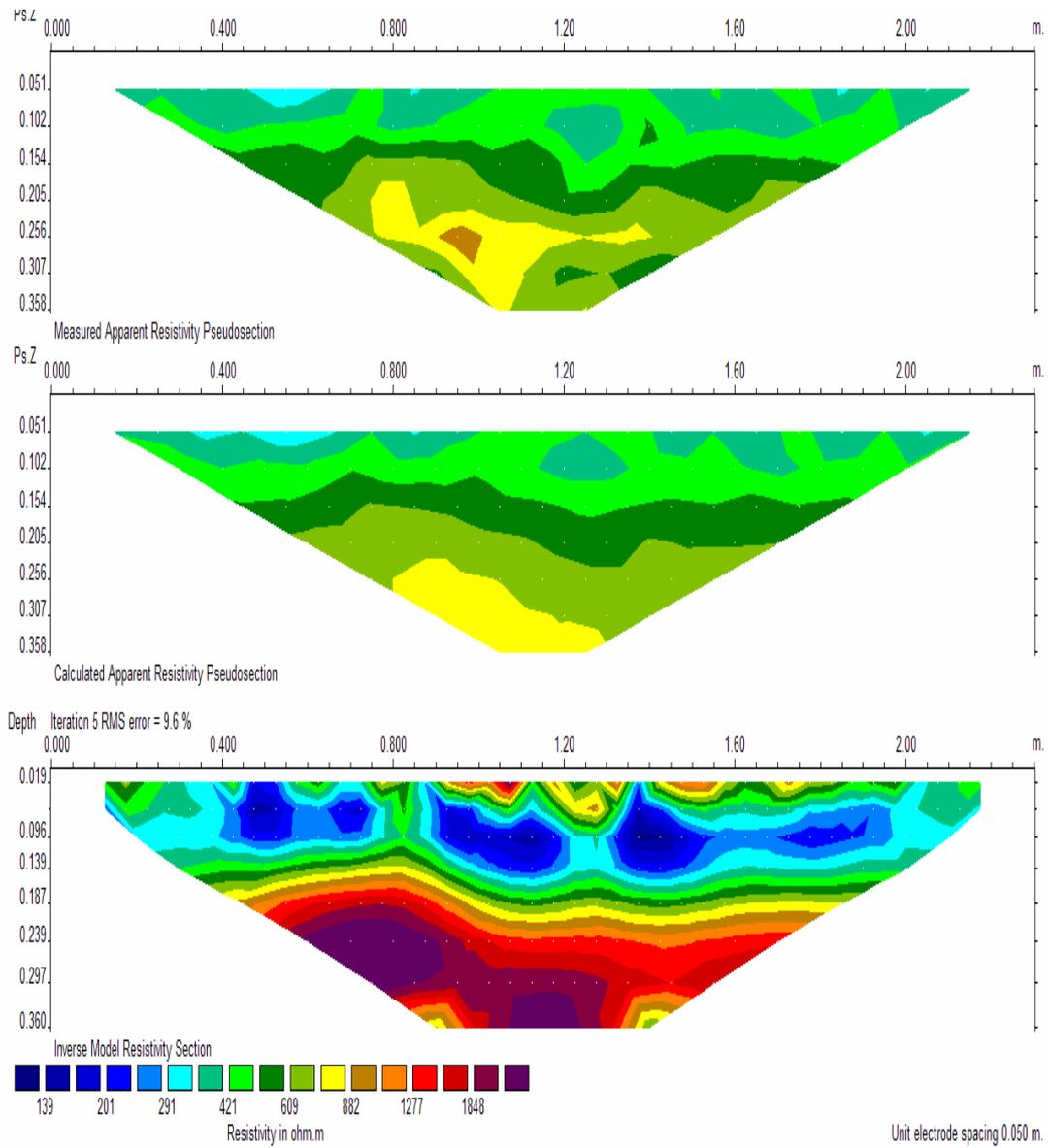
**Figura 9. Ejemplo de una tomografía geoelectrica**



**4.1.1 Arena blanca, humedad 11%.** El primer tipo de suelo explorado fue una arena blanca proveniente de la cantera Toroalto, ubicada al Noroccidente de la ciudad de Pasto; cuya granulometría fue encontrada y reportada en la figura 5. El componente más común de la arena, en tierra continental y en las costas no tropicales, es el sílice, generalmente en forma de cuarzo. Sin embargo, la composición varía de acuerdo a los recursos y condiciones locales de la roca. En algunos lugares hay arena que contiene hierro, feldespato o, incluso, yeso.

Según el tipo de roca de la que procede, la arena puede variar mucho en apariencia. Por ejemplo, la arena volcánica es de color negro mientras que otras suelen ser blancas. La arena es un conjunto de partículas de rocas disgregadas.

**Figura 10. Tomografía arena blanca, humedad 11%.**



En geología se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 mm.

Según resultados obtenidos en el laboratorio, y mediante el análisis granulométrico realizado para la Arena Blanca, se obtuvo que la mayor cantidad de material está en un rango de tamaño de partícula entre 0.149 mm y 0.59 mm, con una relación de vacíos de  $e = 0.33$ .

La tomografía geoelectrica de este tipo de suelo (Fig. 10), arroja una imagen con franjas de colores aproximadamente horizontales con valores de resistividades entre 201 y 1277 ohm-m, cuya humedad no está distribuida en forma homogénea, debido a la forma manual de distribuir el agua en el material para llegar al porcentaje de humedad respectiva.

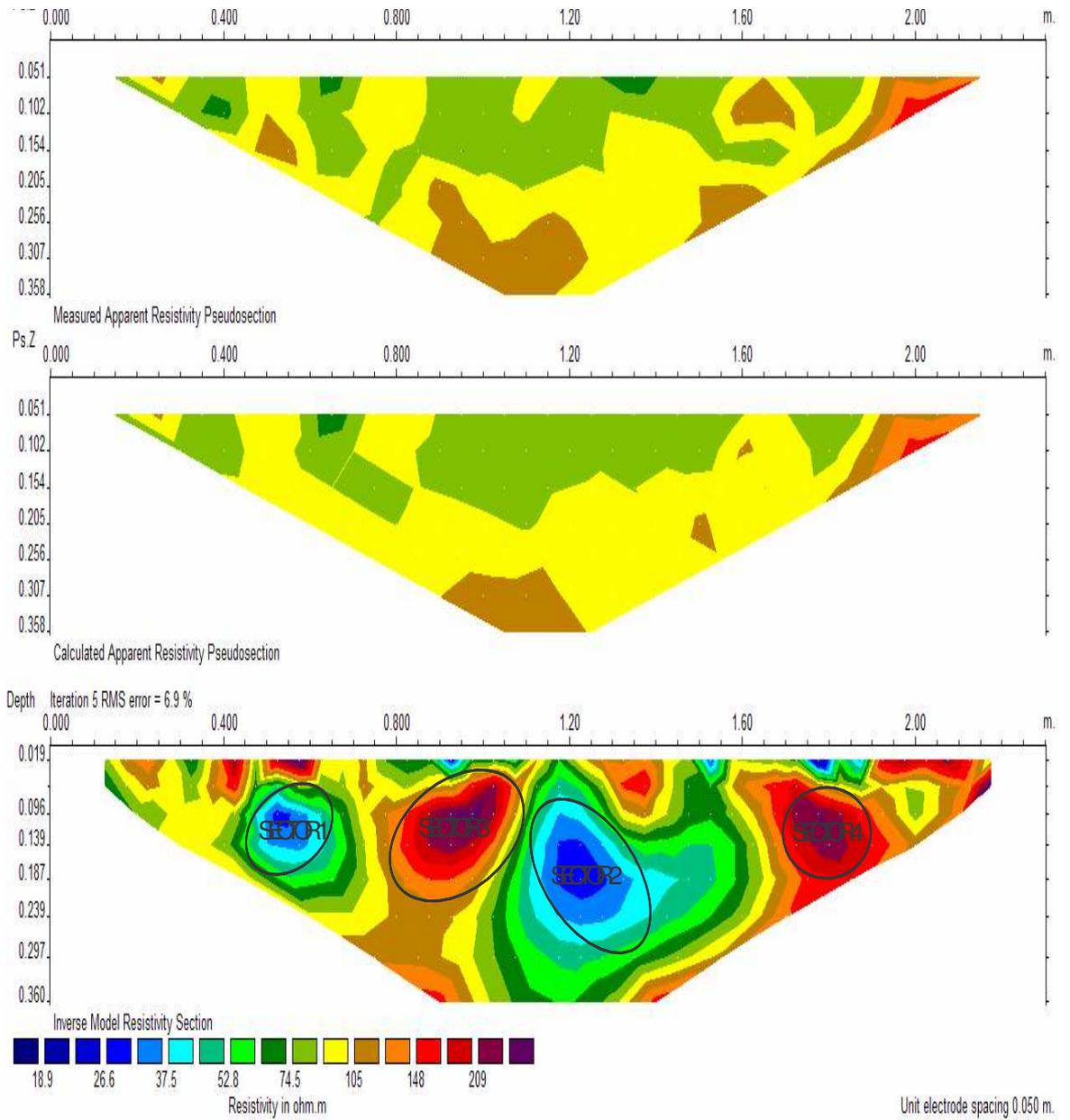
En la parte superior se observa una franja que se extiende en forma horizontal hasta una profundidad de aproximadamente 20 cm, cuya resistividad aparente oscila entre los 139 y 291 ohm-m; lo que significa una mayor concentración de la humedad en este sector que en el resto del material. La resistividad va aumentando paulatinamente desde los 20 cm de profundidad hasta los 36 cm, con valores de resistividad que van desde los 609 ohm-m hasta los 1848 ohm-m. Lo anterior es debido a que la humedad del suelo es cada vez menor en estos sectores.

De otro lado, es importante notar que el mayor valor de resistividad encontrado para este material es de 1848 ohm – m, que se encuentra dentro del rango de resistividades establecido para las arenas (Ver tabla 2).

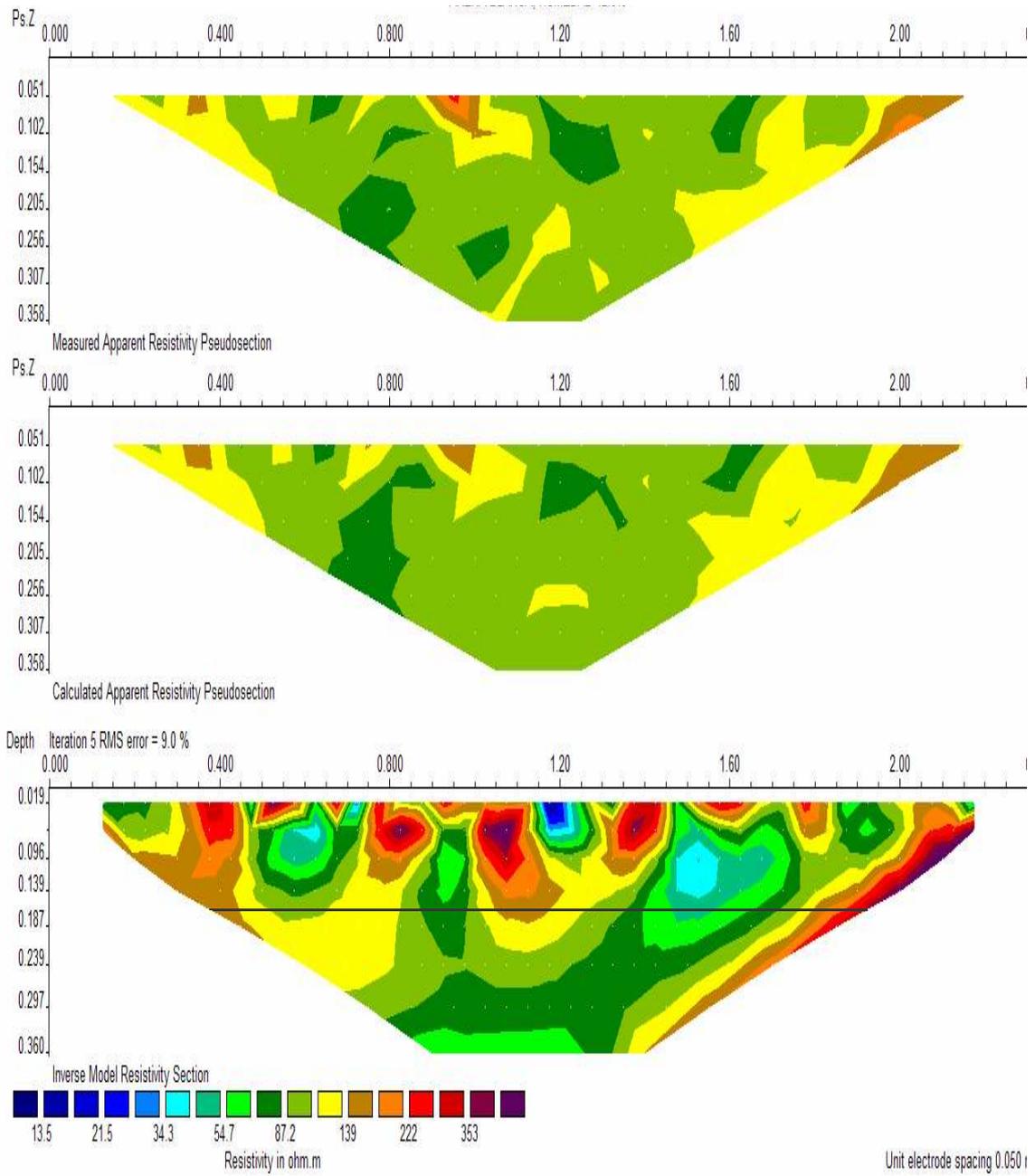
**4.1.2 Arena blanca, humedad 34%.** En esta tomografía (Fig.11) en los sectores 1 y 2, las resistividades aparentes oscilan entre 18.9 y 37.5 ohm-m; hasta aproximadamente los 23.9 cm de profundidad; lo cual indica una mayor concentración de humedad, debido a que no hubo una distribución uniforme del agua en el material y puede deberse a una mayor relación de vacíos con respecto al acomodamiento entre las partículas del material. Caso contrario ocurre en los sectores 3 y 4, donde se indican unos valores de resistividad entre 148 y 209 ohm-m, mayores que los anteriores que indican sectores mas secos. De igual manera, podemos ver que los rangos de las resistividades están dentro de los límites calculados para este material (Ver tabla 2). Se puede deducir, que cada vez que se aumenta el rango porcentual de humedad los valores de resistividad disminuyen.

**4.1.3 Arena blanca, humedad 42%.** En esta tomografía (Fig.12), se puede notar que las mayores valores de resistividad están en la parte superior hasta una profundidad aproximada de 18.7 cm; las resistividades van disminuyendo desde los 18.7 cm hasta los 36 cm de profundidad, con rangos de resistividad aparente entre 87.2 y 222 ohm-m.

**Figura 11. Tomografía arena blanca, humedad 34%.**



**Figura 12. Tomografía arena blanca, humedad 42%.**



Predominan sectores con resistividades homogéneas sobre todo desde el centro hasta los 36 cm de profundidad, observándose una mejor distribución de humedad.

En general, los valores de resistividad, correspondiente a la Arena Blanca están dentro de los niveles calculados, según tabla 2.

De igual forma, se observan diferentes valores de resistividad, debido a las variaciones de humedad.

Haciendo un análisis comparativo entre las figuras 10, 11 y 12, se puede deducir que existe una distribución no homogénea de las humedades, debido quizá al método manual utilizado para cambiarla. De otro lado, se puede afirmar que el método de Resistividad D.C. es un método sensitivo a este cambio de humedades, siendo este el primer factor para el incremento diferencial de la misma. Igualmente y es de primordial importancia el hecho de que el rango mayor dentro del cual varía la resistividad es mas o menos el mismo y por tanto éste rango puede ser usado para caracterizar el tipo de suelo que se esta usando.

**4.1.4 Granito (arrocillo) humedad 5%.** El Granito (Arrocillo), es el segundo tipo de suelo analizado en esta investigación, este tipo de suelo proveniente del depósito Mármoles Putumayo, ubicado en la ciudad de Pasto; el cual fue caracterizado y su granulometría está reportada en la figura 6. El granito es una roca plutónica constituida esencialmente por cuarzo, feldespato y normalmente también mica. Es la roca más abundante de la corteza continental. Se produce cuando el magma con alto contenido en sílice es creado bajo los continentes por fusión de las rocas que los forman, sometidas estas al calor del manto.

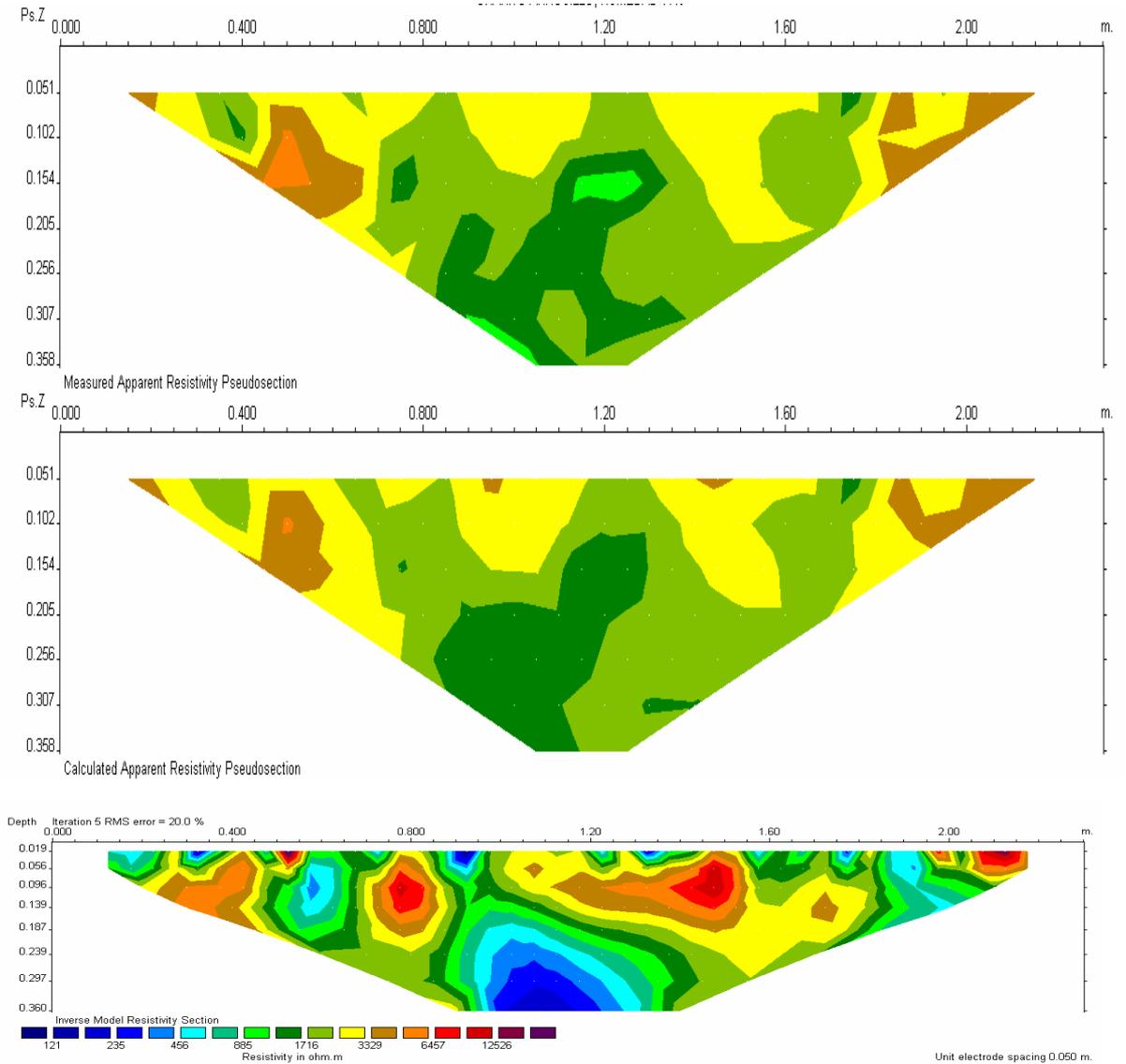
Como este magma contiene menos magnesio incluso que la corteza continental, tiene menor peso específico y por ello asciende a través de esta en unas estructuras características en forma de gota invertida que suelen solidificarse antes de llegar a la superficie. Para que la roca que se forme sea granito es necesario que se solidifique lentamente y a gran presión.

Mediante el análisis granulométrico se pudo observar, que la mayor parte del tamaño de las partículas, en el Granito (Arrocillo), está en un rango de 0.59 mm y 2.00 mm. Las partículas retenidas en cada tamiz son de muchos tamaños, siendo éstas menores al tamaño de la malla, a través de la cual pasó todo el material.

Por otro lado, la relación de vacíos es mayor en el granito ( $e = 0.61$ ) que en la arena; y se observa un descenso del agua por gravedad, concentrándose ésta en la parte inferior.

La tomografía (Fig.13), muestra que en la sección 1 se presenta mayor concentración de humedad y por consiguiente la resistividad en esta zona es menor, oscilando entre 121 – 456 ohm - m.

**Figura 13. Tomografía granito (arrocillo), humedad 5%.**



Las mayores resistividades están en las secciones 2, 3 y 4; las cuales oscilan entre 3329 y 12556 ohm - m y presenta una menor concentración de humedad y se puede deducir que desde los 23.9 cm hasta los 36 cm de profundidad aproximadamente, las resistividades disminuyen.

**4.1.5 Granito (arrocillo) humedad 11%.** En la mayor parte del perfil se muestra una proporción de resistividades (Fig.14), sobre todo en los extremos y se nota que hay una zona concéntrica con resistividades que están entre 146 y 721 ohm.m; a profundidades que van desde los 18.7 cm hasta los 36 cm; las cuales son menores en comparación con las resistividades en el resto del perfil; siendo mas homogéneas y oscilan entre 2088 y 6050 ohm.m.

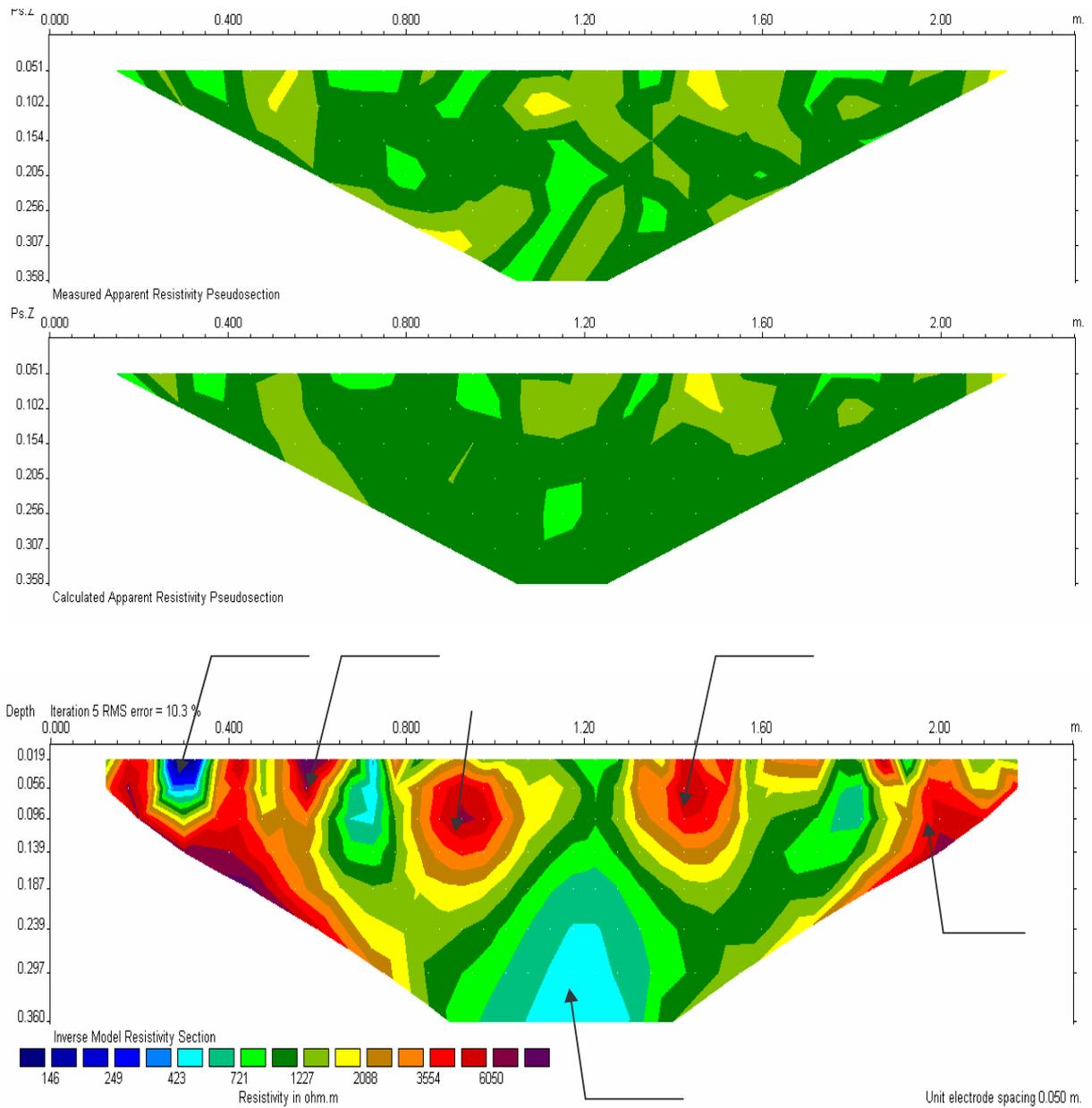
Correlacionando las dos tomografías del Granito (Arrocillo), se observa que en esta última hubo una mejor distribución de humedad a lo largo del perfil. En las tomografías de la Arena Blanca y Granito (arrocillo), se observa que el margen de variación de resistividad depende principalmente de las características que tiene cada suelo.

Realizando un análisis entre los dos materiales, podemos deducir que la Arena Blanca por tener menor espacio entre partículas; posee un mejor acomodamiento de las partículas; lo cual contribuye a una mejor distribución y absorción de humedad. La tomografía para este suelo muestra una distribución más homogénea de las resistividades.

Para el Granito se observa, que el agua tiende a descender mas rápidamente, originándose depósitos de agua y por lo tanto la distribución de las resistividades es menos homogénea.

Como una conclusión importante acerca de las medidas de resistividad D.C. podemos decir que estas dependen del parámetro de humedad y resulta ser un instrumento muy sensible a estos cambios. De hecho este factor fue determinante en la escogencia de los valores de humedad para cada suelo, puesto que a mayores valores de humedad, los suelos escogidos en el estudio se saturaban completamente y no permitían obtener lecturas en los instrumentos de medida.

**Figura 14. Tomografía granito (arrocillo), humedad 11%.**



#### 4.1.6 Superposición de suelos:



Antes de realizar un análisis de las tomografías es necesario precisar que en estas superposiciones se encuentran los dos tipos de suelo; el Granito (Arrocillo), y la Arena Blanca con humedades del 5% y 20% respectivamente.

Inicialmente se tomó un volumen de  $0.15 \text{ m}^3$  de cada material con sus respectivas humedades, luego se depositó al tanque 25 cm de Granito en la parte inferior y posteriormente 25 cm de Arena Blanca en la parte superior. Una vez depositado el material, se ubicaron los electrodos y se hicieron lecturas de corriente y voltaje; para obtener así, las respectivas tomografías con sus valores de resistividad.

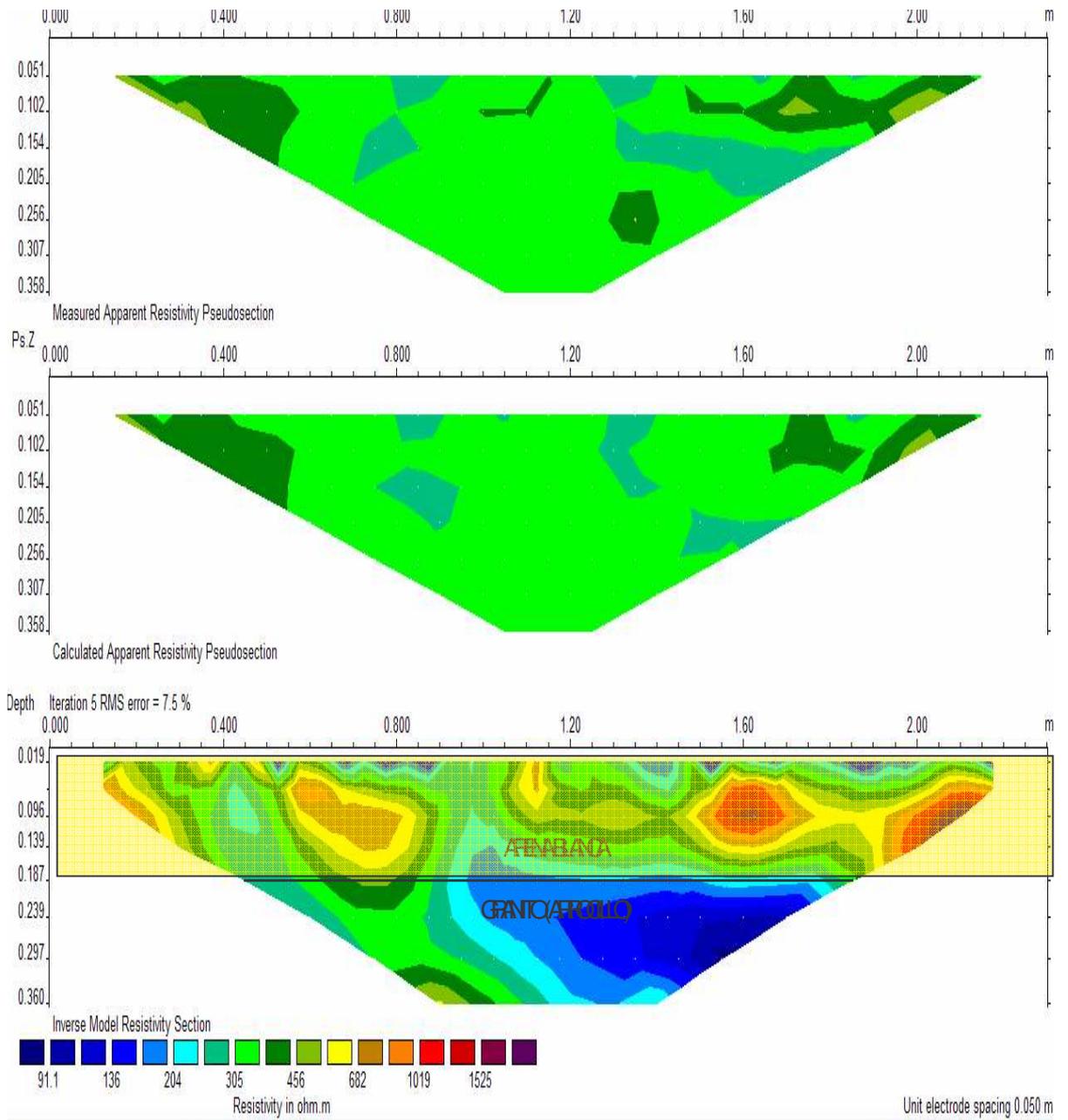
En esta tomografía (Fig. 15), se puede notar una separación entre los dos tipos de suelos; donde las mayores resistividades se concentran en la Arena blanca, que van desde 456 a 1525 ohm-m, hasta una profundidad de 18.7cm.

Por otro lado en esta superposición, las resistividades mas bajas las posee el Granito, las cuales están entre 136 y 456 ohm-m; porque la humedad de la arena blanca afectó al Granito.

En general se observa que no hubo una distribución homogénea de las resistividades, debido a la diferencia en la relación de vacíos de cada material; siendo éste menor en la arena blanca que en el Granito. Esto se convierte en un factor importante porque al haber un mejor acomodamiento de partículas, la humedad se distribuye más uniformemente.

La arena blanca por tener un mayor porcentaje de humedad y por estar situada en la parte superior; afecta al Granito ya que el agua tiende a descender por gravedad.

**Figura 15. Superposición de suelos (A).**



b)

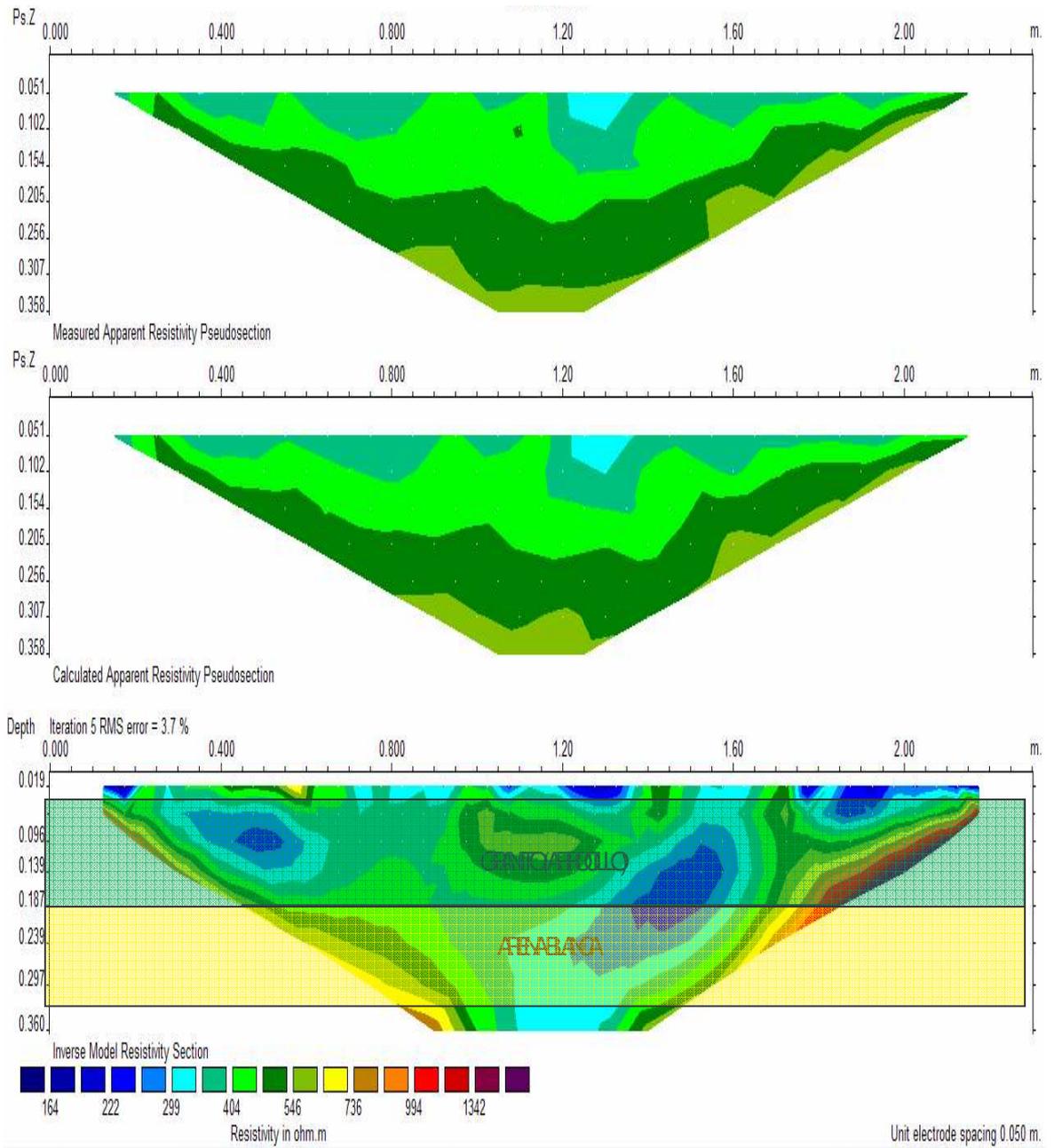


En esta segunda superposición (Fig. 16), la arena blanca se ubica en la parte inferior y en la parte superior el Granito. Aunque el comportamiento de la Arena, demarca una menor resistividad; se distingue que en los dos tipos de suelos, las resistividades son proporcionales en casi todo el perfil y están entre 222 – 546 ohm-m.

Los menores valores de resistividad se ubican en la parte superior de la tomografía (164 – 404 ohm-m), sugiriendo que el material es mucho más húmedo. Valores mayores de resistividad se encuentran en la parte inferior de la misma (546 – 736 ohm-m), lo cual manifiesta un material más seco. Sin embargo las franjas de resistividad no son horizontales y es difícil observar la separación entre los dos tipos de suelo.

A pesar de que la humedad desciende por gravedad y que la relación de vacíos en el granito es mayor que en la Arena Blanca; se puede deducir en este caso, que la superficie de separación de los dos tipos de suelo es impermeable a la humedad. Notándose una mayor concentración de humedad en la interfase de los dos suelos.

**Figura 16. Superposición de suelos (B).**



## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- Para el proyecto se utilizaron 3 tipos de suelos y se los caracterizó mediante ensayos de laboratorio; como son granulometría, porosidad, relación de vacíos, grado de saturación, humedad, peso unitario, gravedad específica y densidad relativa. Cuyos parámetros clasificaron a estos materiales, así:
  - Arena Blanca: SW, arena limpia, bien gradada, con módulo de finura de 1.98; ubicándola dentro del rango de arena medias.
  - Granito: SW, arena bien gradada, limpia; con módulo de finura de 3.15; ubicando al material dentro del rango de arenas gruesas.
  - Ripio de Triturado: SW, no se pudo determinar los coeficientes ya que la curva no corto en el porcentaje pasa del 10% y además debido también a que el tamiz numero 200 presenta un porcentaje pasa mayor al 12%. Se analizaron sus finos para ver si presentaban plasticidad (LL y LP), los cuales arrojaron que el material era N.P.
- Para usos de ingeniería se acostumbra utilizar en la clasificación de los suelos, el análisis granulométrico, el cual nos determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa total de suelo. Para el proyecto se utilizó el método de Tamizado Mecánico, con la cual se determinó las gradaciones a 3 tipos de suelos con diferentes comportamientos y diferente composición mineralógica (arena blanca, granito y ripio de triturado).
- Se variaron los parámetros de humedad para cada tipo de suelo. Para la arena blanca se tomaron los valores de 11%, 34% y 42% y para el granito arcilloso, 5% y 11%. Las humedades se fueron variando dependiendo del grado de absorción de cada tipo de suelo. Para la arena blanca se varió la humedad cada 10% ya que tenía mayor grado de absorción y el granito (arcilloso) se varió cada 5%.
- Para cada valor de humedad se realizaron mediciones de resistividad D.C, usando el método de Wenner y se obtuvieron las tomografías respectivas usando el software IPIWIN32, con la colaboración del Centro de Investigaciones en Materiales – CIMA-.

- Se comprobó que el método de Resistividad D.C., permite calcular la resistividad aparente del suelo, la cual esta ligada con el contenido de humedad, porosidad y relación de vacíos.
- Los resultados mostraron que el método de resistividad D.C. es un método sensible a cambios de humedad, ya que a pequeños cambios de la misma, los valores son significativos. Esto se puede expresar de otra forma, que los cambios notorios en la resistividad siguen la ley del gradiente de la humedad.
- Los resultados también mostraron que la forma como se cambie la humedad en el material es supremamente importante. Esto se notó en las tomografías y en la distribución de la humedad en el suelo. El método manual utilizado no fue el más adecuado para ello.
- En forma general, los rangos de resistividad encontrados están contemplados en estudios hechos por otros autores y establecidos en la tabla 1. Para la arena es de  $10$  a  $6 \cdot 10^3$  y para el granito de  $6 \cdot 10^3$  a  $10^6$
- En la superposición de los dos tipos de suelo, se notó otro tipo de factores que afectan la determinación y caracterización de los mismos. Entre ellos están el cambio de humedad debido a la relación de vacíos entre ellos, el descenso de la humedad por gravedad y la interfase impermeable creada en la superficie de separación.
- En cuanto a la relación de vacíos, en el granito es mayor ( $e = 0.61$ ) que en la arena blanca ( $e = 0.33$ ). Al haber un mejor acomodamiento de partículas, la humedad se distribuye más uniformemente y por consiguiente habrá una distribución homogénea de las resistividades.
- En el modelo real de resistividad eléctrica; los suelos tienen una conformación estratificada con características conductoras propias; sin embargo la dispersión de la corriente permite una capacidad de conducción que depende principalmente de la porosidad del material, humedad, granulometría, compactación y temperatura. En el modelo experimental realizado para los dos tipos de suelo, los valores de resistividad dependen más que todo del parámetro de humedad, granulometría y de otros factores como la compactación del material, la porosidad y la relación de vacíos. En el modelo real existe una mejor precisión de las medidas y el margen de error es menor; comparado con el modelo experimental.
- Se observa que los valores de las resistividades para cada tipo de suelo están comprendidos en un rango amplio tal y como lo describe la literatura. Sin embargo, no es posible determinar con exactitud la resistividad de cada

material en función de la humedad, debido a la distribución de huecos y vacíos en el material ya que la humedad tiene una proporcionalidad directa con ellos.

- Según la superposición de suelos con los resultados obtenidos es imposible mediante este método, diferenciar entre un suelo y otro y peor aún entre diferentes valores de humedad. Definitivamente para el proyecto, el método Geoeléctrico no es un método apropiado y confiable para la determinación de la estratigrafía de un suelo.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- Tener en cuenta que para mediciones de resistividad el suelo no debe estar saturado ya que los resultados expresarían únicamente valores para el agua y no valores que caractericen el tipo de suelo.
- Escoger suelos que sean mal gradados y establecer diferencias con suelos que tienen igual tamaño de partículas; para observar como varían los resultados de resistividad, para futuras investigaciones.
- Asegurar buen contacto entre los electrodos clavados y el suelo, verificando que estén alineados y a la misma profundidad; de igual forma se debe comprobar que los equipos utilizados estén en buen funcionamiento.
- Emplear métodos de Prospección Geofísica diferentes al método de WENNER y establecer diferencias entre ellos, indicando las pautas de su aplicación y las principales ventajas.
- Al vaciar el material al tanque, sería importante realizar la compactación por capas; con el objetivo, que al realizar las mediciones los resultados de los valores de resistividad se asemejen al modelo real.
- Realizar más trabajos de investigación en el campo de los métodos no destructivos como es el caso de los métodos Geoeléctricos, debido a que en el futuro estos tipos de métodos serán suficientemente usados por sus características frente al impacto ambiental.

## BIBLIOGRAFÍA

**ALH Geofísica** <http://www.alhgeofisica.com.ar/> 5k Visitado el 15/10/2007.

**BELTRAN, Mario Fernando y CAICEDO, Diego.** Estudio de Unidades de Mampostería Prismática. Fase II. San Juan de Pasto: 1997. p. 62 - 64. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

**BOWLES, Joseph E.** Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia: McGraw - Hill. 1981. p. 212.

**CORAL ASAIN, Francisco Javier.** Vidriado de ladrillos cerámicos utilizando vidrio reciclado. San Juan de Pasto: 1998. 68 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

**CORAL, Hugo.** Geotecnia I. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto: 1999. p. 4 - 6 y 75 - 108.

**CORDOBA BARAHONA, Carlos y RODRIGUEZ BURGOS, Jesús.** Fundamentos de cerámica tradicional. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto: 1996. p. 97 ISBN 958 - 96034 - 0 – 8.

**GORDONA, Fletcher.** Estudios de Suelos y Cimentaciones en la Industria de la Construcción. Editorial Limusa México, 1979, p. 24 – 27.

**Geofísica aplicada a la Obra Civil** <http://www.geoconsult.es>. Visitado el 04/10/2007.

**MAURICE, Cassan.** Los Ensayos In Situ en la Mecánica del suelo. Tomo 1. Barcelona, España 1982, p. 21.

**McGRAW – HILL** Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería civil, p. 2 – 95.

**Medida de la Resistividad Eléctrica.** <http://petrus.upc.es/wwwdib/tesis/mgasulla/Cap2.pdf>. Visitado el 03/09/2005.

**Medida de Parámetros Eléctricos Aplicados a Puestas a Tierra Puntuales.** <http://procobre Peru Publicaciones.htm>. Visitado el 07/04/2006.

**Métodos Geoelectrónicos.** <http://www.geovirtual.cl/geología/general/ggcap01e.htm>. Visitado el 28/06/2007.

**M. H Loke.** Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.  
Ed. Agrusa 1997

**Protección Catódica.** [http://members.tripod.com/~lizgarcia\\_2/catodicahtml](http://members.tripod.com/~lizgarcia_2/catodicahtml).  
Visitado el 03/09/2005.

**Resistividad Teoría y Diseño De Sistemas De Puesta A Tierra.** <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/Pe70.html>. Visitado el 03/03/2005

**Tomografía Geoeléctrica Como Herramienta De Diagnóstico Ambiental Del Subsuelo – Cuarta Parte.** <http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=902>. Visitado el 17/02/2006.

**Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2002.** © 1993-2001 Microsoft Corporation.  
Reservados todos los derechos.

**ANEXOS**

### Anexo A. VALORES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE

ARENA BLANCA, H = 11% Resist. Aparente $\rho$	ARENA BLANCA, H = 34% Resist. Aparente $\rho$	ARENA BLANCA, H = 42% Resist. Aparente $\rho$
118	79	127
131	111	101
113	79	152
117	88	88
118	97	139
106	67	71
113	98	117
119	92	100
113	74	246
872	86	96
84	92	86
151	77	111
145	65	101
148	84	100
155	82	103
157	105	79
157	75	116
138	76	97
235	120	117
163	114	153
270	144	143
189	79	128
126	69	122
168	105	97
180	82	92
161	91	110
136	101	84
167	83	87
141	83	145
127	91	133
80	76	76
211	89	8
204	85	111
97	79	106
191	117	73
213	113	135

255	77	102
387	106	99
347	173	199
235	103	122
242	112	105
225	72	102
230	91	88
228	85	96
250	74	106
192	80	89
231	76	99
281	84	81
324	101	88
320	99	106
311	82	103
335	78	104
400	95	119
364	114	132
288	95	102
272	93	83
286	85	68
289	112	100
315	94	105
313	87	96
351	95	112
382	91	99
415	93	102
420	105	114
421	106	117
510	102	126
355	87	78
356	99	100
366	110	88
402	98	76
419	109	116
459	101	108
382	89	97
524	96	94
529	113	118
434	108	95
477	110	88
531	114	113

424	109	91
558	100	114
537	99	91
577	119	115
624	106	95
609	100	98

<b>GRANITO (ARROCILLO), H = 5%</b> <b>Resist. Aparente <math>\rho</math></b>	<b>GRANITO (ARROCILLO), H = 11%</b> <b>Resist. Aparente <math>\rho</math></b>
147	226
112	199
58	124
73	184
74	176
70	154
95	207
68	147
84	206
87	171
78	165
69	138
80	190
77	204
75	198
89	179
76	106
96	237
77	157
106	3
93	257
114	184
104	114
106	292
90	184
96	165
74	133
79	154
95	188
86	168
64	150
84	140
81	187
82	185
87	128
103	137
126	207
173	200

127	221
128	283
122	274
104	235
96	106
88	153
88	148
91	157
86	86
80	80
75	128
85	175
95	159
90	122
106	147
118	233
133	190
67	148
91	157
102	111
78	132
79	106
80	119
71	159
76	140
82	170
99	169
123	155
69	167
93	115
87	128
65	108
58	108
60	145
61	130
77	139
94	139
100	92
80	98
85	151
68	106
74	115

82	124
91	92
88	126
83	140