



Certificación ISO 9001:2000 ‡

Evaluación de la resistividad en campo y en laboratorio y su aplicación a pavimentos

Natalia Pérez García
Paul Garnica Anguas
Víctor Hugo Delgado
Noe Landaverde

**Publicación Técnica No. 325
Sanfandila, Qro, 2010**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Evaluación de la resistividad en campo y en
laboratorio y su aplicación a pavimentos**

Publicación Técnica No. 325
Sanfandila, Qro, 2010

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por la Dra. Natalia Pérez García, Dr. Paul Garnica Anguas, Víctor Hugo Delgado y Noe Landaverde.

Colaboraron en las mediciones de campo los técnicos Miguel Ángel Cervantes Nieto, Mario Antonio Pérez González y Luis Alberto Pérez Cortés.

En la fabricación de las placas metálicas para la medición de resistividad en laboratorio colaboraron el Ing. José Luis Moreno Jiménez y Mario Alberto Montes.

Índice

Resumen	v
Abstract	vii
Resumen ejecutivo	ix
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Mediciones de variaciones del contenido de agua en tramos carreteros	3
2.1 Evaluación de las variaciones de contenido de agua	3
Capítulo 3. Conceptos sobre resistividad eléctrica de suelos	13
3.1 Definición de resistividad eléctrica	13
3.2 Factores que afectan la resistividad del suelo	14
3.2.1 Naturaleza del suelo	14
3.2.2 Contenido de agua	15
3.2.3 Temperatura	16
3.2.4 Concentración de sales disueltas	17
3.2.5 Compactación	17
3.2.6 Estratificación del terreno	18
3.3 Métodos para evaluar la resistividad en campo y en laboratorio	19
3.3.1 Método Wenner	19
3.3.2 Método Schlumberger	21
3.3.3 Equipo ohmmapper	22
3.3.4 Método para determinar la resistividad en el laboratorio	25
3.4 Valores típicos de resistividad en algunos materiales	25
3.5 Mediciones de resistividad en laboratorio	28
Capítulo 4. Medición de la resistividad en laboratorio y campo para este estudio	33
4.1 Procedimiento de laboratorio	33
4.2 Procedimiento de campo	36
Capítulo 5. Discusión de resultados de campo	39
5.1 Resultados de campo	39
5.1.1 Perfiles estratigráficos	39
5.1.2 Perfiles de resistividad	48
5.1.2.1 Perfiles de resistividad para el tramo La Venta	48
5.1.2.2 Perfiles de resistividad para el tramo CENAM	50
5.1.2.3 Perfiles de resistividad para el tramo Los Cues	52
Capítulo 6. Discusión de los resultados de laboratorio	57
6.1 Propiedades índice de los suelos de ensaye	57
6.2 Propiedades de compactación	57
6.3 Condiciones de compactación de los especímenes ensayados	61
6.4 Relación entre resistividad y otras propiedades	62
6.4.1 Material del Aeropuerto	62

6.4.2	Material de la Central de Autobuses	64
6.4.3	Material de la Comercial Mexicana	65
6.4.4	Material de la Galera, Santa Rosa y salida a Tlacote	67
Capítulo 7.	Conclusiones y Recomendaciones	71
	Referencias y Bibliografía	73
	Anexo A	75

Resumen

La importancia de las variaciones del contenido de agua en los materiales que forman la sección estructural de una carretera se ha demostrado en diversas investigaciones. Sin embargo, la obtención de datos de campo de dichas variaciones no es tarea fácil, de hecho, se hace necesario instalar equipos sofisticados durante o después de la construcción de la carretera. Por tanto, es deseable que se propongan técnicas para determinar estas variaciones que no requieran tiempos largos o equipos muy complejos.

Este trabajo muestra una serie de mediciones de perfiles de resistividad obtenidos en cinco tramos carreteros que se analizaron con el propósito de determinar hasta dónde mediciones de características más rápidas de determinar (por ejemplo, la resistividad del suelo) pueden ayudar en la evaluación de las variaciones de contenido de agua que se puedan presentar en los materiales que forman las capas de la sección estructural (base, subbase, subrasante y terreno de cimentación). Por otro lado, el estudio se complementó con mediciones de resistividad llevados a cabo en laboratorio para varios suelos. Los resultados demuestran que la resistividad depende de factores entre los que se pueden mencionar tipo de suelo, contenido de agua, peso volumétrico, etc. Para ilustrar el efecto de los factores antes mencionados, se presentan las curvas de isovalores de resistividad y las relaciones entre contenido de agua contra resistividad o grado de saturación contra resistividad.

Palabras clave: resistividad del suelo, pavimento, cambios en el contenido de agua, curvas de compactación.

Abstract

The importance of water content changes of materials that constitute the pavement has been demonstrated in many researches. These changes are not easy to determine. As a matter of fact, it is necessary to install special equipment after or during construction in order to determine this behaviour. Thus, it is desirable to put forward new techniques to determine water content changes in short times and also with equipments easy to operate.

This research work shows a series of resistivity profiles measured in five highway sections with the purpose of determining to what extent soil resistivity can be utilized to assess water content changes in the unbound materials (base, subbase, subgrade or soil support). On the other hand, this study was complemented with laboratory measurements of resistivity on some fine-grained soils. The results demonstrate that resistivity depends on many factors such as water content, dry unit weight, etc. To illustrate this dependence it is shown the isolines of resistivity plotted in the compaction space. At the end, some curves of water content *versus* resistivity and degree of saturation *versus* resistivity are shown for completeness.

Key words: soil resistivity, pavement, water content changes, compaction curves.

Resumen ejecutivo

El diseño de pavimentos depende en gran medida de tres grandes factores: clima, cargas del tránsito y propiedades de los materiales que conformarán la sección estructural. El papel que juega el clima junto con el comportamiento de los materiales es uno de los aspectos que más influye en el desempeño de un pavimento en servicio como se mostrará en este documento.

De forma general, la literatura que toca el tema de diseño de pavimentos muestra resultados de las variaciones estacionales de los contenidos de agua que se presentan en los materiales que conforman las capas de las estructuras carreteras (materiales de base, subbase, subrasante y terreno natural). Estas variaciones afectan en gran medida el desempeño del pavimento ya que una vez que los materiales experimentan un incremento en el contenido de agua sus propiedades se modifican con respecto a las que tenían cuando fueron colocados y por tanto, la superficie de rodadura comienza a presentar una serie de deterioros dentro de los que se pueden mencionar el agrietamiento por fatiga, las deformaciones permanentes o roderas, los agrietamientos longitudinales, etc. Estas fallas hacen que la funcionalidad del pavimento disminuya hasta niveles en los que puede ser intransitable si no se proporciona el mantenimiento adecuado.

Debido a lo anterior, las variaciones en contenidos de agua y en propiedades de los materiales se han determinado en varios tramos de prueba en Estados Unidos y otros países europeos, es decir, naciones que cuentan con el financiamiento que les permite llevar a cabo instrumentaciones con equipos que determinan tanto cambios en contenidos de agua, esfuerzos provocados por el tránsito, cambios de temperatura, etc. Instrumentar una obra para determinar su comportamiento después de haber sido puesta en servicio implica la ejecución de varias tareas, por ejemplo, la colocación de los equipos, la toma de datos, el mantenimiento de los equipos, análisis de información, etc. Todo esto es posible realizarlo en los países antes mencionados; no obstante, en países en desarrollo, es difícil la adquisición de tales instrumentos, por tanto, existen muy pocas investigaciones en las que se muestren resultados de la variación de las propiedades de los materiales que forman la carretera después de que se ha construido. Tomando como base esta información, en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se han llevado a cabo estudios con miras a obtener dicho comportamiento basándose en propiedades que sean más fáciles de evaluar y que su determinación sea en un lapso de tiempo corto.

Uno de los equipos con los que cuenta el IMT es el ohmmapper; con este equipo se pueden determinar las variaciones de resistividad a diferentes profundidades para un cierto tipo de terreno. Este equipo fue utilizado para determinar las variaciones de resistividad hasta 2.1 m de profundidad en cinco tramos de carretera cercanas al IMT. La longitud estudiada en cada tramo fue de 200 m. El

objetivo que se perseguía con la determinación de estas mediciones es que junto con mediciones de resistividad realizadas en laboratorio se pudieran determinar las variaciones de contenido de agua que se presentaron en cada uno de los meses estudiados.

La publicación se desarrolla de la siguiente forma:

En el capítulo 2 se muestran una serie de mediciones de variaciones en contenidos de agua y otras propiedades de materiales en secciones de carreteras en diferentes países. Asimismo, se hace referencia a datos de deflexiones presentados por Rico y del Castillo (1989) donde se manifiesta que éstas no presentan diferencias apreciables a pesar de que se tomaron en diferentes épocas del año. Otros estudios de literatura muestran cómo se van presentando los cambios en los materiales que forman la sección estructural.

En el capítulo 3 se discuten aspectos relacionados a la resistividad eléctrica; es decir, desde su definición, factores de los que depende, métodos para su determinación y finalmente algunos resultados de literatura con respecto a estudios de laboratorio.

El capítulo 4 es una breve descripción del procedimiento de laboratorio y de campo utilizado en la determinación de la resistividad de los suelos en estudio.

Finalmente, los capítulos 5 y 6 presentan la discusión de los perfiles de resistividad obtenidos en campo, así como también los perfiles de suelo que se observaron en los pozos a cielo abierto realizados en cada uno de los tramos. Los resultados de laboratorio demostraron que el valor de resistividad depende tanto del contenido de agua como del peso volumétrico seco, tipo de suelo, etc. Por otro lado, también se muestran las gráficas en las que se puede observar que a mayor contenido de agua la resistividad disminuye. Se indica también la relación entre resistividad y contenido de agua volumétrico para tres suelos; de esta relación se aprecia que diferentes tipos de suelos pueden proporcionar los mismos valores de resistividad.

Para finalizar, se presentan las conclusiones que se desprenden del estudio y el anexo A donde se muestran los perfiles de resistividad y las fotografías de los tramos 2 y 3 que no fueron analizados en la discusión.

1 Introducción

El diseño empírico-mecanicista para pavimentos es la propuesta en boga en la ingeniería de pavimentos para determinar los espesores de las capas que formarán la estructura. Esta tendencia implica que se deberán de llevar a cabo estudios de las propiedades de los materiales, tránsito y de las condiciones climáticas de forma más rigurosa considerando el nivel que se trabaje dentro de la guía de diseño (nivel 1, 2 ó 3). Por ejemplo, cuando se desea utilizar el nivel 1, se determinarán todas las propiedades de los materiales en laboratorio, el tránsito se manejará con espectros de carga, los datos climáticos se tomarán de las estaciones climáticas existentes, etc. A medida que el nivel se acerca al 3, las exigencias en la obtención de propiedades y otras características es menor, es decir, se pueden usar correlaciones para determinar propiedades o utilizar valores conocidos para los materiales de la región.

Una de las claves del diseño empírico-mecanicista es la determinación de la variación de las propiedades de los materiales de acuerdo con los cambios climáticos. Los cambios de temperatura afectan de manera importante el comportamiento de la carpeta asfáltica y los cambios de contenido de agua modificarán las propiedades de los materiales de base, subbase, subrasante y terreno de cimentación, siendo más notable el efecto en materiales finos, que en muchas ocasiones forman la última capa mencionada.

Todo esto ha traído como consecuencia que diversas investigaciones en el área de pavimentos estén enfocadas al estudio de las variaciones de contenido de agua y temperatura en secciones de pavimento y su efecto en el comportamiento del mismo. El trabajo que se presenta a continuación es el estudio de la variación de la resistividad de algunos materiales compactados en laboratorio y mediciones de la misma en tramos carreteros. El objetivo es determinar si las mediciones de resistividad pueden utilizarse como un medio para predecir las variaciones de contenido de agua en los materiales que forman la estructura del pavimento.

2 Mediciones de variaciones del contenido de agua en tramos carreteros

El desarrollo de los métodos de diseño de pavimentos ha seguido un rumbo que quizá nunca nadie imaginó. Haciendo una reseña histórica, puede decirse que los primeros diseños de los caminos se basaban únicamente en conocimientos empíricos. Posteriormente, se usaron las propiedades índice de los materiales para determinar la posibilidad de ser utilizados como material de construcción. Con el paso de los años, los métodos de diseño han evolucionado debido a las nuevas necesidades, es decir, el número de vehículos que transitan por las vías ha cambiado considerablemente, ahora las cargas que transportan los vehículos pesados son mayores y en muchas ocasiones rebasan los niveles dispuestos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; los terrenos por los que se construyen los trazos están formados por suelos que presentan problemáticas complejas, etc.

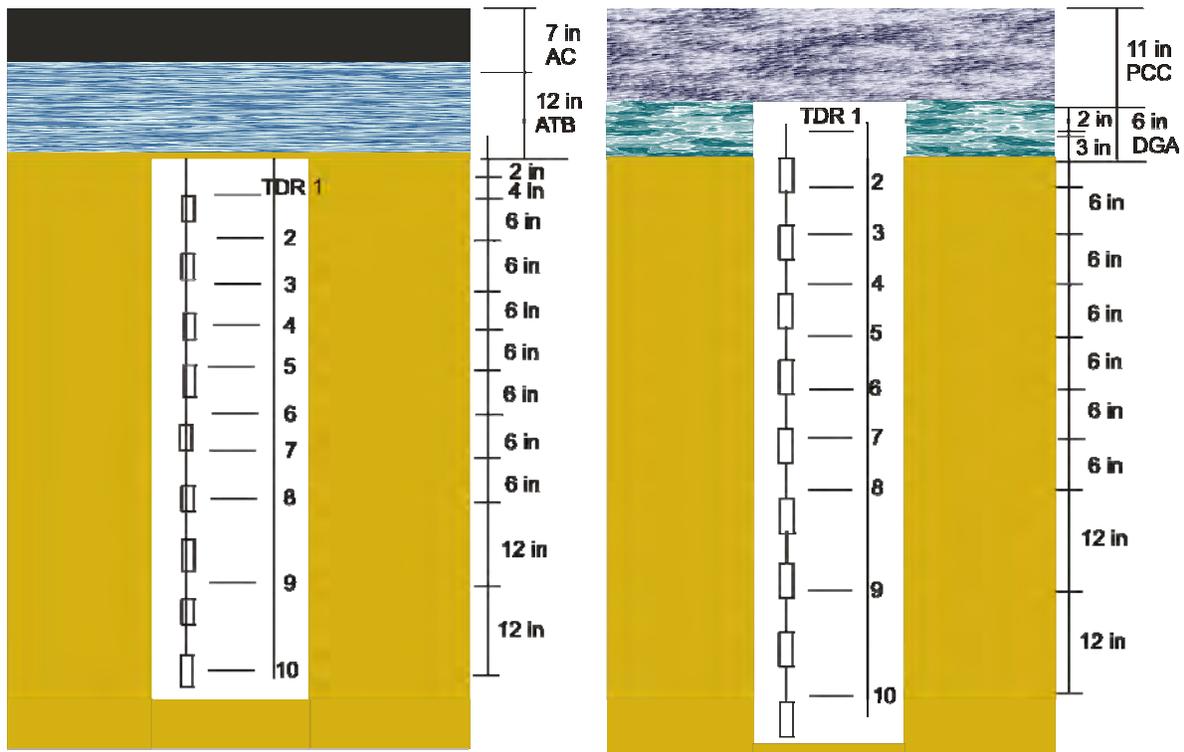
En la actualidad, el ingeniero que diseña pavimentos sabe que existen infinidad de variables que deben tomarse en cuenta para determinar los espesores que tendrá cada una de las capas; no obstante, también es cierto, que a medida que se incrementa el número de variables, los métodos de diseño se vuelven más refinados y complejos y como consecuencia algunas veces no pueden ser utilizados aun cuando sean muy prometedores o al utilizarse se hace uso de datos que han sido determinados para otras regiones.

A continuación se presentan datos de variaciones del contenido de agua de materiales que forman las carreteras mostradas en la literatura y cómo afectan las propiedades de los mismos. Este tema es de suma importancia ya que en el método AASHTO empírico-mecanicista uno de los aspectos a predecir es la variación de las propiedades de los materiales (base, subbase, subrasante y terreno de cimentación) debido a cambios en contenido de agua durante la vida útil de la obra.

2.1 Evaluación de las variaciones de contenido de agua

Durante el desarrollo del programa “Desempeño de pavimentos a largo plazo” (por sus siglas en inglés LTPP) que se llevó a cabo en Estados Unidos, se realizaron investigaciones de secciones de pavimentos nuevos o en servicio. De estos estudios, Heydinger (2002) presentó resultados de variaciones de contenido de agua en materiales de subrasante para un tramo carretero de Ohio. La Figura 2.1 muestra las secciones del pavimento que se construyeron con carpeta de concreto asfáltico y concreto hidráulico. Los espesores de cada una de las capas así como

la localización de los sensores en el material de subrasante se pueden observar en la misma figura.



Nota:
 AC = Concreto asfáltico
 ATB = Base tratada con asfalto
 PCC = Losa de concreto hidráulico
 DGA = Mezcla de concreto asfáltico densa

Figura 2.1
Secciones de pavimento en Delaware, Ohio y profundidades a las que se colocaron los dispositivos de medición (Heydinger, 2002)

Los contenidos de agua volumétricos que se midieron en el material de subrasante (clasificado como CL) cuando se colocaron los dispositivos de medición fueron de 35 y 42 %. El equipo utilizado para la determinación de los contenidos de agua fue el Time Domain Reflectory (TDR). Éstos fueron colocados en la subrasante y en la base no estabilizada. Los resultados obtenidos se indican en la Figura 2.2.

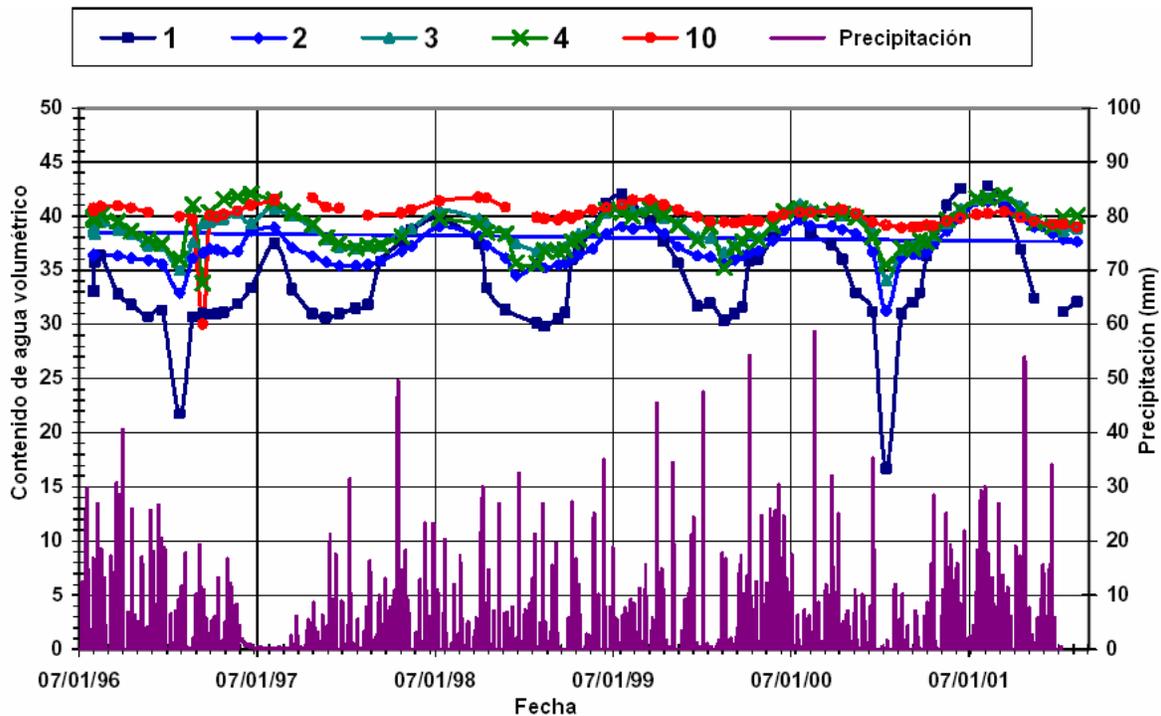


Figura 2.2

Variaciones del contenido de agua medidos con los TDR 1, 2, 3, 4 y 10 en la sección de pavimento asfáltico

Los resultados de la Figura 2.2 indican que al parecer no existe ninguna relación entre el contenido de agua volumétrico obtenido y las lluvias que se presentaron; por tanto, Heydinger concluyó que se puede predecir la variación del contenido de agua sin tomar en cuenta la precipitación que se pueda presentar (Heydinger, 2002).

En el caso de los pavimentos de concreto hidráulico, nótese que la variación de contenido de agua y temperatura en la subrasante siguen el mismo patrón (Figura 2.3). Se puede notar que el rango de variaciones de contenido de agua volumétrico en 6 años estuvo entre 33 % a 42 % máximo, tomando en cuenta el punto de 33 % localizado en año 2000 parece ser un dato que está fuera de la tendencia, si no se toma en cuenta este punto, la variación sería entre 35 y 42 %, lo que corresponde a una variación máxima de contenido de agua volumétrico de 7 % en los 6 años de estudio.

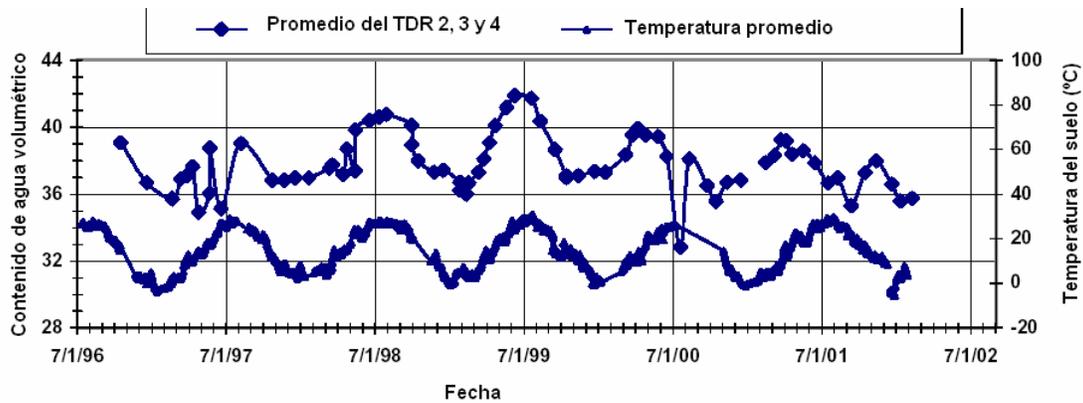


Figura 2.3
Variación del contenido de agua volumétrico en el pavimento de concreto hidráulico

Gukunski, et al. llevaron a cabo un estudio de variaciones de contenido de agua, temperatura del pavimento y del aire, cantidad de precipitación, profundidad de congelamiento, etc, para varios tramos carreteros en el estado de Nueva Jersey, EU. En el artículo publicado, los autores presentan resultados para un tramo de pavimento flexible localizado en la carretera interestatal I-287 (pavimento constituido de la siguiente manera: 25.4 cm de concreto asfáltico, 10.16 cm de base de roca triturada y 33 cm de grava arenosa como material de subbase). La gráfica de variación de contenido de agua de la subrasante muestra -al menos para el periodo de tiempo monitoreado- que desde abril hasta octubre de 2002 el contenido de agua varió entre 30 y 35 %. A partir de octubre, el contenido de agua presenta variaciones más importantes (Figura 2.4).

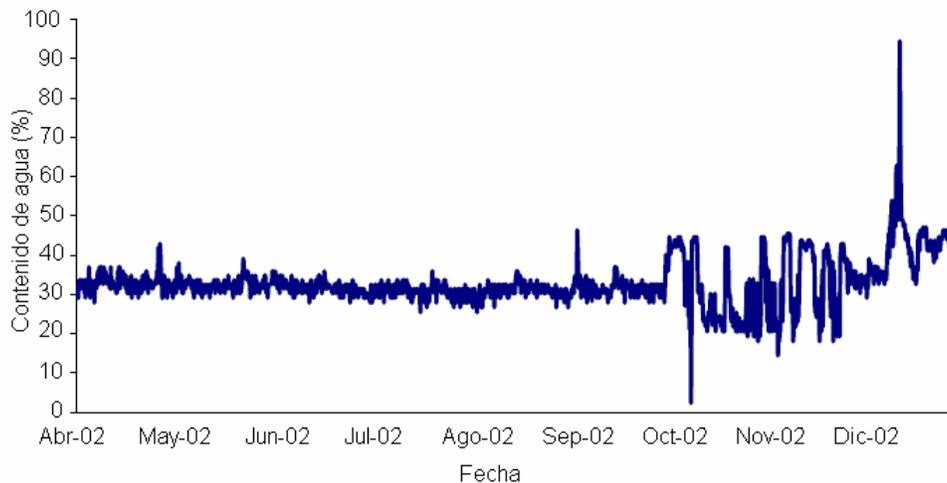


Figura 2.4
Variaciones de contenido de agua en un tramo de pavimento flexible de Nueva Jersey (Gukunski, et al.)

Los tramos de carreteras hasta ahora mencionados se construyeron en Estados Unidos; sin embargo, también se han llevado a cabo estudios de las variaciones de contenido de agua en otros países. Por ejemplo, en Sudán se realizó una investigación en un tramo de carretera con el objetivo de estudiar el comportamiento de una arcilla compactada (en el lado seco de la curva de compactación) para formar un terraplén. La razón de compactar en el lado seco estuvo asociada a los grandes costos del agua debido a la escasez de este recurso en el área ya que la precipitación anual es de 400-500 mm, concentrada en los meses de junio a septiembre.

El material por compactar para formar el terraplén (1.2 m de altura) correspondió a un limo de alta compresibilidad (MH) con 87 % de material que pasa la malla No. 200. La sección en estudio tenía una longitud de 600 m y fue dividida en 6 subsecciones y las variables serían el contenido de agua de compactación y tipo de rodillo para compactar (uno de 10 y otro de 8 toneladas) (Figura 2.5). Dicha Figura ejemplifica el tipo de estructura que fue colocada sobre el terraplén.

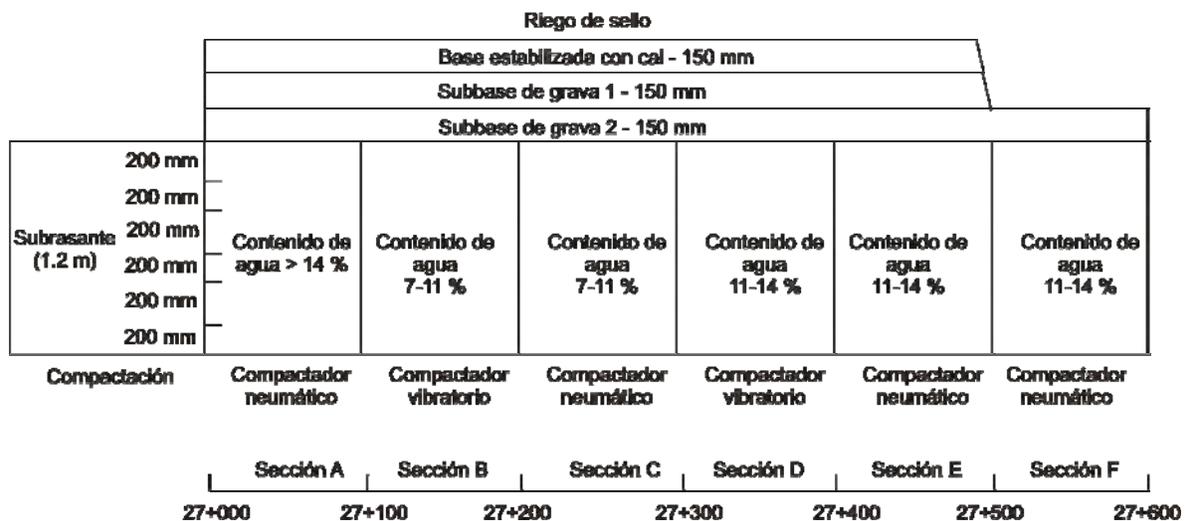


Figura 2.5
Tramo de prueba Sennar-Kosti (Ellis, 1980)

El tramo se construyó antes de la temporada de lluvias. Los resultados de contenido de agua muestran que las variaciones (datos tomados del eje central) están en el rango de 3 a 4 %, es decir, variaciones muy ligeras con respecto a las condiciones iniciales. Sin embargo, en la subsección en la que sólo se tiene grava en la superficie es la que experimenta menos variaciones (Figura 2.6).

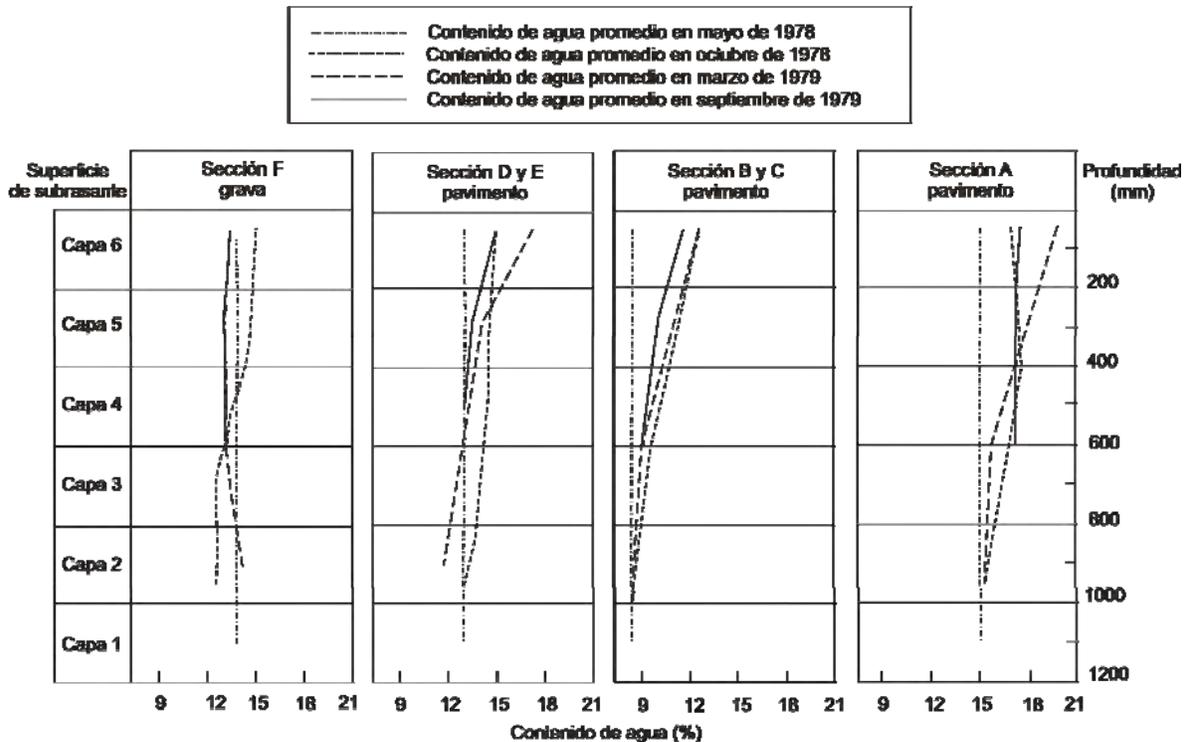


Figura 2.6
Variaciones de contenido de agua a lo largo del eje central del tramo

De las inspecciones visuales que se llevaron a cabo se llegó a la conclusión de que el comportamiento del tramo era satisfactorio.

Salem, et al. (2002) muestran las variaciones de contenido de agua y módulo para una arcilla que forma la subrasante de un pavimento localizado en Maryland, EU (secciones de estudio del programa LTPP). Un ejemplo de los resultados que proporcionan los autores se visualiza en la Figura 2.7. Se observa que a medida que el contenido de agua se incrementa, el módulo disminuye y viceversa. Es importante hacer notar que la máxima variación en contenido de agua es de aproximadamente 1.2 % durante el periodo de un año y cuatro meses lo que trae como consecuencia una variación de módulos entre 105 y 135 MPa.

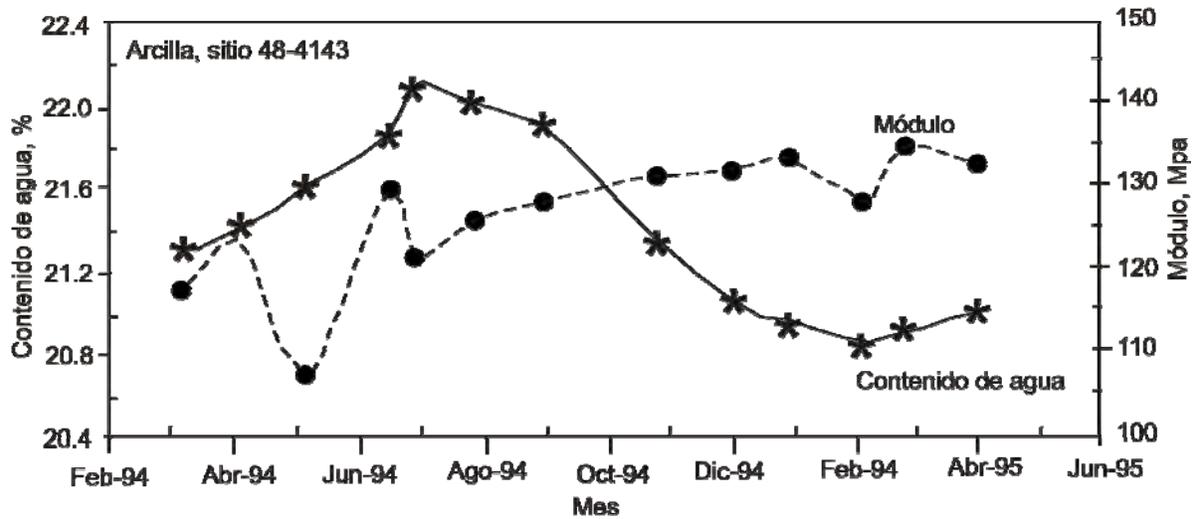


Figura 2.7
Variaciones estacionales de contenido de agua y módulo en una carretera en servicio (Salem, et al., 2002)

Otro aspecto importante en las variaciones de contenido de agua es que dependen también del tipo de suelo. Para el caso de la arena, las variaciones fueron menores (Figura 2.8) comparadas con las que se presentan en la arcilla (Figura 2.7).

La Figura 2.8 muestra que la variación de contenido de agua para la arena fue únicamente 0.5 % y con respecto al módulo fue de aproximadamente 43 kPa (diferencia entre los valores máximo y mínimo).

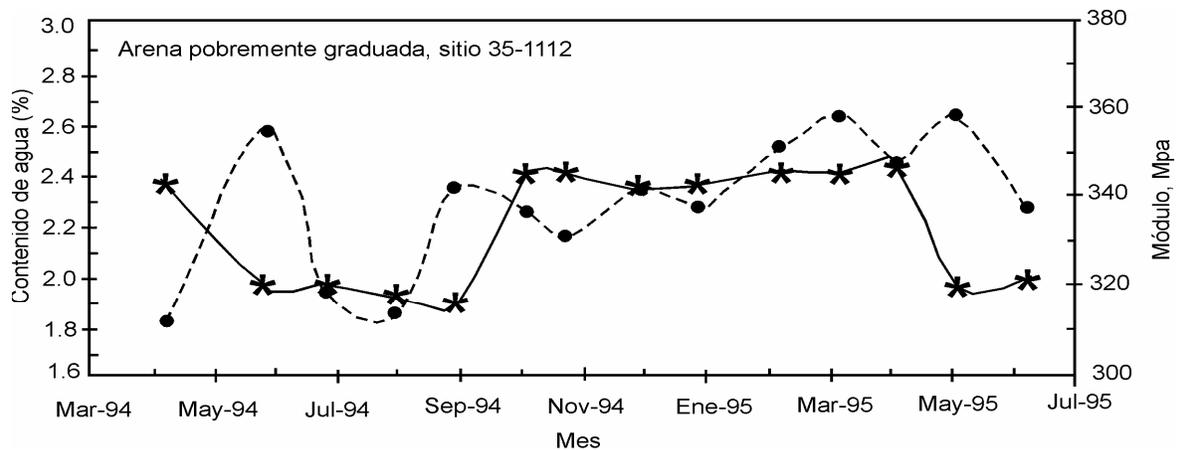


Figura 2.8
Variaciones de contenido de agua y módulo en una subrasante formada por una arena pobremente graduada (Salem, et al., 2002)

Otro ejemplo de variaciones de contenido de agua es el que se muestra en la literatura para una carretera construida en Kenia donde se utilizó arcilla expansiva para formar el relleno y la capa de subrasante (O'Connell y Gourley, 1993). El contenido de agua al que se compactó la arcilla fue entre 13 a 16 %, valor bajo comparado con el óptimo (28 %). Estos mismos valores de contenido de agua se midieron después de haber terminado la construcción. Siete meses después, a más de 60 cm de profundidad no existen variaciones importantes en el contenido de agua o succión total, pero se aprecia que éstos empiezan a incrementarse en los hombros de la carretera y, además, se observa que el frente de humedad se va moviendo hacia el centro de la sección (Figura 2.9).

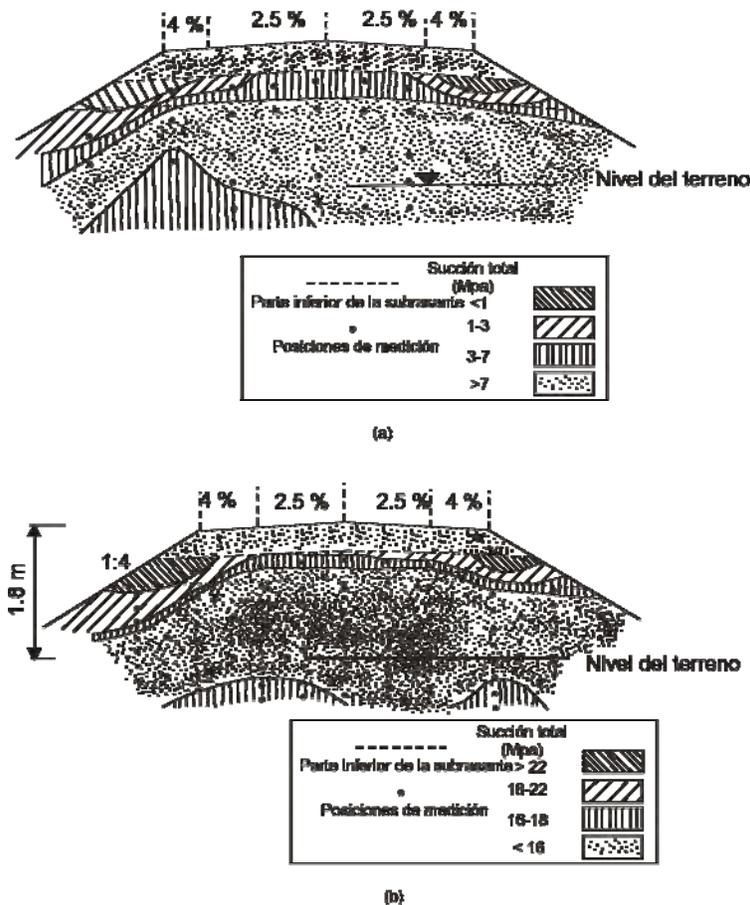


Figura 2.9
Variaciones de la succión total en la sección de pavimento después de siete meses de la construcción (O'Connell y Gourley, 1993)

Los resultados que se encuentran en la literatura corresponden a estudios en pavimentos localizados en regiones climáticas muy particulares. Para el caso de

condiciones mexicanas se han realizado muy pocos estudios, como por ejemplo, el caso de mediciones de deflexiones citado por Rico y del Castillo (1992). Los resultados de deflexiones que presentan se realizaron en dos épocas muy diferentes, es decir, a finales de la temporada de lluvias y al terminar el periodo de estiaje. Las deflexiones no manifiestan diferencias apreciables en la condición estructural de las secciones (Figura 2.10).

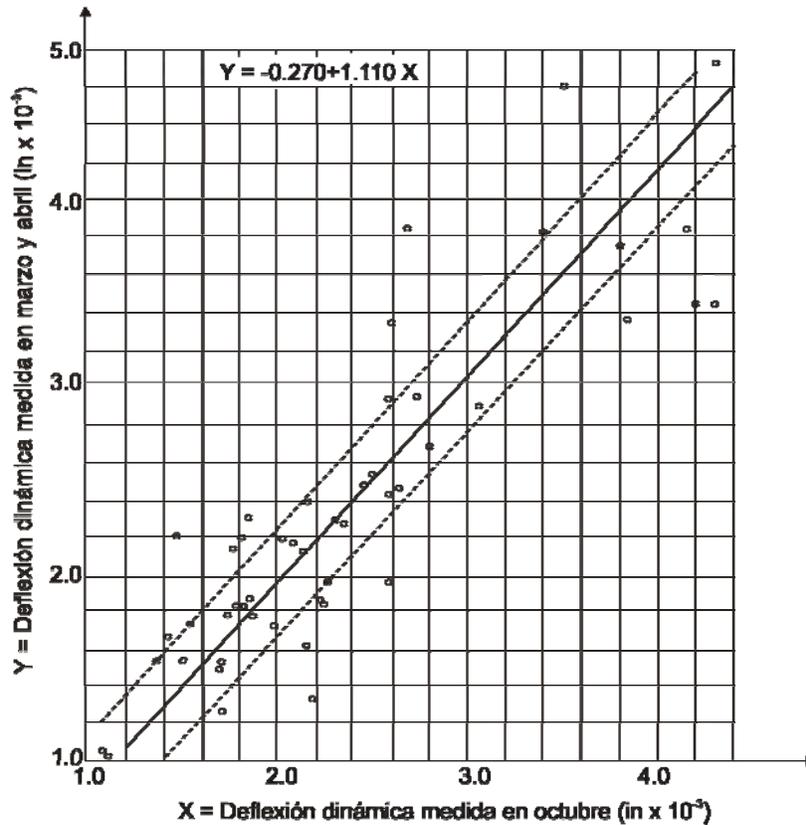


Figura 2.10
Mediciones de deflexión (Rico y del Castillo, 1989)

Como se puede notar de la recopilación de información presentada, en casi todos los casos las variaciones de contenido de agua fueron ligeras. Quizá dependerá de la zona en estudio -aquellas áreas en donde se presente congelamiento-deshielo, las variaciones serán muy importantes; en zonas muy secas las variaciones probablemente sean mínimas-. Por otro lado, las variaciones también dependerán mucho de la posición del nivel freático.

Debido a la gran variación de climas que se pueden presentar en nuestro país es importante que se lleven a cabo estudios de este tipo en distintas regiones del país de tal forma que se tengan datos como los presentados anteriormente pero aplicados a las condiciones mexicanas.

3 Conceptos sobre resistividad eléctrica de suelos

3.1 Definición de resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica (ρ) de un material describe la dificultad que encuentra la corriente eléctrica a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad (σ) como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material.

La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo está determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección “s” y longitud “l”, la resistencia eléctrica es:

$$R = \rho \frac{l}{s} \tag{3.1}$$

A partir de la ecuación (3.1) se puede despejar la resistividad, quedando la ecuación como:

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \tag{3.2}$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ($\Omega\cdot m$) u ohm por centímetro ($\Omega\cdot cm$).

La Figura 3.1 ilustra un esquema para la determinación de la resistividad eléctrica de una muestra de material cuyas dimensiones son 1 m de lado por 1 m de profundidad.

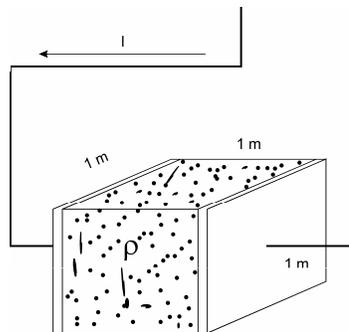


Figura 3.1
Diagrama esquemático para la determinación de la resistividad eléctrica

La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor variación para diversos materiales y por supuesto para los suelos. Su valor depende de diversos factores como: temperatura, humedad o presión, relación de vacíos, peso volumétrico, etc. A continuación se resume la forma en que cada uno de estos factores hace variar la resistividad.

3.2 Factores que afectan la resistividad del suelo

En un medio conductor homogéneo e isótropo, el valor de la resistencia en cualquier punto es igual. Sin embargo, el suelo es un medio heterogéneo y anisótropo, por tanto, es de esperarse que los valores de resistividad dependan de varios factores. Se pueden mencionar los siguientes:

- Naturaleza del tipo de suelo o material
- Humedad
- Temperatura
- Concentración de sales disueltas
- Estratigrafía
- Variaciones estacionales
- Compactación

3.2.1 Naturaleza del suelo

Los suelos pueden ser buenos, regulares o malos conductores de la corriente eléctrica. La Tabla 3.1 resume valores característicos de algunos materiales. Los valores que se presentan en esta tabla son puntuales, por ejemplo, el valor de resistividad de la arcilla es de 40 ohms-m, sin embargo, otros estudios muestran que la resistividad de este material puede variar en un rango muy amplio.

Con respecto al tipo de material, cabe señalar que a medida que el tamaño de las partículas se incrementa, la resistividad se incrementa. Por ejemplo, una grava tiene mayor resistividad que la arena, y ésta presenta un valor mayor con respecto a la arcilla. La razón de ésto podría ser el tamaño de los vacíos que se generan en la estructura y el fluido que se encuentra en ellos. Si el fluido es agua, la resistividad será baja y si es aire, la resistividad será alta ya que el aire no es conductor de electricidad.

Tabla 3.1
Valores típicos de resistividad para algunos materiales
(www.lightningman.com.au/Earthing.pdf)

Material	Valor típico de resistividad (ohm-m)
Agua de mar	2
Arcilla	40
Aguas subterráneas	50
Arena	2 000
Granito	25 000
Hielo	100 000

3.2.2 Contenido de agua

Algunas investigaciones de resistividad de suelos han mostrado que este parámetro depende en gran medida del contenido de agua. Por ejemplo, los resultados publicados por Ozcep, et al (2009) muestran que existe una relación exponencial entre contenido de agua y resistividad (Figura 3.2).

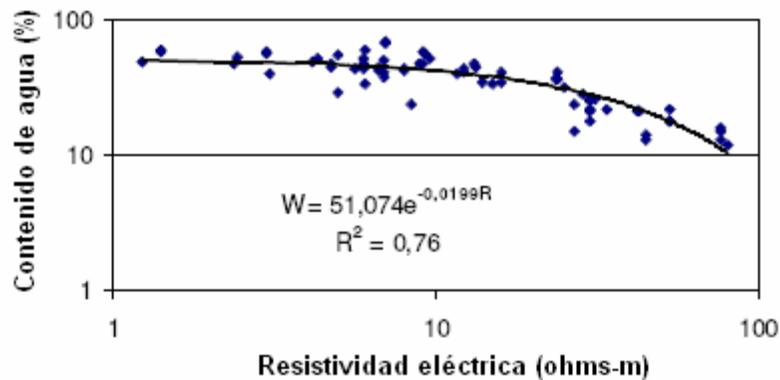


Figura 3.2
Variación de la resistividad en función del contenido de agua

Los resultados de la Figura 3.2 corresponden a un estudio que se llevó a cabo en Turquía. Los valores de resistividad se obtuvieron con mediciones VES (Vertical Electrical Sounding) y los contenidos de agua se obtuvieron por secado de muestras que se extrajeron de los pozos que se realizaron. Los valores mostrados corresponden a una arena.

3.2.3 Temperatura

La resistividad del terreno aumenta al disminuir la temperatura, pero cuando el terreno se enfría por debajo de cero grados Celsius, el agua se congela. El hielo es aislante desde el punto de vista eléctrico, lo que implica que la movilidad de los iones del terreno a través del agua se detiene al congelarse (Figura 3.3 y Figura 3.4).

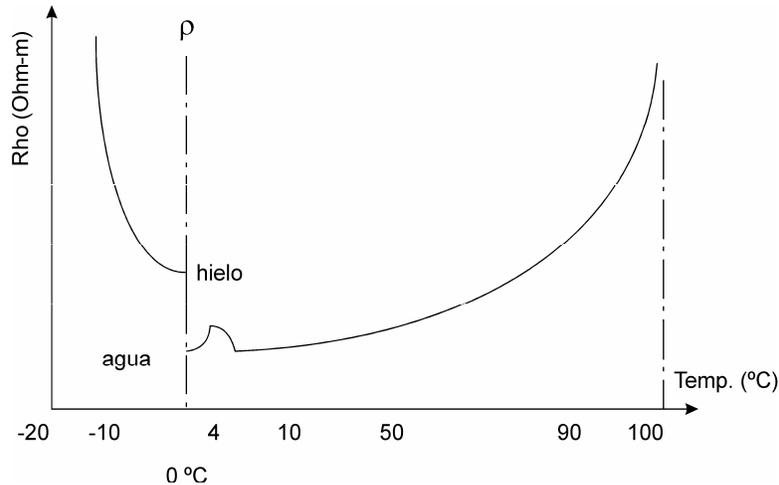


Figura 3.3
Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura
(www.eSelecing.cl/documentos/APUNTES/apuntes%20mallas%20a%tierra/apuntes/unidad2.pdf)

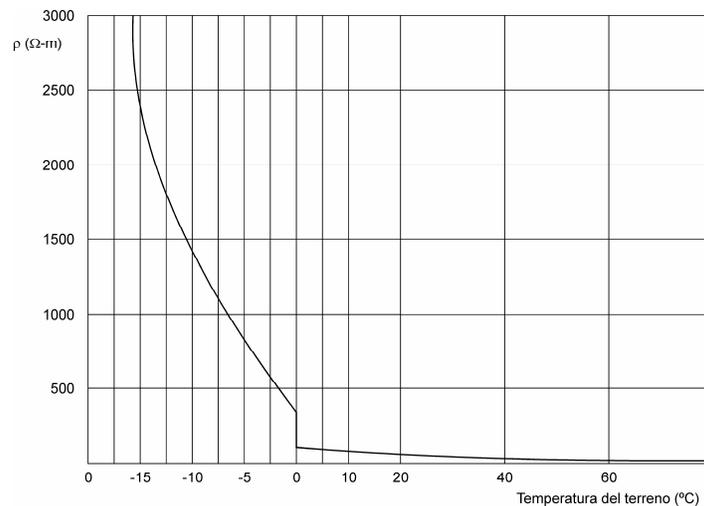


Figura 3.4
Variación de la resistividad con la temperatura
(webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/jramirez/exposiciones_a2003/tema1_resistividadyelectrodosdepat.ppt)

Nótese que en las Figuras 3.3 y 3.4 se muestran la variaciones de la resistividad con la temperatura, sin embargo, en la escala positiva de temperaturas de la Figura 3.4 la resistividad disminuye, caso contrario se observa en la Figura 3.3.

Para temperaturas altas, el agua empieza a evaporarse y como consecuencia la resistividad se incrementa (www.cecalc.ula.ve/usuarios/usuarios/sct/resistividad/).

3.2.4 Concentración de sales disueltas

Al presentarse una mayor concentración de sales disueltas en el agua que se encuentra en el suelo, la conductividad se incrementa y como consecuencia la resistividad disminuye (Figura 3.5).

Dharmawidjaja, et al. (2008) mencionan que el agua disocia las sales en iones y cationes que se encargan de transportar los electrones. Recuérdese que el agua destilada es un aislante y aunque se introduzcan dos electrodos conectados a una batería, no circulará energía eléctrica. Si se añade cloruro de sodio, la electricidad comenzará a moverse ya que los electrones empiezan a circular gracias a los iones disociados.

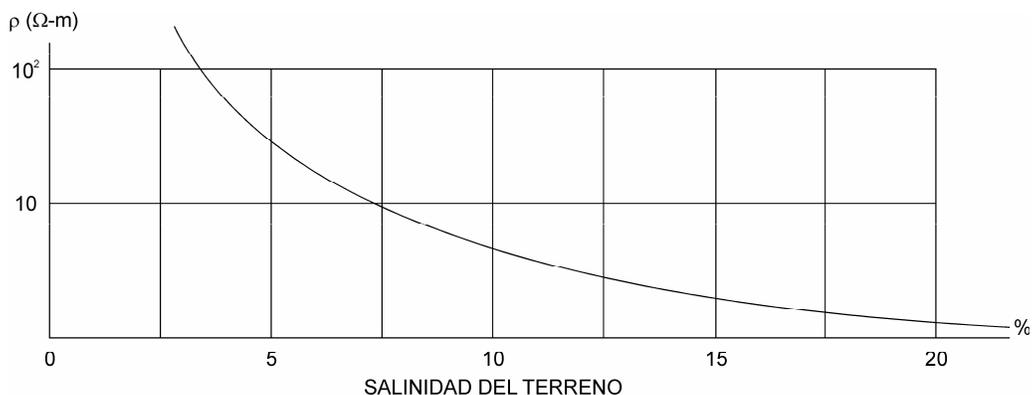


Figura 3.5
Variación de la resistividad con la salinidad (Jaimes y Torres)

3.2.5 Compactación

Cuando los suelos se compactan a una mayor energía, la relación de vacíos y la resistividad disminuyen ya que se logra una mejor conducción a través del agua que pueda contener el suelo como se muestra en el esquema de la Figura 3.6. Esto es de esperarse ya que a medida que se incrementa la energía de compactación –para un mismo contenido de agua– el grado de saturación se incrementa debido a que se reduce la relación de vacíos y por tanto la relación de vacíos disminuye.

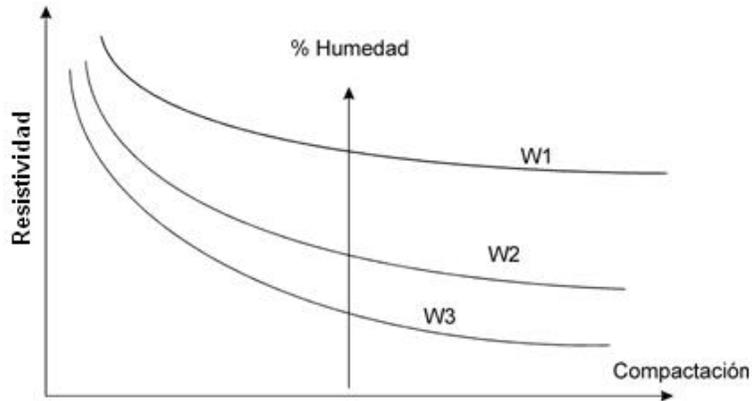


Figura 3.6
Variación de la resistividad en función de la compactación
 (www.eelecinc.cl/documentos/APUNTES/apuntes%20mallas%20a%tierra/apuntes/unidad2.pdf)

3.2.6 Estratificación del terreno

Una característica del material con el que se trabaja en el área de mecánica de suelos es la gran variedad de materiales que se puede tener en un área muy pequeña tanto en sentido vertical como horizontal. En consecuencia, las mediciones de resistividad que se llevan a cabo en el terreno por lo regular no corresponden a materiales homogéneos sino a un perfil de material heterogéneo. Por tanto, debido a que las capas no son uniformes en un terreno, cuando se mide la resistividad, en realidad se mide lo que se llama “resistividad aparente”. La Figura 3.7 muestra un perfil de suelo con sus respectivos valores de resistencia. Nótese que la resistencia para una arena puede tomar valores de 68 ohms y para una arcilla con arena valores de 185 ohms.

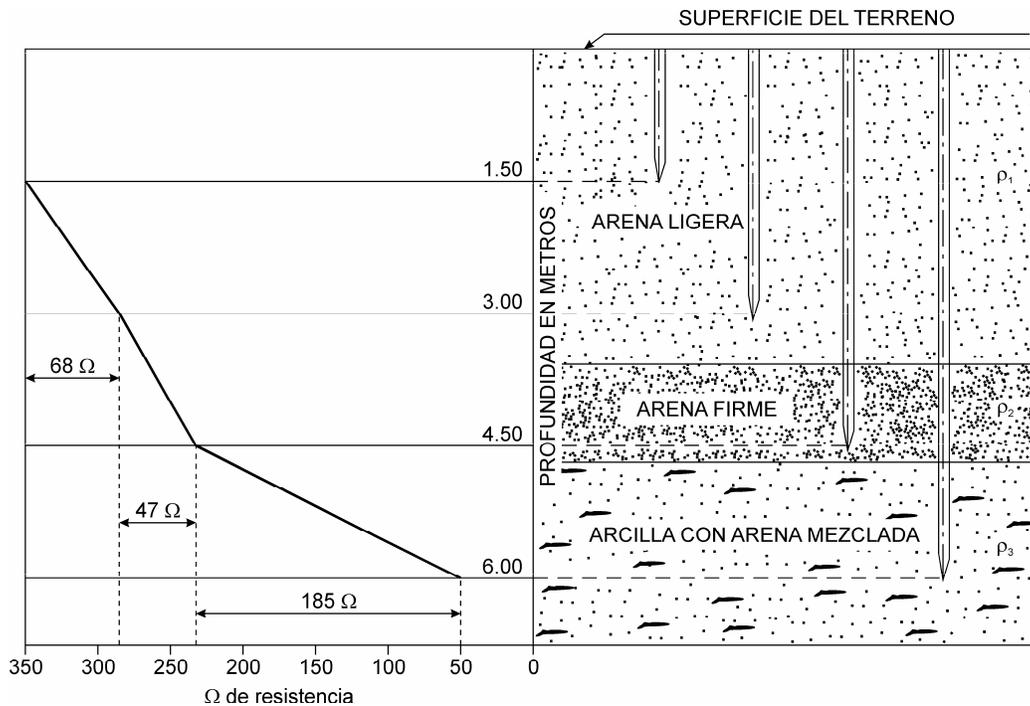


Figura 3.7
Variación de la resistividad en un perfil estratigráfico
 (bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079)

3.3 Métodos para evaluar la resistividad en campo y en laboratorio

3.3.1 Método Wenner

En 1915, el Dr. Frank Wenner del *U.S. Bureau of Standards* desarrolló la teoría de este método de prueba. Para medir la resistividad del suelo se colocan cuatro electrodos alineados y enterrados a una misma profundidad. La profundidad de medición depende de la distancia entre electrodos pero no del tamaño de los mismos.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C_1 y C_2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P_1 y P_2 . En las Figuras 3.8 y 3.9 se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos.

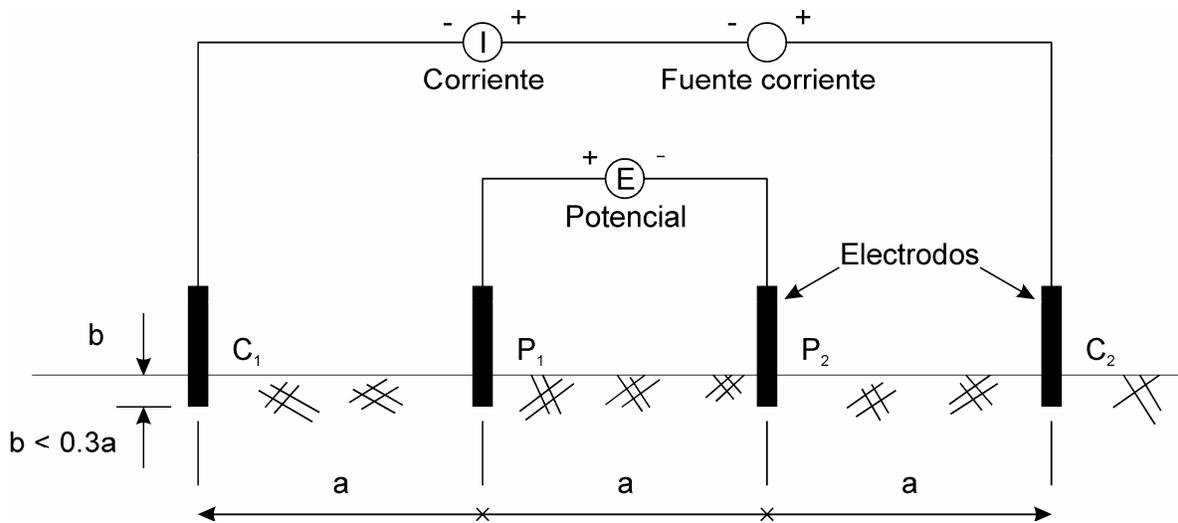


Figura 3.8
Medición de la resistividad del suelo con el método de Wenner o de los cuatro electrodos
(bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079)



Figura 3.9
Medición de la resistividad en campo

A partir de la información de disposición de electrodos y de la lectura de resistencia, la resistividad se calcula como:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot A \cdot R}{\left[1 + \left[\frac{2A}{(A^2 + 4B^2)^{0.5}} \right] - \frac{2A}{(4A^2 + 4B^2)^{0.5}} \right]} \quad (3.3)$$

Donde:

ρ = Resistividad promedio a la profundidad (A) (ohms-m)

A = Distancia entre electrodos (m)

B = Profundidad a la que se entierra el electrodo (m)

R = Lectura de resistencia (ohms)

3.3.2 Método Schlumberger

Este método es parecido al método Wenner con respecto a los cuatro electrodos que se utilizan; no obstante, los electrodos centrales (o de potencial) se mantienen a una distancia constante mientras que la distancia de los electrodos exteriores se va variando para que la profundidad de medición sea mayor (Figura 3.10).

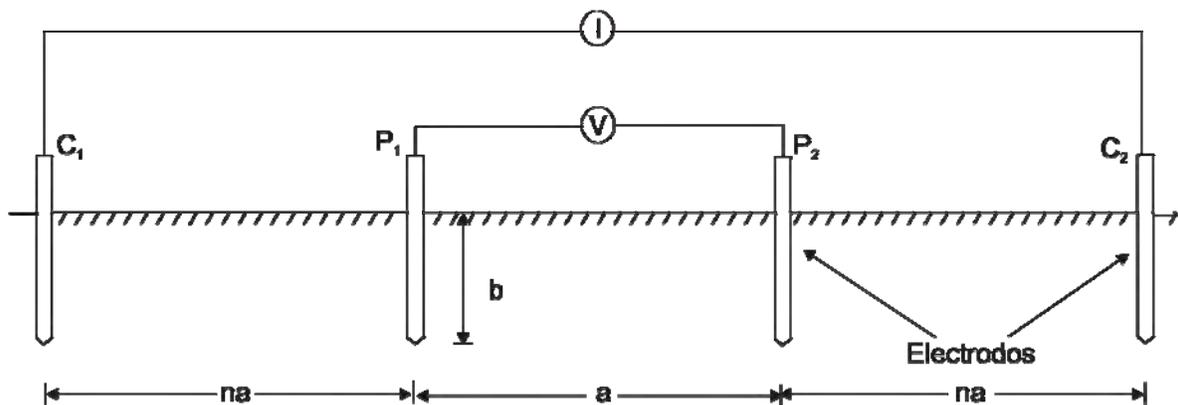


Figura 3.10
Disposición de los electrodos con el método Schlumberger

La ecuación para medir la resistividad con este método es:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (n + 1) \cdot na \quad (3.4)$$

3.3.3 Equipo ohmmapper

El equipo ohmmapper es un sistema para medir la resistividad del suelo en áreas amplias. Consiste de un dipolo receptor, un dipolo transmisor, batería y una consola donde se almacena la información. Cada dipolo está integrado por dos cables que funcionan como electrodos ensamblados al transmisor o al receptor, según corresponda.

El arreglo de electrodos utilizado en el ohmmapper es similar al arreglo dipolo-dipolo, en donde el transmisor inyecta la corriente y el receptor mide la diferencia de potencial (Figura 3.11 y 3.12).

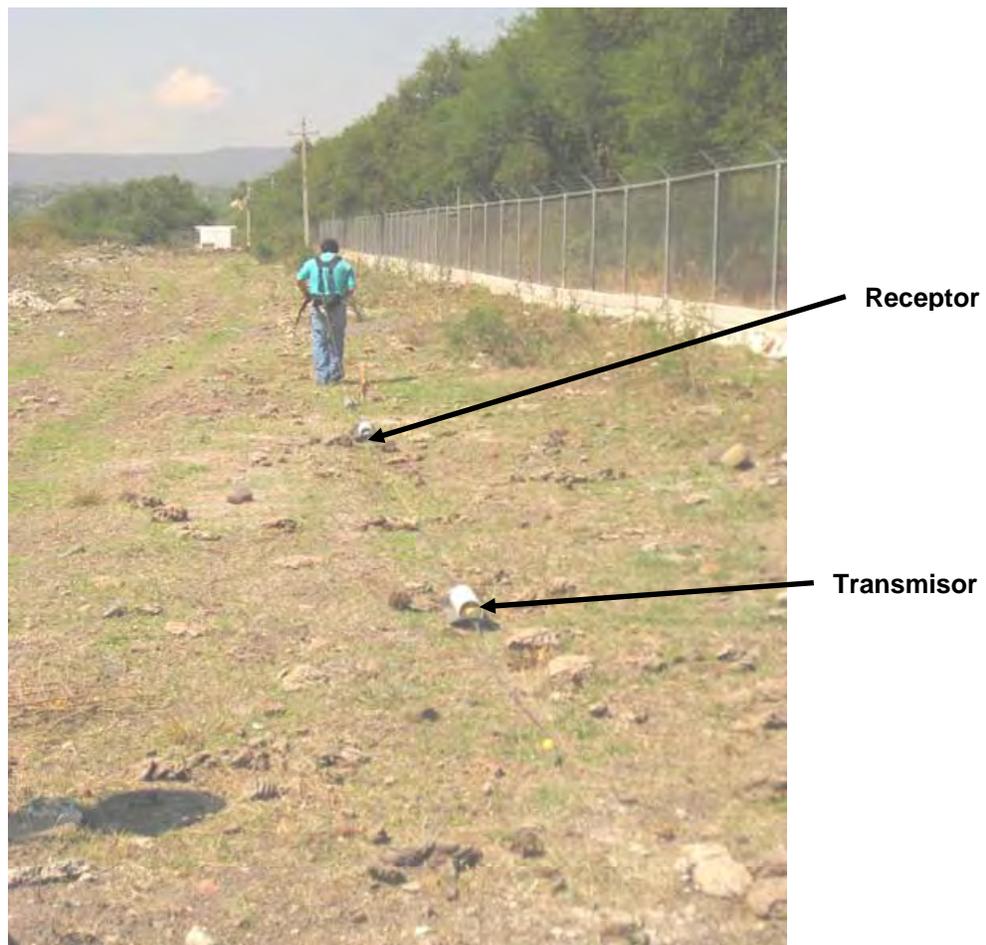


Figura 3.11 Arreglo del ohmmapper utilizado durante las mediciones



Figura 3.12

Determinación del perfil de resistividades con equipo ohmmapper

El transmisor del ohmmapper genera una corriente que se transmite al terreno a través de un cable dipolo no conectado a la tierra. Las características capacitivas del cable dipolo permiten que la corriente del transmisor fluya en la tierra. El cable dipolo receptor recibe el resultado de las medidas y el receptor la decodifica. Un cable no conductor (cuerda) mantiene una separación constante del dipolo receptor y transmisor para de esta manera arrastrar el arreglo sobre el suelo. La señal detectada es convertida en una señal digital óptica que es enviada a través de un cable de fibra óptica, donde es reconvertida en una señal eléctrica y enviada a la consola para su almacenamiento y posterior procesamiento (Flores, 2003).

La Figura 3.13 muestra un esquema completo del equipo. Se indican la posición del receptor, transmisor, los cables electrodos, así como la zona de medición; la profundidad a la que se realicen las mediciones dependerá de la longitud de la cuerda aislante.

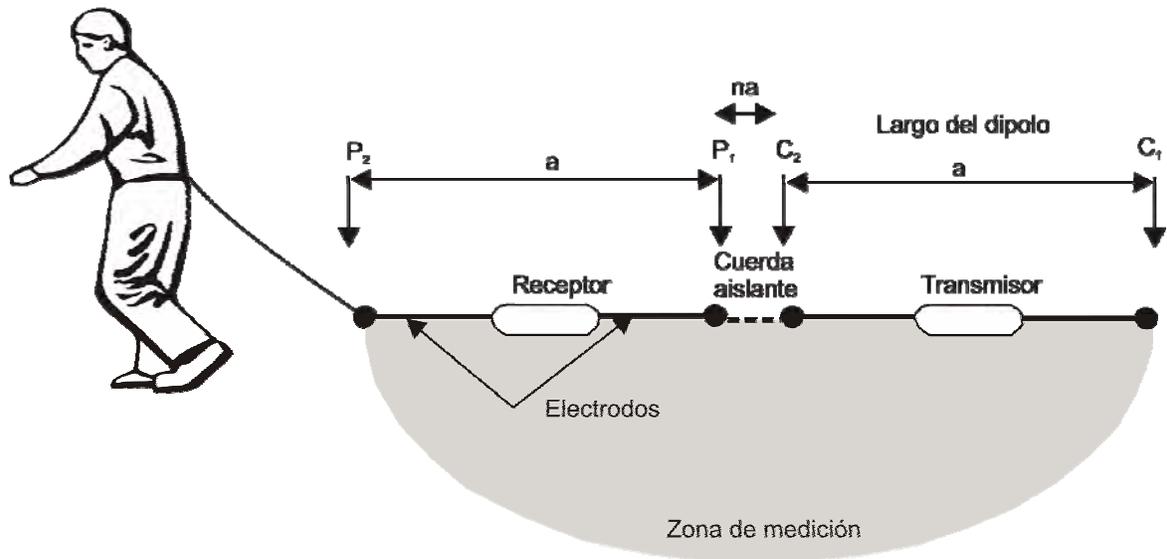


Figura 3.13
Arreglo dipolo-dipolo para el ohmmapper

La Figura 3.14 es un ejemplo de los perfiles de resistividad que se generan después de que los datos obtenidos en campo son procesados. Como se puede notar en la figura, el resultado es un perfil con zonas de diferentes colores a los que corresponden valores de resistividad de acuerdo con la escala que se encuentra en la parte inferior.

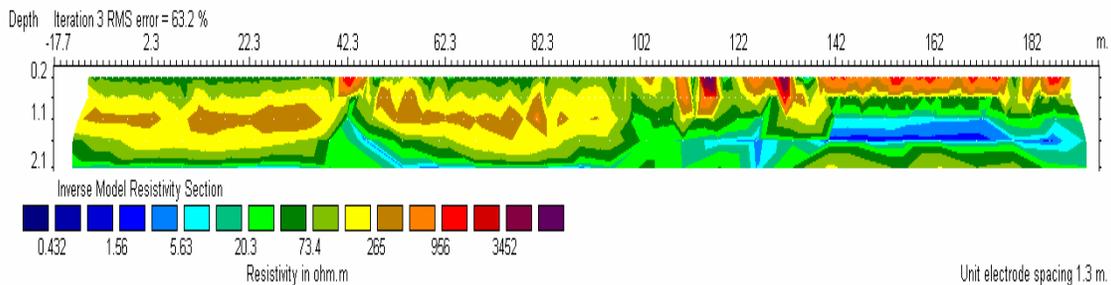


Figura 3.14
Perfil de resistividades obtenido con equipo ohmmapper

La diferencia del ohmmapper con los métodos tradicionales es que no se tiene conexión física del instrumento con el medio, es decir, no existen electrodos enterrados en el terreno como en caso del método Wenner o Schlumberg. Otra ventaja es la facilidad con la que se pueden determinar los perfiles de resistividad en tiempos relativamente cortos.

3.3.4 Método para determinar la resistividad en el laboratorio

Para evaluar la resistividad en el laboratorio de acuerdo con el procedimiento de prueba ASTM G 57, se debe colocar la muestra de material dentro de una caja rectangular de lucita la cual tiene conectados en los extremos los electrodos de corriente por medio de los cuales se induce ésta desde una fuente de poder (pila) y en los otros dos extremos se colocan los electrodos de potencial (Figura 3.15).



Figura 3.15
Caja de lucita para medir la resistencia de suelos según el procedimiento ASTM G 57

Este método resultó de poca utilidad en la investigación debido a la fragilidad de la caja ya que no soportó los niveles de energía que se aplicaron para compactar las muestras a los pesos volumétricos y contenidos de agua requeridos.

3.4 Valores típicos de resistividad en algunos materiales

Como ya se mencionó anteriormente, la resistividad varía en rangos muy amplios; por ejemplo, la resistividad del agua destilada es de unos 10^5 ohms-m, por tanto, puede considerarse como aislante. El agua que se encuentra en la naturaleza presenta, sin embargo, conductividad apreciable, pues siempre tiene disuelta alguna cantidad de sal, generalmente cloruro de sodio (NaCl).

Si la resistividad de las rocas dependiera únicamente de los minerales constituyentes, se consideraría como aislante en la mayoría de los casos, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, etc., prácticamente lo son. En el caso de que la roca tuviera minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora, es decir, sólo lo serían los materiales metálicos. No obstante, todas las rocas tienen presente una cierta cantidad de poros en los

que se puede alojar una determinada cantidad de agua lo que hace que la resistividad se reduzca. La resistividad de las rocas puede variar ampliamente en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros. La Figura 3.16 proporciona un esquema con los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales.

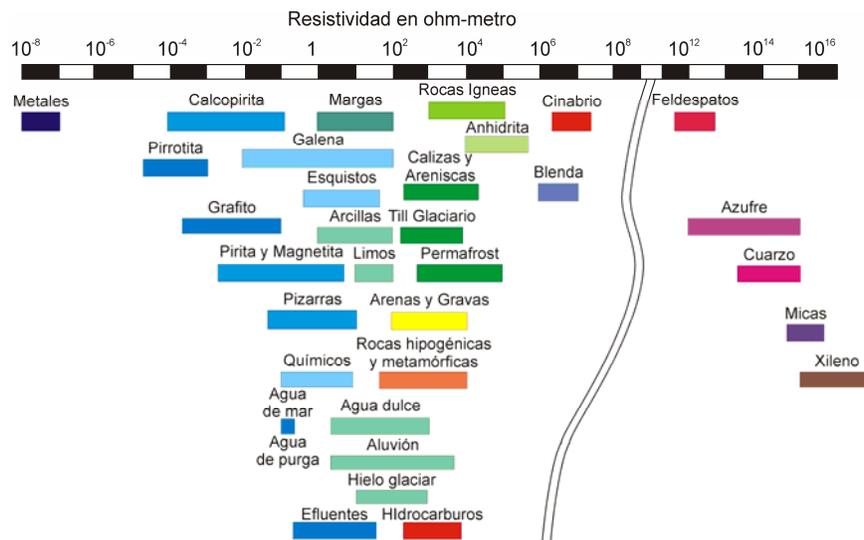


Figura 3.16
Gráfico de los valores de resistividad de diferentes rocas y minerales
 (www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=897)

La resistividad de los suelos tiene un margen de variación muy amplio. Un mismo suelo puede presentar diferentes resistividades con el tiempo debido a factores como la temperatura o la humedad, siendo el último el más determinante. Por tanto, es difícil estimar la composición del subsuelo solamente a partir de la medida de resistividad (www.edicionsupc.es/ftppublic/forum/FEEL0602).

Algunos otros autores presentan tablas en las cuales se muestran los valores de resistividad. Por ejemplo Dharmawidjaja, et al (2008) reportan la Tabla 3.2 donde se resumen los valores de resistividad de varios suelos y rocas.

Tabla 3.2
Resistividades de diversos suelos

Naturaleza del material	Resistividad en ohm-m
Terrenos pantanosos	de algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactadas	100 a 200
Arena arcillosa	30 a 40
Arena silíceas	50 a 500
Suelo con boleos cubierto de césped	200 a 3000
Suelo con boleos	300 a 500
Calizas blandas	1500 a 3000
Calizas compactadas	100 a 300
Calizas agrietadas	1000 a 5000
Pizarras	500 a 1000
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gneis procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gneis muy alterados	100 a 600

Los valores de resistividad que se tienen para limos, por ejemplo, varían entre 20 y 100 ohms-m. Es importante resaltar el hecho de que en la mayoría de las referencias el valor de resistividad que se muestra para una arcilla plástica es de 50 ohms-m; sin embargo, este valor depende del contenido de agua al que se este haciendo referencia, lo cual no se menciona en algunos de los documentos consultados.

Otra referencia (www.mct.dgf.uchile.cl/AREAS/geo_mod0.pdf) muestra los valores de resistividad de varios materiales. En este esquema sí se aprecia que el rango de variación de una arcilla puede estar entre 1 y 100 ohm-m (Figura 3.17).

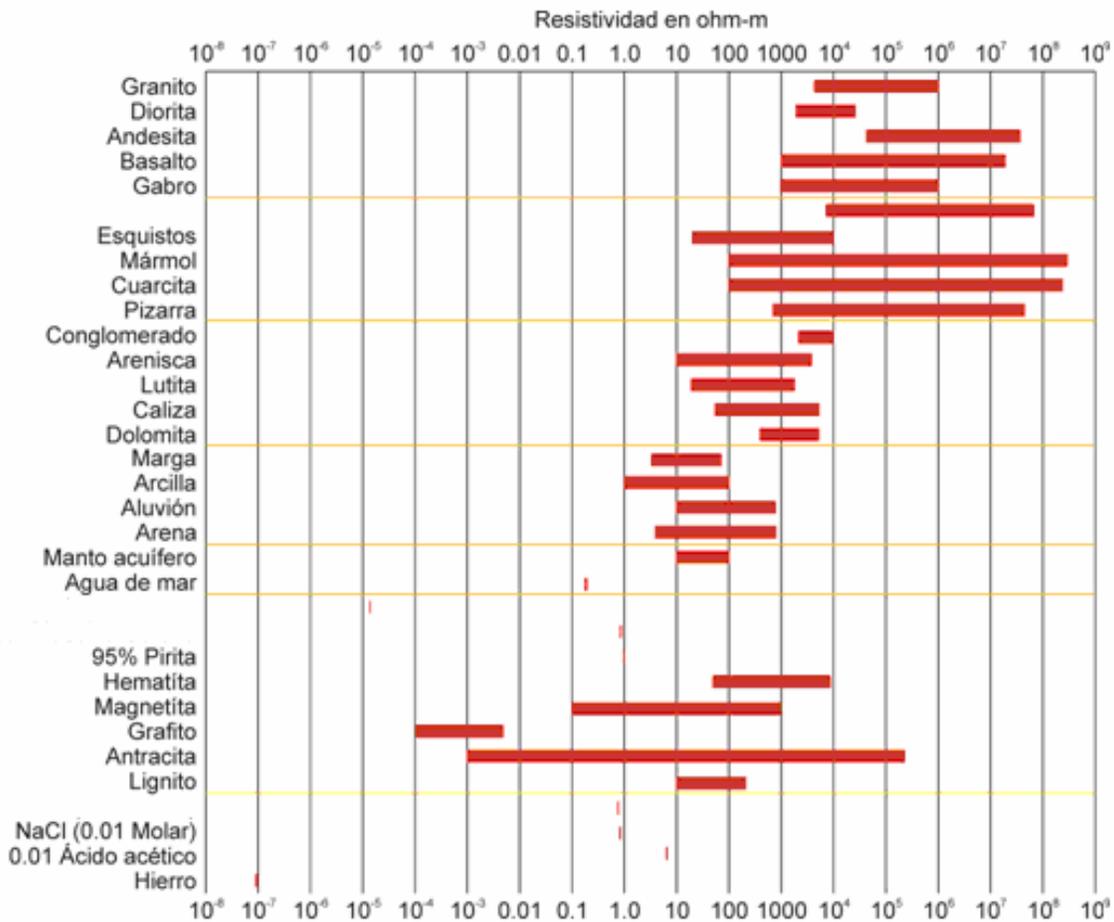


Figura 3.17
Resistividad en distintos medios geol3gicos

3.5 Mediciones de resistividad en laboratorio

Los estudios de laboratorio sobre resistividad en materiales compactados o inalterados son muy escasos, una de las referencias consultadas es la de Abu-Hassanein, et al. (1996) que publicaron resultados de mediciones de resistividad para cuatro tipos de suelo. Las pruebas se llevaron a cabo con muestras compactadas en un molde de PVC con las mismas dimensiones de un molde de compactaci3n Proctor est3ndar. Las energías utilizadas en la compactaci3n fueron la est3ndar, modificada y reducida. Para inducir la corriente se colocaron dos discos de cobre que se presionaron contra las caras del espécimen y la diferencia de potencial se midi3 con dos varillas de cobre colocadas en el centro de la muestra como se aprecia en la Figura 3.18.

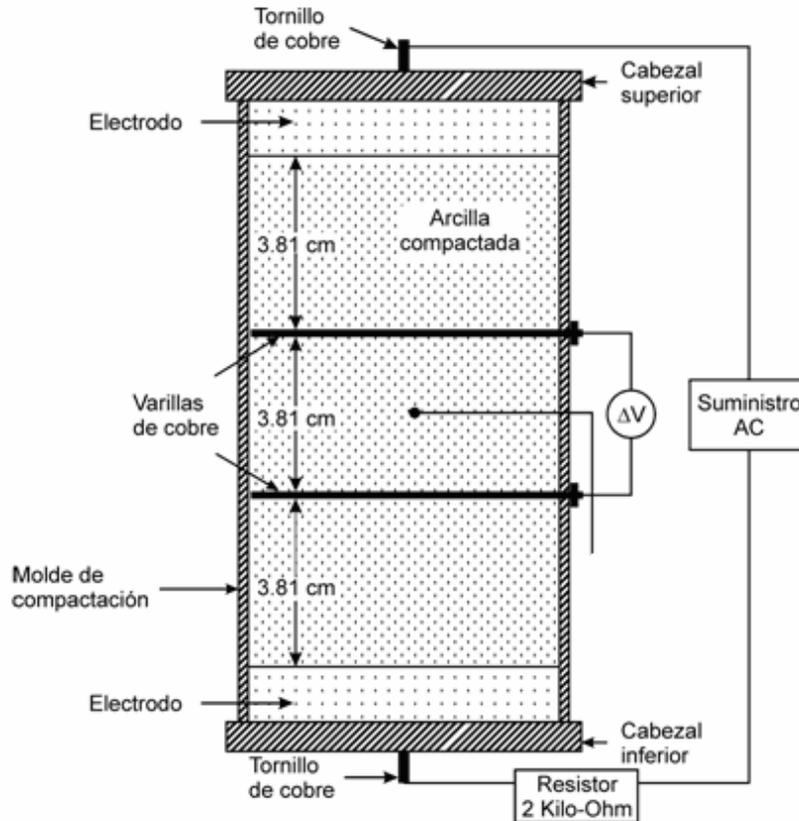


Figura 3.18
Esquema de la colocación de placas para inyectar corriente y varillas para medir la diferencia de potencial (Abu-Hassanein, et al. 1996)

Los resultados de este estudio mostraron que la resistividad de los materiales estudiados se reduce a medida que el contenido de agua y la energía de compactación se incrementan (Figura 3.19). Sin embargo, si se observan los resultados de la gráfica 3.19 (d), se nota que existe un cierto contenido de agua para el cual el valor de resistividad se mantiene prácticamente independiente de la energía de compactación.

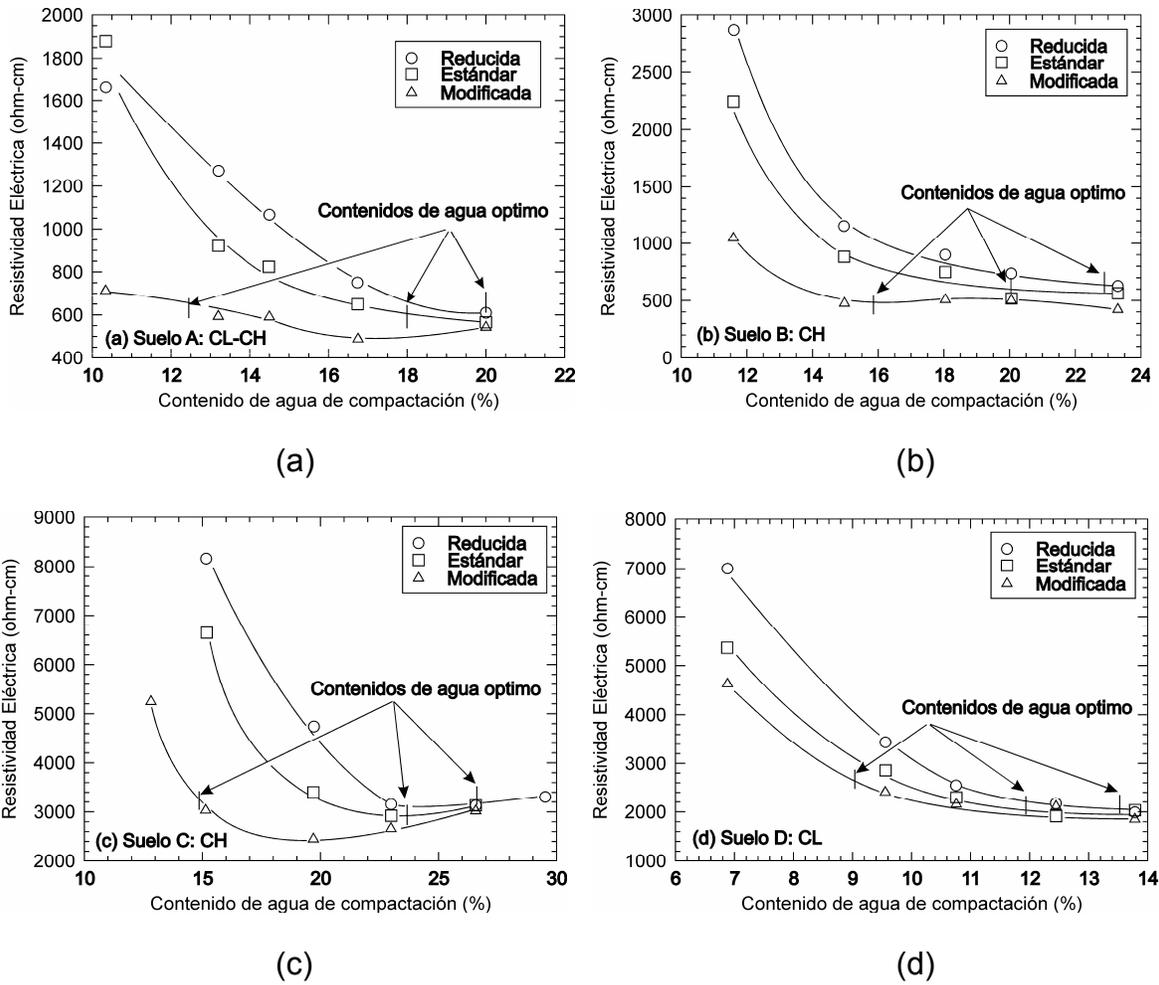


Figura 3.19
Resultados de resistividad para materiales finos compactados

Por otro lado, si los resultados de la figura anterior se grafican con respecto al grado de saturación inicial y no con el contenido de agua, el comportamiento muestra que existe una relación única entre resistividad y grado de saturación; por tanto, sería más útil esta relación que la que se obtiene con respecto al contenido de agua gravimétrico (Figura 3.20).

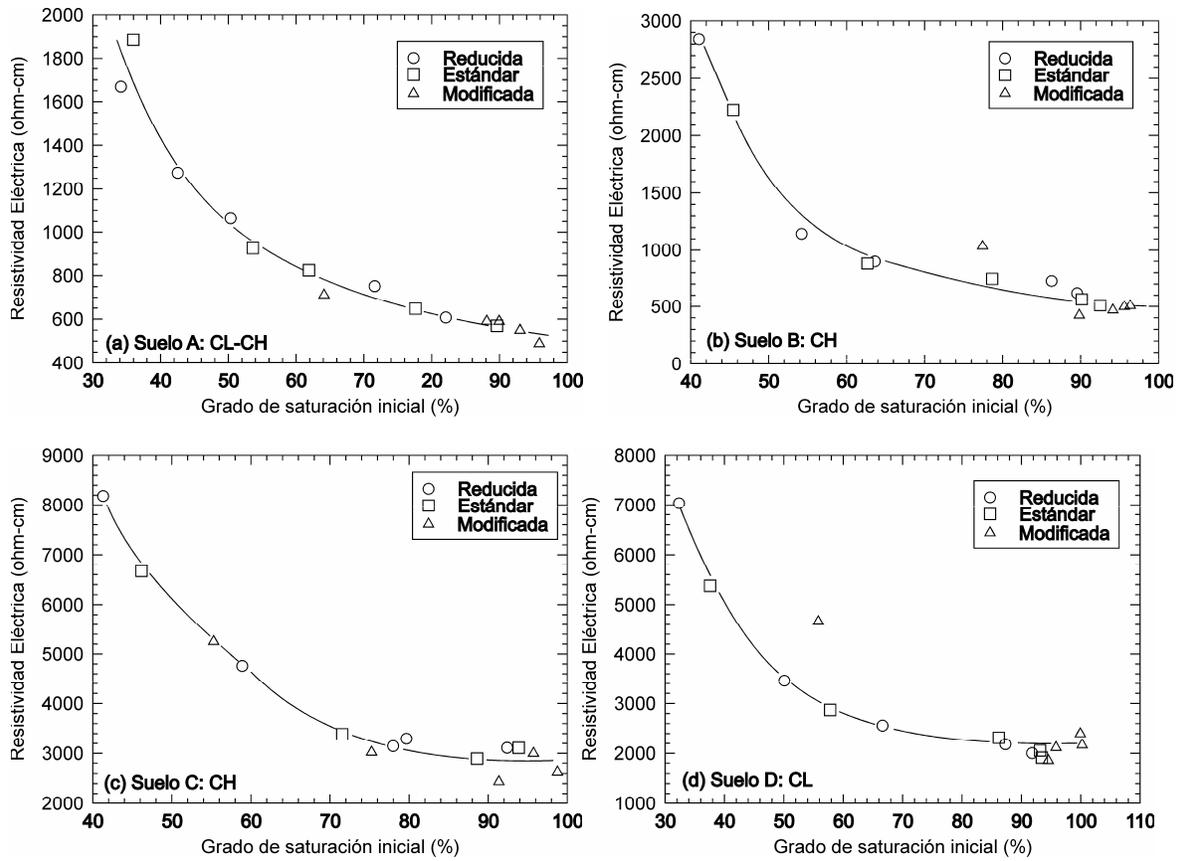


Figura 3.20
Relación entre resistividad y grado de saturación inicial

4 Medición de la resistividad en laboratorio y campo para este estudio

4.1 Procedimiento de laboratorio

Una vez que se obtuvieron las muestras con el peso necesario para el ensaye a través de cuarteos, el procedimiento de preparación fue el siguiente:

- Determinación del contenido de agua inicial de la muestra. Por ejemplo, $w_o = 3.0 \%$,
- Calcular el agua a adicionar para que la muestra alcance el contenido de agua requerido. Supongamos que el contenido de agua requerido es de 30% ,
- Antes de realizar el cálculo del agua a adicionar, es necesario conocer la cantidad de suelo que se va a preparar. Para el ejemplo se utilizará una muestra de $1\ 500\text{ g}$.
- El cálculo de agua a agregar es el siguiente:

$$\text{Peso suelo seco} = \frac{\text{Peso suelo húmedo}}{1 + \frac{w_o}{100}} = \frac{1500}{1 + \frac{3.0}{100}} = 1456.31\text{ g}$$

$$\text{Agua a agregar} = \frac{w_{\text{requerida}} - w_o}{100} \times \text{Peso seco} = \frac{30 - 3}{100} \times 1456.31$$

$$\text{Agua a agregar} = 393.20\text{ g}$$

- Se agrega el agua a la muestra y se mezcla hasta tener un material homogéneo,
- Se deja equilibrar durante 24 horas para que el agua se distribuya en todo el material,
- Se calcula la cantidad de material que debe compactarse en el molde para alcanzar el peso volumétrico requerido. Por ejemplo, para el tipo de mediciones que se llevaron a cabo se utilizó un molde cuadrado de 10 cm

de lado por 10 cm de profundidad. Entonces el calculo del material a compactar fue de la siguiente forma:

$$\text{Área del molde} = 100 \text{ cm}^2$$

Volumen del molde = 1030 cm^3 (Nota: La altura del molde se considera 10.3 cm para que se tenga un espesor de suelo para poder enrasar la muestra),

Considerando que el peso volumétrico seco requerido es de 12.6 kN/m^3 (1.284 g/cm^3), entonces el material húmedo a compactar es:

El peso volumétrico seco de la muestra es:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{W_{\text{requerida}}}{100}}$$

Despejando γ_m de la anterior ecuación se tiene:

$$\gamma_m = \gamma_d \left(1 + \frac{W_{\text{req}}}{100} \right) = 1.284 \left(1 + \frac{30}{100} \right) = 1.669 \text{ g/cm}^3$$

El peso volumétrico de la muestra se define como:

$$\gamma_m = \frac{\text{Peso de la muestra}}{\text{Volumen de la muestra}}$$

Por tanto,

$$\text{Peso de la muestra} = \gamma_m \times \text{Volumen de la muestra}$$

$$\text{Peso de la muestra} = 1.669 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} (1030 \text{ cm}^3) = 1719.07 \text{ g}$$

- Una vez calculado el peso del material, se compacta en el molde con el número de capas especificada (Figura 4.1)



Figura 4.1
Compactación de la muestras para medir resistividad

- Se extrae el espécimen del molde y se enrasa,
- Se determinan sus dimensiones y su peso,
- Finalmente se mide el valor de resistencia. Para llevar a cabo esta medición, en la cara superior e inferior del espécimen se colocan dos placas de lucita las cuales a su vez tienen una placa de acero de 10 cm de lado (mismas dimensiones de la superficie del espécimen) que sirven como medio para transmitir la corriente del equipo al suelo (Figura 4.2).



Figura 4.2
Equipo para medir la resistencia de la muestra compactada

- El último punto del procedimiento de prueba es disgregar la muestra y determinar su contenido de agua de acuerdo con el procedimiento ASTM 2216.
- El valor de resistencia se convierte a resistividad con la ecuación 2.

4.2 Procedimiento de campo

El procedimiento para medir la resistividad de campo es el siguiente:

1. Ensamblar el equipo ohmmapper (transmisor, receptor, consola de adquisición de datos, cuerdas no conductoras, etc.) y posteriormente sujetar todo el sistema ya sea a la persona o al vehículo que lo arrastrará (Figura 4.3),



Figura 4.3
Ensamble del equipo

2. Si las mediciones se van a realizar sobre una línea (caso de esta investigación), después de sujetar el equipo a la persona o vehículo, se arrastra a una velocidad constante. Cabe mencionar que en el primer arrastre la longitud de cuerda no conductora fue de 1.25 m,
3. Al llegar al final de la línea se pueden tomar mediciones de regreso o se recoge el equipo para iniciar el siguiente arrastre,
4. Se repiten los pasos 2 y 3 para las longitudes de cuerda no conductora restantes, las cuales dependerán de la profundidad de medición.
5. Finalmente se realiza en análisis de los datos de campo con el paquete RES2DINV para obtener el perfil de resistividades.

Cabe mencionar que un perfil de resistividades se obtiene a partir de las diferentes mediciones obtenidas con las diferentes longitudes de cuerda no conductora, ya que cada una de ellas proporciona datos a una cierta profundidad.

5 Discusión de resultados de campo

5.1 Resultados de campo

Las mediciones de perfiles de resistividad se llevaron a cabo en cinco tramos de carreteras cercanos al Instituto Mexicano del Transporte; la longitud de cada tramo fue de 200 m y se eligieron de tal forma que las condiciones de estratigrafía fueran diferentes para cada uno de ellos.

Los tramos monitoreados se localizan en la carretera Querétaro-Galindo, entre el CENAM (Centro Nacional de Metrología) y el poblado la Venta. Los nombres que se dieron a cada uno de ellos fueron:

- Tramo 1: La Venta
- Tramo 2: Instituto Mexicano del Transporte
- Tramo 3: Sanfandila
- Tramo 4: Los Cues
- Tramo 5: CENAM

Las mediciones de los perfiles de resistividad se realizaron en los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto y noviembre de 2007.

5.1.1 Perfiles estratigráficos

En mayo de 2007 se realizaron tres pozos a cielo abierto en cada uno de los tramos; éstos se distribuyeron a lo largo de los 200 m para determinar el perfil estratigráfico. En las Figuras 5.1 a 5.10 se pueden observar los perfiles de cada uno de los pozos. Cabe mencionar que el suelo que más predomina en la zona son las arcillas de alta plasticidad con boleos en la parte superficial y subyacen boleos cementados con suelos limosos.

La Figura 5.1 muestra las fotografías de cada uno de los pozos realizados en el tramo 1, de igual forma se observa una vista de las condiciones circundantes del mismo.



(a)



(b)



(c)

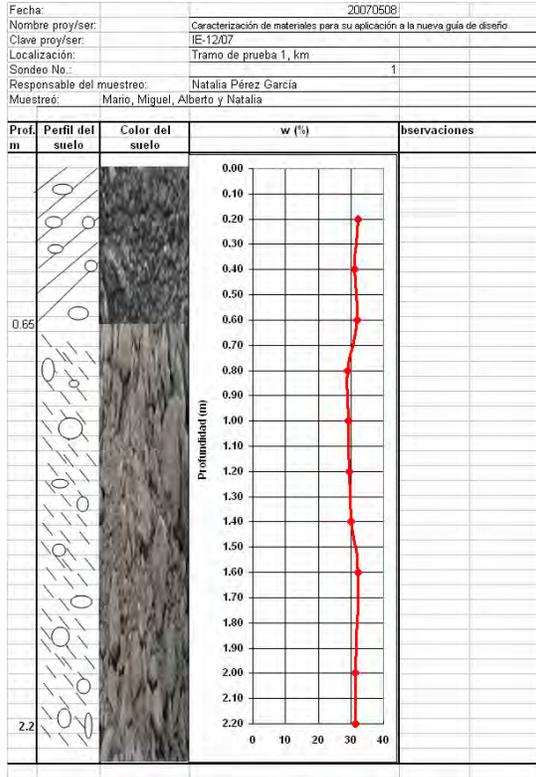


(d)

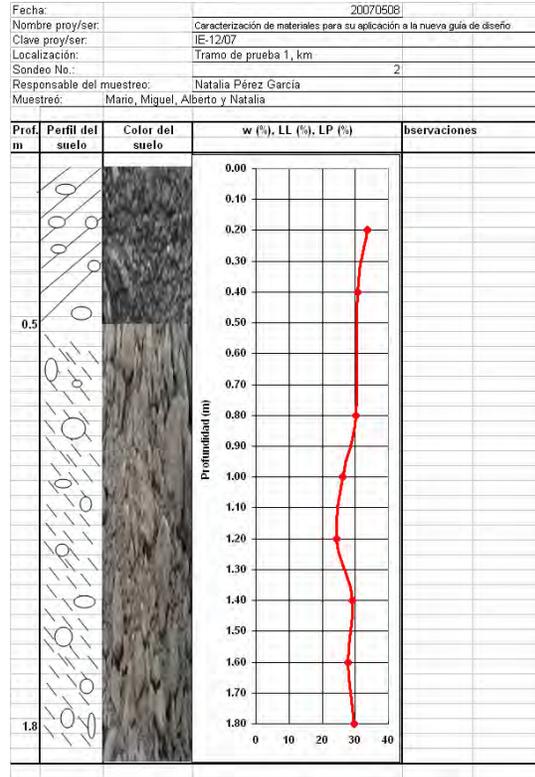
Figura 5.1

Tramo La Venta. (a) Perfil de suelo del pozo 1; (b) Perfil del pozo 2; (c) Perfil del pozo 3; (d) Vista del tramo carretero y localización de pozos

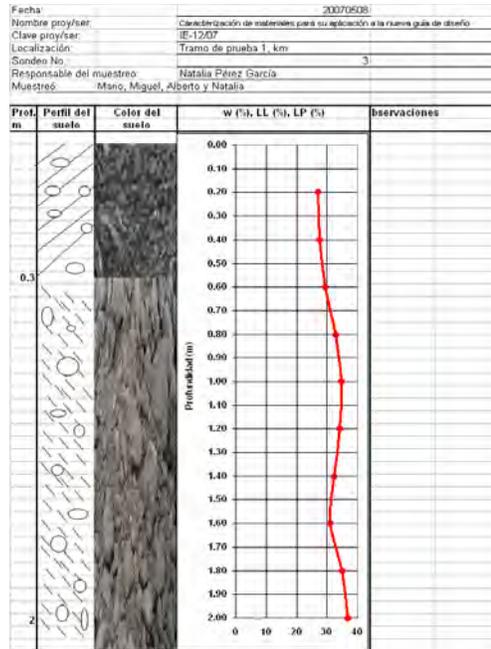
La Figura 5.2 muestra los perfiles de cada uno de los pozos del tramo 1 así como la distribución de los contenidos de agua de los materiales alterados que se muestrearon en ese momento. En esta figura se ilustra que el perfil de suelo se encuentra constituido por una arcilla negra de alta plasticidad con boleos en una profundidad que va desde 0.3 a 0.6 m. A esta arcilla subyace otra arcilla pero de un color café claro hasta una profundidad de aproximadamente 2.0 m que fue la profundidad a la que se realizaron los pozos. Nótese también que el contenido de agua en todo el perfil es aproximadamente 30 % para los pozos 1 y 2 y para el pozo 3 se encuentran entre 28 y 38 %.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.2
Tramo 1. (a) Pozo 1; (b) Pozo 2; (c) Pozo 3

Para el tramo localizado frente al Instituto Mexicano del Transporte, la mayor parte del perfil está formado por una capa superficial de arcilla a la que subyacen boleos empacados en un limo claro (Figura 5.3). En la Figura 5.3 (c) también se observa el tramo y la localización del pozo 3.



(a)



(b)



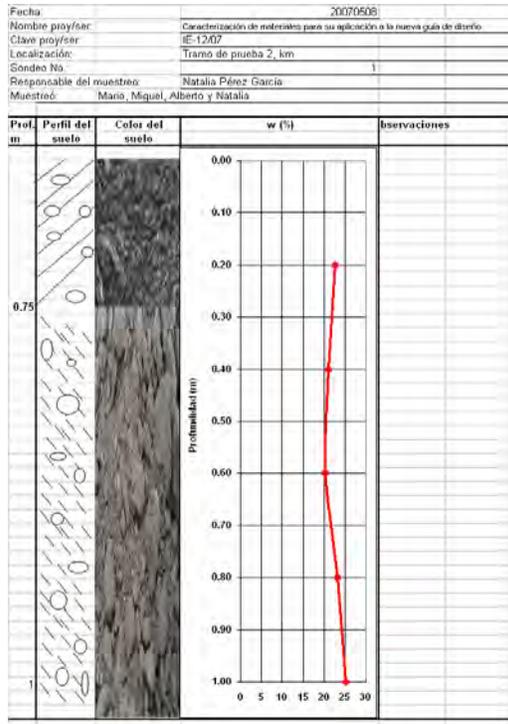
(c)



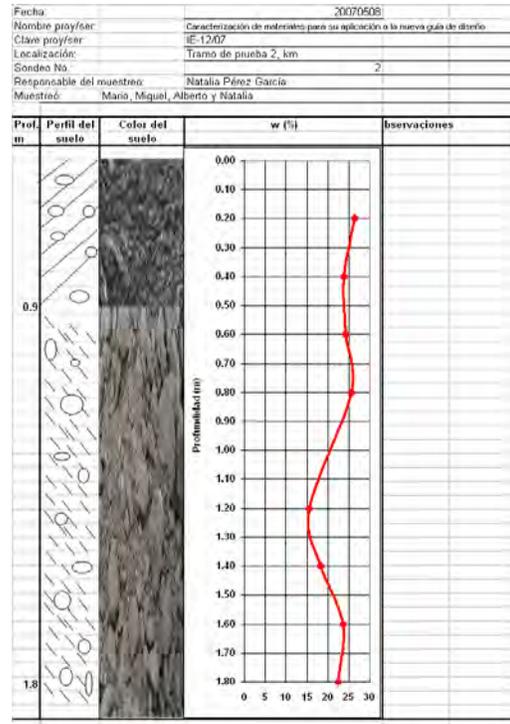
(d)

Figura 5.3
Tramo Instituto Mexicano del Transporte. (a) Pozo 1; (b) Pozo 2; (c) Pozo 3 y (d) Vista del tramo

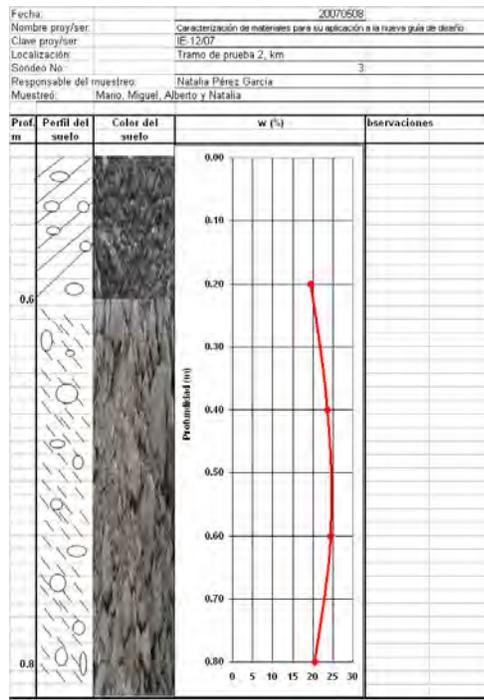
Los contenidos de agua para los materiales (arcilla negra y boleos empacados en limo) de estos pozos variaron entre 20 y 25 % aproximadamente para los materiales del pozo 1 y 3 (Figura 5.4).



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4
Tramo 1. (a) Pozo 1; (b) Pozo 2; (c) Pozo 3

En el tramo Sanfandila, el suelo está constituido por una capa de arcilla negra con boleos a la que subyace una capa de arcilla color café claro (Figura 5.5). Como se puede notar, en esta área ya no se presenta la capa de boleos cementados con limo que se tenía en el tramo anterior a pesar de que la distancia que los separa no es muy grande.



(a)



(b)



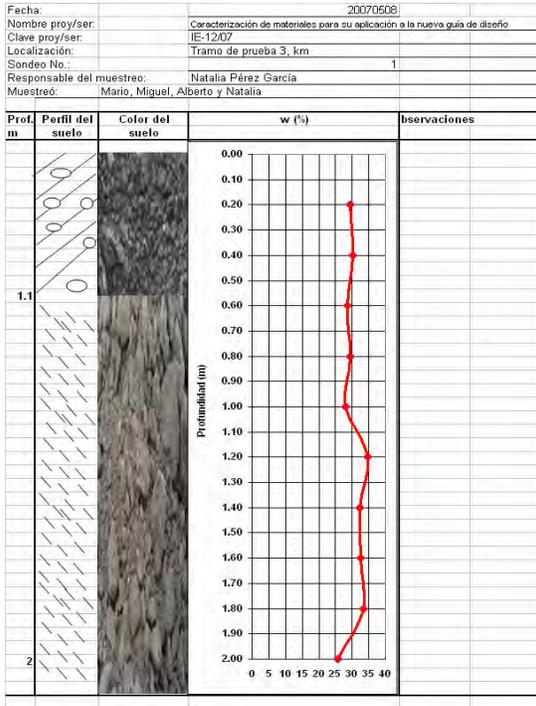
(c)



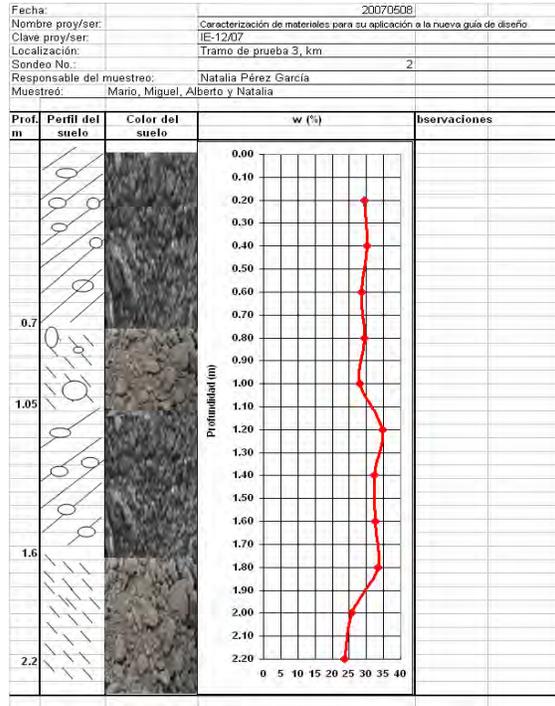
(d)

Figura 5.5
Tramo Sanfandila. (a) Pozo 1; (b) Pozo 2; (c) Pozo 3 y (d) Vista del tramo

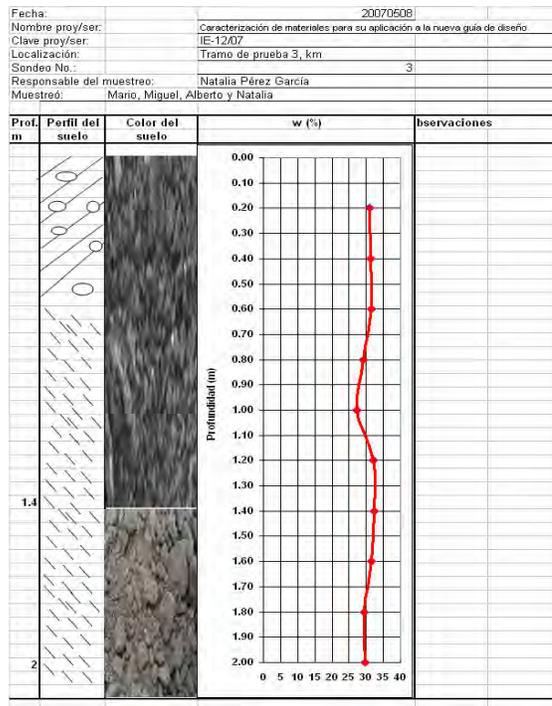
Para esta sección los resultados son interesantes ya que con la distribución de valores de contenido de agua del pozo 1 se puede observar que se tienen dos estratos bien definidos, uno hasta 1.0 m y el segundo hasta 2.0 m que fue la profundidad de muestreo (Figura 5.6).



(a)



(b)



(c)

Figura 5.6
Tramo 1. (a) Pozo 1; (b) Pozo 2; (c) Pozo 3

En el tramo de los Cues se realizaron dos pozos a cielo abierto de los cuales se determinó que el perfil de suelo está compuesto por una capa superficial de arcilla con boleos y subyace una capa de boleos empacados en un limo color blanco (Figura 5.7). La distribución de contenido de agua muestra que el promedio en este tramo es aproximadamente 20 % en el primer pozo y hay una mayor variación en el segundo (Figura 5.8).



(a)



(b)

Figura 5.7
Tramo Los Cues. (a) Pozo 1; (b) Pozo 2

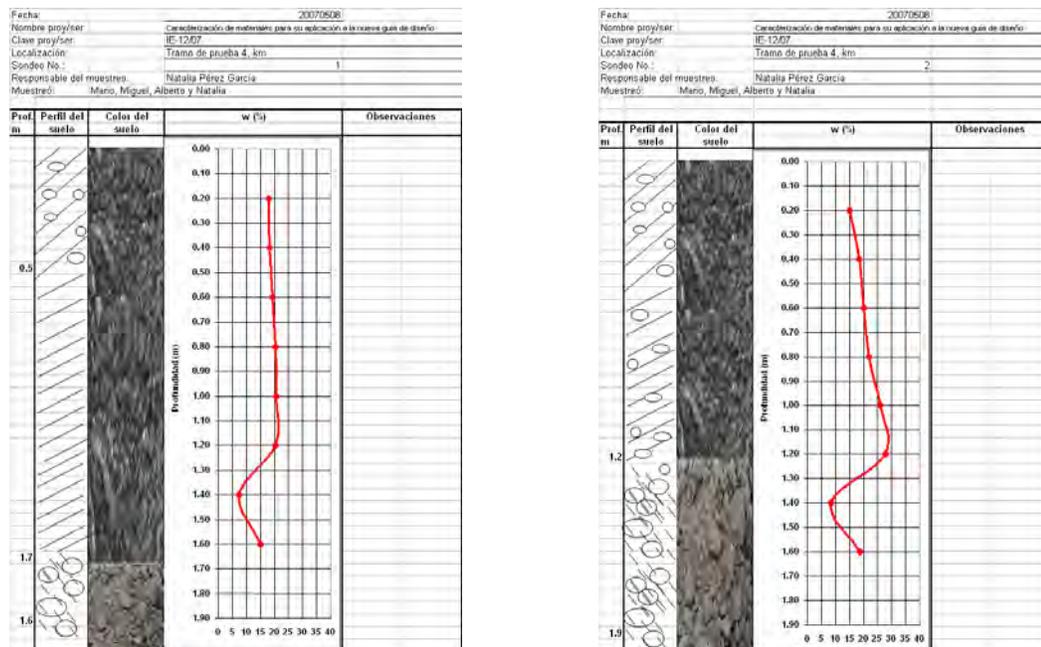


Figura 5.8
Tramo Los Cues. (a) Perfil del pozo 1; (b) Perfil del pozo 2

Con respecto a la sección 5 localizada frente al Centro Nacional de Metrología (CENAM), los estratos están formados por una capa de arcilla de alta compresibilidad hasta una profundidad de 1.8 m a la que subyace un estrato de roca. Las fotografías muestran la presencia del material llamado localmente “tepetate”, sin embargo, éste corresponde al material usado en la construcción de la carretera (Figura 5.9).

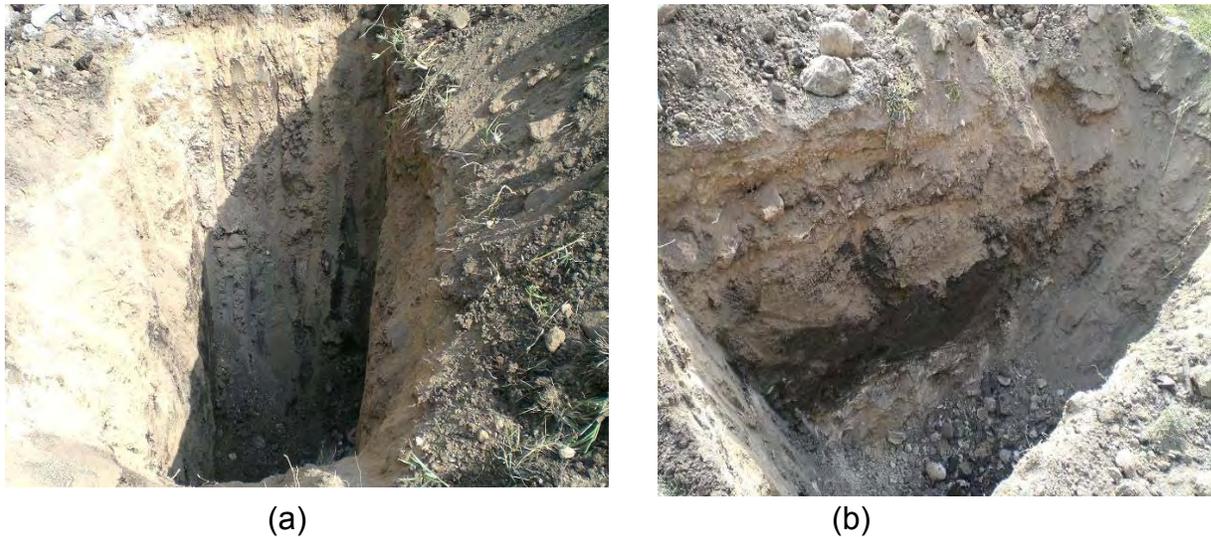
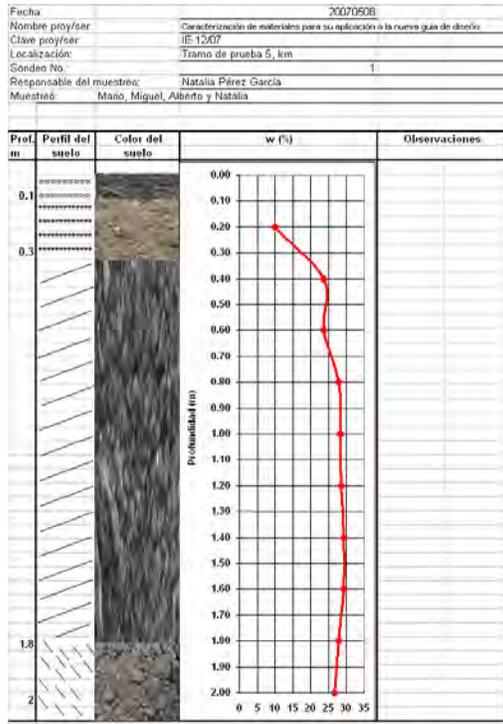


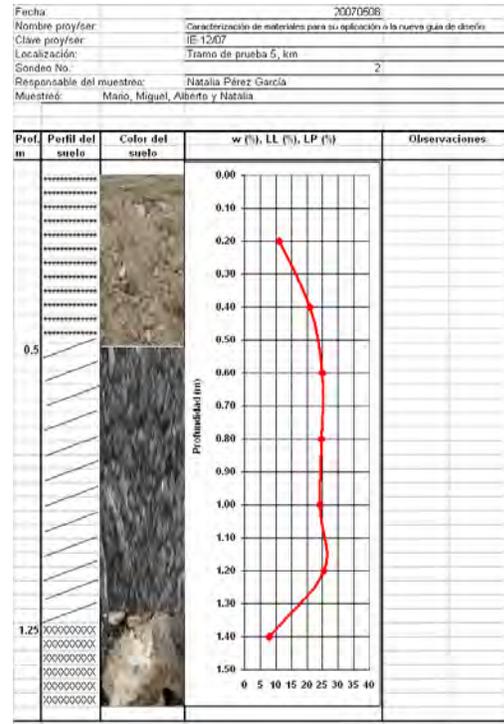
Figura 5.9
Tramo CENAM. (a) Pozo 1; (b) Pozo 2

Los perfiles de contenido de agua nuevamente parecen definir los estratos de materiales que se tienen. Nótese por ejemplo que en el pozo 1 de 0.3 a 1.8 m se tiene una capa de arcilla y el contenido de agua en esta profundidad es prácticamente constante, a partir de esta profundidad el contenido de agua tiende a reducirse ya que la arcilla cambia a una de color más claro. De igual forma para el pozo 2, el contenido de agua para la profundidad de 0.5 a 1.25 m se mantiene constante (aproximadamente 25 %) y el suelo en dicha profundidad es una arcilla de alta compresibilidad (Figura 5.10). Por tanto, con estos resultados puede decirse que la variación de contenido de agua sí proporciona una idea de la distribución de los diferentes materiales en un área.

Como puede observarse de los perfiles de cada uno de los tramos, los materiales que conforman cada sección van desde arcillas de alta compresibilidad, baja compresibilidad, boleos empacados en limos y roca, por tanto, es de esperarse que los perfiles de resistividad muestren valores muy variados.



(a)



(b)

Figura 5.10
Tramo CENAM. (a) Perfil del pozo 1; (b) Perfil del pozo 2

5.1.2 Perfiles de resistividad

En el inciso siguiente se muestra únicamente la discusión de los resultados de los tramos La Venta, CENAM y Los Cues, ya que para los otros dos las conclusiones son similares. En el anexo A se muestran los perfiles de los tramos 2 y 3.

5.1.2.1 Perfiles de resistividad para el tramo La Venta

En la Figura 5.11 se colocaron los perfiles correspondientes a los meses de abril, junio, julio, agosto y noviembre. Esta figura además tiene una cuadrícula de tal forma que se puedan obtener valores de resistividad a ciertas profundidades y cadenamientos para los diferentes meses de estudio. Por ejemplo, la Tabla 5.1 contiene los valores de resistividad para una profundidad de 1.1 m y a cadenamientos de 2.3, 62.3 y 122 m.

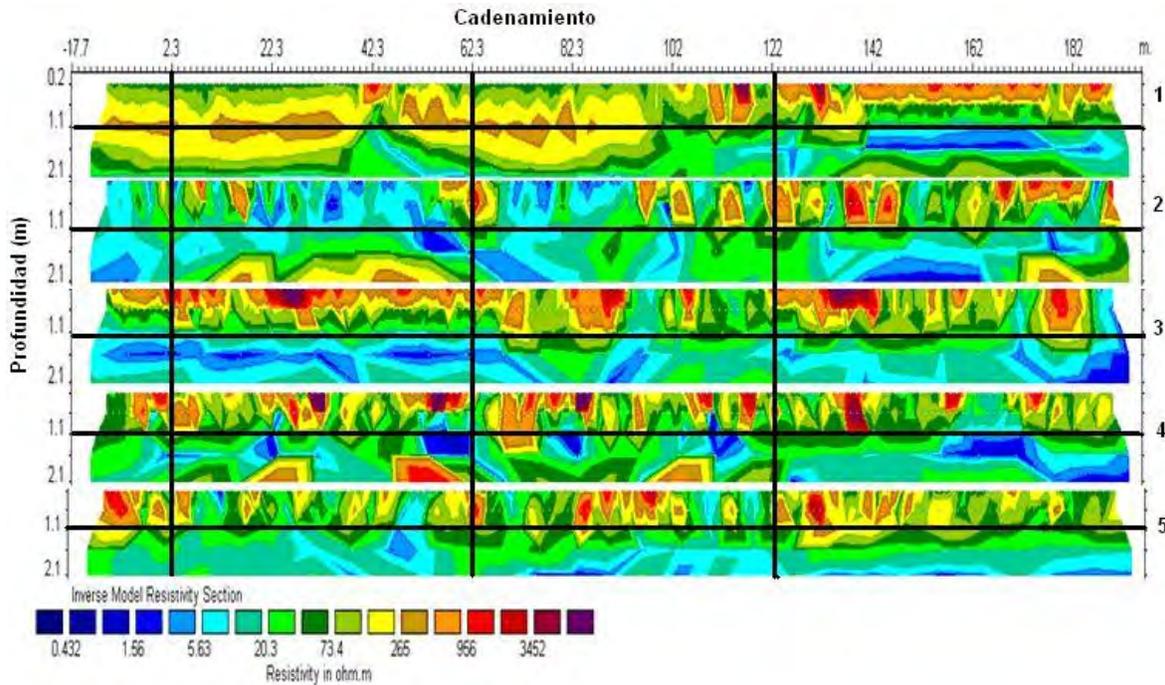


Figura 5.11
Tramo 1. Perfiles de resistividades en los meses abril, junio, julio, agosto y noviembre (iniciando con el de la parte superior)

Tabla 5.1
Datos de resistividad

Cadenamiento 2.3 m		Cadenamiento 62.3 m		Cadenamiento 122 m	
Mes	Resistividad Ohms-m	Mes	Resistividad Ohms-m	Mes	Resistividad Ohms-m
Abril	503.5	Abril	956	Abril	139.5
Junio	38.6	Junio	73.4	Junio	139.5
Julio	10.7	Julio	20.3	Julio	20.3
Agosto	38.6	Agosto	10.7	Agosto	73.4
Noviembre	38.6	Noviembre	73.4	Noviembre	73.4

Graficando los resultados de la Tabla 5.1 junto con las fotografías que se tomaron el día de las mediciones, se observa que en abril donde se tiene un clima seco, los valores de resistividad son los más altos, sin embargo, para los meses de junio, julio y agosto donde ya se presentaron lluvias (de acuerdo con el aspecto de la vegetación del área) la resistividad de los materiales a la profundidad considerada disminuye. En noviembre donde nuevamente el suelo está seco, las resistividades tienden a incrementarse (Figura 5.12).

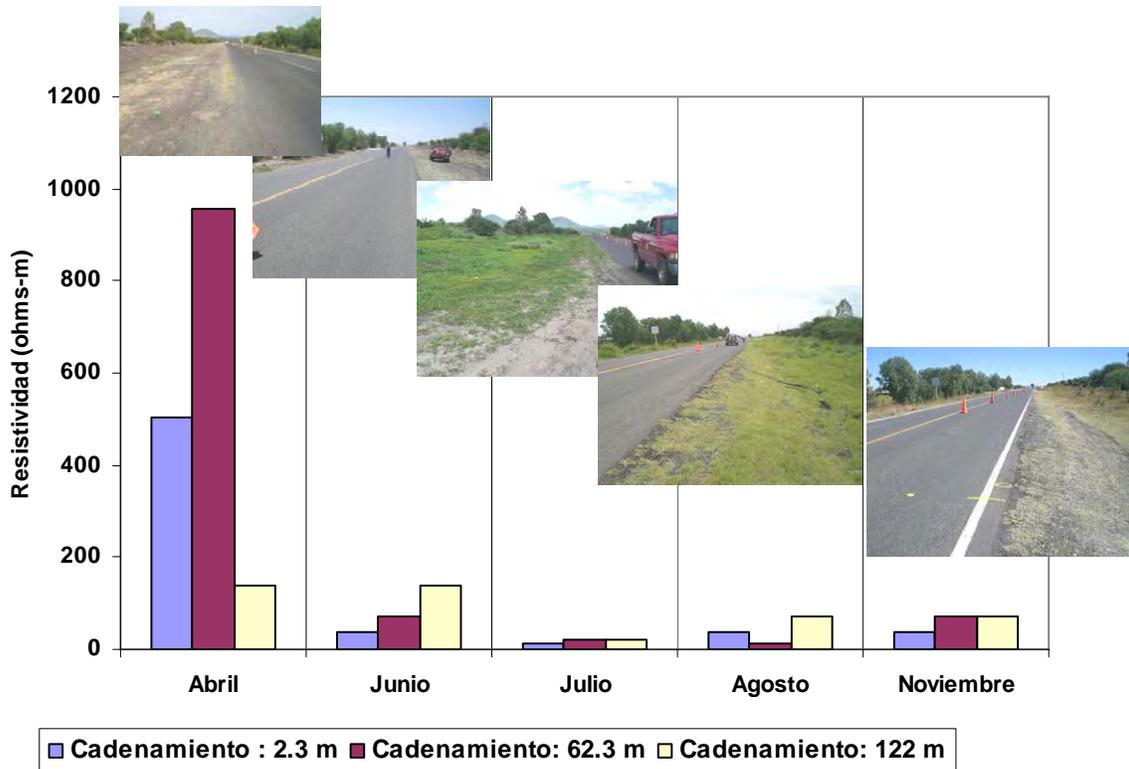


Figura 5.12
Tramo 1. Valores de resistividad en los cadenamientos 2.3, 62.3 y 122 m

5.1.2.2 Perfiles de resistividad para el tramo CENAM

La Figura 5.13 muestra todos los perfiles de resistividad obtenidos del tramo CENAM. De éstos se puede notar que existen algunos meses en los cuales se definen capas de resistividad similar (marzo, abril y julio). Si se toma en cuenta que los perfiles de los pozos a cielo abierto muestran que entre 30 y 50 cm se tiene un relleno y después una arcilla negra de alta plasticidad, pareciera ser que el valor de resistividad de 139.5 ohms-m corresponde al segundo material (CH). Por otro lado, si se observa el perfil de resistividades de julio, las capas inferiores disminuyen su resistividad, es decir, el contenido de agua seguramente se incrementó ya que puede ser la única razón de la variación observada, además, también se presentaron lluvias como se puede notar en las fotografías de la Figura 5.14.

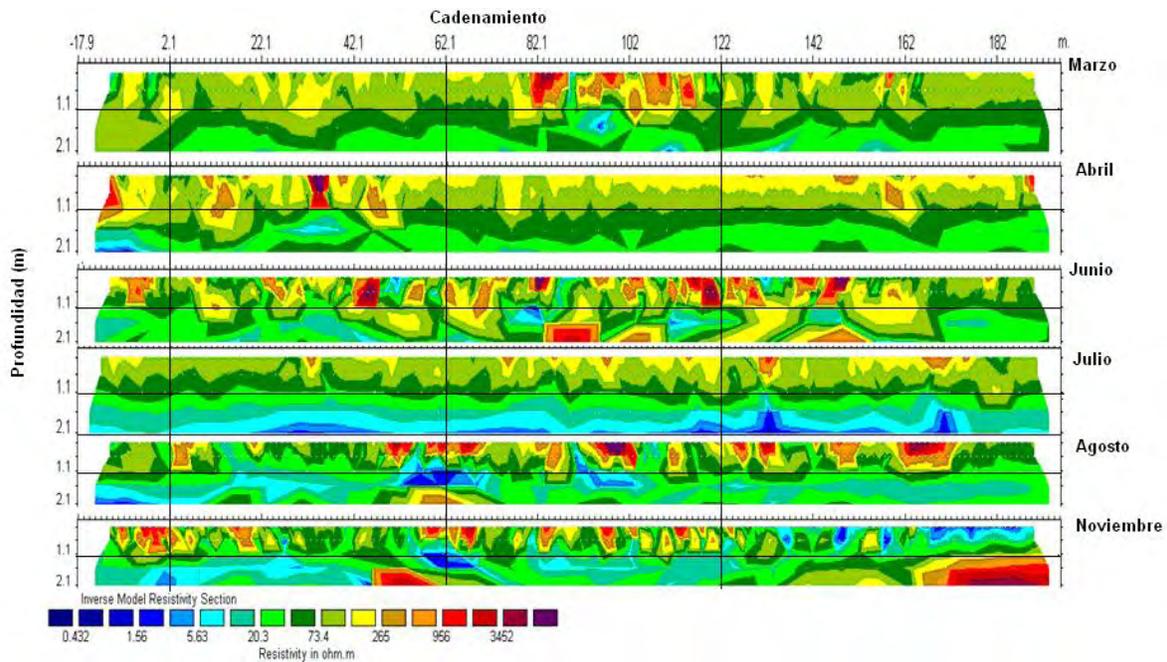


Figura 5.13
Tramo CENAM. Perfiles de resistividad y cuadrícula para obtener información para análisis

Si se obtienen los valores de resistividad en los cadenamientos 2.1, 62.1 y 122 m a una profundidad de 1.1 m se obtienen los datos mostrados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2
Datos de resistividad del tramo CENAM a una profundidad de 1.1 m

Cadenamiento 2.1 m		Cadenamiento 62.1 m		Cadenamiento 122 m	
Mes	Resistividad Ohms-m	Mes	Resistividad Ohms-m	Mes	Resistividad Ohms-m
Marzo	265	Marzo	73.4	Marzo	73.4
Abril	139.5	Abril	73.4	Abril	73.4
Junio	73.4	Junio	139.5	Junio	73.4
Julio	73.4	Julio	73.4	Julio	139.5
Agosto	73.4	Agosto	1.56	Agosto	73.4
Noviembre	73.4	noviembre	1.56	noviembre	10.7

Graficando los valores anteriores y a su vez colocando las fotografías del tramo para observar las condiciones que se presentaron, se observa que en el cadenamiento 2.1 m el valor de resistividad disminuye de marzo a abril y después de mantiene aproximadamente constante para los otros meses, ésto quizá se

debe a que la arcilla es muy impermeable y aun cuando se hayan presentado algunas lluvias puede ser que el agua no haya penetrado a las capas inferiores.

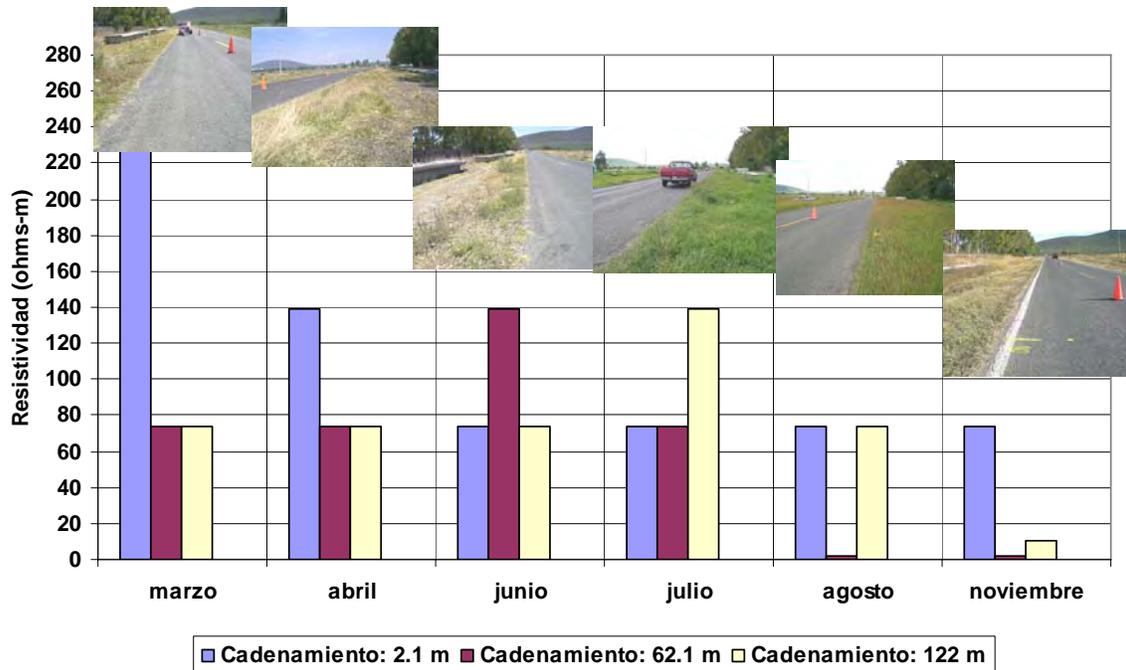


Figura 5.14
Tramo CENAM. Análisis de los valores de resistividad en algunos
cadenamiento y a profundidad de 1.1 m

De forma similar, para el cadenamiento de 122 m no se presentan variaciones en la resistividad a medida que pasa el tiempo, excepto por el valor obtenido en julio.

5.1.2.3 Perfiles de resistividad para el tramo Los Cues

Este tramo se encuentra localizado en la carretera Querétaro-Galindo del km 8 + 700 al 8 + 900 (Figura 5.15).



Figura 5.15
Tramo 4, Los Cues

La Figura 5.16 muestra el esquema de los perfiles de resistividad obtenidos en los meses de marzo, abril, junio, julio, agosto y noviembre.

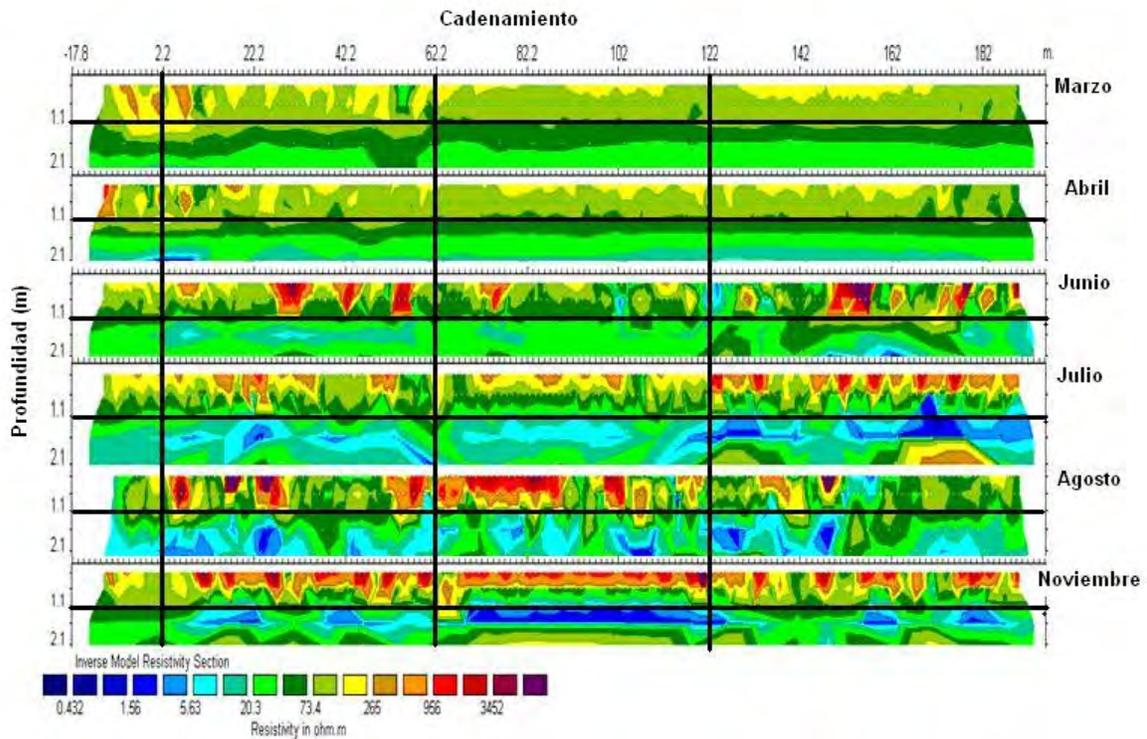


Figura 5.16
Perfiles de resistividad del tramo Los Cues

De los perfiles se observa que durante los meses de marzo y abril los valores de resistividad se mantienen prácticamente constantes, además, se observan estratos de resistividad muy definidos (Figura 5.16).

Si se grafican los valores de resistividad en los cadenamientos de 2.2, 62.2 y 122 m y a 1.1 m de profundidad se obtiene la Figura 5.17. Nótese que sólo en el caso del cadenamiento de 122 m los valores de resistividad se reducen a medida que pasa el tiempo, de hecho, esto es congruente ya que la resistividad empieza a disminuir cuando se presenta la época de lluvias y una vez que se reduce parece mantenerse en ese valor en los últimos cuatro meses.

Con respecto al cadenamiento de 62.2 m, los valores de resistividad a 1.1 m se mantienen prácticamente constantes en todos los meses medidos con excepción del valor obtenido en julio que podría estar relacionado con un error de medición ya que para este mes los valores de resistividad tienden a mantenerse o reducirse pero no a incrementarse, y además se puede observar que la vegetación empieza a crecer lo que indica un incremento en los contenidos de agua del terreno circundante.

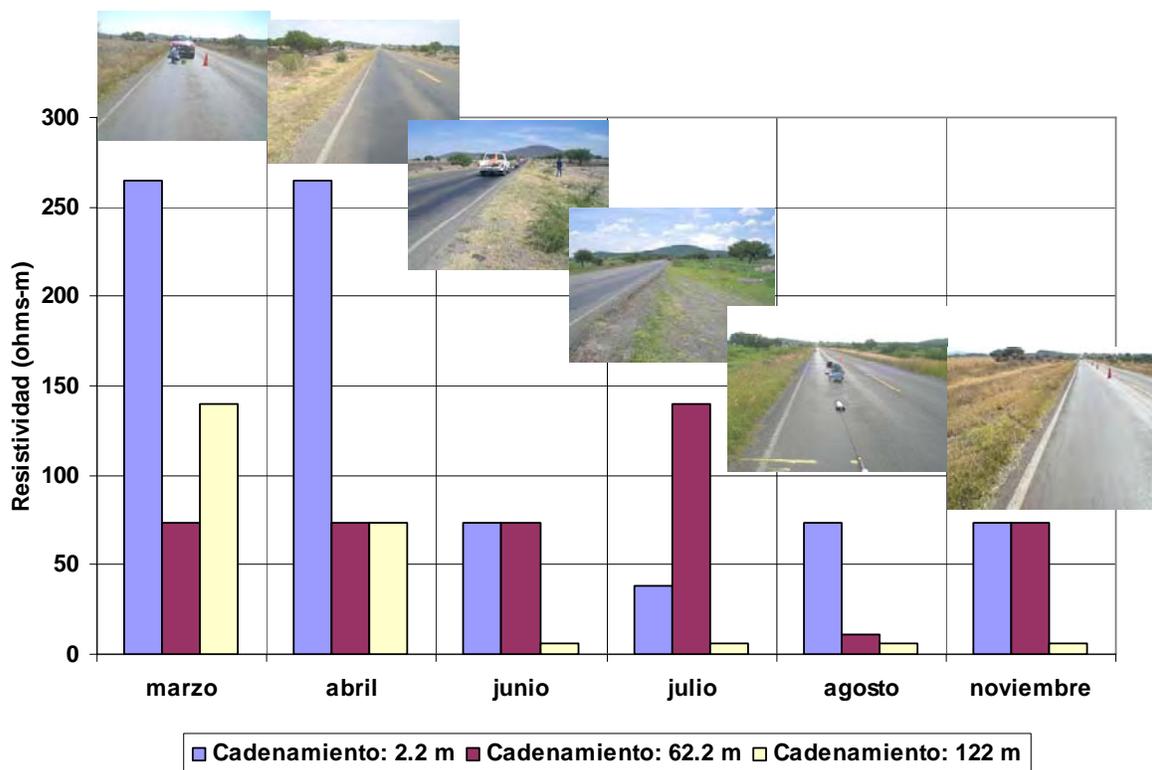


Figura 5.17
Análisis de los valores de resistividad a 1.1 m de profundidad para tres cadenamientos

Los análisis anteriores sólo se muestran para los tramos 1, 4 y 5, sin embargo, los perfiles de resistividades correspondientes a los tramos 2 y 3 incluyen en el anexo A para aquellos interesados en realizar su análisis. Asimismo se muestran las fotografías correspondientes donde se observan las condiciones de clima prevalecientes.

Como se mencionó en párrafos previos, uno de los objetivos principales de estas mediciones era encontrar alguna forma de correlacionar los valores de resistividad con el tipo de material y posiblemente con los contenidos de agua. Sin embargo, de acuerdo con los resultados sí se puede observar que se presentan cambios de resistividad de los materiales debido a cambios en el contenido de agua, sin embargo, con los datos que se tienen hasta la fecha es aún difícil decir en qué porcentaje se presentan estos cambios, para ésto seguramente es necesario continuar las investigaciones tanto en campo como en laboratorio.

6 Discusión de los resultados de laboratorio

6.1 Propiedades índice de los suelos de ensaye

Otro de los objetivos de este trabajo fue determinar el comportamiento de la resistividad de diferentes materiales en laboratorio, de tal forma que con estos resultados y los de campo se pudieran obtener conclusiones con respecto a la posibilidad de evaluar variaciones de contenido de agua de materiales colocados en campo.

Para el estudio de laboratorio se muestrearon varios suelos en la Ciudad de Querétaro. Las clasificaciones según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos son CH, MH, ML. La Tabla 6.1 es un resumen de las propiedades índice y las características de compactación.

Tabla 6.1
Propiedades índice de los suelos en estudio

Suelo	Clasificación	Límites de consistencia			Características de compactación		Pasa malla 200 (%)	G_s
		LL (%)	LP (%)	IP (%)	W_{opt} (%)	γ_d (kN/m ³)		
El Aeropuerto	MH	54	34	20	38.5	12.34	94.4	2.64
La Central de Autobuses	ML	47	36	11	36.5	12.32	92.4	2.66
Comercial Mexicana	ML	*	*	NP	28.8	12.57	57.2	2.38
La Galera	MH	59	33	27	34.3	13.00	89.6	2.68
Santa Rosa	CH	56	20	36	28.1	13.98	87.6	2.56
Salida a Tlacote	CH	72	26	46	34.0	12.55	92.9	2.59

6.2 Propiedades de compactación

Una de las propiedades importantes a evaluar cuando se llevan a cabo estudios de suelos compactados en laboratorio es la determinación de las curvas de compactación ya que estas forman las bases para determinar las condiciones de control de elaboración de especímenes. Las Figura 6.1 a 6.6 muestran las curvas de compactación obtenidas con energía de compactación Proctor estándar, modificada y reducida para cada uno de los suelos. En las mismas figuras se indica la curva de grado de saturación igual a 100 %.

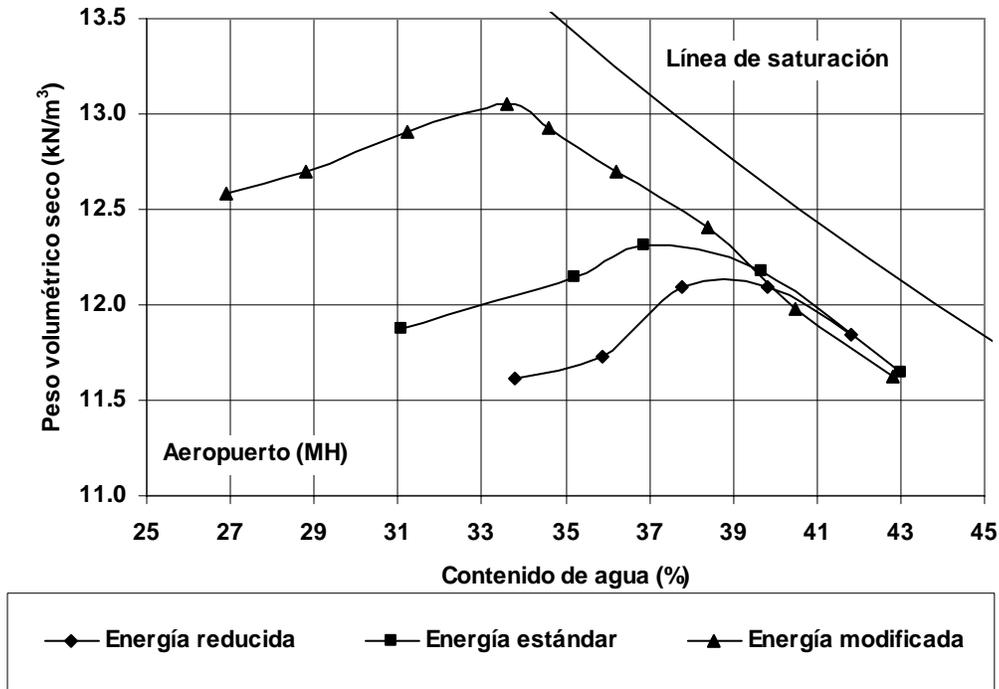


Figura 6.1
Curvas de compactación para el material del Aeropuerto

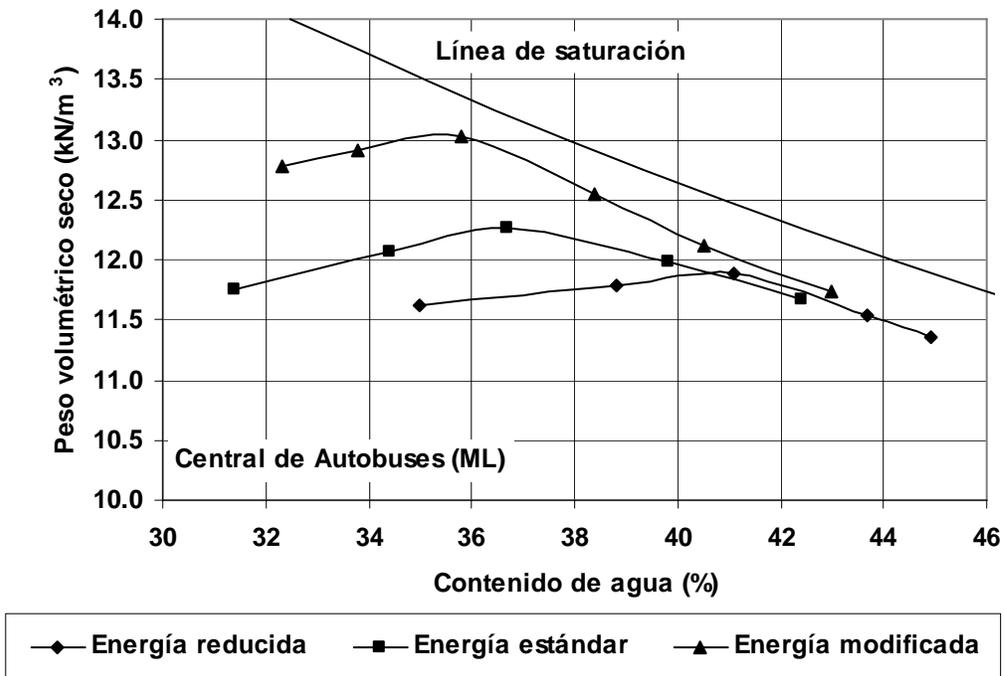


Figura 6.2
Curvas de compactación para el material de la Central de Autobuses

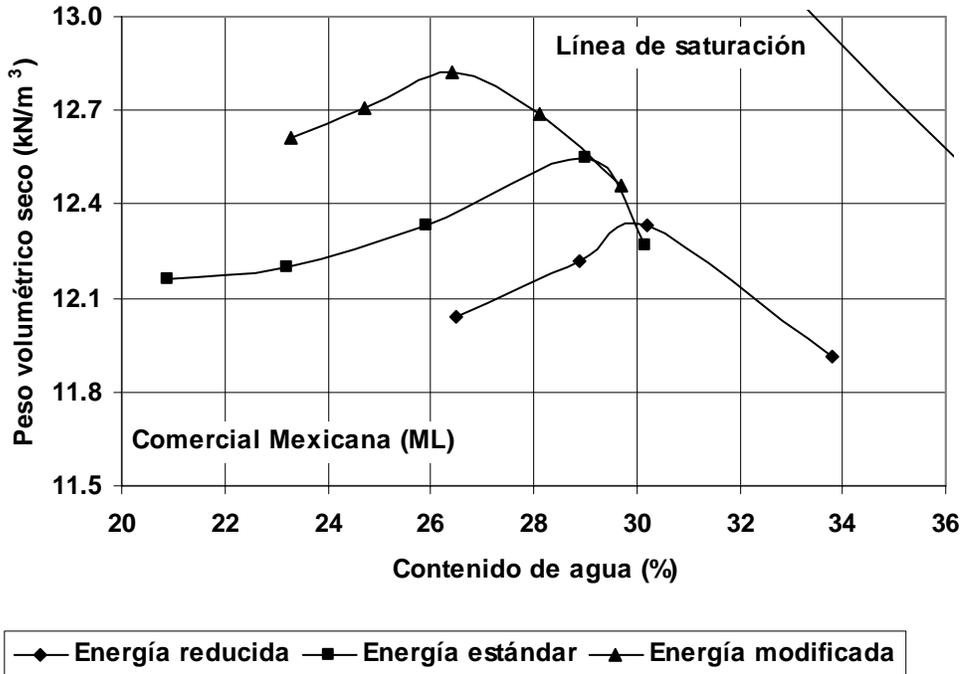


Figura 6.3
Curvas de compactación para el material de la Comercial Mexicana

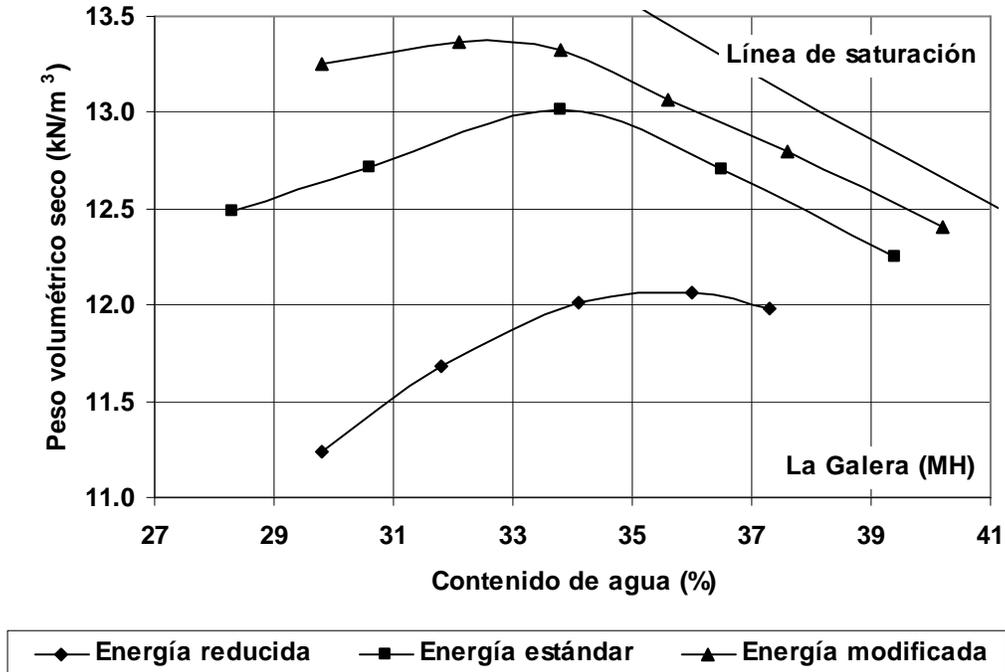


Figura 6.4
Curvas de compactación para el material de La Galera

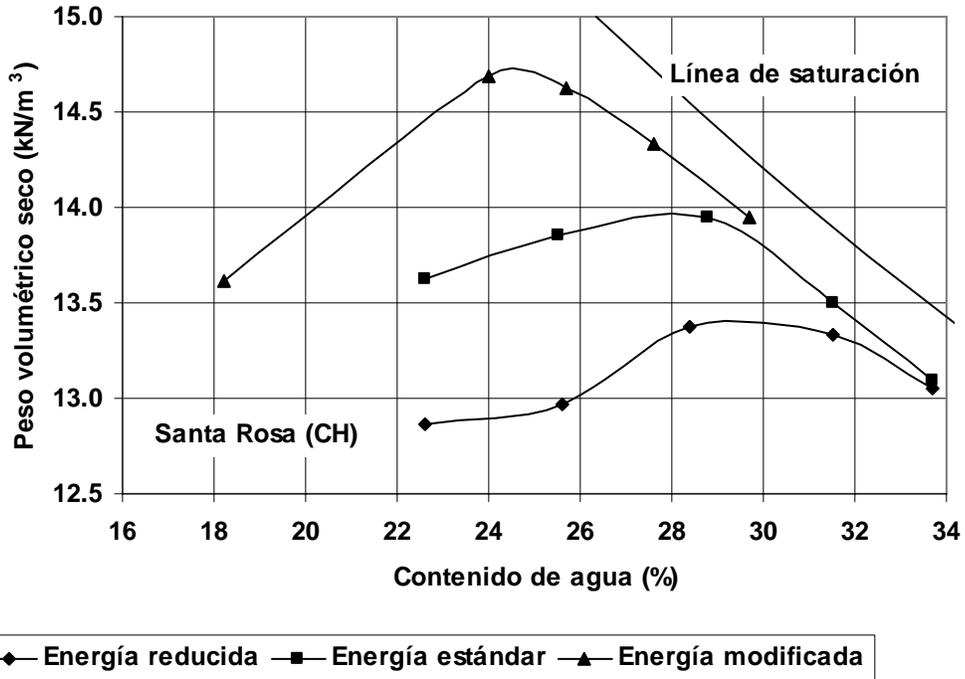


Figura 6.5
Curvas de compactación para el material de Santa Rosa

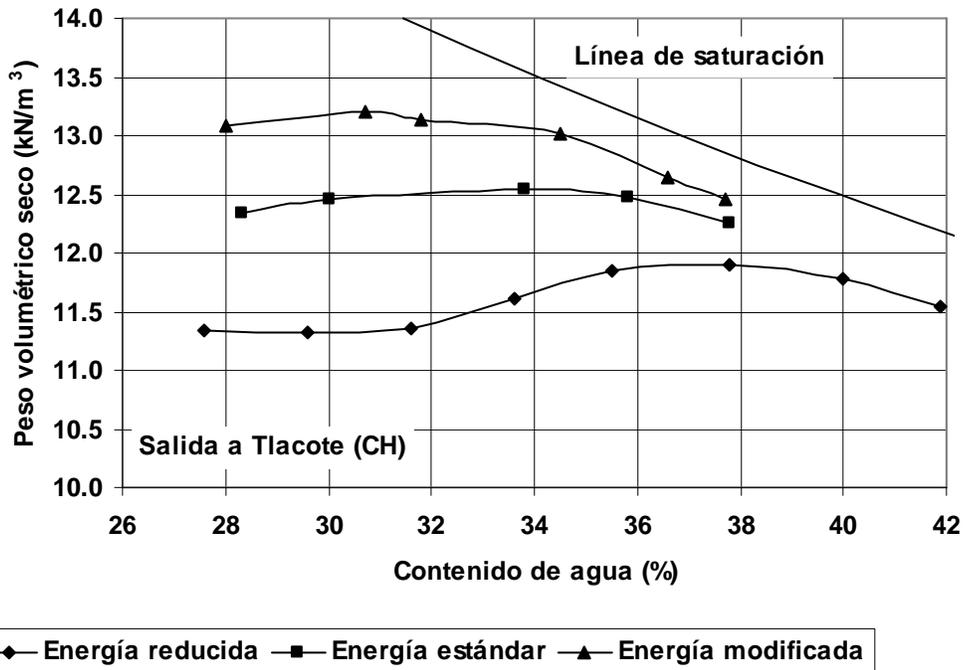
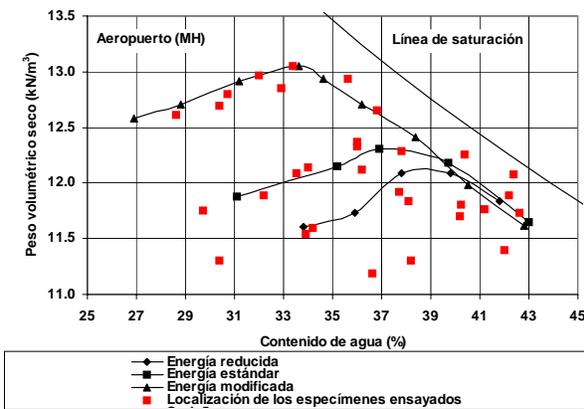


Figura 6.6
Curvas de compactación para el material de la salida a Tlacote

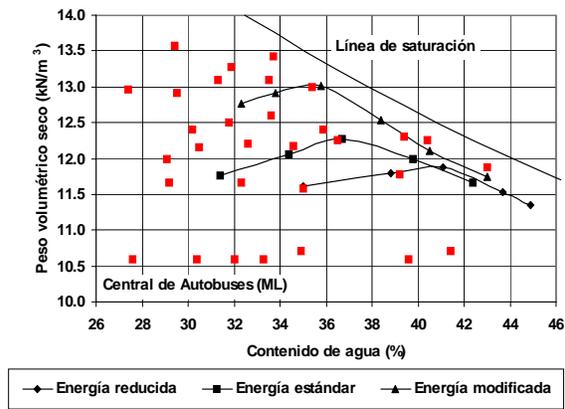
Los valores de contenido de agua óptimo y peso específico seco máximo con respecto a la prueba Proctor estándar se encuentran resumidos en la Tabla 6.1.

6.3 Condiciones de compactación de los especímenes ensayados

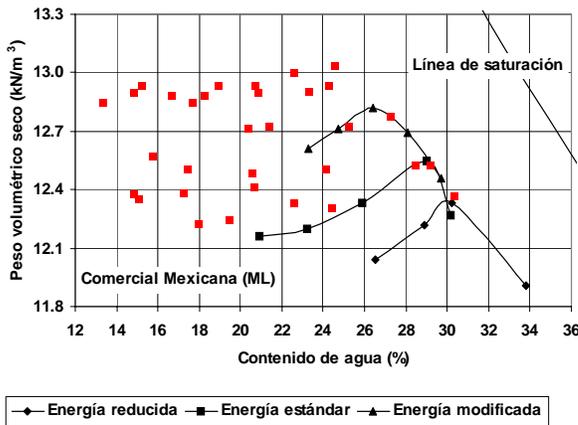
Para evaluar la resistividad en laboratorio, los pesos volumétricos de los especímenes se hicieron variar entre las curvas de compactación obtenidas con energía de compactación reducida y Proctor modificada como se ilustra en la Figura 6.7. En esta figura se grafican los puntos de prueba.



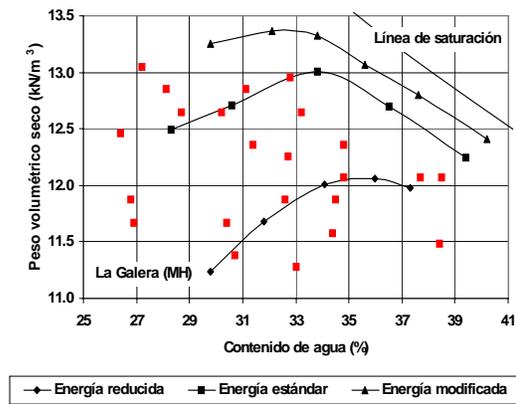
(a) Material del Aeropuerto



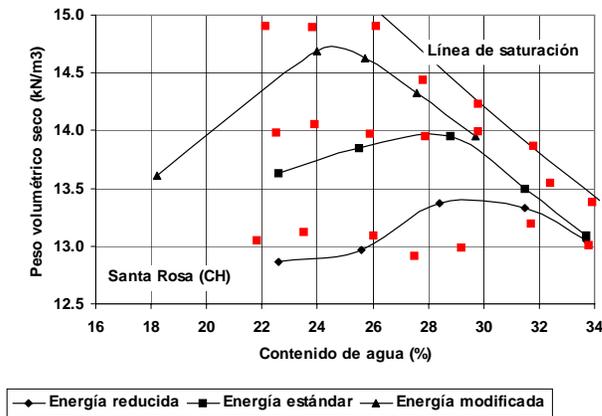
(b) Material de la Central de Autobuses



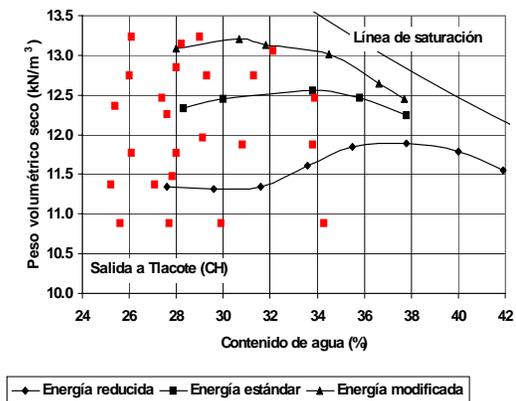
(c) Suelo de la Comercial Mexicana



(d) Suelo de La Galera



(e) Suelo de Santa Rosa



(f) Suelo de la salida a Tlacote

Figura 6.7
Localización de los especímenes ensayados para los suelos de prueba

6.4 Relación entre resistividad y otras propiedades

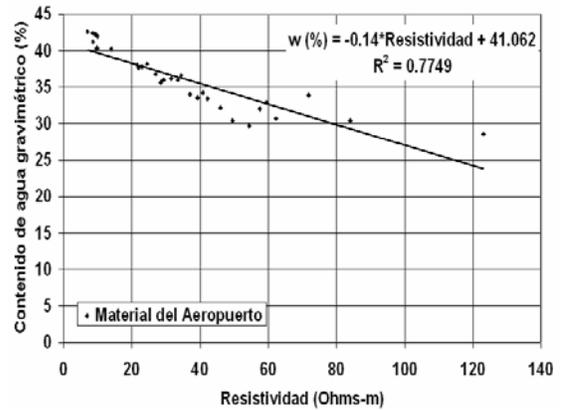
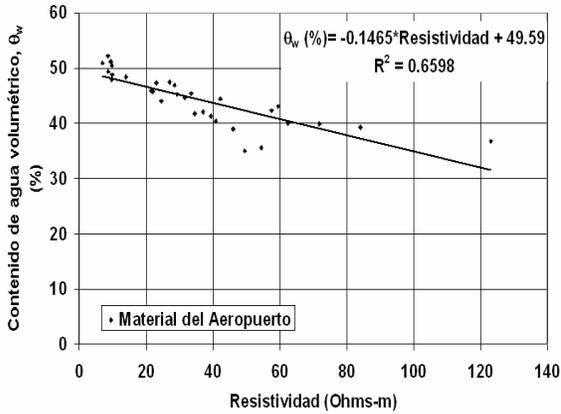
6.4.1 Material del Aeropuerto

Para el material del aeropuerto clasificado como limo de alta compresibilidad, la relación que se obtiene entre resistividad y contenido de agua volumétrico o gravimétrico tiende a una relación lineal como se ilustra en la Figura 6.8. Sin embargo, a valores bajos de contenido de agua se tiene mayor dispersión en los datos; lo que trae como consecuencia que el coeficiente de correlación sea 0.65 ó 0.77 dependiendo si el valor de resistividad se relaciona con el contenido de agua volumétrico o gravimétrico.

Nótese que a medida que el contenido de agua gravimétrico o volumétrico se incrementa la resistividad tiende a disminuir (Figura 6.8).

Por otro lado, si se determinan las curvas de isovalores de resistividad (Figura 6.9) y se grafican en el espacio de compactación se puede observar que dichas curvas presentan un cierto grado de curvatura, lo que indica que los valores de resistividad para este suelo dependen del peso volumétrico seco y en mayor grado del contenido de agua; este aspecto no se observa en las gráficas bidimensionales.

El rango de valores de resistividad para los contenidos de agua ensayados puede variar desde 7 a 123 ohms-m.



(a) Relación entre resistividad y θ_w

(b) Relación entre resistividad y w (%)

Figura 6.8
Relación entre resistividad y contenido de agua volumétrico o gravimétrico para el suelo del aeropuerto

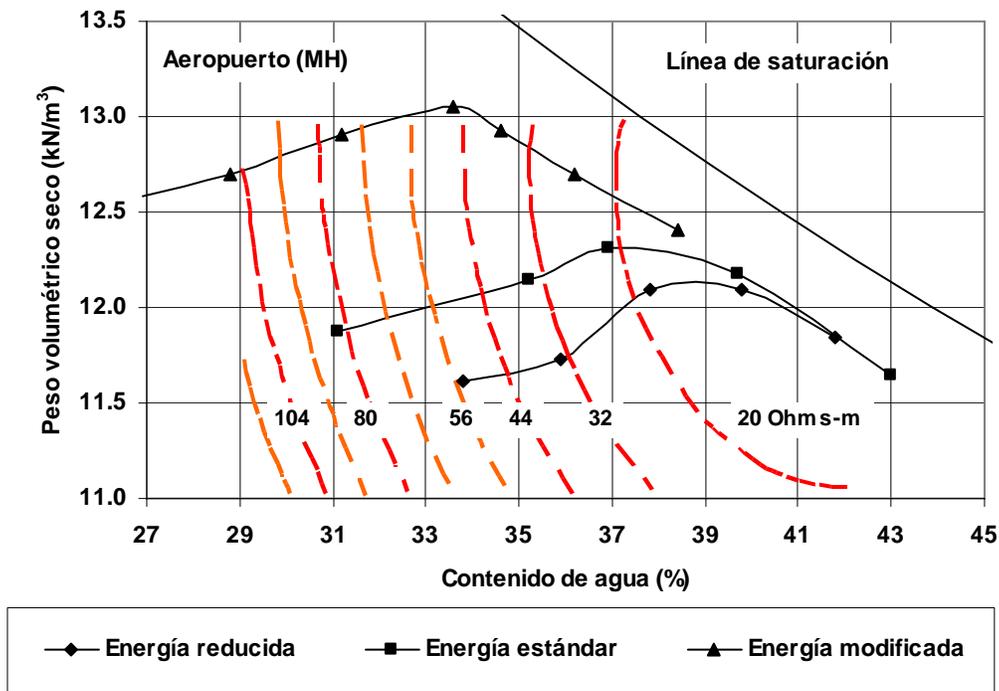


Figura 6.9
Líneas de isovalores de resistividad para el suelo del Aeropuerto

6.4.2 Material de la Central de Autobuses

Para el limo de baja compresibilidad (ML) la relación entre resistividad y contenido de agua volumétrico muestra (al igual que el suelo anterior) una relación lineal, pero en este caso el coeficiente de correlación (R^2) toma un valor de 0.8 con respecto a contenido de agua volumétrico o gravimétrico (Figura 6.10).

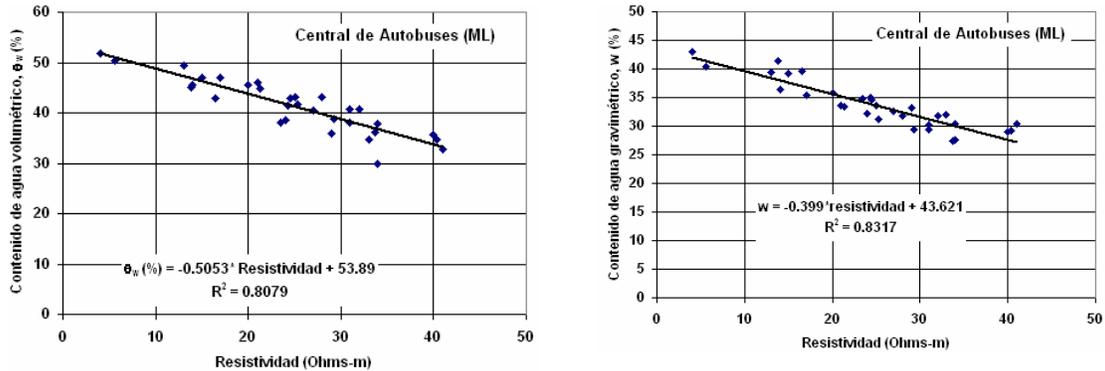


Figura 6.10

Líneas de isovalores de resistividad para el suelo de la Central de Autobuses

Aunado a lo anterior, las curvas de isovalores (Figura 6.12) y la superficie de respuesta (Figura 6.11) evidencian que el valor de resistividad depende tanto del contenido de agua como del peso volumétrico. Además, la variación de la resistividad para este suelo varía en un rango de 4 a 41 ohms-m.

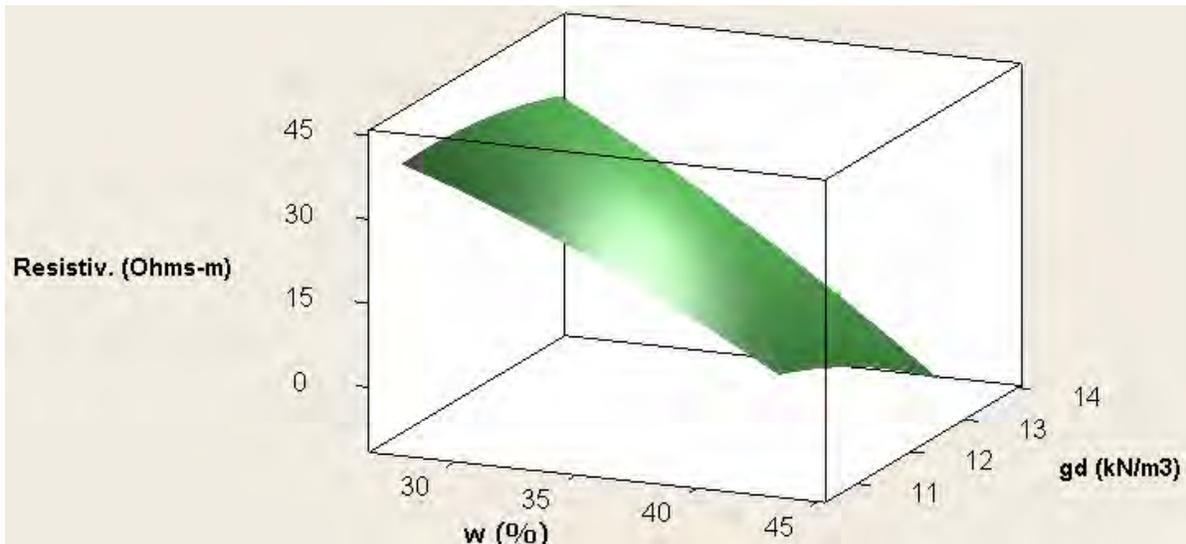


Figura 6.11

Superficie de respuesta para el material de la Central de Autobuses

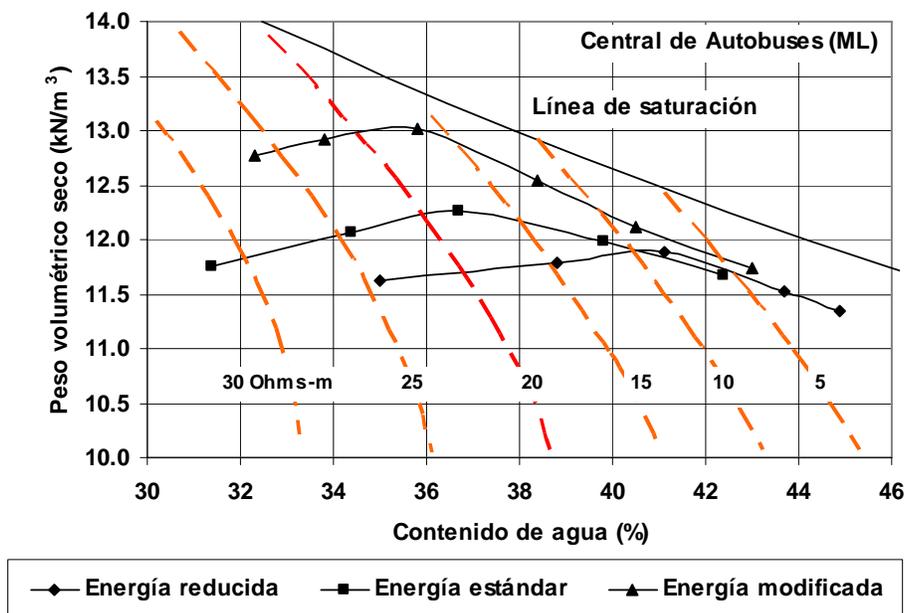


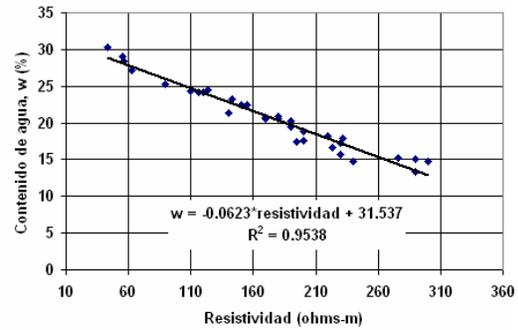
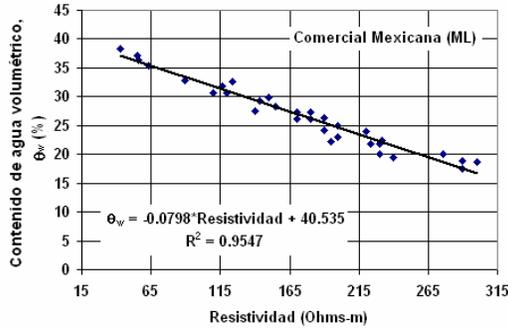
Figura 6.12

Líneas de isovalores de resistividad para material de la Central de Autobuses

6.4.3 Material de la Comercial Mexicana

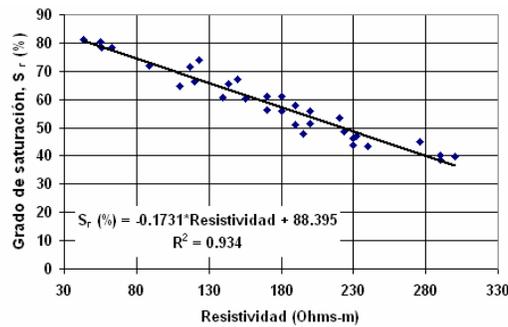
El comportamiento de los valores de resistividad para este material también muestra una relación lineal con contenido de agua volumétrico, contenido de agua gravimétrico o con el grado de saturación.

Se ve que a medida que se incrementa el contenido de agua o grado de saturación, el valor de la resistividad se reduce (Figuras 6.13). Por otro lado, el rango de valores de resistividad para este suelo es entre 43 y 300 ohms-m para el rango de contenido de agua estudiado.



(a) Relación entre resistividad y θ_w

(b) Relación entre resistividad y w

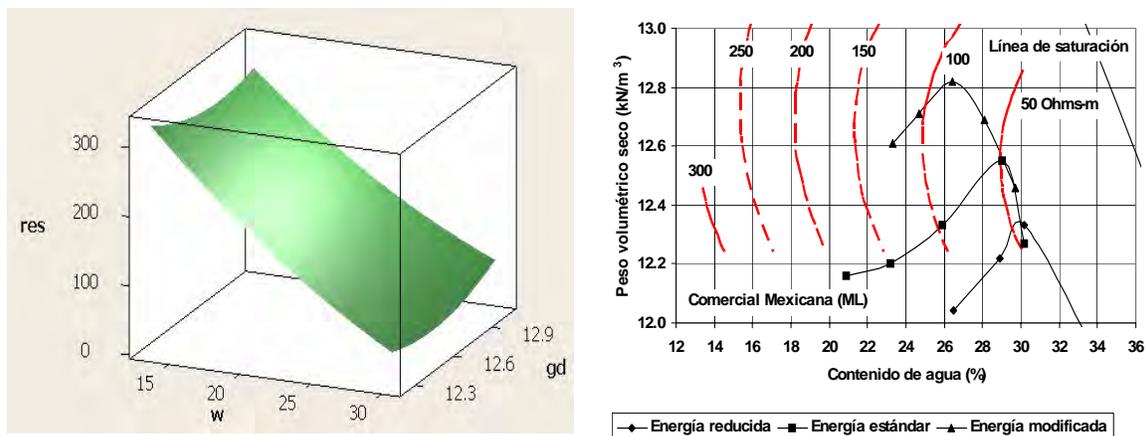


(c) Relación entre resistividad y grado de saturación

Figura 6.13

Relación entre resistividad y contenido de agua volumétrico, contenido de agua volumétrico o grado de saturación

Las relaciones indicadas en la Figura 6.13 no muestran que exista dependencia de la resistividad con el peso volumétrico; no obstante, si los resultados se analizan de tal forma que se obtenga tanto la superficie de respuesta y por tanto las líneas isovalores de resistividad, se obtiene un panorama diferente. Es decir, estas gráficas sí muestran la dependencia tanto del contenido de agua como del peso volumétrico seco (Figura 6.14).



(a) Superficie de respuesta

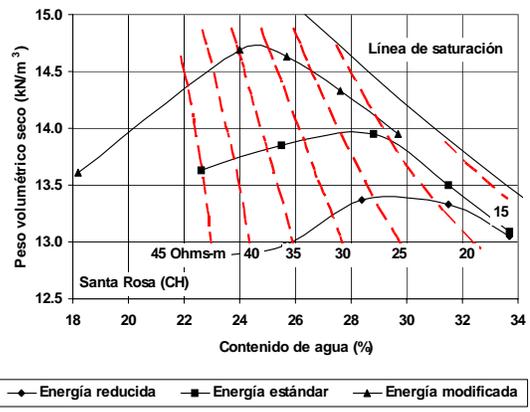
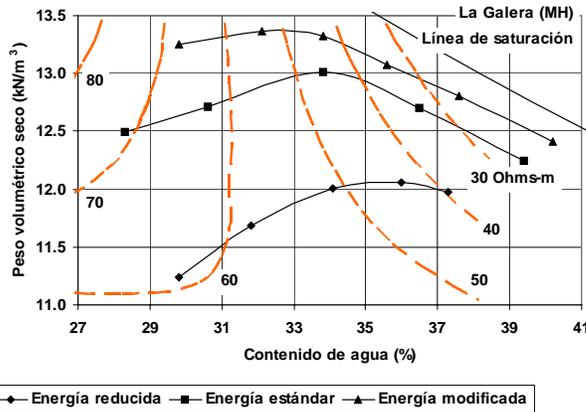
(b) Líneas isovalores de resistividad

Figura 6.14
Superficie de respuesta y líneas isovalores de resistividad para el material de la Comercial Mexicana

6.4.4 Materiales La Galera, Santa Rosa y salida a Tlacote

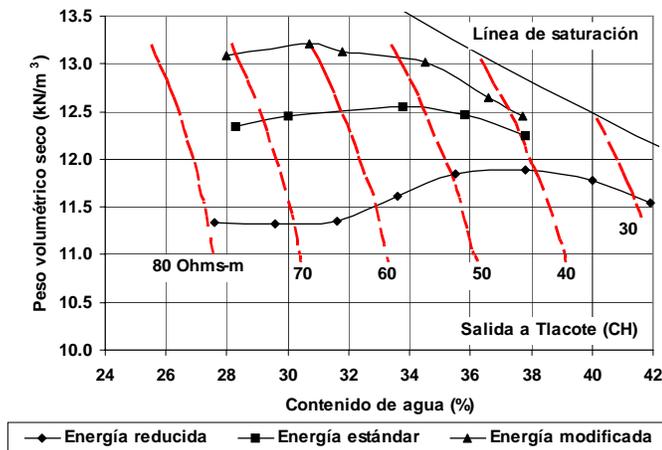
Para discusión de los resultados de los tres últimos suelos sólo se presentan las gráficas de isovalores (Figura 6.15) ya que las relaciones entre contenido de agua y resistividad siguen la misma tendencia de las relaciones ya presentadas, es decir, la resistividad se reduce a medida que el contenido de agua se incrementa.

De las gráficas de isovalores se puede observar que para los tres suelos los valores de resistividad dependen del contenido de agua y del peso volumétrico; no obstante, para el caso del material de Santa Rosa y el de la salida a Tlacote, la dependencia del peso volumétrico es muy ligera ya que las líneas de isovalores tienden a la vertical, no así para el suelo de La Galera donde las líneas de isovalores muestran que existe un cambio de curvatura para contenidos de agua mayores a 31 % (Figura 6.15).



(a) Curvas de isovalores (La Galera)

(b) Curvas de isovalores (Santa Rosa)



(c) Curvas de isovalores (salida a Tlacote)

Figura 6.15
Líneas de isovalores de resistividad. (a) La Galera; (b) Santa Rosa y (c) Salida a Tlacote

Pudiera pensarse que suelos con la misma clasificación podrían presentar los mismos valores de resistividad. En este estudio se tienen tres pares de suelos pero los clasificados ML son muy diferentes puesto que uno presenta propiedades de plasticidad y el otro es no plástico, por tanto, sólo se realizan las comparaciones de los CH y MH.

La Figura 6.16 muestra la comparación para los suelos CH. Es interesante observar que a pesar de que ambos suelos son CH, la línea de tendencia del comportamiento de la resistividad es muy diferente, por ejemplo, para un cierto contenido de agua, el suelo de la salida a Tlacote que tiene un límite líquido mayor

presenta valores de resistividad mayores comparados con los de la arcilla de arcilla de Santa Rosa que tienen propiedades de plasticidad más bajas.

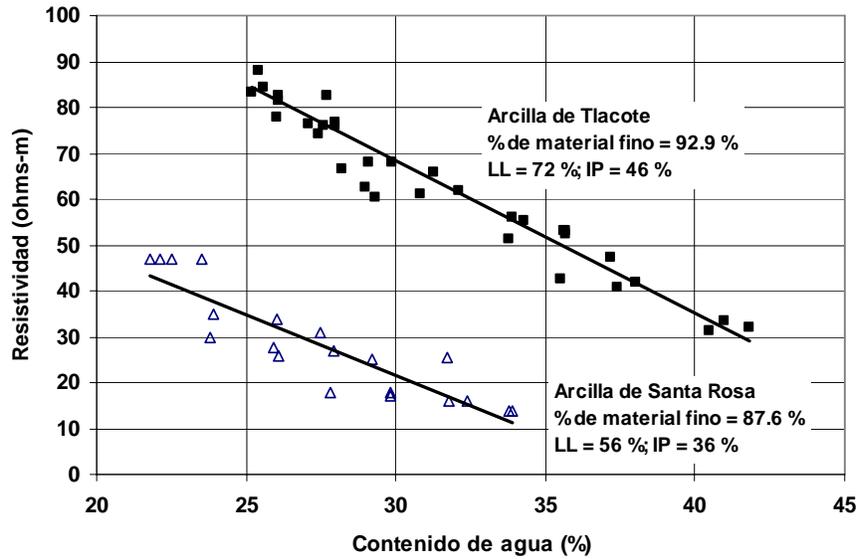


Figura 6.16

Comparación entre valores de resistividad de suelos clasificados como CH

Para el caso de los suelos MH también se observa que el suelo con un límite líquido más alto queda por encima, sin embargo, la diferencia entre estos dos suelos es mucho menor ya que la diferencia en propiedades de plasticidad es muy ligera (Figura 6.17).

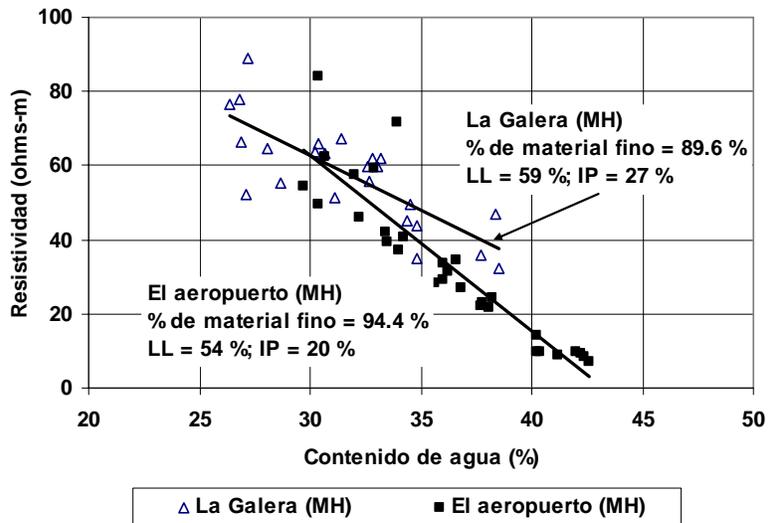


Figura 6.17

Comparación entre valores de resistividad de suelos clasificados como MH

7 Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Del trabajo presentado se pueden desprender las siguientes conclusiones:

1. Los perfiles de resistividad obtenidos en los tramos de pavimentos analizados muestran valores de resistividad que van cambiando a medida que las condiciones de humedad o condiciones climáticas cambian.
2. Para algunos meses los perfiles de resistividad definen el espesor de los estratos de suelo; sin embargo, esta definición se va perdiendo a medida que los contenidos de agua de los materiales se van incrementando.
3. Con los perfiles de resistividad se podrían determinar las variaciones de contenido a través del tiempo siempre y cuando los datos se combinaran con pruebas de laboratorio llevadas a cabo con los mismos tipos de materiales que se monitorean en campo.
4. Las pruebas de laboratorio demostraron que la relación entre contenido de agua y resistividad es lineal, por tanto, si se logran establecer correlaciones para materiales tipo utilizados en carreteras (bases, subbases y subrasantes) sería relativamente fácil determinar en qué grado cambian los contenidos de agua.
5. De los ensayos de laboratorio se observa que el valor de la resistividad al menos de los suelos analizados depende tanto del peso volumétrico seco como del contenido de agua, aun cuando la dependencia del peso volumétrico seco máximo es menor en algunos casos.
6. La correlación entre contenido de agua, contenido de agua volumétrico o grado de saturación y la resistividad es una relación lineal decreciente, es decir, a mayor contenido de agua menor resistividad.
7. Para suelos con la misma clasificación y a un cierto contenido de agua, se pueden obtener valores de resistividad muy diferentes. Pareciera que la resistividad se incrementa a medida que el límite líquido del material se incrementa.
8. La comparación de los valores de resistividad de limos de alta compresibilidad (MH) parece estar más cercana ya que los límites de consistencia presentan pequeñas variaciones.
9. La relación mostrada en la figura 6.18 y la expresión 6.1 parecen demostrar que la resistividad de un suelo es primeramente afectado por la presencia de vacíos y agua. Esto permitiría concluir que es muy factible el usar

mediciones de resistividad eléctrica de un suelo para medir los contenidos de agua presentes y estimar posibles variaciones de propiedades como “el módulo de resiliencia”. Sin embargo, se requiere de una mayor investigación para precisar la posible generalización de una relación única entre resistividad y contenido de agua volumétrico para un mayor tipo de suelos.

Recomendaciones

Existen diversos métodos indirectos para la determinación del tipo de material y propiedades en un área donde se desea llevar a cabo un estudio geotécnico. Uno de estos métodos son los estudios geofísicos que de forma indirecta determinan posibles perfiles estratigráficos y en algunos casos propiedades mecánicas de los materiales que forman el perfil; sin embargo, los resultados de estos estudios se deben tomar con mucha reserva ya que por lo mostrado en este trabajo, diferentes materiales pueden presentar valores similares de resistividad, por tanto, definir el tipo de material o contenido de agua a partir de valores de resistividad no es tarea fácil. Sin embargo, esto podría facilitarse si las mediciones de los perfiles de resistividad se monitorean durante varios años y además complementar los datos de estos perfiles con mediciones de resistividad en laboratorio en los mismos materiales que se tienen en los tramos en investigación ya que con ésto se podrían obtener modelos que relacionen contenido de agua con resistividad.

Otro de las investigaciones recomendables es determinar la resistividad en probetas sometidas a trayectorias de humedecimiento y secado, de tal forma que se puedan determinar modelos entre los gradientes de contenido de agua y el de resistividad.

Referencias y Bibliografía

Abu-Hassanein, Z., Benson, C., y Blotz, L. (1996). "Electrical Resistivity of Compacted Clays". *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 5.

Bedair, H. M. and H. T. Al-Saad. *Dissolved and Particulate Adsorbed Hydrocarbons in Water of Shatt Al-Arab River, Iraq. Water, Air, Soil Pollution. Iraq* (1992).

Bidleman, T. F.; A. A. Castleberry; W. T. Foreman; M. T. Zaransk and D. W. Wall. *Petroleum Hydrocarbons in the Surface Water of Two Studies in the Southeastern United States. Est. Coast Shelf Science. EU* (1990).

Dharmawidjaja, J., Quezada, A., y Soto, G. (2008). Medida de Resistividad de Terreno. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Trabajo para la materia de Laboratorio de Redes.

Ellis, C. I. (1980). Soil compaction at low moisture content-field trials in Sudan. 7th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Accra, Ghana, 1-7 June 1980.

Flores, M. (2003). Uso del método de resistividad para monitorear cambios de humedad. Trabajo de investigación. Universidad Autónoma de Querétaro.

Heydinger, A.G. (2002). "Evaluation of Seasonal Effects on Subgrade Soils". 82nd Annual TRB Meeting, Washington.

PEMEX. *El Petróleo. Gerencia de Información y Relaciones Públicas. México* (1988).

Richter, C. A. (2006). Long-Term Pavement Performance Program Seasonal Variations in the Moduli of Unbound Pavement Layers. Publication No. FHWA-HRT-04-079. Federal Highway Administration.

Rico, R. A., y del Castillo, H. (1992). La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Vol. 2. Ed. Limusa.

Salem, H., Bayomy F., y Al-Taher, M. Prediction of Seasonal Variations of Subgrade Resilient Modulus Using LTPP Data, 82nd Annual TRB Meeting, (2002). B68.

Saval, B. S. Acciones para la Remediación de Suelos en México. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM (1995).

Ulmeyer, (2003). Design and construction of rock cap roadways - A case study in Northeast Washington. TRB 2003 Annual Meeting.

Zaghloul, S., Vitillo, N., Gucunski, N. y Ayed, A. (2003). Seasonal variation in material properties. TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM.

Ozcep, F., Tezel, O. y Asci, M. (2009). Correlation between electrical resistivity and soil-water contents Istanbul and Golcuk. International Journal of Physical Sciences. Vol. 4(6), pp. 362-365, June.

www.edicionsupc.es/ftppublic/forum/FEEL0602.pdf

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_10.htm

<http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=897>

webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/jramirez/exposiciones_a2003/tema1_resistividad_electrodosdepat.ppt

www.eselecting.cl/documentos/APUNTES/apuntes%20mallas%20a%20tierra/apuntes/unidad2.pdf

<http://www.cecalc.ula.ve/usuarios/usuarios/sct/resistividad/>

www.mct.dgf.uchile.cl/AREAS/geo_mod0.pdf

[http:// echo.epfl.ch/VICAIRE/mod_3/chapt_4/text.htm](http://echo.epfl.ch/VICAIRE/mod_3/chapt_4/text.htm)

<http://www.dot.state.fl.us/statematerialsoffice/Geotechnical/conference/materials/gucunski-zaghloul-hadidi-maher-chmiel.pdf> (Figura de contenido de agua en la subrasante 1)

<http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html> (Figura del método Schulember y descripción de los dos métodos para medir resistividad)

www.lightningman.com.au/Earthing.pdf

www.mct.dgf.uchile.cl/AREAS/geo_mod0.pdf

Anexo 1. Perfiles de Resistividad

Tramo 2. Marzo 2007

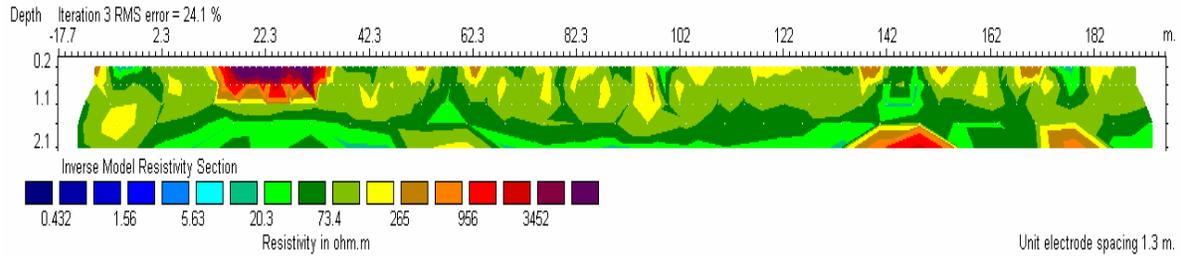


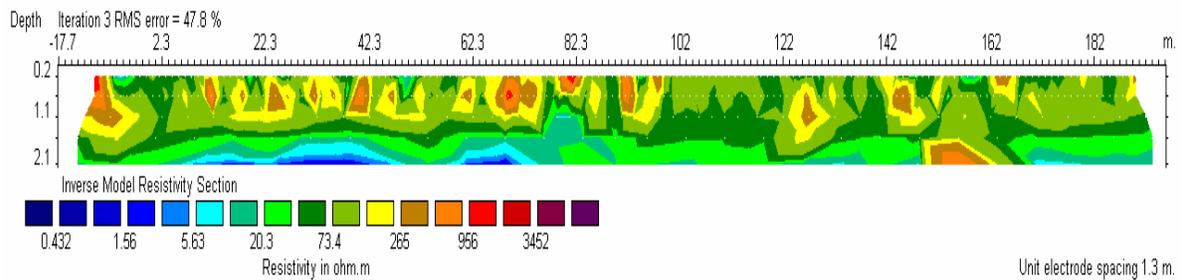
Figura A.1
Perfil de resistividades en marzo de 2007

Tramo 2. 27 de abril de 2007



(a) Vista del tramo 2

(b) Otra vista del tramo 2



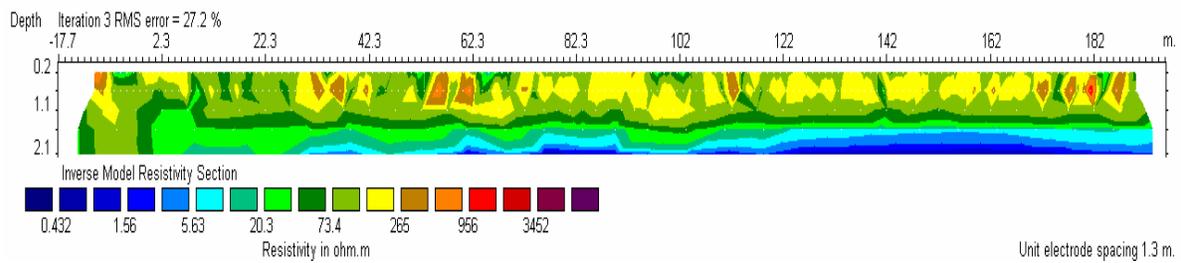
(c) Perfil de resistividades

Figura A.2
Perfil de resistividades y fotografías del tramo en abril de 2007

Tramo 2. 12 de junio de 2007



(a) Vista del tramo 2



(b) Perfil de resistividades

Figura A.3
Perfil de resistividades y fotografías del tramo en junio de 2007

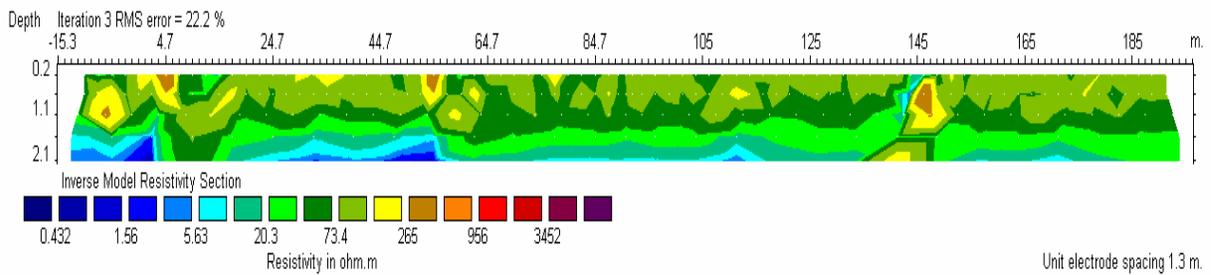
Tramo 2. 16 de julio de 2007



(a) Vista del tramo 2



(b) Otra vista del tramo 2



(c) Perfil de resistividades

Figura A.4
Perfil de resistividades y fotografías del tramo en junio de 2007

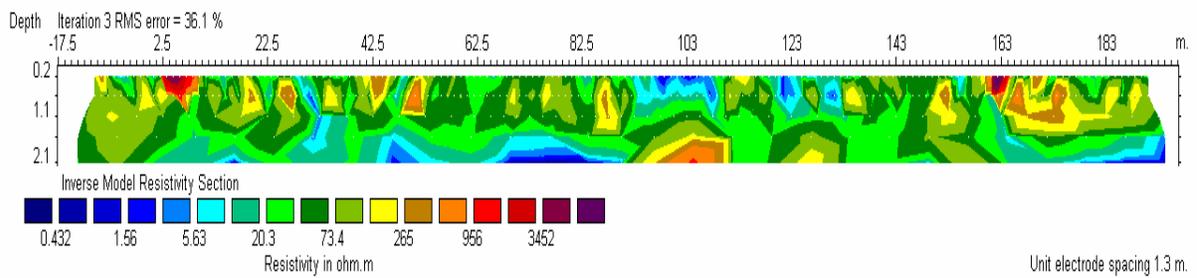
Tramo 2. 23 de agosto de 2007



(a) Vista del tramo 2



(b) Otra vista del tramo 2



(c) Perfil de resistividades

Figura A.5
Perfil de resistividades y fotografías del tramo en agosto de 2007

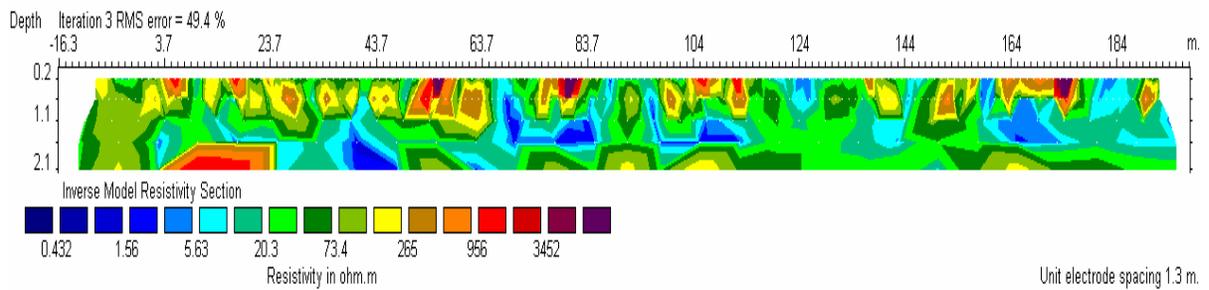
Tramo 2. 5 de noviembre 2007



(a) Vista del tramo 2



(b) Otra vista del tramo 2



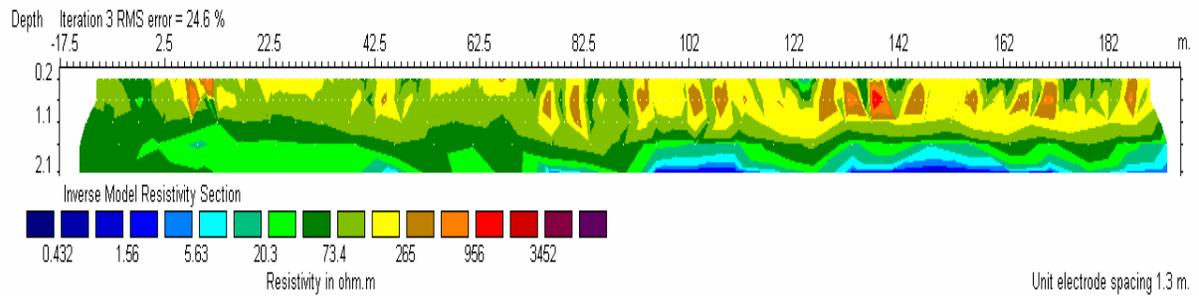
(c) Perfil de resistividades

Figura A.6
Perfil de resistividades y fotografías del tramo en noviembre de 2007

Tramo 3. Marzo 2007



(a) Vista del tramo 2



(b) Perfil de resistividades

Figura A.7
Perfil de resistividades y fotografías del tramo en marzo de 2007

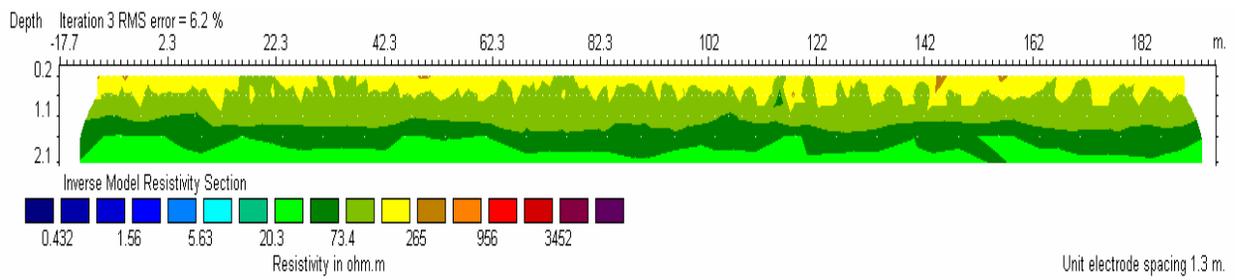
Tramo 3. Abril 26 2007



(a) Vista del tramo 3



(b) Otra vista del tramo 3



(c) Perfil de resistividades

Figura A.8
Perfil de resistividades y fotografías del tramo en abril de 2007

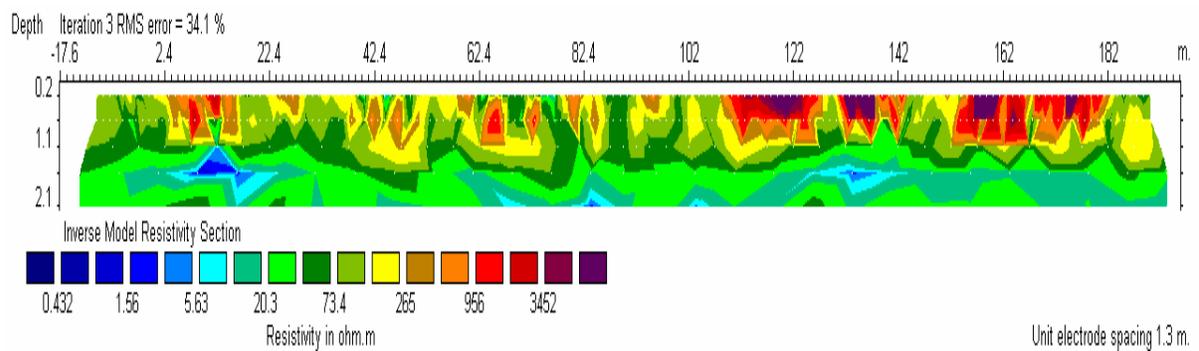
Tramo 3. 12 de junio de 2007



(a) Vista del tramo 3



(b) Otra vista del tramo 3



(c) Perfil de resistividades

Figura A.9
Perfil de resistividades y fotografías del tramo en junio de 2007

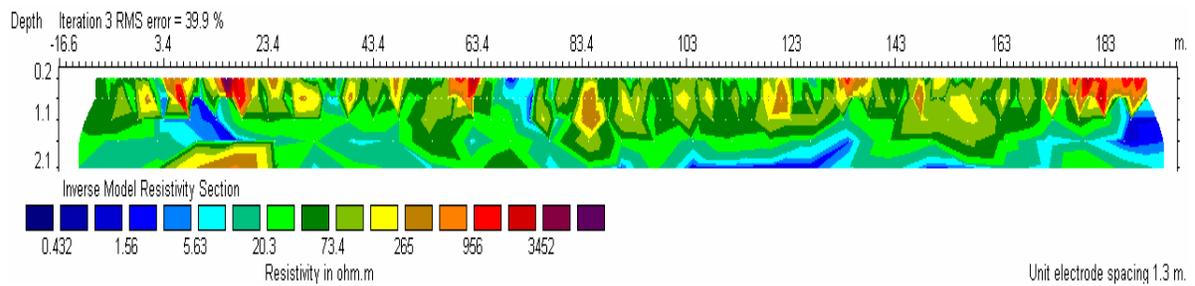
Tramo 3. 6 de noviembre de 2007



(a) Vista del tramo 3



(b) Otra vista del tramo 3



(c) Perfil de resistividades

Figura A.10
Perfil de resistividades y fotografías del tramo en noviembre de 2007

**CIUDAD DE MÉXICO**

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx