

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



## FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

### “ANÁLISIS DE FISURAS Y GRIETAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS MEDIANTE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA”

Tesis previa a la obtención del Título de  
Ingeniero Civil

#### **AUTORES:**

Viviana Mercedes Cárdenas Coronel

C.I. 0302299631

Gabriela Alejandra Araujo Santacruz

C.I. 0302130281

#### **DIRECTOR:**

Ing. Benigno Alfredo Vázquez López, MSc.

C.I. 0101815892

Cuenca - Ecuador  
2016



## RESUMEN

La buena funcionabilidad y capacidad estructural de vías y carreteras depende de una adecuada planificación, diseño, construcción y mantenimiento; así mismo de la estructura del pavimento y de su estado superficial; el mayor deterioro encontrado en la superficie de los pavimentos son las fisuras y grietas que pueden afectar negativamente la estructura. El objetivo del presente proyecto es analizar e identificar las diferentes causas que provocan la aparición de estas patologías en la vía Zhud - Biblián en el kilómetro 49+500 mediante el método de resistividad eléctrica. La resistividad se medirá con el método Wenner-Schlumberger que consiste en la inyección de corriente continua en el terreno mediante un par de electrodos y la determinación mediante otro par, obteniendo así la distribución de resistividades en el pavimento en función de las propiedades físicas del hormigón y de la disposición de las armaduras en su interior, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada. Mediante esta metodología se espera interpretar la magnitud de las fisuras y grietas en la estructura del pavimento rígido, obtención de modelos en dos y tres dimensiones del lugar. Además se podrá verificar si es un método confiable para el análisis de fisuras y grietas, ya que es un método no invasivo para la estructura y podría ayudar en el proceso de mantenimiento a causa de estos deterioros.

**Palabras clave:** Resistividad eléctrica, resistividad aparente, pavimento rígido, fisuras, grietas, losa de hormigón y estructura del pavimento.



## ABSTRACT

The good functionality and structural capacity of roads and highways depends on proper planning, design, construction and maintenance; Likewise of the pavement structure and its surface state; the greatest deterioration found in the pavement surface are the fissures and cracks that may adversely affect the structure. The objective of this project is to analyze and identify the different causes of the appearance of these pathologies in the track Zhud - Biblián at kilometer 49 + 500 by the method of electrical resistivity. Resistivity is measured with the Wenner-Schlumberger method it involves the injection of current into the ground through a pair of electrodes and determination by another pair, thus obtaining the distribution of resistivity in the pavement depending on the physical properties of concrete and the arrangement of the armor inside, the distances between the electrodes and the injected current. This methodology is expected interpret the magnitude of the fissures and cracks in the structure of the rigid pavement, obtaining models in two and three dimensions of the place. In addition, you can check if a reliable method for the analysis of fissures and cracks, as it is a non-invasive method for the structure and could help in the maintenance process because of these impairments.

**Keywords:** *electrical resistivity, apparent resistivity, rigid pavement, fissures, cracks, concrete slab and pavement structure.*



## CONTENIDO

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
CONTENIDO.....	4
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Planteamiento del problema .....	16
1.2 Justificación .....	18
1.3 Objetivos .....	18
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO .....	20
2.1 Método de Resistividad Eléctrica .....	20
2.1.1 Introducción .....	20
2.1.2 Definición de Resistividad Eléctrica .....	20
2.1.3 Resistividad Aparente.....	21
2.1.4 Conductividad Eléctrica .....	22
Conducción Electrónica .....	22
Conducción Electrolítica.....	22
Conducción Dieléctrica .....	23
2.1.5 Método Wenner.....	23
2.1.6 Método Schlumberger.....	23
2.1.6.1 Mecanismos de Conducción Eléctrica en el Hormigón.....	24
2.2 Pavimentos Rígidos .....	25
2.2.1 Introducción .....	25
2.2.2 Definición de Pavimento Rígido.....	26
2.2.3 Elementos que integran un Pavimento Rígido.....	26
2.2.4 Juntas en Pavimentos Rígidos.....	27
2.3 Fisuras y Grietas .....	27
2.3.1 Tipos de Fisuras en Pavimento Rígido .....	28
2.3.1.1 Grietas por fracturación múltiple:.....	28
2.3.1.2 Desintegración: .....	29
2.3.1.3 Baches: .....	29
2.3.1.4 Grietas Lineales: .....	29
2.3.1.5 Levantamiento localizado:.....	30
1.1.1 Consecuencias de las fisuras en el concreto reforzado .....	30
CAPITULO 3. METODOLOGÍA.....	31
2.1 Área de Estudio .....	31



---

<b>2.1.1</b>	<b>Recopilación de Información .....</b>	<b>32</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Geología.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2</b>	<b>Investigación de Campo.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Materiales y Equipo .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Adquisición de Datos.....</b>	<b>36</b>
<b>2.3</b>	<b>Procesamiento de Datos .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Procesamiento bidimensional de los datos.....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Procesamiento tridimensional de los datos .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Modelos bidimensionales .....</b>	<b>42</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Modelo Tridimensional .....</b>	<b>47</b>
<b>CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>		<b>50</b>
<b>3.1</b>	<b>Interpretación de modelos 2D y 3D .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Modelos 2D .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Modelo 3D .....</b>	<b>60</b>
<b>CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>63</b>
<b>Referencias.....</b>		<b>64</b>
<b>Bibliografía.....</b>		<b>66</b>
<b>Anexos .....</b>		<b>69</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Distribución de electrodos Método Wenner.....	23
Figura 2. 2 Distribución de electrodos Método Schlumberger .....	24
Figura 2. 3 Circulación de la corriente eléctrica a través del hormigón .....	25
Figura 2. 4 Estructura de un pavimento rígido.....	27
Figura 2. 5 Grieta Diagonal en la vía Zhud - Biblián.....	30
Figura 3. 1 Ubicación del cantón Biblián .....	31
Figura 3. 2 Ubicación del área de estudio .....	31
Figura 3. 3 Núcleos extraídos en el proyecto Zhud - Biblián .....	33
Figura 3. 4 Perforaciones a cielo abierto – calicatas en el proyecto Zhud - Biblián.....	34
Figura 3. 5 Mapa Geológico de la zona estudiada .....	34
Figura 3. 6 Equipos del Resistímetro PASI modelo 16SG24-N .....	36
Figura 3. 7 Medición de la vía en el lugar afectado .....	37
Figura 3. 8 Dispositivo Wenner-Schlumberger; donde a es la separación entre electrodos, n es el nivel de medición, C1, C2 son los electrodos de Corriente y P1, P2 son los electrodos de potencial .....	38
Figura 3. 9 a) Separación entre electrodos. b) Configuración y medición. c) Separación entre perfiles.....	39
Ilustración 3. 10 Ejemplo de despliegue para el programa RES2DINV, a) pseudosección de resistividades aparente medidas, b) pseudosección de resistividades aparentes calculadas y c) modelo inverso de resistividades. ....	41
Figura 3. 11 Perfil 1 con una profundidad de 1.13m.....	42
Figura 3. 12 Perfil 2 con una profundidad de 1.25m.....	42
Figura 3. 13 Perfil 3 con una profundidad de 1.25m.....	43
Figura 3. 14 Perfil 4 con una profundidad de 1.25m.....	43
Figura 3. 15 Perfil 5 con una profundidad de 1.25m.....	43
Figura 3. 16 Perfil 6 con una profundidad de 1.25m.....	44
Figura 3. 17 Perfil 7 con una profundidad de 1.25m.....	44
Figura 3. 18 Perfil 8 con una profundidad de 1.25m.....	44
Figura 3. 19 Perfil 9 con una profundidad de 1.25m.....	45
Figura 3. 20 Perfil 10 con una profundidad de 1.25m.....	45
Figura 3. 21 Perfil 11 con una profundidad de 1.25m.....	45
Figura 3. 22 Perfil 12 con una profundidad de 1.25m.....	46
Figura 3. 23 Perfil 13 con una profundidad de 1.25m.....	46
Figura 3. 24 Perfil 14 con una profundidad de 1.25m.....	46
Figura 3. 25 Perfil 15 con una profundidad de 1.25m.....	47
Figura 3. 26 Perfil 16 con una profundidad de 1.25m.....	47
Figura 3. 27 Modelo 3D vista en planta .....	48
Figura 3. 28 Modelo 3D vista lateral desde el eje de la vía .....	48
Figura 3. 29 Modelo 3D vista en planta .....	49
Figura 3. 30 Modelo 3D vista lateral desde el eje de la vía .....	49



Figura 4. 1 Esquema de la ubicación de la fisura (color amarillo) y los electrodos (color turquesa). .....50

Figura 4. 2 Perfil 1 de resistividades: a) con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ , b) con un rango de 80  $\Omega \cdot m$  hasta 2000  $\Omega \cdot m$ . ..... 51

Figura 4. 3 Perfil 2 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 52

Figura 4. 4 Perfil 3 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 52

Figura 4. 5 Perfil 4 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 52

Figura 4. 6 Perfil 5 de resistividades: a) con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ , b) con un rango de 80  $\Omega \cdot m$  hasta 2000  $\Omega \cdot m$ . ..... 54

Figura 4. 7 Perfil 6 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 54

Figura 4. 8 Perfil 7 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 55

Figura 4. 9 Perfil 8 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 55

Figura 4. 10 Perfil 9 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 56

Figura 4. 11 Perfil 10 de resistividades: a) con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ , b) con un rango de 80  $\Omega \cdot m$  hasta 2000  $\Omega \cdot m$ . ..... 57

Figura 4. 12 Perfil 11 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 57

Figura 4. 13 Perfil 12 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 57

Figura 4. 14 Perfil 13 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 58

Figura 4. 15 Perfil 14 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 58

Figura 4. 16 Perfil 15 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 59

Figura 4. 17 Perfil 16 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ ..... 59

Figura 4. 18 a) Fisura incorporada en el modelo 3D, b) Modelo 3D vista lateral..... 60



Yo Viviana Mercedes Cárdenas Coronel autora de la tesis "Análisis de fisuras y grietas en pavimentos rígidos mediante Resistividad Eléctrica", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora

Cuenca, 17 de octubre de 2016

Viviana Mercedes Cárdenas Coronel

C.I: 0302299631



Yo Gabriela Alejandra Araujo Santacruz autora de la tesis "Análisis de fisuras y grietas en pavimentos rígidos mediante Resistividad Eléctrica", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora

Cuenca, 17 de octubre de 2016

---

Gabriela Alejandra Araujo Santacruz

C.I: 0302130281



Yo Viviana Mercedes Cárdenas Coronel, autora de la tesis "Análisis de fisuras y grietas en pavimentos rígidos mediante Resistividad Eléctrica", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 17 de octubre de 2016

A handwritten signature in blue ink, enclosed within a blue oval. The signature is stylized and appears to read "Viviana Mercedes Cárdenas Coronel".

Viviana Mercedes Cárdenas Coronel

C.I: 0302299631



Yo Gabriela Alejandra Araujo Santacruz, autora de la tesis "Análisis de fisuras y grietas en pavimentos rígidos mediante Resistividad Eléctrica", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 17 de octubre de 2016

---

Gabriela Alejandra Araujo Santacruz,

C.I: 0302130281



## ***AGRADECIMIENTO***

*Hago extensiva mi gratitud imperecedera al señor Ing. Alfredo Vázquez López Msc. (Director de Tesis), quien me brindó sus conocimientos, dedicación, experiencia y motivación, para que me enfoque en lograr concluir exitosamente mis estudios superiores; agradezco el apoyo logístico brindado por la empresa GEO&GEO, en lo concerniente a brindarme colaboración con sus equipos y personal técnico, en la persona de los señores Byron Loja y Ángel Loja, quienes con su paciencia y conocimientos fueron pilar en el desarrollo del trabajo de campo, así también al MTOP de la provincia del Cañar, en la persona de la Ing. Alexandra García González, quien contribuyo a un desarrollo eficaz de las prácticas en la vía Zhud - Biblián,*

*Retribuyo la amistad y apoyo que supieron brindarme mis amigos Xavi, Andrés, Gaby U, Gino, Iván, Ginna, Migue y Gaby A, gracias por compartir esta maravillosa etapa de mi vida, y alentarme con sus consejos, paciencia y amistad.*

*Me quedará corta la existencia terrenal, para agradecer a todos y cada uno de mis maestros de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, quienes con paciencia y abnegación, me inculcaron sus valiosos conocimientos, mismos que ténganlo por seguro, serán implementados en hacer el bien en nuestra sociedad.*

***Viviana Mercedes***



## ***AGRADECIMIENTO***

*Primeramente doy gracias a Dios y a la Vida, por haberme dado fuerza y valor para terminar esta carrera.*

*A mis padres por fomentarme el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.*

*Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles.*

*A todos los(as) maestros que aportaron en mi formación. Al Ing. Alfredo Vázquez López MSc. quien colaboró para la realización de este trabajo aportando sus conocimientos y experiencia, a su empresa Geo & Geo por la contribución de sus equipos y personal técnico.*

***Gabriela Alejandra***



## ***DEDICATORIA***

*“Somos lo que hacemos día a día, de modo que la excelencia no es un acto sino un hábito”.*

*Aristóteles.*

*Sin duda el camino ha sido complejo y lleno de sacrificios, desde que decidí iniciarme y trace como objetivo el maravilloso sueño de ser una profesional, algo que veo cerca de cristalizarlo.*

*Dedico este trabajo a mi familia, por el apoyo incondicional que me brindan. A mis padres René Alberto y Manuela Margarita, por ser mi guía, mi fortaleza, mis mayores ejemplos y mejores amigos, así también a mis hermanos René Eduardo, Mariela Cristina y Alex Steven, por ser pacientes y animarme a seguir adelante, tanto en buenos como en momentos de duda y temor, contagiándome con su alegría y entusiasmo; ante el sacrificio cumplido siempre recibí el apoyo de mis abuelitos, y a quienes dedico este trabajo, por alentarme con un abrazo de ternura, apoyándome a llegar a la meta.*

***Viviana Mercedes***



## ***DEDICATORIA***

*Este trabajo y toda mi carrera se lo dedico a mis padres Rosa y Luis por ser quienes han estado dándome fuerzas necesarias para poder continuar luchando día tras día y seguir adelante rompiendo todas las barreras y enfrentando con valor y decisión los obstáculos que se presentaron en mis estudios. A mis hermanos Santiago, Gina y Angie por el apoyo incondicional que me han brindado.*

***Gabriela Alejandra***



## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

Las vías y carreteras son el medio fundamental de desarrollo sostenible alrededor del mundo, la buena funcionabilidad y capacidad estructural de las mismas depende de una adecuada planificación, diseño, construcción y mantenimiento; permitiendo la comunicación entre sectores urbanos y rurales. Este servicio vial depende de la estructura del pavimento y de su estado superficial (Lozano & Tabares González, n.d.); el mayor deterioro encontrado en la superficie de los pavimentos son las fisuras y grietas que pueden afectar negativamente su estructura y funcionalidad, como es el caso de la vía Zhud – Biblián que se encuentra afectadas por estas patologías.

Las fisuras en pavimentos rígidos se deben a numerosas causas, afectando la eficiencia de una estructura, pero también pueden indicar fallas estructurales significativas o falta de durabilidad. Es por esto que para el diseño y dimensionamiento de las capas del pavimento es necesario que se incluya las diferentes características de los materiales a emplear y se defina los espesores necesarios que sirven para que el constructor tenga una idea clara del diseño del mismo.

Las fisuras se pueden reparar correctamente si se conoce sus causas y si los procedimientos de reparación seleccionados son adecuados para dichas causas; caso contrario las reparaciones pueden durar poco (Barlow et al., 1993).

Hoy en día existen diversos métodos para análisis de fisuras y grietas en suelos, pavimentos y rocas, dentro de estos se encuentra el método de resistividad eléctrica, que gracias a su constante desarrollo a través de mejoras de los equipos para la recolección de los datos, así como de los programas de interpretación, hacen que su utilización sea cada vez más frecuente para el análisis patológico de la infraestructura vial; obteniendo resultados de profundidad y extensión muy fiables, es por esto que a nivel internacional se ha intensificado la investigación del suelo a través de técnicas tomográficas eléctricas (Weinzettel et al., 2009).

Los métodos de resistividad emplean una fuente artificial de corriente, la cual es inducida en la tierra a través de electrodos. La medición de la diferencia de potencial eléctrico en la vecindad del flujo de corriente así como también la corriente inyectada, hace posible determinar la resistividad aparente del subsuelo.

En la actualidad en nuestro país los métodos geofísicos están siendo utilizados frecuentemente en varios proyectos ingenieriles como:

- Vázquez, (2012). Reconocimiento geofísico a lo largo del trazado del tranvía para la red primario de transporte de la ciudad de Cuenca. Estudios complementarios y de ingeniería básica de la red de primaria de transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de los 4 ríos.



- Vázquez, (2013). Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo. Proyecto de graduación de Ing. Civil, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería.
- Cuñez, (2015). Comportamiento de la resistividad eléctrica de los suelos ante variaciones de humedad y grado de compactación. Proyecto de graduación de Ing. Civil, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería.
- Avilés, Barzallo, (2016). Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca mediante métodos geofísicos. Proyecto de graduación de Ing. Civil, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería.

Cabe recalcar que en el Ecuador no se ha encontrado bibliografía relacionada específicamente al tema de experimentación propuesto, motivo por el cual esta investigación servirá como referencia para futuros trabajos similares, sin embargo se cita algunos trabajos realizados con el método de resistividad eléctrica en pavimentos en otros países:

- Buettner et al., 1996, realizaron tomografía de resistencia eléctrica para proyección de imagen y la distribución espacial de la humedad en secciones de pavimento dando como resultados la estructura básica de la sección de pavimento, el movimiento del agua a través de la imagen como una función del tiempo durante la infiltración y por último un resultado interesante es que el agua no drena la sección hacia el hombro como había sido esperado basado en el diseño original.
- Buettner et al., 1997, realizaron tomografía de resistencia eléctrica para el monitoreo de la infiltración de agua en una sección de pavimento en la estación de campo de Richmond Berkeley, en donde las imágenes de tomografía muestran que el agua en las capas superiores de concreto asfáltico produce una disminución en la resistencia que crece con el tiempo; además de que cuando el agua se mueve en las capas por debajo de la subbase la resistividad aumenta, siendo este un resultado inesperado.
- (Pérez et al., 2010), realizaron la evaluación de la resistividad en campo y en laboratorio y su aplicación a pavimentos en donde se obtuvieron resultados que demuestran que la resistividad depende de factores entre los que se pueden mencionar tipo de suelo, contenido de agua, peso volumétrico.

Los resultados que se quieren obtener son identificar la causa o razón por la cual se ha producido estas patologías en el pavimento rígido, analizando los perfiles de resistividad que se tomarán a lo largo de la vía. Aplicando estos métodos, también se puede verificar la existencia de aguas de infiltración en la zona dependiendo de las profundidades que se alcance en cada perfil, ya que este tipo de fenómeno natural no se puede presenciar superficialmente, esto será más fácil realizando los modelos en dos y tres dimensiones, ya que se presentara un perfil del terreno más real.

El presente trabajo experimental se realizó con el objetivo de poder verificar si es un método confiable para la evaluación de fisuras y grietas, esto podría ayudar a ahorrar tiempo y dinero sin causar daños invasivos a la estructura; contribuyendo así a las diferentes empresas constructoras con el respectivo análisis de vías agilizando el proceso de mantenimiento por causa de estos deterioros.

## 1.2 Justificación

Uno de los aspectos más importantes dentro de la recuperación de la estructura vial es realizar un estudio adecuado con el fin de conocer las causas para una mejor solución de la estructura y la superficie de rodadura que están deterioradas antes de concluir la vida de servicio estimado.

La empresa encargada del estudio de las causas de deterioro de la vía es el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Cañar (MTO) quienes realizaron extracciones de núcleos de hormigones para enviarlos a laboratorio, con el fin de obtener los espesores de cada capa. Estos ensayos afectan directamente en los costos de la obra y el tiempo de ejecución de reparación.

Los métodos geofísicos se caracterizan por ser ensayos rápidos y no destructivos, que muestran resultados de la variación de las propiedades de los materiales que forman la carretera después de que se ha construido, sin embargo en algunas ocasiones estos métodos son poco precisos debido a que en la toma de datos se pueden presentar obstáculos que interfieren de manera significativa para un correcto procesamiento de datos.

Los métodos geoelectrónicos se fundamentan en el estudio de las variaciones de la resistividad eléctrica del subsuelo permitiendo, a partir de las relaciones existentes entre ésta y el tipo de litología, obtener información sobre la estructura y composición del subsuelo, dependiendo del tipo de suelo y contenido de humedad. (Casas & Busquets, 1995)

Se realizaron varios perfiles de tomografías eléctricas a lo largo del tramo estudiado de la vía Zhud – Biblián con el respaldo del Ing. Alfredo Vázquez López MSc. que dispone de los equipos necesarios para su ejecución en campo de la empresa a su cargo GEO&GEO.

## 1.3 Objetivos

### Objetivo General

Analizar e identificar las diferentes causas que provocan la aparición de fisuras y grietas en un tramo de 23 m de la vía Zhud - Biblián mediante el método de resistividad eléctrica, así como también plantear un tipo de solución a los mismos.



## **Objetivos específicos**

1. Obtener perfiles transversales en el área de estudio de la zona afectada.
2. Buscar e identificar zonas de infiltración de aguas del subsuelo que no se puede apreciar superficialmente dependiendo de la profundidad que alcance cada perfil.
3. Obtener modelos en dos y tres dimensiones a partir de medidas realizadas desde la superficie.
4. Definir la confiabilidad, la variación y el grado de error estadístico de la metodología utilizada.

## CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Método de Resistividad Eléctrica

#### 2.1.1 Introducción

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

La resistividad eléctrica del suelo puede considerarse como un patrón representativo de la variación espacial y temporal de muchas otras propiedades físicas y químicas del suelo, tales como estructura, contenido de humedad o composición del fluido de poros. Debido a que la técnica de medición de la resistividad es una técnica no destructiva, la misma ofrece una herramienta interesante para el control de calidad del desempeño de barreras del suelo (Gonzalo Aiassa, 2008).

El fenómeno de conducción eléctrica en materiales se debe al movimiento de cargas eléctricas, las cuales se desplazan de su posición de equilibrio original bajo la aplicación de un potencial eléctrico. La conducción eléctrica ocurre como resultado del movimiento de iones, y la capacidad para transmitir iones está gobernada por la resistividad eléctrica del material (Gonzalo Aiassa, 2008).

El método de resistividad eléctrica se utilizó por primera vez para la exploración de petróleo, gas y prospección de yacimientos minerales conductivos (oro) (Uvidia, 2015). Posteriormente se encontró diversas aplicaciones en el campo de la ingeniería como por ejemplo: exploración de aguas subterráneas, vertederos y transferencia de soluto delimitación, manejo agronómico mediante la identificación de áreas de compactación excesiva o espesor del suelo y la profundidad de la roca, y la evaluación de las propiedades hidrológicas del suelo (Samouëlian et al., 2005).

#### 2.1.2 Definición de Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica  $\rho$  de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad  $\sigma$  como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. El

cumplimiento de la ley de Ohm, permite determinar la resistencia de una columna de suelo por medio de la medición de la diferencia de potencial entre dos puntos, y la determinación de la corriente entre los mismos (Gonzalo Aiassa, 2008). Considerando un campo eléctrico unidimensional, la ley de Ohm resulta,

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

donde, R= Resistencia eléctrica

$\Delta V$ = Potencial eléctrico

I = Corriente eléctrica

A partir de la resistencia eléctrica, puede computarse la resistividad eléctrica, la cual constituye una propiedad del suelo, independiente de las condiciones geométricas,

$$\rho = R \frac{A}{L}$$

donde,  $\rho$ = Resistividad eléctrica

A = Sección transversal de columna del suelo

L = Separación entre los electrodos que determinan la diferencia de potencial

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

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el Siemens (S). La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la naturaleza del tipo del suelo o material, humedad, temperatura, concentración de sales disueltas, estratigrafía, variaciones estacionales, y compactación (Forner, 1999).

### 2.1.3 Resistividad Aparente

Según los análisis del método de los cuatro electrodos, el valor de la resistividad eléctrica obtenida es el real para suelos homogéneos, o en aquellos casos en los cuales las heterogeneidades se encuentran a una distancia muy grande de los electrodos de emisión (o de inyección de corriente) y medición (o de lectura de tensión).

En condiciones reales la corteza terrestre se compone de distintas capas y la profundidad de penetración de las corrientes inyectadas para la medición

depende de la distancia entre los electrodos de emisión y de las heterogeneidades del terreno. Así, el valor del  $\rho$  obtenido no es la resistividad verdadera, sino un indicador de las resistividades del suelo y de la profundidad de penetración de la corriente (Germán, 2007). Este valor de  $\rho$  se denomina resistividad aparente ( $\rho_a$ ), que es la que obtenemos con los métodos de medición y por esto se generaliza:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

donde  $\rho_a$  = Resistividad aparente

K = Coeficiente del arreglo

$\Delta V$  = Diferencia de potencial medida entre electrodos

I = Corriente eléctrica

En el caso particular de un medio homogéneo, la resistividad aparente coincide con la resistividad verdadera,  $\rho_a = \rho$ .

Midiendo la resistividad aparente, se obtienen datos sobre la estructura de la parte superior de la corteza terrestre. Prácticamente todos los métodos de medición de resistividad de suelos están basados en el estudio de la resistividad aparente. Los suelos homogéneos no son muy comunes, debido a los procesos de conformación, que generalmente producen capas de diferentes materiales (Germán, 2007).

## 2.1.4 Conductividad Eléctrica

Como ya se mencionó anteriormente la conductividad eléctrica  $\sigma$  se puede definir como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material, esta puede manifestarse de tres formas: la conducción electrónica, la conducción electrolítica, y la conducción dieléctrica.

### Conducción Electrónica

La corriente es transportada rápidamente por los electrones móviles libres en los metales. La alta conductividad de los metales, es por lo tanto, explicado por el gran número de electrones libres en su estructura (Uvidia, 2015).

### Conducción Electrolítica

Esta conducción se debe a la circulación de las cargas eléctricas transportadas por los iones que se desplazan en un electrolito bajo el efecto de un potencial. Este método de conducción en suelos y rocas es el más común donde la corriente se mueve a través de los iones del agua de poro.

## Conducción Dieléctrica

La conducción dieléctrica está ligada a los desplazamientos de cargas sometidas a un campo eléctrico externo alternativo. Este tercer modo de conducción es dominante en los materiales muy poco conductores. El parámetro más importante es la permisividad absoluta.

### 2.1.5 Método Wenner

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia ( $I$ ) a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial ( $V$ ) que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están colocados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón  $V/I$  es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.

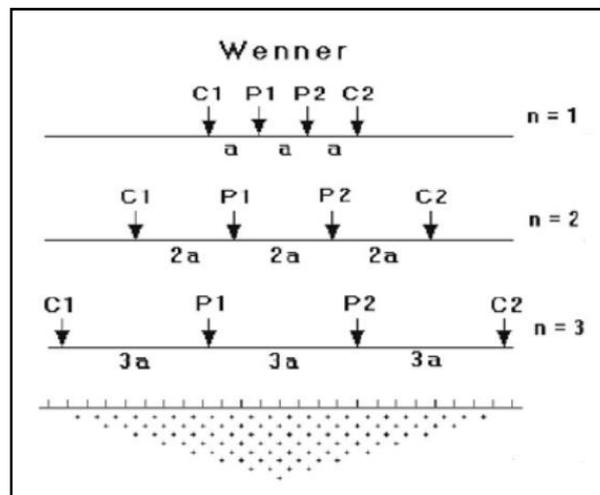


Figura 2. 1 Distribución de electrodos Método Wenner (Andrés López Hidalgo et al. Tomografía eléctrica 2D y 3D)

En la Figura 2.1 se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores.

### 2.1.6 Método Schlumberger

El método de Schlumberger es una modificación del método de Wenner, ya que también emplea 4 electrodos, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial ( $a$ ) se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos ( $na$ ) de la separación base de los electrodos internos ( $a$ ).

La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la Figura 2.2.

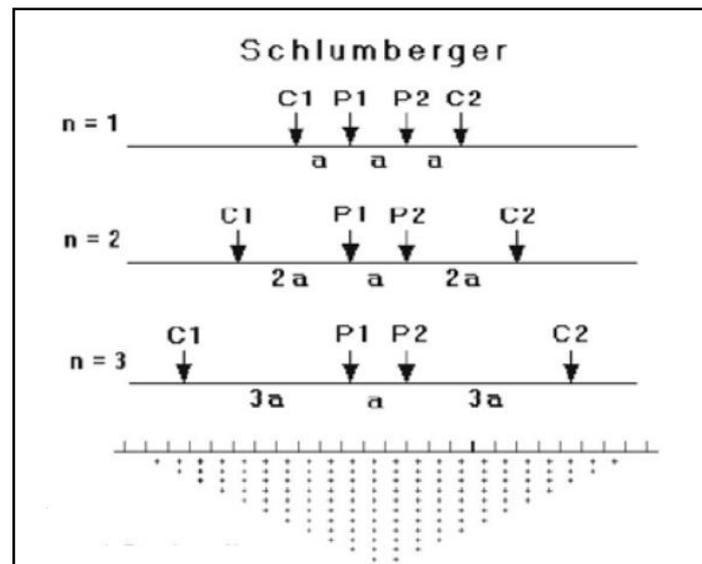


Figura 2. 2 Distribución de electrodos Método Schlumberger (Andrés López Hidalgo et al. Tomografía eléctrica 2D y 3D)

En lo referente al modelo de la teoría de Inversión, éste es una representación matemática idealizada de una sección del suelo. Los datos adquiridos por la generación de corriente eléctrica en el medio, pueden ser calculados mediante relaciones matemáticas para definir un modelo calculado mediante ecuaciones que explican el fenómeno de propagación en el suelo.

### 2.1.6.1 Mecanismos de Conducción Eléctrica en el Hormigón

El hormigón es un material heterogéneo. Desde el punto de vista eléctrico puede considerarse como un material trifásico constituido por elementos sólidos poco conductores (los áridos) que están inmersos en un medio conductor (la pasta de cemento) y cuya porosidad está parcialmente compuesta de aire (no conductor) (Pérez, 2014).

Whittington et al. (1981) demostraron que la conducción eléctrica en el hormigón viene dada esencialmente por la pasta de cemento. Los iones libres se desplazan en los poros, haciendo circular así una corriente eléctrica (Pérez, 2014) como se muestra en la Figura 2.3. La circulación de la corriente eléctrica puede entonces seguir tres caminos:

- La corriente eléctrica circula a la vez a través de los áridos y la matriz. La resistividad aparente está entonces condicionada por las características de las dos fases.
- La corriente atraviesa únicamente la matriz conductora, la resistividad aparente es baja.

- c. La corriente circula únicamente por los áridos que están solos para condicionar la resistividad aparente.

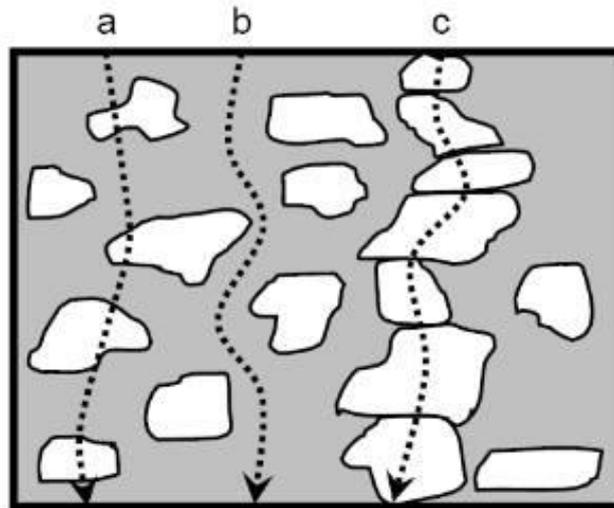


Figura 2. 3 Circulación de la corriente eléctrica a través del hormigón (Pérez, 2014).

La porosidad es un parámetro esencial que condiciona las posibilidades de circulación de los fluidos (por lo tanto de los electrolitos) en una matriz. La influencia de otros parámetros tales como la naturaleza de los áridos, su grado de humedad y su geometría es también algo a tener en cuenta. Sin embargo, es la capacidad de circulación de los electrolitos en la matriz lo que condiciona más el valor de la resistividad.

## 2.2 Pavimentos Rígidos

### 2.2.1 Introducción

Pavimento es el conjunto de capas de diferentes materiales seleccionados que reciben directamente las cargas del tránsito y transmiten en forma distribuida a los estratos inferiores, proporcionando una superficie de rodamiento. Para un adecuado índice de servicio, además de un excelente diseño geométrico es necesario una resistencia apropiada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, una correcta adherencia entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas.

El hormigón se emplea hace más de un siglo, su primera aplicación tuvo lugar en algunas arterias urbanas de ciudades europeas, pasando después a los Estados Unidos donde en 1909 se construye la primera carretera con pavimento rígido (Fonseca, 2010).

## 2.2.2 Definición de Pavimento Rígido

El pavimento rígido está formado por una losa de hormigón que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, apoyada sobre diversas capas, algunas de ellas estabilizadas, el espesor del pavimento puede variar entre 15 y 45 centímetros dependiendo del volumen de tránsito que deba soportar; tiene un periodo de vida entre 20 y 40 años, el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa en las juntas de losas.

Las ventajas de un pavimento rígido radica en:

1. Mayor vida útil con alto índice de servicio
2. Mantenimiento mínimo
3. No se deforma ni se deteriora con el tiempo
4. Requiere menor estructura de soporte

## 2.2.3 Elementos que integran un Pavimento Rígido

a. **Subrasante:** Es la capa de terreno que soporta la estructura del pavimento y que se prolonga hacia una profundidad que no afecte a la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en el diseño final. El espesor del pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que esta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efecto de la humedad, por lo tanto, el diseño de un pavimento es básicamente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante (Alejandro, 2011).

b. **Subbase:** Es la capa de la estructura del pavimento destinado a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura del pavimento, en consecuencia; la capa de la subrasante puede soportar absorbiendo variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la subbase. Por lo tanto esta capa controlara los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento (Alejandro, 2011).

Además trabaja como capa de linaje que le controla la ascensión capilar de agua, protegiendo así la estructura del pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares. Al haber capilaridad en época de heladas, se produce un hinchamiento del agua, causado por el congelamiento lo que produce fallas en el pavimento, si este no dispone de una subrasante u subbase adecuada.

c. **Superficie de Rodadura:** Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, con lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la

losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base. En consecuencia, el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura del pavimento (Alejandro, 2011).

En la Figura 2.4 se puede observar la estructura de un pavimento rígido.

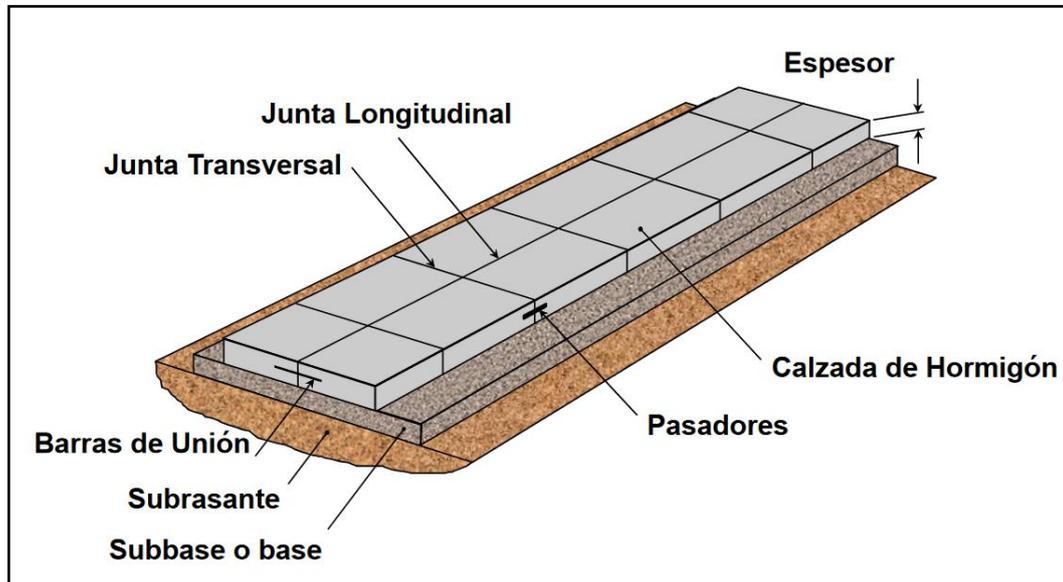


Figura 2. 4 Estructura de un pavimento rígido (Calo, 2012).

## 2.2.4 Juntas en Pavimentos Rígidos

- Juntas de Contracción:** su función es la de aliviar los esfuerzos de tensión causados por las contracciones del concreto.
- Juntas de Expansión:** son aquellas que se disponen para permitir que las losas de concreto se expandan una contra otra sin destruirse.
- Juntas de Construcción:** son aquellas que se forman por las interrupciones de las operaciones de colado y deben garantizar la continuidad estructural.
- Juntas de Alabeo o Articuladas:** su finalidad es evitar el agrietamiento a lo largo de eje central de los pavimentos o en líneas de unión de las diferentes hileras de losas que se producen al elevarse sus bordes cuando la losa es cargada

## 2.3 Fisuras y Grietas

Las fisuras son roturas en la masa de hormigón que aparecen generalmente en su superficie con un desarrollo lineal producidas por la existencia de tensiones superiores a su capacidad de resistencia. Cuando la fisura atraviesa de lado a lado el espesor de un elemento se convierte en grieta. La principal diferencia entre una fisura y una grieta radica en que la fisura “no trabaja”, y si se la cierra por algún método simple no vuelve a aparecer. La grieta en cambio, “si trabaja”,



y para anularla hay que eliminar el motivo que la produjo y además ejecutar trabajos especiales para “sellarla” (Oswaldo, 2009).

Las grietas por lo general se dan por fallas en el diseño, manifestadas por insuficientes secciones de hormigón y/o armaduras de refuerzo; por eso es que se requieren trabajos muy importantes para su reparación.

Las fisuras se originan por las variaciones de longitud de determinadas caras del hormigón con respecto a las otras, y derivan de tensiones que desarrollan el material mismo por retracciones o entumecimientos que se manifiestan generalmente en las superficies libres.

En todas las construcciones en las que interviene el hormigón pueden aparecer fisuras que pueden manifestarse al cabo de años, de semanas, de días, o solamente de horas y que pueden estar motivadas por causas múltiples, unas veces actuando en solitario y otras asociadas a otros fenómenos (Oswaldo, 2009).

### 2.3.1 Tipos de Fisuras en Pavimento Rígido<sup>1</sup>

#### 2.3.1.1 Grietas por fracturación múltiple:

**Descripción:** área superior a 0.1 m<sup>2</sup> y hasta losas completas que presentan múltiples grietas abiertas que dan origen a numerosas partes separadas.

**Posibles causas:** corresponde a una etapa muy avanzada de grietas de esquina, grietas longitudinales o transversales o una combinación de ellas; normalmente por las grietas penetra el agua.

**Reparación:** hay que reparar en todo el espesor, reemplazando longitudinal y transversalmente toda la zona afectada, reconstruir la junta de contracción cuando corresponda

#### 2.3.1.2 Rotura de Esquina:

**Descripción:** una rotura de la esquina es una fisura que intercepta las juntas a una distancia menor o igual a la mitad de la longitud de la losa en ambos lados, medidos desde la esquina de la losa. Por ejemplo, una losa que mide 3.5 de 6.0 m que tiene una grieta 1,5 m por un lado y 3,5 m en el otro lado no se considera una ruptura de esquina; es una grieta diagonal. Sin embargo, una grieta que cruza 0,5 m por un lado y 2.5 m en el otro se considera un descanso de la esquina que se extiende verticalmente a través del espesor de la losa completa.

---

<sup>1</sup> ASTM International D6433-1, Catalogo de deterioros de pavimentos rígidos.

**Posibles Causas:** falta de apoyo de la losa, originado por erosión de la base o alabeo térmico, sobrecarga en las esquinas, deficiente transmisión de cargas entre las juntas.

**Reparación:** reparar en todo el espesor una franja de pavimento del ancho de la losa y de una longitud mínima igual a la distancia entre la junta y la intersección de la grieta con el borde externo.

#### 2.3.1.3 Desintegración:

**Descripción:** desintegración progresiva de la superficie perdiéndose primero la textura y luego el mortero, quedando el árido grueso expuesto.

**Posibles causas:** hormigón con exceso de mortero, mal dosificado, en climas fríos, acción del tránsito y de los ciclos del hielo – deshielo o el hormigón no contiene aire incorporado, curado inapropiado.

**Reparación:** reparación de espesor parcial, recubrir con una mezcla asfáltica si se acepta el incremento de las irregularidades (IRI) que ello significa.

#### 2.3.1.4 Baches:

**Descripción:** cavidad, normalmente de forma redondeada que se forma al desprenderse el hormigón de la superficie.

**Posibles causas:** exceso de materiales finos en el interior del hormigón, mortero poco homogéneo

**Reparación:** limpiar muy bien las paredes, colocar un puente de adherencia y luego rellenar con un hormigón que contenga un aditivo expansivo. Si el deterioro es generalizado reparar colocando una carpeta asfáltica siempre que garantice la adherencia entre las capas.

#### 2.3.1.5 Grietas Lineales:

**Descripción:** (Grietas longitudinales, transversales y diagonales). Las grietas dividen la losa en dos o tres piezas (Las losas divididas en cuatro o más piezas se cuentan como losas divididas). Grietas finas que son sólo unos pocos metros de largo y no se extienden a través de la losa completa, se cuentan como grietas de contracción.

**Posibles causas:** asentamiento de la base, mal posicionamiento de las barras de traspaso de cargas, losas de longitud excesiva, sellado tardío de la junta, espesor de la losa insuficiente para soportar las sollicitaciones.

**Reparación:** se repara todo el espesor afectado para sellarlo con un parche, si el deterioro es generalizado reparar colocando una carpeta asfáltica siempre que garantice la adherencia entre las capas.

### 2.3.1.6 Levantamiento localizado:

**Descripción:** levantamiento de parte de la losa, localizado a ambos lados de una junta transversal o grieta. Habitualmente el hormigón afectado se quiebra en varios trozos.

**Posibles causas:** variaciones térmica, cuando la longitud de las losas es excesiva y no cuenta con juntas de expansión, en pavimentos con barras de traspaso de cargas, mala colocación de estos elementos, presencia de un estrato de suelo expansivo a poca profundidad.

**Reparación:** reparar en todo el espesor, una franja del ancho de la losa y que comprenda longitudinalmente, toda la zona afectada. Reconstruir la junta de contracción como corresponde.

En la Figura 2.5 se muestra la fisura presente en el lugar de estudio, en donde se puede observar que es una grieta longitudinal que divide a la losa produciendo un fuerte agrietamiento con un desnivel aparente.



*Figura 2. 5 Grieta longitudinal en la vía Zhud - Biblián*

### 2.3.2 Consecuencias de las fisuras en el concreto reforzado

Las fisuras en el concreto no solo disminuyen la estética de la estructura y aparenta inseguridad; son en realidad puertas abiertas por las que agentes agresivos y nocivos pueden penetrar a la estructura. Es necesario recordad que el concreto le sirve como recubrimiento al acero, que es el encargado de soportar los esfuerzos de tensión de la estructura, y si este recubrimiento es penetrado por agentes nocivos a través de una fisura o grieta, dicho acero fácilmente será corroído y la estructura se debilitará (Jafid, 2015).

## CAPITULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Área de Estudio

El tramo estudiado de la vía Zhud – Biblián se encuentra en el kilómetro 49+500, que constituye parte del eje estatal E35 en la zona 6, este sector pertenece al cantón Biblián ubicado en la provincia del Cañar (Figura 3.1), a 7 km al norte de la ciudad de Azogues a una altitud de 2639 m.s.n.m, a una temperatura media de 14.5°C. En el Anexo 3 se presente un compendio de fotografías del tramo de la vía estudiada.

En la Figura 3.2 se puede observar la ubicación de la vía Zhud – Biblián ubicando el tramos afectado en donde se realizó el estudio experimental.

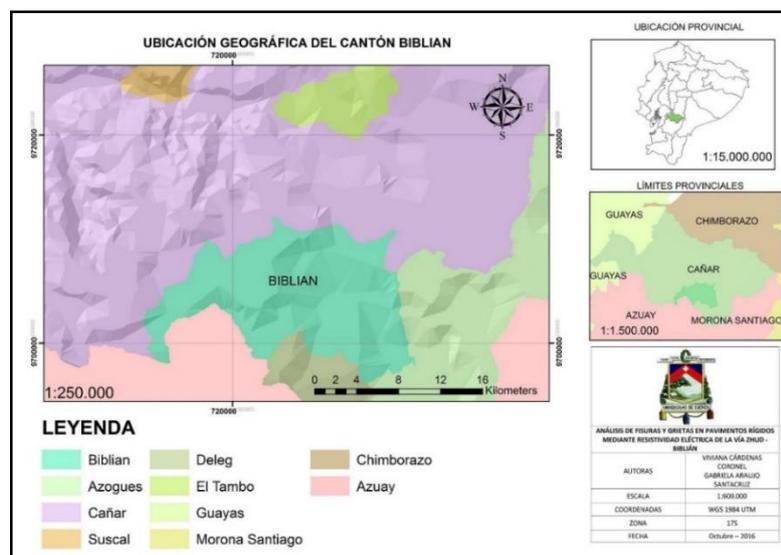


Figura 3. 1 Ubicación del cantón Biblián

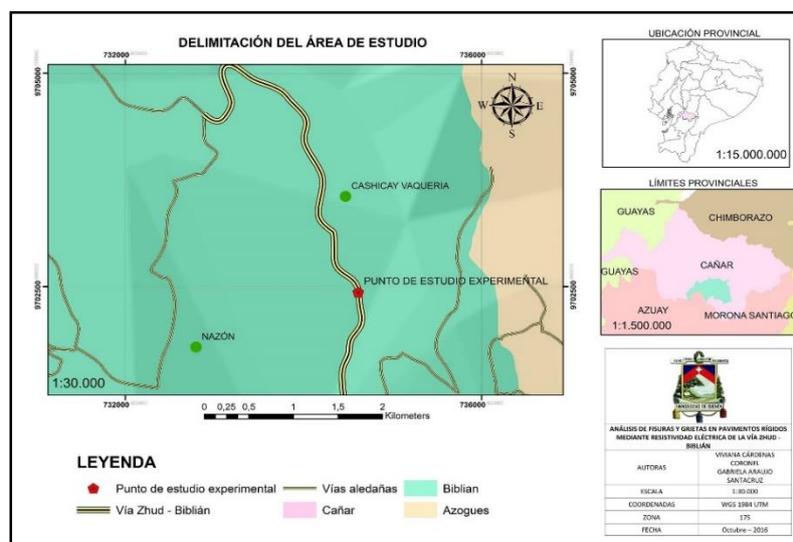


Figura 3. 2 Ubicación del área de estudio



El MTOP planteó el mejoramiento de la capa de rodadura y el sistema de drenaje de las carreteras del país, es así que consideró la rehabilitación definitiva y mantenimiento de la vía Zhud – Biblián ya que se encuentra en la categoría de caminos primarios que enlaza importantes provincia de la costa y la sierra. Esta vía antes de su reconstrucción estaba constituida únicamente con pavimento flexible.

La vía que fue reconstruida en el año 2003 tiene una distancia aproximada de 55 km de las cuales 39 km son de pavimento rígido y 16 km son de pavimento flexible.

### **3.1.1 Recopilación de Información**

Mediante el informe N° 01-EC02014 y el informe de hallazgos mediante el radar de penetración terrestre solicitado por el MTOP se pudo recopilar la siguiente información:

El pavimento rígido fue diseñado con un espesor de losa de 21 cm, debajo se encuentra una capa de asfalto de 24 cm y la capa granular de 30 cm; tiene dos carriles con un ancho de 6.80 m, los paños de las losas de hormigón y espaldón – cuneta con dimensiones de: 4 m (ancho) por 4.50 m (longitud); y, los espaldones variables entre 1.80 y 2.20 m de longitud con un ancho de 2.25 m. Para obtener los espesores y la realidad del pavimento el MTOP efectuó extracciones de núcleos (Figura 3.3) y perforaciones a cielo abierto (calicatas Figura 3.4), los cuales sirvieron para calibrar y comprobar las velocidades de propagación de onda que se han usado durante el procedimiento de información, trabajo que afinó la metodología georadar para la determinación de espesores.

Luego de haber concluido la obra se presentaron grietas prematuras por lo que el MTOP realizó varias evaluaciones estructurales y funcionales a la vía como:

1. Índice de Regularidad Internacional (IRI)
2. Macrotextura
3. Índice de Fricción Internacional (IFI)
4. Fisuración
5. Escaneo de Barras de Transferencia de carga
6. Deflexiones
7. Módulos Elásticos
8. Transferencia de Carga

Dando como resultado que el IRI del carril izquierdo presenta mayor deterioro en la vía que el carril derecho (limite aceptable para asfalto 2.5 m/km), en general el pavimento presenta una superficie rugosa y no comfortable a los usuarios. El valor de la Macrotextura en general cumple con los requisitos del MTOP (valor minino admisible es de 0.5 mm), sin embargo en el carril derecho presenta un coeficiente mayor al requerido, lo cual induce a un desgaste mayor de los neumáticos, causando un aumento en los gastos de circulación. El coeficiente de rozamiento y el IFI cumple con la normativa del MTOP. El porcentaje de fisuración es mayor en el carril izquierdo. En el escaneo de barras de

transferencia de carga los resultado arrojan que existe una dispersión tanto en la cantidad como en la alineación de los pasadores; con respecto a las deflexiones presentan deformaciones mayores a los limites, en donde las deflexiones de centro son menores que las de juntas y estas a su vez menores que las de esquina; existen varios sitios en los cuales la diferencia entre centro y esquina es contraria, lo cual podría suponer oquedades en la capa de soporte. Respecto a los módulos elásticos de hormigón en general presentan valores aceptables, lo cual conduciría a suponer que la mezcla fue conformada por buenos materiales y con la dosificación adecuada. La eficiencia de la transferencia de carga en promedio es regular ya que está en un rango de valores de (50 a 74) % pero lo recomendado para vías en donde circule tráfico pesado es bueno a excelente. Los valores de cada estudio se presentan en el Anexo 2.

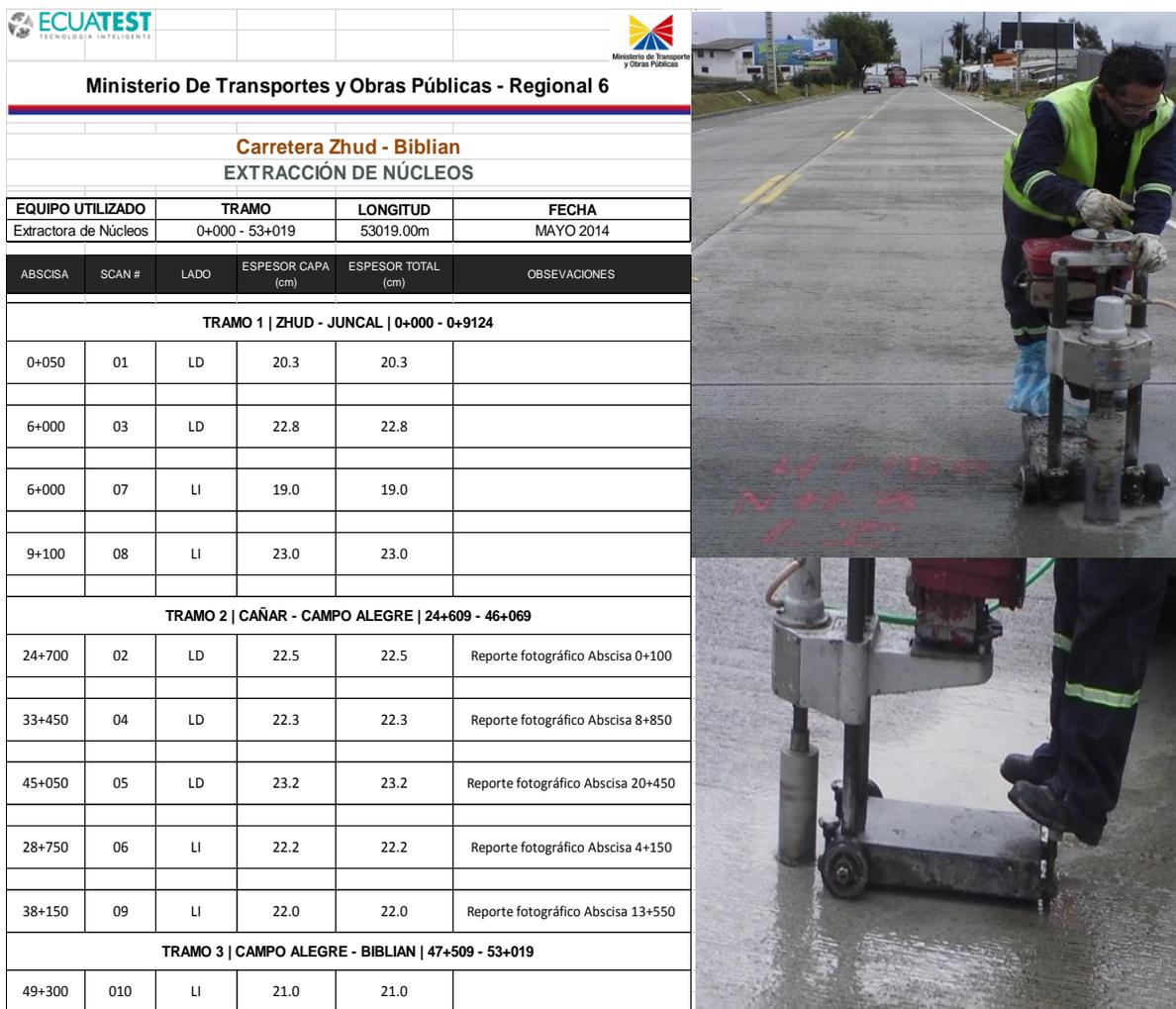


Figura 3. 3 Núcleos extraídos en el proyecto Zhud – Biblián (MTOPI Informe de hallazgos mediante radar de penetración terrestre)

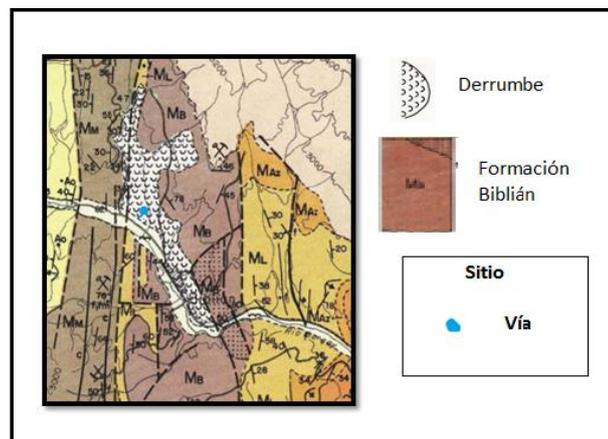
Ministerio De Transportes y Obras Públicas - Regional 6						
Carretera Zhud - Biblian						
REPORTE CALICATAS						
EQUIPO UTILIZADO	TRAMO	LONGITUD	FECHA			
Extractora de Núcleos	0+000 - 53+019	53019.00m	MAYO 2014			
N°	ABSCISAS	DESCRIPCION CAPAS	ESPESOR CAPA (cm)	ESPESOR TOTAL (cm)		
TRAMO 1   ZHUD - JUNCAL   0+000 - 0+9124						
01	1+000	Hormigón	23.0	23.0		
		Asfalto	31.0	54.0		
		Granular	24.0	78.0		
02	4+200	Hormigón	22.0	22.0		
		Asfalto	30.0	52.0		
		Granular 1	25.0	77.0		
03	7+300	Granular 2	12.0	89.0		
		Hormigón	22.0	22.0		
		Asfalto	21.0	43.0		
		Granular	26.0	69.0		
		TRAMO 2   CAÑAR - CAMPO ALEGRE   24+609 - 46+069				
		04	26+550	Hormigón	22.0	22.0
Asfalto Reciclado	18.0			40.0		
Granular	50.0			90.0		
05	28+000	Hormigón	22.0	22.0		
		Asfalto	25.0	47.0		
		Granular	30.0	77.0		
TRAMO 3   CAMPO ALEGRE - BIBLIAN   47+509 - 53+019						
06	49+000	Hormigón	21.0	21.0		
		Asfalto	24.0	45.0		
		Granular	30.0	75.0		
07	51+150	Hormigón	22.0	22.0		
		Asfalto	32.0	54.0		
		Granular	32.0	86.0		



Figura 3. 4 Perforaciones a cielo abierto - calicatas en el proyecto Zhud – Biblián (MTOPI Informe de hallazgos mediante radar de penetración terrestre)

### 3.1.2 Geología<sup>2</sup>

En el tramo afectado de la vía se identificó una zona de derrumbes y la Formación Biblián ( $M_B$ ) como se muestra en la Figura 3.5.



<sup>2</sup> Información proporcionada por la Carta Geológica del Instituto Geológico Militar (IGM).

Figura 3. 5 Mapa Geológico de la zona estudiada (IGM, ÑV-E Azogues hoja 73; NV-F Cuenca hoja 53)

**Formación Biblián (Mioceno Inferior) ( $M_B$ ):** La formación Biblián descansa en discordia sobre la Formación Yunguilla. El depósito basal es de guijarro grueso, a menudo con cantos de la Formación Yunguilla. Esta litología se repite en muchos niveles dentro de arcilla limosas, arenosas finas café – rojizas, y areniscas tobáceas gruesas. Aglomerado volcánicos rojos parecen formar la base local de la formación.

**Derrumbes:** Los extensos derrumbes en Paccha, Solano y Biblián están en continuo movimiento. Su apariencia característica de terrenos ondulados, agrietados y la formación de lagos temporales permite que sean identificados fácilmente, en especial en fotografías aéreas.

## 3.2 Investigación de Campo

### 3.2.1 Materiales y Equipo<sup>3</sup>

Para el desarrollo de las actividades de prospección geofísica y su procedimiento, utilizamos los siguientes equipos (Figura 3.6):

- **Equipo geoelectrico:** El equipo geoelectrico utilizado fue un resistivímetro marca PASI modelo 16SG24-N. Éste dispositivo es un sistema combinado entre la reflexión/refracción sísmica y tomografía eléctrica. Se utiliza principalmente para localizar cavidades, estudios de contaminación por agua salada en los acuíferos costeros, monitoreo de deslizamientos y represas (Instruments, 2011).

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

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

<sup>3</sup> (Instruments, 2011)

- **Energizador (P – 100T).**- genera suficiente energía para el ensayo.



Figura 3. 6 Equipos del Resistivímetro PASI modelo 16SG24-N. (Cortesía P.A.S.I.)

- **Batería.**- es la fuente de alimentación de todo el sistema.
- **Electrodos de acero inoxidable.**- barras metálicas a modo de electrodos cuyo número variará en función del problema, con una longitud ( $L = 50$  cm) y diámetro de ( $\varnothing = 1$  cm). conectar los electrodos.
- **Conectores (o terminales).**- son pequeños cables de cobre con pinzas en los extremos, se encargan de conectar los electrodos al cable eléctrico.
- **Cable multiconductor.**- tiene una longitud de 85 m, con conexiones cada 5 m, para conectar los electrodos.

#### Equipo complementario:

- GPS Garmin
- 1 cámara fotográfica
- Herramientas varias

### 3.2.2 Adquisición de Datos

Se realizaron dos visitas al sitio afectado para proceder a la toma de datos y se decidió adquirir 8 perfiles de resistividad en cada una de las visitas, obteniendo 16 perfiles en total que cubrieron un área de  $126 \text{ m}^2$  ( $22.5 \text{ m}$  de longitud  $\times$   $5.60 \text{ m}$  de ancho) como se muestra en la Figura 3.7.



*Figura 3. 7 Medición de la vía en el lugar afectado*

Como se dispone de un ancho de 5.60 m, la separación electródica fue de 0.40 m teniendo en cada línea 16 electrodos, colocando el primer electrodo en el eje de la vía orientándolos hacia su borde, como se muestra en la Figura 3.9 (a).

Los electrodos se colocaron en la superficie de la vía, donde se trabajó con una mezcla de arcilla y agua que facilitaron la estabilidad de los mismos para la inyección de corriente en el pavimento.

El equipo geoelectrico y accesorios fueron conectados, los conectores y el cable multiconductor fueron acoplados a los electrodos y conectados al resistivímetro (CPU) como se muestra el Figura 3.9 (b).

Se encendieron los equipos y desde la pantalla digital del resistivímetro se eligió la configuración Wenner-Schlumberger, el número de electrodos (16), y se designó el nombre del archivo donde se almacenaron los resultados.

En la Figura 3.8 se muestra una sucesión posible de medidas para el arreglo eléctrico Wenner-Schlumberger, el espaciamiento entre electrodos adyacentes es "a". Para la primera medida se usan los electrodos 1, 2, 3 y 4; donde el electrodo 1 trabaja como el electrodo de corriente C1, el electrodo 2 como el electrodo de potencial P1, el electrodo 3 como el electrodo de potencial P2 y el electrodo 4 como el segundo electrodo C2. Para la segunda medida, se usan los electrodos 2, 3, 4 y 5 para C1, P1, P2 Y C2 respectivamente. Esto se repite sobre la línea de electrodos hasta que se utilizan los electrodos 13, 14, 15 y 16 para la última medida con espaciamiento "1a".

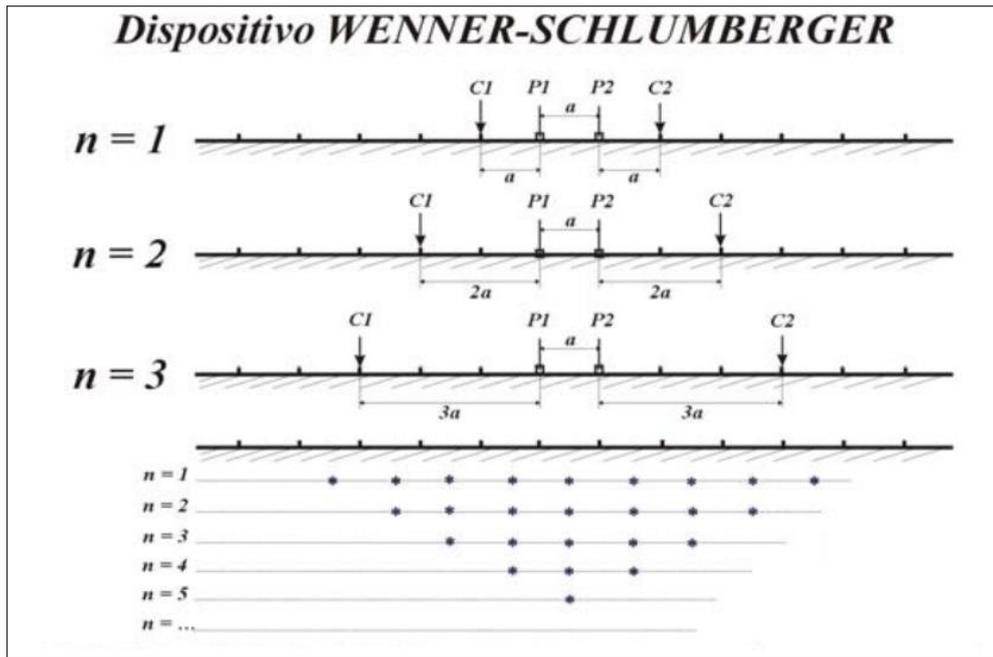


Figura 3.8 Dispositivo Wenner-Schlumberger; donde  $a$  es la separación entre electrodos,  $n$  es el nivel de medición,  $C1$ ,  $C2$  son los electrodos de Corriente y  $P1$ ,  $P2$  son los electrodos de potencial. (Andrés López Hidalgo et al. Tomografía eléctrica 2D y 3D).

La corriente eléctrica es suministrada por una batería la cual fue transmitida al resistímetro, Energizador (P-100T) Link Box y electrodos mediante el cable multiconductor, realizadas las mediciones estas se almacenaron en el resistímetro.

Finalizadas las mediciones del primer perfil, se realizó el mismo procedimiento para los siguientes 15 perfiles. La separación entre cada perfil fue de 1.50m, como se muestra en la Figura 3.9 (c).

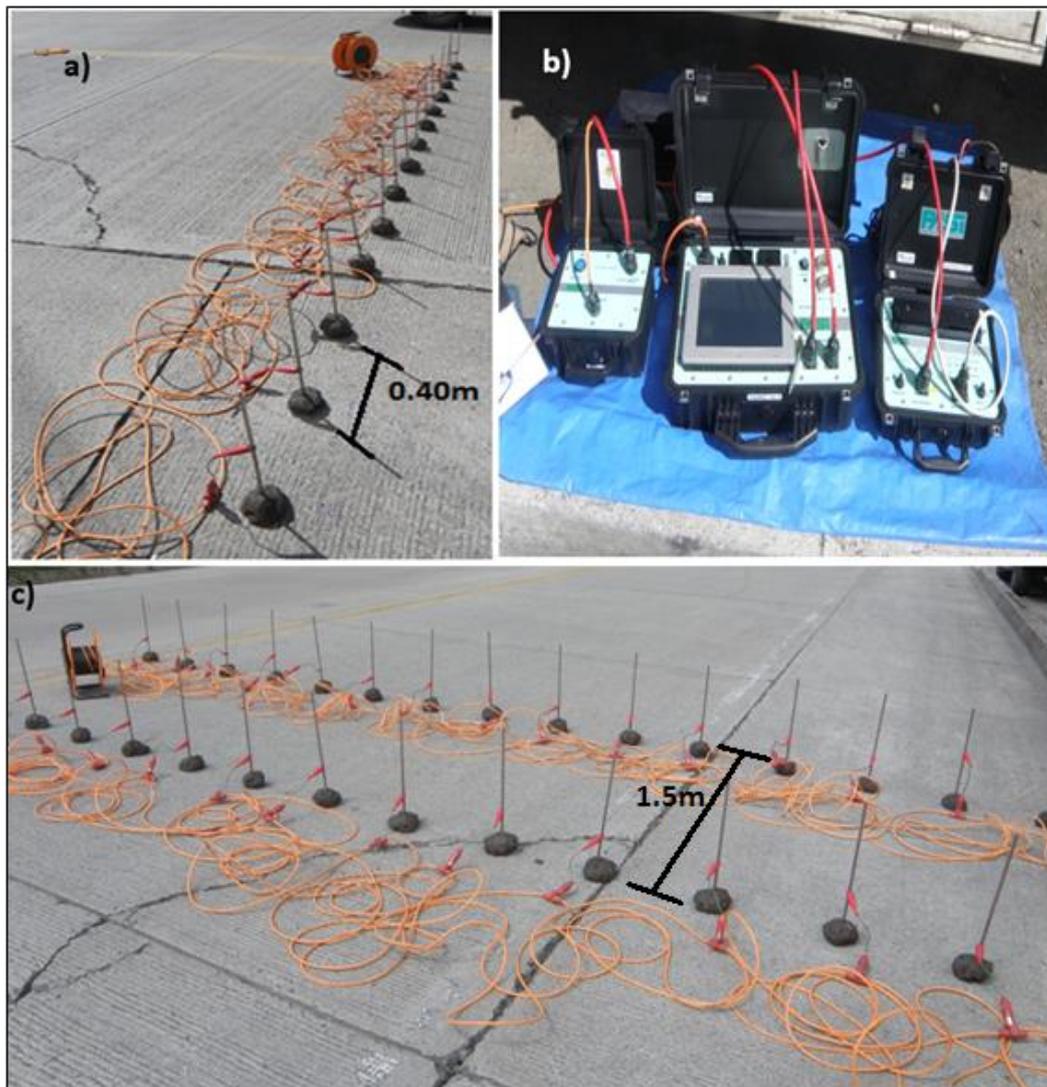


Figura 3. 9 a) Separación entre electrodos. b) Configuración y medición. c) Separación entre perfiles.

### 3.3 Procesamiento de Datos

El programa utilizado para el proceso de datos en 2D es RES2DINV y para el proceso de datos en 3D es Voxler.

#### 3.3.1 Procesamiento bidimensional de los datos

RES2DINV es un programa informático que determinará automáticamente un (2-D) modelo bidimensional de resistividad del subsuelo de los datos obtenidos de las encuestas de imagen eléctricos (Griffiths y Barker 1993). Este programa despliega los datos de resistividad en forma de perfiles, por niveles.

Una de las ventajas de este programa es que cuenta con un módulo para eliminar datos erróneos realizando iteraciones de los datos de cada perfil (tabla 1), así que utilizando esta herramienta, lo primero que realiza con los archivos de cada

perfil es limpiarlos. Los datos erróneos pueden ser ocasionados por algún problema con el contacto del electrodo con el pavimento, la presencia de objetos metálicos enterrados, fuentes electromagnéticas como cables de alta tensión en las cercanías, potenciales naturales y corrientes telúricas entre otros. La eliminación de datos no necesariamente implica un cambio en la información, simplemente los puntos identificados como incongruentes modifican los resultados en cuanto a su semejanza con el modelo buscado.

Estadísticamente los valores obtenidos en campo presentan errores un poco elevados y mediante el programa RES2DINV se logró disminuir el porcentaje de error ya que este programa realiza varias iteraciones antes de obtener cada perfil. (Ver anexo 1)

<b>Tabla de Iteraciones Perfil 1</b>		
<b>Número de Iteraciones</b>	<b>Tiempo de Iteración</b>	<b>% de Error Absoluto</b>
1	2.48	9.461
2	0.95	5.03
3	0.69	4.078
4	1.48	3.406
5	1.17	3.304

*Tabla 1. Iteraciones de los datos del perfil 1 reduciendo el porcentaje de error absoluto.*

Una subrutina de modelado directo se utiliza para calcular los valores de resistividad aparente, y una técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados se usa para la rutina de inversión (deGroot-Hedlin y Constable 1990, Loke y 1996a Barker). El programa es compatible con las técnicas de modelización con visión de elementos finitos y diferencias finitas. Puede procesar pseudosecciones con hasta 16000 electrodos y 21000 puntos de datos en una sola vez en un equipo con 1 GB de RAM. La mayor distancia entre electrodos puede ser hasta 36 veces la separación más pequeña utilizada en un solo conjunto de datos.

Una vez aplicados los parámetros necesarios, se inicia la inversión. El programa despliega una pseudosección de resistividades aparentes medidas, otra pseudosección de resistividades aparentes calculadas y la sección de resistividades producto del modelo inverso (Figura 3.8).

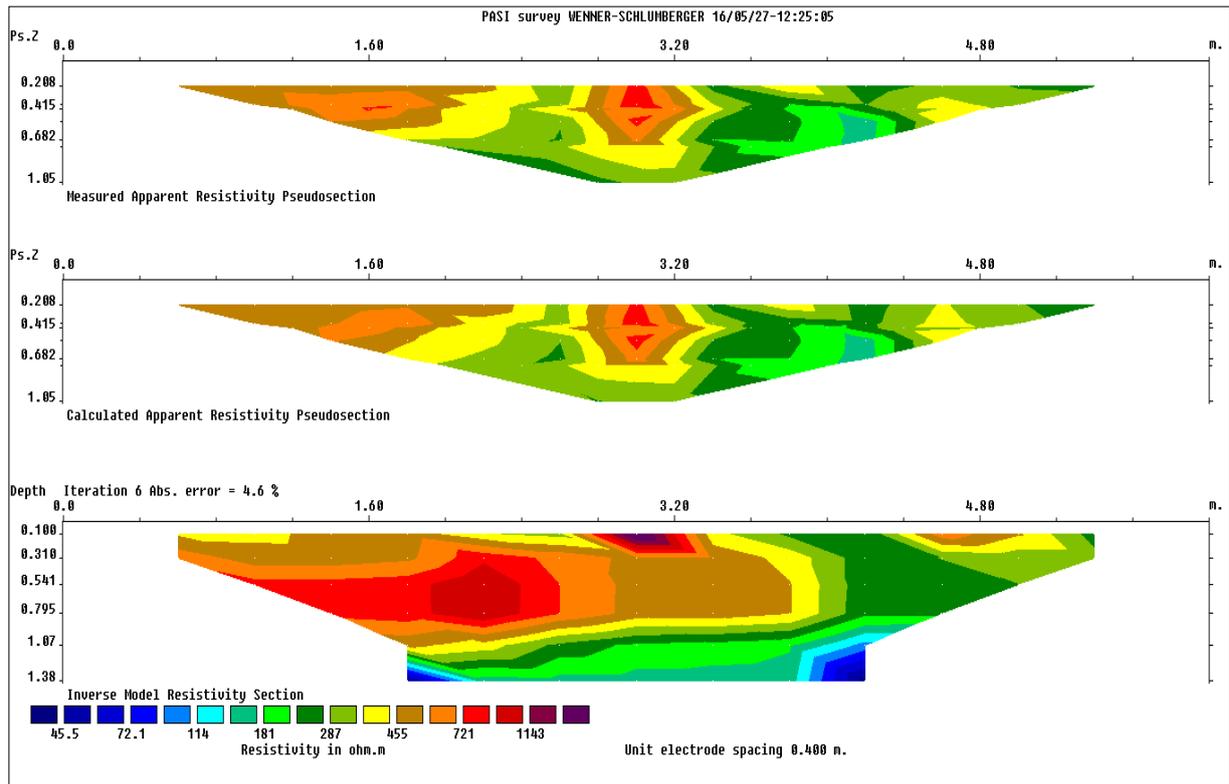


Figura 3. 10 Ejemplo de despliegue para el programa RES2DINV de la vía Zhud - Biblián, a) pseudosección de resistividades aparente medidas, b) pseudosección de resistividades aparentes calculadas y c) modelo inverso de resistividades.

Para una mejor visualización de cada uno de los perfiles se utilizó una escala de colores adecuada debido que el valor mínimo y máximo para cada resultado no es el mismo, se decidió acotar el rango de resistividades entre 30 y 3000  $\Omega \cdot m$ , de manera que las comparaciones de colores sean directos. Esto no implica que estos sean los valores mínimos y máximos de cada tomografía.

### 3.3.2 Procesamiento tridimensional de los datos

Voxler es un programa de visualización en tres dimensiones orientado principalmente hacia la representación volumétrica y visualización de datos. Este programa puede mostrar líneas de flujo, diagramas vectoriales, mapas de contorno, isosuperficies, cortes de imagen, gráficos de dispersión tridimensionales, representación directa de volumen, bloques 3D, así como marcas y más.

Voxler está diseñado para la visualización de datos XYZC, donde C es una variable en cada X, Y, Z y la ubicación.

## Elaboración de Modelos 2D Y3D

### 3.3.3 Modelos bidimensionales

A continuación se presentan los 16 perfiles 2D obtenidos mediante el programa RES2DINV.

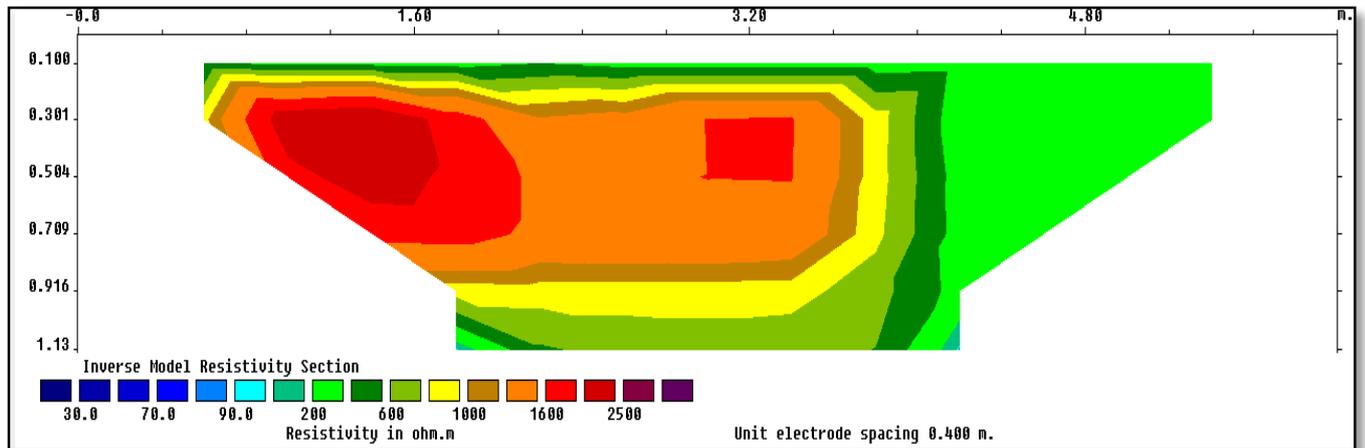


Figura 3. 11 Perfil 1 con una profundidad de 1.13 m

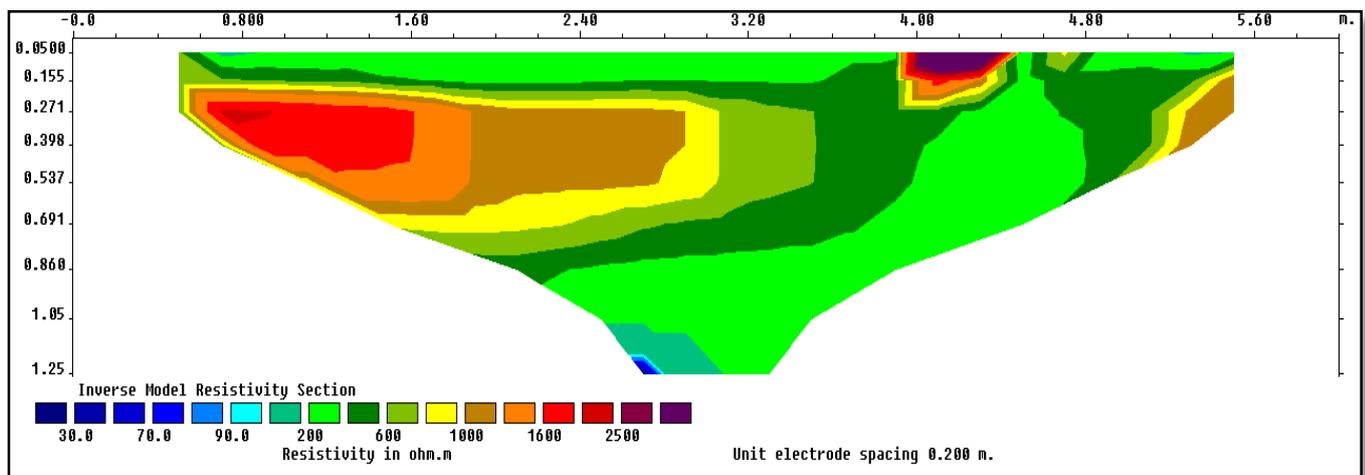


Figura 3. 12 Perfil 2 con una profundidad de 1.25 m

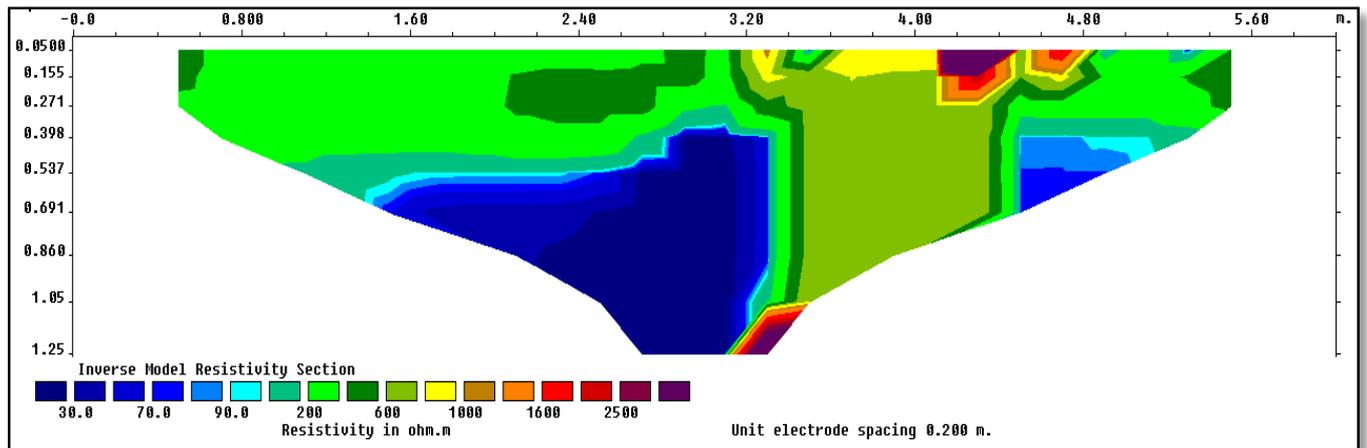


Figura 3. 13 Perfil 3 con una profundidad de 1.25 m

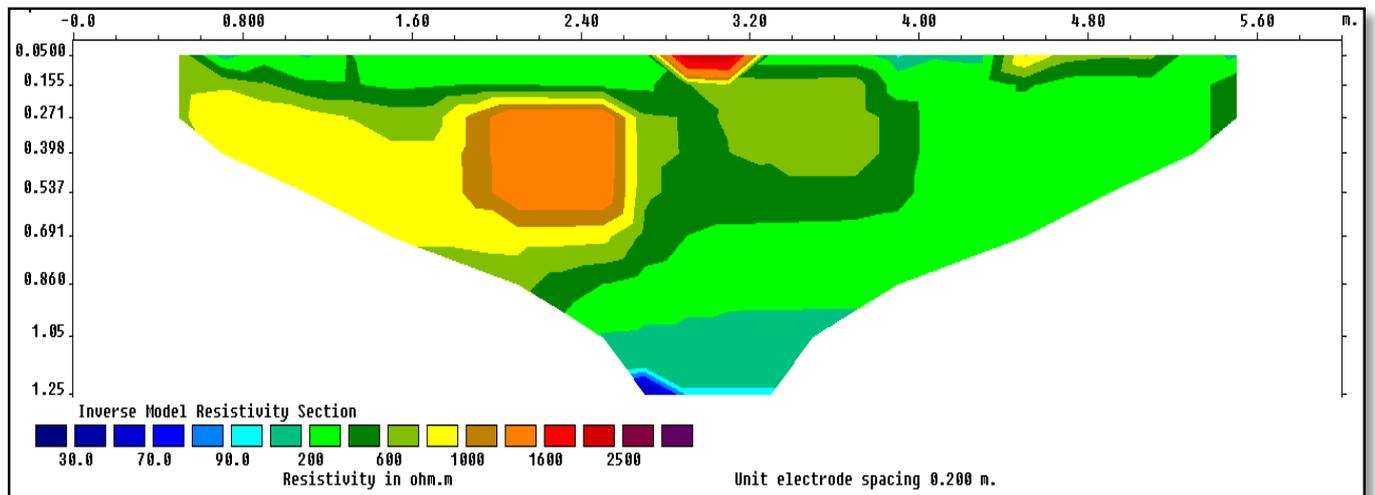


Figura 3. 14 Perfil 4 con una profundidad de 1.25 m

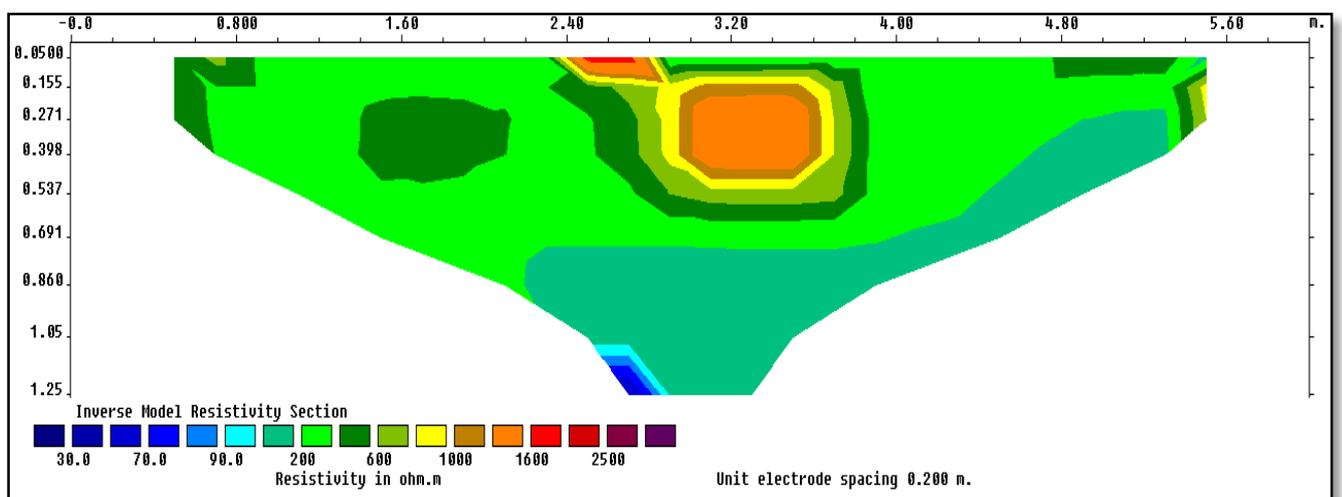


Figura 3. 15 Perfil 5 con una profundidad de 1.25 m

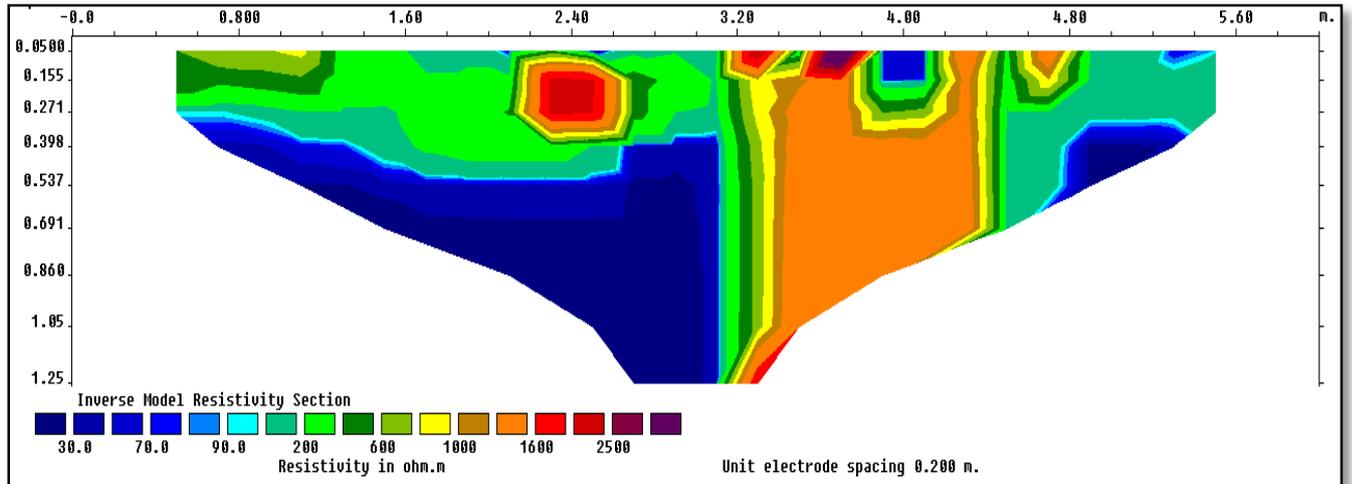


Figura 3. 16 Perfil 6 con una profundidad de 1.25 m

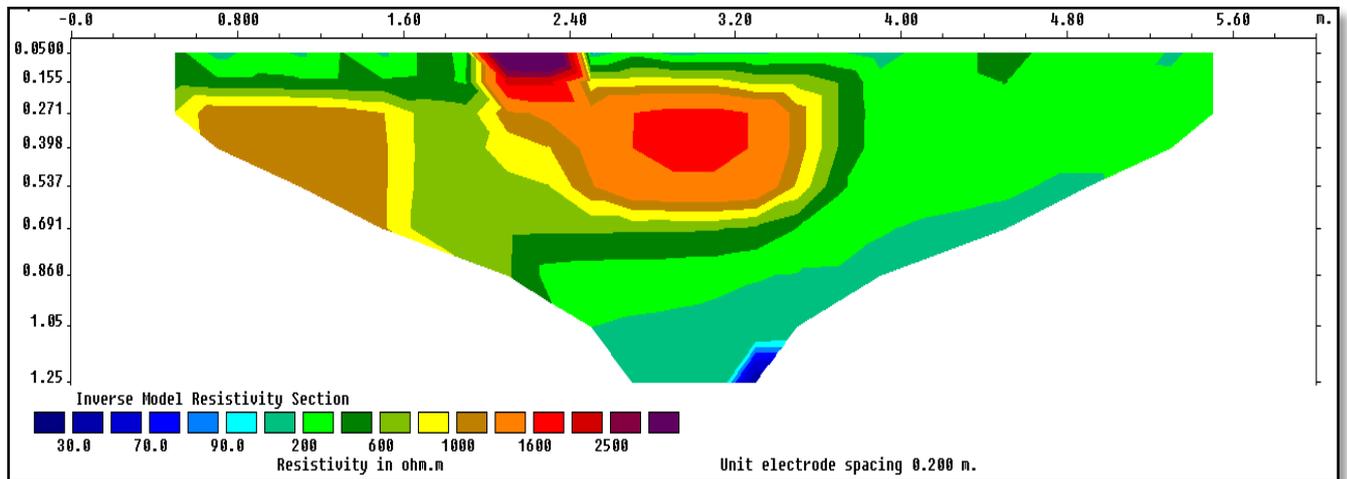


Figura 3. 17 Perfil 7 con una profundidad de 1.25 m

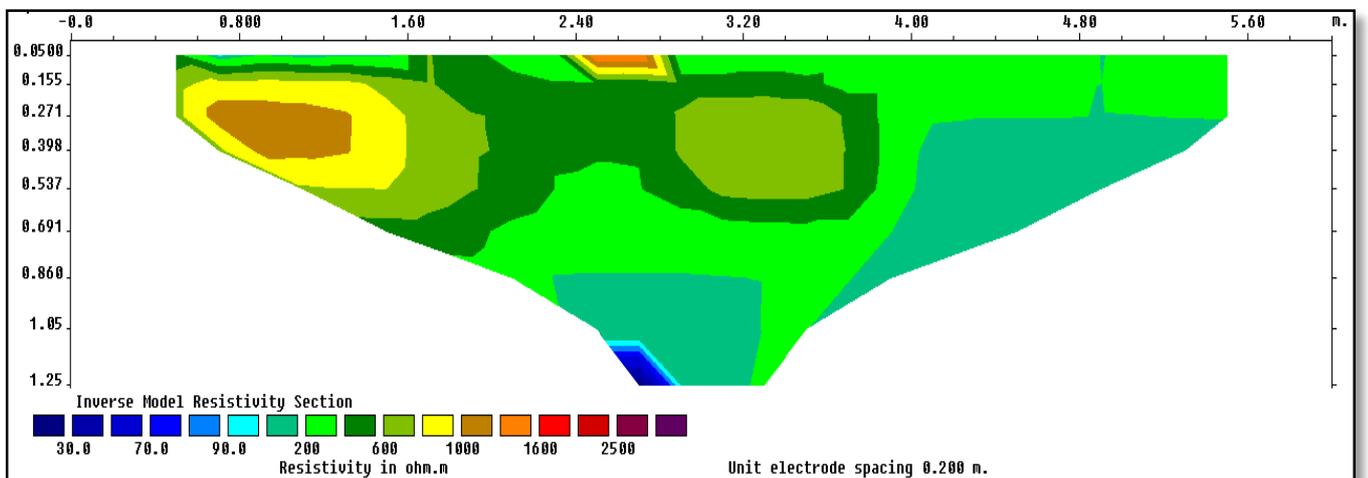


Figura 3. 18 Perfil 8 con una profundidad de 1.25 m

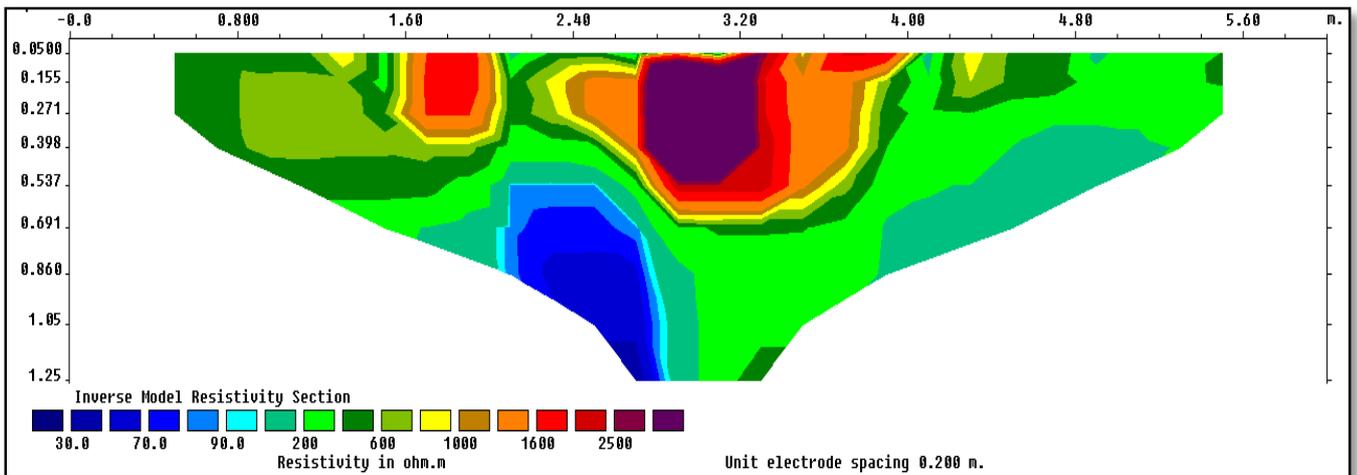


Figura 3. 19 Perfil 9 con una profundidad de 1.25 m

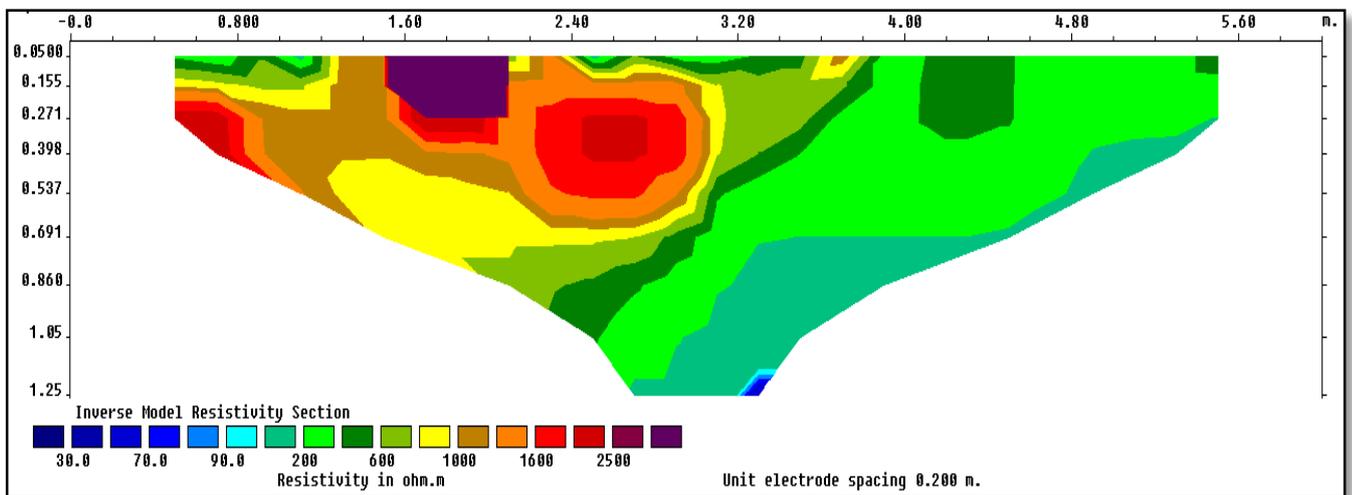


Figura 3. 20 Perfil 10 con una profundidad de 1.25 m

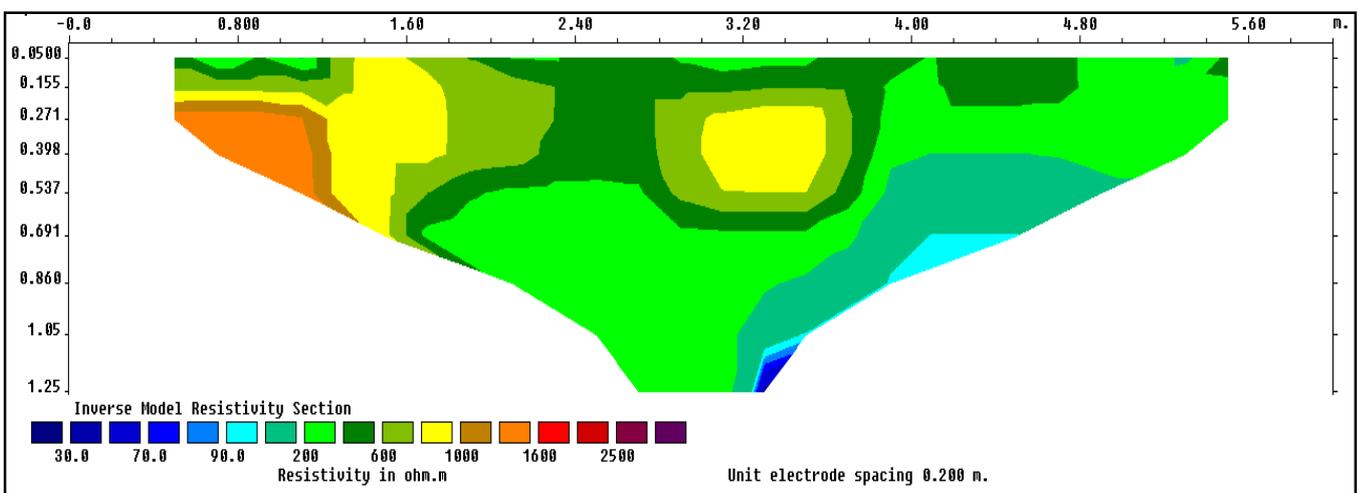


Figura 3. 21 Perfil 11 con una profundidad de 1.25 m

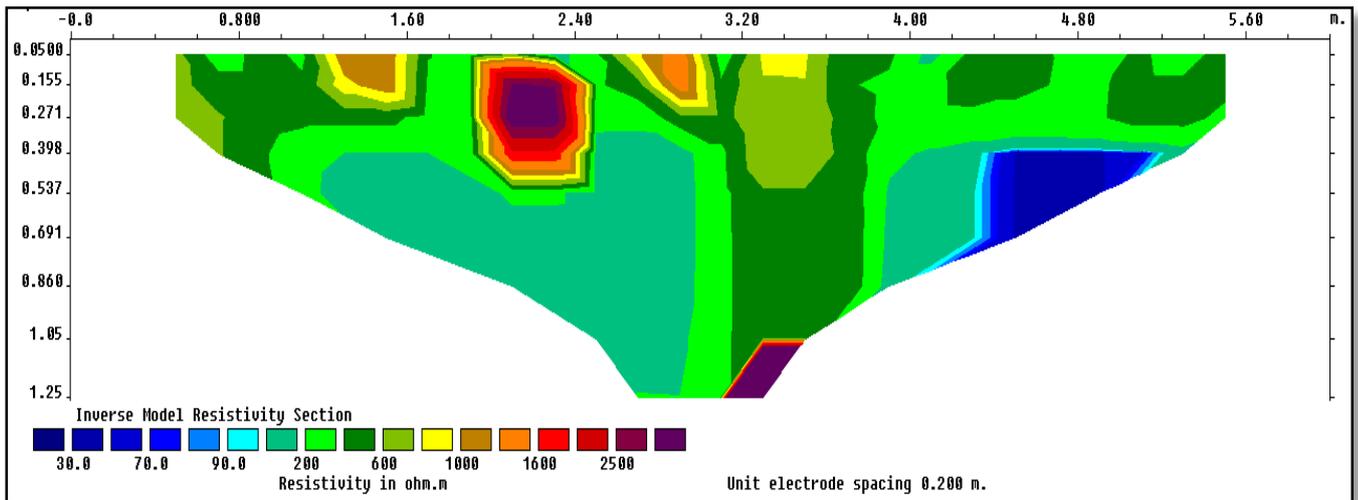


Figura 3. 22 Perfil 12 con una profundidad de 1.25 m

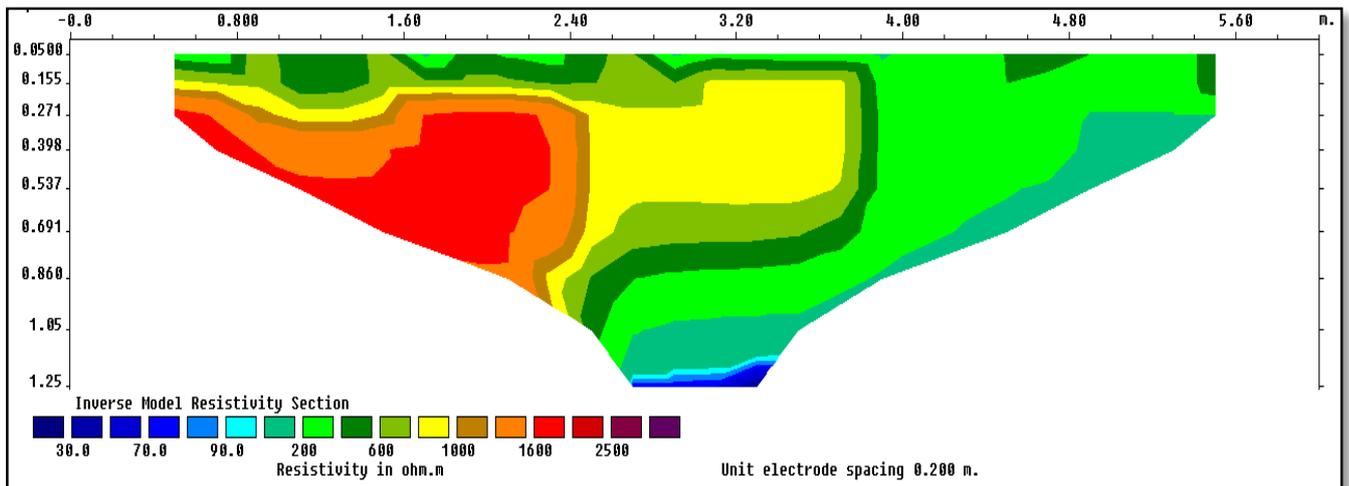


Figura 3. 23 Perfil 13 con una profundidad de 1.25 m

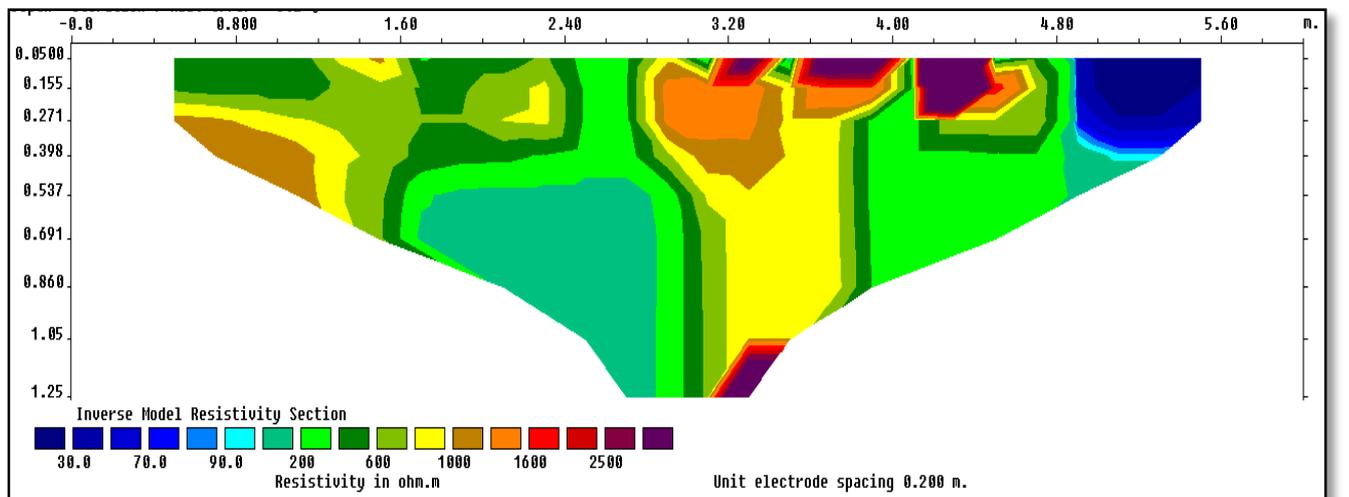


Figura 3.24 Perfil 14 con una profundidad de 1.25 m

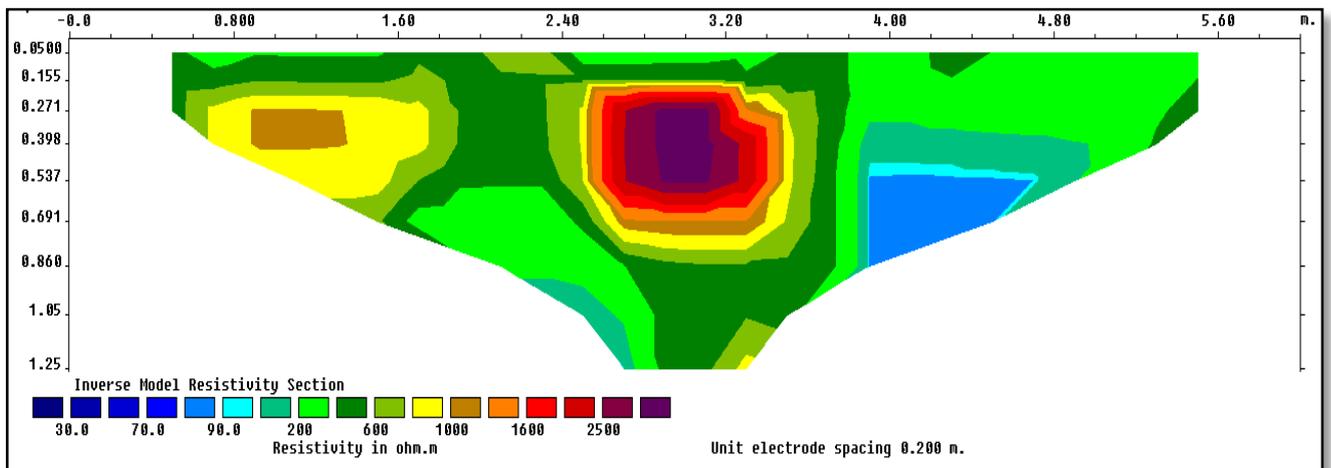


Figura 3.25 Perfil 15 con una profundidad de 1.25 m

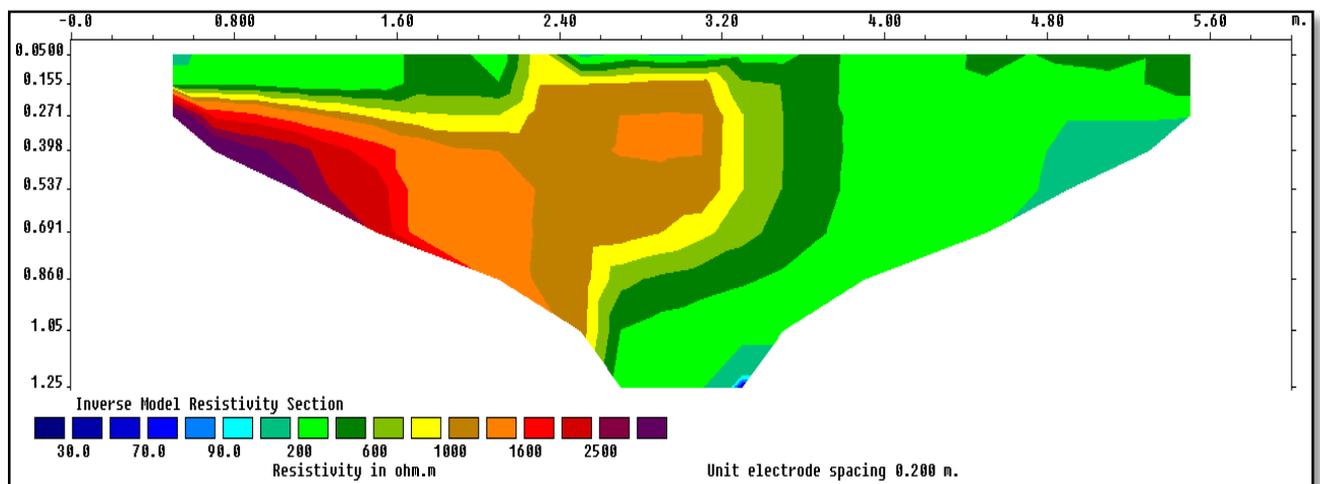


Figura 3. 26 Perfil 16 con una profundidad de 1.25 m

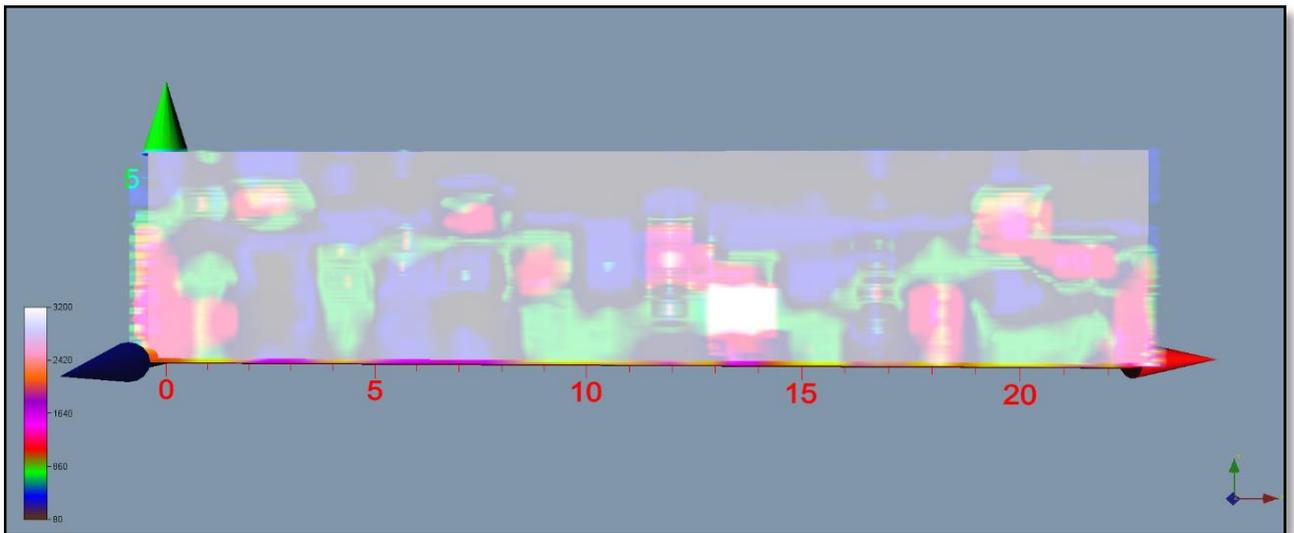
Como se puede observar en cada uno de los perfiles, la distribución de la resistividad a profundidad sigue un comportamiento similar, es decir, se aprecia una capa de alta resistividad (mayor a  $200 \Omega \cdot m$ ) presente en todos los perfiles.

Este comportamiento es extremadamente diferente en el perfil 3 y en el perfil 6, donde se observan valores de resistividad muy pequeños (menor a  $30 \Omega \cdot m$ ), la razón de esta variación es que estos perfiles se encuentran muy cercanos a las juntas transversales, las cuales tienen varillas de acero y puede ser la causante de registrar valores bajos.

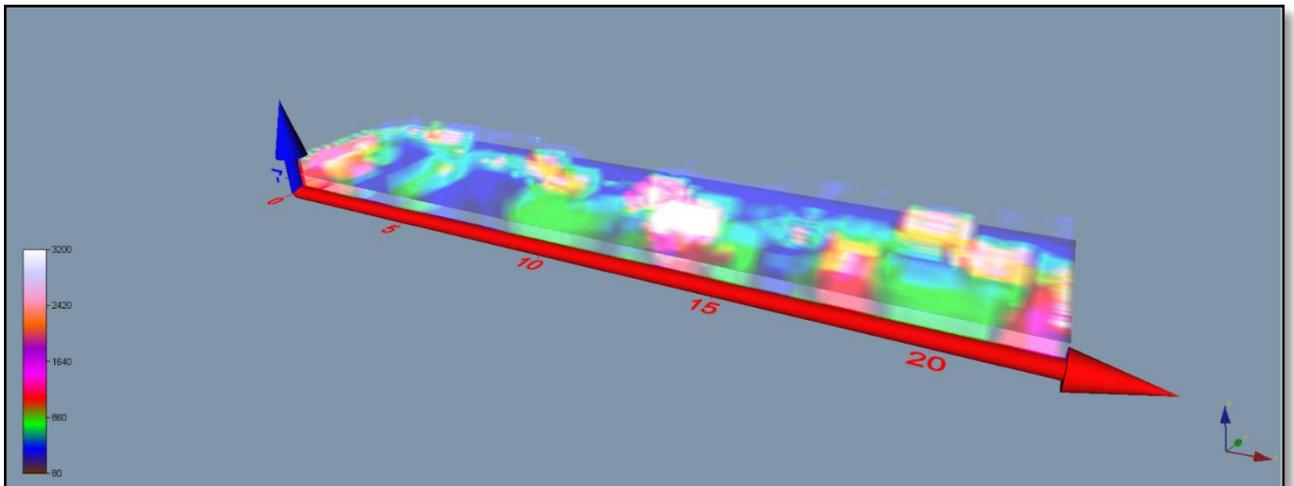
### 3.3.4 Modelo Tridimensional

A continuación se presenta el modelo 3D, obtenido mediante el programa Voxler.

La figura 3.23 y 3.24 muestran el modelo que contiene los 16 perfiles.



*Figura 3. 27 Modelo 3D vista en planta*



*Figura 3. 28 Modelo 3D vista lateral desde el eje de la vía*

La figura 3.25 y 3.26 muestran el modelo en donde se descartó los perfiles 3 y 6 como ya se explicó anteriormente.

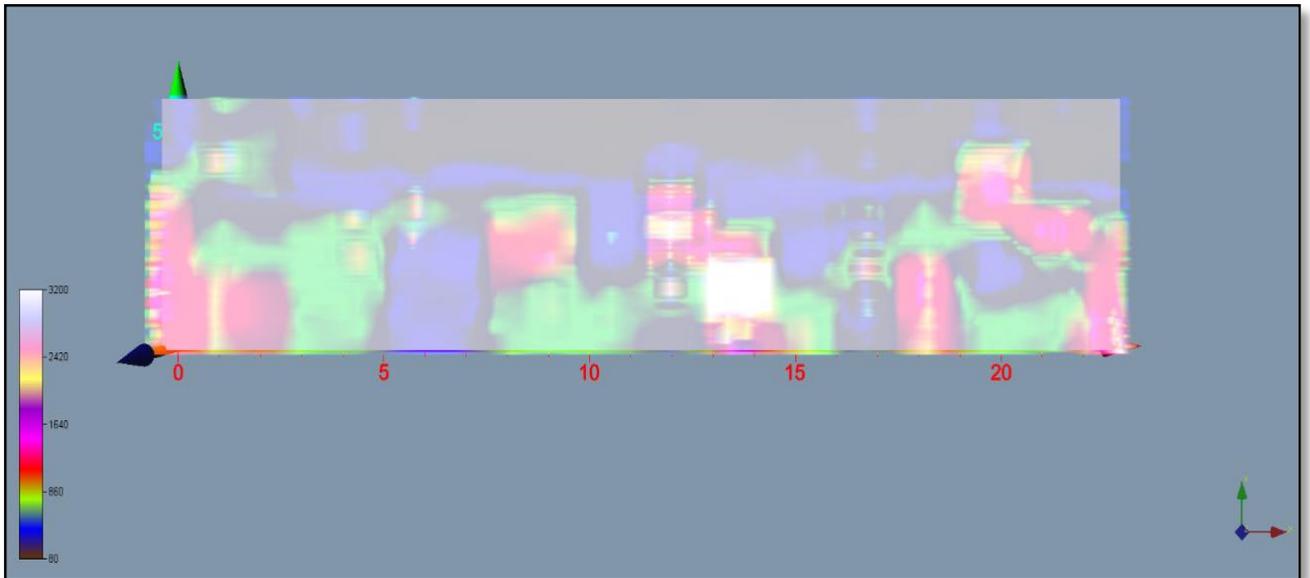


Figura 3. 29 Modelo 3D vista en planta

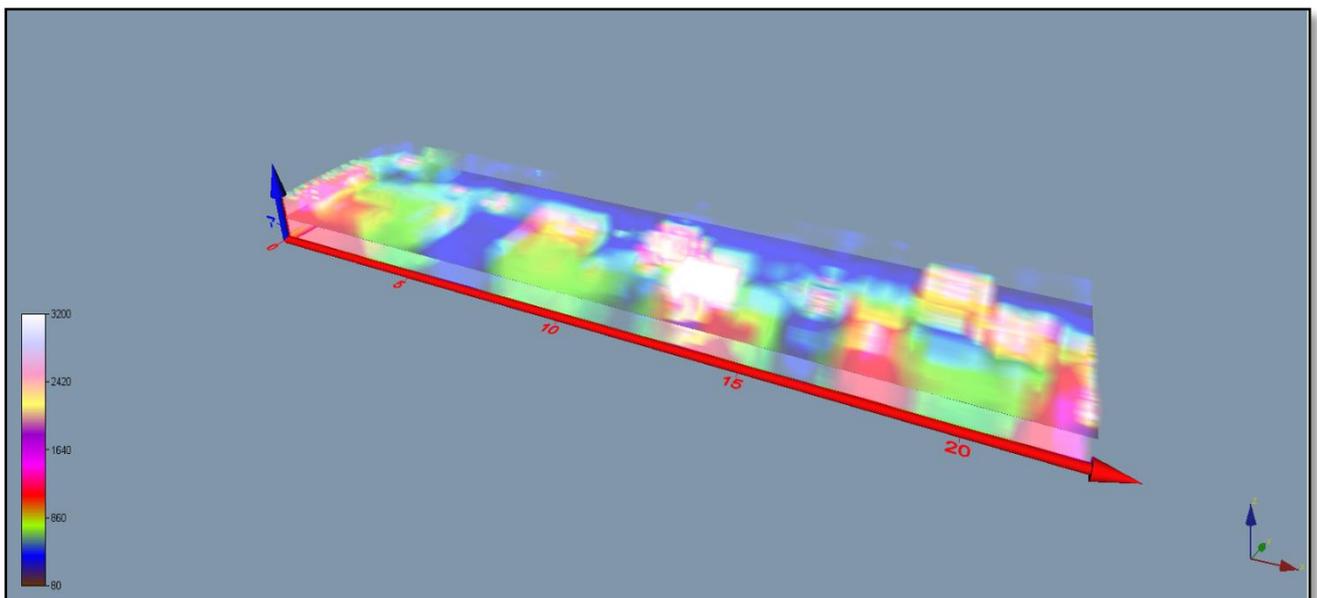


Figura 3. 30 Modelo 3D vista lateral desde el eje de la vía

## CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Interpretación de modelos 2D y 3D

La Figura 4.1 muestra un esquema de la ubicación de la fisura y los electrodos que ayudara a la interpretación de cada uno de los perfiles.

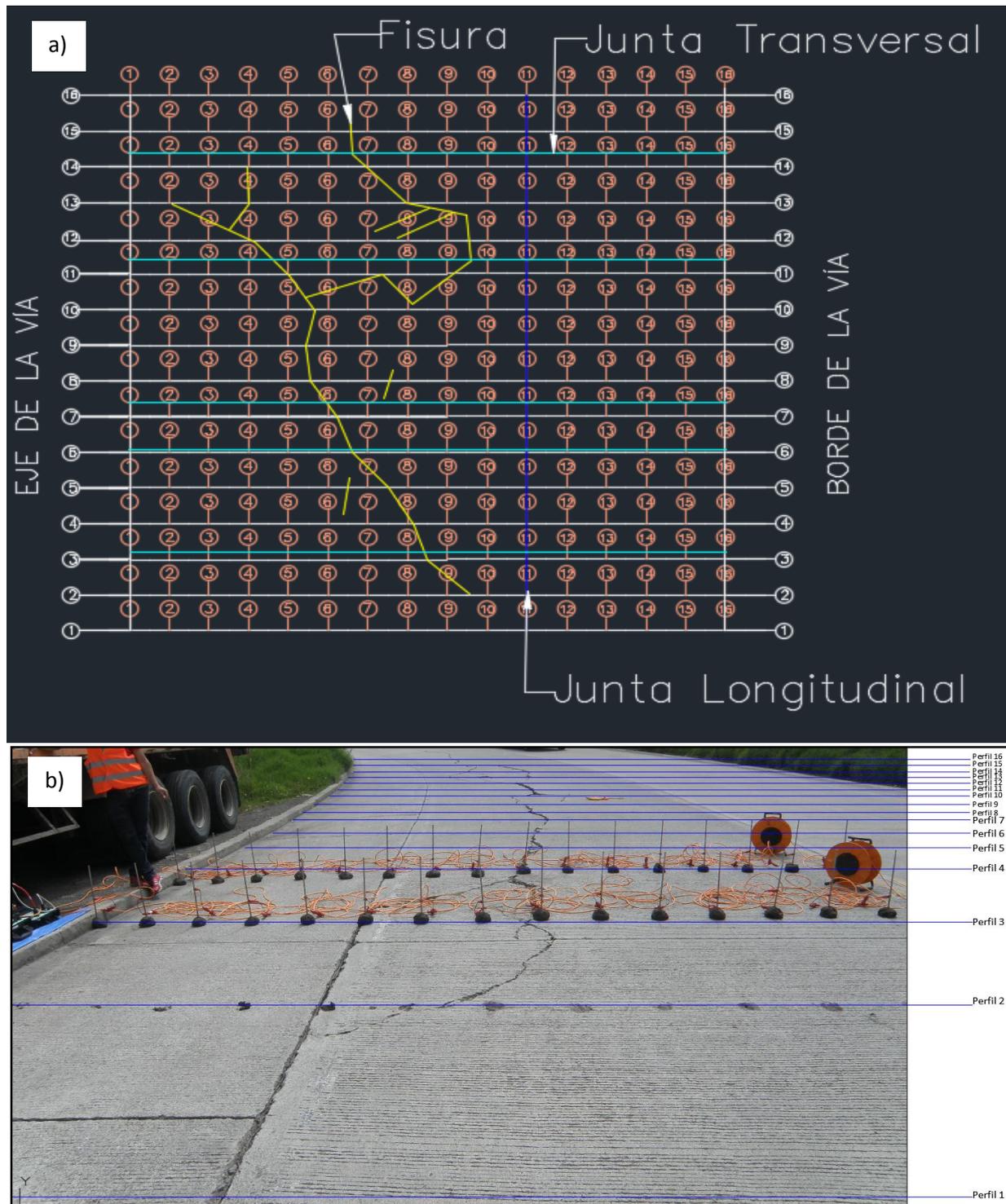


Figura 4. 1 Esquema a) ubicación de la fisura (color amarillo) y los electrodos (color turquesa), b) perfiles ubicados en la vía.

### 4.1.1 Modelos 2D

La sección afectada que fue analizada se encuentra en el carril izquierdo en dirección sur – norte con un ancho de 4 m y un espaldón de 1.60 m dividida por una junta longitudinal que en cada perfil está localizada en el electrodo número 11.

En los perfiles 1, 5, y 10 se realizó un cambio de escala de colores con un rango de  $80 \Omega\cdot m$  hasta  $2000 \Omega\cdot m$  desglosando los valores desde  $200 \Omega\cdot m$  hasta  $400 \Omega\cdot m$  para una mejor interpretación dentro de ese rango.

#### Perfil 1

Este perfil se encuentra al inicio del tramo analizado, en donde la vía no presenta deterioro alguno superficialmente, es por esto que se puede observar en la figura 4.2 a) diferentes valores de resistividad; en el rango de  $800 \Omega\cdot m$  a  $1600 \Omega\cdot m$  se puede interpretar como la estructura del pavimento en buen estado con un espesor de 0.30 m diferenciando los valores más altos en la parte izquierda, en donde se encuentra una capa de asfalto con espesor de 0.24 m (color rojo), por estos valores tan altos ( $1600 \Omega\cdot m$  a  $2300 \Omega\cdot m$ ) se entiende que la capa de asfalto se encuentra en buen estado. La losa de hormigón tiene un espesor de 0.21 m y se puede apreciar en un rango de valores de  $200 \Omega\cdot m$  a  $400 \Omega\cdot m$  (color verde); sin embargo en el metro 2 hasta 2.80 se puede ver que la capa de hormigón se está asentando ya que las líneas que separan cada color tienden hacia abajo.

Para poder analizar la parte derecha de la vía en donde se encuentra el espaldón se cambió la escala de colores como ya se mencionó anteriormente (Figura 4.2 b) en donde se puede distinguir resistividades pequeñas que representan una zona no afectada con material suelto.

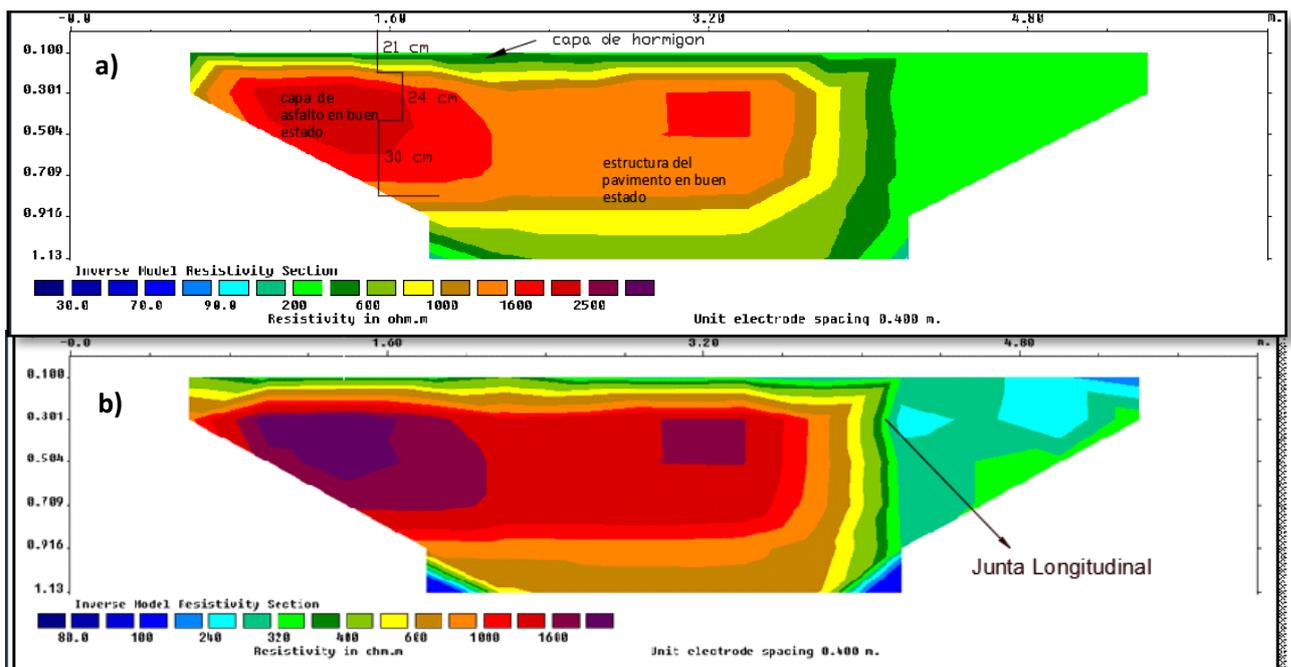


Figura 4. 2 Perfil 1 de resistividades: a) con un rango de  $30 \Omega\cdot m$  hasta  $3000 \Omega\cdot m$ , b) con un rango de  $80 \Omega\cdot m$  hasta  $2000 \Omega\cdot m$ .

## Perfil 2

En el perfil 2 se puede observar que ya empieza el deterioro del pavimento en el metro 3.90 en el eje horizontal encontrándose dentro de un rango de  $2300 \Omega \cdot m$  a  $3000 \Omega \cdot m$  siendo los valores de resistividad más altos que se tiene. La estructura del pavimento como ya se mencionó en el primer perfil se encuentra en el rango de  $800 \Omega \cdot m$  a  $1600 \Omega \cdot m$  con un espesor de  $0.30m$ , presentando las mismas características del perfil anterior en la parte izquierda se encuentra la capa de asfalto en buen estado (Figura 4.3), pero también podemos observar que esta capa en el metro 1.60 disminuye en resistividad indicando que se está deteriorando o que en la reconstrucción quitaron esa capa, ( $1000$  a  $1500$ ). En el metro 3 hasta el metro 3.80 se identifica una zona de falla estructural de dicho pavimento es decir puede ser material suelto o la estructura puede tener un contenido de humedad alto, esta zona de falla proviene del deterioro ya existente con un rango de resistividad de  $200 \Omega \cdot m$  a  $600 \Omega \cdot m$ .

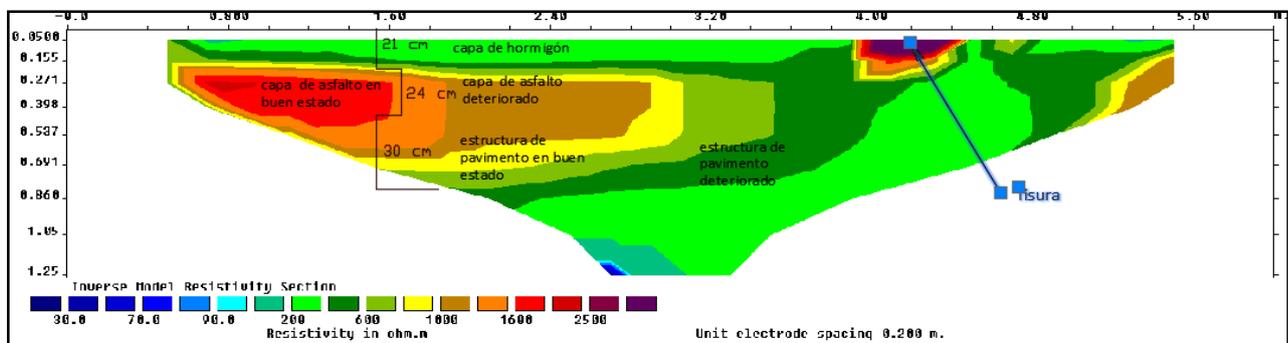


Figura 4. 3 Perfil 2 de resistividades con un rango de  $30 \Omega \cdot m$  hasta  $3000 \Omega \cdot m$

## Perfil 3

En la Figura 4.4 se puede observar que en la imagen varían los valores de resistividad en comparación con los otros perfiles, pero se identifica claramente la grieta en el metro 4.20 con un alto valor de resistividad; los valores bajos que contiene el perfil se debe a la presencia de los aceros en la junta transversal; es por esto que no se puede apreciar las diferentes capas del pavimento como se muestra en los demás perfiles, en la parte inferior muestra un rango de valores de resistividad muy bajo pudiendo interpretar como una zona de infiltración y en el metro 3.20 hasta 4.80 si se observa parte de la estructura del pavimento deteriorada.

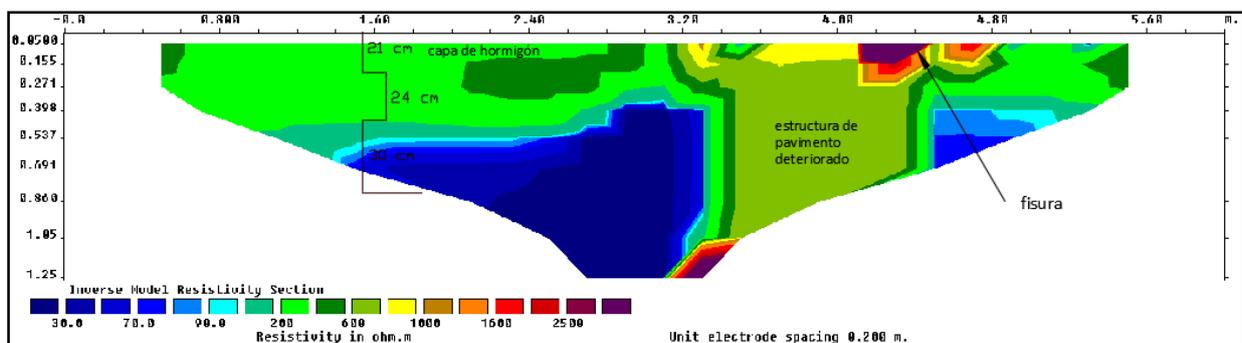


Figura 4. 4 Perfil 3 de resistividades con un rango de  $30 \Omega \cdot m$  hasta  $3000 \Omega \cdot m$

## Perfil 4

En la Figura 4.5 se identifica cada uno de los rangos ya explicados en las figuras anteriores, pudiendo ubicar a la fisura en el metro 2.65 en donde empieza un decrecimiento de resistividad que se interpreta como una estructura del pavimento deteriorado pudiendo contener material suelto o humedad como ya se dijo anteriormente que envuelve al pavimento en buen estado con un espesor de 0.30m. Se puede apreciar que la capa de hormigón va aumentando de espesor, es decir podría concluirse que hay un asentamiento de la vía ya que las líneas que separan los colores de resistividad tienden hacia abajo.

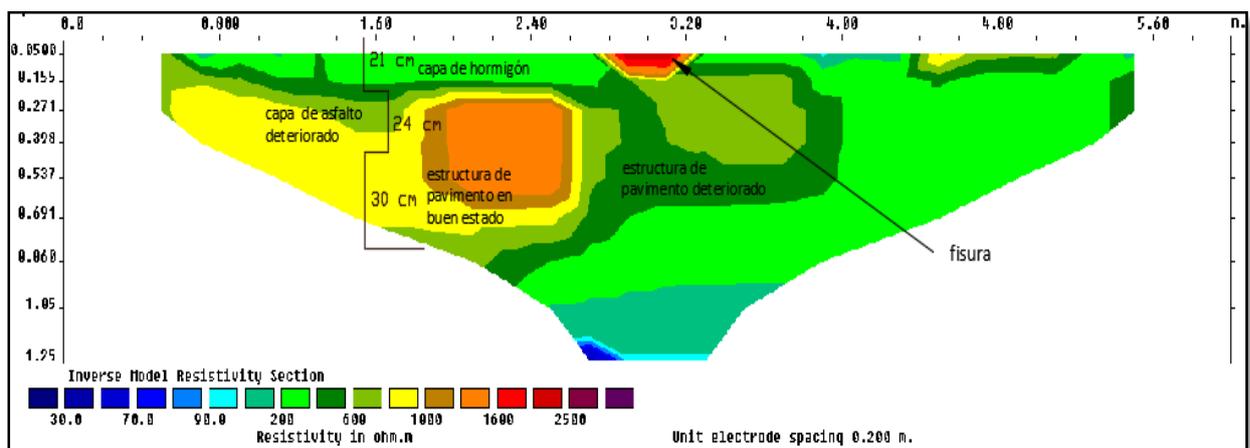


Figura 4. 5 Perfil 4 de resistividades con un rango de 30  $\Omega\cdot m$  hasta 3000  $\Omega\cdot m$

## Perfil 5

En este perfil podemos observar que la fisura se va extendiendo hacia la estructura del pavimento (Figura 4.6 a), afectando las capas del mismo. En la figura 4.6 b) se puede apreciar detalladamente que la estructura del pavimento se está deteriorando en la parte izquierda representando un agrietamiento importante, en la parte derecha del perfil se puede apreciar resistividades pequeñas, esto se da debido a que se encuentra en la zona de junta longitudinal que separa el carril con el espaldón de la vía, analizando la parte inferior del perfil se puede distinguir valores muy bajos de resistividad, posiblemente haya zonas de infiltración o zonas altamente saturadas.

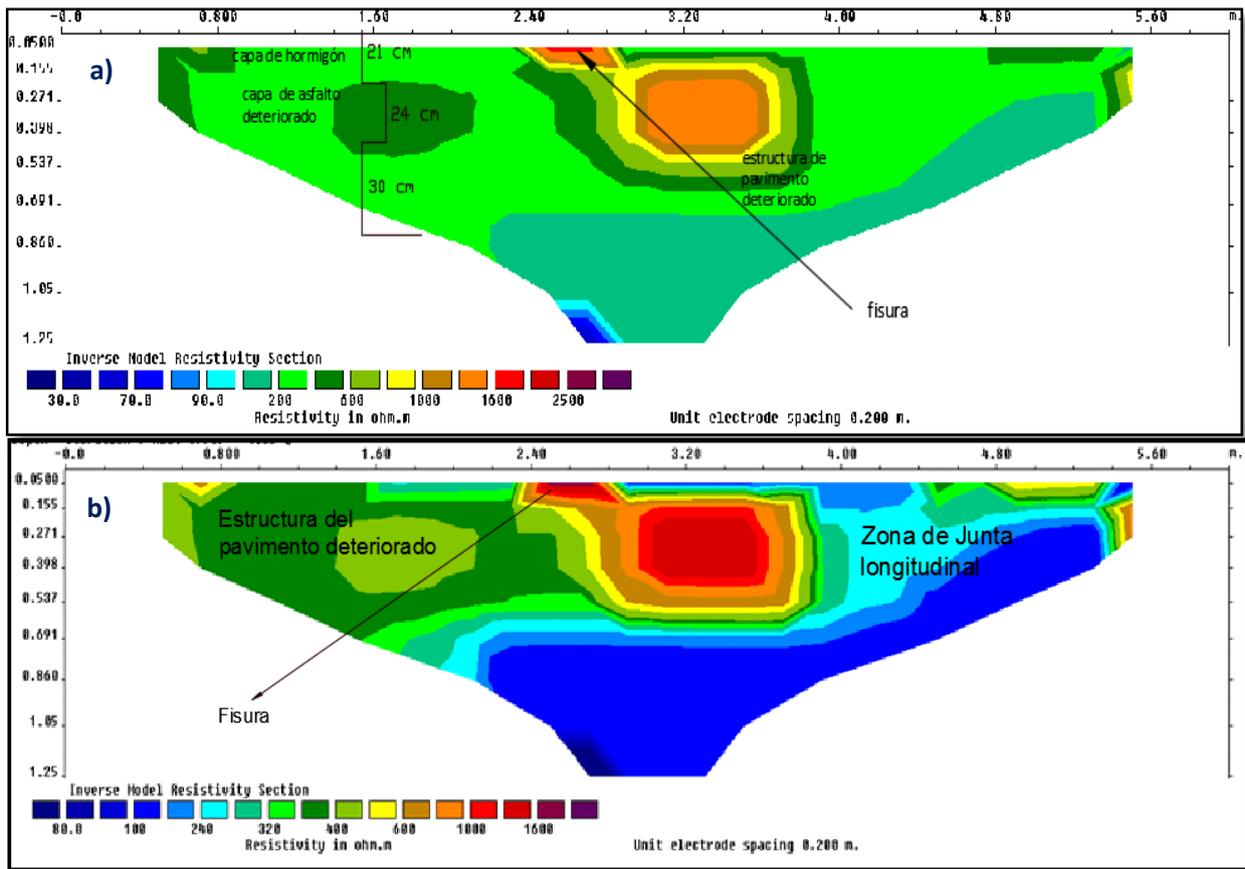


Figura 4. 6 Perfil 5 de resistividades: a) con un rango de 30  $\Omega$ -m hasta 3000  $\Omega$ -m, b) con un rango de 80  $\Omega$ -m hasta 2000  $\Omega$ -m

## Perfil 6

En el metro 3.20 hasta el metro 4 la grieta es más desarrollada pero este perfil como el perfil 3 como ya se explicó se encuentran en la junta transversal y por esa razón los valores de resistividad varían ampliamente, sin representar de manera real la estratigrafía. (Figura 4.7).

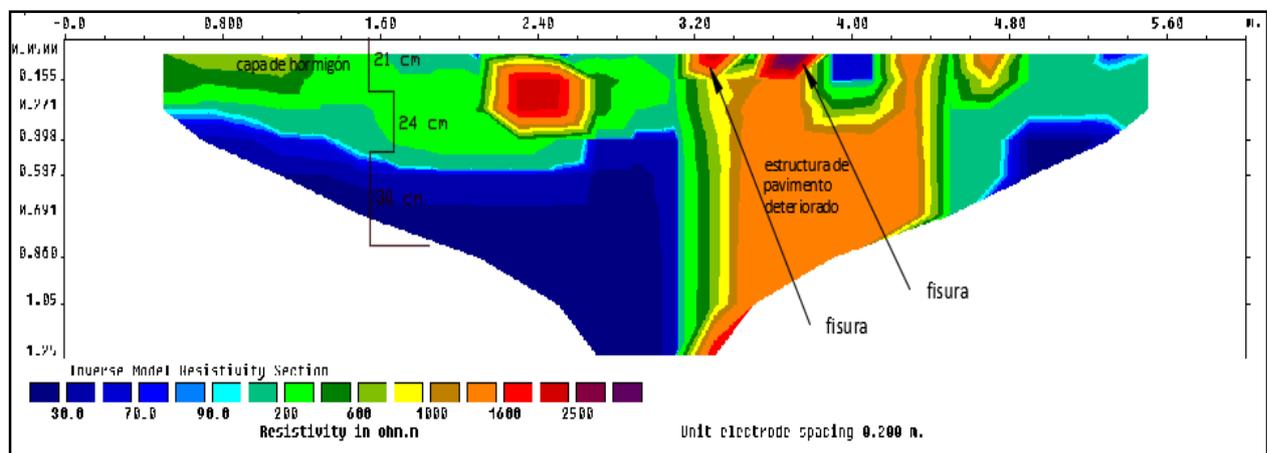


Figura 4. 7 Perfil 6 de resistividades con un rango de 30  $\Omega$ -m hasta 3000  $\Omega$ -m.

## Perfil 7

En el metro 2 hasta el metro 2.40 la grieta es más desarrollada y conjuntamente con los perfiles 4 y 5 la losa de hormigón está deteriorada en un 30% de un total de 4 m (ancho del carril), también se puede distinguir claramente que sigue presente el deterioro en la estructura del pavimento (Figura 4.8).

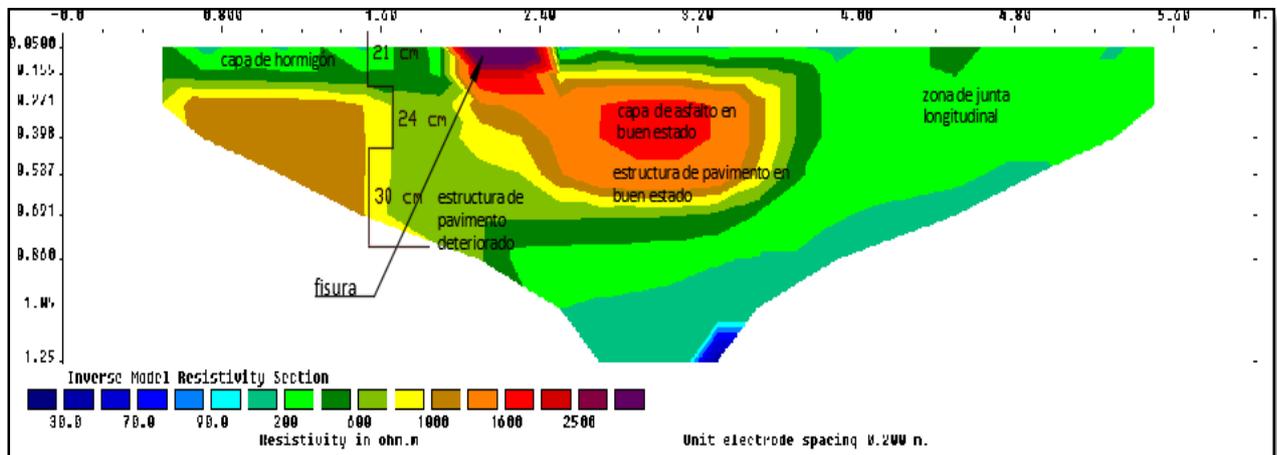


Figura 4. 8 Perfil 7 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ .

## Perfil 8

Presencia de agrietamiento en los metros 1.60 hasta 1.80 y 2.40 hasta 2.80 que se prolongan de manera significativa hacia la derecha en dirección a la junta longitudinal y la estructura del pavimento continua con las mismas características ya mencionadas en los perfiles anteriores con deterioro (Figura 4.9).

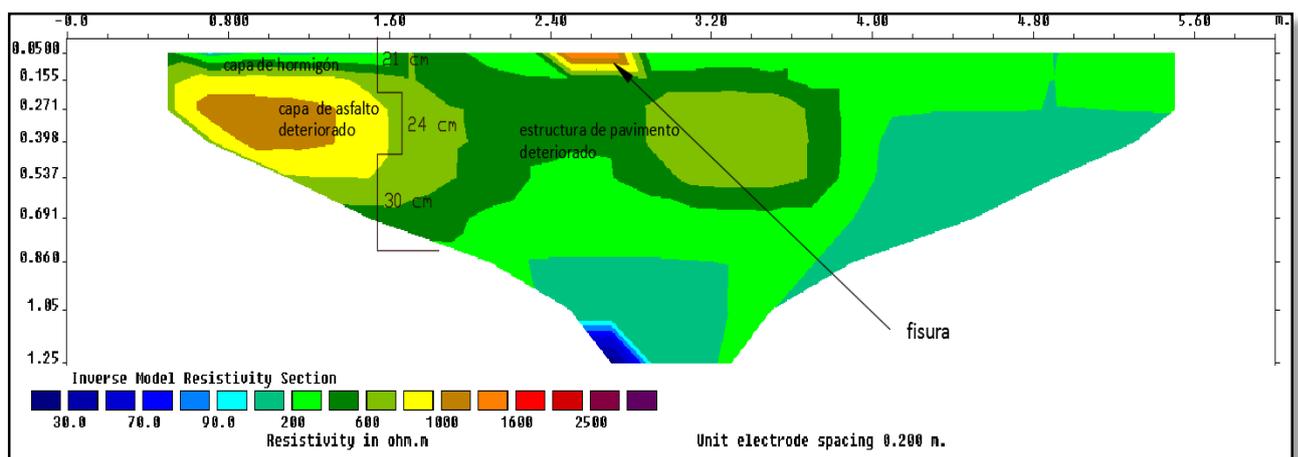


Figura 4. 9 Perfil 8 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ .

## Perfil 9

Se puede observar claramente que las grietas tienen mayor profundidad de manera especial en el metro 1.60 hasta 2 con un espesor mayor a 0.30m afectando considerablemente a la estructura del pavimento. En el metro 2.80 hasta 3.40 como se muestra en la Figura 4.10 hay presencia de resistividades

muy altas pero superficialmente no se encuentran fisuras es por eso que se puede concluir como relleno de material o la capa de asfalto ya antes mencionada.

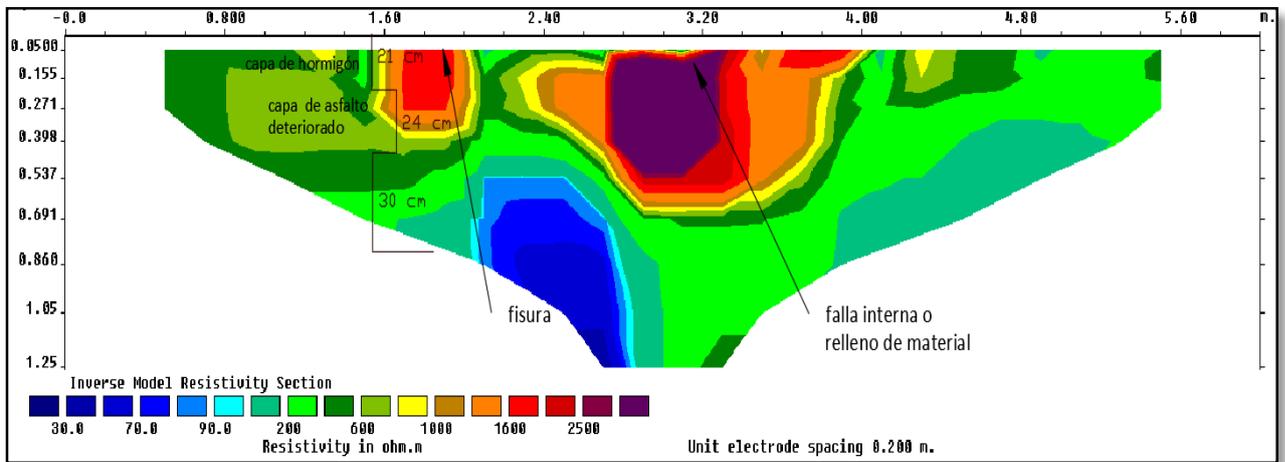


Figura 4. 10 Perfil 9 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ .

### Perfil 10

Conforme se va analizando cada uno de los perfiles se puede deducir que la grieta está afectando casi en su totalidad la estructura del pavimento produciendo inestabilidad de la misma, donde se puede observar de una manera más clara en la Figura 4.11 b; y en la parte derecha se distingue la zona de junta longitudinal por los valores de resistividad.

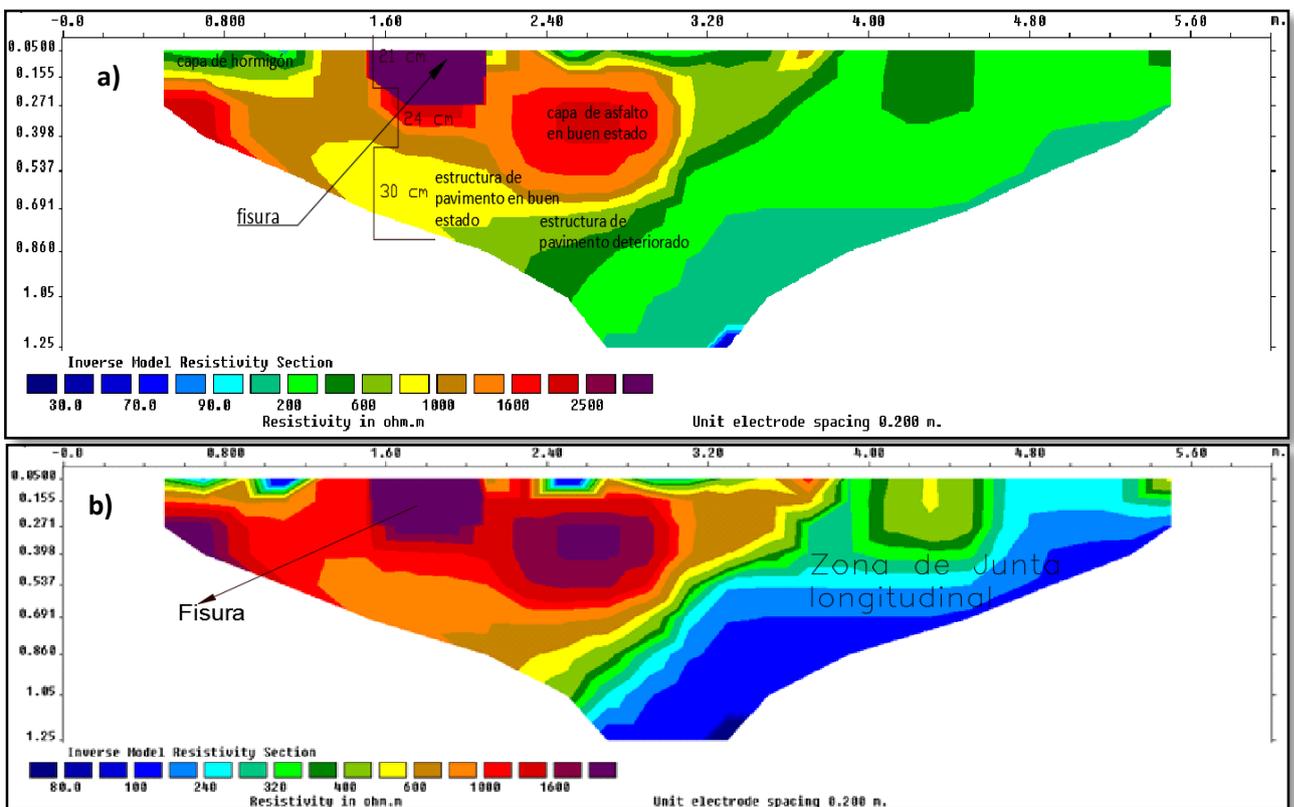


Figura 4. 11 Perfil 10 de resistividades: a) con un rango de  $30 \Omega \cdot m$  hasta  $3000 \Omega \cdot m$ , b) con un rango de  $80 \Omega \cdot m$  hasta  $2000 \Omega \cdot m$ .

## Perfil 11

La fisura ubicada en el metro 1.60 está afectando la losa de hormigón y la estructura del pavimento, mientras que las que se encuentran en el metro 2.60 y 2.80 son superficiales debido a que sus valores de resistividad se mantienen en estos puntos (Figura 4.12), sin embargo se ve la continuidad de la estructura del pavimento deteriorada.

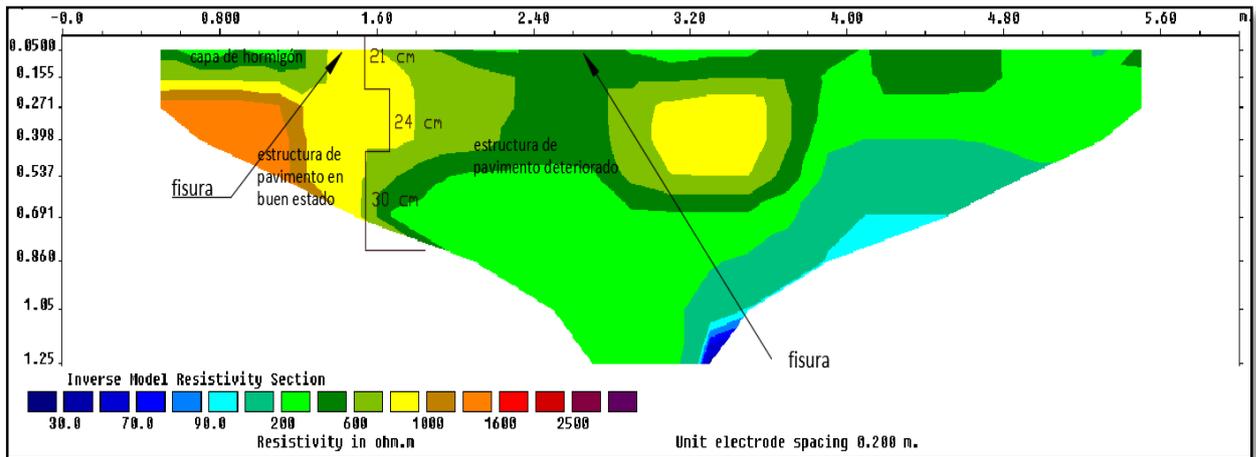


Figura 4. 12 Perfil 11 de resistividades con un rango de  $30 \Omega \cdot m$  hasta  $3000 \Omega \cdot m$ .

## Perfil 12

En este perfil se puede apreciar que existe una grieta interna en el metro 2 que está por debajo de la losa de hormigón, se podría decir que con el paso del tiempo afectará la calzada, también se pueden ver las grietas en el metro 1.20, 2.80 y 3.40 (Figura 4.13).

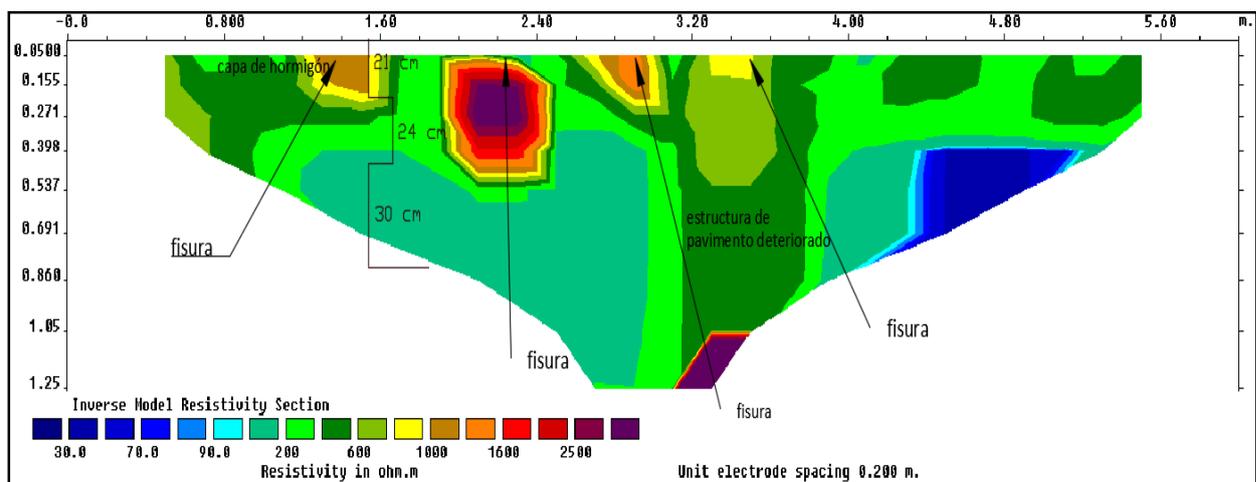


Figura 4. 13 Perfil 12 de resistividades con un rango de  $30 \Omega \cdot m$  hasta  $3000 \Omega \cdot m$ .

### Perfil 13

En la Figura 4.14 se puede distinguir que la losa de hormigón está asentándose conjuntamente con la estructura del pavimento debido a la presencia de las grietas ya existentes, esto puede ser resultado del deterioro del mismo que se observa en los perfiles ya interpretados.

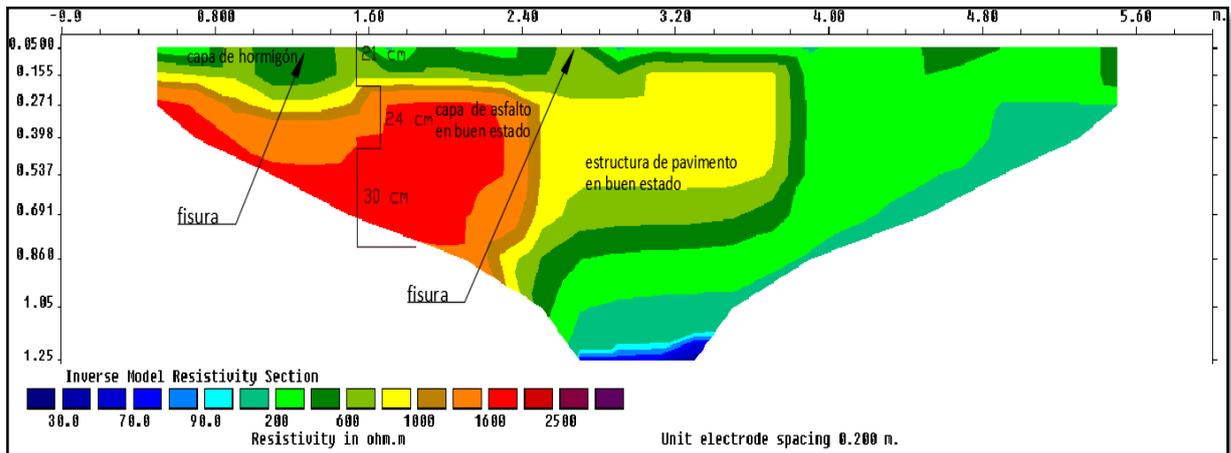


Figura 4. 14 Perfil 13 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ .

### Perfil 14

Continuando con el análisis se puede apreciar que el deterioro del pavimento continúa a lo largo de todo el perfil, en la parte derecha las resistividades son bajas debido a que en ese punto los electrodos estaban muy cerca de la junta transversal que puede ser la causa de estos valores (Figura 4.15).

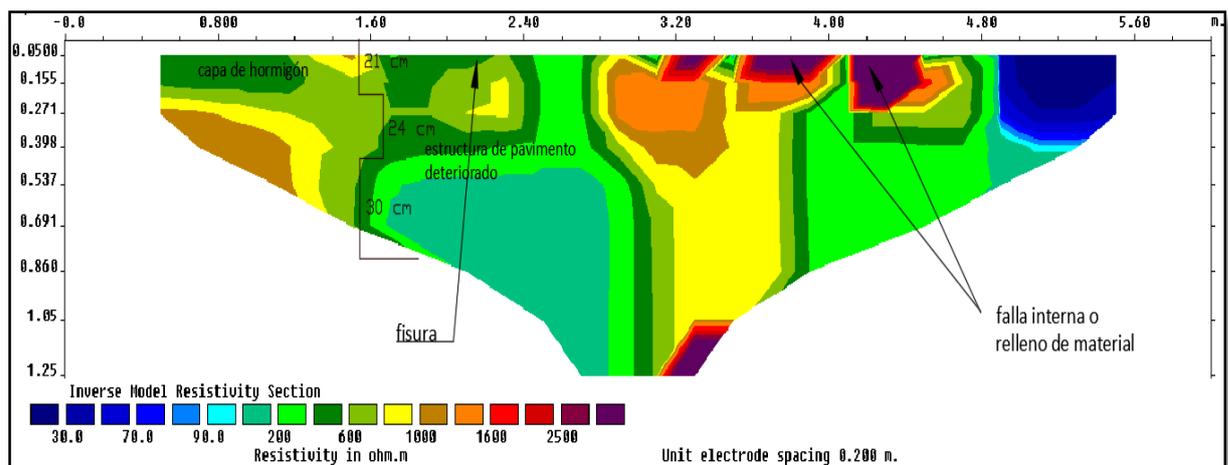


Figura 4. 15 Perfil 14 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ .

## Perfil 15

En este perfil se puede observar una grieta interna produciendo oquedad entre el pavimento en donde la falla estructural envuelve está grieta. Claramente podemos notar que la losa de hormigón sigue asentándose como en los perfiles anteriores (Figura 4.16).

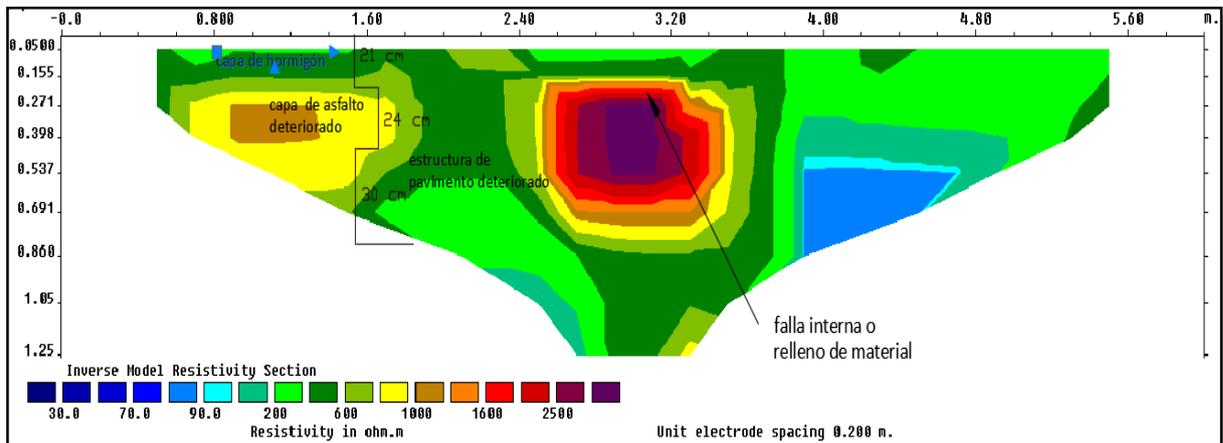


Figura 4. 16 Perfil 15 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ .

## Perfil 16

Por último en este perfil la fisura esta ubicada en el metro 2 hasta 2.40 que se une a la estructura del pavimento. Se observa la losa de hormigón mas profunda confirmando el asentamiento de la misma (lado izquierdo), y debajo de está se puede distinguir una posible falla o relleno de material asfáltico por las razones ya explicadas anteriormente, (Figura 4.17).

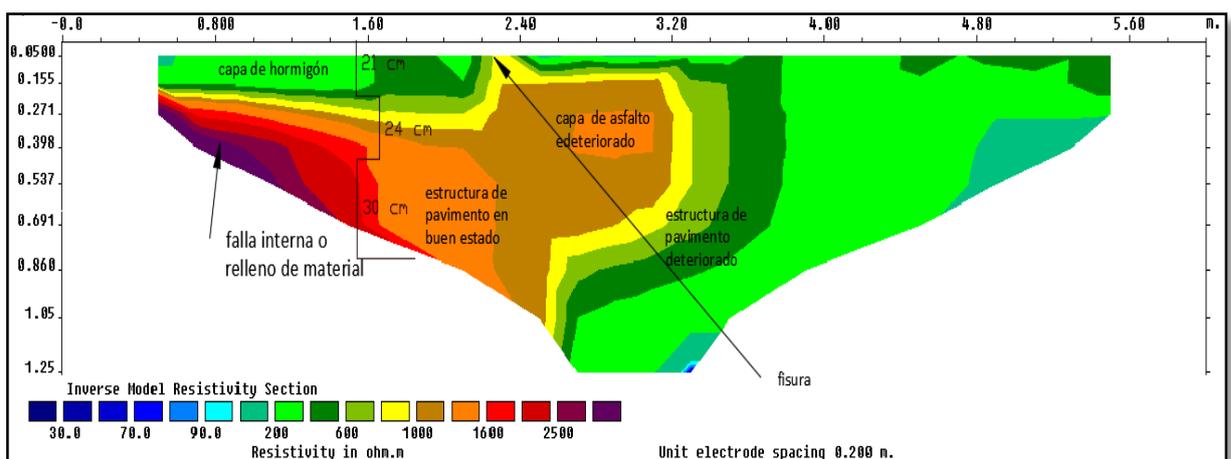


Figura 4. 17 Perfil 16 de resistividades con un rango de 30  $\Omega \cdot m$  hasta 3000  $\Omega \cdot m$ .

### 4.1.2 Modelo 3D

Con este modelo se pudo observar los 14 perfiles en conjunto dándonos como resultado una perspectiva general de la distribución de resistividades.

En la imagen vista en planta se incorporó la fisura (Figura 4.18 a), indicando la ubicación de la misma y ayudándonos a identificar que en las zonas de color verde confirma el deterioro de la estructura del pavimento así como en el metro 13 hasta 15 (color blanco) el deterioro casi en su totalidad (Figura 4.18 b). El color azul en el metro 5 hasta 7 corrobora la posible zona de infiltración.

Este modelo tridimensional no nos facilitó mayor información de la ya obtenida en los modelos bidimensionales, además que no se pudo distinguir las diferentes capas de la estructura del pavimento.

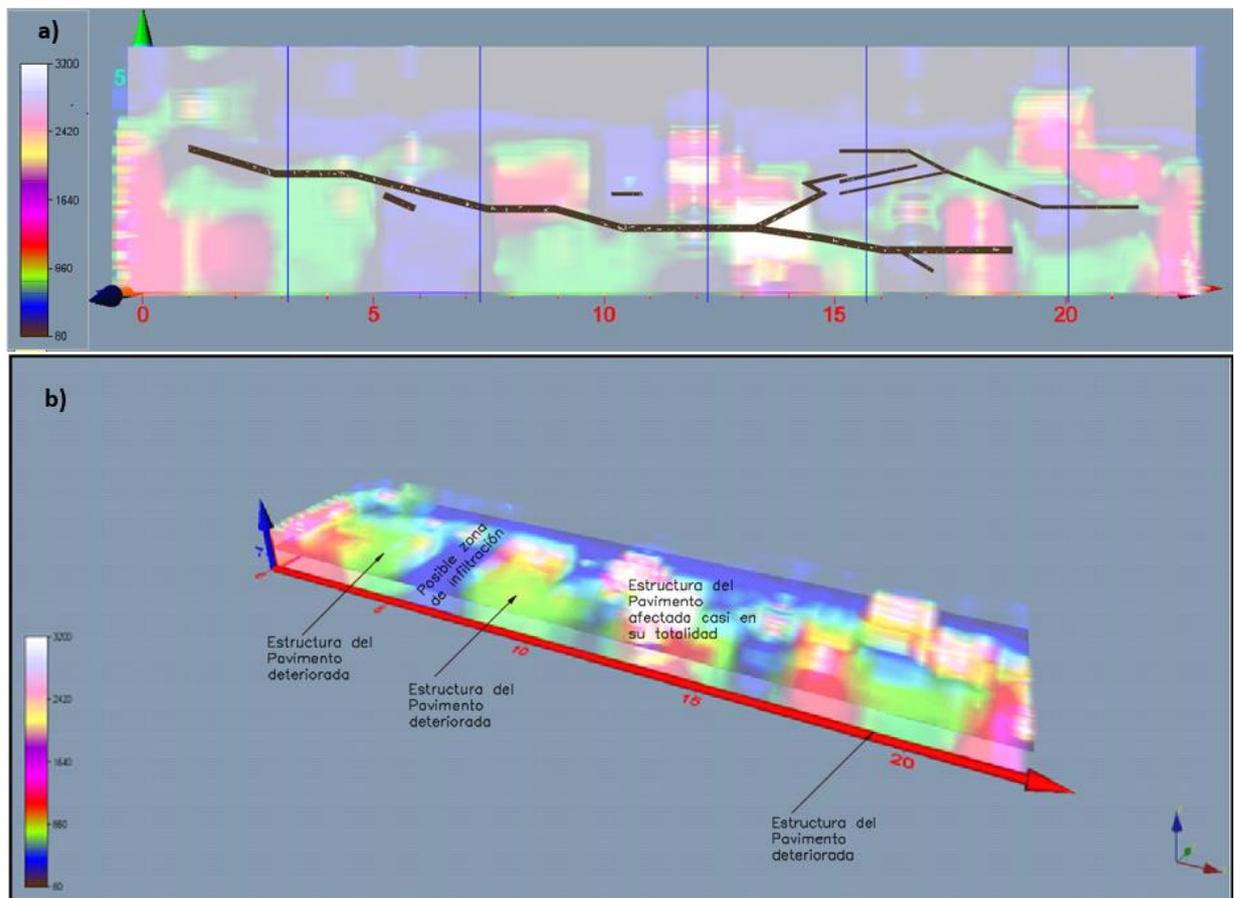


Figura 4. 18 a) Fisura incorporada en el modelo 3D, b) Modelo 3D vista lateral



## CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Del trabajo presentado se puede desprender las siguientes conclusiones:

Los resultados obtenidos de este trabajo experimental confirman que el método de resistividad eléctrica es no invasivo y práctico para el análisis de fisuras en pavimentos rígidos ya que se pudo observar internamente que la estructura de dicho pavimento está deteriorada o con contenido de humedad.

De acuerdo a los espesores de cada capa del pavimento y con los valores de resistividad obtenidos se concluye:

Estructura	Rango de Valores de Resistividad
Losa de hormigón	(200 - 400) $\Omega \cdot m$
Capa asfáltica en buen estado	(1600 - 2300) $\Omega \cdot m$
Capa asfáltica deteriorada	(1000 - 1500) $\Omega \cdot m$
Estructura de pavimento en buen estado	(800 - 1600) $\Omega \cdot m$
Estructura de pavimento deteriorado	(200 - 600) $\Omega \cdot m$
Fisuras o grietas	(2300 - 3000) $\Omega \cdot m$

Este rango de valores puede tener variaciones en función de la humedad de cada uno de los materiales, así como también de las características de resistividad del cemento, agregados y materiales constituyentes de la estructura del pavimento. Estos valores presentan un alto grado de confiabilidad en base a los reducidos valores de error obtenidos en el procesamiento.

Es importante mencionar que el método no fue sólo útil para evaluar la presencia de fisuras sino que también se pudo observar la estructura del pavimento que facilito la evaluación y estado del mismo.

Según informes presentados por la Contraloría General del Estado la falla estructural anticipada presente en el pavimento se debe a que el espesor de la losa de hormigón se construyó de 21 cm, y esto género que las tensiones sobrepasen los límites de la resistencia de la estructura del mismo, siendo éste un espesor reducido para vías de tránsito pesado.



Dado a que gran parte de la vía se encuentra sobre una zona de falla se decidió la reconstrucción de la misma con pavimento rígido, sin embargo se considera que a pesar del bajo costo de inversión para su mantenimiento y conservación no es factible ya que este pavimento no se adapta a la falla causando las cuarteaduras.

Cuando se emplea este método se debe analizar la separación y ubicación de electrodos, en donde no interfiera material resistivo ya que dificulta el buen funcionamiento del método distorsionando los resultados de los perfiles bidimensionales, como por ejemplo la presencia de acero en las juntas transversales que se encuentran en la vía.

Existe la posibilidad de la presencia de zonas de infiltración como se pudo observar en algunos perfiles pero por las profundidades alcanzadas (1.25m) debido a la separación entre electrodos que fueron de 0.40m imposibilitó la confirmación de estas zonas ya que el estudio se realizó sobre un elemento rígido.

La elección de la mejor configuración para un sondeo de campo depende de la estructura a ser estudiada es por esto que se utilizó la modalidad Wenner-Schlumberger ya que la resolución horizontal y vertical de datos es moderadamente sensible y buena.

Debido a que los datos están automatizados se obtuvo secciones 2D de gran resolución con datos confiables ya que se realizó un gran número de medidas y gracias al programa RES2DINV se pudo realizar una corrección de errores además de un adecuado número de iteraciones para obtener los gráficos de inversión.

Debido a que se realizó un recapeo con concreto hidráulico sobre una capa de rodadura existente, sin obtener resultados favorables, lo más recomendable sería reparar toda la estructura del pavimento ya que de los resultados de la presente investigación, gran parte de la estructura del pavimento se encuentra deteriorada.

Una solución parcial sería sellar las fisuras, con la finalidad de evitar el ingreso de agua a la estructura del pavimento, lo cual permitirá reducir la tasa de deterioro para esto se recupera la estructura nivelando la losa mediante un raspado, además de colocar en las zonas afectadas una fina capa de mezcla asfáltica ( Coronado J., 2002).



## 5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar el estudio con diferentes tipos de fisuras que se presentan a lo largo de la vía (grietas lineales, levantamiento localizado, baches, desintegración, rotura de esquina y grietas por fracturación múltiple) en un periodo de tiempo más extenso es decir según vaya progresando el deterioro del pavimento esto permitirá mejorar las interpretaciones de los valores de resistividad ya que dichos valores se deben tomar con mucha reserva debido a que definir el tipo de material o contenido de humedad a partir de valores de resistividad no es tarea fácil y si se realizara un control de datos este método podría ser útil para futuras rehabilitaciones de vías.

Para un mejor control, interpretación y elaboración de modelos tridimensionales se aconseja que en campo la configuración Wenner-Schlumberger para la toma de datos se realice en tres dimensiones, esto se puede realizar en el mismo equipo cambiando su configuración bidimensional a tridimensional ya que en el programa Voxler no se logró una interpretación adecuada.

Una limitación del método es que las imágenes de cada perfil se presentan en un rango de escala de 16 valores de resistividad; es por esto que se recomienda realizar varios cambios de rangos para poder tener una visión de los resultados a interpretar.

Debido a que los perfiles 3 y 6 presentaron datos muy diferentes a los demás perfiles se recomienda realizar la toma de datos de cada perfil a una distancia menor ya que en 1.50 m el suelo puede variar.

## Referencias

1. Alejandro, R. B. C. (2011). Análisis de los Factores que producen el deterioro de los Pavimientos Rígidos. Escuela Politécnica de Ejército. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3033/1/T-ESPE-030924.pdf>
2. Barlow, P., W., D., Pashina, F. K. A., Barth, F., Gergely, P., Scanlon, A., ... Fouad, F. H. (1993). ACI 224.1R-93 Causas, evaluación y revisión de fisuras en estructuras de hormigón, 2. Retrieved from [http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Causas\\_evaluacion\\_reparacion.pdf](http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Causas_evaluacion_reparacion.pdf)
3. Buettner, M., Daily, B., Ramirez, A., Geirsigsheig, Sdjighseug, Eskjkhguieshg, ... Dsbglues. (1997). Electrical resistance tomography for monitoring the infiltration of water into a pavement section.
4. Buettner, M., Ramirez, A., Daily, W., Jzdfhgigau, Dkzsgjiaehv, Djfhvuedzshb, ... Iszhhviw. (1996). Electrical Resistance tomography for imaging the spatial distribution of moisture in pavement sections.
5. Calo, D. H. (2012). Diseño de pavimentos rígidos. San Salvador de Jujuy. Retrieved from <http://www.actualizarmiweb.com/sites/icpa/publico/files/01.pdf>
6. Casas, A., & Busquets, E. (1995). Caracterización de vertederos y detección de penachos contaminantes mediante la utilización de métodos geofísicos. Física de La Tierra, (7), 207–226. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=124541&orden=1&info=link>
7. Fonseca, A. M. (2010). Ingeniería de Pavimentos. Retrieved from <http://es.slideshare.net/carlonchosuicida/alfonso-montejo-fonseca-ingenieria-de-pavimentos>
8. Forner, M. G. (1999). Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Universidad Politecnica de Catalunya. Retrieved from <http://petrus.upc.es/wwwdib/tesis/mgasulla/resumen.html>
9. Germán, M. et al. (2007). Fundamente e Ingeniería de las puestas de tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos (Primera Ed). Retrieved from [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=0\\_lfdN3rHNsC&oi=fnd&pg=PR15&dq=concepto de resistividad electrica en suelos&ots=wDGpoC7BEI&sig=RnfBpnLwoZmQsZ9y\\_E2UnEE6-DI#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=0_lfdN3rHNsC&oi=fnd&pg=PR15&dq=concepto+de+resistividad+electrica+en+suelos&ots=wDGpoC7BEI&sig=RnfBpnLwoZmQsZ9y_E2UnEE6-DI#v=onepage&q&f=false)



10. Gonzalo Aiassa. (2008). Caracterización de procesos de Infiltración en estado No Saturado sobre suelo limosos compactados. Universidad Nacional de Cordova. Retrieved from [http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado\\_cs\\_ing/aiassa/TDoctoral\\_Gonzalo\\_Aiassa.pdf](http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/aiassa/TDoctoral_Gonzalo_Aiassa.pdf)
11. Instruments, P. A. S. . G. (2011). Manual PASI Geophysical instruments. (P. A. S. . A. R. Reserved, Ed.) (2011th ed.). Retrieved from <http://www.pasisrl.it/newproducts/sismografo-gea24-es/v>
12. Jafid, P. (2015). Utilización de fibra sintética para la reducción de fisuras por contracción térmica en las bases de concreto reforzado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Retrieved from [http://www.repositorio.usac.edu.gt/1068/1/Jafid\\_Abinady\\_Pineda\\_Rodriguez.pdf](http://www.repositorio.usac.edu.gt/1068/1/Jafid_Abinady_Pineda_Rodriguez.pdf)
13. Jorge Coronado Iturbide. (2002). Manual centroamericano para diseño de pavimentos. Retrieved from [http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-04-29\\_02-56-4598388.pdf](http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-04-29_02-56-4598388.pdf)
14. Lozano, E., & Tabares González, R. (n.d.). Diagnóstico de vía existente y diseño del pavimento flexible de la vía nueva mediante parámetros obtenidos del estudio en fase I de la vía acceso al barrio Ciudadela del Café-vía La Badea. Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/743/1/ricardotabaresgonzales.2005.pdf>
15. Oswaldo, C. J. C. P. I. (2009). Fisura por retracción en el hormigón. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Retrieved from <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/7960/D-38816.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
16. Pérez, M. del C. P. (2014). Durabilidad en el Hormigón Armado. La resistividad eléctrica como indicador de durabilidad. Universidad de Coruña. Retrieved from [http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/13747/PicosPerez\\_MariaDelCarmen\\_TFG\\_2014.pdf?sequence=2](http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/13747/PicosPerez_MariaDelCarmen_TFG_2014.pdf?sequence=2)
17. Pérez, N., Garnica, P., Delgado, V. H., Landaverde, N., KjsfhuiWG, Jksvagjvs, ... SJDBHGILS. (2010). Evaluación de la Resistividad en campo y en laboratorio y su aplicación a Pavimentos. México. Retrieved from <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt325.pdf>
18. Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics Wiley.

19. Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., Jhgufyk, ... Jdmjtdmv. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 173–193. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Bruand\\_A/publication/222649758\\_Electrical\\_resistivity\\_survey\\_in\\_soil\\_science\\_A\\_review/links/0c960521e126739d50000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bruand_A/publication/222649758_Electrical_resistivity_survey_in_soil_science_A_review/links/0c960521e126739d50000000.pdf)
20. Uvidia, J. A. C. (2015). Eléctrica, Comportamiento de la Resistividad de los Suelos ante variaciones de Humedad y grado de Compactación. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23016/1/Tesis.pdf>
21. Weinzettel, P., Varni, M., Dietrich, S., Usunoff, E., Hjhkhk.-, Jbhohp, ... Hlhig8piñoh. (2009). Evaluación de tres dispositivos de tomografía eléctrica para la identificación de horizontes petrocálcicos en el suelo. *Ciencia Del Suelo*, 27(1), 135–146. Retrieved from [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672009000100014&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672009000100014&script=sci_arttext)
22. Jorge Coronado Iturbide. (2002). Manual centroamericano para diseño de pavimentos. Retrieved from [http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-04-29\\_02-56-4598388.pdf](http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-04-29_02-56-4598388.pdf)

## Bibliografía

1. Antonio, M. M. J. (2012). Análisis Comparativo De Métodos De Diseño y Construcción de Pavimentos De Concreto Hidráulico según Normas Aplicadas en México, Reino Unido y España. Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5180/Tesis.pdf?sequence=1>
2. Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2003). Application of soil electrical conductivity to precision agriculture. *Agronomy Journal*, 95(3), 459–461. Retrieved from [https://djfextranet.agrsci.dk/sites/soilsensors/public/Documents/EMI/Application\\_of\\_soil\\_electrical\\_conductivity.pdf](https://djfextranet.agrsci.dk/sites/soilsensors/public/Documents/EMI/Application_of_soil_electrical_conductivity.pdf)
3. Dietrich, S. (2013). Infiltración y recarga a través del suelo y zona no saturada en áreas de llanura. Caracterización en base a la aplicación de tomografía eléctrica y trazadores. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Retrieved from [digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_5274\\_Dietrich.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_5274_Dietrich.pdf)



4. Dietrich, S., Weinzettel, P., & Varni, M. (2014). La infiltración de agua en el suelo: su caracterización mediante tomografía eléctrica.
5. Hidalgo, A. L., Loke, M. H., Fanton, G. O., & Rubí, E. C. (2010). Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D). Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Gerardo\\_Fanton/publication/266036673\\_TCNICAS\\_PRCTICAS\\_PARA\\_INVESTIGACION\\_DE\\_RESISTIVIDAD\\_EN\\_DOS\\_Y\\_TRES\\_DIMENSIONES\\_\(TOMOGRAFA\\_ELECTRICA\\_2D\\_y\\_3D\)/links/5484d30a0cf24356db60e2a5.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gerardo_Fanton/publication/266036673_TCNICAS_PRCTICAS_PARA_INVESTIGACION_DE_RESISTIVIDAD_EN_DOS_Y_TRES_DIMENSIONES_(TOMOGRAFA_ELECTRICA_2D_y_3D)/links/5484d30a0cf24356db60e2a5.pdf)
6. Javier, G. V. (2012). Estudio de las fallas en los pavimentos rígidos para el mantenimiento y rehabilitación de algunas vías principales del Municipio de Abrego norte de Santander. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Retrieved from <http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/1009/1/28564.pdf>
7. Loke, M. H., & Lane, J. W. (2004). Inversion of data from electrical imaging surveys in water-covered areas. ASEG Extended Abstracts, 2004(1), 14–20. Retrieved from [https://www.geophysik.uni-muenchen.de/~jowa/praktikum08\\_09/Geoelectric\\_notes.pdf](https://www.geophysik.uni-muenchen.de/~jowa/praktikum08_09/Geoelectric_notes.pdf)
8. Malaysia. (2010). Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method Wenner, dipole-dipole, inline pole-pole, pole-dipole, equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays. <http://doi.org/115> Cangkat Minden Jalan 5, Minden Heights, 11700 Gelugor, Penang
9. Manuel, A. M. (2010). Caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos usando tomografía de Resistividad Eléctrica. Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1289/Tesis.pdf?sequence=1>
10. Martínez Yanez, J., & Velázquez Martínez, I. (2009). Aplicaciones del medidor digital de resistencia de puesta a tierra. Retrieved from [http://tesis.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/3573/1/APLICACIONES\\_DEL\\_MEDIDOR\\_DIGITAL\\_DE\\_RESISTENCIA\\_DE\\_PUESTA\\_A\\_TIERRA.pdf](http://tesis.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/3573/1/APLICACIONES_DEL_MEDIDOR_DIGITAL_DE_RESISTENCIA_DE_PUESTA_A_TIERRA.pdf)
11. Solminiácz, H., & Echaveguren, T. (2002). Antecedentes para la inspección y diseño de especificaciones de textura, resistencia al deslizamiento y fricción en pavimentos. In Actas de VI Congreso PROVIAL. Termas de Chillán (pp. 5–8). Retrieved from



[http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos\\_pdf/35HernandeSolminihacResistenciaadeslizamiento.pdf](http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/35HernandeSolminihacResistenciaadeslizamiento.pdf)

12. Telford, W. L. G. & R. S. (1990). Applied geophysics. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=oRP5fZYjXMC&oi=fnd&pg=PR15&dq=Applied+geophysics+&ots=Ca1iOm0zla&sig=iFSR808K522YyndjMcpsQfM7D4c#v=onepage&q=Applied+geophysics&f=false>
13. Weinzettel, P., Dietrich, S., & Varni, M. (2009). Utilización de tomografía eléctrica con distintas configuraciones y espaciamientos electródicos para la caracterización de la zona no saturada. Silva Rojas, O. Y Carrera Ramírez, J. Ed. Jornadas de Investigación de La Zona No Saturada Del Suelo, 9, 253–260. Retrieved from <http://congress.cimne.com/zns09/admin/files/filepaper/p378.pdf>
14. Weinzettel, P., Dietrich, S., & Varni, M. (2011). Preferential flow determination in soil with petrocalcic horizon by electrical resistivity tomography.



# Anexos



## Anexo 1 (Tablas de Iteraciones de Perfiles)

Tabla de Iteraciones Perfil 1		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	2.48	9.461
2	0.95	5.03
3	0.69	4.078
4	1.48	3.406
5	1.17	3.304

Tabla de Iteraciones Perfil 2		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	5.1	10.195
2	1.95	5.909
3	4.82	5.055
4	1.36	4.116
5	1.14	3.389
6	1.86	2.845
7	1.19	2.534

Tabla de Iteraciones Perfil 4		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	3.42	10.037
2	0.67	5.173
3	1.09	3.851
4	0.53	3.117
5	0.78	2.73
6	1.09	2.525
7	1.14	2.377

Tabla de Iteraciones Perfil 5		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	1.31	9.872
2	0.34	4.442
3	0.59	3.244
4	1.11	2.519
5	1.25	2.132
6	0.72	1.834
7	0.48	1.65

Tabla de Iteraciones Perfil 7		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	2.68	15.573
2	0.92	5.783
3	1.28	3.443
4	1.19	2.006
5	0.62	1.686
6	0.5	1.598
7	0.58	1.551

Tabla de Iteraciones Perfil 8		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	2.2	9.568
2	0.41	5.413
3	1.23	4.391
4	1.15	3.611
5	1.29	3.186
6	1.26	2.992
7	1.28	2.848



Tabla de Iteraciones Perfil 9		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	2.28	29.432
2	0.34	12.412
3	0.48	10.313
4	1.31	9.247
5	0.59	8.274
6	0.58	7.735
7	0.56	7.468

Tabla de Iteraciones Perfil 10		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	2.75	18.289
2	0.44	7.755
3	0.58	0.995
4	1.59	3.922
5	1.26	3.621
6	0.7	3.542

Tabla de Iteraciones Perfil 11		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	2.29	7.582
2	0.42	4.108
3	1.36	2.904
4	0.72	2.385
5	0.64	2.144
6	0.61	2.007
7	0.75	1.925

Tabla de Iteraciones Perfil 12		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	2.33	16.48
2	0.48	9.012
3	1.84	6.7
4	1.54	5.888
5	0.92	4.779
6	1.42	4.374
7	1.36	3.928

Tabla de Iteraciones Perfil 13		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	1.48	8.963
2	0.41	4.311
3	0.66	2.942
4	1.37	1.8
5	0.7	1.326
6	0.66	1.159
7	0.66	1.1

Tabla de Iteraciones Perfil 14		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	0.3	21.057
2	0.47	11.176
3	1.51	9.196
4	1.45	7.441
5	1.51	6.651
6	1.59	5.812
7	1.64	5.195

Tabla de Iteraciones Perfil 15		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	0.43	9.156
2	0.51	5.833
3	1.44	4.731
4	0.84	3.721
5	0.67	3.089
6	0.69	2.755
7	0.64	2.549

Tabla de Iteraciones Perfil 16		
Número de Iteraciones	Tiempo de Iteración	% de Error Absoluto
1	2.56	8.86
2	0.55	4.974
3	0.67	3.432
4	1.58	2.257
5	0.75	1.695
6	0.72	1.5
7	0.75	1.419



## Anexo 2 (Resumen de parámetros evaluados y calculados)

TRAMO	CARRIL	IRI m/Km	TXT mm	SRV	IFI	% FIS	H1 cm	H2 cm	H3 cm	D1 C umm	D1 E umm	D1 J umm	KE PCI	MH PSI	MCS PSI	MSR PSI	E <sub>pcc</sub> PSI	S'P <sub>cc</sub> PSI	LTE
ZHUD – JUNCAL	DER	4,36	1,03	0,76	0,52	11,02	20,81	28,20	28,46	73 / 120	119 / 353	114 / 241	216	4.486.300	631.341	9.955	2.626.055	602,7	56
	IZQ	4,87	0,78	0,79	0,46	23,42				75 / 94	101 / 123	94 / 149	209				2.075.800	578,8	66
CAÑAR – CAMPO ALEGRE	DER	3,74	0,89	0,76	0,48	13,45	22,79	19,25	41,43	116 / 67	248 / 81	160 / 69	205	3.236.664	693.075	11.440	3.485.326	640,1	67
	IZQ	4,52	0,79	0,80	0,47	15,69				81 / 58	121 / 70	138 / 65	222				2.215.993	586,7	66
CAMPO ALEGRE - BIBLIAN	DER	4,74	0,97	0,81	0,53	17,39	21,30	28,79	33,67	76	71	64	241	3.642.657	659.430	13.071	4.082.131	666,1	68
	IZQ	4,76	0,81	0,76	0,45	34,60				74	80	61	218				3.677.512	648,5	72

### NOMENCLATURA:

IRI: INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (m/Km)  
 TXT: MACROTEXTURA (mm)  
 SRV: COEFICIENTE DE ROZAMIENTO  
 IFI: INDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL  
 % FIS: PORCENTAJE DE FISURACIÓN  
 H1: ESPESOR DE HORMIGÓN (cm)  
 H2: ESPESOR CAPA ASFÁLTICA ANTIGUA (cm)  
 H3: ESPESOR DE CAPA GRANULAR (cm)  
 D1 C: DEFLEXIÓN MÁXIMA EN CENTRO DE LOSA (umm)  
 D1 E: DEFLEXIÓN MÁXIMA EN ESQUINA DE LOSA (umm)  
 D1 J: DEFLEXIÓN MÁXIMA EN JUNTA DE LOSA (umm)  
 KE: MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE (PCI)  
 MH: MÓDULO DEL HORMIGÓN CALCULADO CON RETROCALCULO PROGRAMA ROSY DESIGN (PSI)  
 MCS: MÓDULO DE LA CAPA DE SOPORTE INVOLUCRA A LA CAPA DE ASFALTO Y CAPA GRANULAR, MEDIANTE RETROCALCULO PROGRAMA ROSY, (PSI)  
 MSR: MÓDULO DE LA SUBRASANTE MEDIANTE RETROCALCULO PROGRAMA ROSY (PSI)  
 E<sub>pcc</sub>: MÓDULO ELÁSTICO DEL HORMIGÓN CALCULADO CON AASHTO 93 (PSI)  
 S'P<sub>cc</sub>: MÓDULO DE ROTURA DEL HORMIGÓN MEDIANTE AASHTO 93 (PSI)  
 LTE: EFICIENCIA DE LA TRANSFERENCIA DE CARGA EN JUNTA

### **Anexo 3 (Fotos del trabajo en Campo)**





