

Modelado de la resistividad del subsuelo a partir de tomografías eléctricas 2D en el sector
norte del Municipio de Bucaramanga

Autor

Eliana Lizeth Gutiérrez Rincón

Trabajo de Grado presentado Para optar al título de Magister en Geofísica

Director

Wilfredo Deltoro Rodríguez

Magíster (MSc) en Ingeniería Civil.



Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Maestría de Geofísica

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A mis padres y hermanos por todo el apoyo incondicional durante este proceso.

Agradecimientos

A mi familia, a mi director Wilfredo Destorc, profesores y amigos que hicieron posible el desarrollo de este trabajo. A la Universidad Industrial de Santander y especialmente al grupo de investigación de Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas de la escuela de Ingeniería Civil.

Tabla de Contenido

Introducción19

1. Objetivos20

 1.1 Objetivo general.....20

 1.2 Objetivos específicos20

2. Supuesto de investigación.....21

3. Marco teórico22

 3.1 Tipos de prospecciones geoelectricas26

 3.2 Modelado Directo28

 3.2.1 Método de diferencias finitas28

 3.2.2 Método de elementos finitos29

 3.3 Modelado Inverso30

 3.4 Función de sensibilidad.....32

 3.4.1 Función de sensibilidad para el modelo 1D34

 3.4.2 Función de sensibilidad para el modelo 2D35

 3.4.3 Configuración Wenner.....36

 3.4.4 Configuración Wenner-Schlumberger.....37

 3.4.5 Configuración Dipolo-Dipolo40

4. Características Regionales de la zona de estudio41

4.1 Evolución geológica Bucaramanga	43
4.1.1 Fase I Orogenia Andina Mioceno-Plioceno.....	43
4.1.2 Fase II Pleistoceno	44
4.1.3 Fase III Holoceno Temprano.....	45
4.1.4 Fase IV Holoceno-Reciente	46
4.1.5 Fase V Cuaternario Reciente.....	46
5. Metodología	49
5.1 Construcción de Modelos Sintéticos.....	49
5.2 Definición de Parámetros.....	53
6. Resultados	81
7. Discusión.....	115
8. Conclusiones	125
9. Recomendaciones	126
Referencias Bibliográficas	127

Lista de Figuras

Figura 1. Distribución del potencial debido a una fuente de corriente en un semi-espacio homogéneo. Adaptado de (Philips Aizebeokhai, 2010).....22

Figura 2. Configuraciones de electrodos más conocidas. Adaptado de (Philips Aizebeokhai, 2010).
.....25

Figura 3. Técnicas de prospección geoelectrica. Adaptado de (Hidalgo, Loke, Oscar-Fanton, & Cara-Rubí, 2004).....26

Figura 4. Disposición de los electrodos y secuencia de medición de una tomografía de resistividad eléctrica (TRE). Adaptado de (D. M. Loke, 2000).27

Figura 5. Grilla de diferencias finitas bidimensional utilizado para discretizar el problema directo de resistividad. Adaptado de (Peter Robert McGillivray, 1992).29

Figura 6. Grilla de elementos finitos bidimensional utilizado para discretizar el problema directo de resistividad. Adaptado de (Zeferno A. da Fonseca Lopes, 2011)30

Figura 7. Configuración simple utilizada para el cálculo de la función de sensibilidad para un semi-espacio homogéneo. Adaptado de (D. M. Loke, 2000).33

Figura 8. Función de sensibilidad. a) configuración Wenner Alpha, b) configuración Wenner Betta, c) configuración Gamma. Adaptado de (M. H. Loke, 2004).....37

Figura 9. Función de sensibilidad para la configuración Wenner-Schlumberger. a) n=1, b) n=2, c) n=4, d) n=6. Adaptado de (M. H. Loke, 2004).39

Figura 10. Función de sensibilidad para la configuración Dipolo-Dipolo. a) n=1, b) n=2, c) n=4, d) n=6. Adaptado de (M. H. Loke, 2004).....41

Figura 11. Localización geográfica del área de estudio.43

Figura 12. Modelo sintético de resistividad eléctrica del subsuelo, perfil AA modelo 1.....50

Figura 13. Localización de los perfiles geológicos y modelos sintéticos geoelectricos en el área de estudio, base del mapa modelo de clasificación de fase por pendiente a partir del modelo digital de elevación (DEM).....52

Figura 14. Modelado del forward del perfil AA-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo. .53

Figura 15. Modelado del forward del perfil AA-modelo1 de la configuración Schlumberger. ..54

Figura 16. Modelado del forward del perfil AA-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.....54

Figura 17. Modelado del forward del perfil AA-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo. ..55

Figura 18. Modelado del forward del perfil AA-modelo2 de la configuración Schlumberger.55

Figura 19. Modelado del forward del perfil AA-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.....56

Figura 20. Modelado del forward del perfil BB-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.....56

Figura 21. Modelado del forward del perfil BB-modelo1 de la configuración Schlumberger.....57

Figura 22. Modelado del forward del perfil BB-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.....57

Figura 23. Modelado del forward del perfil BB-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.....58

Figura 24. Modelado del forward del perfil BB-modelo2 de la configuración Schlumberger.....58

Figura 25. Modelado del forward del perfil BB-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.....59

Figura 26. Modelado del forward del perfil BB-modelo3 de la configuración Dipolo-Dipolo.....59

Figura 27. Modelado del forward del perfil BB-modelo3 de la configuración Schlumberger.....60

Figura 28. Modelado del forward del perfil BB-modelo3 de la configuración Wenner-Schlumberger.....60

Figura 29. Modelado del forward del perfil CC-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.....61

Figura 30. Modelado del forward del perfil CC-modelo1 de la configuración Schlumberger.....61

Figura 31. Modelado del forward del perfil CC-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.....62

Figura 32. Modelado del forward del perfil CC-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo....62

Figura 33. Modelado del forward del perfil CC-modelo2 de la configuración Schlumberger.....63

Figura 34. Modelado del forward del perfil CC-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.....63

Figura 35. Modelado del forward del perfil DD-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo. ..64

Figura 36. Modelado del forward del perfil DD-modelo1 de la configuración Schlumberger.64

Figura 37. Modelado del forward del perfil DD-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.....65

Figura 38. Modelado del forward del perfil DD-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo. ...65

Figura 39. Modelado del forward del perfil DD-modelo2 de la configuración Schlumberger.66

Figura 40. Modelado del forward del perfil DD-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.....66

Figura 41. Modelado del forward del perfil EE-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.....67

Figura 42. Modelado del forward del perfil EE-modelo1 de la configuración Schlumberger.....67

Figura 43. Modelado del forward del perfil EE-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.....68

Figura 44. Modelado del forward del perfil EE-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.....68

Figura 45. Modelado del forward del perfil EE-modelo2 de la configuración Schlumberger.69

Figura 46. Modelado del forward del perfil EE-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.....69

Figura 47. Modelado del forward del perfil FF-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.70

Figura 48. Modelado del forward del perfil FF-modelo1 de la configuración Schlumberger.70

Figura 49. Modelado del forward del perfil FF-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.....71

Figura 50. Modelado del forward del perfil FF-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.71

Figura 51. Modelado del forward del perfil FF-modelo2 de la configuración Schlumberger.72

Figura 52. Modelado del forward del perfil FF-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.....72

Figura 53. Modelado del forward del perfil GG-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo. ...73

Figura 54. Modelado del forward del perfil GG-modelo1 de la configuración Schlumberger.73

Figura 55. Modelado del forward del perfil GG-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.....74

Figura 56. Combinación de parámetros obtenida (cuadro rojo) para el perfil AA-modelo 1 en la configuración Dipolo-Dipolo.....75

Figura 57. Mejor modelo invertido, error, y modelo objetivo del perfil AA-modelo 1 en la configuración Dipolo-Dipolo del primer filtro.76

Figura 58. Combinación de parámetros obtenida (cuadro rojo) para el perfil AA-modelo 1 en la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.77

Figura 59. Mejor modelo invertido, error, y modelo objetivo del perfil AA-modelo 1 en la configuración Dipolo-Dipolo del segundo filtro.78

Figura 60. Equipo Supersting R8 fabricado por la empresa Advanced Geosciences, Inc., (AGI) con 56 electrodos, de propiedad del Grupo Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas.79

Figura 61. Tomografías eléctricas tomadas en campo distribuidas en el área de estudio.80

Figura 62. Perfil AA-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.83

Figura 63. Perfil AA-Modelo 2, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.83

Figura 64. Perfil BB-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.....84

Figura 65. Perfil BB-Modelo 2, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.....84

Figura 66. Perfil BB-Modelo 3, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.....85

Figura 67. Perfil CC-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.....85

Figura 68. Perfil CC-Modelo 2, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.....86

Figura 69. Perfil DD-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.86

Figura 70. Perfil DD-Modelo 2, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.87

Figura 71. Perfil EE-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.87

Figura 72. Perfil EE-Modelo 2, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.88

Figura 73. Perfil FF-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.....88

Figura 74. Perfil FF-Modelo 2, de la configuración Wenner-Schlumberger, segundo filtro.89

Figura 75. Perfil GG-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.89

Figura 76. Interpretación geoelectrica tomografía G1.92

Figura 77. Interpretación geoelectrica tomografía G2.94

Figura 78. Interpretación geoelectrica tomografía G4.96

Figura 79. Interpretación geoelectrica tomografía G5.98

Figura 80. Interpretación geoelectrica tomografía G6.100

Figura 81. Interpretación geoelectrica tomografía G7. 102

Figura 82. Interpretación geoelectrica tomografía G8. 104

Figura 83. Interpretación geoelectrica tomografía G9. 106

Figura 84. Interpretación geoelectrica tomografía G10. 108

Figura 85. Interpretación geoelectrica tomografía G11. 110

Figura 86. Interpretación geoelectrica tomografía G12. 112

Figura 87. Interpretación geoelectrica tomografía G13. 114

Figura 88. Porcentaje de error ponderado perfil AA-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 116

Figura 89. Porcentaje de error ponderado perfil AA-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 117

Figura 90. Porcentaje de error ponderado perfil BB-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 117

Figura 91. Porcentaje de error ponderado perfil BB-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 117

Figura 92. Porcentaje de error ponderado perfil BB-Modelo 3. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 118

Figura 93. Porcentaje de error ponderado perfil CC-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 118

Figura 94. Porcentaje de error ponderado perfil CC-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 118

Figura 95. Porcentaje de error ponderado perfil DD-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 119

Figura 96. Porcentaje de error ponderado perfil DD-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 119

Figura 97. Porcentaje de error ponderado perfil EE-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 120

Figura 98. Porcentaje de error ponderado perfil EE-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 120

Figura 99. Porcentaje de error ponderado perfil FF-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 121

Figura 100. Porcentaje de error ponderado perfil FF-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger..... 121

Figura 101. Porcentaje de error ponderado perfil GG-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger. 122

Figura 102. Perfil Geológico CC..... 123

Figura 103. Perfil Geológico FF. 123

Figura 104. Perfil Geológico GG. 124

Figura 105. Perfil Geológico BB..... 125

Lista de tablas

Tabla 1. *Rango de resistividades eléctricas para las diferentes unidades geológicas.*48

Tabla 2. *Modelos sintéticos de resistividad eléctrica generados de los 7 perfiles geológicos.*50

Tabla 3. *Parámetros iniciales para el proceso de inversión de los datos sintéticos.*75

Tabla 4. *Nuevo grupo de parámetros para el proceso de inversión de los datos sintéticos del perfil AA-Modelo 1.*.....76

Tabla 5. *Resultados pruebas sintéticas primer y segundo filtro.*.....81

Tabla 6. *Resultados pruebas sintéticas primer y segundo filtro.*.....82

Tabla 7. *Resultados pruebas sintéticas primer y segundo filtro.*.....82

Tabla 8. *Parámetros para el proceso de inversión de las tomografías eléctricas de campo.*.....90

Tabla 9. *Información general tomografía G1.*.....91

Tabla 10. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G1.*.....92

Tabla 11. *Información general tomografía G2.*.....93

Tabla 12. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G2.*.....94

Tabla 13. *Información general tomografía G4.*.....95

Tabla 14. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G4.*.....96

Tabla 15. *Información general tomografía G5.*.....97

Tabla 16. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G5.*.....98

Tabla 17. *Información general tomografía G6.*.....99

Tabla 18. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G6.*..... 100

Tabla 19. *Información general tomografía G7.*..... 101

Tabla 20. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G7*..... 102

Tabla 21. *Información general tomografía G8*..... 103

Tabla 22. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G8*..... 104

Tabla 23. *Información general tomografía G9*..... 105

Tabla 24. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G9*..... 106

Tabla 25. *Información general tomografía G10*..... 107

Tabla 26. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G10*..... 108

Tabla 27. *Información general tomografía G11*..... 109

Tabla 28. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G11*..... 110

Tabla 29. *Información general tomografía G12*..... 111

Tabla 30. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G12*..... 112

Tabla 31. *Información general tomografía G13*..... 113

Tabla 32. *Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G13*..... 114

Resumen

Título: Modelado de la resistividad del subsuelo a partir de tomografías eléctricas 2D en el sector norte del Municipio de Bucaramanga*

Autor: Eliana Lizeth Gutiérrez Rincón**

Palabras Claves: Tomografía eléctrica, Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Wenner-Schlumberger, resistividad eléctrica, Formación Bucaramanga.

Descripción:

Para el estudio de evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por remoción en masa en el sector norte del Municipio de Bucaramanga, la geofísica es un insumo importante ya que permite identificar niveles freáticos, posibles zonas saturadas que indiquen riesgo de movimientos en masa y contrastes litológicos.

En este estudio se tomaron 12 tomografías eléctricas 2D. Se realizaron pruebas sintéticas de tomografías eléctricas empleando diferentes modelos geológicos construidos a partir de la información disponible, con el fin de identificar entre las configuraciones Dipolo-Dipolo, Schlumberger y Wenner-Schlumberger la que mejor reproduce los datos, así como la combinación de parámetros de la inversión para cada una de las tomografías.

Se identificó que la configuración Dipolo-Dipolo es la que mejor recupera los modelos sintéticos en 13 casos, adicionalmente el arreglo Wenner-Schlumberger es mejor para estructuras geológicas verticales y los diferentes parámetros a utilizar en el proceso de inversión depende de las características geológicas del área de estudio.

Se interpretó las formaciones del basamento, arrojando valores por encima de los 400 Ohm-m. El miembro Órganos hidrogeológicamente presenta zona saturadas con resistividades entre 1 y 18 Ohm-m, este comportamiento hidrogeológico puede corresponder a zonas de posibles movimientos en masa; como también zonas no saturadas con resistividades por encima de 18 Ohm-m, además se identifica clastos de diferentes tamaños y con valores de resistividades muy elevadas por encima de 5623 ohm-m.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física Director Wilfredo Deltoro.

Abstract

Title: Modeling of the subsoil resistivity from 2D electrical tomography in the northern sector of the Municipality of Bucaramanga *

Author: Eliana Lizeth Gutiérrez Rincón**

Palabras Claves: Electrical tomography, Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Wenner-Schlumberger, electrical resistivity, Bucaramanga Formation.

Description:

In hazard and risk analysis for landslides in the north of Bucaramanga city, geophysics is a main input, as part of it, in this study 12 2D geoelectrical tomographies had been taking. Several synthetic tests were done using geological models built from the available information, to evaluate configurations Dipolo-Dipolo, Schlumberger and Wenner-Schlumberger and the software inversion parameters to be use for acquisition and processing of the data.

Dipolo-Dipolo configuration shows to have better fit in 13 tests, in addition, Wenner-Schlumberger have a better fit for models with vertical variation and the parameters variates depending of the geological model.

Basement formations were interpreted, throwing values above 400 Ohm-m. The member Organs hydrogeologically has saturated zones with resistivities between 1 and 18 Ohm-m, this hydrogeological behavior can correspond to areas of possible mass movements; as well as unsaturated areas with resistivities above 18 Ohm-m, clasts of different sizes and with very high resistivity values above 5623 ohm-m are also identified.

* Master Thesis

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física Director Wilfredo Deltoro.

Introducción

El sector norte del Municipio de Bucaramanga a través de la historia ha manifestado problemas por movimientos en masa que ha afectado a la población. Con el ánimo de profundizar en esta problemática es necesario realizar el estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en esta área urbana. Un factor fundamental dentro de este estudio es la investigación geofísica, en este caso tomografías eléctricas 2D técnica que permite recolectar información de resistividad del subsuelo en dos direcciones. Un elemento importante en este método es seleccionar la configuración de los electrodos que mejor responderá a los cambios de las diferentes litologías y estructuras geológicas.

Las tres configuraciones comúnmente utilizadas son Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger, estos arreglos presentan ventajas y desventajas como resolución y profundidad de alcance. La función de sensibilidad teórica para cada una de ellas, es desarrollada empleando un modelo de semi-espacio homogéneo. Sin embargo, en la naturaleza las estructuras geológicas no se comportan de esta manera. De ahí la importancia de analizar y conocer el modelo geológico y estructural para seleccionar la configuración de los electrodos apropiados para el área de estudio.

En este estudio se realizaron pruebas sintéticas a partir de diferentes modelos geológicos presenten en el área con el fin de identificar la configuración de los electrodos a utilizar para la cada una de las tomografías eléctricas. A partir de la información geoelectrica analizar e investigar si existe una evidencia que la saturación de aguas subterráneas sea causa de los movimientos de remoción en masa recientes.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Establecer si hay correspondencia entre las zonas que presentan movimientos de remoción en masa y un comportamiento hidrogeológico subsuperficial saturado.

1.2 Objetivos específicos

Generar modelos sintéticos de resistividad en 2D del área en estudio a partir de información geológica existente, registro eléctrico e información litológica de pozo, por medio del software AGI Earthimager 2D.

Diseñar adquisiciones con las configuraciones Dipolo-Dipolo, Schlumberger, Wenner-Schlumberger, para cada una de las tomografías.

Generar los modelos de resistividades del subsuelo.

Realizar el análisis de las tomografías eléctricas 2D considerando el contexto geológico del área de estudio.

2. Supuesto de investigación

El área de la zona norte de Bucaramanga se ha interpretado como un mega deslizamiento por varios autores. Sobre este megadeslizamiento cicatrizado se ha asentado una población humana que ha aumentado en los últimos años. La infraestructura construida durante los últimos años presenta agrietamiento y colapso de las mismas.

Este fenómeno puede tener su causa en múltiples orígenes, en los que se cuentan el aumento de la carga portante sobre el depósito aun inestable, o a zonas saturadas por aguas subterráneas lo cual ha sido atribuido por estudios del área metropolitana y de la CDMB.

En este trabajo se ha decidido investigar si existe una evidencia que la saturación de aguas subterráneas sea causa de los movimientos de remoción en masa recientes. Por lo cual nos preguntamos ¿existe correspondencia entre las zonas que presentan movimientos de remoción en masa y un comportamiento hidrogeológico subsuperficial saturado?

3. Marco teórico

En geofísica las investigaciones geoelectricas se basan en identificar los contrastes de resistividad de los materiales del subsuelo. La resistencia eléctrica R de un material está relacionada con su dimensión física (área de sección transversal y longitud) y de su resistividad todos los métodos de resistividad usan una fuente artificial de corriente la cual se inyecta en el subsuelo a través de dos electrodos y la diferencia de potencial se mide en otras dos posiciones de electrodos, la corriente se inyecta en el punto C_1 en la superficie del suelo esta corriente fluye radialmente desde el punto de entrada y su distribución es uniforme sobre una superficie hemisférica de resistividad . La distribución del potencial es simétrica respecto a la vertical colocada en el punto medio de los dos electrodos de corriente, como se muestra en la figura 1.

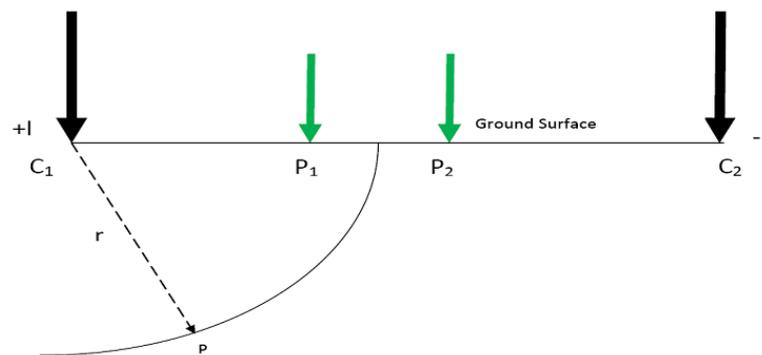


Figura 1. Distribución del potencial debido a una fuente de corriente en un semi-espacio homogéneo.

El potencial $\phi(r)$ en un punto p a una distancia r del electrodo de corriente C_1 que inyecta una corriente I , en un medio homogéneo con resistividad ρ , viene dado por:

$$\Phi(r) = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

(1.1)

En el caso de dos electrodos de corriente: C1 con una corriente +I y C2 con una corriente -I, el potencial $\phi(r)$ en un punto arbitrario de un medio homogéneo con resistividad ρ a partir de la ecuación 1.1, es:

$$\phi(r) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{c1}} - \frac{1}{r_{c2}} \right) \quad (1.2)$$

Donde r_{c1} y r_{c2} son las distancias desde la fuente y el electrodo de corriente del punto arbitrario. La diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie en un semi espacio homogéneo con una típica configuración de cuatro electrodos, se obtiene de:

$$\Delta\phi(r) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_2 P_2} \right) \quad (1.3)$$

La resistividad obtenida mediante este método es una resistividad aparente debido a que la tierra es heterogénea, esta resistividad aparente depende de la configuración de los electrodos y está determinada por la corriente inyectada y la diferencia de potencial, como sigue:

$$\rho_a = G \frac{\Delta\phi}{I} \quad (1.4)$$

Donde G es el factor geométrico que depende de la configuración de los electrodos.

La selección de la configuración de los electrodos depende de la complejidad geológica del objeto de estudio. Los arreglos más utilizados se muestran en la figura 2 con su respectivo factor geométrico.

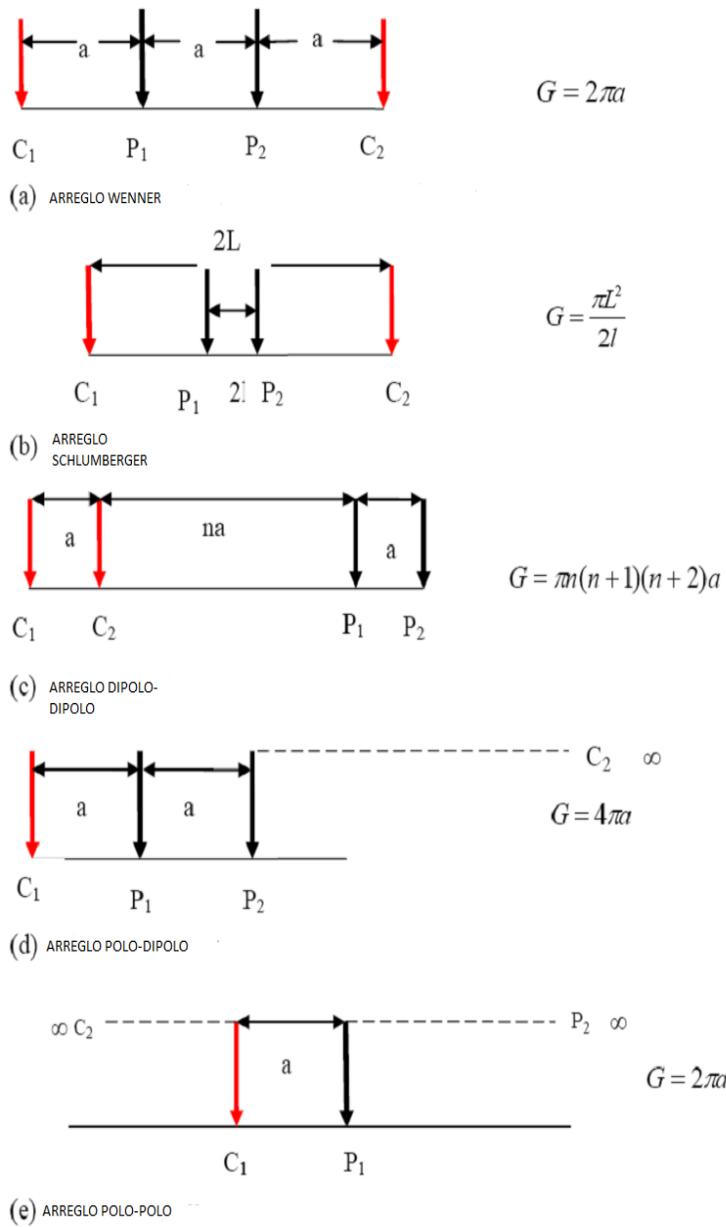


Figura 2. Configuraciones de electrodos más conocidas. Adaptado de (Philips Aizebeokhai, 2010).

3.1 Tipos de prospecciones geoelectricas

El propósito de las técnicas de prospección geofísica es conocer la forma, la distribución y las dimensiones de los cuerpos presentes en el subsuelo a partir de medidas tomadas en superficie.

Una de las técnicas geofísicas es la prospección geoelectrica en esta técnica se puede obtener perfiles verticales (1D) llamados sondeos eléctricos verticales (SEV) y secciones transversales llamados sondeos de resistividad 2D o tomografía de resistividades eléctricas (TRE); también es posible obtener sondeos de resistividad 3D, todas con el fin de conocer la variación de la resistividad en el subsuelo. (J Royero, 2014) Figura 3.

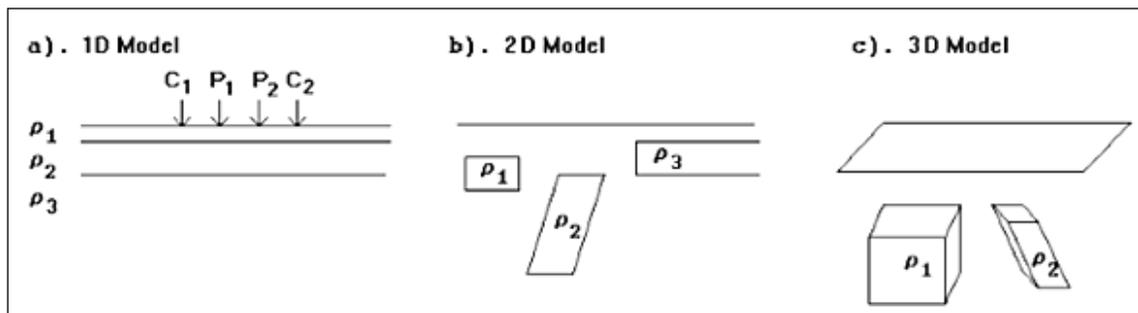


Figura 3. Técnicas de prospección geoelectrica. Adaptado de (Hidalgo, Loke, Oscar-Fanton, & Cara-Rubí, 2004).

Para realizar la técnica de sondeos de resistividad 1D o sondeos eléctricos verticales (SEV), se utilizan solo cuatro electrodos ajustados dependiendo de la configuración. Los electrodos se van espaciando en el área a estudiar manteniendo el punto central fijo, el espaciamiento depende de la configuración a utilizar. Dos electrodos utilizados para inyectar corriente y los otros dos electrodos para medir la diferencia de potencial. A partir de estas mediciones se obtienen los valores de resistividades del subsuelo en una columna vertical unidimensional a partir del punto central. En

el caso de requerir conocer las variaciones laterales de las resistividades del subsuelo, se debe utilizar el método de tomografía de resistividades eléctricas (TRE).

La TRE permite modelar la resistividad del subsuelo mediante electrodos (unidos entre sí por un cable multi – conector), un computador portátil y una unidad de comunicación electrónica. Los electrodos se anclan en el suelo a la misma distancia, la cantidad de electrodos y alcance de extensión en longitud depende de las capacidades del equipo. El equipo selecciona automáticamente los cuatro electrodos relevantes para la medición dependiendo de la configuración seleccionada previamente por el usuario. La secuencia de adquisición de datos de tomografía eléctrica se muestra en la figura 4.

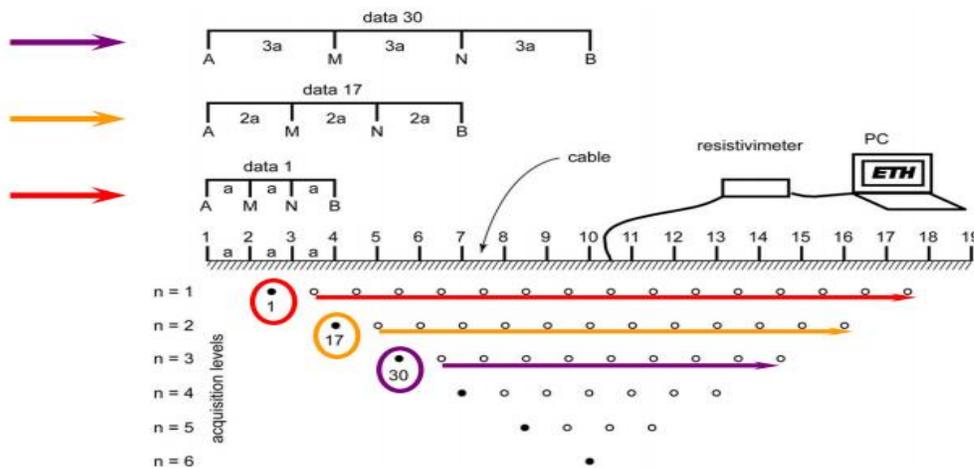


Figura 4. Disposición de los electrodos y secuencia de medición de una tomografía de resistividad eléctrica (TRE). Adaptado de (D. M. Loke, 2000).

Los datos adquiridos en campo corresponden a datos de resistividades aparentes por lo que es necesario un procesamiento de los datos para obtener las resistividades reales, empleando métodos

de inversión. El producto final es una sección de distancia Vs profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo.

3.2 Modelado Directo

El modelado directo se define como el proceso de predecir los datos de resistividad aparente en función de la distribución de resistividad del subsuelo y la distribución geométrica de los electrodos. La ecuación gobernante para el problema de resistividad de corriente directa se obtiene por la combinación de la ecuación de la conservación de carga y la ley de Ohm para un modelo de conductividad en 2D. Con el modelado directo se generan los datos sintéticos de la resistividad aparente, este proceso se lleva a cabo a través de métodos numéricos que solucionan de forma aproximada la ecuación diferencial gobernante, empleando las condiciones de frontera que describen el experimento físico. Para resolver el problema directo de resistividad en 2D se pueden utilizar el método de transmisión de onda, método de diferencias finitas, y método de elementos finitos. Una de las ventajas de los métodos de diferencias finitas y elementos finitos con respecto a los otros métodos es la capacidad de aproximar rápidamente las soluciones de cualquier modelo de estructura compleja. El método de diferencias finitas es relativamente rápido comparado con el método de elementos finitos.

3.2.1 Método de diferencias finitas. Este método ampliamente utilizado para solucionar ecuaciones diferenciales, hace una discretización que resulta de representar el operador diferencial con un operador discreto, esto ayuda al diseño de una grilla con la precisión requerida por el problema. Para un modelo de la tierra 2D se genera una grilla rectangular sobre el modelo y se asigna a cada celda rectangular un valor de resistividad; para cada punto de cada esquina de la celda se desarrolla la ecuación gobernante, cada una de las soluciones en cada punto de la celda

aporta información para la solución de las celdas vecinas y así sucesivamente va aproximando a la solución en todo el modelo. En la figura 5 se muestra la grilla utilizada en el método de diferencias finitas para discretizar el problema directo de resistividad.

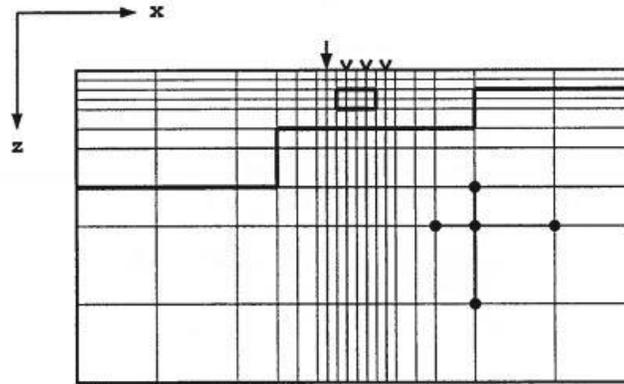


Figura 5. Grilla de diferencias finitas bidimensional utilizado para discretizar el problema directo de resistividad. Adaptado de (Peter Robert McGillivray, 1992).

3.2.2 Método de elementos finitos. El método de elementos finitos se aplica usando elementos poligonales (en este caso triángulos), para la discretización del modelo de resistividades, a diferencia del método de diferencias finitas en la que la discretización se hace con celdas rectangulares, esto permite un mejor ajuste de la forma del modelado real cuando este no es rectangular, teniendo en cuenta que las condiciones de frontera se colocan en todos los límites de la red como se muestra en la figura 6.

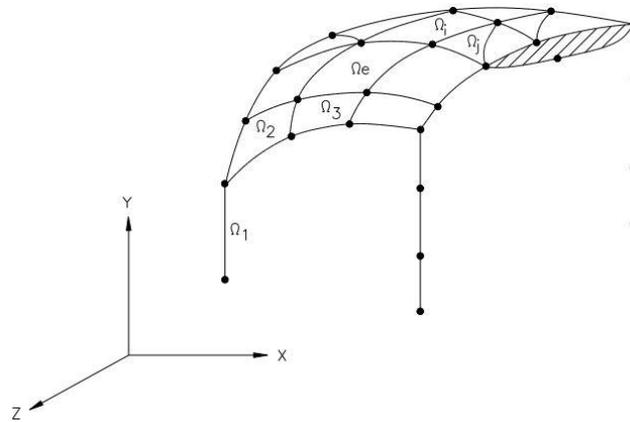


Figura 6. Grilla de elementos finitos bidimensional utilizado para discretizar el problema directo de resistividad. Adaptado de (Zeferno A. da Fonseca Lopes, 2011)

3.3 Modelado Inverso

El modelado inverso es el proceso donde se encuentra la distribución de resistividades del subsuelo que reproduce con una precisión dada por el usuario la resistividad aparente tomada en campo. La solución de problemas inversos se desarrolla mediante métodos numéricos; en problemas de inversión lineales la solución viene dada por,

$$m = (G^t G)^{-1} G^t d \quad (1.5)$$

Siendo m el conjunto de parámetros, G el operador lineal del espacio de parámetros al espacio de los datos y del conjunto de datos.

En el caso de la tomografía eléctrica el conjunto de parámetros es la distribución de resistividades eléctricas del subsuelo, y siendo d los valores de resistividad aparente medidos en campo y d_{syn} los datos sintéticos. En este caso el operador G no es lineal, por lo que no es posible usar la ecuación (1.5), para solucionar el problema existen dos formas: la primera y ampliamente más utilizada es linealizar el problema, cuya solución usando mínimos cuadrados es:

$$m_{n+1} = m_n + (G^t G)^{-1} G^t \{d - d_{syn}\} \quad (1.6)$$

En algunos casos se hace necesario introducir un factor de amortiguamiento, para mejorar la estabilidad de la solución.

$$m_{n+1} = m_n + (G^t G + \alpha^2)^{-1} G^t \{d - d_{syn}\} \quad (1.7)$$

En esta se parte de un modelo inicial m_0 que se va modificando localmente (distribuciones de resistividades cercanas), lo que hace que la solución dependa principalmente de la selección del modelo inicial. Entre ellos, podemos mencionar el método de Newton y el método del Gradiente Conjugado; la segunda forma, menos usada debido a su alto costo computacional, es construir modelos de resistividades de forma aleatoria para posteriormente seleccionar el modelo que mejor reproduce la resistividad aparente obtenida en la adquisición; a diferencia de los métodos locales no es necesario construir un modelo inicial. Entre ellos sobresale el método de cristalización

simulada (S. Kirkpatrick; C. D. Gelatt; M. P. Vecchi Science, 1983) y algoritmo genético (Holland J.H., 1984).

El software empleado AGI Earthimager 2D del equipo SuperSting™ Earth Resistivity, IP & SP System with WI-FI utiliza el método de elementos y diferencias finitas para el modelado directo y mínimo cuadrado amortiguada (Damped Least Squares) ecuación 1.7, Modelado suave (Smooth Model Inversion) e Inversión Robusta (Robust Inversion) para el modelado inverso.

3.4 Función de sensibilidad

La función de sensibilidad de Frechet representada matemáticamente por la derivada de Frechet (P.R. McGillivray & Oldenburg, 1990), indica el cambio en la diferencia de potencial de una sección del subsuelo provocada por una variación en la resistividad para un semi-espacio homogéneo (M. H. Loke, 2004).

Para el cálculo de la función de sensibilidad para un semi-espacio homogéneo (M. H. Loke, 2004) considera una configuración simple con solo un electrodo de corriente en el punto $(0,0,0)$ y un electrodo de potencial en $(a,0,0)$, ambos sobre la superficie y separados a metros. Inyectando un amper de corriente a través del electrodo de corriente C1 da como resultado un potencial ϕ observado en el electrodo de potencial P1. figura 7.

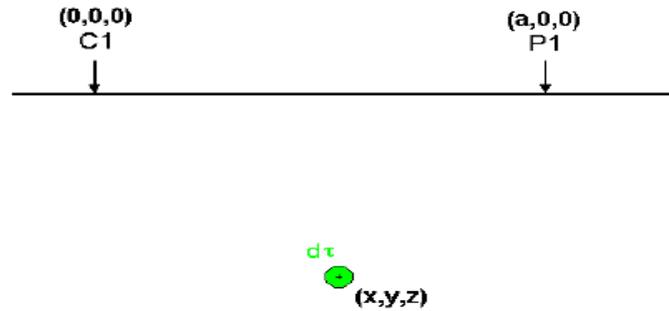


Figura 7. Configuración simple utilizada para el cálculo de la función de sensibilidad para un semi-espacio homogéneo. Adaptado de (D. M. Loke, 2000).

Suponiendo que hay un cambio de la resistividad $\delta\rho$ a una profundidad (x,y,z) el cambio en la medida de la diferencia de potencial esta dado por (M. H. Loke & Barker, 1995) como

$$\delta\Phi = \frac{\delta\rho}{\rho^2} \int_v \nabla\Phi \cdot \nabla\Phi' d\tau \quad (1.8)$$

Donde el cambio en la resistividad tiene un valor constante en un elemento de volumen $d\tau$ y zero para los demás. El parámetro Φ' es el potencial medido en el electrodo de corriente P1, para el caso de un semi-espacio homogéneo el potencial Φ en el punto medio es dado por

$$\Phi = \frac{\rho}{2\pi\{(x-a)^2 + y^2 + z^2\}^{0.5}} \quad (1.9)$$

Desarrollando la divergencia y sustituyendo la ecuación 1.9 en 1.8 se obtiene,

$$\frac{\delta\Phi}{\delta\rho} = \int_v \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{\{x^2 + y^2 + z^2\}^{1.5} \{(x-a)^2 + y^2 + z^2\}^{1.5}} dx dy dz \quad (1.10)$$

La derivada de Frechet en 3-D viene dada por el término dentro de la integral, es decir.

$$F_{3D}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{\{x^2 + y^2 + z^2\}^{1.5} \{(x-a)^2 + y^2 + z^2\}^{1.5}} \quad (1.11)$$

La ecuación 1.11 es la función de sensibilidad o derivada de Frechet para una configuración simple. Para una configuración general de cuatro electrodos es necesario sumar las contribuciones de los cuatro pares de electrodos corriente y potencial.

3.4.1 Función de sensibilidad para el modelo 1D. La función de sensibilidad para el modelo 1D es utilizada para calcular la profundidad de investigación de la configuración. Se calcula integrando la ecuación (1.11) en las direcciones tanto x como y donde sus límites van de $-\infty$ a $+\infty$, asumiendo que las capas del subsuelo son horizontales.

$$F_{1D}(z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{\{x^2 + y^2 + z^2\}^{1.5} \{(x-a)^2 + y^2 + z^2\}^{1.5}} dx dy \quad (1.12)$$

La solución analítica de la ecuación (1.12) (Roy, A; Apparao, 1971) está dada por

$$F_{1D}(z) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{z}{(a^2 + 4z^2)^{1.5}} \quad (1.13)$$

3.4.2 Función de sensibilidad para el modelo 2D. La función de sensibilidad para el modelo 2D es utilizada para identificar la resolución vertical y lateral de las diferentes configuraciones. En este caso para un punto (x,y) , se suma la contribución de todos los puntos para valores de y que van de $+\infty$ hasta $-\infty$.

$$F_{2D}(x, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{\{x^2 + y^2 + z^2\}^{1.5} \{(x-a)^2 + y^2 + z^2\}^{1.5}} dy \quad (1.14)$$

La solución analítica desarrollada por (M. H. Loke & Barker, 1995) está dada por la siguiente ecuación

$$F_{2D}(x, z) = \frac{2}{\alpha \beta^2} \left\{ \frac{\alpha^2 E(k) - \beta^2 K(k)}{(\alpha^2 - \beta^2)} - \frac{\gamma \{(\alpha^2 + \beta^2)E(k) - 2\beta^2 K(k)\}}{(\alpha^2 - \beta^2)^2} \right\} \quad (1.15)$$

(1.16)

Donde,

$$k = \frac{(\alpha^2 - \beta^2)^{0.5}}{\alpha}$$

Para $x > 0.5a$

$$\alpha^2 = x^2 + z^2, \quad \beta^2 = (x - a)^2 + z^2, \quad \gamma = xa$$

Para $x < 0.5a$

$$\beta^2 = x^2 + z^2, \quad \alpha^2 = (x - a)^2 + z^2, \quad \gamma = a(x - a)$$

Para $x = 0.5a$

$$F_{2D}(x, z) = \pi \left\{ \frac{1}{2\alpha^3} - \frac{3a^2}{16\alpha^5} \right\}, \text{ Con } \alpha = 0.25a^2 + z^2$$

Los valores de sensibilidad más altos se encuentran cerca a los electrodos, los patrones de contorno para cada configuración son diferentes a distancias mayores. Estas diferencias ayudan a explicar la respuesta que tiene las diferentes configuraciones a los diferentes tipos de estructuras.

3.4.3 Configuración Wenner. Es la configuración pionera, muchos de los primeros sondeos 2D se llevaron a cabo con esta configuración. La función de sensibilidad para la configuración Wenner Alpha los contornos son casi horizontales debajo del centro de la configuración figura 8a, por causa de esta propiedad esta configuración es relativamente sensible a los cambios verticales de resistividad del subsuelo debajo del centro de la configuración, aunque es menos sensible a los cambios horizontales. En la configuración Beta la ubicación de los electrodos es el mismo que el usado por la configuración Dipolo-Dipolo sin embargo el espaciamiento es a figura 8b; para la configuración Gamma figura 8c, el electrodo de corriente y potencial son intercalados (C2-P2), la función de sensibilidad en esta configuración muestra que la región más profunda se encuentra debajo de los dos electrodos exteriores y no debajo del centro del arreglo. En conclusión, es una configuración útil para identificar estructuras horizontales, pero no útiles para identificar estructuras verticales.

Para esta configuración la profundidad media de investigación es aproximadamente 0.5 veces la separación “a” utilizada. La intensidad de la señal es inversamente proporcional al factor geométrico, que es el utilizado para calcular el valor de la resistividad aparente. Debido a que el

factor geométrico de esta configuración es más pequeño comparado con las otras configuraciones es que esta configuración tiene la mayor intensidad de señal. (D. M. Loke, 2000).

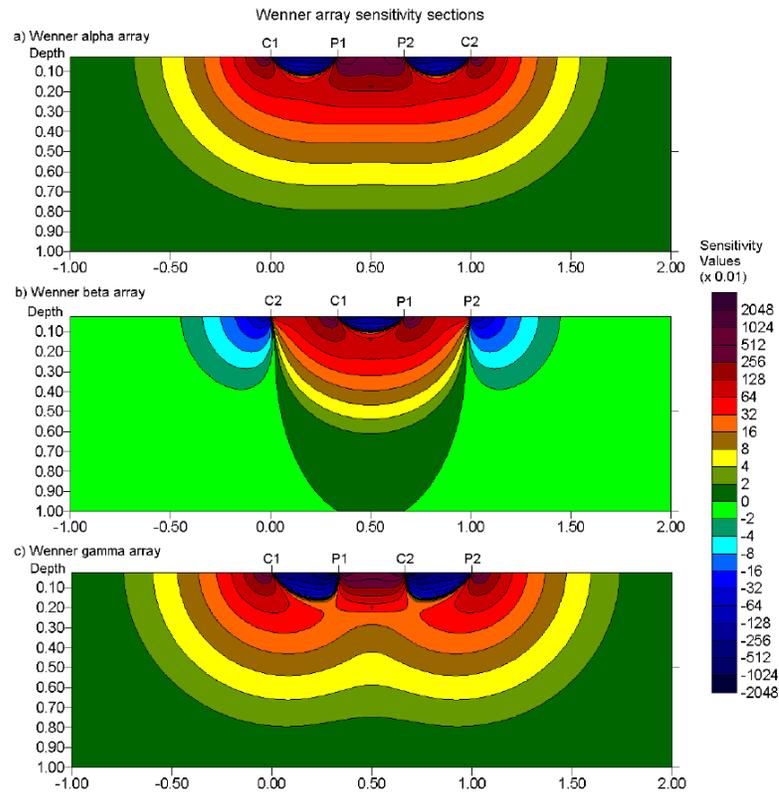


Figura 8. Función de sensibilidad. a) configuración Wenner Alpha, b) configuración Wenner Beta, c) configuración Gamma. Adaptado de (M. H. Loke, 2004).

3.4.4 Configuración Wenner-Schlumberger. La configuración Wenner-Schlumberger es una combinación entre las configuraciones Wenner y Schlumberger (O. Pazdirek and V. Bláha, 1996).

Una modificación de la configuración de Schlumberger es que puede ser usado en un sistema de espaciamiento de electrodos constante. El factor “n” para esta configuración es la relación de la distancia entre los electrodos C1-P1 (o P2-C2) y la separación entre el par de potencial P1-P2. La

función de sensibilidad para esta configuración se muestra en la figura 9a para un factor $n=1$, la figura 9b para un factor $n=2$, la figura 9c para un factor $n=4$ y la figura 9d para un factor $n=6$, el área con mayor sensibilidad positiva se concentra debajo de los electrodos centrales (P1-P2) y a medida que aumenta el factor n los contornos de sensibilidad tienen una ligera curvatura vertical debajo del centro del arreglo. Para el caso del factor $n=6$ se observan los contornos de alta sensibilidad positiva que están más separados de los contornos C1 y C2 de alta sensibilidad positiva. En conclusión, esta configuración es moderadamente sensible tanto a estructuras horizontales como verticales. Este arreglo puede ser utilizado en áreas donde se encuentren ambos tipos de estructuras geológicas.

La profundidad media de investigación es un 10% mayor que la de la configuración Wenner para la misma distancia entre los electrodos exteriores (C1 y C2). La intensidad de la señal para esta configuración es menor que la de la configuración Wenner, pero mayor que la configuración Dipolo-Dipolo. (D. M. Loke, 2000).

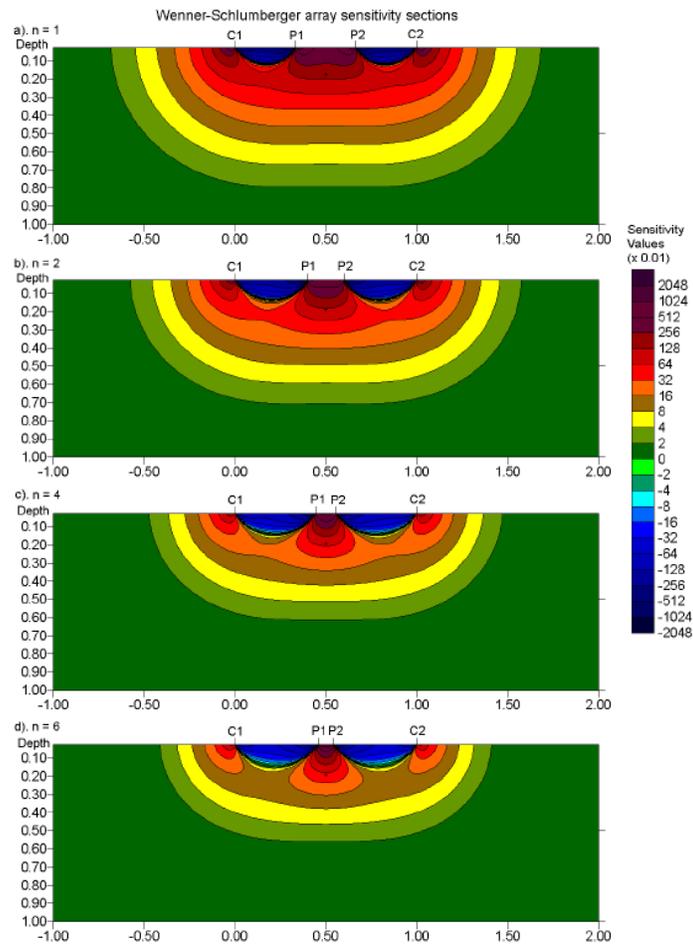


Figura 9. Función de sensibilidad para la configuración Wenner-Schlumberger. a) n=1, b) n=2, c) n=4, d) n=6. Adaptado de (M. H. Loke, 2004).

3.4.5 Configuración Dipolo-Dipolo. La configuración Dipolo-Dipolo ha sido ampliamente utilizada. El espaciamiento entre los electrodos C2-C1 y P1-P2 es dado por “a” además tiene un factor “n” que esta dado como la relación de la distancia entre los electrodos C1-P1 y la separación entre el par de electrodos C2-C1(ó P1-P2). La función de sensibilidad para esta configuración se muestra en la figura 10a para un factor $n=1$, la figura 10b para un factor $n=2$, la figura 10c para un factor $n=4$ y la figura 10d para un factor $n=6$, los valores de sensibilidad más altos son generalmente localizados entre C2-C1 y P1-P2 lo que significa que la configuración es más sensible a los cambios de resistividad debajo de estos pares de electrodos. El patrón de contorno de sensibilidad es casi vertical, es decir es muy sensible a los cambios horizontales en la resistividad, pero relativamente insensible a cambios verticales. En general esta configuración es buena para mapear estructuras verticales como diques y cavidades, pero como desventaja no es buena para mapear estructuras horizontales como capas sedimentarias. Además, esta configuración tiene menor profundidad de investigación comparada con Wenner, aunque tiene mejor cobertura de datos horizontales. (D. M. Loke, 2000).

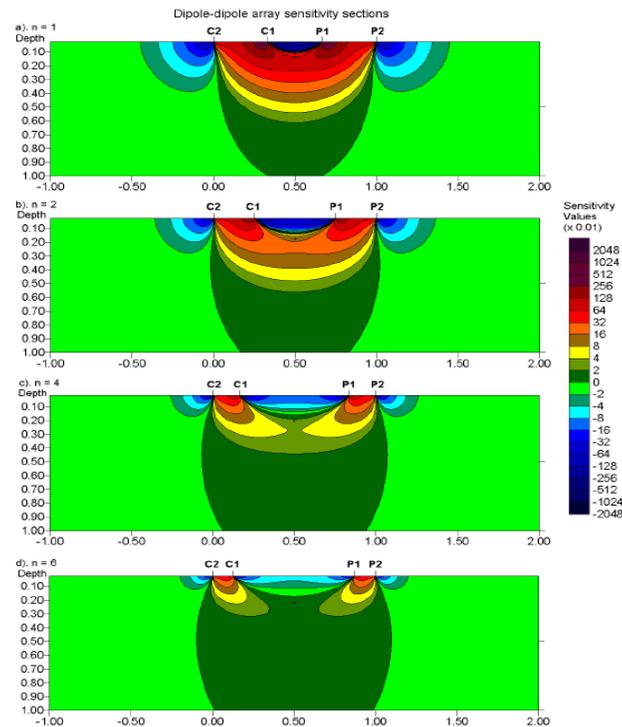


Figura 10. Función de sensibilidad para la configuración Dipolo-Dipolo. a) $n=1$, b) $n=2$, c) $n=4$, d) $n=6$. Adaptado de (M. H. Loke, 2004)

Debido a que estos modelos teóricos de sensibilidad están calculados para un semi espacio homogéneo, en este trabajo se propone realizar pruebas sintéticas con modelos construidos a partir de la información geológica disponible para comparar las diferentes configuraciones.

4. Características Regionales de la zona de estudio

El Departamento de Santander está localizado al nororiente de Colombia sobre el costado Occidental de la cordillera Oriental; este territorio es geológicamente complejo y tectónicamente dinámico relacionado a la interacción de las placas tectónicas Nazca, Caribe y Sur América (Jm Royero & Clavijo, 2001).

Bucaramanga (Ciudad capital del Departamento de Santander) y su área metropolitana se relacionan principalmente con el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Martha y la falla del Suarez.

La Ciudad de Bucaramanga se encuentra sobre un depósito sedimentario de edad cuaternaria correspondiente a la Formación Bucaramanga, morfológicamente corresponde a un abanico aluvial depositado sobre una depresión tectónica.

El abanico de Bucaramanga presenta una superficie ondulada con pendientes entre 2 y 7 inclinada hacia el occidente, este depósito aumenta de oriente a occidente. Teniendo en cuenta las clasificaciones hechas por (Hubach, 1952) se propone dividir la formación Bucaramanga, de base a techo en: miembro Órganos (Qbo), miembro Fino (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr).

El área de estudio se encuentra localizada en el sector Norte de la ciudad de Bucaramanga, comprende los barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, Villa Helena, Villa Rosa, y Villa María. Figura 11.

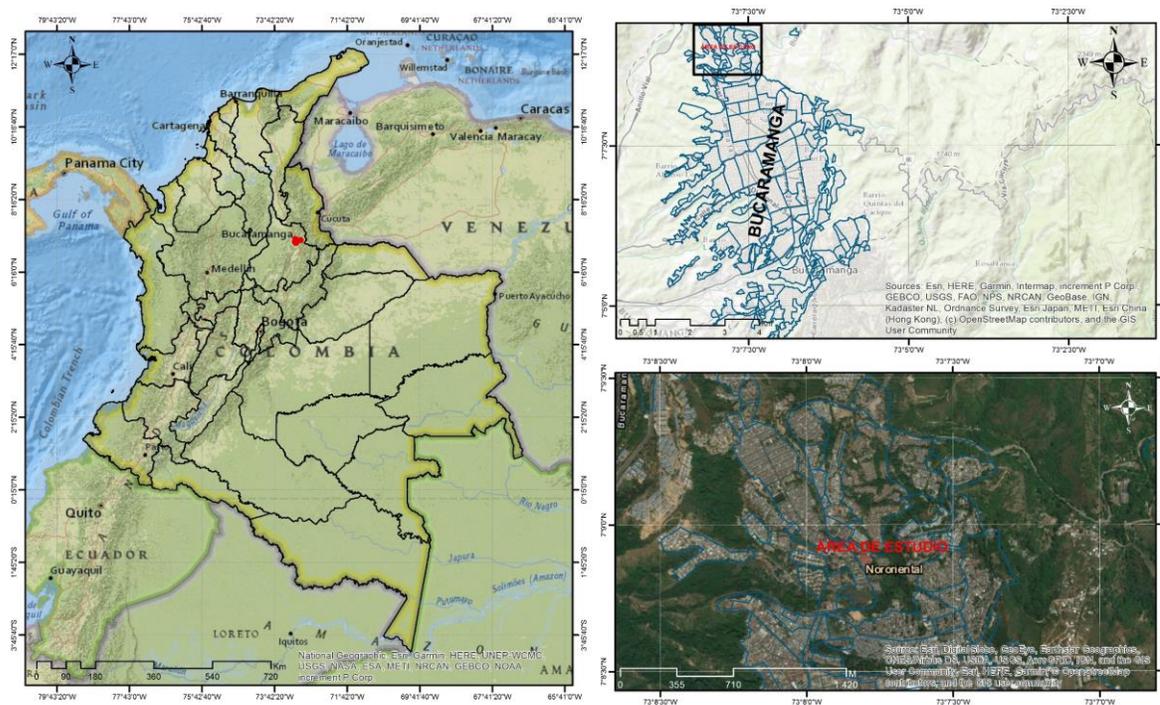


Figura 11. Localización geográfica del área de estudio.

4.1 Evolución geológica Bucaramanga

4.1.1 Fase I Orogenia Andina Mioceno-Plioceno. La depresión tectónica de Bucaramanga, está limitada al oriente por el sistema de fallas de Bucaramanga y al occidente por el sistema de fallas del Suárez - Río de Oro. Estos dos sistemas se unen al norte de la ciudad en el sector de Los Colorados. El límite sur de la depresión corresponde a la falla de Los Santos. (Geomática & Sistemas, 2017)

El origen de esta depresión tectónica está asociado a los últimos levantamientos de la cordillera Oriental donde las areniscas y limolitas de la Formación Girón fueron comprimidas por el levantamiento del Macizo de Santander al oriente de la depresión, contra las paleo Mesas de Los Santos, Ruitoque, basamento de la depresión de Bucaramanga y la Mesa de Lebrija al occidente.

Este empuje generó el desplazamiento hacia el sur del basamento de la depresión, las mesas de Ruitoque y de Los Santos, el hundimiento fue escalonado de norte a sur donde en ese momento (pre-Mioceno) los estratos de las formaciones: Diamante; Tiburón, Bocas, Jordán, Girón y Los Santos estaban sub-horizontales, formando las mesas de: los Santos y Ruitoque al límite sur de la depresión; también se conformaron de Sur a Norte, el Alto de Cañaveral, los Cerros de la Cumbre y Santana y se inició la erosión de la Ladera Occidental del Macizo, donde se emplazaron los intrusivos de los Cerros de Pan de Azúcar y Morrórico entre los trazos más orientales del sistema de Fallas de Bucaramanga y Pan de Azúcar. (Geomática & Sistemas, 2017).

El costado oriental de la depresión es el que más muestra deformaciones en los estratos de las formaciones Paleozoicas de orientación Noroeste alcanzado inclinaciones de más de 45° al SW, en algunos lugares incluso el movimiento relativo de los bloques alcanza a invertir el buzamiento; estos estratos finalmente se fracturaron siguiendo fallas de rumbo paralelas a la Falla de Bucaramanga. (Geomática & Sistemas, 2017).

4.1.2 Fase II Pleistoceno. La depresión fue rellenada durante el Pleistoceno por los abanicos aluviales que conformaban los paleo - ríos: Suratá al norte, Río Frío al centro y de Oro al sur. El abanico más amplio corresponde al del río Surata que tenía su ápice en el sector de Morrórico y se extendía hasta la confluencia actual de los ríos Frío y de Oro en el casco urbano de Girón. Estos sedimentos conforman los que hoy día se han denominado los miembros Órganos (Qbo) o miembro III y Finos (Qbf) o miembro II de la formación Bucaramanga. Los últimos movimientos tectónicos de las fallas de Bucaramanga y del Suárez desplazaron el ápice de los abanicos y desviaron la dirección de los ríos mencionados de suroccidental a occidental y nororiental; este proceso generó al noroccidente de la depresión la formación del río Lebrija al converger en ese punto los ríos Surata y de Oro, adicionalmente estos movimientos propiciaron flujos de escombros y lodos que recubrieron los depósitos aluviales lo cuales conformaron los miembros Gravoso (Qbg), Limos

rojos (Qblr) en el sector de Bucaramanga – Floridablanca- norte y los denominados Flujos de Escombros (Qbfe) entre la zona urbana de los municipios Floridablanca y Piedecuesta. (Geomática & Sistemas, 2017).

En esta época se inicia el proceso de disección de los depósitos que contenía la depresión concentrándose en los paleo-cauces de la quebrada La Iglesia al Norte, Zapamanga en la zona Central, Río Frío y Mensuly al sur, todos drenando hacia el río de Oro que al confluir con el Suratá conformaron el río Lebrija, de orientación Nor-noroccidental. Este último movimiento coincide con el final de las manifestaciones del último periodo glaciario o por lo menos un cambio significativo en las condiciones hidrometeorológicas en las cuencas altas de los ríos mencionados anteriormente, que disminuyeron la intensidad de los flujos de escombros, que a su vez conformaban los abanicos al oriente de la depresión e iniciaron la erosión pluvial en condiciones similares a las actuales. (Geomática & Sistemas, 2017).

4.1.3 Fase III Holoceno Temprano. En el costado centro oriental de la depresión tectónica de Bucaramanga, se presentaron probablemente los mayores desplazamientos relativos en la vertical, debidos a la formación de una cuña limitada al sur por la falla transversal que sigue el curso de la quebrada Suratoque y otra al norte que alinea la quebrada La Iglesia, al oriente del viaducto La Flora y limitada al occidente por los alineamientos de las fallas del Grupo 3 (Cabecera - Lagos del Cacique occidental - La Cumbre - Mesuli). Producto de esta actividad se generaron las avalanchas que conformaron conos y terrazas de poca extensión en el área de piedemonte principalmente en la zona de Bosconia en el río Suratá, la Zapamanga en el sector de Vericute y Helechales Limoncito en el Río Frío. (Geomática & Sistemas, 2017).

Este movimiento tectónico explica el basculamiento de algunos depósitos cuaternarios antiguos y la presencia de planos de flexodeslizamiento en los mismos y la formación de espesos depósitos de vertiente en este sector recubriendo las fallas más occidentales del sistema de Bucaramanga; las

mesas de Los Santos y de Ruitoque se mantienen en ascenso como límite sur de la depresión. (Geomática & Sistemas, 2017).

4.1.4 Fase IV Holoceno-Reciente

Los sedimentos de la superficie del macizo de Santander y de la Meseta de Bucaramanga en el sector oriental de la misma, fueron objeto de una disección profunda causada por la erosión retrogresiva de la quebrada La Iglesia y sus afluentes (Quebrada La Flora) al norte. Este proceso dejó al descubierto los cerros de Morrorrico, Pan de Azúcar, UDES (vereda Santa Bárbara parte Baja) y lagos del Cacique en la parte norte, los afluentes de la Quebrada Zapamanga en la zona central, sector de Limoncito y los de la Quebrada Mensulí al sur; además del ahondamiento de los valles de los ríos Surata y Frio. Todas estas corrientes presentan un marcado control estructural en su curso y cambian de orientación en la zona de la falla de Bucaramanga, de suroccidental a este-oeste y noroccidental; esta erosión retrogresiva se inicia en el Macizo, como producto de su acción se conformaron pequeños conos y terrazas de 3 a 5 metros de espesor, que recubren las rocas del Neis, las formaciones Bocas y Tiburón y las rocas graníticas que actúan como nivel base de erosión. (Geomática & Sistemas, 2017).

4.1.5 Fase V Cuaternario Reciente. Los desprendimientos de laderas de suelos de antiguos depósitos cuaternarios (Pleistoceno) y/o suelos residuales son producto de la acción combinada de las condiciones endógenas (roca fracturada y actividad sísmica), y exógenas asociadas a las condiciones climáticas y la acción antrópica. Estas últimas se evidencia en cambios de uso de los suelos de bosques a agropecuario intensivo, la adecuación de vías en corte, principalmente la vía nacional (Bucaramanga – Cúcuta) y la invasión y loteo de las zonas suburbanas de Bosconia, Vegas de Morrorrico, La Malaña –San José; barrios subnormales de Bellavista y Buenos Aires, en el sector norte, viviendas rurales en el sector de la UDES- Km 9, Hacienda Las Delicias, vía El Carmen-Vericute-Cenicafe, Limoncito. Estas zonas ubicadas en laderas con inclinaciones de más del 57%

generan depósitos de laderas con inclinaciones de 30° a 45° grados y espesores de hasta 5 metros que se distingue por estar compuesto predominantemente por guijos y guijarros de areniscas silíceas duras e ígneo metamórficas duras y escombros, sin embargo el desarrollo urbanístico y las obras de protección contra la erosión iniciadas en los años 40, las obras de protección de taludes, la canalización de algunas quebradas, la construcción de redes de alcantarillados, complementadas con el aislamiento y reforestación de algunas zonas han permitido frenar los procesos de erosión natural.(Geomática & Sistemas, 2017).

El estudio geológico fue realizado por un grupo de geólogos UIS pertenecientes al grupo de investigación de Geomática de la escuela de ingeniería Civil. En el que se realizaron 7 perforaciones, 6 trincheras y 20 apiques.

En el área de estudio el basamento está constituido por las formaciones Diamante, Tiburón, Bocas y Girón. En el sondeo s7b se encontró alternancia de calcarenitas, calcilutitas y caliza mudstone altamente bioturbadas y presencia de corales y braquiópodos pertenecientes a la Formación Diamante, se encontró a 92 m de profundidad. La Formación Tiburón en el S2 se encuentra a 105.6 m de profundidad se encontró conglomerado calcáreo de guijos y guijarros clasto soportado. La Formación Bocas conformada por alternancia de areniscas finas a gravosas, limolitas conglomeraticas bioturbadas y conglomerados tamaño guijos. En el sondeo S1 se encontró a 122.4 metros. (Geomática & Sistemas, 2017).

Sobre el basamento suprayace la Formación Bucaramanga en el área de estudio está representada por los miembros Órganos Inferior (QbO1), Órganos Superior (QbO2) y Órganos Removido (Qd?).

El miembro Órganos Inferior (QbO1) se encontró representado en los sondeos por gravas, arenas gravosas y limos gravosos; las gravas predominantemente de composición ígnea y metamórficas.

El miembro Órganos Superior (QbO2) se encontró en los sondeos como arenas gravosas grano decreciente. Las gravas en mayor proporción de composición sedimentaria.

Una de las características físicas importantes en estas unidades es la resistividad debido a que muestra contraste en relación con cada una de las unidades geológicas como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1.

Rango de resistividades eléctricas para las diferentes unidades geológicas.

<i>Resistividad Eléctrica (Ω-m)</i>	<i>Unidad Geológica</i>
5-3000	<i>Depósitos más recientes: deslizamientos, aluviones y coluviones.</i>
7-200	<i>Miembros Limos Rojos</i>
130-6900	<i>Miembro Gravoso: -niveles gruesos</i>
10-80	<i>-niveles finos</i>
2-25	<i>Miembros finos</i>
40-2900	<i>Miembro Órganos: -niveles gruesos</i>
5-30	<i>-niveles finos</i>
100-250	<i>Formación Girón</i>
35-50	<i>Formación Jordán: -zona meteorizada</i>
350-950	<i>-roca sana</i>
20-80	<i>Gneis de Bucaramanga: -zona meteorizada</i>
550-850	<i>-roca sana</i>

Nota: Rangos de resistividades eléctricas de las diferentes unidades geológicas presentes en el área de estudio.

Adaptado de (Vásquez & Bermoudes, 2010).

A partir del registro de pozo del sondeo S7b se obtuvieron los rangos de resistividad del subsuelo para la Formación Bucaramanga y la Formación Diamante. El miembro Órganos superior presenta rangos entre 5 y 25 Ohm/m, el miembro Órganos inferior valores entre 15 y 25 Ohm/m, el miembro Órganos removido valores de 27 Ohm/m y para la Formación Diamante valores de resistividad entre 100 y 200 Ohm/m.

5. Metodología

Para cumplir los objetivos en este proyecto se desarrolló una metodología basada en pruebas sintéticas; se generaron 14 modelos sintéticos de resistividades eléctricas del subsuelo correspondiente a la zona de estudio donde se realizaron 12 tomografías eléctricas.

5.1 Construcción de Modelos Sintéticos

Se construyeron 14 modelos sintéticos de resistividades eléctricas utilizando el software EarthImager2D de la empresa AGI basados en 7 perfiles geológicos realizados por el equipo de geología perteneciente al proyecto (Geomática & Sistemas, 2017), los valores de resistividad asignados fueron tomados del registro de pozo S7b e información bibliográfica (Vásquez & Bermoudes, 2010). En la figura 12 se muestra el modelo sintético de resistividad eléctrica del perfil AA modelo 1.

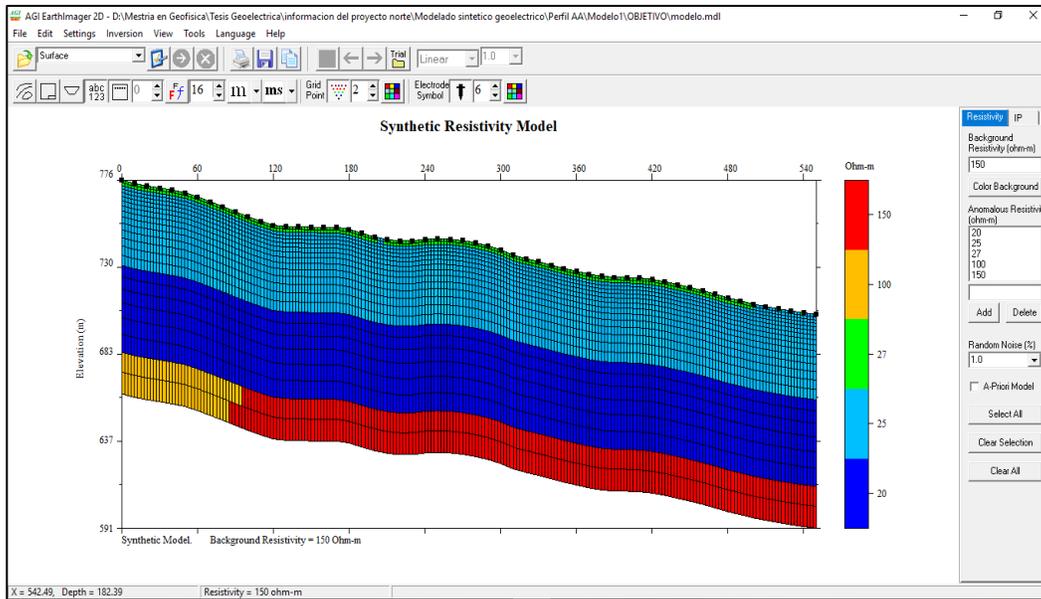


Figura 12. Modelo sintético de resistividad eléctrica del subsuelo, perfil AA modelo 1.

Se utilizaron 7 perfiles geológicos de los cuales se generaron 14 modelos de resistividad sintéticas tabla 2.

Tabla 2.

Modelos sintéticos de resistividad eléctrica generados de los 7 perfiles geológicos.

PERFILES	MODELOS
Perfil AA	Modelo 1
	Modelo 2
Perfil BB	Modelo 1
	Modelo 2
	Modelo 3
Perfil CC	Modelo 1
	Modelo 2
Perfil DD	Modelo 1
	Modelo 2

	Modelo 1
Perfil EE	Modelo 2
	Modelo 1
Perfil FF	Modelo 2
	Modelo 1
Perfil GG	Modelo 1

En la figura 13 se muestra la localización de los 7 perfiles geológicos y los 14 modelos sintéticos de resistividad del subsuelo, la base del mapa es el modelo de clasificación de fase por pendiente generado a partir del modelo digital de elevación (DEM).

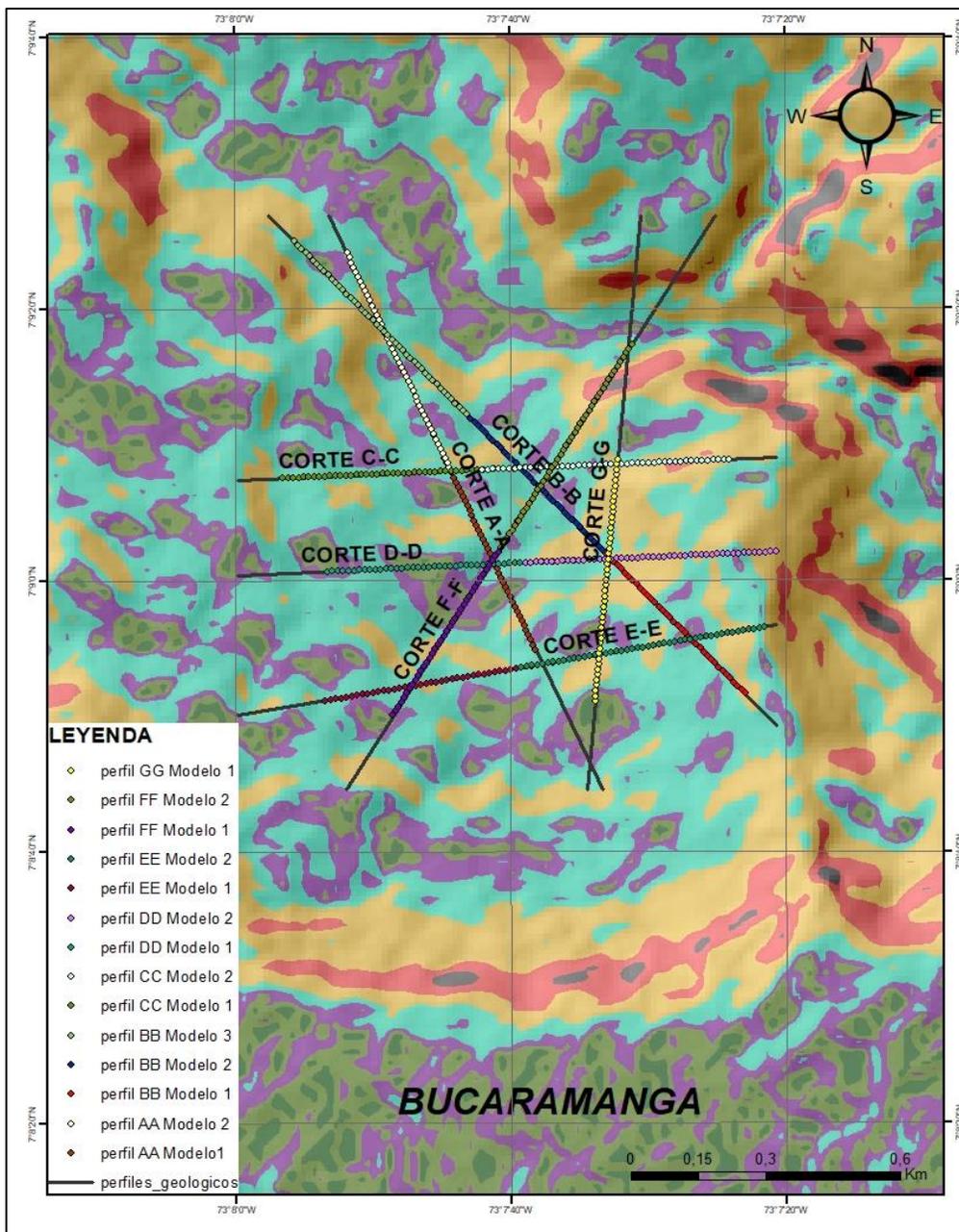


Figura 13. Localización de los perfiles geológicos y modelos sintéticos geoelectricos en el área de estudio, base del mapa modelo de clasificación de fase por pendiente a partir del modelo digital de elevación (DEM).

5.2 Definición de Parámetros

Se realizaron 1.722 pruebas sintéticas, para definir la configuración apropiada para la toma de datos en campo y los parámetros correspondientes a utilizar en el proceso de inversión de los mismos.

Para cada modelo sintético se genera el modelado del forward utilizando el método de elementos finitos y el número de divisiones de la malla 4 para las configuraciones Dipolo-Dipolo, Schlumberger y Wenner-Schlumberger.

En la figura 14 se muestra el modelado del forward del perfil AA-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

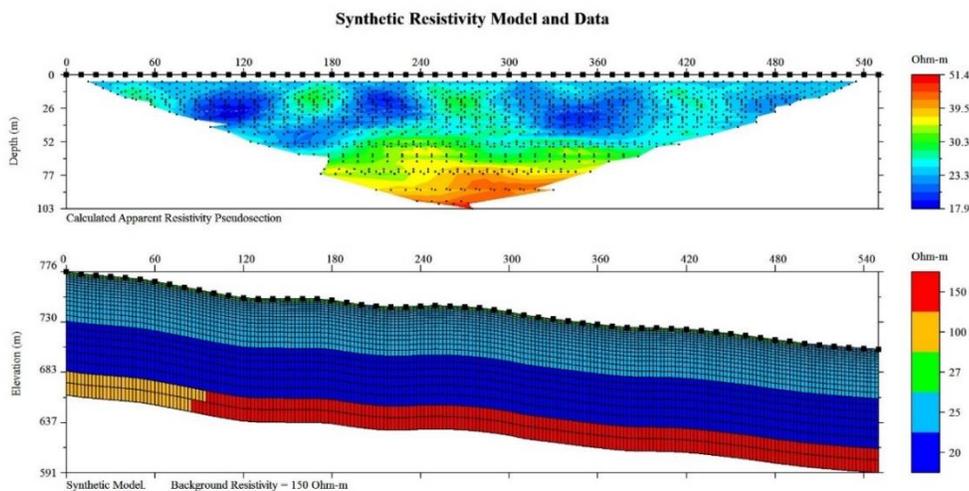


Figura 14. Modelado del forward del perfil AA-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 15 se muestra el modelado del forward del perfil AA-modelo1 de la configuración Schlumberger.

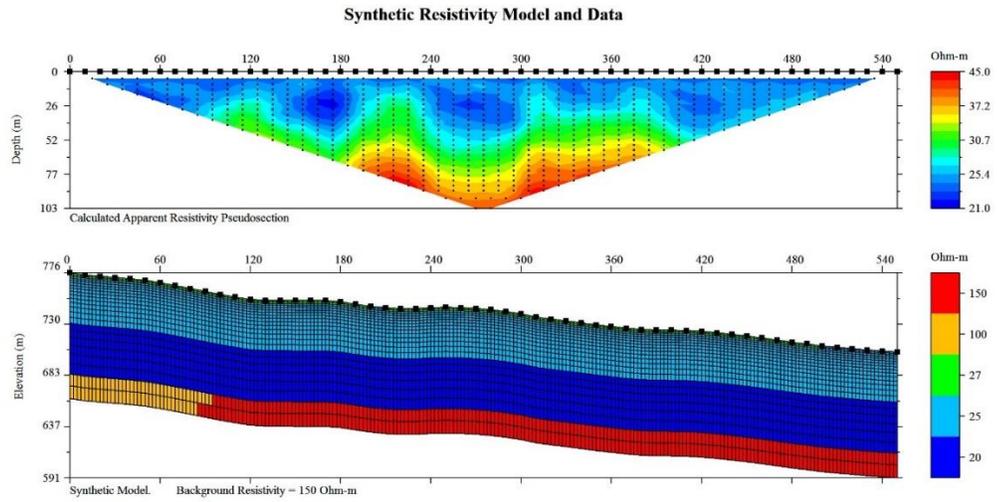


Figura 15. Modelado del forward del perfil AA-modelo1 de la configuración Schlumberger.

En la figura 16 se muestra el modelado del forward del perfil AA-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

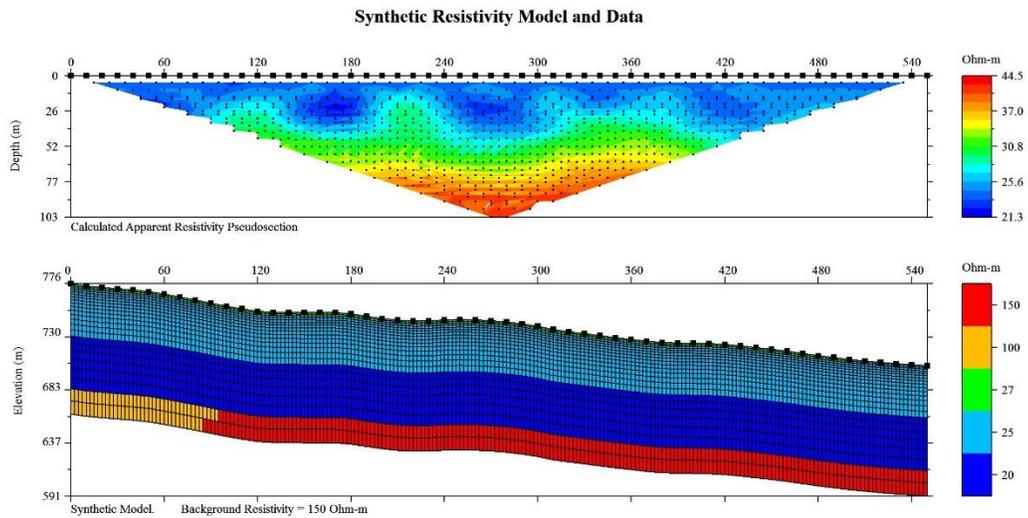


Figura 16. Modelado del forward del perfil AA-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 17 se muestra el modelado del forward del perfil AA-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

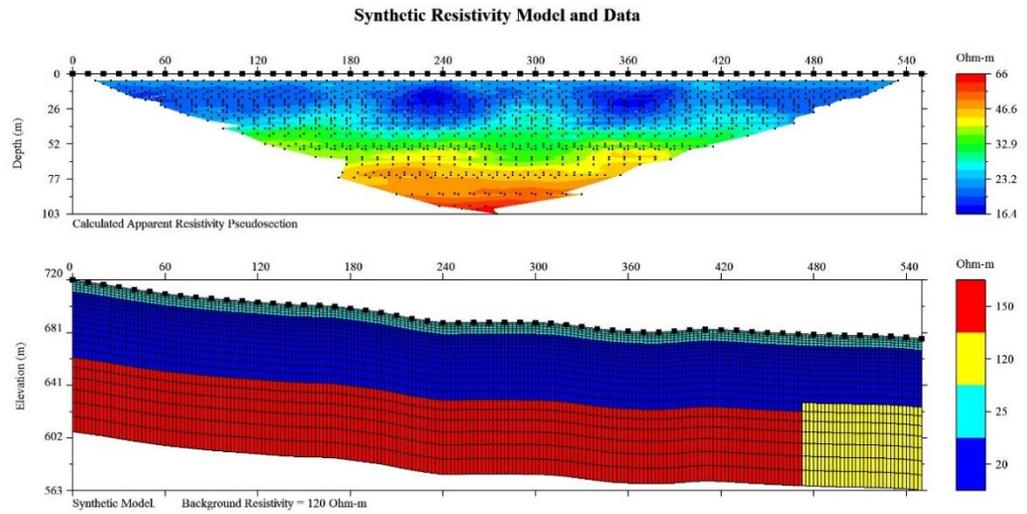


Figura 17. Modelado del forward del perfil AA-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 18 se muestra el modelado del forward del perfil AA-modelo2 de la configuración Schlumberger.

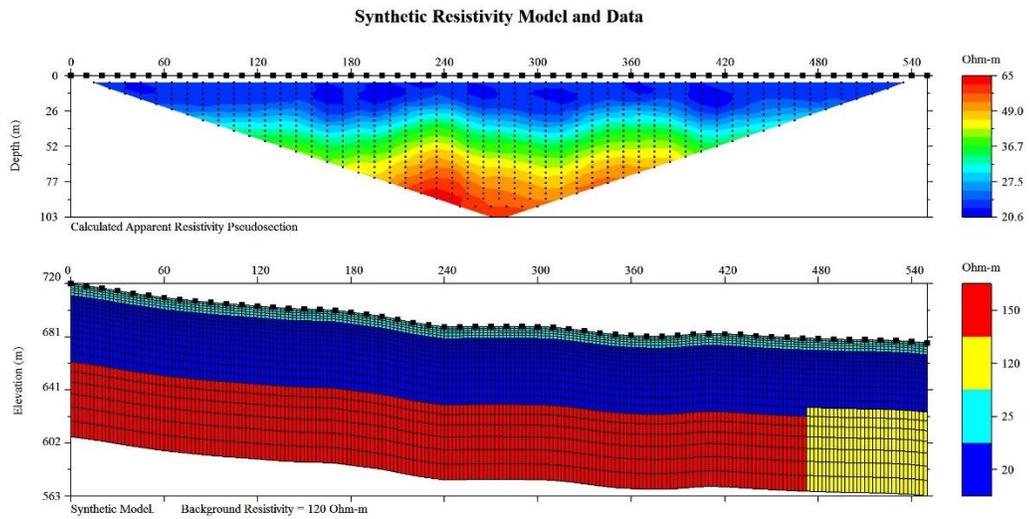


Figura 18. Modelado del forward del perfil AA-modelo2 de la configuración Schlumberger.

En la figura 19 se muestra el modelado del forward del perfil AA-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

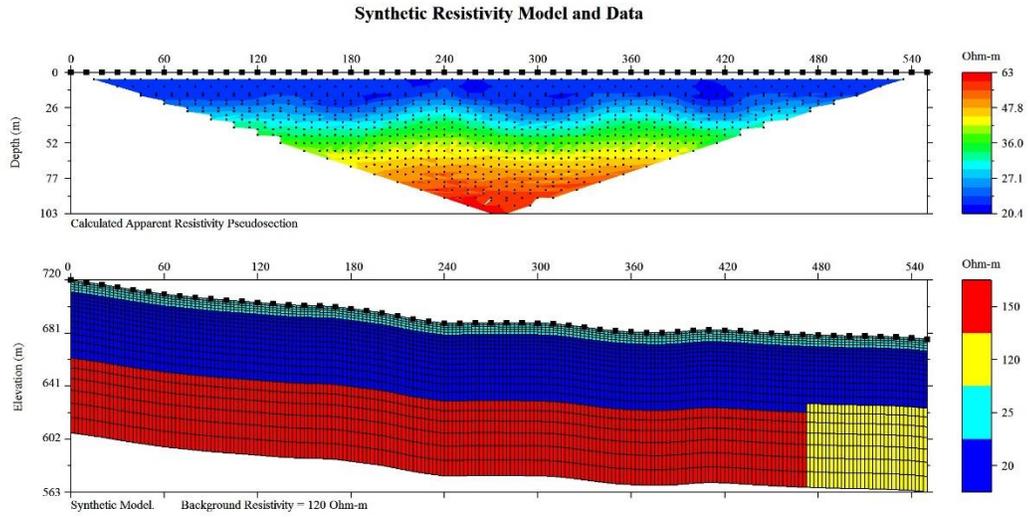


Figura 19. Modelado del forward del perfil AA-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 20 se muestra el modelado del forward del perfil BB-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

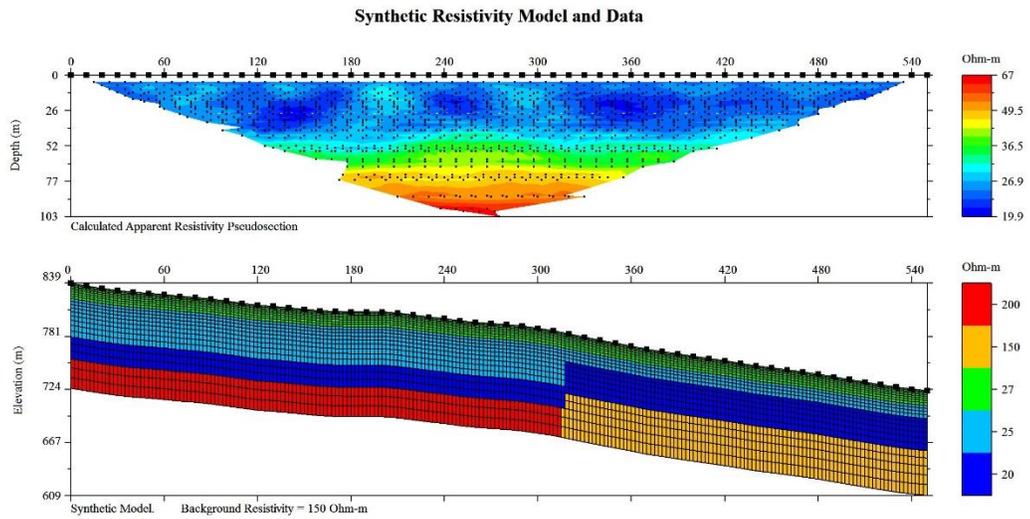


Figura 20. Modelado del forward del perfil BB-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 21 se muestra el modelado del forward del perfil BB-modelo1 de la configuración Schlumberger.

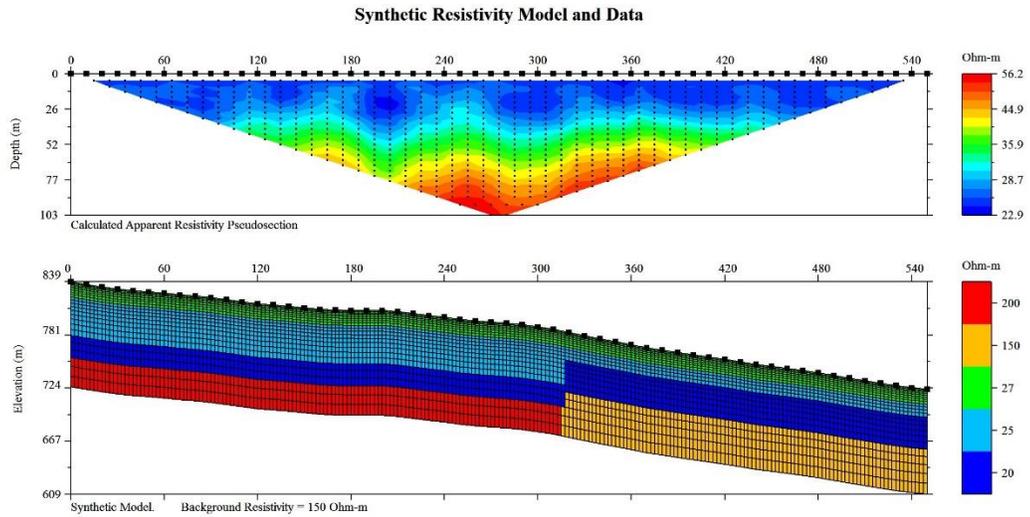


Figura 21. Modelado del forward del perfil BB-modelo1 de la configuración Schlumberger.

En la figura 22 se muestra el modelado del forward del perfil BB-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

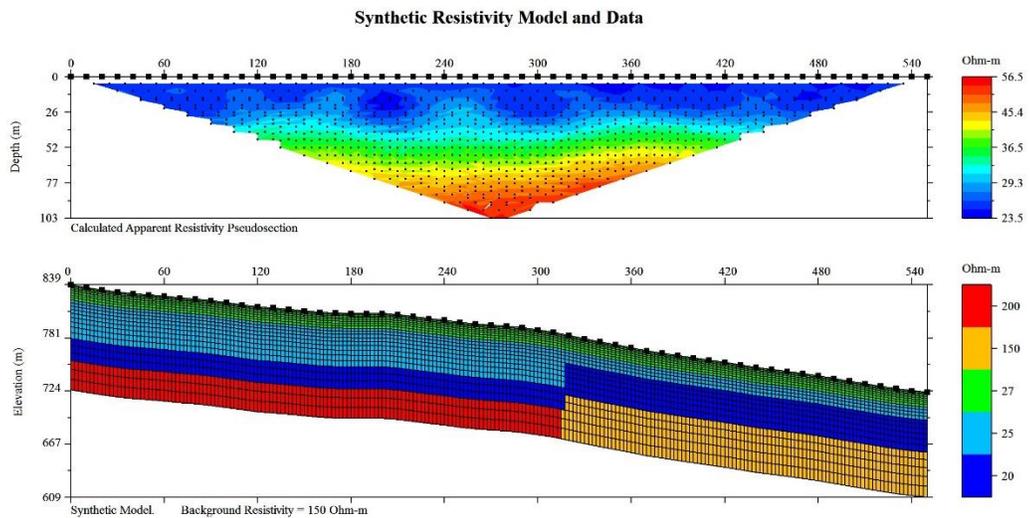


Figura 22. Modelado del forward del perfil BB-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 23 se muestra el modelado del forward del perfil BB-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

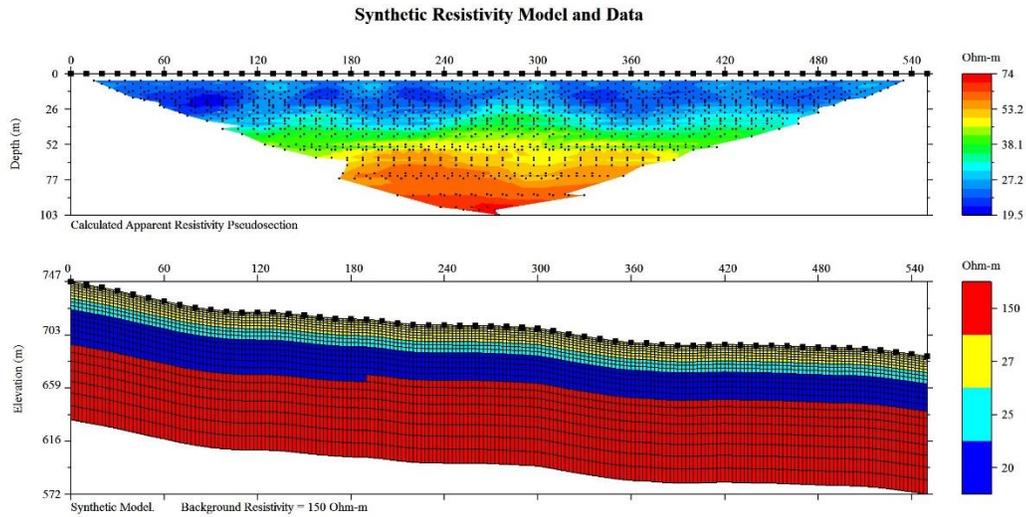


Figura 23. Modelado del forward del perfil BB-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 24 se muestra el modelado del forward del perfil BB-modelo2 de la configuración Schlumberger.

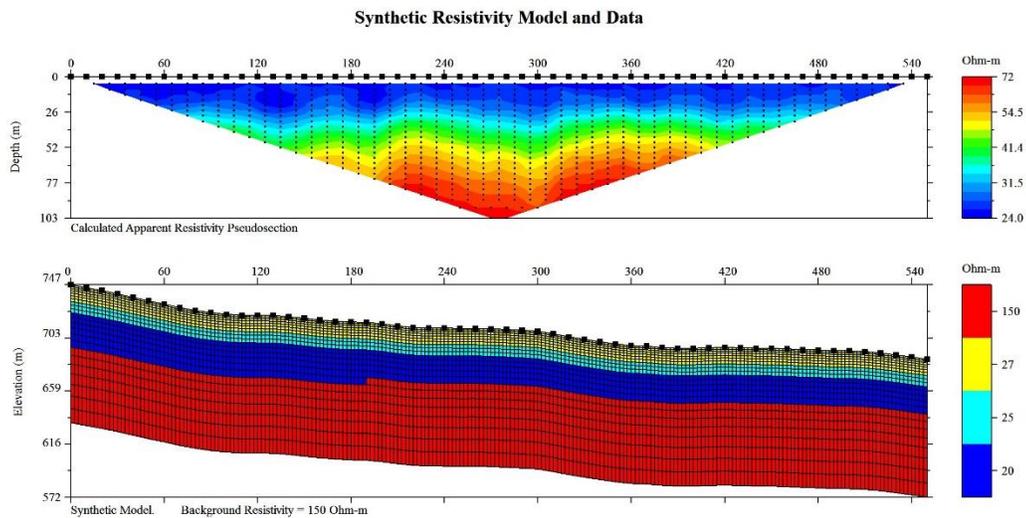


Figura 24. Modelado del forward del perfil BB-modelo2 de la configuración Schlumberger.

En la figura 25 se muestra el modelado del forward del perfil BB-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

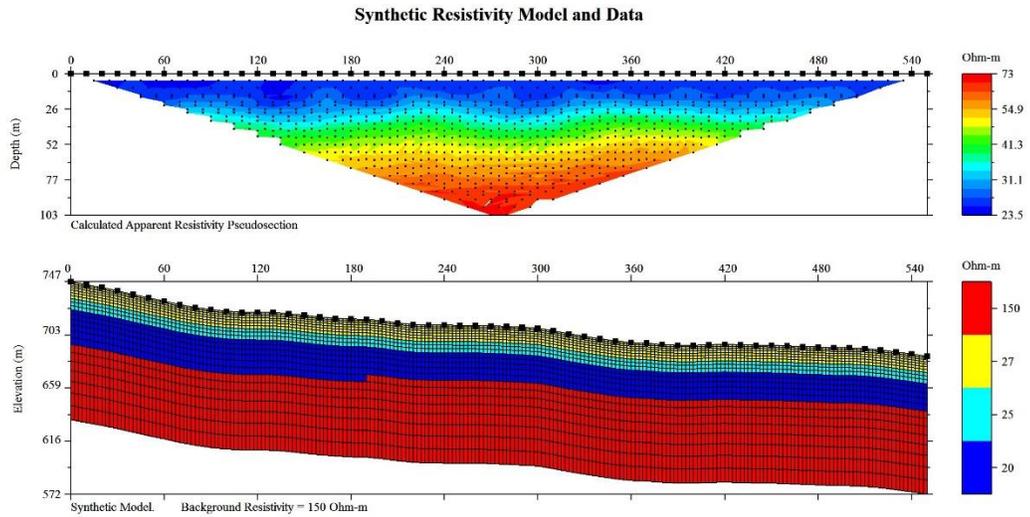


Figura 25. Modelado del forward del perfil BB-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 26 se muestra el modelado del forward del perfil BB-modelo3 de la configuración Dipolo-Dipolo.

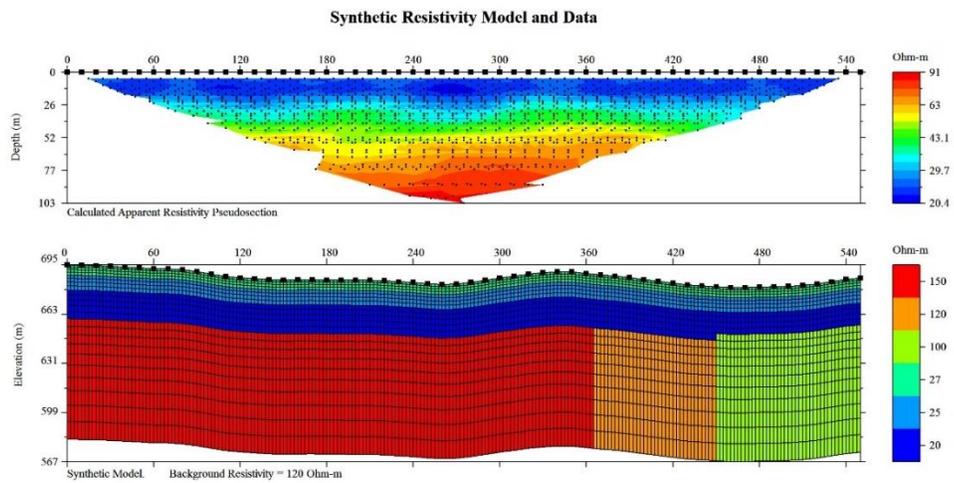


Figura 26. Modelado del forward del perfil BB-modelo3 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 27 se muestra el modelado del forward del perfil BB-modelo3 de la configuración Schlumberger.

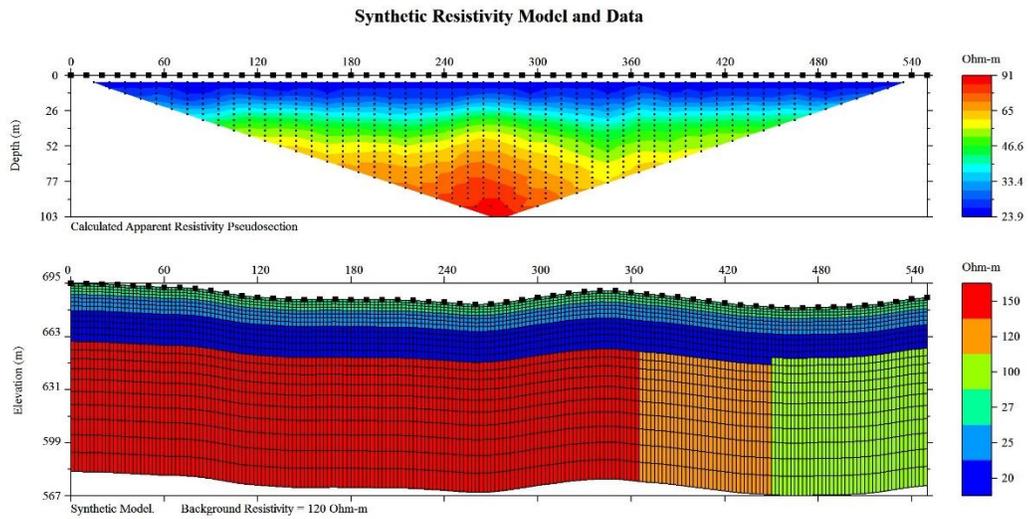


Figura 27. Modelado del forward del perfil BB-modelo3 de la configuración Schlumberger.

En la figura 28 se muestra el modelado del forward del perfil BB-modelo3 de la configuración Wenner-Schlumberger.

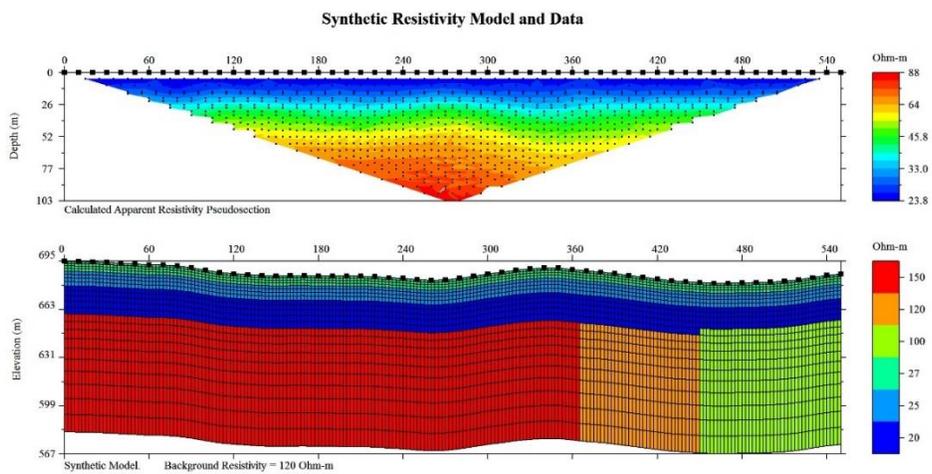


Figura 28. Modelado del forward del perfil BB-modelo3 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 29 se muestra el modelado del forward del perfil CC-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

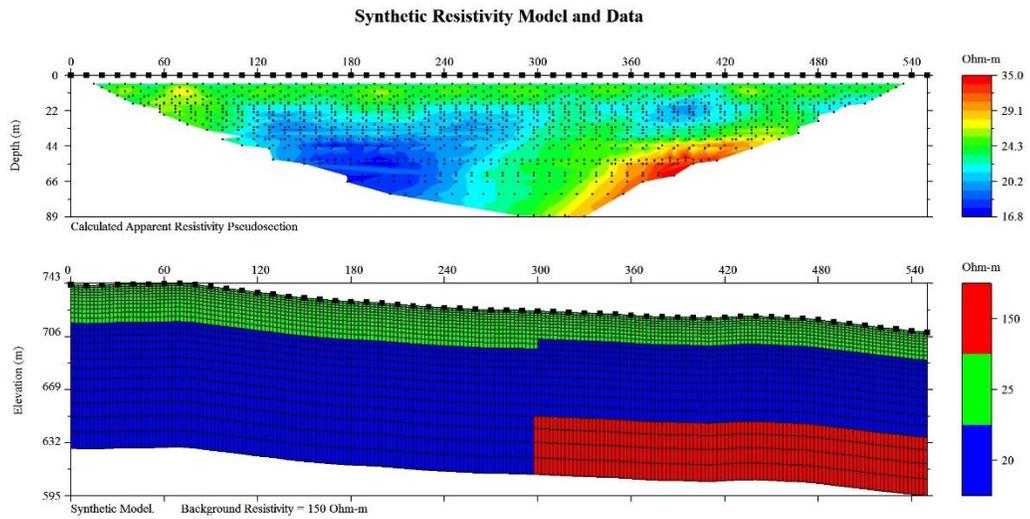


Figura 29. Modelado del forward del perfil CC-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 30 se muestra el modelado del forward del perfil CC-modelo1 de la configuración Schlumberger.

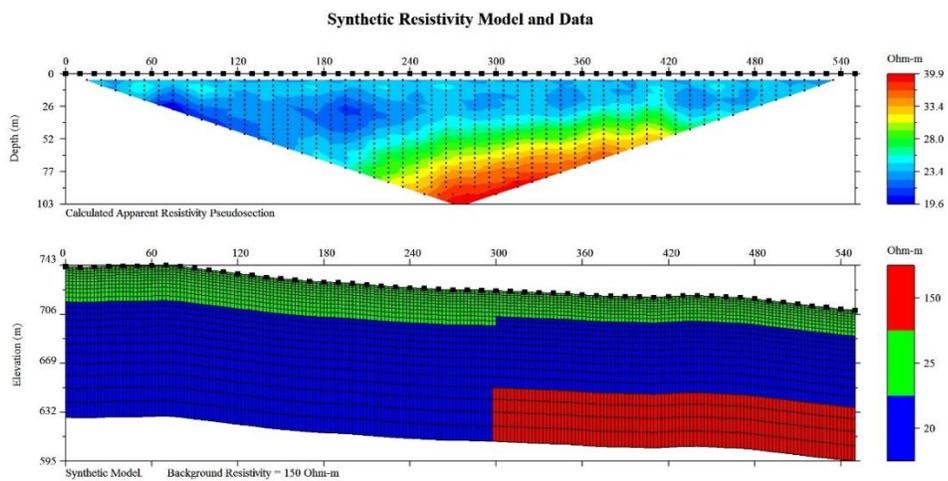


Figura 30. Modelado del forward del perfil CC-modelo1 de la configuración Schlumberger.

En la figura 31 se muestra el modelado del forward del perfil CC-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

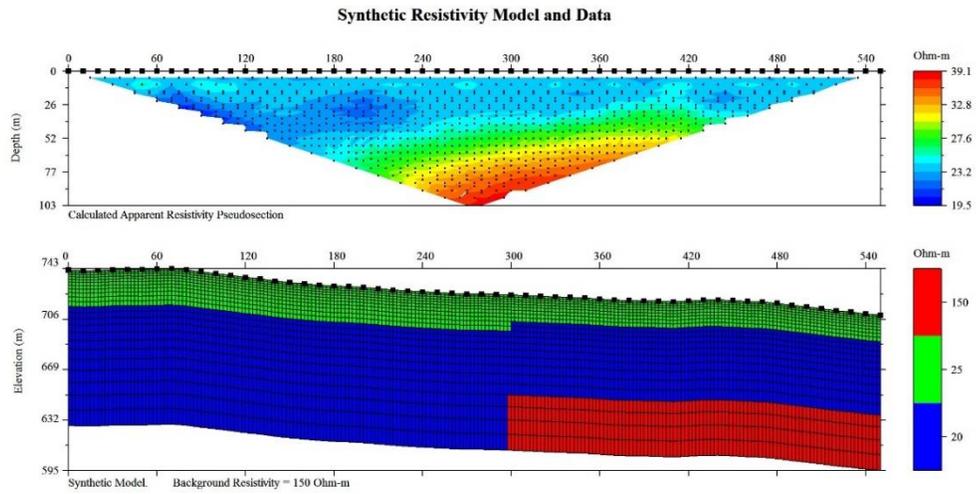


Figura 31. Modelado del forward del perfil CC-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 32 se muestra el modelado del forward del perfil CC-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

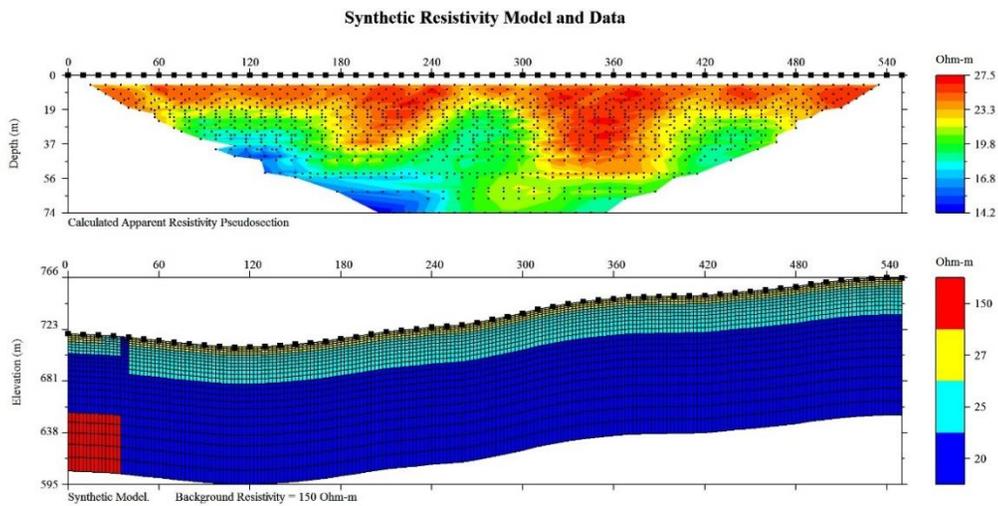


Figura 32. Modelado del forward del perfil CC-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 33 se muestra el modelado del forward del perfil CC-modelo2 de la configuración Schlumberger.

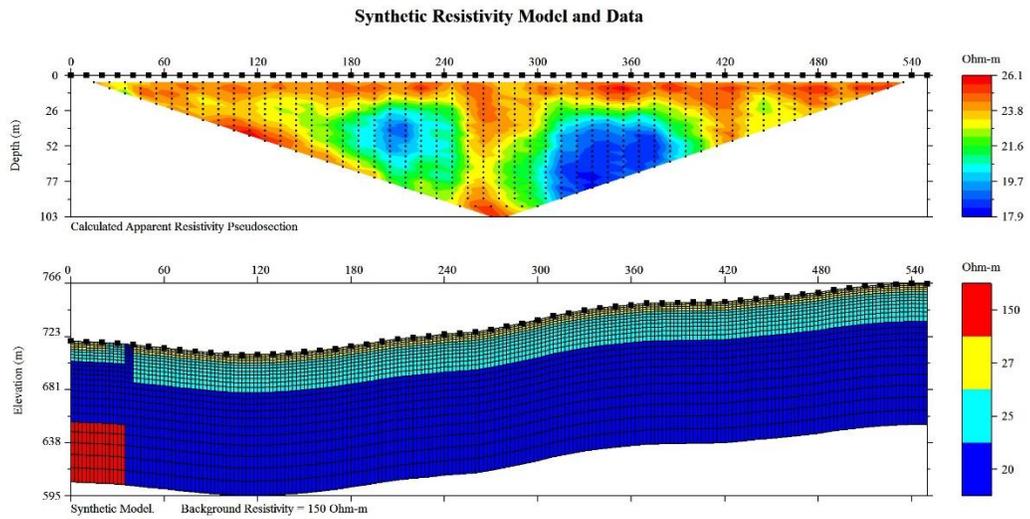


Figura 33. Modelado del forward del perfil CC-modelo2 de la configuración Schlumberger.

En la figura 34 se muestra el modelado del forward del perfil CC-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

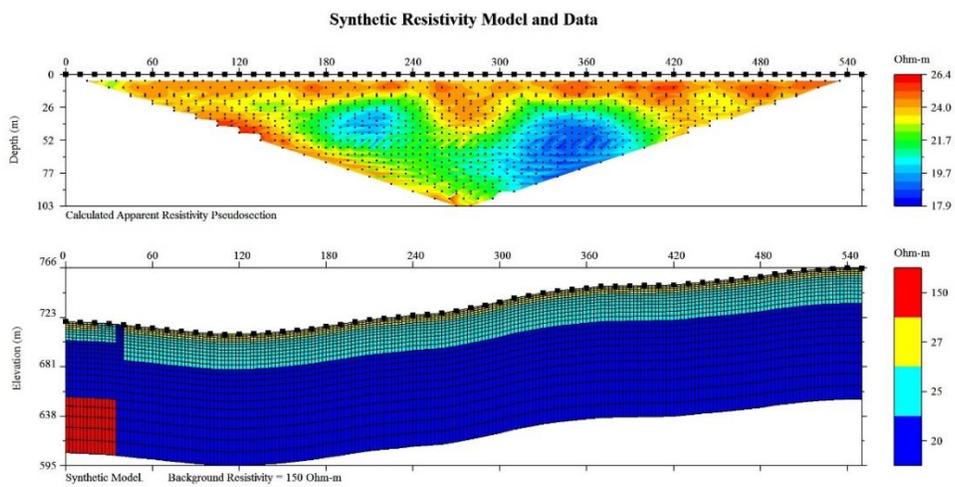


Figura 34. Modelado del forward del perfil CC-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 35 se muestra el modelado del forward del perfil DD-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

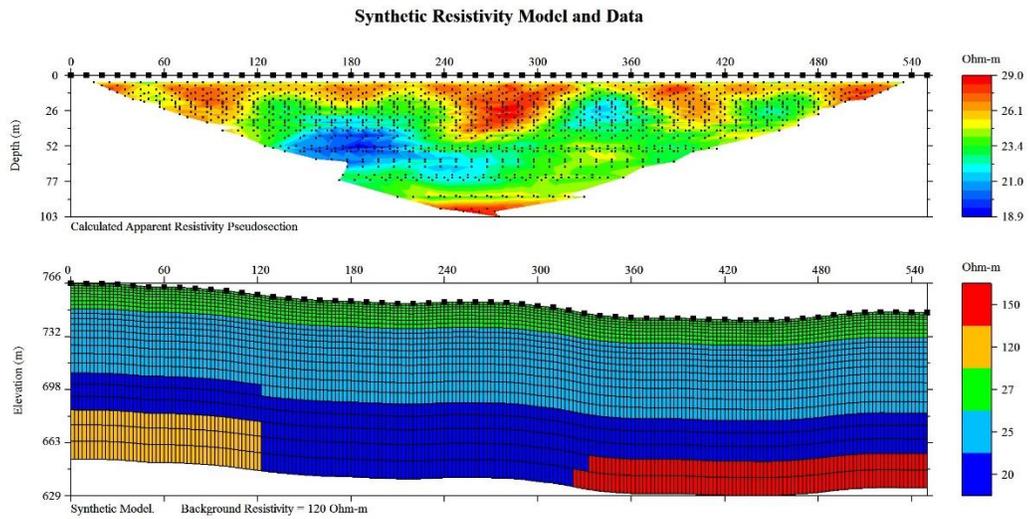


Figura 35. Modelado del forward del perfil DD-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 36 se muestra el modelado del forward del perfil DD-modelo1 de la configuración Schlumberger.

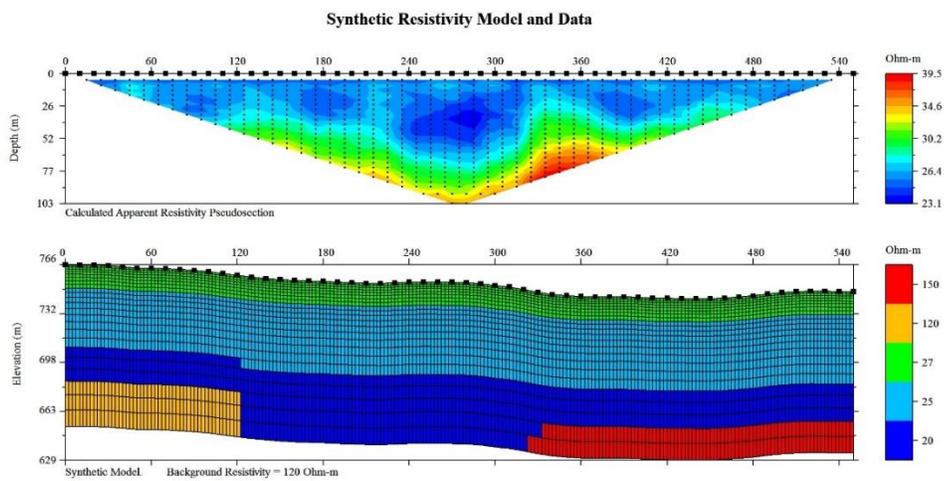


Figura 36. Modelado del forward del perfil DD-modelo1 de la configuración Schlumberger.

En la figura 37 se muestra el modelado del forward del perfil DD-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

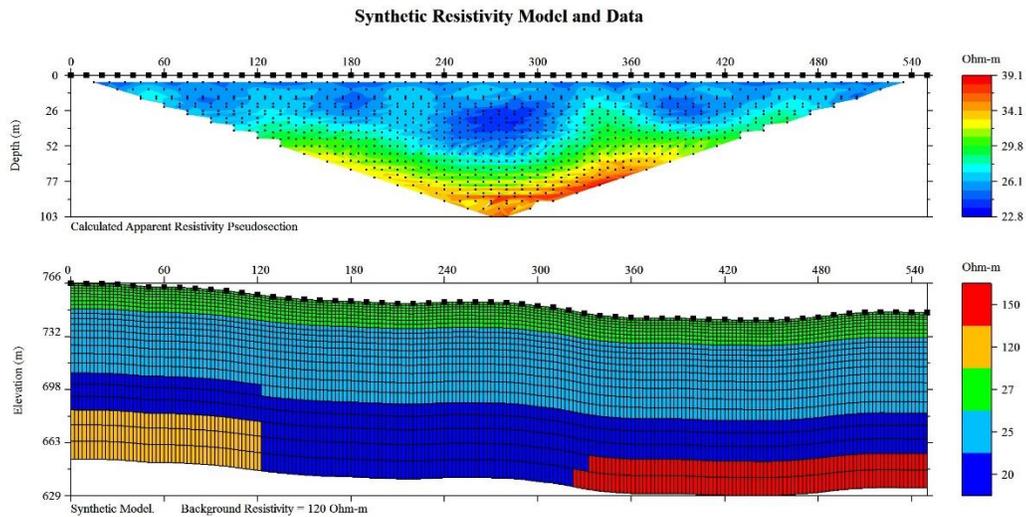


Figura 37. Modelado del forward del perfil DD-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 38 se muestra el modelado del forward del perfil DD-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

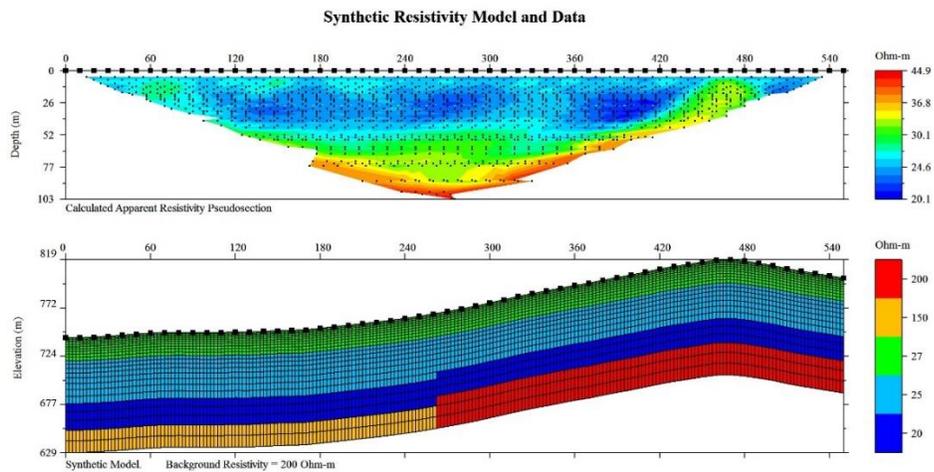


Figura 38. Modelado del forward del perfil DD-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 39 se muestra el modelado del forward del perfil DD-modelo2 de la configuración Schlumberger.

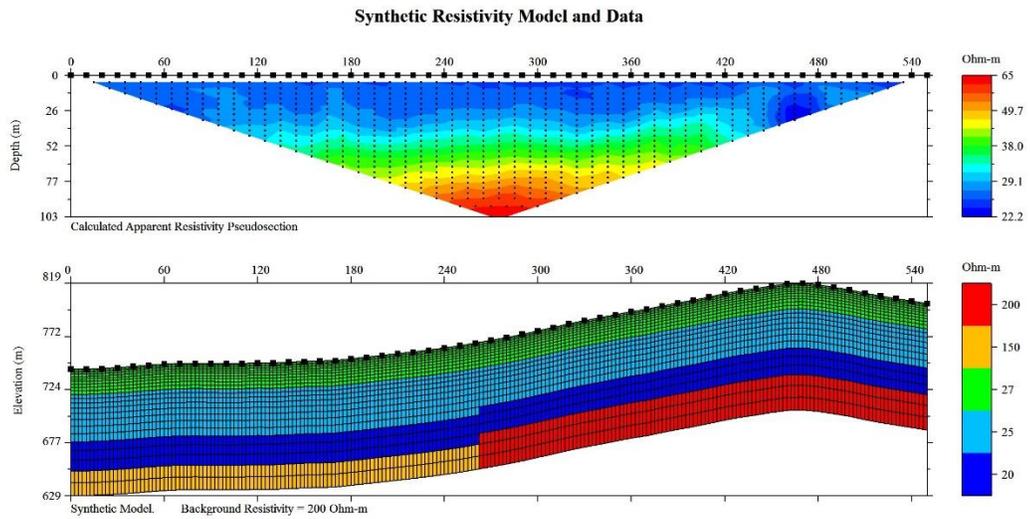


Figura 39. Modelado del forward del perfil DD-modelo2 de la configuración Schlumberger.

En la figura 40 se muestra el modelado del forward del perfil DD-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

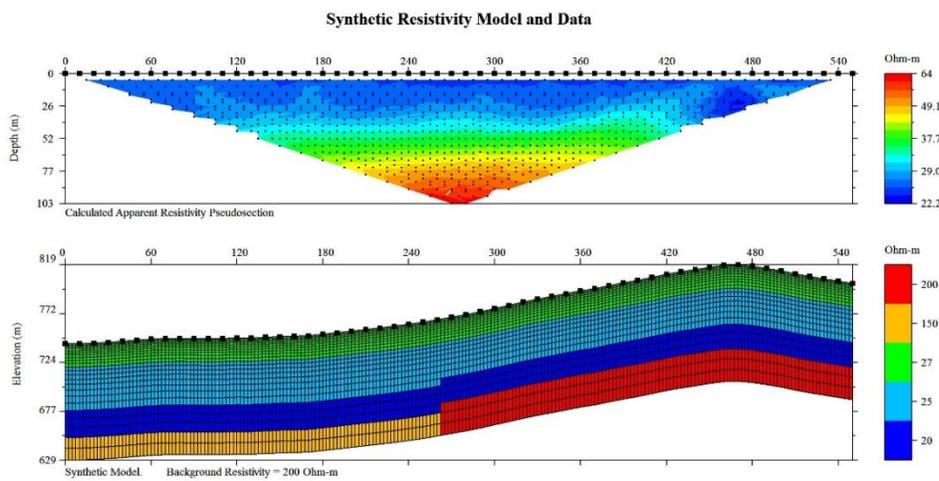


Figura 40. Modelado del forward del perfil DD-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 41 se muestra el modelado del forward del perfil EE-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

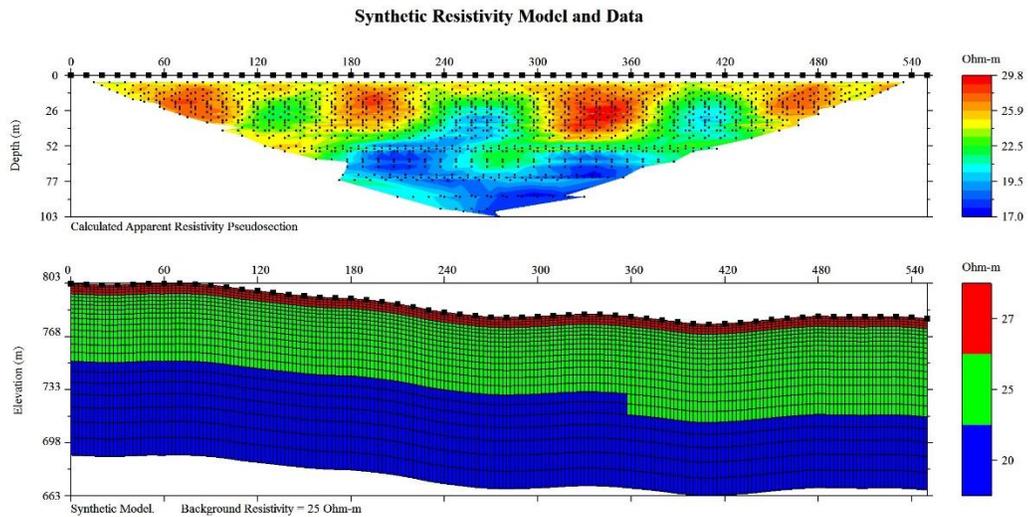


Figura 41. Modelado del forward del perfil EE-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 42 se muestra el modelado del forward del perfil EE-modelo1 de la configuración Schlumberger.

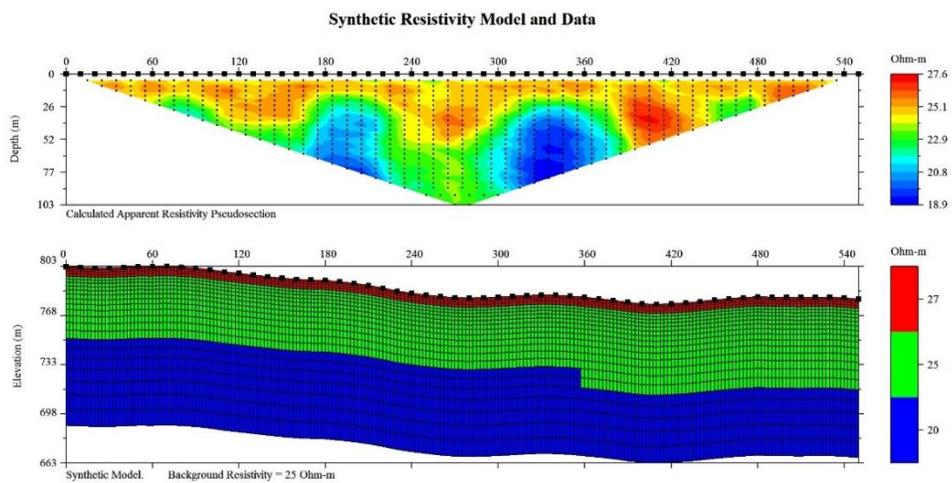


Figura 42. Modelado del forward del perfil EE-modelo1 de la configuración Schlumberger.

En la figura 43 se muestra el modelado del forward del perfil EE-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

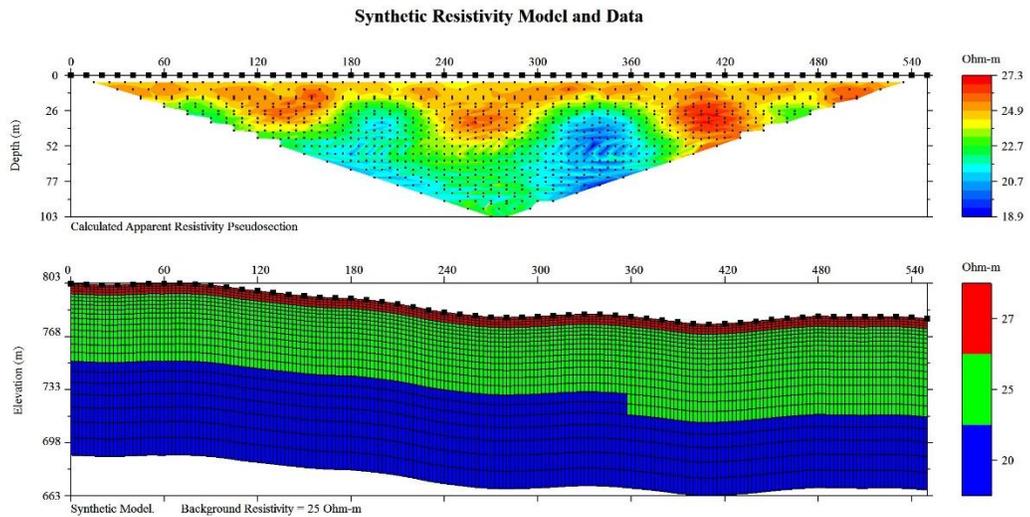


Figura 43. Modelado del forward del perfil EE-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 44 se muestra el modelado del forward del perfil EE-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

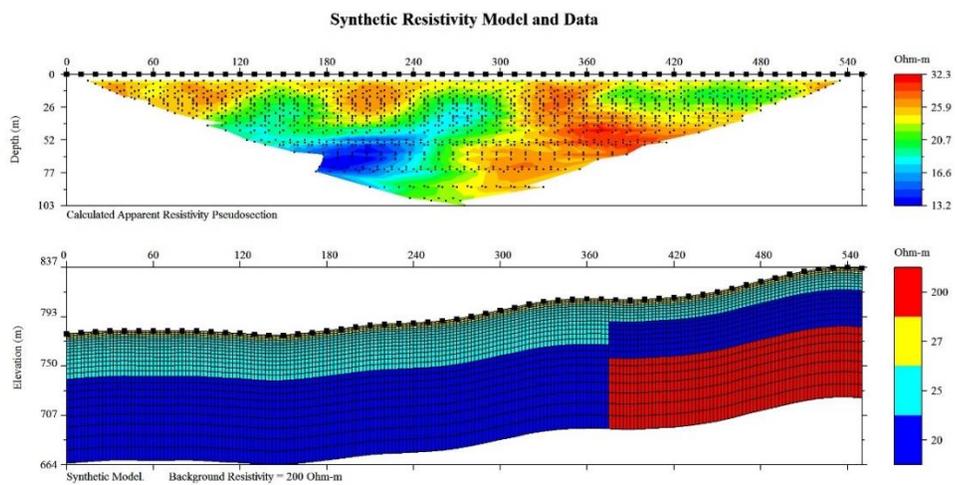


Figura 44. Modelado del forward del perfil EE-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 45 se muestra el modelado del forward del perfil EE-modelo2 de la configuración Schlumberger.

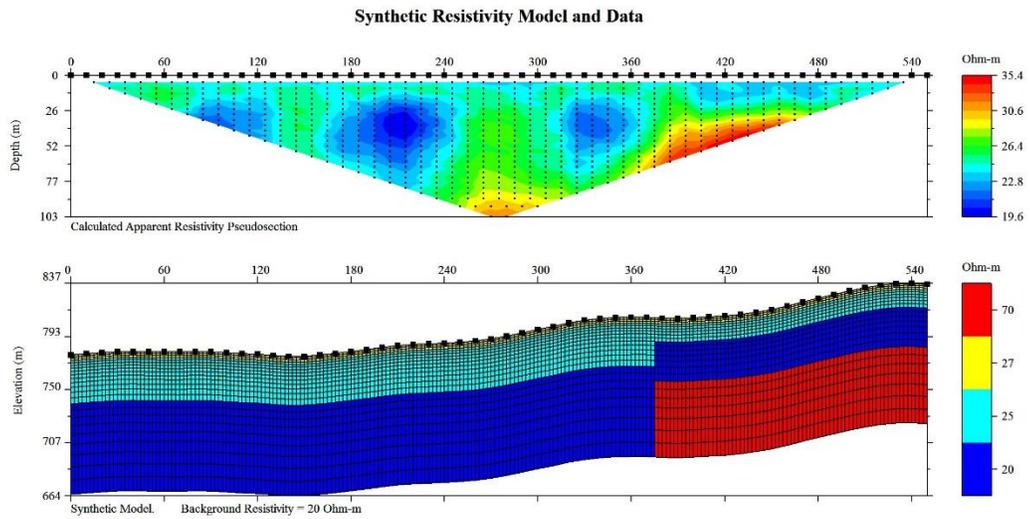


Figura 45. Modelado del forward del perfil EE-modelo2 de la configuración Schlumberger.

En la figura 46 se muestra el modelado del forward del perfil EE-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

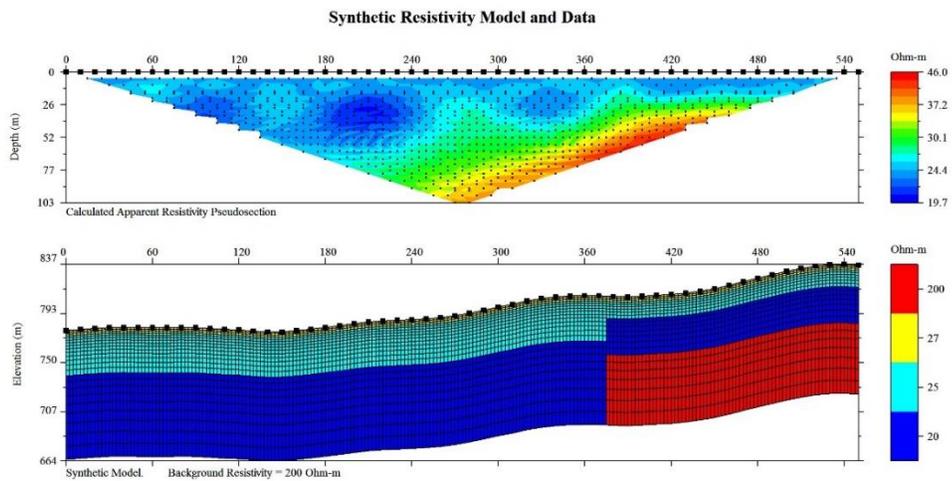


Figura 46. Modelado del forward del perfil EE-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 47 se muestra el modelado del forward del perfil FF-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

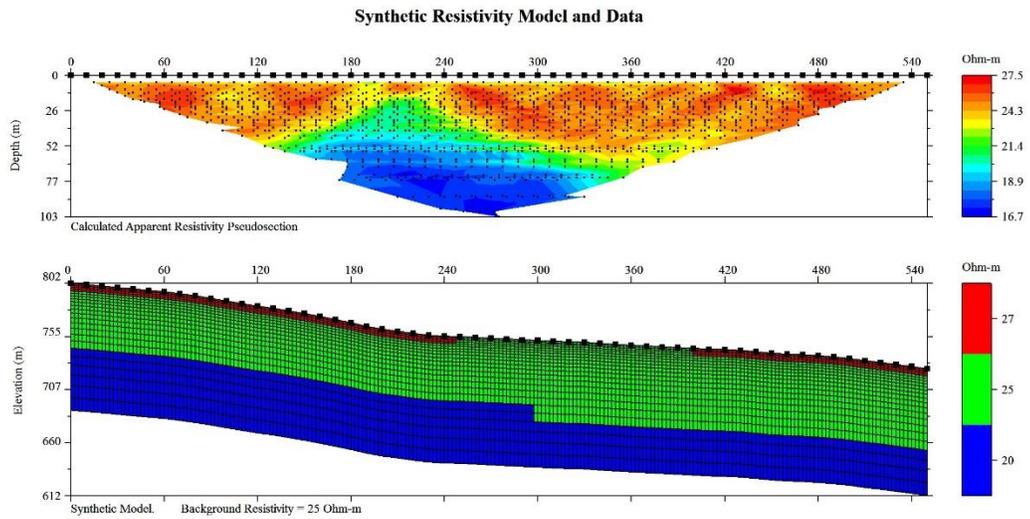


Figura 47. Modelado del forward del perfil FF-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 48 se muestra el modelado del forward del perfil FF-modelo1 de la configuración Schlumberger.

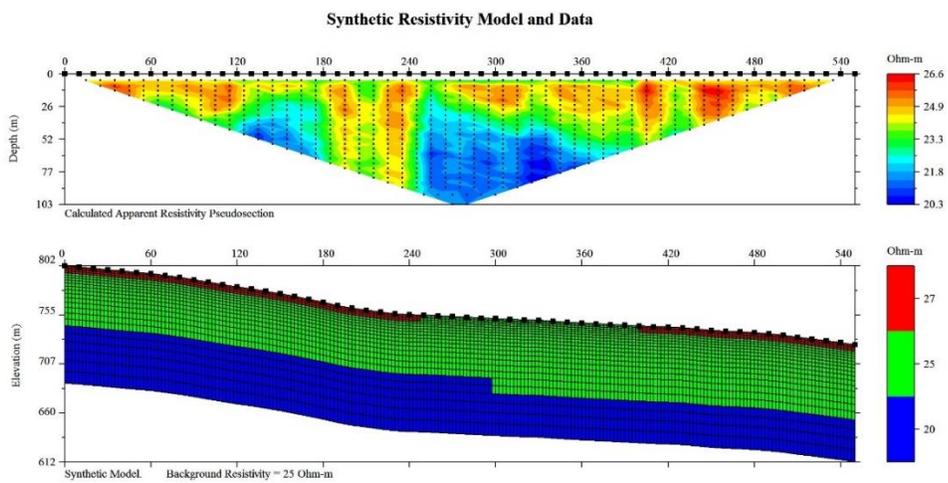


Figura 48. Modelado del forward del perfil FF-modelo1 de la configuración Schlumberger.

En la figura 49 se muestra el modelado del forward del perfil FF-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

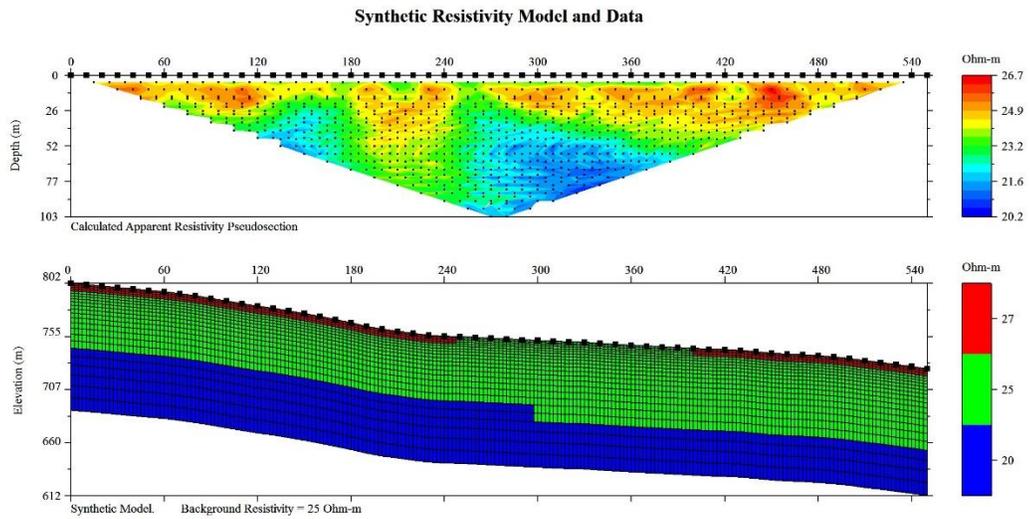


Figura 49. Modelado del forward del perfil FF-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 50 se muestra el modelado del forward del perfil FF-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

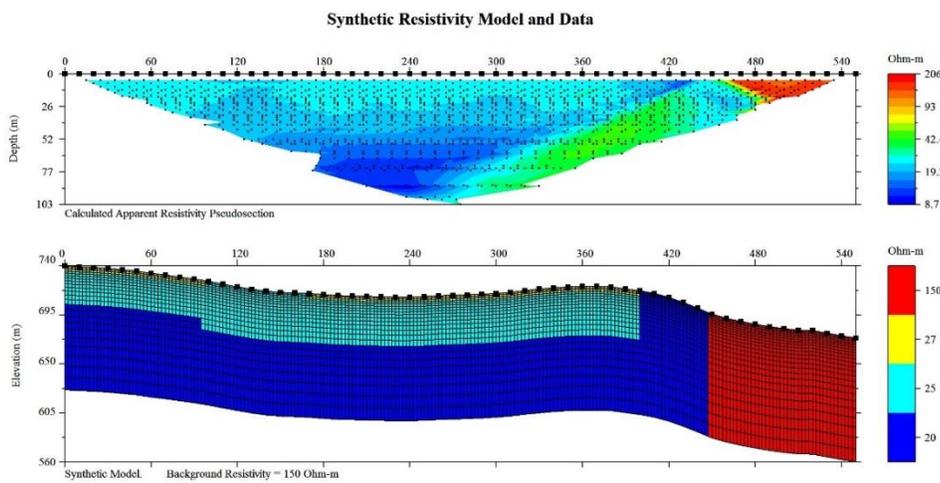


Figura 50. Modelado del forward del perfil FF-modelo2 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 51 se muestra el modelado del forward del perfil FF-modelo2 de la configuración Schlumberger.

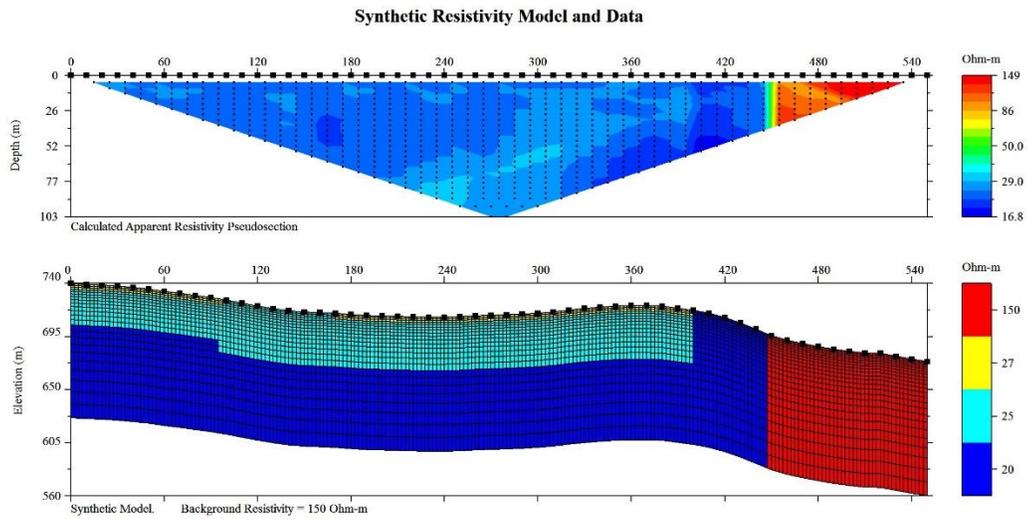


Figura 51. Modelado del forward del perfil FF-modelo2 de la configuración Schlumberger.

En la figura 52 se muestra el modelado del forward del perfil FF-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

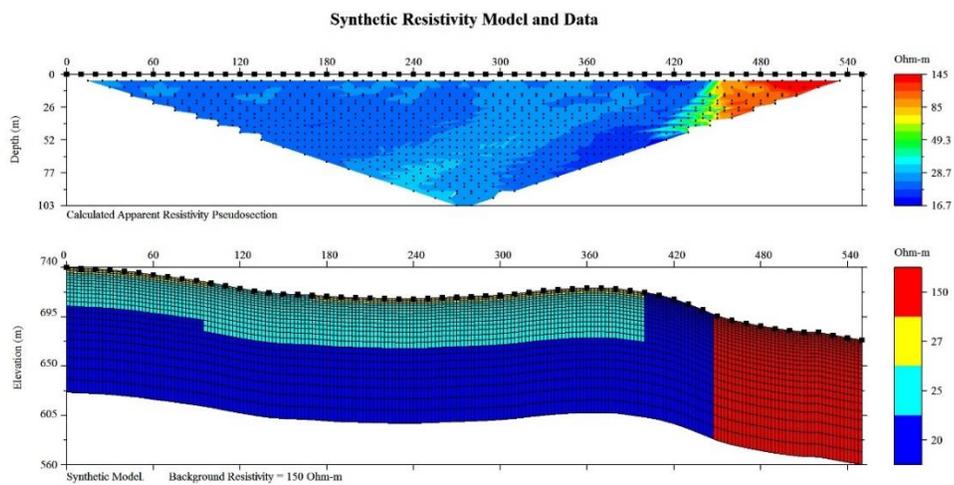


Figura 52. Modelado del forward del perfil FF-modelo2 de la configuración Wenner-Schlumberger.

En la figura 53 se muestra el modelado del forward del perfil GG-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

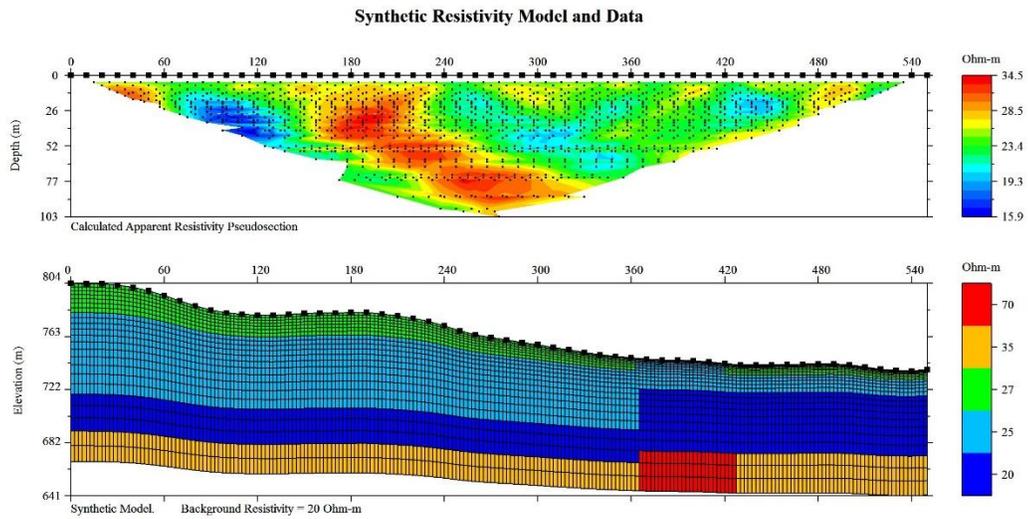


Figura 53. Modelado del forward del perfil GG-modelo1 de la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 54 se muestra el modelado del forward del perfil GG-modelo1 de la configuración Schlumberger.

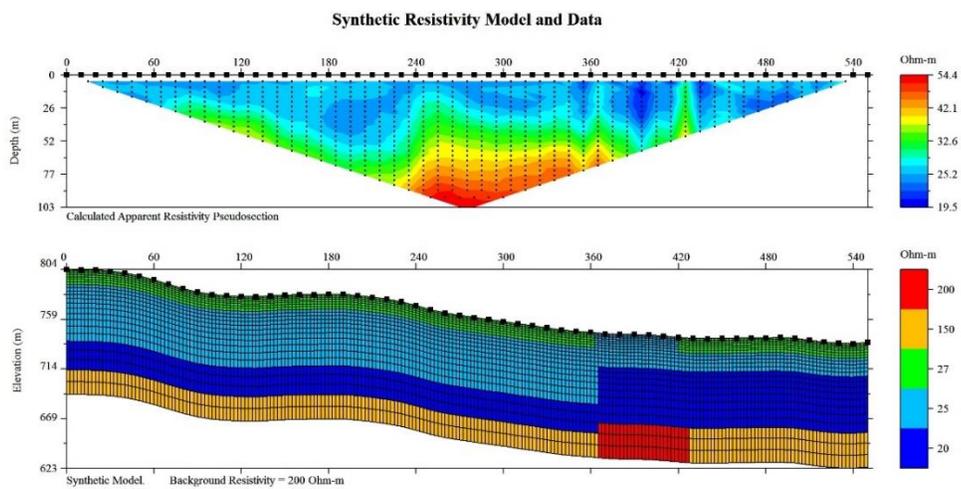


Figura 54. Modelado del forward del perfil GG-modelo1 de la configuración Schlumberger.

En la figura 55 se muestra el modelado del forward del perfil GG-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

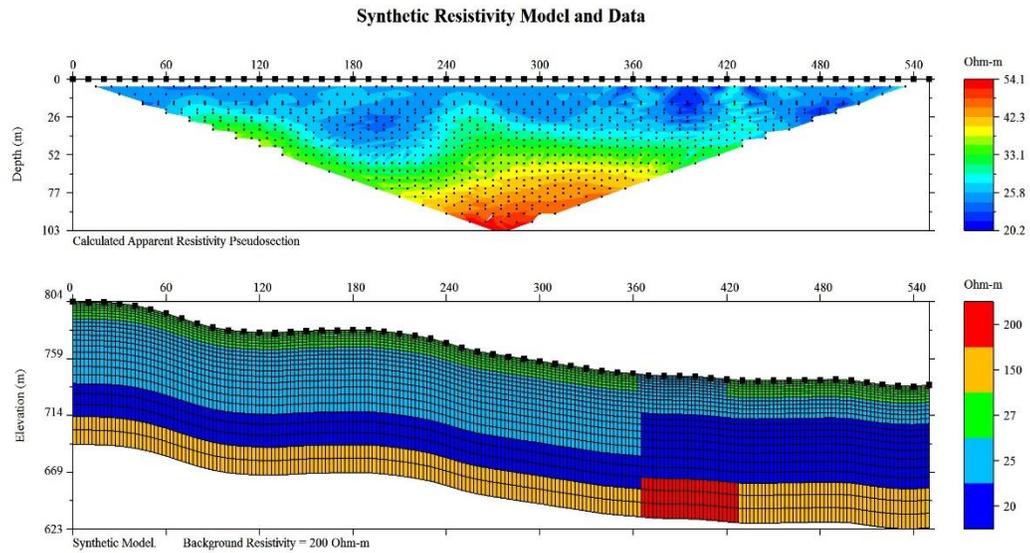


Figura 55. Modelado del forward del perfil GG-modelo1 de la configuración Wenner-Schlumberger.

El módulo de inversión de los datos del software AGI Earthimager 2D cuenta con una serie de parámetros que pueden ser modificados por el usuario.

Para el proceso de inversión de los datos sintéticos se emplearon con base al manual de usuario del programa para mediciones de tomografía eléctrica (Advanced Geosciences, 2009) como parámetros iniciales los siguientes valores. Tabla 3.

Tabla 3.

Parámetros iniciales para el proceso de inversión de los datos sintéticos.

PARÁMETROS INICIALES		
CONFIGURACIÓN	DAMPING	NUMERO DE ITERACIONES
Dipolo-Dipolo	0.5-3-7-10	5-10-15-20
Schlumberger	0.5-3-7-10	5-10-15-20
Wenner-Schlumberger	0.5-3-7-10	5-10-15-20

En el primer filtro se realizaron 672 pruebas correspondientes a todas las combinaciones posibles de los parámetros iniciales de los 14 modelos. Se selecciona la combinación de parámetros con la que se obtiene menor error para cada configuración. En la figura 56 se observa la combinación de parámetros obtenida para el perfil AA-modelo 1 en la configuración Dipolo-Dipolo.

```

10
11 - clear all; close all; clc;
12
13 % Nombre de la carpeta para cada configuracion:
14 % DD->Dipolo-Dipolo; SCH-> Schlumberger; WEN-SCH-> Wenner-Schlumberger
15 Config_folder = 'DD';
16
17 % Nombre de la carpeta para cada filtro
18 Filtro_folder = 'filtro_1';
19
20 % Valores limites para la escala de colores de la resistividad
21 rho_min = 0.0;
22 rho_max = 150.0;
23
24 fprintf(' \n');
25 fprintf(' ***** \n');
26 fprintf(' * * * * * \n');
27 fprintf(' * Iniciando Programa Parametros.m * \n');

```

Command Window

Modelo con menor error: 01-50520.dat
 Porcentaje de error Ponderado: 12.586225

 * * * * *
 * Programa Parametros.m Finalizado. *

Figura 56. Combinación de parámetros obtenida (cuadro rojo) para el perfil AA-modelo 1 en la configuración Dipolo-Dipolo.

En la figura 57 se muestran los tres modelos: Mejor modelo invertido, error, y modelo objetivo del perfil AA-modelo 1 en la configuración Dipolo-Dipolo.

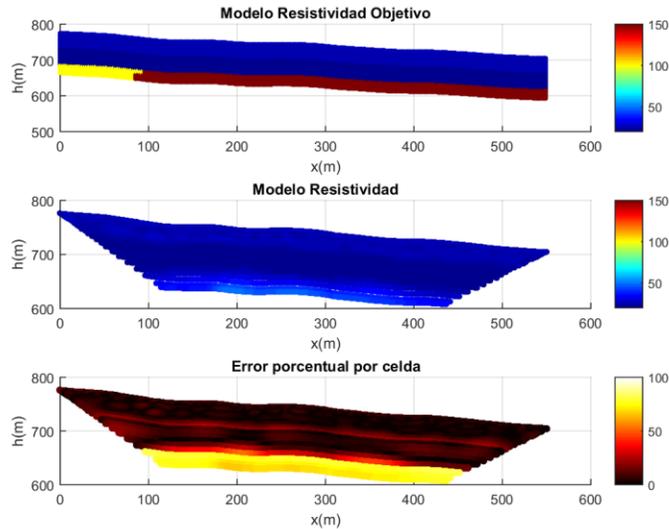


Figura 57. Mejor modelo invertido, error, y modelo objetivo del perfil AA-modelo 1 en la configuración Dipolo-Dipolo del primer filtro.

A partir de este resultado se genera un nuevo grupo de parámetros para cada modelo, tomando valores alrededor de los obtenidos en el resultado de cada modelo. Tabla 4. (Inversión multiescala).

Tabla 4.

Nuevo grupo de parámetros para el proceso de inversión de los datos sintéticos del perfil AA-Modelo 1.

PARÁMETROS PERFIL AA-MODELO 1		
CONFIGURACIÓN	DAMPING	NUMERO DE ITERACIONES
Dipolo-Dipolo	0.3-0.4-0.5-0.6-0.7	3-4-5-6-7
Schlumberger	0.3-0.4-0.5-0.6-0.7	18-19-20-21-22
Wenner-Schlumberger	0.3-0.4-0.5-0.6-0.7	18-19-20-21-22

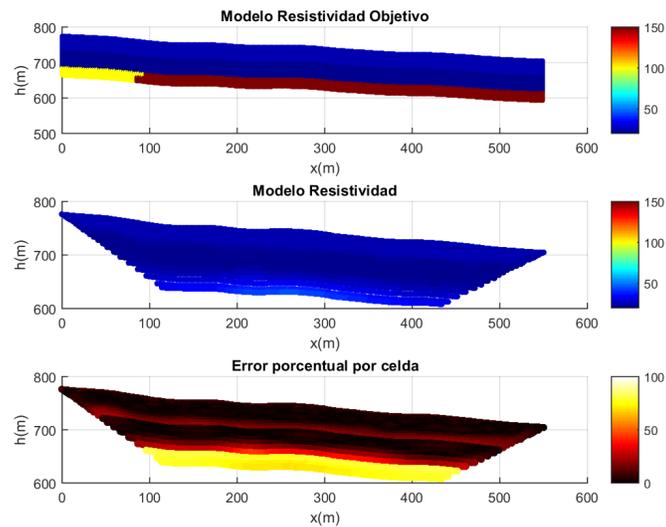


Figura 59. Mejor modelo invertido, error, y modelo objetivo del perfil AA-modelo 1 en la configuración Dipolo-Dipolo del segundo filtro.

Una vez desarrolladas todas las pruebas y seleccionada la configuración y parámetros de menor error entre el modelo objetivo y el mejor modelo invertido, se realizó la adquisición de datos en campo de las tomografías eléctricas con un equipo Supersting R8 fabricado por la empresa Advanced Geosciences, Inc., (AGI) con 56 electrodos y una longitud máxima de 550m, de propiedad del Grupo Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas. Figura 60.



Figura 60. Equipo Supersting R8 fabricado por la empresa Advanced Geosciences, Inc., (AGI) con 56 electrodos, de propiedad del Grupo Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas.

Por tratarse de una zona urbana con asentamientos anormales en donde algunas de las casas y calles están distribuidas sin un orden específico, el acceso a los sectores constituyó un factor condicionante para la ubicación final de las tomografías.

Procedimiento para la realización del ensayo

- ✓ Definición del punto de inicio de la línea.
- ✓ Limpieza de la línea y fijación de las estacas generales o banderolas.
- ✓ Medición de la línea, Desde el punto de partida extender la cinta métrica a lo largo de la línea de trabajo marcada.
- ✓ Definición de longitud de la línea.
- ✓ Definición de espaciamiento entre electrodos.
- ✓ Colocación de electrodos en la línea planteada.
- ✓ Conexión entre cables y electrodos.
- ✓ Adecuación del sitio de trabajo.
- ✓ Se inicia la creación del proyecto en el equipo de medición.
- ✓ Configuración de los parámetros del equipo.

- ✓ Creación de la nueva estación.
- ✓ Adquisición de datos.
- ✓ Terminadas la adquisición de los datos se procede a recoger el equipo.

Para este estudio se tomaron 12 tomografías eléctricas distribuidas en el área de estudio como se muestra en la figura 61.

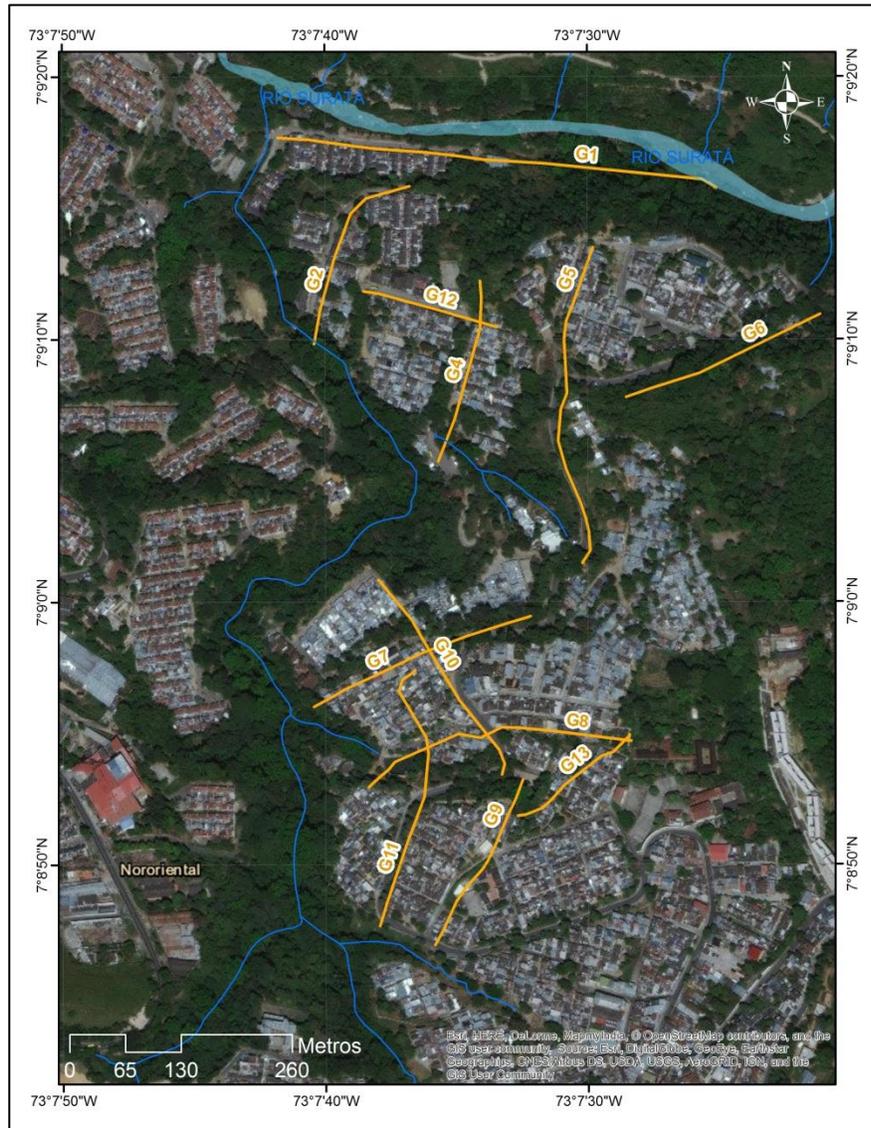


Figura 61. Tomografías eléctricas tomadas en campo distribuidas en el área de estudio.

Para el procesamiento de los datos tomados en campo se utilizan los parámetros obtenidos en el modelado sintético correspondiente. De este modo obtener los valores de resistividades reales del subsuelo en el área de estudio. Información utilizada para el estudio de AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL SECTOR NORTE DE BUCARAMANGA (BARRIOS LIZCANO, ESPERANZA III, MIRADOR, JOSE MARIA CORDOBA, VILLA HELENA, VILLA ROSA, VILLA MARÍA).

6. Resultados

En las tablas 5, 6 y 7 se muestran los parámetros con los que se obtiene el menor error entre el modelo objetivo y el mejor modelo invertido para las configuraciones Dipolo-Dipolo, Schlumberger, y Wenner-Schlumberger, generados en el primer y segundo filtro.

Tabla 5.

Resultados pruebas sintéticas primer y segundo filtro.

CONFIGURACIÓN	Perfil AA Modelo 1		Perfil AA Modelo 2		Perfil BB Modelo 1		Perfil BB Modelo 2		Perfil BB Modelo 3	
	Filtro 1	Filtro 2								
Modelo DD	01-0.5-5-5	01-0.7-5-7	1-0.5-5-20	1-0.5-5-22	1-0.5-5-20	1-0.4-5-22	1-0.5-5-20	1-0.3-5-22	1-0.5-5-20	1-0.3-5-20
Error-DD	12.20	12.13	19.07	18.68	16.23	16.48	19.75	19.50	22.63	22.90
Modelo SCH	03-0.5-5-20	3-0.7-5-22	3-0.5-5-15	3-0.3-5-17	3-0.5-5-20	3-0.4-5-19	3-7-5-10	3-8-5-9	3-10-5-5	3-10-5-7
Error SCH	16.47	15.45	21.39	20.64	20.78	20.65	21.05	20.74	26.52	26.11
Modelo WEN-SCH	2-0.5-5-20	2-0.4-5-22	2-0.5-5-20	2-0.3-5-21	2-0.5-5-20	2-0.5-5-21	2-10-5-10	2-11-5-11	2-3-5-15	2-4-5-13
Error SCH	16.14	17.08	22.56	22.63	22.56	21.71	23.55	23.77	30.06	31.44

Nota: Mejores parámetros obtenidos entre todos los modelos invertidos.

Tabla 6.

Resultados pruebas sintéticas primer y segundo filtro.

CONFIGURACIÓN	Perfil CC Modelo 1		Perfil CC Modelo 2		Perfil DD Modelo 1		Perfil DD Modelo 2		Perfil EE Modelo 1	
	Filtro 1	Filtro 2	filtro 1	filtro 2	filtro 1	filtro 2	filtro 1	filtro 2	filtro 1	filtro 2
Modelo DD	1-0.5-5-10	1-0.3-5-8	1-10-5-5	1-11-5-7	1-0.5-5-5	1-0.3-5-6	1-0.5-5-15	1-0.7-5-13	1-0.5-5-5	1-0.7-5-5
Error-DD	10.4	10.33	6.13	6.31	8.68	9.61	15.11	15.16	4.52	4.59
Modelo SCH	3-3-5-20	3-2-5-22	3-7-5-5	3-5-5-5	3-3-5-5	3-4-5-4	3-0.5-5-5	3-0.3-5-3	3-7-5-5	3-6-5-4
Error SCH	14.29	15.59	6.73	7.15	10.38	11.60	21.30	21.45	4.78	5.21
Modelo WEN-SCH	2-0.5-5-20	2-0.4-5-22	2-10-5-5	2-10-5-4	2-7-5-5	2-9-5-4	2-0.5-5-20	2-0.3-5-22	2-7-5-5	2-7-5-7
Error SCH	13.87	13.44	6.61	6.85	11.17	11.32	22.06	21.99	4.67	4.69

Nota: Mejores parámetros obtenidos entre todos los modelos invertidos.

Tabla 7.

Resultados pruebas sintéticas primer y segundo filtro.

CONFIGURACIÓN	Perfil EE Modelo 2		Perfil FF Modelo 1		Perfil FF Modelo 2		Perfil GG Modelo 1	
	Filtro 1	Filtro 2	filtro 1	filtro 2	filtro 1	filtro 2	filtro 1	filtro 2
Modelo DD	1-0.5-5-20	1-0.6-5-22	1-0.5-5-5	1-0.6-5-3	1-10-5-5	1-12-5-3	1-0.5-5-15	1-0.4-5-17
Error-DD	11.17	11.34	4.27	4.27	15.85	15.16	15.45	15.59
Modelo SCH	3-0.5-5-20	3-0.6-5-22	3-10-5-5	3-9-5-6	3-10-5-5	3-12-5-4	3-0.5-5-5	3-0.3-5-4
Error SCH	11.64	12.6	4.55	5.01	11.98	11.76	20.64	20.51
Modelo WEN-SCH	2-0.5-5-20	2-0.3-5-21	2-0.5-5-5	2-0.6-5-5	2-10-5-5	2-12-5-4	2-0.5-5-20	2-0.6-5-22
Error SCH	12.51	12.35	4.41	4.48	11.20	10.90	20.12	20.36

Nota: Mejores parámetros obtenidos entre todos los modelos invertidos.

Los valores que se muestran subrayados en las tablas 5, 6 y 7 son los parámetros seleccionados que mejor dan respuesta a la comparación entre el modelo objetivo y el mejor modelo invertido, como también los parámetros con menor error. En las figuras de la 62 a la 75 se observa el resultado correspondiente a los datos subrayados.

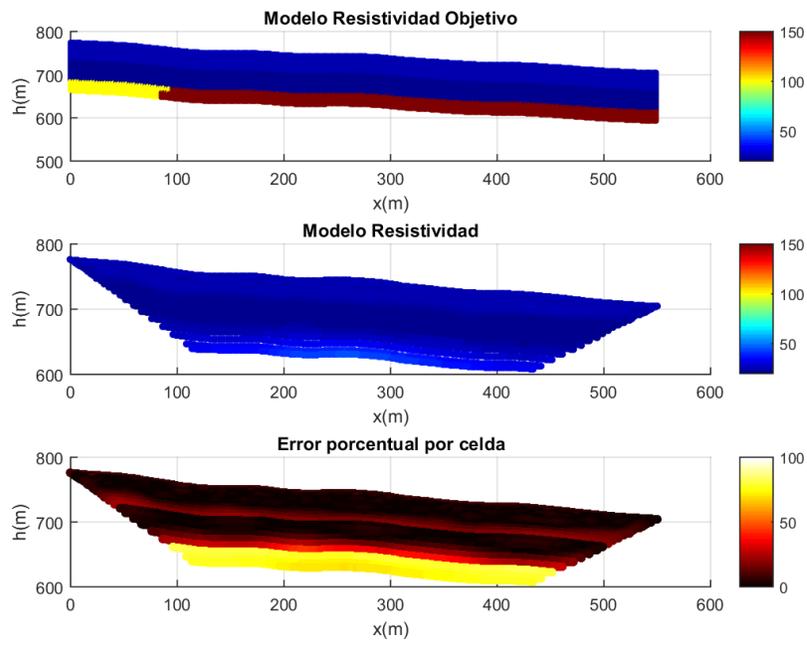


Figura 62. Perfil AA-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

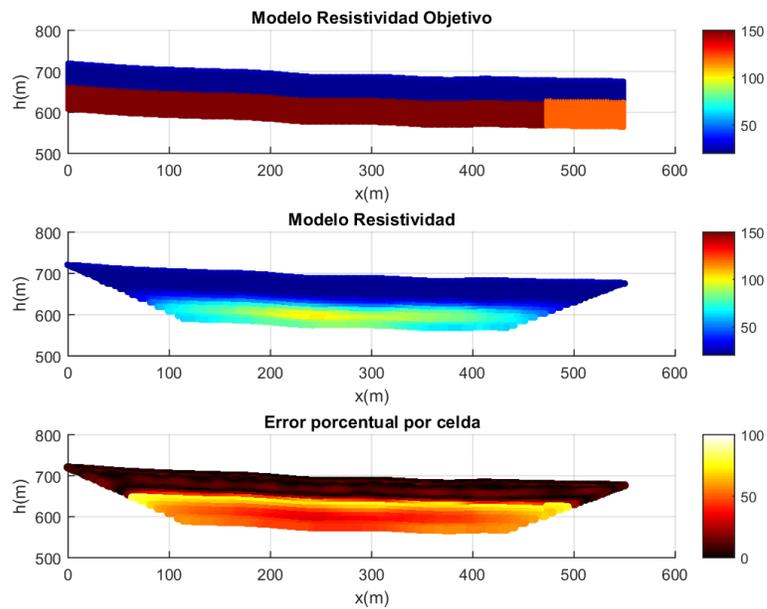


Figura 63. Perfil AA-Modelo 2, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

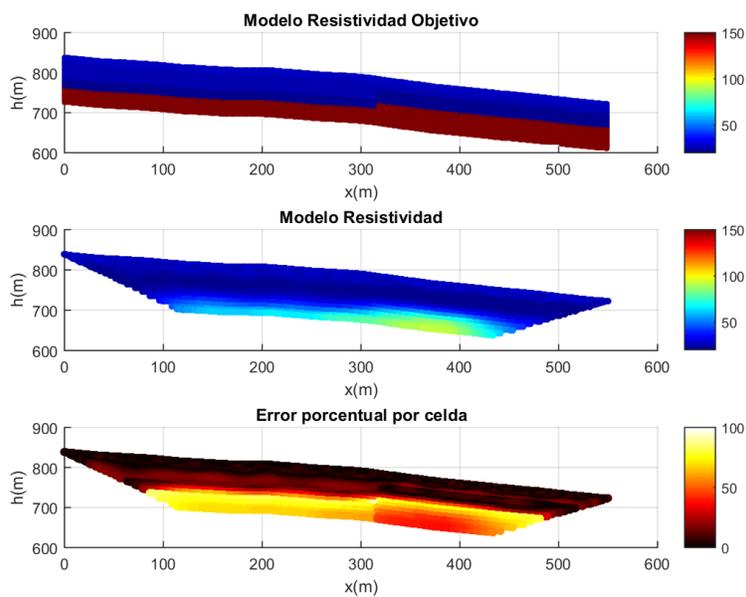


Figura 64. Perfil BB-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

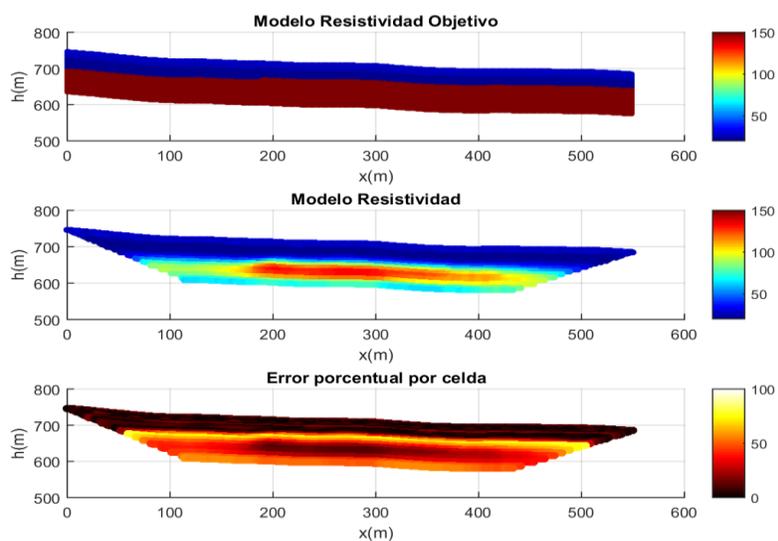


Figura 65. Perfil BB-Modelo 2, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

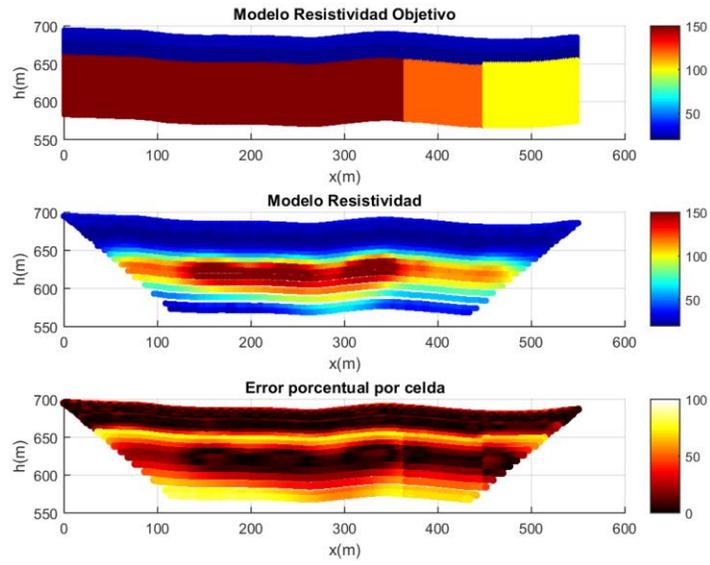


Figura 66. Perfil BB-Modelo 3, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

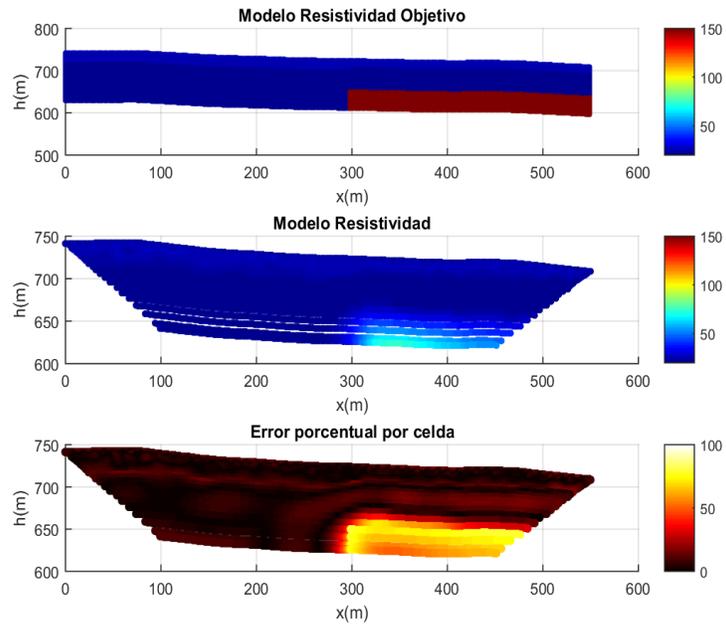


Figura 67. Perfil CC-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

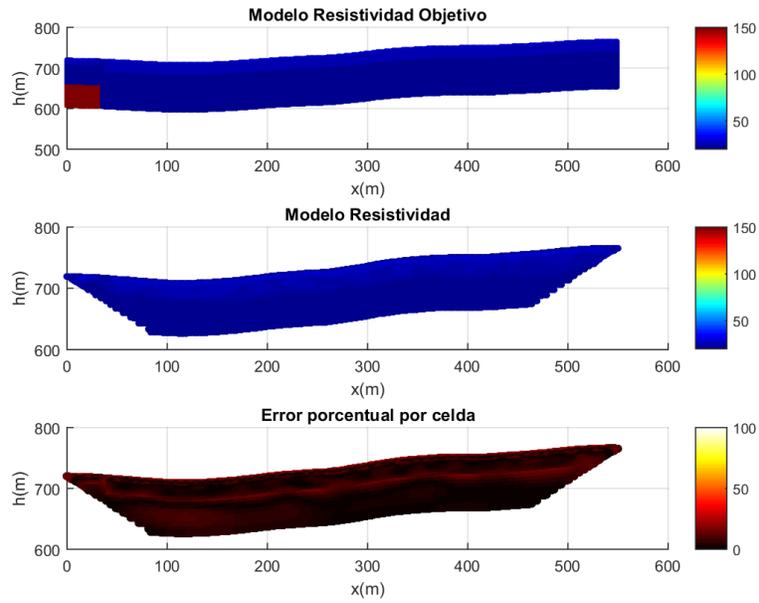


Figura 68. Perfil CC-Modelo 2, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

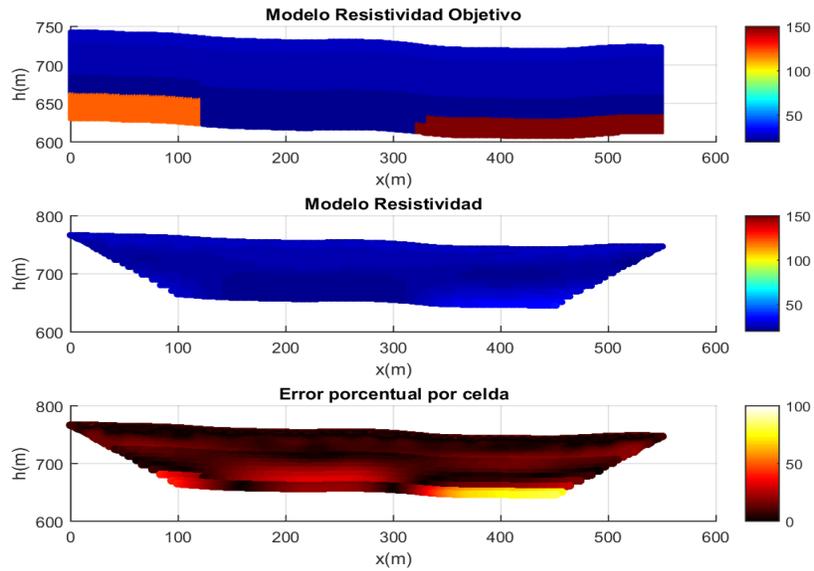


Figura 69. Perfil DD-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

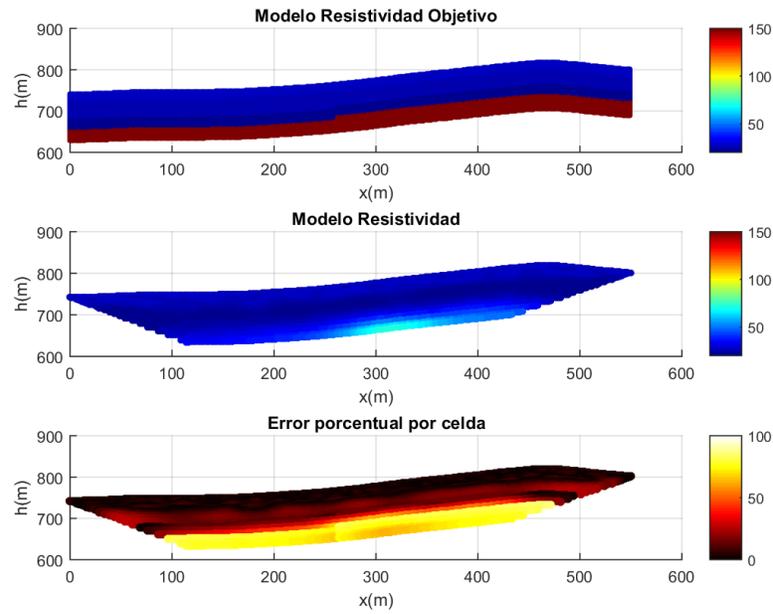


Figura 70. Perfil DD-Modelo 2, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

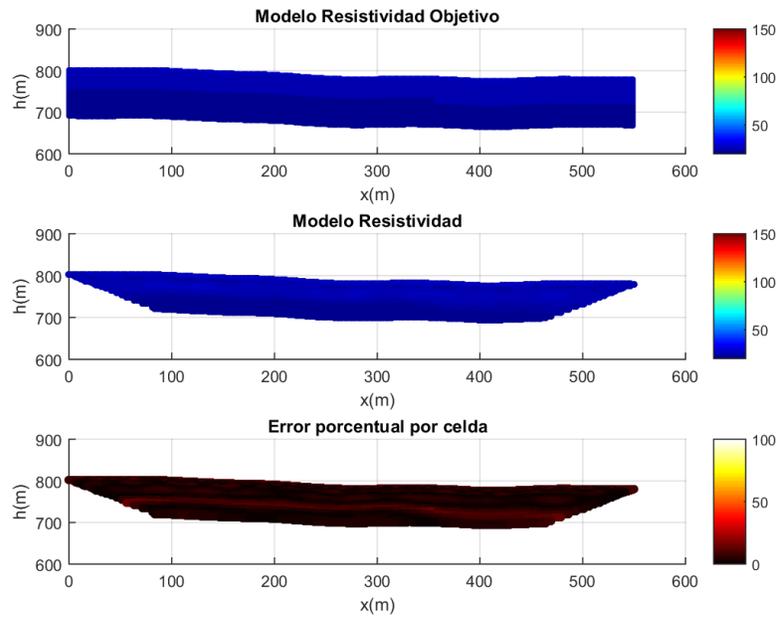


Figura 71. Perfil EE-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

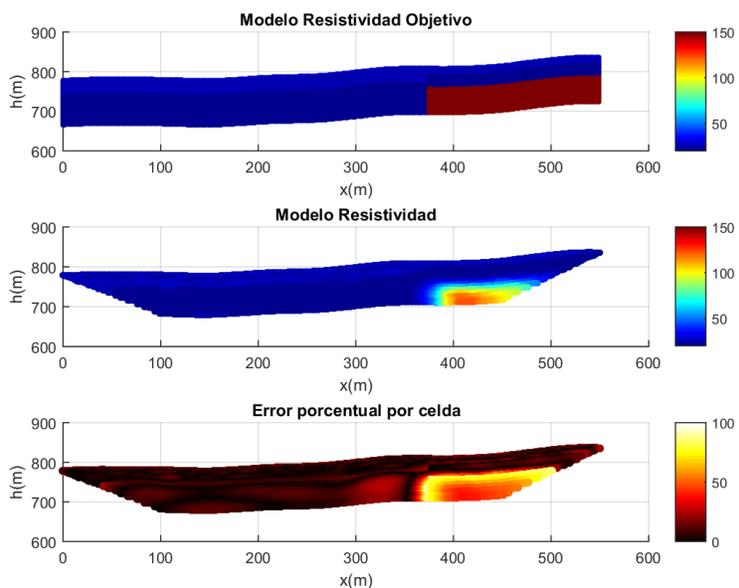


Figura 72. Perfil EE-Modelo 2, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

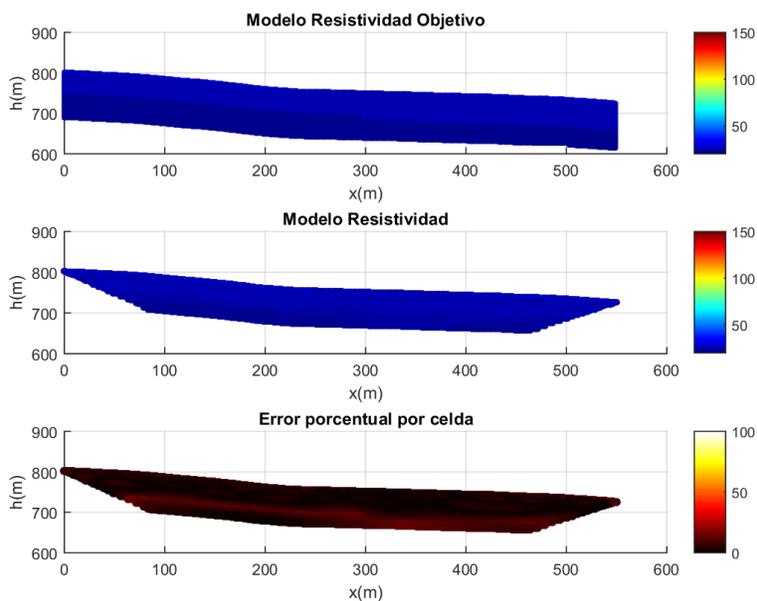


Figura 73. Perfil FF-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

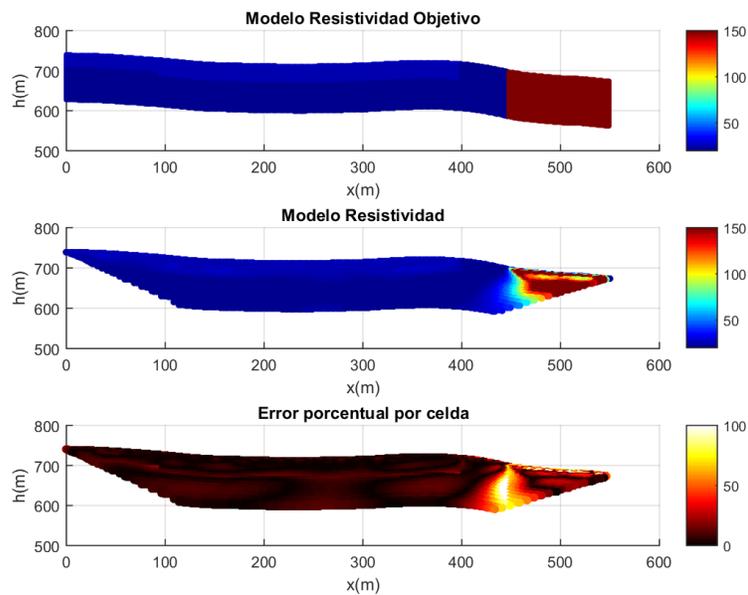


Figura 74. Perfil FF-Modelo 2, de la configuración Wenner-Schlumberger, segundo filtro.

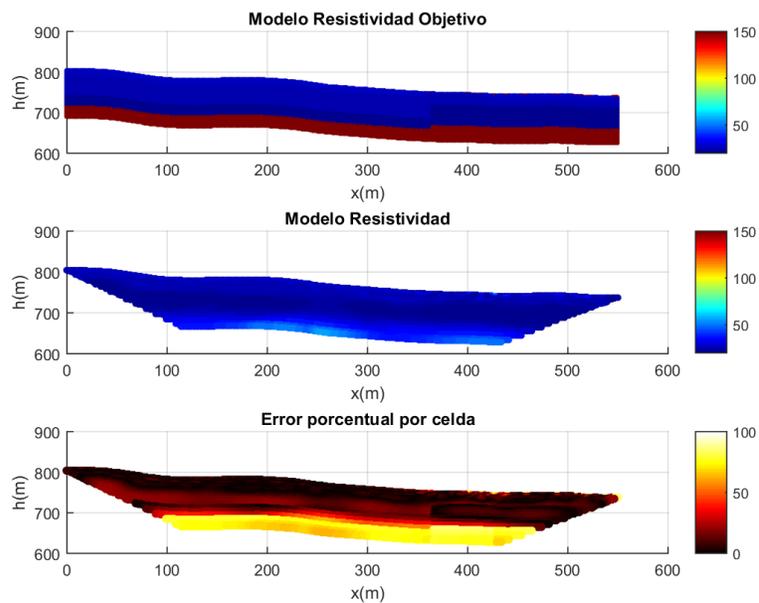


Figura 75. Perfil GG-Modelo 1, de la configuración Dipolo-Dipolo, segundo filtro.

Los parámetros seleccionados anteriormente en las pruebas sintéticas, son los parámetros utilizados para el proceso de inversión de las 12 tomografías eléctricas tomadas en campo. En la tabla 8 se muestra los parámetros utilizados para cada tomografía tomada en campo.

Tabla 8.

Parámetros para el proceso de inversión de las tomografías eléctricas de campo.

TOMOGRAFÍAS DE CAMPO	PARÁMETROS PARA INVERSIÓN
G1	Perfil CC- Modelo 2
G2	Perfil FF- Modelo 2
G4	Perfil FF- Modelo 2
G5	Perfil GG-Modelo 1
G6	Perfil CC- Modelo 2
G7	Perfil EE-Modelo 2
G8	Perfil EE-Modelo 2
G9	Perfil EE-Modelo 2
G10	Perfil BB-Modelo 1
G11	Perfil GG-Modelo 1
G12	Perfil CC- Modelo 2
G13	Perfil GG-Modelo 1

➤ **Tomografía G1**

Tabla 9.

Información general tomografía G1.

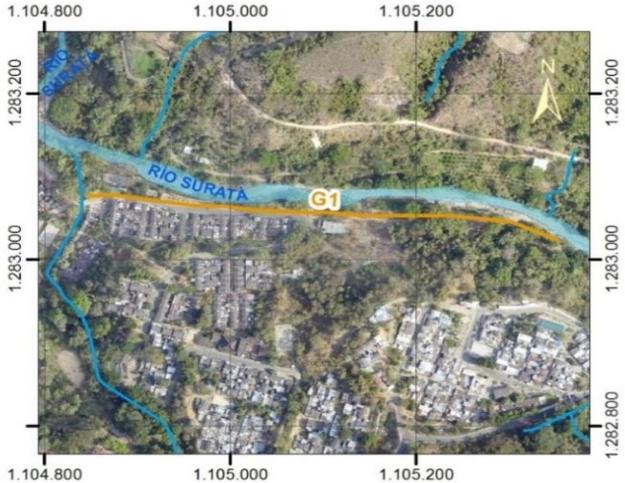
G1 BARRIO VILLA HELENA INFORMACIÓN GENERAL																				
Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)	Punto inicial X: 1104848.3407 Y: 1283077.8676 Punto Final X: 1105349.5419 Y: 1283024.6863	Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en el Barrio Villa Helena, en cercanías al Río Surata Geología local: Medición principalmente sobre depósitos de terraza; hacia la parte oeste, se encuentra sobre depósitos aluviales recientes y depósitos antrópicos mecanizados y hacia el este, sobre la Formación Tiburón.																		
Localización																				
		Puntos de referencia y fuentes de ruido																		
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>PUNTO</th> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Canal recicladora cerca caseta para basura</td> <td>11.048.483.407</td> <td>12.830.878.676</td> </tr> <tr> <td>Tablero Baja Tensión</td> <td>11.049.589.539</td> <td>12.830.663.280</td> </tr> <tr> <td>Caseta de basura</td> <td>11.050.844.025</td> <td>12.830.562.665</td> </tr> <tr> <td>Tubería de Alcantarillado</td> <td>11.051.560.780</td> <td>12.830.513.963</td> </tr> <tr> <td>Afloramiento Roca</td> <td>11.052.549.607</td> <td>12.830.496.487</td> </tr> </tbody> </table>	PUNTO	X	Y	Canal recicladora cerca caseta para basura	11.048.483.407	12.830.878.676	Tablero Baja Tensión	11.049.589.539	12.830.663.280	Caseta de basura	11.050.844.025	12.830.562.665	Tubería de Alcantarillado	11.051.560.780	12.830.513.963	Afloramiento Roca	11.052.549.607	12.830.496.487
PUNTO	X	Y																		
Canal recicladora cerca caseta para basura	11.048.483.407	12.830.878.676																		
Tablero Baja Tensión	11.049.589.539	12.830.663.280																		
Caseta de basura	11.050.844.025	12.830.562.665																		
Tubería de Alcantarillado	11.051.560.780	12.830.513.963																		
Afloramiento Roca	11.052.549.607	12.830.496.487																		
Observaciones sobre electrodos:		Observaciones																		
<ul style="list-style-type: none"> · Del 2 al 10 sobre pavimento y adoquín · Del 1, 11 al 50, sobre suelo, con excepción del 25, que se encuentra sobre cuneta · De 51 al 56 en suelo aluvial reciente · Cercanía a canal en: 1 · Margen derecha de drenaje en: 1 · Cercanía a tablero de baja tensión en: 13 · Agrietamientos en el andén en: 15 al 18 · Antiguos hundimientos en la vía en 15 al 18. · Cercanía a malla eslabonada en: 20 · Cercanía a pozo de inspección de alcantarillado en: 27 · Cercanía a caseta de basura en: 28 · Paso de tubería de alcantarillado bajo la línea entre electrodos adyacentes en: 35, 48 · Árboles inclinados en el talud superior en: 37 al 43 		<ul style="list-style-type: none"> · Medición: Soleado · Previas: Lluvias fuertes en la noche 																		
		Condiciones climáticas																		

Tabla 10.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G1.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	7
Damping	11
Iteraciones forward	5
Configuración	Dipolo-Dipolo

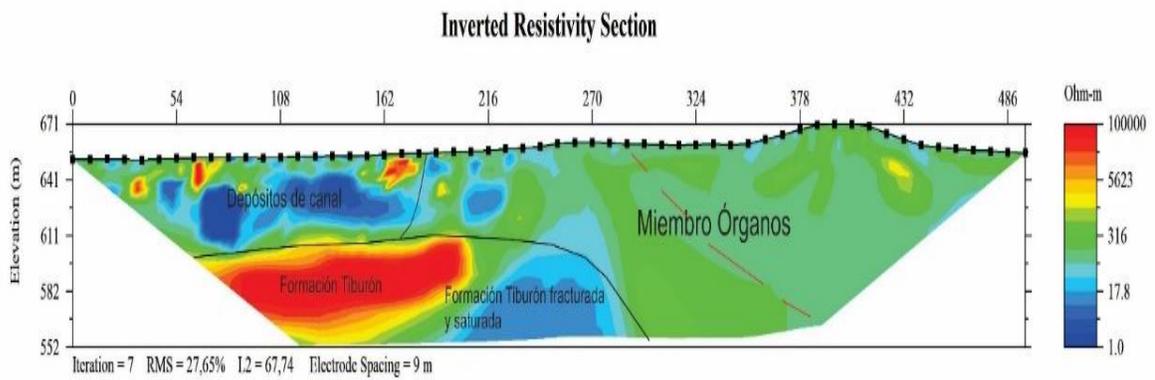


Figura 76. Interpretación geoelectrica tomografía G1.

➤ **Tomografía G2**

Tabla 11.

Información general tomografía G2.

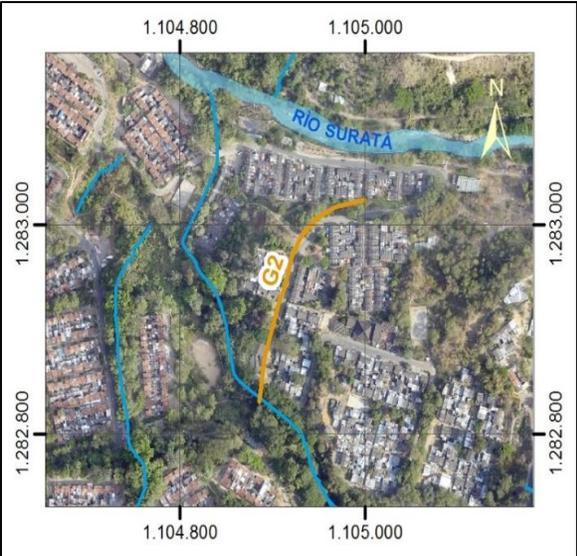
G2 BARRIO VILLA HELENA		
INFORMACIÓN GENERAL		
<p>Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)</p>	<p>Punto inicial X: 1104885.7206 Y: 1282834.029</p> <p>Punto Final X: 1104978.3405 Y: 1283019.63</p>	<p>Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en el Barrio Villa Helena.</p> <p>Geología local: Medición principalmente sobre Miembro Órganos Removido (Qd?); hacia el sur, se encuentra sobre depósitos aluviales recientes y depósitos antrópicos de desechos; hacia la parte intermedia, sobre la Formación Tiburón y hacia el norte, se localiza sobre depósitos de terraza.</p>
Localización		
		
Puntos de referencia y fuentes de ruido		
PUNTO	X	Y
Canal de Gaviones	11.048.857.206	1.282.834.029
Caja de alcantarillado	11.048.949.107	1.282.885.094
Caseta de basura	11.049.302.333	12.829.867.527
Observaciones		
<p>Observaciones sobre electrodos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Del 1 al 7, 11 al 56 en suelo, excepto 5, 8 al 10, 13, 40 que se encuentra en andén, 41 en escombros y 42 al 43 en escombros y basura, 39 se encuentra sobre relleno. • Cerca de canal en gaviones y margen izquierda de drenaje en 1 al 2 • Hundimiento en la vía en: 12 al 13, 15 al 16. • Tubería de alta presión del acueducto en: 24. • Cercanía a caseta de basura en: 40 al 41. • Inicio de pendiente mayor a 30° en 42. • Pendiente a mayor a 30° en: 43 a 50. • Termina pendiente mayor a 30° en 51 	<p>Condiciones climáticas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Medición: Soleado • Previas: Mañana soleada 	

Tabla 12.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G2.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	4
Damping	12
Iteraciones forward	5
Configuración	Wenner-Schlumberger

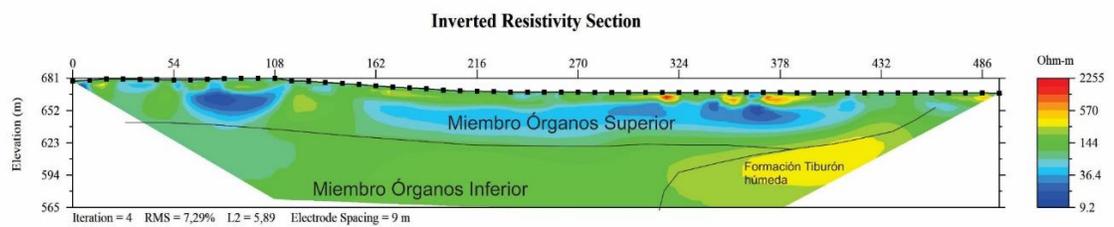


Figura 77. Interpretación geoelectrica tomografía G2.

➤ **Tomografía G4**

Tabla 13.

Información general tomografía G4.

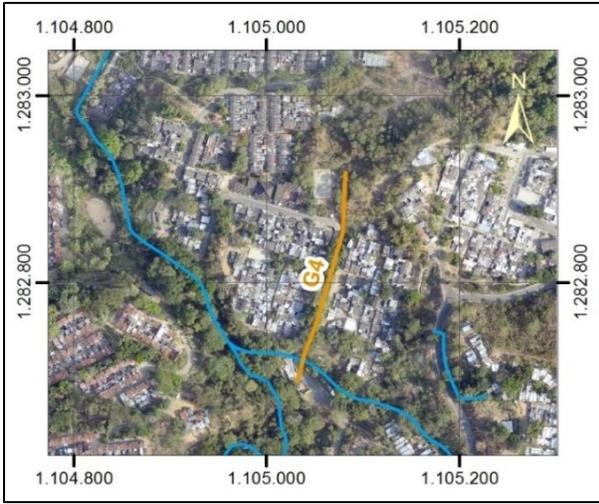
G4 BARRIO VILLA HELENA I														
INFORMACIÓN GENERAL														
Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)	<p>Punto inicial X: 1105033.2508 Y: 1282701.6171</p> <p>Punto Final X: 1105080.557 Y: 1282914.8032</p>	<p>Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en el Barrio Villa Helena I.</p> <p>Geología local: Medición principalmente sobre el Miembro Órganos Removido (Qd?); hacia la parte sur, se encuentra sobre depósitos antrópicos mecanizados y depósitos aluviales recientes; en la parte intermedia, sobre el Miembro Órganos y hacia la parte norte, se localiza sobre la Formación Tiburón.</p>												
Localización														
	Puntos de referencia y fuentes de ruido													
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PUNTO</th> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Comienzo de la línea</td> <td>11.050.332.508</td> <td>12.827.016.171</td> </tr> <tr> <td>Electrodos sobre suelo</td> <td>11.050.804.826</td> <td>12.828.868.095</td> </tr> <tr> <td>Muro de contención</td> <td>11.050.658.405</td> <td>12.828.086.493</td> </tr> </tbody> </table>	PUNTO	X	Y	Comienzo de la línea	11.050.332.508	12.827.016.171	Electrodos sobre suelo	11.050.804.826	12.828.868.095	Muro de contención	11.050.658.405	12.828.086.493	
PUNTO	X	Y												
Comienzo de la línea	11.050.332.508	12.827.016.171												
Electrodos sobre suelo	11.050.804.826	12.828.868.095												
Muro de contención	11.050.658.405	12.828.086.493												
Observaciones sobre electrodos:	Observaciones	Condiciones climáticas												
<ul style="list-style-type: none"> • De 1 al 9 en asfalto • De 10 al 56 en suelo • Cercanía a pozo de inspección de alcantarillado en: 5 • Margen derecho de drenaje en: 6 • Arriba de un muro de contención en: 10 al 45 • Agrietamiento en muros en: 10 al 20, 22 al 27 • Agrietamiento en escaleras en: 21 • Inestabilidad del talud manifestada por los residentes en: 42 al 45 • Pendiente mayor a 30° en 47 al 55 • Cercanía a canal en 56 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición: Soleado • Previas: Mañana nublada 													

Tabla 14.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G4.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	4
Damping	12
Iteraciones forward	5
Configuración	Wenner-Schlumberger

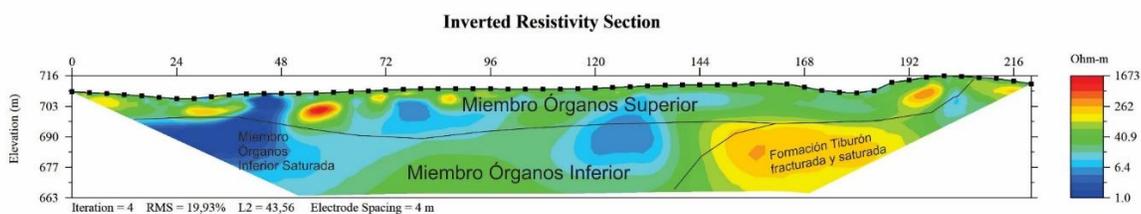


Figura 78. Interpretación geoelectrica tomografía G4.

➤ **Tomografía G5**

Tabla 15.

Información general tomografía G5.

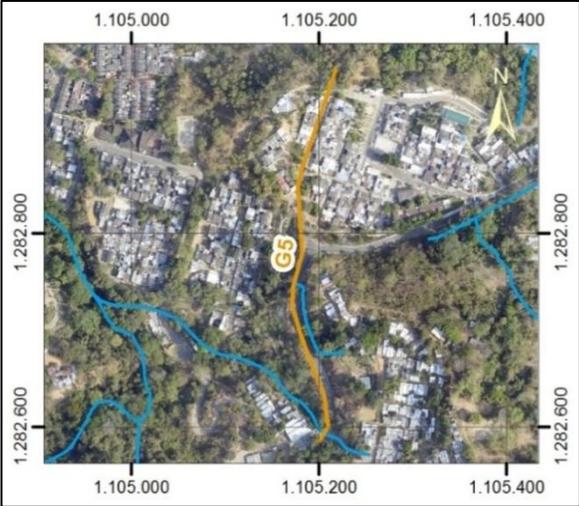
G5 BARRIO LOS ANGELES			
INFORMACIÓN GENERAL			
<p>Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)</p>	<p>Punto inicial X: 1105201.4734 Y: 1282586.935</p> <p>Punto Final X: 1105212.6861 Y: 1282956.6277</p>	<p>Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en el Barrio Los Ángeles.</p> <p>Geología local: Medición principalmente sobre el Miembro Órganos Removido (Qd?) hacia la parte sur, en algunos sectores se encuentra sobre depósitos antrópicos de desecho y depósitos de terraza; hacia la parte norte, se encuentra sobre el Miembro Órganos y la Formación Tiburón.</p>	
Localización			
	Puntos de referencia y fuentes de ruido		
	PUNTO	X	Y
	Comienzo de la línea	11.052.014.734	1.282.586.935
	“Y” Los Ángeles	1.105.181.123	12.827.874.199
	Final de la línea	11.052.128.861	12.829.566.277
Observaciones sobre electrodos:	Observaciones		Condiciones climáticas
<ul style="list-style-type: none"> • 1 se encuentra en andén • 2 se encuentra en andén en adoquín • De 3 al 35, 38 al 45, 54, 56 en suelo • De 36 al 37, 46 al 48, 53, 55 en asfalto • Drenaje en 2 • Inicio de escarpe en 3, 31 • Arriba de corona del escarpe en 4 al 11, 32 • Termina escarpe en 12, 33 • Vegetación quemada en 6 al 15 • Afloramiento de la Formación Órganos Superior en 22 al 30 • Hundimiento en asfalto deteriorado en: 49 al 50 • Piel de cocodrilo en asfalto deteriorado en: 51 al 52 • Cercanía a canal en 55 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición: Soleado • Previas: Mañana nublada 		

Tabla 16.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G5.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	17
Damping	0,4
Iteraciones forward	5
Configuración	Dipolo-Dipolo

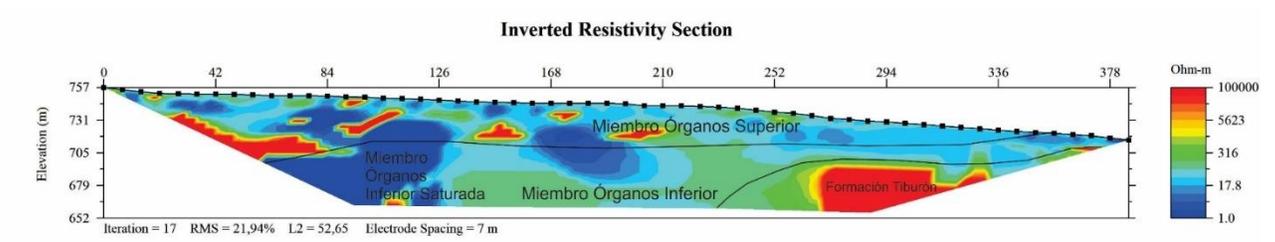


Figura 79. Interpretación geoelectrica tomografía G5.

➤ **Tomografía G6**

Tabla 17.

Información general tomografía G6

G6 BARRIO LOS ANGELES																
INFORMACIÓN GENERAL																
<p>Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)</p>	<p>Punto inicial X: 1105244.01941 Y: 1282778.28376</p> <p>Punto Final X: 1105470.89147 Y: 1282875.82613</p>	<p>Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en el Barrio Los Ángeles.</p> <p>Geología local: Medición sobre el Miembro Órganos Removido (Qd?)</p>														
Localización	Puntos de referencia y fuentes de ruido															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PUNTO</th> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Colegio Los Ángeles</td> <td>110.531.240.456</td> <td>128.280.081.088</td> </tr> <tr> <td>Drenaje</td> <td>110.534.164.336</td> <td>128.281.233.728</td> </tr> <tr> <td>Calle 16N</td> <td>110.540.229.026</td> <td>128.284.197.178</td> </tr> <tr> <td>Calle 17CN</td> <td>110.545.475.258</td> <td>128.286.785.516</td> </tr> </tbody> </table>	PUNTO	X	Y	Colegio Los Ángeles	110.531.240.456	128.280.081.088	Drenaje	110.534.164.336	128.281.233.728	Calle 16N	110.540.229.026	128.284.197.178	Calle 17CN	110.545.475.258	128.286.785.516
PUNTO	X	Y														
Colegio Los Ángeles	110.531.240.456	128.280.081.088														
Drenaje	110.534.164.336	128.281.233.728														
Calle 16N	110.540.229.026	128.284.197.178														
Calle 17CN	110.545.475.258	128.286.785.516														
<p>Observaciones sobre electrodos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Del 1 al 56 en suelo • Hundimiento en la vía en 21 al 26 • Drenaje en 27 al 28 • Descole artesanal de aguas servidas en 50 	<p>Observaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Medición: Soleado • Previas: Lluvias fuertes en la noche 	<p>Condiciones climáticas</p>														

Tabla 18.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G6.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	7
Damping	11
Iteraciones forward	5
Configuración	Dipolo-Dipolo

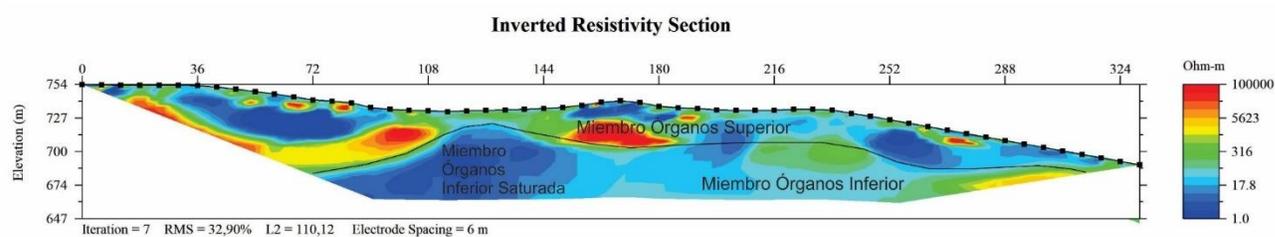


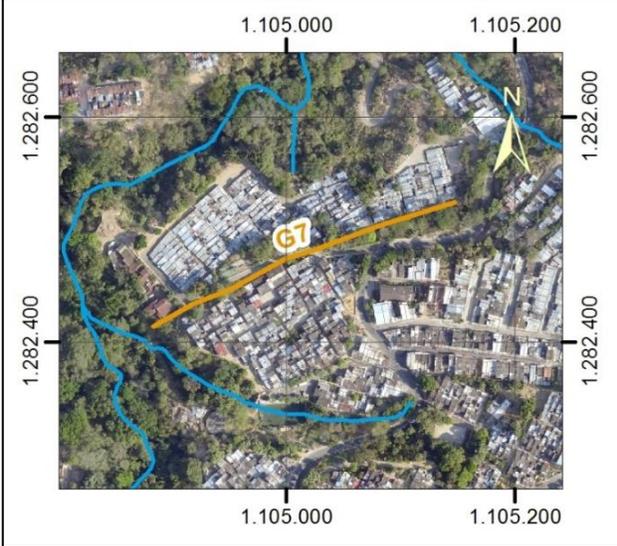
Figura 80. Interpretación geoelectrica tomografía G6.

➤ **Tomografía G7**

Tabla 19.

Información general tomografía G7

G7 BARRIOS LA ESPERANZA III, JOSE MARIA CORDOBA, MIRADOR		
INFORMACIÓN GENERAL		
Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)	Punto inicial	Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en el Barrios La Esperanza III, José María Córdoba, Mirador
	X: 1104884.49311	
	Y: 1282413.53558	Geología local: Medición sobre el Miembro Órganos Removido (Qd?)
	Punto Final	
X: 1105136.94561		
	Y: 1282520.50596	

Localización		Puntos de referencia y fuentes de ruido		
		PUNTO	X	Y
		Damas Rosadas	110.490.185.033	128.242.347.171
		Colegio La Juventud	110.494.227.945	128.244.306.504
		Pozo de Inspección	110.499.116.651	128.246.817.074
		Kiosco	110.500.487.061	128.247.417.287
		Carrera 26		
		Barrio José María Córdoba	110.511.781.098	128.251.469.152

Observaciones sobre electrodos:	Observaciones	Condiciones climáticas
<ul style="list-style-type: none"> • De 1 al 14, 35 al 54 en suelo, excepto 51 que se encuentra en andén • De 15 al 29 en cuneta • De 30 al 33 en asfalto deteriorado • De 55 al 56, 34 en andén • Pozo de inspección del alcantarillado en: 5, 15, 19, 22, 31, 41 al 42 • Frente al colegio La Juventud en: 15 al 25 • Pie de escarpe en: 44 al 47 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición: Nublado • Previas: Lluvias en la noche 	

Tabla 20.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G7.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	22
Damping	0,6
Iteraciones forward	5
Configuración	Dipolo-Dipolo

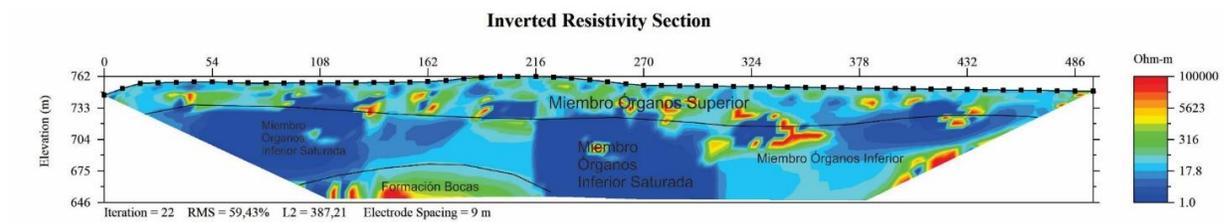


Figura 81. Interpretación geoelectrica tomografía G7.

➤ **Tomografía G8**

Tabla 21.

Información general tomografía G8

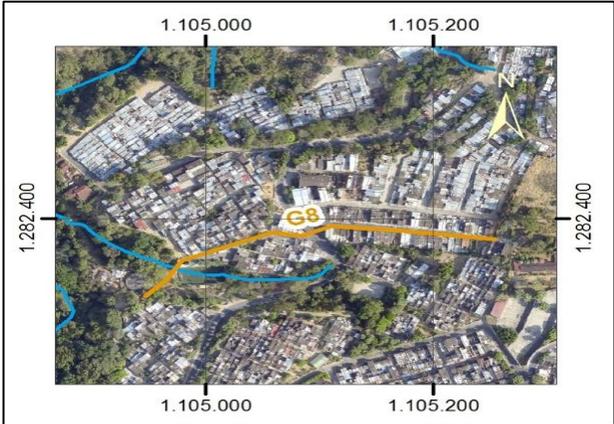
G8 BARRIO LIZCANO I, LA ESPERANZA III		
INFORMACIÓN GENERAL		
Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)	Punto inicial	Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en el Barrio Lizcano I, La Esperanza III
	X: 1105253.41859 Y: 1282376.54841	
	Punto Final	Geología local: Medición principalmente sobre el Miembro Órganos Removido (Qd?); hacia el oeste, se encuentra sobre depósitos aluviales recientes.
	X: 1104948.71059 Y: 1282313.23349	
Localización		
		
Puntos de referencia y fuentes de ruido		
PUNTO	X	Y
Escaleras Barrio Lizcano I	110.524.150.918	128.237.802.007
Barrio Lizcano I	110.522.364.505	128.238.022.757
Vía Matanza	110.509.380.848	128.238.457.538
Parqueadero	110.499.236.325	128.235.797.122
Box Coulvert	110.497.431.423	128.234.423.771
Tanque de Agua (S6)	11.049.558.211	128.232.085.713
Observaciones sobre electrodos:		
<ul style="list-style-type: none"> • De 1 al 3 en gradas de concreto • De 5 al 32 y 42 al 47 en asfalto • 4 en andén • De 33 al 41 y 48 al 56 en suelo • Cercanía al tanque de agua del acueducto fuera de operación en: 56 • Pozo de inspección de alcantarillado en 2, 18, 25, 27, 32, 44, 47 • Pozo de inspección pluvial en 2 • Viviendas agrietadas en: 17, 37 • Separaciones mayores/menores en: 9m en 25, 10m en 26 		
Observaciones		
<ul style="list-style-type: none"> • Medición: Soleado • Previas: Día y noche sin lluvias 		
Condiciones climáticas		

Tabla 22.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G8.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	22
Damping	0,6
Iteraciones forward	5
Configuración	Dipolo-Dipolo

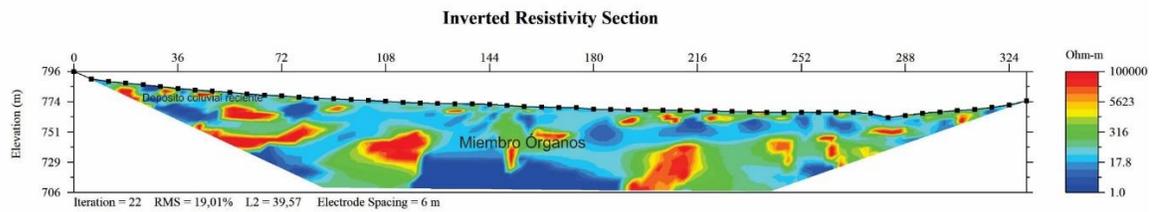


Figura 82. Interpretación geoelectrica tomografía G8.

➤ **Tomografía G9**

Tabla 23.

Información general tomografía G9.

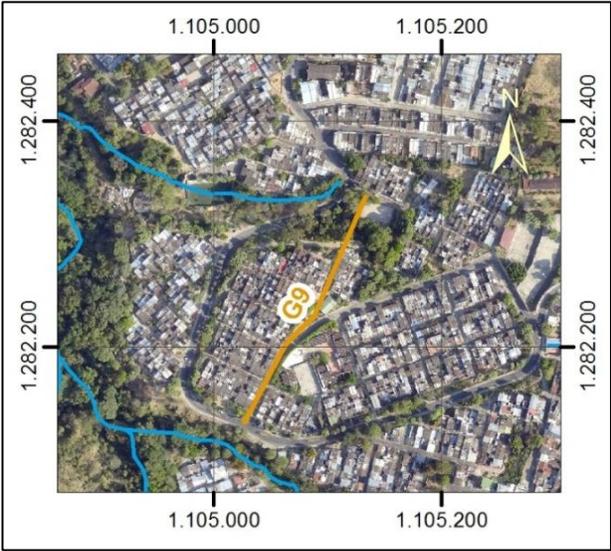
G9 BARRIO LA ESPERANZA II		
INFORMACIÓN GENERAL		
Punto inicial		
Ubicación: (Magna Colombia- Bogotá)	X: 1105027.55329 Y: 1282133.16356	Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en el Barrio La Esperanza II
Punto Final	X: 1105129.81824 Y: 1282326.43232	
		Geología local: Medición sobre el Miembro Órganos Removido (Qd?).
Localización		
		
Puntos de referencia y fuentes de ruido		
PUNTO	X	Y
Inicio Vía Matanza	110.502.755.329	128.213.316.356
Antigua Laguna	110.504.552.012	12.821.689.014
Colegio Esperanza II	110.507.081.555	128.220.945.347
Salón Comunal	110.509.210.275	128.223.824.657
Cañada	110.511.997.482	128.230.021.959
Canales de filtración	110.512.841.204	128.232.268.764
Cancha		
Observaciones		
Observaciones sobre electrodos:		Condiciones climáticas
<ul style="list-style-type: none"> • De 1 al 19 en asfalto • 20 en andén • De 21 al 56 en suelo excepto el 26 al 27, 41 al 44 que se encuentran en andén y en 34 al 35, 37 en andén en mortero • Pozo de inspección de alcantarillado en 44, • Pozo de inspección pluvial en: 2 • Viviendas agrietadas en: 31 al 32 • Pendiente mayor a 30° en: 47 al 52 • Cercano al canal en 2, 54 al 55 • Pavimento deteriorado en: 6 al 9 		<ul style="list-style-type: none"> • Medición: Soleado • Previas: Día y noche sin lluvias

Tabla 24.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G9.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	22
Damping	0,6
Iteraciones forward	5
Configuración	Dipolo-Dipolo

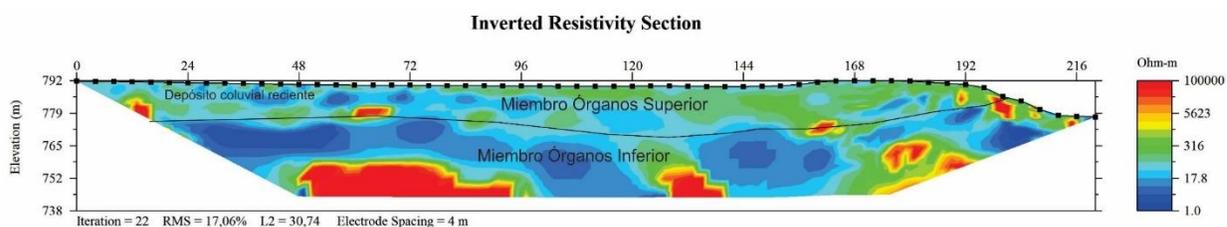


Figura 83. Interpretación geoelectrica tomografía G9.

➤ **Tomografía G10**

Tabla 25.

Información general tomografía G10.

G10 BARRIOS LA ESPERANZA II Y JOSE MARIA CORDOBA		
INFORMACIÓN GENERAL		
Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)	Punto inicial	Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en los Barrios La Esperanza II y Jose María Córdoba
	X: 1105109.06635	
	Y: 1282338.09406	Geología local: Medición principalmente sobre el Miembro Órganos Removido (Qd?); hacia la parte sur, se encuentra sobre depósitos antrópicos mecanizados y hacia la parte norte, sobre depósitos aluviales recientes.
	Punto Final	
X: 1104961.83919		
	Y: 1282564.93711	

Localización		Puntos de referencia y fuentes de ruido		
		PUNTO	X	Y
		Desagüe (viene de la cancha)	110.510.966.638	128.234.305.793
		Calle 12B N	110.509.119.017	128.238.197.672
		Pequeño parque (Entrada Esperanza III)	110.505.382.748	12.824.250.693
		Pozo de inspección (Mitad vía)	110.502.573.543	128.247.612.302
		Carrera 26	110.502.192.611	128.248.536.161
		Pantalla anclada	110.496.827.824	128.255.728.605

Observaciones sobre electrodos:	Observaciones	Condiciones climáticas
<ul style="list-style-type: none"> • De 1 al 4, 20 al 23, 32 al 33, 36 al 39 y 56 en suelo excepto 22 que se encuentra en anden • De 5 al 8, 14 al 19, 34 y 40 al 54 en anden excepto 18 que se encuentra en suelo • De 9 al 13, 35 y 55 en asfalto • De 24 al 31 en concreto • Cercanía a drenaje en: 1 • Margen izquierda de drenaje en:2 • Marge derecha en drenaje:3 • Pozo de inspección de alcantarillado en 4, 11, 34, 35, 45, 54 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición: Lluvias • Previas: Mañana soleada 	

Tabla 26.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G10.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	22
Damping	0,4
Iteraciones forward	5
Configuración	Dipolo-Dipolo

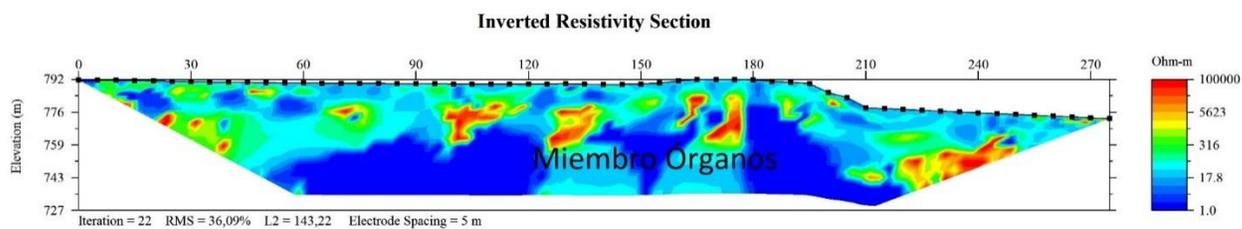


Figura 84. Interpretación geoelectrica tomografía G10.

➤ **Tomografía G11**

Tabla 27.

Información general tomografía G11.

G11 BARRIO LA ESPERANZA III INFORMACIÓN GENERAL			
Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)	<p>Punto inicial X: 1104963.8476 Y: 1282152.52833</p> <p>Punto Final X: 1105000.60939 Y: 1282453.2212</p>	<p>Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en el Barrio La Esperanza III</p> <p>Geología local: Medición principalmente sobre el Miembro Órganos Removido (Qd[?]); hacia la parte sur, se encuentra sobre depósitos aluviales recientes y hacia la parte intermedia, sobre depósitos antrópicos de desecho.</p>	
Localización			
	Puntos de referencia y fuentes de ruido		
	PUNTO	X	Y
	Cercanía a malla metálica	11.049.638.476	128.215.252.833
	bordea zona escarpada (Antiguo Deslizamiento 2010)		
	Calle 10A N	11.049.737.203	128.218.610.583
	Piezómetro aprox. 9m AMB	110.498.926.847	128.223.362.692
	Pequeño parque	11.049.923.781	128.224.313.114
	Escalera cancha sintética (Zona escarpada)	110.501.834.999	128.230.800.803
	Muro de contención	11.050.203.307	128.232.790.914
	Canal rectangular en concreto (Baja profundidad hidráulica)	11.050.208.474	128.237.289.968
	Patio, detrás de Colegio La Juventud	110.498.821.713	128.243.387.562
	Línea de tubería sanitaria	110.500.060.939	12.824.532.212
Observaciones sobre electrodos:	Observaciones	Condiciones climáticas	
<ul style="list-style-type: none"> • De 1 al 5, 15 al 20, 25 al 36, 39, 45 al 46, 51 en suelo excepto el 18 que se encuentra en andén en concreto • De 6 al 7, 21 al 24 en andén en concreto • De 8 al 14 en andén en adoquín excepto el 10 que se encuentra en andén en mortero • De 40 al 44, 47 al 50 en andén • De 37 al 38 en asfalto • De 52 al 53 en concreto • De 54 al 56 en canaleta • Cercanía a corona de deslizamiento en: 1 • Poste de luz en: 14, 20 • Piezómetro CDMB en: 16 al 17 • Pozo de inspección de alcantarillado en 44 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición: Lluvias • Previa: Mañana soleada 		

Tabla 28.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G11.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	17
Damping	0,4
Iteraciones forward	5
Configuración	Dipolo-Dipolo

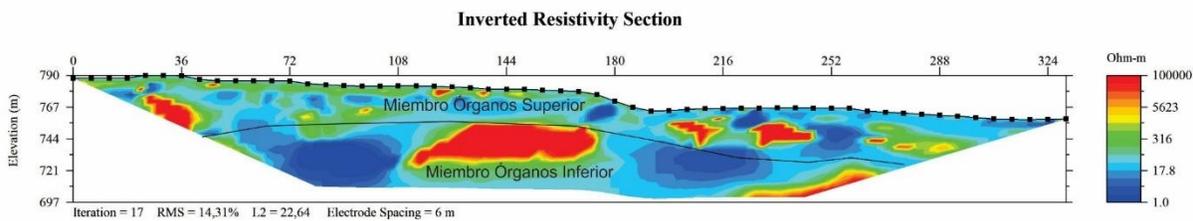


Figura 85. Interpretación geoelectrica tomografía G11.

➤ **Tomografía G12**

Tabla 29.

Información general tomografía G12.

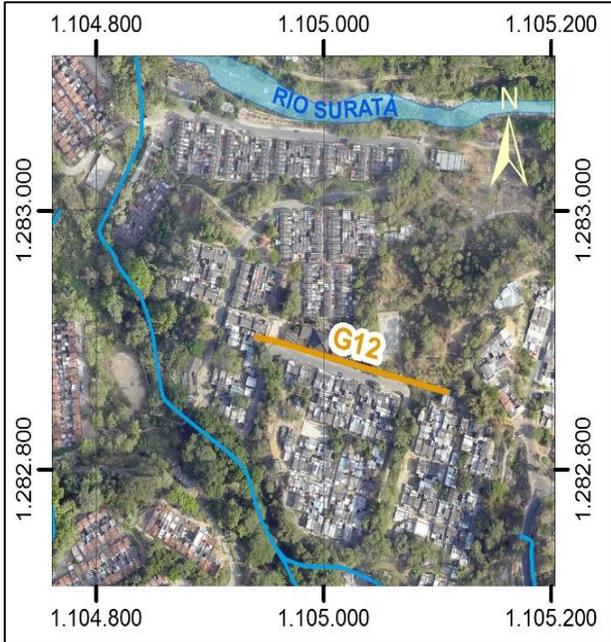
G12 BARRIO VILLA HELENA I		
INFORMACIÓN GENERAL		
	Punto inicial	
	X: 1105105.20805	Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en el Barrio Villa Helena I
Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)	Y: 1282860.53227	
	Punto Final	
	X: 1104945.43133	Geología local: Medición sobre el Miembro Órganos Removido (Qd?).
	Y: 1282901.49229	
Localización		
		
Puntos de referencia y fuentes de ruido		
PUNTO	X	Y
Inicio de escaleras (Límite tentativo de deslizamiento)	110.510.229.292	128.286.124.081
Inicio colina (Cruce con G4)	11.050.789.719	128.286.690.912
Caseta de basura	110.507.022.651	128.286.903.474
Colegio María Cano	110.502.358.446	128.288.037.137
Iglesia San Jerónimo Emiliana	110.499.463.281	128.288.819.442
Parqueadero improvisado	11.049.630.123	128.289.763.597
Patio, viviendas.	11.049.542.254	128.289.957.803
Calle 15C N		
Observaciones		
Observaciones sobre electrodos:	Condiciones climáticas	
<ul style="list-style-type: none"> • De 1 al 32, 49 al 56 en suelo, excepto el 13 que se encuentra en concreto, 27 y 55 en andén • De 33 al 48 en andén, excepto 42 que se encuentra en canal de aguas lluvias • Cercanía a gradas en: 1 al 10 • Pendiente mayor a 30° en: 2 al 10 • Muro de contención en: 5 • Frente a caseta de basura en: 13 • Colegio en: 26 al 32 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición: Soleado • Previas: Mañana soleada 	

Tabla 30.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G12.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	7
Damping	11
Iteraciones forward	5
Configuración	Dipolo-Dipolo

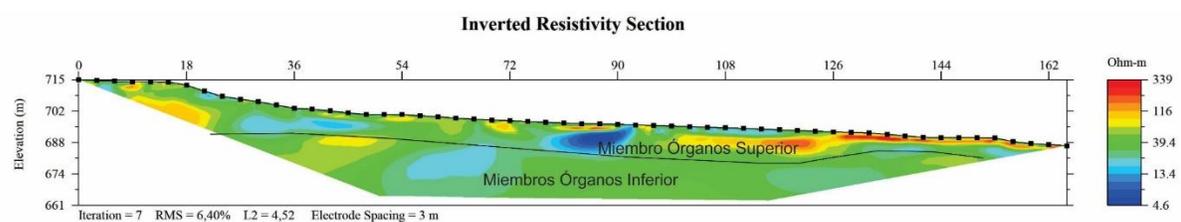


Figura 86. Interpretación geoelectrica tomografía G12.

➤ **Tomografía G13**

Tabla 31.

Información general tomografía G13.

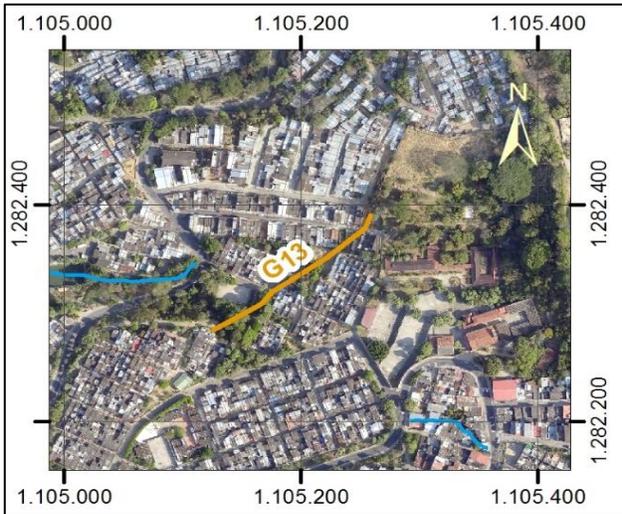
G13 BARRIOS LIZCANO I, LA ESPERANZA II INFORMACIÓN GENERAL																							
Ubicación: (Magna Colombia-Bogotá)	Punto inicial X: 1105256.98005 Y: 1282385.97 Punto Final X: 1105128.32374 Y: 1282285.9605	Descripción de la actividad: Levantamiento de tomografía de resistividad eléctrica, en los Barrios Lizcano I, La Esperanza II Geología local: Medición sobre el Miembro Órganos Removido (Qd?).																					
Localización																							
		Puntos de referencia y fuentes de ruido																					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PUNTO</th> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Escaleras Barrio Lizcano 1</td> <td>110.525.535.368</td> <td>128.238.019.463</td> </tr> <tr> <td>Pequeñas terrazas de muros agrietados</td> <td>110.524.928.709</td> <td>128.237.366.311</td> </tr> <tr> <td>Caja en concreto para filtros</td> <td>110.523.652.452</td> <td>128.236.096.992</td> </tr> <tr> <td>Casa abandonada, presenta pérdida total como consecuencia de grietas</td> <td>110.519.155.054</td> <td>128.233.108.179</td> </tr> <tr> <td>Nacimiento de agua</td> <td>110.515.660.199</td> <td>128.230.297.051</td> </tr> <tr> <td>Zona escarpada</td> <td>110.513.346.524</td> <td>128.228.905.323</td> </tr> </tbody> </table>	PUNTO	X	Y	Escaleras Barrio Lizcano 1	110.525.535.368	128.238.019.463	Pequeñas terrazas de muros agrietados	110.524.928.709	128.237.366.311	Caja en concreto para filtros	110.523.652.452	128.236.096.992	Casa abandonada, presenta pérdida total como consecuencia de grietas	110.519.155.054	128.233.108.179	Nacimiento de agua	110.515.660.199	128.230.297.051	Zona escarpada	110.513.346.524	128.228.905.323	
PUNTO	X	Y																					
Escaleras Barrio Lizcano 1	110.525.535.368	128.238.019.463																					
Pequeñas terrazas de muros agrietados	110.524.928.709	128.237.366.311																					
Caja en concreto para filtros	110.523.652.452	128.236.096.992																					
Casa abandonada, presenta pérdida total como consecuencia de grietas	110.519.155.054	128.233.108.179																					
Nacimiento de agua	110.515.660.199	128.230.297.051																					
Zona escarpada	110.513.346.524	128.228.905.323																					
Observaciones																							
Observaciones sobre electrodos: <ul style="list-style-type: none"> • De 1, 4 al 40, 43 al 56 en suelo, excepto el 33 que se encuentra en canal • De 2 al 3 en gradas de concreto • 41 en canal • 42 en andén • Muro de contención en: 1 • Agrietamiento en el muro de contención en: 5 al 8 • Pata de muro de contención en: 9 al 10 • Filtros en: 13 al 15, 25, 45 al 46 • Pozo de inspección de alcantarillado en 2 al 4, 18, 22, 44 • Agrietamiento de muro en: 24 • Tubo corrido manifestado por los residentes en: 28 al 30 • Zona de afloramiento de agua en: 36 al 43 • Pendiente mayor a 30° en: 47 al 53 	Condiciones climáticas <ul style="list-style-type: none"> • Medición: Nublado • Previas: Lluvia noche anterior 																						

Tabla 32.

Parámetros para el proceso de inversión de la tomografía G13.

INFORMACIÓN DE PROCESAMIENTO	
Numero de iteraciones	17
Damping	0,4
Iteraciones forward	5
Configuración	Dipolo-Dipolo

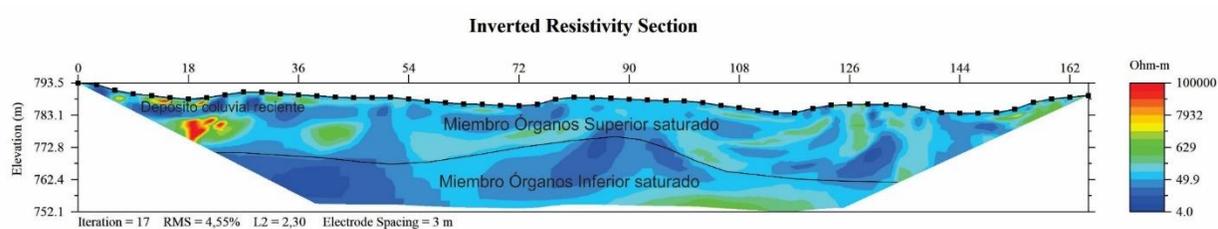


Figura 87. Interpretación geoelectrica tomografía G13.

7. Discusión

En la literatura se encuentran diferentes casos de estudio con resultados variables, por ejemplo (Adeyemo, Ojo, & Raheem, 2017) comparan las configuraciones Wenner y Schlumberger en un estudio realizado para la identificación de espesor y profundidad de un acuífero. Combinan mediciones de sondeos eléctricos verticales con mediciones de agua estática e identifica que las mediciones con la configuración Schlumberger tienen mayor correlación. Por otro lado (Vasantrao, Bhaskarrao, Mukund, Baburao, & Narayan, 2017) identificaron que para la configuración Wenner no es posible registrar valores de mayor profundidad a 100 metros, y en cambio la configuración Schlumberger con un espaciamiento corto de los electrodos puede lograr una mayor profundidad.

En el estudio de comparación de las configuraciones Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo realizado por (Zhou, Beck, & Adams, 2002) se reporta que la configuración que mejor delimita las áreas de posibles colapsos de sumideros es la de Dipolo-Dipolo, sin embargo a pesar de que las mediciones se vean afectadas por el ruido, esta configuración es más efectiva que la configuración Schlumberger; al mismo tiempo afirma que la configuración Wenner fue la menos sensible en la detección de las diferentes estructuras del terreno kárstico. En el trabajo realizado por (Moreira, Lapola, & Carrara, 2016) se recomienda la configuración Dipolo-Dipolo para modelar estructuras verticalizadas de alta resistividad, mientras que las configuraciones Wenner y Schlumberger se recomiendan para modelados de estructuras verticalizadas de baja resistividad.

En este estudio se realizaron pruebas sintéticas para 14 diferentes modelos geológicos aplicando las configuraciones Dipolo-Dipolo, Schlumberger y Wenner-Schlumberger. En las figuras 88 a 101 se muestra el porcentaje de error ponderado obtenido para diferentes combinaciones del damping y número de iteraciones utilizados en el proceso de inversión para todos los modelos. Se observa que para 13 modelos la configuración con menor error es Dipolo-Dipolo; sin embargo,

para el perfil FF modelo 2 la configuración con menor error es Wenner-Schlumberger, esto se atribuye a que esta configuración es más sensible a estructuras verticales como presenta el modelo geológico. Se observa una evidente variación del error ponderado para los diferentes conjuntos de parámetros en los modelos, exceptuando los modelos perfil CC modelo 2, perfil EE modelo 1 y perfil FF modelo 1. En particular en el perfil AA modelo 1, los cambios en el error ponderado para la configuración Dipolo-Dipolo no se perciben, lo que significa que no importa cual combinación de parámetros se utilicen el resultado va a ser similar. Para 26 de las 42 configuraciones, se obtuvo menor error con el valor del damping de 0.5, lo que representa la mayoría. En contraste el número de iteraciones necesarias para obtener el menor error se encuentran distribuidas en 5 y 20.

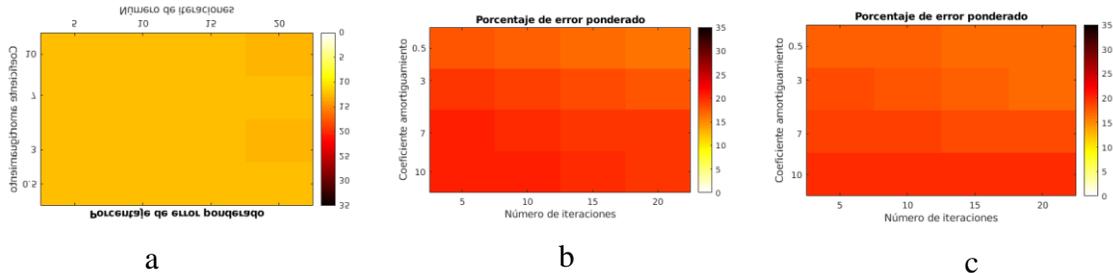


Figura 88. Porcentaje de error ponderado perfil AA-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

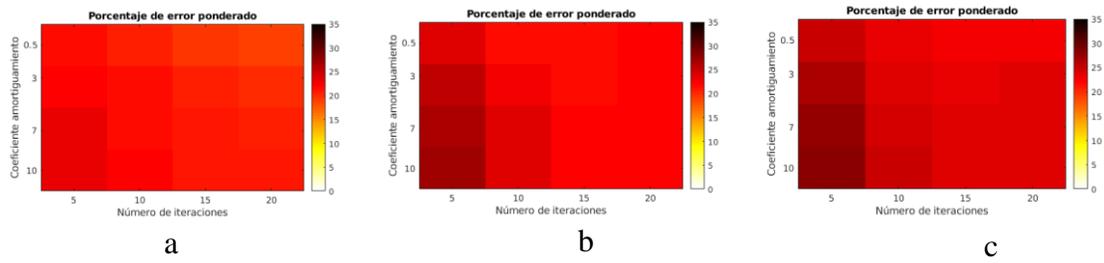


Figura 89. Porcentaje de error ponderado perfil AA-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

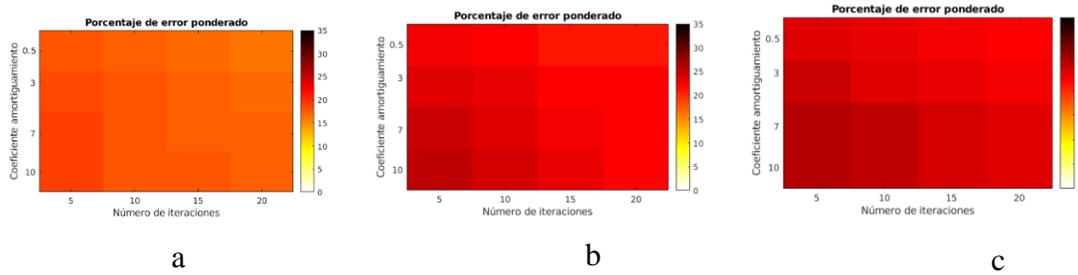


Figura 90. Porcentaje de error ponderado perfil BB-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

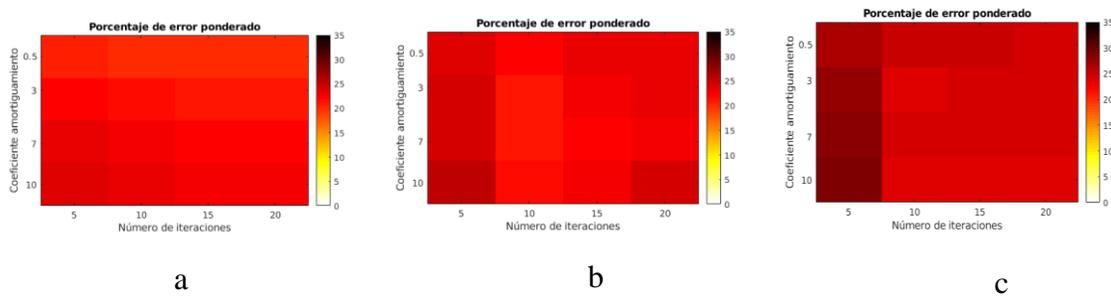


Figura 91. Porcentaje de error ponderado perfil BB-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

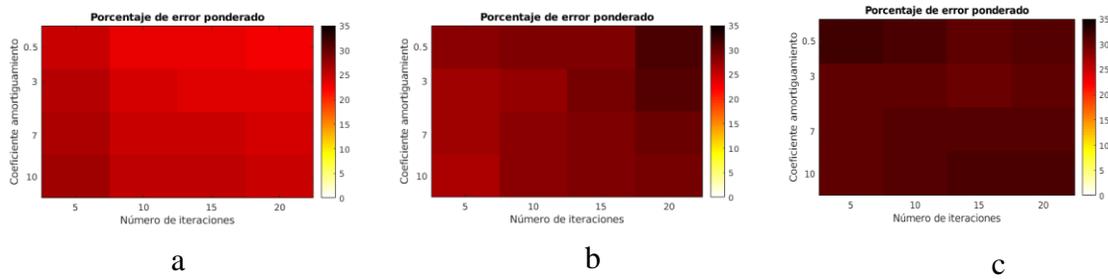


Figura 92. Porcentaje de error ponderado perfil BB-Modelo 3. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

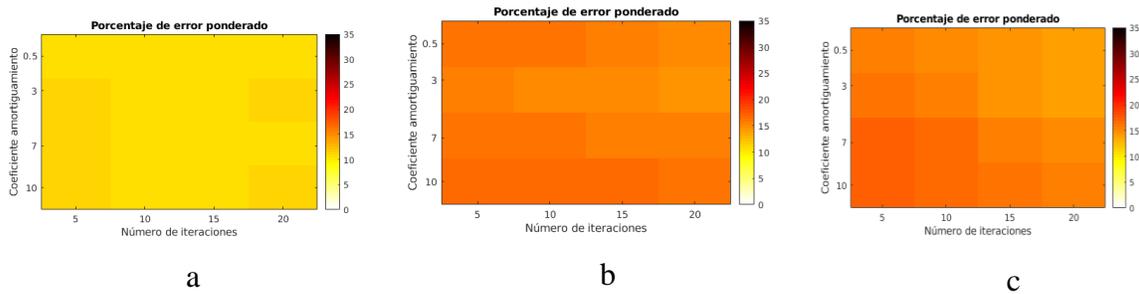


Figura 93. Porcentaje de error ponderado perfil CC-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

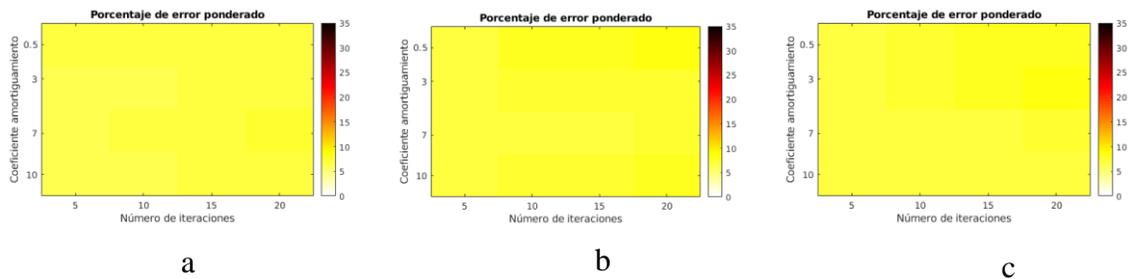


Figura 94. Porcentaje de error ponderado perfil CC-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

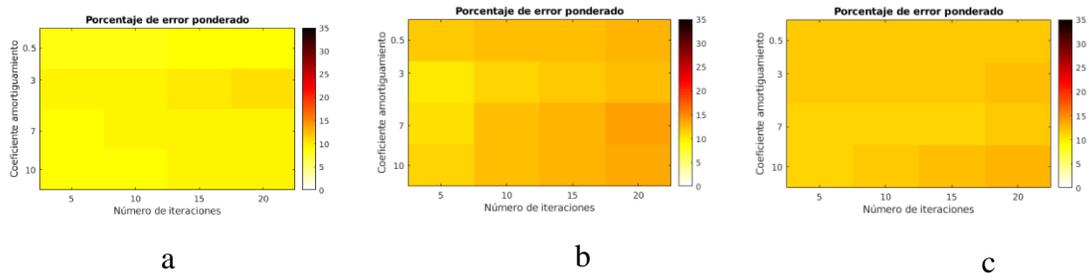


Figura 95. Porcentaje de error ponderado perfil DD-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

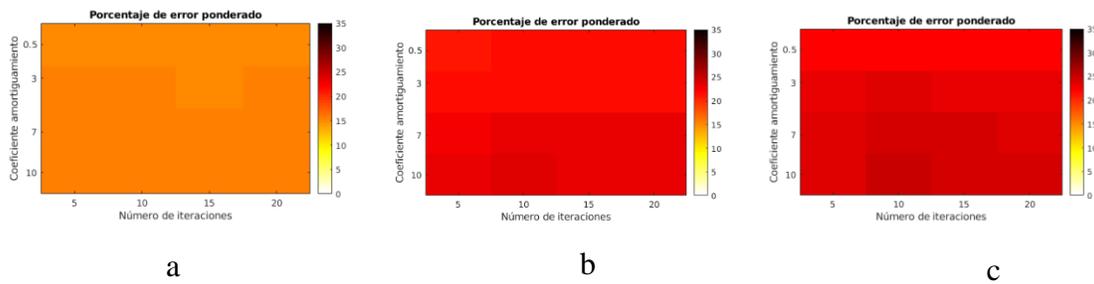


Figura 96. Porcentaje de error ponderado perfil DD-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

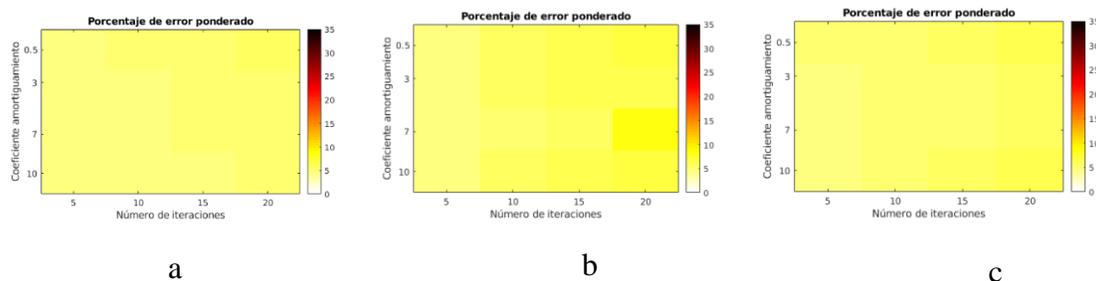


Figura 97. Porcentaje de error ponderado perfil EE-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

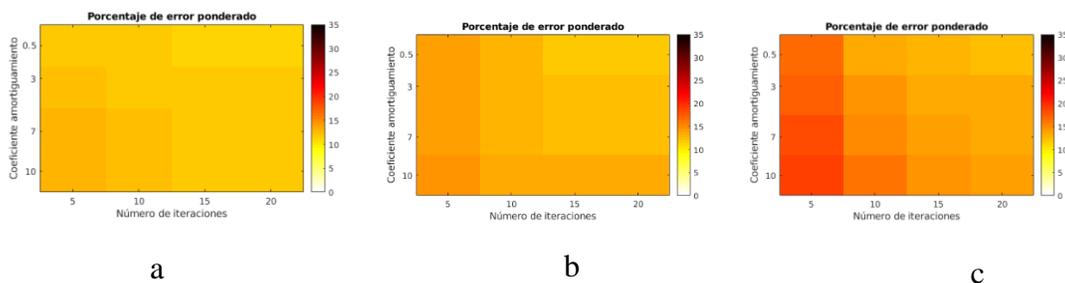


Figura 98. Porcentaje de error ponderado perfil EE-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

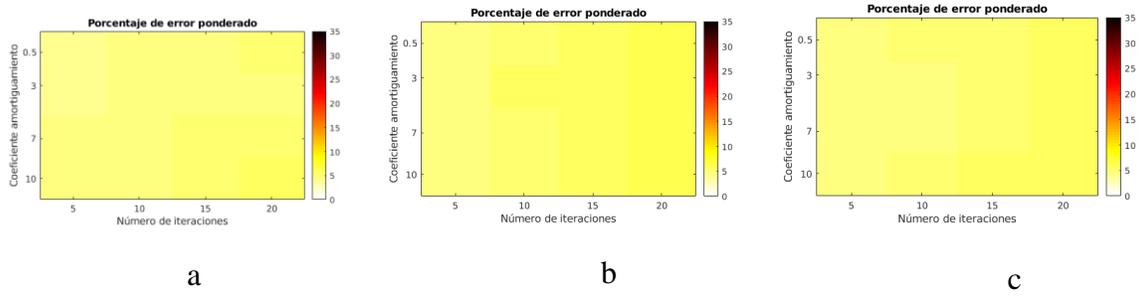


Figura 99. Porcentaje de error ponderado perfil FF-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

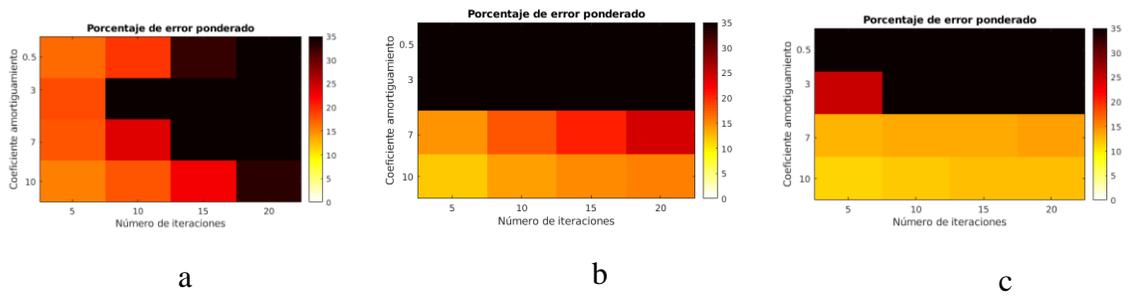


Figura 100. Porcentaje de error ponderado perfil FF-Modelo 2. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

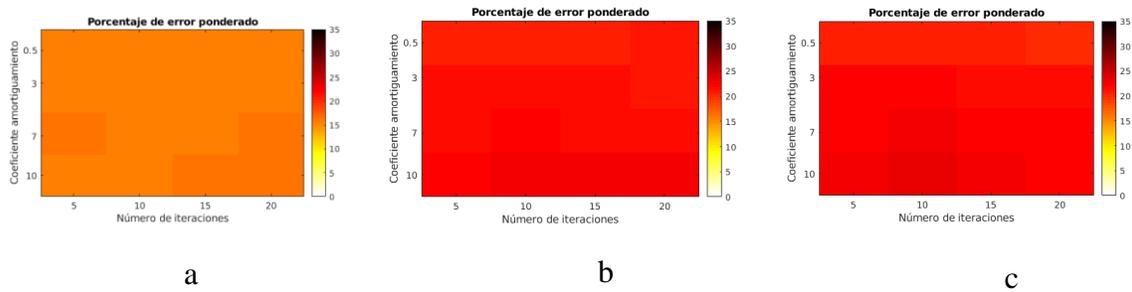


Figura 101. Porcentaje de error ponderado perfil GG-Modelo 1. a) Dipolo-Dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner-Schlumberger.

En la interpretación de las tomografías eléctricas se identifica un ajuste razonable con los modelos generados a partir de la información geológica. Para el caso de la tomografía G1, se identifica la Formación Tiburón a 60 metros de profundidad con valores de resistividad mayor a 400 Ohm-m y se encuentra en contacto fallado con el miembro Órganos Inferior, como se muestra en el perfil geológico entre la longitud +550 hasta +1100, figura 102, lo que corresponde al perfil CC modelo 2. Sin embargo, en el perfil geológico se observa que la Formación tiburón se encuentra aproximadamente a 100 metros de profundidad. El miembro Órganos evidencia zonas saturadas con valores de resistividades entre 1 y 17.8 Ohm-m y las zonas no saturadas en resistividades entre 17.8 y 400 Ohm-m.

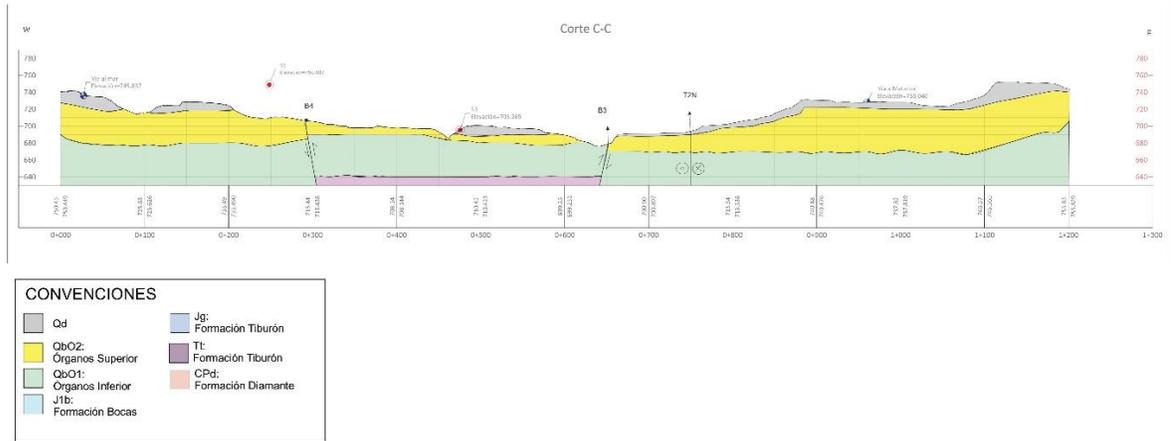


Figura 102. Perfil Geológico CC.

Tomado de: (Geomática & Sistemas, 2017)

En la tomografía G2 se identifica la formación Tiburón a 29 metros de profundidad, sin embargo, en el modelo geológico desde la longitud +800 hasta 1300, perfil FF modelo 2, la Formación Tiburón se encuentra en superficie. Figura 103, presenta resistividades entre 150 y 570 Ohm-m y se encuentra en contacto con el miembro Órganos Inferior y Superior con valores de resistividades entre 50 y 150 Ohm-m. El miembro Órganos Superior presenta zonas saturadas con valores de resistividades de 9.2 a 50 Ohm-m.

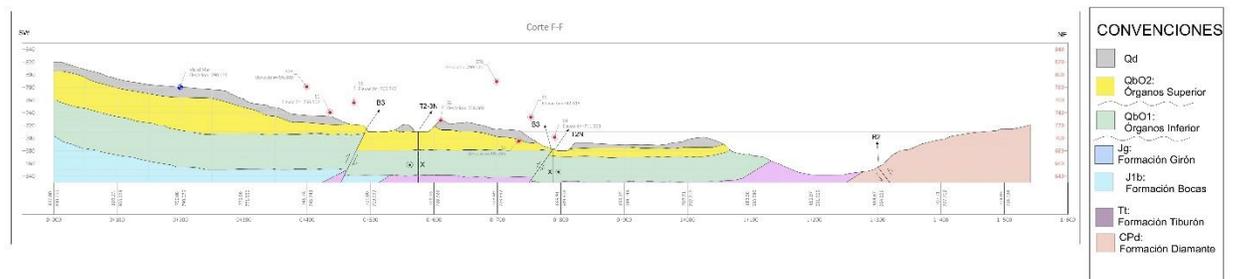


Figura 103. Perfil Geológico FF.

Tomado de: (Geomática & Sistemas, 2017)

En la tomografía G5 se identifica la formación Tiburón aproximadamente a 26 metros de profundidad, como se muestra en el perfil geológico desde la longitud +550 hasta +1000, perfil GG modelo 1, figura 104. Presenta valores de resistividad entre 500 y 10.000 Ohm-m. Se encuentra en contacto con el miembro Órganos, el cual presenta resistividades en zonas saturadas entre 1 y 17.8 Ohm-m y en zonas secas entre 17.8 y 500 Ohm-m. Los clastos presentes en esta formación muestran elevados valores de resistividad.

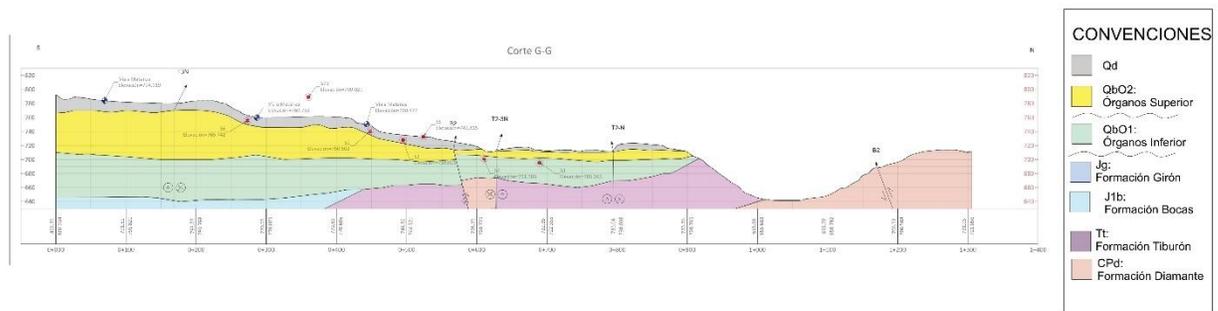


Figura 104. Perfil Geológico GG.

Tomado de: (Geomática & Sistemas, 2017)

En la tomografía G10, no refleja la capa las formaciones Diamante y Tiburón, debido a que la profundidad en la tomografía es aproximadamente 65 metros y estas formaciones como se evidencia en el perfil geológico desde la longitud +100 hasta +400, perfil BB modelo 1, figura 105, Se encuentran a 80 metros de profundidad. El miembro Órganos presenta zonas saturadas con resistividades entre 1 y 17.8 Ohm-m y zonas no saturadas con resistividades entre 17.8 y 316 Ohm-m. Esta formación refleja clastos con valores de resistividades elevados por encima de los 1000 Ohm-m.

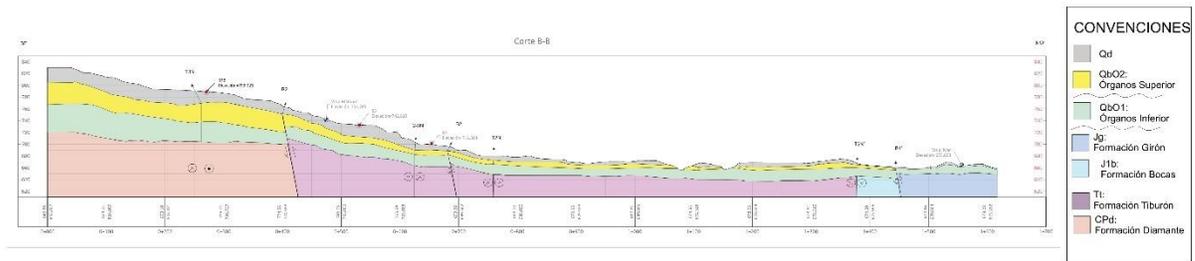


Figura 105. Perfil Geológico BB.

Tomado de: (Geomática & Sistemas, 2017)

8. Conclusiones

De acuerdo a las pruebas sintéticas realizadas en los diferentes modelos geológicos la configuración que muestra menor error en estructuras horizontales es la de Dipolo-Dipolo, y la configuración que menor error muestra a estructuras verticales es la de Wenner-Schlumberger. pág. 109.

Para los casos de los perfiles CC modelo 2, perfil EE modelo 1 y perfil FF modelo 1 la variación del error entre las tres configuraciones es muy pequeña, lo que significa que para ese caso es confiable utilizar cualquiera de las tres. pág. 108.

A partir del análisis entre las 1.722 pruebas sintéticas, 574 para la configuración Dipolo-Dipolo, 574 para la configuración Schlumberger y 574 para la configuración Wenner-Schlumberger para cada uno de los modelos geológicos, se seleccionó para la toma de datos en campo la configuración

Dipolo-Dipolo para 10 tomografías eléctricas y la configuración Wenner-Schlumberger para 2 tomografías eléctricas. pág. 79.

Para las tomografías G8, G9, G10, y G11 la interpretación de los cuerpos de depósitos recientes muestran una alta correspondencia entre los valores mayores a 5623 ohm-m correspondiente a clastos, dentro de valores de resistividades entre 17.8 y 316 ohm-m correspondiente a la matriz del depósito. Lo que se ajusta razonablemente al modelo geológico. pág. 93,95,97,99.

El miembro Órganos hidrogeológicamente presenta zona saturadas con resistividades entre 1 y 18 Ohm-m, este comportamiento hidrogeológico puede corresponder a zonas de posibles movimientos en masa; como también zonas no saturadas con resistividades por encima de 18 Ohm-m.

9. Recomendaciones

Se recomienda repetir periódicamente las tomografías para monitorear el subsuelo del área de estudio.

Se recomienda contrastar con otros métodos geofísicos.

Referencias Bibliográficas

- Adeyemo, I. A., Ojo, B. T., & Raheem, W. O. (2017). Comparison of Thickness and Depth Resolution Power of Wenner and Schlumberger Arrays: A Case Study of Temidire Quarters, Akure, Nigeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 05(03), 233–239.
- Advanced Geosciences, I. (AGI). (2009). *EarthImager 2D* (p. 139). p. 139.
- Geomática, & Sistemas, G. y optimización de. (2017). *Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga (barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María córdoba, Villa helena, Villa rosa, Villa maría)*. INFORME DE GEOLOGIA No.2.
- Hidalgo, A. A., Loke, M. H., Oscar-Fanton, G., & Cara-Rubí, E. (2004). *Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D y 3D)*. 600(5400), 1–36.
- Holland J.H. (1984). Genetic Algorithms and Adaptation. En *Department of computer and communication sciences* (Vol. 16). The university of Michigan.
- Hubach, E. (1952). *Interpretación geológica de la erosión y los deslizamientos en Bucaramanga y medidas de defensa*.
- INGEOMINAS. (2001). *Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga*. 270.
- Loke, D. M. (2000). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies - A practical guide to 2-D and 3-D surveys* Copyright. August 200(1999), 61.
- Loke, M. H. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*, (July), 136.
- Loke, M. H., & Barker, R. D. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60(6), 1682–1690.

- Mcgillivray, P.R., & Oldenburg, D. W. (1990). Methods for Calculating Fréchet for the Non-Linear Inverse Problem. *Geophysical Prospecting*, (October 1989), 499–524.
- Mcgillivray, Peter Robert. (1992). *Forward Modeling and Inversion*.
- Moreira, C. A., Lapola, M. M., & Carrara, A. (2016). Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer. *Geofísica Internacional*, 55(2), 119–129.
- O. Pazdirek and V. Bláha. (1996). Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. in *Proceedings of the EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts*.
- Philips Aizebeokhai, A. (2010). 2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design. *Scientific Research and Essays*, 5(23), 3592–3605.
- Roy, A; Apparao, A. (1971). *Depth of investigation in direct current methods*. 36(5).
- Royero, J. (2014). *Caracterización geoeléctrica del subsuelo en el sector floreña NW 6, Yopal-Casanare*. (c).
- Royero, Jm, & Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander Escala 1.400. 000. *Memoria Explicativa. INGEOMINAS*. 92p.
- S. Kirkpatrick; C. D. Gelatt; M. P. Vecchi Science. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(9), 671–680.
- Vasantrao, B. M., Bhaskarrao, P. J., Mukund, B. A., Baburao, G. R., & Narayan, P. S. (2017). Comparative study of Wenner and Schlumberger electrical resistivity method for groundwater investigation: a case study from Dhule district (M.S.), India. *Applied Water Science*, 7(8), 4321–4340.
- Vásquez, L. E., & Bermoudes, O. D. E. (2010). *Modelo geológico-geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga*. (34).

Zeferno A. da Fonseca Lopes. (2011). *El método de los elementos finitos: Una introducción*.

Unversdad Rafael Urdaneta.

Zhou, W., Beck, B. F., & Adams, A. L. (2002). Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental Geology*, 42(8), 922–928.