Prospección geoeléctrica para el modelado 2D de la resistividad del subsuelo en el área

perimetral del casco urbano del municipio de Málaga (Santander).

Jesús Leonardo Rincón Jaimes

Proyecto de grado para optar al título Magister en Geofísica

**Director:** 

**Carlos Alberto Ríos Reyes** 

**Doctor en Ciencias Aplicadas** 

Co – Director:

Carlos Alberto Chacón Ávila

Magister en Física

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Maestría en Geofísica

Bucaramanga

2020

## Dedicatoria

Otra etapa de mi vida que finaliza, un triunfo más, una victoria que celebrar. Son algunos de los sentimientos presentes en mí, en un día como hoy, que alcanzo una meta propuesta y postergada por bastante tiempo pero que desde ya, visualizó otras en un horizonte lleno de experiencias nuevas por vivir y caminos que recorrer. Los momentos buenos y malos, las victorias y tropiezos, aquello que dolió, sufrió y parecía no terminar hacen de mí la persona que soy, siempre aprendiendo de ellas, porque no me arrepiento de nada en la vida, aquello que no dejo recuerdos y felicidad, enseño lecciones de vida.

Dar gracias al creador de TODO es poco, agradecer por la vida, salud y sabiduría recibida es insuficiente, reconocer sus dones, regalos y milagros alrededor en cada respiro no es nada, porque no hay palabra para describir sus grandezas. TODO viene de Él, TODO es por Él y TODO vuelve a Él.

A mi familia, el pilar fundamental de mi vida, también quiero dedicar este nuevo capítulo de mi existencia, porque este logro es gracias a ustedes, por ustedes y para ustedes. A mi madre Gloria Nancy Jaimes González, a mi padre Wilson Rincón Álvarez, a mi segunda madre María Nubia Carvajal Celis, a mi hermana Laura Isabel, así como al resto de mi familia: abuelas, abuelos, tías, tíos, primas y primos. Todos ellos, aportaron, en mayor o menor proporción, su granito de arena en el proceso y por ello, hoy celebran conmigo este gran éxito en mi vida.

A mi novia, Carol Durán, por ser una persona como aquellas que ya no existen, una mujer en toda la extensión de la palabra y representar un gran apoyo incondicional en mi vida, un ser especial en el cual puedo confiar.

A las compañeras del apartamento (Paula V. Mancera, Angie F. Ramirez, Ana M. Sanchéz y Leidy Zafra), amigos y amigas, personas especiales que he conocido y con los cuales me siento como en familia, también este triunfo es para ustedes, parte esencial de mi vida, gracias por los buenos recuerdos de los momentos compartidos con ustedes.

## Agradecimientos

GRACIAS a Dios, y al Espíritu Santo por la vida, salud, sabiduría y las ganas de luchar al levantarme todos los días. AGRADECIMIENTOS para la virgen María y el niño Jesús por concederme la posibilidad de crecer como persona, formarme académicamente, desarrollarme profesionalmente, hacer realidad los sueños y deseos y llegar más allá de ellos.

La Universidad Industrial de Santander, un espacio donde crecí como persona, me formé como académico y respondí como profesional solo se puede llevar en el alma. Las escuelas de Física, Geología e Ingeniería Civil con sus grupos de investigación en Geología Básica y Aplicada y Geomática, lugares donde los miedos y temores se transforman en fortalezas y certezas imprime un sello imborrable en el corazón. Gracias al personal administrativo, docente y auxiliares por su calidad humana. Agradecimiento especial para Rocío del Pilar Bernal, José David Sanabria, Jorge Eduardo Pinto, Luis Núñez y John Díaz.

Al director de mi trabajo de investigación, el Doctor Carlos Alberto Ríos Reyes, a mi codirector Carlos Alberto Chacón Ávila y a mi tutor Luis Eduardo Moreno Torres ETERNAS GRACIAS por su paciencia, comprensión y dedicación para llevar a feliz término el desarrollo del presente informe. A mis jurados, por sus sugerencias, correcciones y exigencias en pro de mejorar cada día.

De manera especial, quiero agradecer al grupo de trabajo y de campo, María Angélica Salamanca, José Tarazona y Natalia Rueda; hoy tengo el honor de llamarlos no solo amigos, ellos son compañeros y colegas para toda la vida, que con su ayuda y dedicación contribuyeron a este logro. Gracias a los habitantes de los municipios de Málaga y San José de Miranda por abrirme las puertas de sus casas y prestarme el pedacito de tierra que Dios les regaló para realizar la práctica. Un hermoso lugar que me llevare en el corazón y nunca olvidaré.

¡Muchas gracias a todos!

# Contenido

1. Planteamiento del problema
2. Localización de la zona de estudio
3. Marco de Referencia
3.1 Marco Geológico
3.2 Marco Teórico
3.2.1 Generalidades de los estudios de prospección geoeléctrica
3.2.2 Tipos de prospecciones geoeléctricas
3.2.3 Elección de una determinada matriz
3.2.4 Propiedades eléctricas de las rocas
3.2.5 Teoría básica de inversión
3.3 Análisis estado del arte
4. Generalidades del Proyecto
4.1 Pregunta de investigación
4.2 Objetivos
4.2.1 Objetivo General
4.2.2 Objetivos Específicos
5. Justificación
6. Metodología

6.1 Análisis de la información existente	57
6.2 Adquisición y procesamiento de los Sondeos Eléctricos Verticales	58
6.3 Generación de modelos sintéticos 2D	61
6.3.1 Modelos sintéticos.	
6.3.2 Modelado Directo "Forward Modelling"	
6.3.3 Modelado Inverso.	
6.3.4 Determinación de los parámetros óptimos	69
6.4 Adquisición de datos (Tomografías de Resistividad Eléctrica)	71
6.5 Procesamiento de la información adquirida en campo	73
6.6 Interpretación y análisis	75
6.7 Redacción y defensa	76
7. Resultados	77
7.1 Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.)	77
7.2 Modelos sintéticos 2D	
7.3 Tomografías de Resistividad Eléctrica (T.R.E)	
8. Discusión de Resultados	
9. Conclusiones	
10. Recomendaciones	
Referencias Bibliográficas	
Apéndices	

# Lista de Figuras

Pág.
Figura 1. Población y extracción de agua en el tiempo
Figura 2. Localización de la zona de interés (delimitada por la línea blanca)
<i>Figura 3</i> . Geología de la zona de interés
Figura 4. Superficies equipotenciales y dirección del flujo de corriente generada por el electrodo
(fuente de corriente)
Figura 5. Configuración, convencional de 4 electrodos para realizar la medición de resistividad
de un medio (subsuelo)
Figura 6. Principales configuraciones, arreglos, distribuciones matrices o modalidades utilizadas,
con su respectivo factor geométrico
Figura 7. Tres modelos diferentes para estudios geoeléctricos. a) 1D. b) 2D. c) 3D 40
Figura 8. Secuencia de mediciones para realizar un sondeo eléctrico vertical (S.E.V). a. Matriz
Wenner. b. Arreglo Schlumberger
Figura 9. Secuencia de mediciones para realzar una tomografía de resistividad eléctrica
(T.R.E.)
Figura 10. Función de sensibilidad 1-D, con el valor de máxima sensibilidad y la profundidad
media de investigación. a) Configuración Polo – Polo. b) Matriz Wenner alpha
Figura 11. Función de sensibilidad 2D para las matrices Wenner, Wenner-Schlumberger y
Dipolo-Dipolo

Figura 12. Resistividades de las principales rocas, suelos y minerales. La resistividad	
corresponde al inverso de la conductividad eléctrica.	49
Figura 13. Etapas del procedimiento de inversión eléctrica.	51
Figura 14. Distribución de usos del agua para el año 2014	55
Figura 15. Equipo Terrameter SAS 1000 de ABEM, utilizado para la adquisición de cada	
SEV	60
Figura 16. Flujo de trabajo para la generación y el procesamiento de modelos sintéticos de	
resistividad eléctrica 2D	63
Figura 17. Configuración de los parámetros del modelado directo, análogo para todos los	
perfiles sintéticos	66
Figura 18. Tomógrafo SuperSting R8/IP/SP, equipo necesarios en la adquisición de datos de	
TRE	73
Figura 19. Uso del equipo terrameter SAS 1000 de ABEM para la adquisición de un sondeo	
Eléctrico Vertical (S.E.V.).	78
Figura 20. Localización de los Sondeos Eléctricos Verticales (S) realizados	78
Figura 21. Procesamiento del SEV1 (RUIS1A) por medio del software IPI2Win	81
Figura 22. Procesamiento del SEV RUIS2A por medio del software IPI2Win	83
Figura 23. Modelo UIS 1_2 integrado por los SEV RUIS1A y RUIS2A	85
Figura 24. Procesamiento del SEV RUIS3A por medio del software IPI2Win	87
Figura 25. Procesamiento del SEV RUIS4A por medio del software IPI2Win	90
Figura 26. Modelo UIS 4_3 constituido por los SEV RUIS4A y RUIS3A	91
Figura 27. Procesamiento del SEV RCREA1 por medio del software IPI2Win.	93

Figura 28. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical RCREA2 por medio del software
IPI2Win
Figura 29. Perfil RCREA constituido por los SEV RCREA1 y RCREA2
Figura 30. Procesamiento del SEV RCREW1 por medio del software IPI2Win
Figura 31. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical RCREW2 por medio del software
IPI2Win
Figura 32. Modelo RCREW integrado por los SEV RCREW1 y RCREW2 103
Figura 33. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical ROVI1 por medio del software
IPI2Win
Figura 34. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical ROVI2 por medio del software
IPI2Win
Figura 35. Modelo ROVI compuesto por los SEV ROVI1 y ROVI2 109
Figura 36. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical RYERB1 por medio del software
IPI2Win
Figura 37. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical ELM1 por medio del software
IPI2Win
Figura 38. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical ELM2 por medio del software
IPI2Win
Figura 39. Perfil ELM integrado por los SEV ELM1 y ELM2 118
Figura 40. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical WELM1 por medio del software
IPI2Win
Figura 41. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical WELM1 por medio del software
IPI2Win

Figura 42. Modelo WELM integrado por los SEV WELM1 y WELM2 123
Figura 43. Localización de los modelos sintéticos (MS) desarrollados 124
Figura 44. Perfil geológico 1 llamado UIS 124
Figura 45. Modelo sintético de resistividad eléctrica 2D del perfil UIS 125
Figura 46. Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. Configuración Dipolo –
Dipolo. b. Matriz Wenner – Schlumberger. c. Arreglo Schlumberger
Figura 47. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras
secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en
porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro 128
Figura 48. Parámetros óptimos para la configuración Wenner – Schlumberger. Gráfica
normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con
respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y
diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro 130
Figura 49. Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras
secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en
porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro
Figura 50. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Dipolo –Dipolo

Figura 51. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Wenner – Schlumberger
Figura 52. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Schlumberger
Figura 53. Perfil geológico 2 llamado Aeropuerto
Figura 54. Modelo sintético de resistividad eléctrica 2D del perfil Aeropuerto
Figura 55. Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. Configuración Dipolo –
Dipolo. b. Matriz Wenner – Schlumberger. c. Arreglo Schlumberger
Figura 56. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras
secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en
porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro
Figura 57. Parámetros óptimos para la configuración Wenner – Schlumberger. Gráfica
normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con
respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y
diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro
Figura 58. Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras
secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en
porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro

Figura 59. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Dipolo – Dipolo
Figura 60. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Wenner- Schlumberger
Figura 61. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Schlumberger
Figura 62. Modelo geológico 3 llamado Estadio/Normal144
Figura 63. Modelo sintético de resistividad eléctrica 2D del perfil Estadio/Normal 145
Figura 64. Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. Configuración Dipolo –
Dipolo. b. Matriz Wenner – Schlumberger. c. Arreglo Schlumberger
Figura 65. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras
secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en
porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro 147
Figura 66. Parámetros óptimos para la configuración Wenner - Schlumberger. Gráfica
normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con
respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y
diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro
Figura 67. Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras

secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en
porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro 150
Figura 68. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Dipolo – Dipolo
Figura 69. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Wenner – Schlumberger
Figura 70. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Schlumberger
Figura 71. Perfil geológico 4 llamado Laguna Seca
Figura 72. Modelo sintético de resistividad eléctrica 2D del perfil Laguna Seca 154
Figura 73. Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. Configuración Dipolo –
Dipolo. b. Matriz Wenner – Schlumberger. c. Arreglo Schlumberger 155
Figura 74. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras
secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en
porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro 157
Figura 75. Parámetros óptimos para la configuración Wenner - Schlumberger. Gráfica
normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con
respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y
diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro

Figura 76. Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras
secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en
porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro 160
Figura 77. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Dipolo – Dipolo
Figura 78. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Wenner - Schlumberger 162
Figura 79. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Schlumberger
Figura 80. Modelo geológico 5 llamado Guácimo – Naranjitos 164
Figura 81. Modelo sintético de resistividad eléctrica 2D del perfil Guásimo - Naranjitos 164
Figura 82. Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. Configuración Dipolo –
Dipolo. b. Matriz Wenner – Schlumberger. c. Arreglo Schlumberger
Figura 83. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras
secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertido y diferencia, medida
en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro
Figura 84. Parámetros óptimos para la configuración Wenner - Schlumberger. Gráfica
normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con

respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertido y
diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro 168
Figura 85. Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras
secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertido y diferencia, medida
en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro
Figura 86. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje entre las dos primeras, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Dipolo –Dipolo
Figura 87. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje entre las dos primeras, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Wenner – Schlumberger 172
Figura 88. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en
porcentaje entre las dos primeras, expresando el error cuadrático medio porcentual.
Configuración Schlumberger
Figura 89. Modelo geológico de Km 8 – La Mina 173
<i>Figura 90</i> . Modelo sintético de resistividad eléctrica Km 8 – La Mina 174
Figura 91. Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. arreglo Dipolo – Dipolo. b.
distribución Wenner – Schlumberger. c. configuración Schlumberger
Figura 92. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con
valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras
secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertida y diferencia, medida
en porcentaje, entre ellas. a y b. primer filtro. c – d. segundo filtro

Figura 93. Parámetros óptimos para la configuración Wenner - Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertida y Figura 94. Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertida y diferencia, medida Figura 95. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Figura 96. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Figura 97. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Figura 98. Uso del tomógrafo SuperSting R8/IP/SP para la adquisición de una Tomografía de Figura 99. Localización de las Tomografías de Resistividad Eléctrica (T) desarrollados...... 185 Figura 100. Procesamiento de la tomografía UIS con los parámetros óptimos. Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y modelo de 

Figura 101. Pseudosección de datos desajustados con las zonas más fiables y aquellas áreas de
mayor incertidumbre. a. Primer análisis realizado. b. Segundo análisis desarrollado 188
Figura 102. Grafica de datos desajustados de superficie con el error relativo de cada uno de
ellos. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado
Figura 103. Histograma de datos desajustados. La línea azul indica el porcentaje de error
máximo. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado
Figura 104. Curva de convergencia con la disminución del valor RMS o desajuste de los datos
en cada iteración. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado 190
Figura 105. Gráfica de dispersión entre los datos de resistividad aparente calculada con los datos
de resistividad aparente medida. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado. 190
Figura 106. Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 1 (UIS) 191
Figura 107. Procesamiento de la tomografía Aeropuerto con los parámetros óptimos.
Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y
modelo de resistividad invertida
Figura 108. Pseudosección de datos desajustados con las zonas más fiables y aquellas áreas de
mayor incertidumbre. a. Primer análisis realizado. b. Segundo análisis desarrollado 194
Figura 109. Grafica de datos desajustados de superficie con el error relativo de cada uno de
ellos. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado194
Figura 110. Histograma de datos desajustados. La línea azul indica el porcentaje de error
máximo. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado
Figura 111. Curva de convergencia con la disminución del valor RMS o desajuste de los datos
en cada iteración. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado

Figura 112. Gráfica de dispersión entre los datos de resistividad aparente calculada con los datos
de resistividad aparente medida. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado. 196
Figura 113. Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 2
(Aeropuerto)
Figura 114. Procesamiento de la tomografía Estadio/Normal con los parámetros óptimos.
Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y
modelo de resistividad invertida
Figura 115. Pseudosección de datos desajustados con las zonas más fiables y aquellas áreas de
mayor incertidumbre. a. Primer análisis realizado. b. Segundo análisis desarrollado 200
Figura 116. Grafica de datos desajustados de superficie con el error relativo de cada uno de
ellos. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado
Figura 117. Histograma de datos desajustados. La línea azul indica el porcentaje de error
máximo. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado
Figura 118. Curva de convergencia con la disminución del valor RMS o desajuste de los datos
en cada iteración. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado 201
Figura 119. Gráfica de dispersión entre los datos de resistividad aparente calculada con los datos
de resistividad aparente medida. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado. 202
Figura 120. Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 3
(Estadio/Normal)
Figura 121. Procesamiento de la tomografía Laguna Seca con los parámetros óptimos.
Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y
modelo de resistividad invertida

Figura 122. Análisis estadístico de la TRE 4. a. Pseudosección de datos desajustados con las
zonas más fiables y aquellas áreas de mayor incertidumbre. b. Grafica de datos desajustados de
superficie con el error relativo de cada uno de ellos
Figura 123. Análisis estadístico de la TRE 4. Histograma de datos desajustados. La línea azul
indica el porcentaje de error máximo 205
Figura 124. Análisis estadístico de la TRE 4. a. Gráfica de dispersión entre los datos de
resistividad aparente calculada con los datos de resistividad aparente medida. b. Curva de
convergencia con la disminución del valor RMS o desajuste de los datos en cada iteración 206
Figura 125. Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 4 (Laguna
Seca)
Figura 126. Procesamiento de la tomografía Laguna Seca con los parámetros óptimos.
Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y
modelo de resistividad invertida
Figura 127. Pseudosección de datos desajustados con las zonas más fiables y aquellas áreas de
mayor incertidumbre. a. Primer análisis realizado. b. Segundo análisis desarrollado 210
Figura 128. Grafica de datos desajustados de superficie con el error relativo de cada uno de
ellos. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado
Figura 129. Histograma de datos desajustados. La línea azul indica el porcentaje de error
máximo. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado
Figura 130. Curva de convergencia con la disminución del RMS o desajuste de los datos en cada
iteración. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado

Figura 131. Gráfica de dispersión entre los datos de resistividad aparente calculada con los
datos de resistividad aparente medida. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis
desarrollado
Figura 132. Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 5 (Guásimo -
Naranjitos)
Figura 133. Procesamiento de la tomografía Km 8 / La mina. Pseudosección de resistividad
aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y modelo de resistividad
invertida
Figura 134. Análisis estadístico de la TRE 6. a. Pseudosección de datos desajustados. b.
Diagrama de superficie de datos desajustados
Figura 135. Análisis estadístico de la TRE 6. Histograma de datos desajustados. La línea azul
indica el porcentaje de error máximo
Figura 136. Análisis estadístico de la TRE 6. a. Gráfica de dispersión entre los datos de
resistividad aparente calculada con los datos de resistividad aparente medida. b. Curva de
convergencia con la disminución del valor RMS o desajuste de los datos en cada iteración 216
Figura 137. Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 6 (Km8/La
Mina)
Figura 138. Ejemplo de los patrones de ruido sobre los modelos invertidos. a. Efecto de
footprints o huellas. b. Influencia del fenómeno de efecto de borde

# Lista de Tablas

# Pág.

Tabla 1. La profundidad media de investigación para las principales matrices. Z <sub>e</sub> /a corresponde
a la relación entre la profundidad (Z) y la distancia de separación de electrodos (a) y L es la
longitud total de la configuración
Tabla 2. Selección de los parámetros en el filtro 1 (en azul) y aplicación del filtro2 con dos
unidades por encima y debajo del valor seleccionado en primer filtro. Se emplean dos filtros por
cada configuración
Tabla 3. Ubicación de los Sondeos Eléctricos desarrollados (S.E.V.). 79
Tabla 4. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 1 (RUIS1A). 80
Tabla 5. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RUIS1A. 81
Tabla 6. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 2 (RUIS2A). 82
Tabla 7. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RUIS2A. 83
Tabla 8. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 3 (RUIS3A). 86
Tabla 9. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RUIS3A. 87
Tabla 10. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 4 (RUIS4A). 88
Tabla 11. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RUIS4A. 90
Tabla 12. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 5 (RCREA1)
Tabla 13. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RCREA1
Tabla 14. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 6 (RCREA2)

Tabla 15. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RCREA2.	
Tabla 16. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 7 (RCREW1).	
Tabla 17. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical 7 (RCREW1).	
Tabla 18. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 8 (RCREW2).	100
Tabla 19. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RCREW2.	102
Tabla 20. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 9 (ROVI1).	
Tabla 21. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical ROVII.	105
Tabla 22. Datos adquiridas por el Sonde Eléctrico Vertical 10 (ROVI2).	106
Tabla 23. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical ROVI2.	107
Tabla 24. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 11 (RYERB)	109
Tabla 25. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RYERB1.	111
Tabla 26. Datos adquiridas por el Sonde Eléctrico Vertical 12 (ELM1).	
Tabla 27. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical ELM1.	114
Tabla 28. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 13 (ELM2)	115
Tabla 29. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical ELM2.	117
Tabla 30. Datos adquiridas por el Sonde Eléctrico Vertical 14 (WELM1).	
Tabla 31. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical WELM1.	
Tabla 32. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 14 (WELM2).	121
Tabla 33. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical WELM2.	
Tabla 34. Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las conf	iguraciones
realizadas, según el modelo sintético 1	127
Tabla 35. Error porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético de	l (UIS). 134

Tabla 36. Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las configuraciones
realizadas, según el modelo sintético 2
Tabla 37. Error porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético 2
(Aeropuerto)
Tabla 38. Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las configuraciones
realizadas, según el modelo sintético 3
Tabla 39. Error porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético 3
(Estadio/Normal)
Tabla 40. Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las configuraciones
realizadas, según el modelo sintético 4156
Tabla 41. Error porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético 4 (Laguna
Seca)
Tabla 42. Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las configuraciones
realizadas, según el modelo sintético 5
Tabla 43. Error porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético 5 (Guásimo
- Naranjitos)
Tabla 44. Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las configuraciones
realizadas, según el modelo sintético 6
Tabla 45. Error RMS porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético 6 (Km
8 – La Mina)
Tabla 46. Localización de las Tomografías de Resistividad Eléctrica (T.R.E.)    184
Tabla 47. Correlación entre las características geológicas y las propiedades físicas.    226

# Lista de Apéndices

Pág.

### Resumen

**Título:** Prospección geoeléctrica para el modelado 2D de la resistividad del subsuelo en el área perimetral del casco urbano del municipio de Málaga (Santander).<sup>\*</sup>

Autor: Jesús Leonardo Rincón Jaimes\*\*

**Palabras claves:** Prospección Geoeléctrica, Resistividad, Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Santander (Colombia).

#### **Descripción:**

La prospección geoeléctrica determina la distribución de la resistividad del subsuelo, realizando mediciones (o toma de datos) en superficie, para a partir de dichas medidas, estimar la resistividad verdadera de las estructuras presentes en el área de estudio. Los métodos de resistividad eléctrica han sido ampliamente utilizados para la descripción y caracterización del subsuelo, siendo implementados en varias ramas de las ciencias (ingeniería, geología y antropología, entre otras).

El presente informe corresponde al proyecto de grado para optar al título de Magister en Geofísica, en la modalidad trabajo de investigación, el cual pretende construir, a través de la prospección geofísica aplicada, Sondeo Eléctrico Vertical (VES) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), el modelo 2D de resistividad eléctrica del subsuelo, mediante el procesamiento de datos sintéticos para el tratamiento de información geoeléctrica con fines hidrogeológicos.

Los resultados obtenidos contribuyen, mejoran y profundizan el conocimiento y descripción del subsuelo presente en la periferia y bajo el casco urbano del municipio de Málaga y determinan la presencia de un acuífero confinado, aislado de la atmósfera por una capa impermeable constituida por arcilla - limo, materiales altamente meteorizados, localizados en el eje del sinclinal de Málaga, bajo la zona urbana.

<sup>\*</sup> Proyecto de grado de Maestría

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Maestría en Geofísica Director: Carlos Alberto Ríos R.

### Abstract

**Title:** Geoelectrical prospecting for the 2D modelling of the resistivity of the subsurface in the perimeter of the area in the urban zone of the Malaga town..\*

Author: Jesús Leonardo Rincón Jaimes\*\*

**Key words**: Geolectrical prospecting, Resistivity, Vertical Electric Sounding (VES), Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Santander (Colombia).

### **Description:**

The geoelectrical prospecting determines the distribution of the resistivity of the subsoil, taking a measurement in the surface, based on this measurement can estimate the true resistivity of the present structures in the study area. The electrical resistivity methods have been widely used for the description and characterization of the subsoil; this is being implemented in several branches of the sciences (engineering, geology, anthropology and others).

The actual report is a degree project on purpose of being granted the title of Magister in Geophysics, in the research work modality, which pretends to build through the applied geophysical prospection, Vertical Electric Sounding (VES) and Electrical Resistivity Tomography (ERT), the 2D model of electrical resistivity of the subsurface, from the processing of synthetic data to the treatment of geoelectrical information with hydrogeological purposes.

The obtained results contribute, improve and deepen in the knowledge and description of the subsoil in the periphery and under the urban zone of the Malaga town and determinates the presence of a confined aquifer, isolated from the atmosphere by an impermeable layer constituted by clay - silt materials highly weathered and located in the axis of Málaga syncline, under the urban zone.

<sup>\*</sup> Master Degree Thesis

<sup>\*\*</sup> Science Faculty. School of Physics Master in Geophysics Director: Carlos Alberto Ríos R.

### 1. Planteamiento del problema

El crecimiento poblacional, el desarrollo de diferentes prácticas económicas (como por ejemplo la ganadería y la agricultura), el uso inadecuado del suelo, la construcción en sectores no aptos para determinado fin, la acelerada y creciente deforestación en las últimas décadas y la constante contaminación de diversas fuentes hídricas, entre otros factores, generan cada día, el aumento en la demanda de suministro de agua.

La Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO (2016) señala que en el año 2010 la población mundial correspondía a 7.000 millones de habitantes y la extracción de agua supera los 4.000 Km<sup>3</sup> anuales (figura 1). Se estima, que actualmente se consume el 54% del agua dulce y, a mediados del siglo XXI la población mundial alcanzará los 12.000 millones de habitantes previstos, la demanda de agua se habrá duplicado y las reservas hídricas de nuestro planeta llegarán a su tope (FAO, 2016).

El área de interés en el presente estudio no es la excepción, ya que presenta una fuerte problemática causada por el desabastecimiento del recurso hídrico, donde las fuentes superficiales de agua presentes son insuficientes para satisfacer las necesidades básicas y los requerimientos de la población y el suministro de la misma no alcanza para garantizar la cobertura total.



Figura 1. Población y extracción de agua en el tiempo. (FAO, 2016).

Las condiciones descritas previamente representan un serio obstáculo en el desarrollo social de la comunidad e impide el crecimiento cultural y económico del área de trabajo, donde el mayor centro poblado lo constituye el municipio de Málaga con 19.239 habitantes, de los cuales 81% de ellos, es decir, 15.569 personas se encuentran ubicados en el casco urbano con un crecimiento anual del 0,1% (EOT Málaga, 2015).

Según lo anterior, es necesario profundizar en el conocimiento del subsuelo y de la capacidad acuífera presente en la periferia y bajo el casco urbano del municipio de Málaga (Santander).

Sin embargo, los estudios sobre la existencia, localización y disponibilidad de esta son pocos, incompletos o se encuentran fragmentados y en ocasiones no existe información sobre los recursos hídricos del área; solo se presentan datos del agua superficial, de escasos volúmenes, generalmente contaminada y no apta para el consumo humano.

### 2. Localización de la zona de estudio

El área de interés se encuentra localizada en el nororiente de Colombia, sobre la Cordillera Oriental, en el sector este del Departamento de Santander, en jurisdicción de la Provincia García Rovira, incluyendo el casco urbano del municipio de Málaga y la periferia de este.

La zona de trabajo está limitada en Datum Magna Sirgas origen en la zona central de coordenadas planas, desde Y (o norte) 1'231.642 hasta 1'233.825 y X (o este) de 1'147.167 a 1'150.086, abarcando un área total de 6,37 kilómetros cuadrados, distribuidos en 2 municipios, comprendiendo el sector sur del municipio de Málaga (cabecera municipal y varios sectores de las veredas Buenavista, Barzal, Guásimo y San Luis) y el norte del municipio de San José de Miranda (área rural perteneciente a la vereda Yerbabuena) (Figura 2).



*Figura 2*. Localización de la zona de interés (delimitada por la línea blanca). Tomado y modificado de SGC (2013).

## 3. Marco de Referencia

## 3.1 Marco Geológico

El área de estudio se encuentra localizada sobre el extremo meridional (borde oriental) del Macizo de Santander, en la parte sur del páramo del Almorzadero (Alcaldía de Málaga, 2017); sector constituido por rocas sedimentarias pertenecientes (según la nomenclatura de la Cuenca Maracaibo) a formaciones cretáceas Río Negro (Kirn) y Tibú – Mercedes (Kitm), así como por diferentes tipos de depósitos sedimentarios (figura 3).

- Formación Río Negro (Kirn): De edad Valanginiano, la formación Río Negro (Kirn) se encuentra constituida por un conjunto muy variable de lutitas oscuras, físiles y laminadas intercaladas con areniscas cuarcíticas de grano fino y algunos conglomerados, con un alto grado de fracturación. Mientras el límite inferior es de discordancia sobre rocas pre – cretáceas, el límite superior de esta formación corresponde a una laguna estratigráfica. Litológicamente, la Formación Rio Negro (Kirn) puede ser correlacionada con la formación Tambor (Kita) de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (Vargas *et al*, 1976).
- Formación Tibú Mercedes (Kitm): La edad de la Formación Tibú Mercedes (Kitm) corresponde a Aptiano superior a Albiano inferior. El segmento inferior (Tibú) está integrado por areniscas negras de grano grueso a guijosas y caliza fosilífera gris con unas pocas capas de lutitas negras y areniscas de grano fino, micáceas y ferruginosas. La

Formación Mercedes, por su parte, consiste de intercalaciones de caliza gris fosilífera, a veces arenosa, lutitas oscuras a negras, micáceas y carbonosas, y areniscas grises de grano fino a medio, localmente muy calcáreas. El límite superior con la suprayecente Formación Aguardiente (Kia) es concordante y gradacional y el límite infrayacente con la Formación Río Negro (Kirn) no está bien definido (Vargas *et al*, 1976).

- Depósitos coluviales (Qc): Incluyen depósitos de talud, derrubios y material de avalancha, acumulados en las partes finales de las áreas con fuertes pendientes. Presentan morfología colinada y se encuentran integrados por fragmentos angulares de roca (arenisca y caliza) dentro de una matriz arenosa amarillenta (Vargas *et al*, 1976). De pequeñas extensiones, este tipo de depósito se encuentra localizado en el costado suroccidental (Barrio María Auxiliadora) y al nororiente (costado de la pista del aeropuerto) de la cabecera municipal de Málaga (EOT Málaga 2015).
- Depósitos aluviales (Qal): Producto del material depositado en los valles actuales de los ríos y quebradas mayores (principalmente las quebradas La Magnolia y La Malagueña o Chorrerón), compuesto por niveles gravosos, arenosos y lodosos, junto a cantos y gravas de diferente tamaño, generados por la dinámica hídrica del sector (cambios de velocidad y arrastre del drenaje) (Vargas *et al*, 1976). Distribuidos en el sector norte (parte de la pista del aeropuerto) y sur (límites con el municipio de San José de Miranda) del casco urbano de Málaga (EOT Málaga 2015), abarcan áreas muy pequeñas.

El comportamiento estructural se encuentra dominado por esfuerzos compresivos, donde el fallamiento inverso, el fracturamiento, el plegamiento complejo y las estructuras asimétricas son los rasgos más sobresalientes. El sistema principal de fallamiento corresponde al generado por la Falla del Río Servita, estructura (inversa) de tipo regional que presenta un trazo sinuoso de

dirección norte – sur, controla el cauce del río homónimo y enfrenta litologías Cretácicas con Paleogenas. (EOT San José de Miranda, 2003). Entre tanto, el sistema de plegamientos está representado por estructuras asimétricas, sinclinales de dirección noreste – suroeste, donde el sinclinal de Málaga corresponde a su máximo representante, afectado por sistemas de fallas paralelas (Falla Málaga – Miranda) y transversales (Falla Aguablanca) a la falla del Río Servita. (EOT Málaga, 2015).

- Falla Málaga Miranda: Estructura paralela a la falla del río Servita, de tipo normal de débil salto, con dirección norte – sur que separa y levanta el flanco izquierdo del sinclinal de Málaga de forma abrupta. El flanco derecho de este pliegue se encuentra hundido. Localizado en el sector occidental de la zona de estudio, la falla Málaga – Miranda enfrenta litologías cretácicas. (EOT San José de miranda, 2003).
- Sinclinal de Málaga: El casco urbano del municipio de Málaga se localiza sobre su núcleo. Estructura asimétrica de litología cretácea (Formación Tibú – Mercedes) de dirección noreste – suroeste (EOT Málaga, 2015).

Ubicada sobre la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, la zona de estudio pertenece a la sub – cuenca del río Servita, micro – cuenca La Magnolia. El drenaje más importante corresponde a la quebrada La Malagueña o Chorrerón, así como pequeñas acequias cuyos usos principales corresponden a la ganadería, la agricultura y la evacuación de desechos domésticos (EOT San José de Miranda, 2003). Estos cursos de agua (con una dirección predominante NW – SE) confluyen en el río Servita, describiendo un patrón de drenaje lineal – paralelo. (EOT Málaga, 2015).

El área de interés corresponde a un valle de erosión fluvial, de orientación N – S. El proceso morfodinámico del rio Servita y sus afluentes generan procesos erosivos de socavación, labrando

valles amplios y profundos en forma de V, con relieves muy variables, abarcando áreas desde planas e inclinadas con pendientes de 3% al 12% (en el casco urbano del municipio de Málaga) hasta morfologías abruptas y escarpadas con pendientes desde 25% hasta mayores al 50% (margen occidental del sector de trabajo) (Portilla, 1999). Por esta razón, la zona de estudio se caracteriza por presentar una topografía montañosa.

Debido a la ubicación del área de trabajo, en la región predomina un clima frío semi - húmedo con diferencias topografías bastante marcadas, abarcando alturas desde los 2.600 m.s.n.m (en el margen noroccidental) hasta 1.900 m.s.n.m (sector oriental). Lo anterior genera condiciones climáticas muy variadas a lo largo de toda el área. En la región predomina una temperatura media mensual que oscila desde 14°C (veredas Buenavista, San Luis y Yerbabuena) a 20°C (veredas Barzal y Guásimo), según los datos de las estaciones climatológicas, pluviométricas y pluviográficas presentes. Según estas estaciones, la zona de trabajo presenta una precipitación anual desde los 1.400 mm hasta los 1.600 mm, con los valores máximos registrados sobre la cabecera municipal de Málaga. Las precipitaciones presentan un un régimen bimodal, donde el periodo de tiempo comprendido entre Septiembre y Noviembre y desde Abril a Mayo corresponden con la temporada lluviosa, donde los máximos valores se presentan en el mes de Octubre (precipitación promedio igual a 215 mm mensuales), mientras que el primer trimestre del año, así como el periodo de tiempo entre Junio y Agosto y todo Diciembre representan la temporada de verano (seca) de la región, especialmente en Enero, mes con los mínimos valores de precipitación (promedio igual a 38,40 mm mensuales) y las temperaturas más altas (EOT Málaga, 2015).



Figura 3. Geología de la zona de interés. Tomado y modificado de SGC (2013).

## 3.2 Marco Teórico

La Prospección Geofísica corresponde a una rama de la física aplicada, encargada del estudio de las estructuras en el interior de la Tierra y de la localización de cuerpos delimitados por el contraste de alguna de sus propiedades físicas con las del medio circundante, mediante observaciones en la superficie de la tierra (Orellana, 1982).

Así, la prospección geofísica corresponde a un conjunto de diferentes métodos, complementarios entre sí (Loke, 2000). Dentro de la diversidad de técnicas prospectivas, se destacan cuatro métodos: magnético, gravimétrico, eléctrico y sísmico. Los dos primeros son de campo natural y los dos restantes de campo artificial (con algunas excepciones). Aunque la prospección geoeléctrica abarca el estudio (por medio de mediciones efectuadas en la superficie) de la distribución en profundidad de alguna magnitud electromagnética (permeabilidad magnética

 $\mu$ , la permitividad e y resistividad eléctrica  $\rho$ ), hoy día, el estudio de esta última es la más usada. Lo anterior se debe a dos razones: la primera, la amplitud de variación de la resistividad es de 25 órdenes de magnitud, a diferencia de la permitividad (2 órdenes de magnitud) y permeabilidad (4 órdenes de magnitud); y segundo, la cuantificación de la permeabilidad magnética y la permitividad requieren del uso de instrumentos de laboratorio, a diferencia de los cambios de resistividad, medidos indirectamente desde la superficie (Daza, 2012). De ahí que la prospección geoeléctrica corresponda (casi exclusivamente) a los métodos de resistividad eléctrica.

**3.2.1 Generalidades de los estudios de prospección geoeléctrica.** La prospección geoeléctrica determina la distribución de la resistividad del subsuelo, realizando mediciones (o toma de datos) en superficie, para a partir de dichas medidas, estimar la resistividad verdadera de las estructuras presentes en el área de estudio. La resistividad de un material se define como la oposición (resistencia) a la corriente eléctrica entre las caras opuestas de un cubo unitario de material y es una propiedad inversa a la conductividad eléctrica (Kearey *et al,* 2002).

Aunque los estudios geoeléctricos se han usado, durante décadas para fines hidrogeológicos, este método geofísico también es ampliamente utilizado en minería, en las investigaciones geotécnicas y actualmente en estudios medioambientales (Loke, 2012). Los estudios de prospección geoeléctrica se basan en la inyección de corriente en el subsuelo y en la medición de la diferencia de potencial (voltaje) resultante, por medio de dispositivos llamados electrodos.

Para ilustrar lo anterior, exponemos el caso más sencillo, es decir, suponer un subsuelo homogéneo con una resistividad verdadera determinada y una única fuente de corriente localizada sobre la superficie, como se aprecia en la figura 4. La corriente inyectada fluye radialmente lejos del electrodo de modo que la distribución de corriente es uniforme sobre las superficies equipotenciales y el potencial varía inversamente con la distancia a ella. La forma de las superficies equipotenciales corresponden a hemisferios y el flujo de corriente es perpendicular a esta (Kearey *et al*, 2002). Así, el potencial puede ser expresado como

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

donde  $\rho$  (de unidades ohmios por metro [ $\Omega^*m$ ]) representa la resistividad del material presente en el subsuelo, I (referida en columbios sobre segundo [C/s], o ampere [A]) corresponde a la corriente inyectada, y r (expresada en metros [m]) es la distancia hasta un punto, tomado en la superficie, desde la fuente.



*Figura 4*. Superficies equipotenciales y dirección del flujo de corriente generada por el electrodo (fuente de corriente). Tomado y modificado de Herman (2001).

Normalmente se poseen dos electrodos de corriente (designados como C1 o A y C2 o B) y dos electrodos de potencial (llamados P1 o M y P2 o N), como se observa en la figura 5. En los estudios de prospección geoeléctrica, el punto central de la configuración o de la matriz se mantiene fijo, mientras el espacio entre los electrodos se aumenta para obtener más información acerca de las secciones más profundas del subsuelo.



*Figura 5*. Configuración, convencional de 4 electrodos para realizar la medición de resistividad de un medio (subsuelo). Tomado y modificado de Gasulla (1999).

El procedimiento consiste en calcular, por separado, el potencial eléctrico generado en el punto P1 (o M) debido a la contribución de C1 o A (con signo positivo) y de C2 o B (con signo negativo), valores que posteriormente serán operados (sumados) entre sí. El mismo proceso es aplicado para P2 (o N). La diferencia de potencial deseada se obtiene al sustraer el segundo valor del primero, en un proceso llamado "método de superposición" (Van Nostrand y Cook, 1966).

$$\Delta \phi = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)$$

Entre tanto, para medios heterogéneos, surge el término de resistividad aparente  $\rho_a$ , análoga al concepto de resistividad en medios homogéneos y es calculada a partir de la corriente (I) inyectada y la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) resultante (UGR, 2013). La resistividad aparente  $\rho_a$  puede ser estimada a partir de dichos valores de la siguiente manera (Loke, 2012).

$$\rho_{\mathsf{a}} = \mathsf{k} \frac{\Delta \emptyset}{I}$$

Los equipos de medida, generalmente expresan un valor de R = V/I, por lo cual la resistividad aparente se puede expresar como
$$\rho_{a} = k * R$$

Donde R corresponde a la resistencia y depende del circuito y K es el factor geométrico y depende de la configuración de los electrodos. Los principales arreglos o matrices pueden ser apreciados u observados en el esquema de la figura 6.



*Figura 6*. Principales configuraciones, arreglos, distribuciones matrices o modalidades utilizadas, con su respectivo factor geométrico. Tomado y modificado de Loke (2012).

**3.2.2 Tipos de prospecciones geoeléctricas.** El propósito de toda técnica de prospección geoeléctrica es conocer la forma, la distribución y las dimensiones de los cuerpos presentes en el subsuelo, a partir de medidas tomadas o realizadas en superficie. Mediante estos estudios es posible obtener un perfil donde se observe la variación de la resistividad en el subsuelo y de esta manera determinar las estructuras que lo integran (Royero, 2014). Las técnicas de prospección geoeléctrica se dividen en: sondeos de resistividad 1D, sondeos de resistividad 2D y sondeos de resistividad 3D. Según el método aplicado se generan 3 modelos diferentes tras su adquisición y procesamiento (figura 7).



*Figura 7*. Tres modelos diferentes para estudios geoeléctricos. a) 1D. b) 2D. c) 3D. Tomado y modificado de Hidalgo et al (2000).

Para realizar sondeos de resistividad 1D, denominados también Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) o Calicatas Eléctricas (conjunto sucesivos de SEV para la generación de perfiles), se considera al subsuelo homogéneo, isótropo y dispuesto en capas horizontales o sub – horizontales. Los cuatro electrodos son distribuidos en el área a estudiar, según la configuración determinada y el punto central de la configuración o de la matriz se mantiene fijo, mientras el espacio entre los electrodos se aumenta para obtener más información acerca de las secciones más profundas del subsuelo (figura 8).



*Figura 8*. Secuencia de mediciones para realizar un sondeo eléctrico vertical (S.E.V). a. Matriz Wenner. b. Arreglo Schlumberger. Tomado y modificado de Loke (2012).

En estos casos, la resistividad solo varía en función de la profundidad, es decir, los cambios laterales no son registrados. Normalmente, la resistividad en el subsuelo cambia de forma vertical

y horizontal, causando alteraciones en el valor de la resistividad aparente que, pueden ser y son, frecuentemente mal interpretados (Hidalgo *et al*, 2000).

Para una representación más precisa del subsuelo se podría trabajar un sondeo de resistividad 2D. Para este tipo de estudios es fundamental la técnica geofísica llamada Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), fruto de la evolución de métodos geoeléctricos clásicos (SEV y Calicatas Eléctricas). Para realizar una TRE es necesario distribuir un gran número de electrodos (unidos entre sí por un cable multi – conector) en el área de estudio con un espaciamiento determinado (según el arreglo a utilizar) y conectarlos a un amperímetro, un voltímetro y un procesador (equipo que selecciona los electrodos a utilizar para la inyección de corriente y la medida de potencial) (figura 9). El procesamiento de estos datos incluye el cálculo de la resistividad verdadera a partir de los valores de la resistividad aparente, mediante una técnica de inversión desarrollada por Loke & Barker (1995), donde el producto final es una sección de distancia vs profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo.



*Figura 9*. Secuencia de mediciones para realzar una tomografía de resistividad eléctrica (T.R.E.). Tomado y modificado de Loke (2012).

Sin embargo, en la naturaleza, todas las estructuras geológicas en el subsuelo son tridimensionales. En principio, un sondeo de resistividad 3D y la interpretación de su correspondiente modelo debería ser más exacta, pero en la actualidad, los sondeos 2D corresponden a los más prácticos, de acuerdo a la relación entre los costos y resultados (Royero, 2014).

**3.2.3 Elección de una determinada matriz.** La elección de una determinada matriz depende de una gran cantidad de características, entre ellas, el tipo de estructura a estudiar, la sensibilidad de la configuración, la profundidad de investigación y el nivel de ruido de fondo o la relación señal – ruido (Loke, 2000).

Para la primera de ellas (el objetivo) se debe tener en cuenta el tamaño, la profundidad y el contraste de resistividad de este con el medio circundante o el entorno. El espaciamiento de los electrodos debe ser lo suficientemente grande como para lograr la penetración al objetivo, pero cuanto mayor sea el espaciamiento, menor será la resolución, tanto lateral como verticalmente, por lo que no será posible detectar un cuerpo pequeño en profundidad. La sensibilidad de la matriz y la profundidad de investigación pueden ser tratadas por diferentes procedimientos matemáticos, basados en la integral de Frechet o en la función de sensibilidad de Frechet, la cual expresa el grado en que un cambio en la resistividad de una sección del subsuelo provoca una variación en la medida de potencial (Royero, 2014). Finalmente, la relación existente entre la señal y el ruido está basada con el factor geométrico de la matriz utilizada. La intensidad de la señal es inversamente proporcional al factor geométrico (Loke, 2012); según lo anterior, la configuración Wenner posee

la intensidad de la señal más fuerte entre las distribuciones más utilizadas, al tener el factor geométrico (K =  $2*\pi*a$ ) más pequeño que todas ellas.

Para ilustrar el concepto de integral de Frechet consideremos el ejemplo de la configuración Polo – Polo, correspondiente a un electrodo de corriente y un electrodo de potencial separados a metros. A través de C1 es inyectado 1 amperio de corriente, generando un determinado potencial en P1 (Loke, 2012). Para este caso de estudio (matriz Polo – Polo) la función de sensibilidad de Frechet se puede expresar de la siguiente manera:

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

Para obtener la integral de Frechet para una configuración de cuatro electrodos, es necesario sumar las contribuciones de los dos electrodos de corriente sobre los dos electrodos de potencial. Así, la profundidad de investigación puede ser obtenida integrando la función de sensibilidad (Loke, 2000). Para el caso de un medio continuo y de disposición horizontal, la función de sensibilidad de Frechet unidireccional se puede expresar mediante la siguiente ecuación (Royero, 2014).

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

La ecuación anterior fue integrada por Roy y Apparao (1971), obteniendo la Función Característica de Investigación o de Sensibilidad, utilizada para conocer la profundidad de investigación en un medio homogéneo.

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

Para ilustrar lo anterior, en la figura 10 se aprecia el gráfico de la función de sensibilidad 1D para las configuraciones Polo – Polo y Wenner, donde el eje de las ordenadas representa los valores

de la función de sensibilidad y el eje de las abscisas corresponde la relación Z<sub>e</sub>/a entre la profundidad Z y la separación a entre el electrodo de corriente y el de potencial. Se observa como la función de sensibilidad aumenta desde cero hasta un valor determinado (para la matriz Wenner es aproximadamente 0,35a) y luego disminuye asintóticamente a cero. Algunos autores consideran el punto máximo como la profundidad de investigación del arreglo. Sin embargo, Edwards (1977) ha demostrado que una estimación más exacta corresponde a la "profundidad media de la investigación", definida como la profundidad por encima de la cual el área bajo la curva es igual a la mitad del área total bajo la curva y representa el valor de la profundidad en el cual el tramo de subsuelo comprendido entre la superficie y dicha profundidad tiene la misma influencia en el potencial medido (por lo tanto en el valor de la resistividad) que el tramo de ese subsuelo que está por debajo de ella. En términos más simples, la sección superior de la tierra por encima de la "profundidad media de la investigación" tiene la misma influencia sobre el potencial medido que la sección inferior. Esto indica, aproximadamente, la profundidad de investigación máxima de una determinada distribución (Rovero, 2014).



*Figura 10*. Función de sensibilidad 1-D, con el valor de máxima sensibilidad y la profundidad media de investigación. a) Configuración Polo – Polo. b) Matriz Wenner alpha. Tomado y modificado de Loke (2012).

En la tabla 1 se puede observar la profundidad media de investigación para las principales matrices, donde es posible calcular la profundidad máxima para cada una de ellas. El procedimiento consiste en multiplicar el espaciamiento entre los electrodos (Z<sub>e</sub>/a) o la distancia total de la configuración empleada (Ze/L) por el factor expresado en la tabla. Para los arreglos dipolo-dipolo, polo-dipolo y Wenner-Schlumberger, también se debe tener en cuenta el factor "n" (Loke, 2012). Por ejemplo, la profundidad máxima de investigación para un estudio utilizando la matriz Wenner – Schlumberger con una extensión total de 112 metros y con un valor de 2 para n, sería (L \* factor multiplicador de Wenner - Schlumberger para n=2), 112 [m] \* 0.186, igual a 20.83 metros.

#### Tabla 1.

La profundidad media de investigación para las principales matrices.  $Z_{e}/a$  corresponde a la relación entre la profundidad (Z) y la distancia de separación de electrodos (a) y L es la longitud total de la configuración.

A	Array type	z "/a	z./L			
Wenner Alpha		0.519	0.173			
Wenner Beta		0.416	0.139			
Wenner Gamma	a	0.594	0.198			
Dipole-dipole	n = 1	0.416	0.139			
	n = 2	0.697	0.174			
	n = 3	0.962	0.192			
	n = 4	1.220	0.203			
	n = 5	1.476	0.211			
	n = 6	1.730	0.216			
Equatorial dipo	le-dipole	0.451	0.010			
	n = 1	0.451	0.319			
	n = 2	0.809	0.362			
	n = 3	1.180	0.373			
	n = 4	1.556	0.377			
Wannar Caldumbargar						
weinier - Seinu	n = 1	0.52	0 173			
	n = 2	0.93	0.186			
	n = 3	1 32	0 189			
	n=4	1.71	0.190			
	n = 5	2.09	0.190			
	n = 6	2.48	0.190			
Pole-dipole	n = 1	0.52				
	n = 2	0.93				
	n = 3	1.32				
	n = 4	1.71				
	n = 5	2.09				
	n = 6	2.48				
Pole-Pole		0.867				

Nota. Tomado y modificado de Loke (2000).

A pesar de que la integral de Frechet calcula la contribución neta para todos los valores x & y a la misma profundidad, esconde una multitud de efectos. Por ejemplo si el subsuelo no es homogéneo, los resultados pueden ser muy diferentes. Para estudiar la idoneidad de las diferentes distribuciones es necesario la función de sensibilidad 2D. (Loke, 2012). Esto implica que la integral de Frechet (F<sub>3D</sub>) con respecto a y es

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

Esta integral tiene una solución analítica (Loke y Barker 1995), expresada en términos de integrales elípticas. La solución completa es

$$F_{2D}(x,z) = \frac{2}{\alpha\beta^2} \left[ \frac{\alpha^2 E(K) - \beta^2 K(k)}{(\alpha^2 - \beta^2)} - \frac{\gamma[(\alpha^2 + \beta^2) E^{3k}) - 2\beta^2 k(k)]}{(\alpha^2 - \beta^2)} \right]$$

Donde

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

Y para x < 0.5\*a

$$\alpha^2 = x^2 + Z^2; \ \beta^2 = (x - a)^2 + Z^2; \ \gamma = xa$$

Para x > 0.5\*a

$$\beta^2 = x^2 + z^2$$
;  $\alpha^2 = (x - a)^2 + Z^2$ ;  $\gamma = a(x - a)$ 

y x = 0.5\*a

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

En la figura 11 se aprecia la función de sensibilidad 2D para tres de las configuraciones más comunes (Wenner, Wenner – Schlumberger y Dipolo – Dipolo). Como se mencionó anteriormente, la función de sensibilidad expresa el grado en que un cambio en la resistividad de una sección del subsuelo influye o afecta en la medida de potencial. Los valores más altos de sensibilidad se encuentran cerca a los electrodos y a mayores valores de sensibilidad, mayor es la influencia de la región del subsuelo (Loke, 2000). La diferencia en las gráficas de la figura 11 explica la respuesta de los diversos arreglos a distintos tipos de estructuras.

En general, la configuración Wenner es una buena opción para un estudio realizado en un área ruidosa (debido a la alta intensidad de su señal) y donde la resolución vertical sea requerida. La matriz dipolo – dipolo puede ser la más aconsejable si la resolución horizontal es importante. El arreglo Wenner – Schlumberger es una alternativa razonable por su buena resolución vertical y horizontal, además de la buena intensidad de la señal. Si se posee un sistema con un número limitado de electrodos, la distribución polo – dipolo puede ser una opción viable. Para estudios donde la separación entre electrodos sea pequeña (con buena cobertura horizontal), el sistema polo – polo puede ser una adecuada elección. La modalidad Schlumberger es una de los arreglos más utilizadas a causa de la buena resolución horizontal que presenta y la alta intensidad de su señal (Loke, 2012).

**3.2.4 Propiedades eléctricas de las rocas.** La resistividad del subsuelo o de los materiales contenidos en él, está relacionada con diversos parámetros geológicos, entre ellos, la composición mineralógica, la porosidad conectada, el tipo y la cantidad de fluido contenido, el grado de meteorización o de metamorfismo, entre otras (UGR, 2013); representando un amplio rango de variación en su valor (figura 12).



*Figura 11*. Función de sensibilidad 2D para las matrices Wenner, Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo. Tomado y modificado de UNIL (2007).

En la mayoría de las rocas y sedimentos secos esta propiedad es elevada, por lo que actúan como semiconductores o conductores de baja capacidad, sin embargo, este comportamiento cambia significativamente cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, generando una disminución de la resistividad o un aumento en la capacidad de conducción de la corriente eléctrica (Auge, 2008).

Así, los materiales menos resistivos (más conductores) corresponden a los metales, mientras que los materiales menos conductores (más resistivos) son los agregados cristalinos (UGR, 2013). Los suelos con algún contenido de agua y el recurso hídrico subterráneo en general, poseen valores de resistividad aún más bajos, donde los suelos arcillosos normalmente son más conductores que los suelos arenosos. En el caso de las rocas, aquellas bien consolidadas, como las rocas ígneas y metamórficas siempre y cuando estén secas, presentan valores de resistividad muy altos, en contraste con las arcillas que son altamente conductivas (Vélez, 2011).



*Figura 12*. Resistividades de las principales rocas, suelos y minerales. La resistividad corresponde al inverso de la conductividad eléctrica. Tomado y modificado de Loke (2012).

**3.2.5 Teoría básica de inversión.** La teoría de inversión corresponde a un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que permiten obtener información útil de nuestro entorno (mundo físico) a partir de inferencias logradas a través de observaciones. La finalidad es encontrar un modelo que obtenga una repuesta similar a los valores reales medidos, bajo ciertas restricciones (Zúñiga, 2011). En geofísica el concepto de la inversión desempeña un papel muy importante debido a la necesidad de comprender alguna característica del subsuelo u obtener información acerca de la estructura interna de la Tierra, a partir, solo de datos adquiridos en superficie. Sin embargo, la teoría de inversión también es usada en medicina (tomografías), para la prospección acústica, el electromagnetismo y en astronomía.

El proceso de inversión genera, a partir de una pseudosección de resistividades aparentes medidas en campo, un modelo de la distribución de la resistividad verdadera del subsuelo, de forma que el modelo teórico de esta sea similar a las observaciones de campo.

El procedimiento parte de los datos de resistividad aparentes medidos (adquiridos en campo) representados en forma de pseudoperfil o pseudosección. A continuación se genera un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo y aplicando el modelado (o problema) directo se obtiene un pseudoperfil o una pseudosección de resistividades aparentes calculadas, derivadas del modelo. Estos valores son comparados generando un error. La diferencia es calculada entre el pseudoperfil de resistividades aparentes calculadas y la pseudosección de resistividades aparentes medidas; si este dato es mayor respecto al valor de convergencia, el modelo inicial se modifica de manera iterativa de tal forma que la diferencia entre los datos sea la menor posible (Royero, 2014) (figura 13). De este modo y tras una serie de iteraciones, se adquiere un modelo de resistividades verdaderas del subsuelo que explique el pseudoperfil o la pseudosección de resistividades aparentes medidas.

Para realizar el cálculo de los valores de resistividad verdadera es necesario una subproceso de modelado directo y una técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados (Loke & Barker, 1995). Durante el proceso de inversión se adopta como criterio de convergencia el valor del error cuadrático medio (RMS) entre los datos experimentales y la respuesta del modelo actualizado en cada iteración. Si el dato del RMS es menor al valor predefinido se concluye que la inversión ha convergido y el proceso se considera finalizado (Royero, 2014).



Figura 13. Etapas del procedimiento de inversión eléctrica. (Zúñiga, 2011).

# 3.3 Análisis estado del arte

El método de resistividad es una de las técnicas geofísicas más antiguas (Loke, 2000). En la literatura existen diferentes autores que han implementado los métodos de resistividad eléctrica para la generación perfiles 1D y modelos 2D del subsuelo, utilizados en la descripción y caracterización del mismo, así como de sus condiciones (geológicas, geoeléctricas, hidrogeológicas, etc.). Asfahani (2004), Befus *et al* (2014), Mahmoud y Tawfik (2014) y Mohamaden (2016) son algunos ejemplos.

En Colombia han sido desarrollado diversos trabajos utilizando la prospección geoeléctrica, algunos de ellos, en jurisdicción del departamento de Santander. Sin embargo, a pesar de la extensa literatura existente sobre la aplicación de métodos de resistividad para la generación de modelos descriptivos del subsuelo, ninguno de ellos ha tenido proximidad con el sector del presente proyecto. Las primeras referencias relacionadas con la zona de interés corresponden a los estudios realizados por Ward *et at* (1973), quienes desarrollan la Geología del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, departamentos de Santander y Norte de Santander; donde

incluyen la definición, distribución, descripción, edad y relaciones estratigráficas, además de la correlación de las diferentes unidades geológicas aflorantes en el área.

Posteriormente, Vargas *et al* (1976) publican la memoria explicativa del mapa geológico de la Plancha 136 – Málaga, Cuadrángulo I – 13, a escala 1:100.000. Royero y Clavijo (2001) en la memoria explicativa del departamento de Santander, describen de forma general y completa las rocas que afloran en el departamento, las provincias tectónicas que lo integran y las principales estructuras presentes.

El municipio de San José de Miranda expone un análisis climático, una descripción del recurso hídrico y una caracterización geológica general de su territorio (EOT San José de Miranda, 2003). La alcaldía de Málaga, en su Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT Málaga, 2015) presenta el diagnóstico ambiental, donde se describe el clima (capitulo 1), la hidrología (capitulo 2) y la geología (capitulo 3) del municipio.

Los geólogos Rueda y Tavera (2016) generaron el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa mediante la aplicación del modelo matemático de lógica difusa a partir de diferentes insumos (Geología, Geomorfología y Suelos) para la plancha 136 - I - B, abarcando un área de  $150 \text{ km}^2$ , incluyendo el sector occidental del presente trabajo.

Salamanca (2017) desarrolló la caracterización geológica general, identificando litologías, rasgos estructurales, sedimentológicos y estratigráficos, generando columna estratigráfica generalizada y cortes geológicos. Rueda y Tarazona (2018) realizaron el inventario de puntos de agua subterránea en la zona de estudio, registrando 6 zonas entre aljibes, pozos de agua, afloramientos, humedales y sectores de infiltración; la mayoría de ellos rodeada de vegetación y alta contaminación por exceso de basura de origen antrópico.

# 4. Generalidades del Proyecto

# 4.1 Pregunta de investigación

¿El diseño de perfiles sintéticos 2D mejora el procesamiento de datos reales de resistividades en una prospección geoeléctrica para obtener información acerca del subsuelo y de la capacidad acuífera de reservorios de rocas presente en la periferia y bajo el casco urbano del municipio de Málaga (Santander), contribuyendo a la búsqueda de soluciones enfocadas a cubrir la demanda y abastecimiento de agua?

### 4.2 Objetivos

# 4.2.1 Objetivo General

Desarrollar perfiles 2D de resistividades eléctricas del subsuelo presente en la periferia y bajo el casco urbano del municipio de Málaga (Santander) mediante el uso de prospección geofísica aplicada (sondeos verticales, SEV y tomografías eléctricas, TRE).

### 4.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar perfiles sintéticos 2D de resistividades eléctricas del subsuelo, mediante configuraciones específicas y a partir del análisis de la información existente, en el área perimetral del casco urbano del municipio de Málaga (Santander).
- Adquirir los datos mediante prospección geoeléctrica (sondeos verticales, SEV y tomografías de resistividades eléctricas, TRE) en la periferia y bajo el casco urbano del municipio de Málaga (Santander).
- Construir perfiles 1D y 2D de resistividades eléctricas del subsuelo por medio del procesamiento de datos recopilados en campo y con ayuda de softwares especializados para dicho fin.
- Analizar e interpretar (desde el punto de vista geoeléctrico) los modelos 1D y los perfiles
  2D desarrollados.

# 5. Justificación

Según el decreto 2320 del año 2009 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) la dotación neta máxima (consumo diario de agua por persona) para un determinado sector (municipio o distrito) depende de diferentes índices, entre ellos, se encuentra el nivel de complejidad (basado en el número de habitantes que residen en la cabecera municipal del territorio y su capacidad económica), los índices climatológicos y la altura sobre el nivel del mar.

El municipio de Málaga, en jurisdicción del Departamento de Santander, se encuentra clasificado dentro de un nivel de complejidad medio – alto (población entre 12.501 y 60.000

habitantes en la zona urbana con capacidad económica media), así mismo se encuentra en la categoría climática frio o templado, clasificación utilizada para territorios localizadas a alturas superiores a 1.000 m.s.n.m.

Según lo anterior, la dotación neta máxima corresponde a 125 litros/habitante/día y es destinada a satisfacer las necesidades básicas y los requerimientos de la población, donde el sector residencial corresponde al más predominante, utilizando el 89% del suministro total. El sector comercial (10%) y el industrial (1%) complementan los usos del agua para el municipio (figura 14). (Empresas públicas de Málaga E.S.P., 2015).





Sin embargo, la dotación suministrada, para la zona de trabajo, es insuficiente y cada vez más escasa en algunos sectores como por ejemplo el industrial y el comercial.

Por ello, la búsqueda y la localización de posibles nuevas fuentes de agua corresponden a información muy importante para la región de interés, presentándose como una posible solución al desabastecimiento de la misma; donde el recurso hídrico subterráneo puede ser una salida viable a la problemática expuesta.

Además, la ubicación geográfica (vertiente occidental de la Cordillera Oriental) y geológica (borde oriental del Macizo de Santander y sector sur del páramo del Almorzadero) del área de estudio, junto a la mediana pluviosidad del sector (1.600 mm anuales), permite que algunos drenajes que conforman la red hídrica tengan flujos constantes y muchos otros intermitentes, generando condiciones óptimas y favorables para la ocurrencia de aguas subterráneas.

La prospección geofísica se presenta como la técnica más apropiada para ser aplicada, al corresponder como un método rápido, económico y no destructivo, que permite la identificación y caracterización del subsuelo, logrando la construcción de modelos descriptivos que permiten analizar el comportamiento de determinadas propiedades físicas (campo magnético, campo eléctrico y resistividad, entre otras), necesarias para su posterior (y correcta) interpretación (Loke, 2012).

El alcance principal del presente trabajo de investigación pretende construir, a partir de prospección geofísica aplicada: Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Tomografía Resistividad Eléctrica (TRE), el modelo 2D de resistividad eléctrica del subsuelo, mediante el procesamiento de datos sintéticos para el tratamiento de información geoeléctrica con fines hidrogeológicos; convirtiéndose en el primer paso en el proceso de evaluación integral de recursos hídricos del área de interés.

Los resultados aquí obtenidos serán de vital importancia, teniendo en cuenta que se pretende contribuir, mejorar y profundizar en el conocimiento y descripción del subsuelo para aportar información fundamental sobre los recursos acuíferos en el área perimetral del casco urbano del municipio de Málaga, en el departamento de Santander, que sirva de soporte técnico – científico a las diferentes autoridades (ambientales, territoriales, locales y educativas), convirtiéndose en el punto de partida para futuros estudios de mayor detalle.

#### 6. Metodología

La metodología utilizada estuvo basada en el desarrollo de una serie de procedimientos necesarios para obtener la información requerida por el objetivo de estudio.

### 6.1 Análisis de la información existente

Esta fase consistió en la búsqueda, adquisición, recopilación, síntesis y análisis de la información secundaria, es decir, aquellos datos obtenidos de forma indirecta acerca del área de estudio, por medio de diferentes fuentes.

En otras palabras correspondió a la compilación bibliográfica y comprendió la reunión de todos aquellos datos sobre la configuración inicial del terreno, la cual incluye las unidades geológicas aflorantes, la disposición topográfica, las actuales formas del paisaje (geomorfología), los cuerpos de agua presentes (hidrografía), los procesos que deforman, pliegan y fallan la corteza terrestre (estructural), las características atmosféricas, climatológicas y meteorológicas generales, el inventario de puntos de agua subterránea, las vías de acceso y la población existente en el área de estudio. Todos estos insumos fueron recopilados junto con la información necesaria sobre la aplicación de los métodos de resistividad eléctrica (sondeos verticales, SEV y tomografías, TRE): parámetros para el diseño, adquisición, procesamiento, interpretación y análisis.

Toda esta información fue adquirida a través de artículos de revistas científicas, trabajos, memorias de eventos, informes y tesis, afines al proyecto; dispuestas en base de datos de carácter técnico – científico, en instituciones territoriales (corporaciones autónomas regionales, alcaldías y gobernaciones), en establecimientos educativos (universidades) y en fuentes electrónicas.

Sin embargo, la resistividad del subsuelo o de los materiales y estructuras contenidos en él está relacionada con diversos parámetros geológicos, abarcando un amplia variación en su valor. Según lo anterior, fue necesario utilizar las tablas de resistividad eléctrica, es decir, los valores aceptados en la literatura para determinados materiales, los cuales representan varios órdenes de magnitud.

Posterior a la etapa de búsqueda y adquisición de la información preliminar, se procedió a la síntesis y al análisis de toda la información obtenida, con el fin de filtrar los datos recopilados y así obtener o extraer la información necesaria para generar una visión general o preliminar del área de estudio.

#### 6.2 Adquisición y procesamiento de los Sondeos Eléctricos Verticales

Correspondió a la toma de datos directamente del terreno, que complementó o modificó la información anteriormente reunida, determinando las características geológicas (distribución de las estructuras presentes en el subsuelo) y geofísicas (variaciones en la resistividad eléctrica de los materiales que integran el subsuelo), reduciendo y acotando el rango en la variación de cada una de ellas, según el entorno geológico – geofísico y/o las condiciones particulares del área de interés, estableciendo el grado de humedad que presentan (seco, húmedo o saturado) y la densidad de fracturamiento existente (alta o baja).

Los sectores representativos para los sondeos correspondieron a zonas donde se observaron las unidades geológicas en profundidad, determinando realizar 15 SEV, convirtiéndose en información de apoyo o puntos de control para cada una de los modelos sintéticos y TRE desarrolladas. Las áreas seleccionadas fueron la zona nororiental donde se realizaron 4 prospecciones con distribución Schlumberger (S1 denominado RUIS1A, S2:RUIS2A, S3:RUIS3A y S4:RUIS4A), el área central con 4 sondeos, dos configuraciones tipo Schlumberger (S5:RCREA1 y S6:RCREA2) y dos matrices Wenner (S7:RCREW1 y S8:RREW2), el sector norte con dos sondeos de arreglo Schlumberger (S9:ROVI1 y S10:ROVI2), la zona sur donde se desarrolló 1 SEV, con modalidad Schlumberger (S11:RYERB) y el área oeste con 4 prospecciones, dos de distribución Schlumberger (S12:ELM1 y S13:ELM2) y dos con la configuración Wenner (S14:WELM1 y S15:WELM2). La obtención de los datos fue realizada en la época más seca del año, para garantizar la presencia del agua en las estructuras que integran o componen el subsuelo.

Para la adquisición de cada sondeo fue utilizado un terrameter SAS 1000 de ABEM, perteneciente a la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (figura 15). Se encuentra integrado por una batería de NiCd con un sistema de enganche, un adaptador para batería externa de 12 V, 4 electrodos de acero inoxidable, 4 pinzas de cocodrilo y varios juegos de cable. El equipo realiza cuatro medidas de resistividad aparente (denominados stocks) y entrega un promedio de dicho valor. Adicionalmente, se empleó un GPS marca Garmin para la georreferenciación, una brújula de tipo Brunton para el registro de la dirección azimutal, así como otros elementos necesarios como un martillo de poliuretano (o porra), batería externa, un conjunto de walkies – talkies y cinta métrica no metálica.



Figura 15. Equipo Terrameter SAS 1000 de ABEM, utilizado para la adquisición de cada SEV.

Los datos recopilados correspondieron con los valores de las resistividades eléctricas aparentes (promedio de los cuatro stocks) de las estructuras que constituyen el subsuelo, expresadas numéricamente, junto al valor de la desviación estándar asociada y la corriente empleada. La información recolectada por cada uno de los SEV desarrollados, fue procesada mediante el software IPI2Win, programa diseñado para la interpretación 1D de las curvas de sondeo eléctrico vertical a lo largo de un perfil. El enfoque a la obtención de un resultado geológico lo hace distinguible de otro software de inversión (Bobachev, *et al.*, 2000).

Los datos de entrada incluyeron la configuración de la matriz, la separación entre los electrodos y los valores de resistividad aparente. El software genera los parámetros del modelo para la información suministrada en el sondeo realizado y corresponden al número de capas, resistividades (verdaderas), espesores, profundidades y alturas (desde el nivel de la superficie o suelo). Lo anterior es presentado en una tabla y graficado por una línea negra en escala logarítmica, donde también es representada, con una línea roja, la curva teórica del modelo y con una azul, el perfil final; la diferencia relativa entre las dos primeras líneas corresponde al valor del error de ajuste, expresado en porcentaje. El objetivo de esta fase fue la generación de los modelos 1D.

### 6.3 Generación de modelos sintéticos 2D

Los perfiles sintéticos de resistividad eléctrica 2D se realizaron con el objetivo de evaluar la respuesta de un flujo de corriente eléctrica a través de los materiales que integran el subsuelo, según diferentes arreglos de los electrodos, para la obtención de una tomografía de resistividad eléctrica. Es decir, a partir de un modelo de las estructuras geológicas reales en el subsuelo, se estudia el efecto generado con una prospección geoeléctrica (Díaz, 2010). Los objetivos del anterior proceso corresponden con encontrar la mejor estrategia para la recolección de información y las mejores características en el modelado inverso, sin la necesidad de costosas pruebas de ensayos y error. (AGI, 2009). Así, los perfiles sintéticos de resistividad eléctrica 2D fueron desarrollados con el fin de obtener los parámetros óptimos para la adquisición de los datos en campo (arreglo de los electrodos) y para el proceso de inversión (número de iteración y el número de amortiguamiento o *"damping factor"*).

En la construcción de los modelos sintéticos fue necesario el desarrollo de perfiles geológicos, con el fin de identificar, representar y caracterizar el subsuelo. Según lo anterior y a partir de la configuración inicial del área de estudio se generaron 6 modelos geológicos en sectores representativos de la zona de trabajo y, mediante la distribución y cambio en el valor de la resistividad verdadera del subsuelo (o de las estructuras presentes en él) obtenidas en la adquisición y procesamiento de los sondeos eléctricos verticales, 6 perfiles sintéticos de resistividad eléctrica 2D fueron desarrollados. Las áreas seleccionadas correspondieron a aquellas zonas donde las condiciones geográficas y geológicas fueron favorables para la acumulación de aguas subterráneas. Las regiones del estudio fueron las principales estructuras de la región, el sinclinal de Málaga y la falla Málaga – Miranda, así como los cursos de agua más importantes del sector de interés, la quebrada La Magnolia y la quebrada Chorrerón o Malagueña.

Las áreas representativas fueron: la zona nororiental de la cabecera municipal donde se realizó el modelo designado como UIS en el flanco oriental del sinclinal de Málaga, en predios adquiridos por la Universidad Industrial de Santander para su ampliación. Sobre el costado oriental de la pista del Aeropuerto Jerónimo de Aguayo se generó el perfil denominado Aeropuerto, distribuido sobre el eje del sinclinal de Málaga, para evaluar la influencia de esta estructura sobre la acumulación de agua subterránea. La sección denominada Estadio/Normal se localiza en un sector adyacente a la falla Málaga – Miranda, perpendicular al curso de la quebrada La Magnolia, en el margen occidental del área de trabajo. El modelo llamado Laguna Seca y el perfil designado como Guácimo – Naranjitos, ubicados en el extremo sur, se encuentran distribuidos sobre depósitos recientes (de tipo aluvial) generados por la quebrada Chorrerón o Malagueña. La sección llamada Km 8 – La Mina fue ejecutada en el borde occidental del área de trabajo, fuera de la región de interés para determinar la influencia de la región adyacente en los procesos de acumulación de agua subterránea.

Por medio de la aplicación de un proceso denominado modelado directo sobre los perfiles anteriormente desarrollados, se generaron las pseudosecciones de resistividades aparentes sintéticas o calculadas. Posterior a ello, los datos virtuales (resistividades aparentes) de los pseudoperfiles creados fueron procesados mediante simulación inversa, generando las imágenes eléctricas de resistividad invertida, con el objetivo de reconstruir la distribución de resistividad verdadera de los modelos originales. Finalmente, las pseudosecciones de resistividad invertida fueron correlacionadas con los perfiles sintéticos 2D iniciales para determinar los parámetros óptimos (figura 16). Durante esta fase se realizó la variación de determinados parámetros como por ejemplo, diferentes arreglos para el modelado directo (Dipolo – Dipolo, Wenner – Schlumberger y Schlumberger) y algunas características específicas para la simulación inversa (número de iteraciones y factor de amortiguamiento).



*Figura 16*. Flujo de trabajo para la generación y el procesamiento de modelos sintéticos de resistividad eléctrica 2D.

**6.3.1 Modelos sintéticos.** Para el desarrollo de los modelos geológicos, los softwares ArcGIS (versión 10.1) y CorelDRAW (versión 2012) fueron empleados; los perfiles sintéticos de resistividad eléctrica se modelaron por medio del software AGI EarthImager 2D, mientras el proceso de comparación fue realizado mediante el software MATLAB (versión R2013a). La extensión de los modelos geológicos y los perfiles sintéticos desarrollados fue de 550 metros, longitud total sobre la superficie que alcanza el tomógrafo SuperSting R8, equipo utilizado en la adquisición de datos en campo

Cada modelo geológico realizado se digitalizó en el software CorelDRAW versión 2012. La topografía fue obtenida mediante software ArcGIS versión 10.1, con ayuda del modelo digital de elevación (D.E.M.) resolución 12.5 metros por 12.5 metros, descargado de la plataforma Vertex, portal de datos de sensores remotos de la NASA (UAF, 2018).

Los perfiles sintéticos 2D fueron construidos mediante la opción Creador de Comandos Bidimensional o 2D Two – Dimensional Command Creator del menú herramientas del software EarthImager 2D, donde fueron configurados los parámetros de entrada de las secciones: el número de electrodos, la separación de los mismos, el tipo de instrumento a utilizar y la matriz a elegir. Es posible, incluso, realizar una simulación, donde se observa el número máximo de mediciones, la cantidad de datos a obtener y la estimación del tiempo de levantamiento en campo. El modelo generado es guardado en un archivo de comando (extensión cmd). Se utilizaron 56 electrodos, separados 10 metros entre sí (extensión total de 550 metros) y el tipo de instrumento utilizado correspondió a SuperSting R8 (parámetros propios del tomógrafo a utilizar). El arreglo de los electrodos es el primer parámetro a variar dentro de los perfiles sintéticos. Dipolo – Dipolo, Wenner – Schlumberger y Schlumberger fueron las distribuciones seleccionadas; es decir, se generaron 3 archivos de comandos (.cmd) por cada sección geológica generada.

Se determinó analizar el efecto de la topografía en el procesamiento de un conjunto de datos (Loke, 2000), agregando el relieve de la superficie terrestre sobre el modelo sintético. La topografía de cada perfil sintético se adquirió de manera similar que las secciones geológicas, por medio del software ArcGIS versión 10.1, con ayuda del modelo digital de elevación (D.E.M.) resolución 12.5 metros por 12.5 metros, descargado de la plataforma Vertex, portal de datos de sensores remotos de la NASA (UAF, 2018). La topografía fue agregada al modelo mediante un archivo en un editor de texto ASCII como bloc de notas. El archivo consiste en dos columnas

separadas por comas, donde la primera de ella corresponde a la distancia en el eje X y la segunda columna designa la elevación de cada punto, en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

Cada perfil sintético de resistividad eléctrica correspondió a una matriz de 220 columnas y 23 filas, interpretada como un modelo (malla) que subdivide el subsuelo en 5.060 celdas, donde son introducidas las características geológicas y los valores de resistividad específicos de cada región o zona. Estos perfiles fueron guardados en formato (. mdl) mediante la opción Guardar Modelo Sintético (*Save Syntehtic Model*) del menú principal Archivo.

**6.3.2 Modelado Directo "Forward Modelling".** El objetivo del proceso denominado modelado directo es calcular los valores de resistividad aparente a partir de la distribución de resistividades en el subsuelo de la sección sintética.

Para la configuración de los parámetros del modelado directo fue utilizada la opción "*Forward Modeling*" de la ventana de configuración de la barra de herramientas primarias del software EarthImager 2D. Los parámetros seleccionados para ser aplicados, análogos para todos los perfiles sintéticos generados, son: la configuración en el método y tipo de resolución del modelado directo, la condición de frontera, el número de divisiones de malla, el factor incremental de espesor y el factor de profundidad (figura 17).

Para el método empleado en el modelado directo es necesario considerar las variaciones de los valores de resistividad (en profundidad y lateralmente) en el modelo bidimensional. Para calcular el potencial eléctrico en la superficie, dada una distribución de resistividades específica, debe ser analizado que el modelo sintético 2D presenta un campo eléctrico 3D debido a una fuente de corriente puntual. Una práctica común para resolver el problema del modelado directo de resistividad 2.5 D es utilizar métodos numéricos por discretización del dominio de investigación

(AGI, 2009). La ecuación diferencial parcial 3D se transforma con Fourier en una ecuación 2D para reducir el tiempo de cálculo. La solución directa puede ser obtenida resolviendo la siguiente ecuación diferencial parcial 2D en el dominio de transformación de Fourier (Yang y Lagmanson, 2003).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) - K^2 \sigma V = -I \,\delta(x) \,\delta(z)$$

Settings	×
Initial Settings Forward Modeling Resistivity	Inversion   IP Inversion   Terrain   CRP
Forward Model Method	Number of Mesh Divisions 4
Forward Equation Solver	Thickness Incremental Factor
Type of Boundary Condition	Depth Factor
	Max Number of CG Iterations
	CG Stop Residual
Default Surface	OK Cancel Apply



Donde V es el potencial eléctrico escalar en el dominio de la transformada de Fourier, I es la corriente eléctrica, K es el número de onda en el dominio de la trasformación y  $\sigma$  es la conductividad eléctrica en función de (x,z). En AGI EarthImager, es posible resolver esta ecuación diferencial parcial utilizando el método de diferencias finitas o elementos finitos.

El método de diferencias finitas se basa en un método descrito por Dey y Morrison en el año 1979, pero con una modificación introducida por Loke en 1994 y requiere la división o discretización del subsuelo en bloques rectangulares utilizando una rejilla, donde cada bloque posee una resistividad constante y la resistividad aparente del modelo es determinada a partir de la diferencia de potencial en los nodos de la malla rectangular. En el método de elementos finitos el subsuelo también es discretizado en elementos de resistividad constante pero sin la necesidad de ser rectangulares (Díaz, 2010). Este último (elementos finitos) es el empelado por generar una solución del modelado directo más precisa y procesar mejor la adición de la topografía (Loke, 2012). El potencial obtenido en los nodos es utilizado para hallar los valores de resistividad aparente a lo largo del perfil.

Para resolver el modelo directo se determinó la Descomposición de Cholesky como la opción optima sobre el Gradiente Conjugado. Aunque los dos son robustos y estables numéricamente, el primero de ellos es más rápido para conjuntos de datos de resistividad con más de 20 electrodos. La condición de frontera utilizada correspondió a Dirilecht por generar un modelado directo más preciso (Zúñiga, 2011).

El parámetro *Number of Mesh Divisions* establece el número de celdas entre dos electrodos y representa un factor dominante en el tiempo de ejecución, a mayor número de divisiones mayor tiempo de ejecución y mayor precisión en el modelado directo. Se estableció un valor de 4 para esta característica. El factor incremental de espesor (*Thickness incremental factor*) se define como la relación entre los espesores de dos capas. A causa de la degradación de la resolución del modelo al aumentar la profundidad, generada en los métodos de resistividad, el espesor del estrato inferior debe aumentar en un factor de 1.1 en relación con la capa inmediatamente superior (Loke, 2012).

El factor de profundidad determina la profundidad de la sección invertida y fue establecido con el valor predeterminado, es decir 1.1. Los parámetros *Max. Number of CG Iterations* y *CG Stop* 

*Residual* son solo aplicables cuando la opción gradiente conjugado es seleccionada para la característica *Forward Equation Solver* (AGI, 2009).

Una vez aplicadas las configuraciones anteriormente mencionadas, se procedió a modelar por simulación directa, mediante la opción Forward Simulation del menú herramientas. El software ejecuta una adquisición virtual y genera un conjunto de datos sintéticos (1.498 para la matriz Dipolo – Dipolo, 1.315 datos sintéticos mediante el arreglo Wenner – Schlumberger y 721 en la distribución Schlumberger), representados por medio de una pseudosección de resistividad aparente calculada de forma triangular

**6.3.3 Modelado Inverso.** El modelado inverso consiste en generar, a partir de los datos sintéticos de los pseudoperfiles de resistividad aparente calculada, las secciones de resistividad invertida, con el objetivo de reconstruir la distribución de resistividad verdadera de las estructuras originales. Es necesario configurar el proceso de inversión antes de ejecutar el modelado. La pestaña Inversión de Resistividad (*Resistivity Inversion*) de la ventana de configuración de la barra de herramientas primarias del software EarthImager 2D permite modificar los parámetros, según los objetivos del presente informe. Así, el número de iteraciones varío desde 1 hasta 20 mientras el valor del factor de amortiguamiento "*damping factor*" fue modificado desde 0.5 hasta 10, registros aceptados y sugeridos por (AGI, 2009).

Mediante la opción Planificador de Prospección (Survey Planner) del menú herramientas, el software generó los perfiles de resistividad invertida, según las configuraciones seleccionadas. Cada sección fue procesada mediante simulación inversa por medio el método de inversión de modelo suavizado o *Smooth Model Inverion* (Loke & Barker, 1996), variando los parámetros anteriormente descritos (número de iteraciones y factor de amortiguamiento) y sus respectivas

secciones generadas fueron guardadas en un archivo en formato (X, Y, Z) con extensión .dat., en una carpeta llamada 1 filtro. Se observan 3 imágenes por cada inversión: el perfil sintético inicial, la pseudosección de resistividad aparente calculada y el modelo de resistividad invertida, junto al el error cuadrático medio (RMS) y la norma L2 asociada.

Los perfiles guardados corresponden a la iteración 5, 10, 15 y 20 con factor de amortiguamiento 0.5, 3, 7 y 10. Según lo anterior, por cada modelo sintético desarrollado 16 pseudosecciones de resistividad invertida fueron creadas para cada una de las tres configuraciones, 48 en total.

**6.3.4 Determinación de los parámetros óptimos.** Los perfiles de resistividad invertida fueron correlacionados con los modelos sintéticos iniciales mediante un código elaborado en el software MATLAB (versión R2013a) por medio de la comparación del valor de resistividad punto a punto, para su análisis. La distribución de resistividad obtenida en las imágenes eléctricas invertidas presenta una diferencia significativa con los valores en las secciones sintéticas originales (Loke, 2012).

El código selecciona el perfil (y sus parámetros) que representa la mejor inversión, generando 2 figuras. La primera de ellas corresponde con una gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. La segunda figura son 3 imágenes: el perfil sintético inicial, la imagen eléctrica (óptima) invertida y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros.

Una vez seleccionado el modelo (y los parámetros óptimos del mismo) y con el objetivo de reducir y acotar el rango en la variación de cada uno de ellos, un segundo filtro fue aplicado, donde el número de iteraciones y el factor de amortiguamiento vuelven a ser modificados. Al valor determinado en el primer filtro, se le adicionaron cuatro valores (dos unidades por encima y dos

unidades por debajo), es decir, el segundo filtro constó de cinco valores por cada parámetro (tabla

2). En caso de ser seleccionado el valor de 0.5 para el *dumping*, la variación se realizó de dos

décimas por encima y de dos décimas por debajo de este para un total de cinco valores.

#### Tabla 2.

Selección de los parámetros en el filtro 1 (en azul) y aplicación del filtro2 con dos unidades por encima y debajo del valor seleccionado en primer filtro. Se emplean dos filtros por cada configuración.

Parámetro	Filtro 1						
Número iteración	X1	X2		X3	X4		
Damping	Y1	Y2		Y3	Y4		
	Filtro 2						
Número iteración	X2-2	X2 – 1	X2	X2 + 1	1 X2 + 2		
Damping	Y4-2	Y4 – 1	Y4	Y4 + 1	1 Y4+2		

El segundo filtro consistió en aplicar el mismo proceso (simulación directa e inversa) sobre los perfiles sintéticos originales, modificando los nuevos valores en el número de iteraciones y en el damping. Según lo anterior se obtuvieron 25 secciones de resistividad invertida para cada una de las tres configuraciones, 75 en total, guardadas en un archivo en formato (X, Y, Z) con extensión .dat., en una carpeta llamada 2 filtro.

Los pseudoperfiles generados fueron correlacionados, de nuevo, con los modelos sintéticos originales para obtener los parámetros óptimos del segundo filtro, utilizando el código creado en el software MATLAB (versión R2013a) anteriormente mencionado; generando las 2 figuras descritas inicialmente. Así, son obtenidos el número de iteración y el factor de amortiguamiento de cada configuración, para ser aplicadas en el proceso de inversión de los datos adquiridos.

Para determinar el mejor arreglo de electrodos (Dipolo – Dipolo, Wenner – Schlumberger o Schlumberger) para ser aplicados en la prospección, los parámetros seleccionados en el segundo filtro son comparados entre sí, por medio de un segundo código generado en el software MATLAB (versión R2013a). El código compara el perfil sintético original y las secciones invertidas con los parámetros óptimos seleccionados del segundo filtro para cada configuración y determina el menor error entre ellos, seleccionando la mejor matriz para ser aplicada en campo, generando tres imágenes (una por cada arreglo): el perfil sintético inicial, la imagen eléctrica (óptima) invertida y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio (RMS) porcentual.

Según lo anterior, por cada modelo geológico se generó un perfil sintético de resistividad, tres pseudosecciones de resistividad aparente calculada (una por cada configuración), 48 imágenes eléctricas de resistividad invertida para el primer filtro (16 por cada matriz) y 75 estructuras de resistividad invertida para el segundo filtro (25 por cada arreglo). Es decir, se selecciona el mejor modelo entre 123 perfiles de resistividad invertida, determinando la mejor configuración de electrodos y los parámetros óptimos de inversión.

# 6.4 Adquisición de datos (Tomografías de Resistividad Eléctrica)

Esta fase consistió en la obtención de información, directamente del área de estudio, mediante el uso de tomografías de resistividad eléctrica (TRE) y según los resultados obtenidos en la etapa anterior del proceso metodológico.

Las áreas seleccionadas para la adquisición de información de prospección geofísica por medio de tomografías fueron los mismos sectores donde se realizaron los perfiles geológicos y modelos sintéticos. Es decir, se procedió a realizar 6 TRE en esas zonas teniendo en cuenta determinadas características como el transporte del equipo, las condiciones topográficas, la malla vial existente y los objetivos del presente trabajo de investigación. Además, la información fue obtenida en la época más seca del año, para asegurar la presencia de agua en las estructuras que integran el subsuelo.

En la zona nororiental se realizaron 2 TRE, denominados UIS y Aeropuerto; en el sector oeste se presenta 1 adquisición geoeléctrica llamada Estadio/Normal; en la región sur, 2 prospecciones geofísicas fueron llevadas a cabo denominadas Laguna Seca y Guácimo – Naranjitos y el área oeste posee 1 tomografía designada La Mina/Km 8. Las anteriores prospecciones geofísicas fueron desarrolladas con configuración Wenner – Schlumberger, matriz obtenida en los modelos sintéticos.

Los TRE fueron obtenidos por medio del tomógrafo SuperSting R8/IP/SP con Wi – Fi, del área de Geomática de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, el cual presenta tres modos de funcionamiento: resistividad (RES), polarización inducida en dominio del tiempo (IP) y auto – potencial o potencial espontaneo (SP). Este equipo se encuentra constituido por un ordenador principal, 56 electrodos en acero inoxidable, una caja de conmutación denominada "*Switch box*", antena Wi-Fi, batería de 12V y varios juegos de cable (figura 18). El equipo realiza, antes de la adquisición de datos, una prueba para confirmar la conexión correcta de todos los electrodos, verifica la baja resistencia de contacto y examina partes especificas del sistema.

Para cada medición se utilizó, adicionalmente un GPS marca Garmin para la georreferenciación, una brújula de tipo Brunton para el registro de la dirección azimutal, un nivel locke y mira para realizar la corrección topográfica requerida, así como otros elementos necesarios como un martillo de poliuretano (o porra), batería externa, un conjunto de walkies – talkies y cinta métrica no metálica. El producto final de esta etapa fue la adquisición de los valores de las

resistividades eléctricas aparentes de las estructuras que constituyen el subsuelo, representadas por medio de pseudosecciones o pseudoperfiles. Estos datos junto a un buen registro (de campo y fotográfico) serán la base para la siguiente fase del proceso metodológico.



Figura 18. Tomógrafo SuperSting R8/IP/SP, equipo necesarios en la adquisición de datos de TRE.

# 6.5 Procesamiento de la información adquirida en campo

El procesamiento de la información correspondió al tratamiento aplicado a los datos que fueron recopilados u obtenidos en la etapa anterior de este proceso metodológico. Dentro de esta fase, se procedió a estimar y calcular, a partir de la teoría de la inversión (Loke & Barker, 1995), mediante software especializado para este fin y según los parámetros óptimos obtenidos en los modelos sintéticos, las verdaderas resistividades eléctricas de las estructuras presentes en el subsuelo.

A la información adquirida por cada TRE se le realizó un tratamiento por medio del software AGI Earthimager 2D, programa que procesa datos de resistividad eléctrica bidimensional (2D), generando secciones de resistividad invertida (AGI, 2009). El procesamiento de cada tomografía correspondió con importar la pseudosección de resistividad aparente medida (producto de la etapa de adquisición de datos) y agregar los parámetros óptimos (número de iteraciones y factor de amortiguamiento), generados en los modelos sintéticos 2D, características propias de cada perfil.

Las grandes variaciones de resistividad cerca a la superficie en un modelo con relieve homogéneo genera resultados de baja confiabilidad (Loke, 2000), por ello, es necesario incorporar la topografía en la tomografía para el proceso de inversión. Así, el relieve del terreno, obtenido por medio de un nivel locke y mira, fue agregado mediante la pestaña T*errain* de la ventana de configuración de la barra de herramientas primarias y de la opción *Read Terrein File* del menú principal Archivo del software. La carpeta de la topografía consistió en dos columnas separadas por comas, donde la primera de ellas corresponde a la distancia en el eje X y la segunda columna designa la elevación de cada punto, en metros sobre el nivel mar.

Posterior al proceso de inversión, 3 imágenes pueden ser apreciadas, la primera de ellas corresponde a la pseudosección de resistividad aparente medidas en campo, la segunda figura es el pseudoperfil de resistividades aparentes calculadas en el proceso de inversión y la tercera representa al modelo de resistividades verdaderas, información a interpretar y analizar. Se expresa el error cuadrático medio (RMS) y la norma L2 asociada al procesamiento.

La información obtenida después de realizar el proceso de inversión fue analizada estadísticamente, mediante un conjunto de herramientas específicas (*Data Misfit Pseudosection, Surface Data Misfit Scatter Plot, Data Misfit Histogram, Convergence Curve y Data Misfit Crossplot*) de la opción *Convergence and Data Misfit* del menú principal *View,* que permitieron analizar el desajuste de los datos, adquiriendo así, en un proceso posterior de inversión, un modelo más preciso, una imagen más confiable del subsuelo, reduciendo el error cuadrático medio (RMS) y la norma L2.
La pseudosección de datos desajustados (*Data Misfit Pseudosection*) permite identificar el sector del modelo con información errónea (datos que puede influir en la confiabilidad del perfil), mediante el cálculo del error relativo. La resistividad aparente calculada puede ser menor o mayor que la resistividad aparente medida, generando desajustes positivos o negativos, distribuidos simétricamente a partir del 0% de error relativo. La pseudosección es representada en una gráfica de puntos en el diagrama de datos desajustados de superficie (*Surface Data Misfit Scatter Plot*), determinando cuáles datos de la medición fueron erróneos. El histograma de datos desajustados (*Data Misfit Histogram*) reconoce la información que no encaja en el modelo, mediante una gráfica entre el valor absoluto del desajuste relativo entre los datos (registrada en eje de las abscisas) con el número de datos (ilustrada en el eje de las ordenadas). En la curva de convergencia (Convergence Curve) es posible apreciar la disminución del error RMS (o desajuste de la información) después de cada iteración. El diagrama de dispersión de datos desajustados (*Data Misfit Crossplot*) determina el ajuste de la sección, a mayor dispersión, menor ajuste (AGI, 2009).

El producto final de esta fase correspondió a la elaboración y revisión de los perfiles 2D, en donde se identifique la distribución de la resistividad (verdadera) del subsuelo de la zona de estudio.

#### 6.6 Interpretación y análisis

En esta etapa se llevó a cabo la interpretación (desde el punto de vista geoeléctrico) y el análisis de los modelos 1D y los perfiles 2D generados para el área de trabajo, área urbana del municipio de Málaga y la periferia de este, en el departamento de Santander.

De la secciones 1D se interpretó el valor de resistividad en profundidad de determinados estructuras que integran el subsuelo en sectores específicos y de las estructuras 2D se obtuvo la variación espacial (lateral y vertical) del registro de resistividad de dichos materiales. Según lo anterior se procedió a confirmar y complementar la información geológica por medio de los datos geofísicos adquiridos y procesados. En otras palabras, se correlacionaron las dos fuentes de información para determinar la distribución y el cambio en el valor de la resistividad de los materiales que constituyen el subsuelo.

Lo anterior consistió en deducir determinado(s) material(es) o estructura(s) presentes en el subsuelo, basado en las variaciones de resistividad verdadera (obtenidas en los modelos y perfiles desarrollados).

La finalidad de este proceso se basó en la identificación y caracterización del subsuelo, mediante el análisis de modelos descriptivos que permiten analizar el comportamiento de la resistividad y el efecto sobre este valor de acuerdo a parámetros geológicos.

#### 6.7 Redacción y defensa

En esta fase, la cual corresponde a la última dentro del proceso metodológico, se procedió a la elaboración, redacción, entrega, defensa y justificación del trabajo final.

En este informe se consignó toda la información referente al proyecto: las actividades realizadas, los resultados obtenidos, los productos entregados y el impacto o la utilidad de este trabajo de investigación.

#### 7. Resultados

La información presentada a continuación corresponde con los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, de acuerdo a los objetivos y según el proceso metodológico planteado.

#### 7.1 Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.)

Se desarrollaron un total de 15 Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.), distribuidos en sectores representativos de la zona de estudio (figura 19). De las 15 prospecciones realizadas, 11 de ellas fueron desarrollados por medio de la configuración Schlumberger y los 4 restantes mediante el arreglo Wenner. En algunos sectores, los datos obtenidos fueron adquiridos por medio de las dos matrices anteriormente mencionadas. Así mismo, 14 de ellos se distribuyen en jurisdicción del municipio de Málaga y el decimoquinto se localiza en territorio del municipio de San José de Miranda (figura 20). La localización de cada SEV puede ser observada en la tabla 3.

El software IPI2Win permitió la creación de un perfil 2D mediante la unión de dos modelos 1D. Gracias a la ubicación geográfica de los sondeos, 7 secciones 2D de resistividad eléctrica (verdadera) del subsuelo fueron generados, mediante la opción *Add file* del menú principal Archivo. Estos datos (modelo 1D y perfil 2D) se convirtieron en información de apoyo o puntos de control para cada uno de los modelos sintéticos y de las TRE desarrolladas.

En cada sondeo se observa la ubicación del mismo, el tipo de arreglo utilizado, la separación de electrodos, la resistividad aparente obtenida (promedio de los cuatro stocks), desviación estándar asociada y corriente empleada. Así mismo, se aprecia el procesamiento, interpretación y

análisis de cada prospección, al igual que el error asociado al tratamiento anteriormente descrito, expresado en porcentaje.



*Figura 19.* Uso del equipo terrameter SAS 1000 de ABEM para la adquisición de un sondeo Eléctrico Vertical (S.E.V.).



Figura 20. Localización de los Sondeos Eléctricos Verticales (S) realizados.

Tabla 3.

Ubic	Udicacion ae los Sonaeos Electricos desarrollados (S.E.V.).										
	SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES (SEV)										
$\mathbf{N}^{\circ}$	SEV	<b>X</b> ( <b>m</b> )	<b>Y</b> ( <b>m</b> )	<b>Z</b> ( <b>m</b> )	Vereda (Municipio)	Configuración					
1	RUIS1A	1'233.752	1'149.049	2.205	Casco Urbano (Málaga)	Schlumberger					
2	RUIS2A	1'233.704	1'149.042	2.204	Casco Urbano (Málaga)	Schlumberger					
3	RUIS3A	1'233.694	1'149.326	2.214	Casco Urbano (Málaga)	Schlumberger					
4	RUIS4A	1'233.619	1'149.293	2212	Casco Urbano (Málaga)	Schlumberger					
5 6	RCREA1	1'233.212	1'148.896	2.201	Casco Urbano (Málaga)	Schlumberger					
	RCREA2	1'233.250	1'148.910	2.200	Casco Urbano (Málaga)	Schlumberger					
7	RCREW1	1'233.212	1'148.896	2.201	Casco Urbano (Málaga)	Wenner					
8	RCREW2	1'233.250	1'148.910	2200	Casco Urbano (Málaga)	Wenner					
9	ROVI1	1'233.884	1'148.396	2.248	Casco Urbano (Málaga)	Schlumberger					
10	ROVI2	1'233.933	1'148.395	2.249	Casco Urbano (Málaga)	Schlumberger					
11	RYERB	1'231.551	1'148.732	2.191	Yerbabuena (San José de Miranda)	Schlumberger					
12	ELM1	1'232.640	1'147.445	2.448	Buenavista (Málaga)	Schlumberger					
13	ELM2	1'232.710	1'147.454	2.452	Buenavista (Málaga)	Schlumberger					
14	WELM1	1'232.640	1'147.445	2.448	Buenavista (Málaga)	Wenner					
15	WELM2	1'232.710	1'147.454	2.452	Buenavista (Málaga)	Wenner					

Ubicación de los Sondeos Eléctricos desarrollados (S.E.V.).

## **SEV 1: RUIS1A**:

El primer Sondeo Eléctrico Vertical (S.E.V.) se desarrolló paralelo a la carrera 9 o también llamada Avenida Argelino Durán Quintero que comunica el aeropuerto Jerónimo de Aguayo con la molinera de Herrán, sobre los linderos del predio de la Universidad Industrial de Santander, en el sector nororiental del área urbana del municipio de Málaga. Las coordenadas corresponden a X=1'233.752; Y=1'149.049; Z=2.205. La configuración geoeléctrica utilizada fue Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 1 metro hasta 60 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros, con una extensión total en superficie de 120 metros. Un total de 21 medidas fueron adquiridas (tabla 4).

iridas por e	el Sondeo Eléc	trico Vertica	ul 1 (RUIS1A	.).	
$\mathbf{N}^{\circ}$	<b>AB/2</b>	MN/2	ρa	δ	Ι
	<b>(m)</b>	( <b>m</b> )	$(\Omega^*m)$		(mA)
1	1	0.25	91.242	0.019	100
2	2	0.25	48.303	0.057	100
3	3	0.25	34.613	0.048	100
4	4	0.25	33.190	0.045	100
5	5	0.25	33.414	0.045	100
6	7.5	0.25	39.508	0.260	100
7	10	0.25	51.748	0.031	100
8	10	1	58.360	0.016	100
9	12.5	1	74.411	0.017	100
10	15	1	68.819	0.047	100
11	17.5	1	69.243	0.018	100
12	20	1	73.684	0.079	100
13	25	1	67.966	0.058	100
14	25	5	83.142	0.593	100
15	30	5	88.891	0.007	100
16	35	5	92.628	0.074	100
17	40	5	89.981	0.084	100
18	45	5	91.173	0.199	100
19	50	5	84.100	0.015	50
20	60	5	89.779	0.015	100
21	60	10	74.908	0.476	100

 Tabla 4.

 Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 1 (RUISIA)

El procesamiento generó un perfil integrado por 5 capas con un error de 4,12% (figura 21). Se encuentra constituido por depósitos (de tipo aluvial y coluvial) con diferentes grados de húmedad y saturación que subyacen a una fina capa de suelo transportado húmedo. La sección más profunda del sondeo corresponde a material calcáreo (caliza biomicrítica fracturada y saturada) perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior (tabla 5).



Figura 21. Procesamiento del SEV1 (RUIS1A) por medio del software IPI2Win.

te	erpretaci	ión del Sondeo	Eléctrico V		
	N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litología asociada
	Capa	$(\Omega^*m)$	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	Litologia asociada
	1	136	0,69	0,69	Suelo transportado húmedo.
	2	27,80	3,43	4,12	Depósito coluvial húmedo.
	3	410	3,04	7,16	Depósito coluvial seco.
	4	29,10	20,70	27,86	Depósito aluvial húmedo.
	5	367			Caliza biomicrítica fracturada y saturada perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.

Tabla 5. Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RUIS1A.

#### **SEV 2: RUIS2A:**

RUIS2A fue el nombre designado al S.E.V. realizado paralelo a la carrera 9 (Avenida Argelino Durán Quintero) que comunica el aeropuerto Jerónimo de Aguayo con la molinera de Herrán, en los linderos del predio de la Universidad Industrial de Santander, a 48,50 metros del SEV1 (RUIS1A) en la zona nororiental del casco urbano de Málaga. Las coordenadas corresponden a X=1'233.704; Y=1'149.042; Z=2.204.

La distribución elegida fue Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 1 metro hasta 150 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros, con una extensión total en superficie de 300 metros. 16 medidas fueron obtenidas para el procesamiento (tabla 6).

N°	<b>AB/2</b> (m)	MN/2 (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
1	1	0.25	176.43	0,014	100
2	2	0.25	116.90	0,022	100
3	3	0.25	55.145	0,049	100
4	4	0.25	40.444	1,05	100
5	5	0.25	31.996	0,406	50
6	10	0.25	28.673	0,369	100
7	10	1	29.389	0,131	100
8	30	1	44.339	0,126	100
9	30	5	64.153	0,236	100
10	50	5	67.690	0,266	100
11	70	5	65.782	0,29	100
12	70	10	70.032	0,235	100

Tabla 6. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 2 (RUIS2A).

N°	<b>AB/2</b> (m)	MN/2 (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
13	90	10	72.520	1,73	100
14	110	10	71.870	0,736	100
15	130	10	81.573	1,21	100
16	150	10	78.859	0,88	100

En el procesamiento del presente sondeo se obtuvo un perfil constituido por 6 capas con un error de 3,46% (figura 22). El área de trabajo se encuentra integrada por suelo de tipo transportado húmedo, depósitos coluviales y aluviales (con diferentes grados de saturación) y material calcáreo, correspondiente a calizas biomicríticas (altamente fracturadas y saturadas) y calizas micríticas (compactas y secas) pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior (tabla 7).



Figura 22. Procesamiento del SEV RUIS2A por medio del software IPI2Win.

Tabla 7.

Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RUIS2A.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalogía asociada
Capa	<b>(Ω*m)</b>	<b>(m)</b>	( <b>m</b> )	Litologia asociada
1	284	0,95	0,95	Suelo transportado húmedo.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalogía associada		
Capa	$(\Omega^*m)$	<b>(m)</b>	( <b>m</b> )	Litologia asociada		
2	35,5	3,06	4,01	Depósito coluvial húmedo.		
3	17,4	3,60	7,61	Depósito coluvial saturado.		
4	193	15,50	23,11	Depósito aluvial húmedo.		
				Caliza biomicríticas altamente		
5	13,6	21,10	44,21	fracturada y saturada perteneciente a la		
5				parte superior de la Formación Tibú -		
				Mercedes.		
				Caliza micrítica compacta y seca		
6	7.850			perteneciente a la Formación Tibú		
		Mercedes.				

Las prospecciones geoeléctricas 1 (RUIS1A) y 2 (RUIS2A) distantes 48,50 metros, fueron procesadas con el software IPI2Win para obtener un perfil 2D llamado UIS 1\_2", de orientación NNE – SSW y una profundidad total de 46 metros (figura 23).

La primera capa del modelo, que desarrolla poco espesor (menos de un metro) y presenta valores de resistividad de 136  $\Omega^*$ m a 284  $\Omega^*$ m, es asociada a suelo de tipo transportado húmedo. La resistividad disminuye en la capa infrayacente hasta 17,40  $\Omega^*$ m, relacionado al aumento en el contenido de agua del material presente, descrito como un depósito Cuaternario de tipo coluvial (con mayor grado de saturación en el sector SSW). Se presenta una capa (registrada solo en el costado NNE) de 3,04 metros de espesor con resistividad de 410  $\Omega^*$ m constituido por el mismo material (deposito Cuaternario de tipo coluvial) pero en condiciones secas. Posterior a él, se presenta una gruesa capa (espesor promedio de 18,10 metros) con resistividades desde 29,10  $\Omega^*$ m hasta 193  $\Omega^*$ m, interpretado como otro depósito Cuaternario, pero de tipo aluvial (en condiciones húmedas). El estrato infrayacente presenta gran espesor (mayor a 21 metros) relacionado a material

calcáreo (calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas). La última capa (espesor desconocido y resistividad de 7.850  $\Omega^*$ m), registrado solo en el costado SSW, corresponde a calizas micríticas secas y compactas, razón del elevado valor de resistividad.



Figura 23. Modelo UIS 1\_2 integrado por los SEV RUIS1A y RUIS2A.

## > SEV 3: RUIS3A:

La prospección geoeléctrica denominada RUIS3A fue desarrollada en la parte superior de los predios adquiridos por la Universidad Industrial de Santander para su ampliación, en la zona nororiental de la cabecera municipal de Málaga. Las coordenadas corresponden a X=1'233.694; Y=1'149.326; Z=2.214. La matriz utilizada para la obtención de datos fue Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 1 metro hasta 110 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros, con una extensión total en superficie de 220 metros (tabla 8).

$\mathbf{N}^{\circ}$	AB/2	MN/2	ρa	δ	Ι
	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	(Ω*m)		(mA)
1	1	0.25	347.88	0.016	100
2	2	0.25	296.8	0.034	100
3	3	0.25	233.68	0.015	100
4	4	0.25	173.23	0.019	100
5	5	0.25	121.25	0.015	100
6	7.5	0.25	80.411	0.075	100
7	10	0.25	70.478	0.059	100
8	12.5	1	58.153	0.017	100
9	15	1	56.767	0.367	100
10	17.5	1	50.262	0.070	100
11	20	1	83.086	0.090	100
12	25	1	76.45	0.275	100
13	25	5	68.993	0.203	100
14	30	5	63.338	0.333	100
15	35	5	59.735	0.197	100
16	40	5	60.92	0.132	100
17	45	5	62.431	1.880	100
18	50	5	63.185	1.810	100
19	60	5	71.15	0.101	100
20	60	10	67.069	0.112	100
21	70	10	73.514	0.047	100
22	90	10	99.824	99.824	100
23	100	10	90.859	0.136	100
24	110	10	80.353	0.352	100

Tabla 8.

Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 3 (RUIS3A).

Por medio del software IPI2Win un perfil de 5 capas con un error del 5,49% fue obtenido (figura 24). Asociado a suelo transportado y depósitos coluviales húmedos, la zona de estudio también se

encuentra integrada por material calcáreo (calizas biomicrítica altamente fracturadas y saturadas y calizas micríticas compactas y secas) perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior (tabla 9).



Figura 24. Procesamiento del SEV RUIS3A por medio del software IPI2Win.

te	erpretaci	ón del Sondeo I	Eléctrico V	ertical RUIS3A.		
	N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litología asociada	
	Capa	( <b>Ω</b> *m)	<b>(m)</b>	(m)		
	1	328	1,76	1,76	Suelo transportado húmedo.	
	2	48,20	7,39	9,15	Depósito coluvial húmedo.	
	3	124	6,94	16,09	Caliza biomicrítica fracturada y saturada perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.	
	4	22,40	18,70	34,79	Caliza biomicrítica saturada y con mayor densidad de fracturamiento perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.	

Tabla 9.Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RUIS3A.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalagía asociada			
Capa	( <b>Ω</b> *m)	(m)	( <b>m</b> )	Litologia asociada			
				Caliza micrítica compacta y seca			
5	6.885			perteneciente a la Formación Tibú -			
				Mercedes.			

#### **SEV 4: RUIS4A**:

La prospección geoeléctrica denominada RUIS4A fue desarrollada en la parte superior de los predios adquiridos por la Universidad industrial de Santander para su ampliación, en la zona nororiental de la cabecera municipal de Málaga, a 82 metros del SEV 3 (RUIS3A). Las coordenadas corresponden a X=1'233.619; Y=1'149.293; Z=2212.

La configuración geoeléctrica utilizada fue Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 1 metro hasta 140 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros, con una extensión total de 280 metros y 26 datos adquiridos (tabla 10).

N°	<b>AB/2</b> (m)	MN/2 (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
1	1	0.25	716.82	0.030	50
2	2	0.25	602.29	0.045	50
3	3	0.25	379.29	0.014	50
4	4	0.25	218.59	0.011	50
5	5	0.25	148.16	0.032	50
6	7.5	0.25	77.973	4.330	50
7	10	1	70.838	0.013	50
8	12.5	1	59.398	0.021	50

Tabla 10. Datos adauiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 4 (RUIS4A).

N°	<b>AB/2</b> (m)	MN/2 (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
9	15	1	60.059	0.049	50
10	17.5	1	55.493	0.236	50
11	20	1	57.601	2.250	50
12	25	1	53.623	0.087	100
13	25	5	53.559	0.044	100
14	30	5	54.302	1.950	100
15	35	5	57.317	0.062	100
16	40	5	58.057	0.051	100
17	45	5	60.422	0.251	100
18	50	5	57.567	0.222	100
19	60	5	63.146	0.158	50
20	60	10	70.512	1.080	50
21	70	10	76.607	0.080	100
22	80	10	87.055	0.420	100
23	90	10	96.333	0.027	100
24	100	10	104.53	0.554	100
25	120	10	117.54	1.460	100
26	140	10	110.7	1.450	100

Un perfil de 5 capas con un error de 3,26% fue generado, analizado e interpretado (figura 25). En la sección más superficial del estudio se desarrollan dos capas de suelo (de tipo transportado) de poco espesor con diferentes condiciones de húmedad. Posterior a esta, se presenta un depósito coluvial húmedo y finalmente dos capas de caliza, descritas como material biomicrítica saturadas y con diferentes densidades de fracturamiento, pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú Mercedes del Cretáceo inferior (tabla 11).



Figura 25. Procesamiento del SEV RUIS4A por medio del software IPI2Win.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalagía asociada
Cap	a (Ω*m)	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	Entologia asociaua
1	627	0,32	0,32	Suelo transportado húmedo.
2	1185	0,82	1,14	Suelo transportado seco.
3	75,10	6,78	7,92	Depósito coluvial húmedo.
4	50,60	28,20	36,12	Caliza biomicrítica saturada y con mayor densidad de fracturamiento perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.
5	202			Caliza biomicrítica fracturada y saturada perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.

In

Tabla 11.

Los sondeos eléctricos verticales 4 (RUIS4A) y 3 (RUIS3A), separados 82 metros entre sí, fueron utilizados para generar un modelo 2D, denominado "UIS 4 3". Presenta una orientación SSW – NNE y alcanza una profundidad total de 37 metros (figura 26).

Los primeros metros del perfil poseen poco espesor y registran resistividades de 328  $\Omega^*$ m a  $627\Omega^*$ m, valores correspondientes a suelo de tipo transportado y húmedo; sin embargo en el sector SSW se desarrolla una pequeña capa de suelo transportado seco (resistividad 1.185  $\Omega^*$ m y espesor 0,82 metros) no registrada en el costado NNE. La capa infrayacente con valores de resistividad desde 48,20  $\Omega^*$ m hasta 75,10  $\Omega^*$ m es descrita como un deposito coluvial húmedo. Subyace a este una capa gruesa (con espesor superior a 28 metros) con resistividades bajas (22,40  $\Omega^*$ m a 50,60  $\Omega^*$ m) asociada a material calcáreo perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes, correspondiente a caliza biomicrítica altamente fracturada y saturada. A una profundidad de 34,79 metros se presenta, solo en el costado NNE, el techo de la última capa con resistividad de 6.885  $\Omega^*$ m y espesor desconocido, representando calizas micríticas compactas y en condiciones secas, también pertenecientes a la Formación Tibú – Mercedes.



Figura 26. Modelo UIS 4\_3 constituido por los SEV RUIS4A y RUIS3A.

## > SEV 5: RCREA1:

El SEV 5 denominado RECREA1 fue desarrollado en la Urbanización Castilla Real, en la parte posterior de la pista del Aeropuerto Jerónimo de Aguayo y diagonal al E.S.E. Hospital Regional

García Rovira, sobre el sector norte de la cabecera municipal de Málaga. Las coordenadas corresponden a X=1'233.212; Y=1'148.896; Z=2.201.

La prospección geoeléctrica se realizó con la configuración Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 2 metros hasta 80 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros, con una extensión total en superficie de 160 metros, con un total de 22 datos (tabla 12).

uy	quintuis por ci sonaco Licenteo Venteu 5 (NenEm).							
	$\mathbf{N}^{\circ}$	<b>AB/2</b> ( <b>m</b> )	MN/2 (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)		
	1	2	0.25	25.082	0.021	100		
	2	3	0.25	25.716	0.013	100		
	3	4	0.25	25.961	0.014	100		
	4	5	0.25	26.180	0.021	100		
	5	7.5	0.25	28.505	0.034	100		
	6	10	0.25	31.548	0.101	100		
	7	10	1	32.613	0.008	100		
	8	12.5	1	36.612	0.029	100		
	9	15	1	39.477	0.023	100		
	10	17.5	1	41.530	0.019	100		
	11	20	1	43.082	0.047	100		
	12	25	1	45.365	0.126	100		
	13	25	5	45.462	0.110	100		
	14	30	5	48.164	0.065	100		
	15	35	5	50.840	0.162	100		
	16	40	5	53.118	0.161	100		
	17	45	5	55.040	0.474	100		
	18	50	5	55.854	0.488	100		
	19	60	5	57.378	0.917	100		

Tabla 12.Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 5 (RCREA1).

N°	<b>AB/2</b> (m)	MN/2 (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
20	60	10	56.246	0.424	100
21	70	10	58.200	1.160	100
22	80	10	58.671	1.220	100

Los resultados obtenidos para el presente sondeo corresponden a un perfil compuesto por 5 capas con un error de 1,10% (figura 27). Constituido por suelo de tipo residual y húmedo que suprayace a un depósito aluvial saturado. Las últimas tres capas se encuentran asociadas a material calcáreo pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes, correspondientes a calizas biomicríticas saturadas y con diferente densidad de fracturamiento (tabla 13).



Figura 27. Procesamiento del SEV RCREA1 por medio del software IPI2Win.

Tabla 13.				
Interpretación	del Sondeo	Eléctrico	Vertical	RCREA1.

 N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalagía agasiada
Capa	( <b>Ω</b> *m)	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	Litologia asociada
1	26,38	2,65	2,65	Suelo residual húmedo.
2	20,92	1,86	4,51	Depósito aluvial saturado.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	
Capa	(Ω*m)	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	Litologia asociada
				Caliza biomicrítica saturada y con
3	57 21	14 45	18.06	mayor densidad de fracturamiento
5	57,51	14,45	18,90	perteneciente a la parte superior de la
				Formación Tibú – Mercedes.
				Caliza biomicrítica fracturada y
4	67.20	16.25	25.01	saturada perteneciente a la parte
4	07,39	10,23	55,21	superior de la Formación Tibú –
				Mercedes.
				Caliza biomicrítica altamente
5	61 64			fracturada y saturada perteneciente a la
5	01,04			parte superior de la Formación Tibú -
				Mercedes.

## > SEV 6: RCREA2:

RCREA2 fue el nombre designado al S.E.V. realizado en la Urbanización Castilla Real, en la parte posterior de la pista del Aeropuerto Jerónimo de Aguayo y diagonal al E.S.E. Hospital Regional García Rovira, a 40,50 metros del SEV5 (RCREA1), sobre el sector norte de la cabecera municipal de Málaga. Las coordenadas corresponde a X = 1'233.250, Y = 1'148.910, Z = 2.200.

La matriz para el desarrollo de la prospección geoeléctrica fue Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 1 metro hasta 80 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros, con una extensión total en superficie de 160 metros y con 21 datos obtenidos, como se aprecia en la tabla 14.

N°	<b>AB/2</b> ( <b>m</b> )	MN/2 (m)	$ ho_{a}\left( \Omega^{*}m ight)$	δ	I (mA)
1	1	0.25	16.402	0.171	100
2	2	0.25	18.941	0.167	100
3	3	0.25	19.755	0.014	100
4	4	0.25	18.949	0.084	100
5	5	0.25	18.861	0.071	100
6	7.5	0.25	20.229	0.205	100
7	10	0.25	22.089	0.160	100
8	10	1	32.276	0.065	100
9	12.5	1	36.322	0.059	100
10	15	1	39.591	0.038	100
11	17.5	1	42.080	0.076	100
12	20	1	44.340	0.035	100
13	25	1	48.034	0.070	100
14	30	5	48.753	0.177	100
15	35	5	50.022	0.197	100
16	40	5	51.417	0.086	100
17	45	5	52.055	0.056	100
18	50	5	52.401	1.410	100
19	60	5	54.655	0.014	100
20	70	10	54.802	0.492	100
21	80	10	56.065	0.955	100

Tabla	14.
-------	-----

Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 6 (RCREA2).

En el procesamiento del presente sondeo se obtuvieron 6 capas con un error de 0,66% (figura 28). Las primeras dos capas, de poco espesor, se encuentran compuestas por suelo residual con diferentes condiciones de humedad. Subyace a él un deposito aluvial saturado y los últimos tres estratos corresponden a caliza biomicrítica saturada y con diferentes condiciones de fracturamiento, pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes (tabla 15).



Figura 28. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical RCREA2 por medio del software IPI2Win.

bla 15.				
erpretac	ión del Sondeo	Eléctrico V	Vertical RCREA2	2.
N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalagía agagiada
Capa	$(\Omega^*m)$	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	Litologia asociada
1	21,75	0,81	0,81	Suelo residual saturado.
2	54,47	0,75	1,56	Suelo residual húmedo.
3	14,80	2,50	4,06	Depósito aluvial saturado.
4	96,40	4,95	9,01	Caliza biomicrítica fracturada y saturada perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.
5	49,79	41,50	50,51	Caliza biomicrítica saturada y con mayor grado de fracturamiento perteneciente a la parte superior de la

Tabla 15.		
Interpretación del Sond	eo Eléctrico	Vertical RCREA2.

6

82,55

perteneciente a la parte superior de la				
Formación Tibú – Mercedes (Kitm).				
Caliza biomicrítica fracturada y				
saturada perteneciente a la parte				
superior de la Formación Tibú -				
Mercedes.				

Los sondeos eléctricos verticales 5 (RCREA1) y 6 (RCREA2), separados 40,50 metros entre sí, fueron utilizados para generar un modelo 2D, denominado "RCREA". Presenta una orientación SSW – NNE y alcanza una profundidad de 55 metros (figura 29).

La primera capa identifica resistividades desde 21,75  $\Omega^*m$  a 54,47  $\Omega^*m$  y el espesor varía desde 1,56 metros (en el costado NNE) hasta 2,65 metros (en el sector SSW) y es descrita como suelo residual húmedo a saturado. Inferior a esta, se registra una capa caracterizada por su poco espesor (aproximadamente 2 metros) y bajos valores de resistividad (14,80  $\Omega^*m$  y 20,92  $\Omega^*m$ ) interpretado como un depósito Cuaternario de tipo aluvial saturado (su bajo valor de resistividad corresponde con el alto contenido de agua). El estrato infrayacente se describe como una gruesa capa de espesor total desconocido y con registros de resistividad desde 49,79  $\Omega^*m$  hasta 96,40  $\Omega^*m$ , donde el material constituyente corresponde, en su totalidad, a material calcáreo biomicrítica (asociado a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior) en condiciones saturadas pero variando su densidad de fracturamiento.



Figura 29. Perfil RCREA constituido por los SEV RCREA1 y RCREA2.

## > SEV 7: RCREW1

La prospección geoeléctrica 7 (designada como RCREW1) fue realizada en la Urbanización Castilla Real, en la parte posterior de la pista del Aeropuerto Jerónimo de Aguayo y diagonal al E.S.E. Hospital Regional García Rovira, sobre el sector norte del casco urbano del municipio de Málaga. Las coordenadas corresponden a X=1'233.212; Y=1'148.896; Z=2.201.

El sondeo eléctrico vertical fue desarrollado con la distribución Wenner donde la separación (a) de los electrodos inició en 3 metros y finalizó en 54 metros, con una extensión total en superficie de 162 metros, para un total de 17 datos (tabla 16).

N°	a (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
1	3	26.482	0.095	100
2	6	30.363	0.123	100
3	9	36.796	0.230	100
4	12	40.962	0.221	100
5	15	42.746	2.590	100
6	18	45.335	1.627	100
7	21	47.398	0.366	100
8	24	49.453	0.298	100
9	27	51.345	1.010	100
10	33	53.878	0.920	100
11	36	55.346	0.992	100
12	39	55.236	1.590	100
13	42	56.595	1.100	100
14	45	56.573	0.823	100
15	48	57.059	0.931	100

Tabla 16.Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 7 (RCREW1).

$\mathbf{N}^{\circ}$	a (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
16	51	57.301	1.310	100
17	54	57.128	0.869	100

El procesamiento generó un perfil integrado por 5 capas con un error de 1,03% (figura 30). Se encuentra constituido por suelo residual húmedo, depósito aluvial saturado y material calcáreo correspondiente a caliza biomicrítica (altamente fracturada y saturada), pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes (tabla 17).



Figura 30. Procesamiento del SEV RCREW1 por medio del software IPI2Win.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad			
Capa	(Ω*m)	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	Litologia asociada		
1	30,75	1,57	1,57	Suelo residual húmedo.		
2	16,43	1,77	3,34	Depósito aluvial saturado.		
3	52,75	21,40	24,74	Caliza biomicrítica altamente fracturada y saturada perteneciente a la parte superior de la formación Tibú – Mercedes.		

Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical 7 (RCREW1).

Tabla 17.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad			
Capa	$(\Omega^*m)$	<b>(m)</b>	( <b>m</b> )	Litologia asociada		
4	93,67	29,26	54	Caliza biomicrítica fracturada y saturada perteneciente a la parte superior de la formación Tibú – Mercedes.		
5	31,94			Caliza biomicrítica saturada y con mayor densidad de fracturamiento perteneciente a la parte superior de la formación Tibú – Mercedes.		

## > SEV 8: RCREW2

Sobre la Urbanización Castilla Real, en la parte posterior de la pista del Aeropuerto Jerónimo de Aguayo y diagonal al E.S.E. Hospital Regional García Rovira, a 40,50 metros del SEV7 (RCREW1) fue ejecutado el SEV8 designado RCREW2, sobre el sector norte del área urbana del municipio de Málaga. Las coordenadas corresponden a X=1'233.250 Y=1'148.910, Z=2.200.

La configuración utilizada fue Wenner donde la separación de los electrodos (a) inició en 3 metros y finalizó en 54 metros, con una extensión total en superficie de 162 metros, adquiriendo un total de 17 datos (tabla 18).

por el sonde	o Elecífico	veriicai o (N	CREW2).	
$\mathbf{N}^{\circ}$	a (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
1	3	28.237	0.066	100
2	6	29.166	0.020	100
3	9	34.732	0.082	100
4	12	38.207	0.069	100
5	15	41.209	0.290	100

Tabla 18.

Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 8 (RCREW2).

N°	a (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
6	18	43.864	0.026	100
7	21	45.330	0.069	100
8	24	46.307	0.202	100
9	27	46.832	0.290	100
10	30	48.805	0.515	100
11	36	51.080	0.269	100
12	39	51.294	0.284	100
13	42	51.558	0.365	100
14	45	52.933	0.590	100
15	48	53.217	0.501	100
16	51	54.237	0.162	100
17	54	54.809	0.925	100

Un perfil de 5 capas con 0.52% de error fue generado para el presente sondeo, como se observa en figura 31 y se aprecia en la tabla 19. Asociado a suelo (residual y húmedo), depósitos aluviales (con diferentes grados de saturación) y material calcáreo (caliza biomicrítica altamente fracturada y saturada) perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.



*Figura 31.* Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical RCREW2 por medio del software IPI2Win.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litelegía esegiada
Capa	(Ω*m)	<b>(m)</b>	( <b>m</b> )	Litologia asociada
1	37,33	1,72	1,72	Suelo residual húmedo.
2	14,40	1,40	3,12	Depósito aluvial saturado.
3	21,48	0,79	3,91	Depósito aluvial muy húmedo.
				Caliza biomicrítica altamente
4	52.96	50.08	54	fracturada y saturada perteneciente a
т	52,70	50,00	54	la parte superior de la formación Tibú
				– Mercedes.
				Caliza biomicrítica saturada y con
5	82 97			menor grado de fracturamiento
5	02,97			perteneciente a la parte superior de la
				formación Tibú – Mercedes.

1 abia 17.	Ta	bla	19.	
------------	----	-----	-----	--

Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RCREW2.

Las prospecciones geoeléctricas 7 (RCREW1) y 8 (RCREW2) distantes 40,50 metros, fueron procesadas con el software IPI2Win para obtener un perfil 2D llamado RECREW con una orientación SSW – NNE y una profundidad total de 56 metros (figura 32).

Los primeros metros del subsuelo corresponden a una capa de poco espesor (promedio de 1,64 metros) con resistividades de 30,75  $\Omega$ \*m a 37,33  $\Omega$ \*m, interpretados como suelo residual húmedo. El valor de la resistividad disminuye por debajo del suelo, registrando medidas desde 14,4  $\Omega$ \*m hasta 21,48  $\Omega$ \*m, relacionado con un depósito Cuaternario de tipo aluvial muy húmedo a saturado. A una profundidad de 3,34 metros (en el costado SSW) y 3,91 metros (en el sector NNE) un estrato grueso (espesor total desconocido) con resistividades variables (de 31,94  $\Omega$ \*m hasta 93,67  $\Omega$ \*m) es asociado, en su totalidad, a calizas (de tipo biomicrítica saturadas con diferentes densidades de fracturamiento) pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior.



Figura 32. Modelo RCREW integrado por los SEV RCREW1 y RCREW2.

## **SEV 9: ROVI1:**

El sondeo 9 (llamado ROVI1) fue desarrollado en la Hacienda Oviedo, sobre el primer kilómetro de la vía que conduce de la cabecera municipal de Málaga al casco urbano del municipio de Molagavita, sobre el sector noroccidental del área urbana de Málaga. Las coordenadas corresponden a X = 1'233.884, Y = 1'148.396, Z = 2.248.

La prospección geoeléctrica se realizó con la matriz Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 1 metro hasta 90 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros, con una extensión total en superficie de 180 metros, para un total de 23 datos (tabla 20).

s por er sonaco Licenteo verticar > (Roviri).							
NIO	<b>AB/2</b>	MN/2	ρa	8	Ι		
IN	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	( <b>Ω</b> *m)	0	(mA)		
1	1	0.25	70.413	0.023	100		
2	2	0.25	66.437	0.018	100		
3	3	0.25	66.399	0.066	100		
4	4	0.25	66.110	0.030	100		
5	5	0.25	59.674	0.030	100		
6	7.5	0.25	44.905	0.023	100		
7	10	1	43.475	0.038	100		
8	12.5	1	43.475	0.009	100		
9	15	1	46.606	0.029	100		
10	17.5	1	46.030	0.125	100		
11	20	1	46.314	0.141	100		
12	25	1	53.436	0.100	100		
13	25	5	66.286	0.685	100		
14	35	5	67.042	1.540	100		
15	35	5	67.800	0.116	100		
16	40	5	66.969	1.680	100		
17	40	5	65.503	0.718	100		
18	45	5	68.210	6.499	100		
19	50	5	68.870	0.500	100		
20	60	10	77.057	0.050	100		
21	70	10	80.951	0.083	100		
22	80	10	80.773	0.450	100		
23	90	10	92,913	0.085	100		

Tabla 20.

Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 9 (ROVII).

Por medio del software IPI2Win se generó un perfil con 5 capas con un error del 3,80% (figura 33). El área de interés se encuentra constituida por suelo de tipo residual húmedo, depósito coluvial saturado y material calcáreo correspondiente a caliza biomicrítica y micrítica (con diferentes

grados de fracturamiento y condiciones de húmedad) perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior (tabla 21).



Figura 33. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical ROVI1 por medio del software IPI2Win

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalogía ogosiado
Capa	( <b>Ω</b> *m)	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	Litologia asociada
1	74,90	3,53	3,53	Suelo residual húmedo.
2	16,80	3,11	6,64	Depósito coluvial saturado.
3	144	12,10	18,74	Caliza biomicrítica fracturada y saturada perteneciente a la parte superior de la formación Tibú – Mercedes.
4	21,30	15,20	33,94	Caliza biomicrítica saturada y con mayor densidad de fracturamiento perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.
5	7.437			Caliza micrítica compacta y seca de la Formación Tibú – Mercedes.

Tabla 21.			
Interpretación del Sonde	o Eléctrico	Vertical	ROVI1.

# **SEV 10: ROVI2:**

En predios de la Hacienda Oviedo, sobre el primer kilómetro de la vía que conduce de la cabecera municipal de Málaga al casco urbano del municipio de Molagavita, a 49 metros del SEV 9, se realizó la prospección geoeléctrica denominado ROVI2. Las coordenadas corresponden a X= 1'233.933, Y= 1'148.395, Z= 2.249.

El sondeo se realizó con el arreglo Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 1 metro hasta 90 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros, con una extensión total en superficie de 180 metros, adquiriendo un total de 21 datos (tabla 22).

N°	<b>AB/2</b> (m)	MN/2 (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
1	1	0.25	73.730	0.021	100
2	2	0.25	49.925	0.014	100
3	3	0.25	46.637	0.021	100
4	4	0.25	45.323	0.021	100
5	5	0.25	45.714	0.021	100
6	7.5	0.25	48.340	0.051	100
7	10	0.25	53.227	0.019	100
8	10	1	48.462	0.100	100
9	12.5	1	52.461	0.016	100
10	15	1	55.827	0.028	100
11	17.5	1	57.979	0.048	100
12	20	1	60.351	0.039	100
13	25	1	63.516	0.082	100
14	25	5	64.468	0.019	100
15	30	5	69.677	0.025	100

Tabla 22. Datos adquiridas por el Sonde Eléctrico Vertical 10 (ROVI2).

N°	<b>AB/2</b> (m)	MN/2 (m)	ρ <sub>a</sub> (Ω*m)	δ	I (mA)
16	35	5	72.908	0.020	100
17	40	5	73.074	0.098	100
18	45	5	72.807	0.063	100
19	50	5	73,852	0.109	100
20	80	10	70.777	0.153	100
21	90	10	70.711	0.180	100

El procesamiento generó un perfil integrado por 5 capas con un error de 0,98%, como se aprecia en la figura 34. Se encuentra constituido por suelo residual húmedo, depósito coluvial húmedo y material calcáreo correspondiente a caliza biomicrítica altamente fracturada y saturada perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior (tabla 23).



Figura 34. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical ROVI2 por medio del software IPI2Win.

nte	terpretación del Sondeo Eléctrico Vertical ROVI2.						
	N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	L italagía asogiada		
Ī	Capa	( <b>Ω</b> *m)	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	Litologia asociada		
	1	118,40	0,38	0,38	Suelo residual húmedo.		
	2	40,94	1,79	2,17	Suelo residual muy húmedo.		
	3	37,41	3,45	5,62	Depósito coluvial húmedo.		

Tabla 23. Iı

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litología asociada	
Capa	(Ω*m)	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )		
4	85,58	23,35	28,97	Caliza biomicrítica fracturada y saturada perteneciente a la parte superior de la formación Tibú – Mercedes.	
5	64,20			Caliza biomicrítica saturada con mayor densidad de fracturamiento perteneciente a la parte superior de la formación Tibú – Mercedes.	

Los sondeos eléctricos verticales 9 (ROVI1) y 10 (ROVI2) separados 49 metros entre sí, fueron utilizados para generar un modelo 2D, denominado "ROVI". Presenta una orientación SSW – NNE y alcanza una profundidad total de 36 metros (figura 35).

La primera capa con resistividades desde 40,94  $\Omega^*$ m hasta 118,40  $\Omega^*$ m es asociado a suelo de tipo residual húmedo. Posterior a esta, se registra una capa de 3,28 metros de espesor promedio con una resistividad de 16,80  $\Omega^*$ m a 37,41  $\Omega^*$ m y se encuentra relacionado a depósitos Cuaternarios de tipo coluvial húmedo, con mayor grado de saturación en el costado SSW. La resistividad disminuye en el estrato inferior hasta 21,30  $\Omega^*$ m y se asocia a material calcáreo (calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas) pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior. El espesor de la última capa, registrada solo en el costado SSW, se desconoce y el valor de la resistividad, que aumenta hasta 5.245  $\Omega^*$ m describe calizas micríticas compactas y secas.

#### **SEV 11: RYERB1:**

El SEV 11 designado con el nombre RYERB1 fue ejecutado sobre el margen derecho en el primer kilómetro de la vía que conduce desde la cabecera municipal de Málaga al casco urbano de

San José de Miranda, en jurisdicción de la vereda Yerbabuena del territorito de San José de Miranda. Las coordenadas corresponden a X 1'231.551, Y= 1'148.732, Z= 2.191.



Figura 35. Modelo ROVI compuesto por los SEV ROVI1 y ROVI2.

La prospección geoeléctrica fue desarrollada con la distribución Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 1 metro hasta 70 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros, con una extensión total en superficie de 140 metros, para un total de 21 datos (tabla 24).

quir	ridas por el Sondeo Eléctrico Vertical II (RYERB).						
	NIO	AB/2	MN/2	ρ <sub>a</sub>	8	Ι	
	IN	(m)	( <b>m</b> )	<b>(</b> Ω*m)	0	(mA)	
	1	1	0.25	339	0.033	100	
	2	2	0.25	590.05	0.007	100	

Tabla 24. Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 11 (RYERB).

NIO	<b>AB/2</b>	MN/2	ρa	c	Ι
IN	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	<b>(Ω*m)</b>	0	(mA)
3	3	0.25	670.93	0.071	100
4	4	0.25	706.82	0.089	100
5	5	0.25	722.74	0.087	100
6	7.5	0.25	717.80	0.079	100
7	10	0.25	763.78	0.072	100
8	10	1	689.83	0.019	100
9	12.1	1	705.05	0.010	100
10	15	1	740.81	0.076	100
11	17.5	1	661.18	0.014	100
12	20	1	690.97	0.030	100
13	25	1	664.39	0.013	100
14	25	5	766.28	0.013	100
15	30	5	718.96	0.026	100
16	35	5	638.84	0.012	100
17	40	5	554.42	0.014	100
18	45	5	473.29	0.020	100
19	50	10	401.23	0.035	100
20	53	10	301.09	0.079	100

El perfil obtenido se encuentra integrado por 6 capas, desarrolla un error de 3,06% (figura 36) y está asociado a suelo de tipo transportado (con diferentes grados de húmedad), depósito aluvial y material calcáreo, correspondiente a calizas biomicríticas y micríticas, perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes, con diferentes condiciones de húmedad, saturación y densidad de fracturamiento (tabla 25).


*Figura 36.* Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical RYERB1 por medio del software IPI2Win.

Tabla 25.

Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical RYERB1.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalaría asociada
Capa	( <b>Ω</b> *m)	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	Litologia asociada
1	158	0,37	0,37	Suelo transportado húmedo.
2	4.631	0,45	0,82	Suelo transportado seco.
3	241	1,42	2,24	Depósito aluvial seco.
				Caliza biomicrítica fracturada,
4	1.449	11,60	13,84	porosa y seca perteneciente a la
				Formación Tibú – Mercedes.
				Caliza biomicrítica altamente
5	21.10	24.0	28 71	fracturada y saturada
5	51,10	24,7 30,74	30,74	perteneciente a la Formación
				Tibú – Mercedes.
				Caliza micrítica compacta y
6	656			seca perteneciente a la
				Formación Tibú Mercedes.

# **≻** SEV 12: ELM1:

La prospección geoeléctrica designada como ELM1 corresponde a la desarrollada sobre el margen derecho en el kilómetro 2,50 de la vía que conduce desde la cabecera municipal de Málaga

al casco urbano de Molagavita, 70 metros antes de la intersección con la quebrada La Magnolia, en predios de la finca de Hernando Castellanos (jurisdicción de la vereda Buenavista, municipio de Málaga). Las coordenadas corresponde a X=1'232.640, Y=1'147.445, Z=2.448.

El S.E.V fue realizado con la configuración Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 1 metro hasta 100 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros con una extensión total en superficie de 200 metros; para un total de 24 datos adquiridos, como se observa en la tabla 26.

Tabla 26.Datos adquiridas por el Sonde Eléctrico Vertical 12 (ELM1).

NIO	<b>AB/2</b>	MN/2	ρa	8	Ι
IN	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	$(\Omega^*m)$	0	(mA)
1	1	0.25	45.66	0.035	100
2	2	0.25	35.957	0.039	100
3	3	0.25	40.052	0.019	100
4	4	0.25	42.195	0.023	100
5	5	0.25	43.276	0.026	100
6	5	1	46.605	0.011	100
7	10	1	47.454	0.023	100
8	12.5	1	51.079	0.011	100
9	15	1	56.217	0.033	100
10	17.5	1	59.3	0.041	100
11	20	1	62.258	0.069	100
12	25	1	68.274	0.048	100
13	25	5	65.214	0.017	100
14	30	5	71.283	0.041	100
15	35	5	76.965	0.033	100

NIO	<b>AB/2</b>	MN/2	ρa	8	Ι
1 <b>N</b>	<b>(m)</b>	( <b>m</b> )	$(\Omega^*m)$	0	(mA)
16	40	5	79.19	0.022	100
17	45	5	81.263	0.031	100
18	50	5	82.295	0.036	100
19	60	5	85.455	0.037	100
20	60	10	89.113	0.013	100
21	70	10	95.425	0.109	100
22	80	10	94.493	0.035	100
23	90	10	100.96	0.133	100
24	100	10	95.244	0.052	100

Posterior a su procesamiento, el perfil con 1,02% de error y compuesto por 7 capas fue analizado e interpretado (figura 37).



Figura 37. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical ELM1 por medio del software IPI2Win.

El sector de estudio se encuentra constituido por depósitos Cuaternarios de tipo coluvial húmedo, así como por material calcáreo que corresponde a calizas biomicríticas saturadas y con diferente densidad de fracturamiento, pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior (tabla 27).

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litelegía egosiada
Capa	(Ω*m)	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	Litologia asociada
1	73,87	0,49	0,49	. Depósito coluvial húmedo
2	18,30	0,58	1,07	Depósito coluvial saturado.
3	103,30	1,21	2,28	Depósito coluvial húmedo.
4	22,04	2,97	5,25	Depósito coluvial muy húmedo.
5	121	5,71	10,96	Caliza biomicrítica saturada y fracturada perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.
6	107,4	25,98	36,94	Caliza biomicrítica saturada y con mayor densidad de fracturamiento perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.
7	98,08			Caliza biomicrítica altamente fracturada y saturada perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.

Tabla 27.Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical ELM1.

# **SEV 13: ELM2:**

La prospección geoeléctrica designada como ELM2 corresponde a la desarrollada sobre el margen derecho en el kilómetro 2,50 de la vía que conduce desde la cabecera municipal de Málaga al casco urbano de Molagavita, a 70,50 metros del sondeo 12 (ELM1), en predios de la finca de

Hernando Castellanos, en jurisdicción de la vereda Buenavista, municipio de Málaga. Las coordenadas corresponde a X=1'232.710, Y=1'147.454 y Z=2.452.

El S.E.V fue realizado con la configuración Schlumberger donde la separación media de los electrodos de corriente (AB/2) fue desde 1 metro hasta 100 metros y la distancia media de los electrodos de potencial (MN/2) inició en 0,25 metros y finalizó en 10 metros, con una extensión total en superficie de 200 metros. 25 datos fueron adquiridos (tabla 28).

NIO	<b>AB/2</b>	MN/2	ρa	\$	Ι
IN	<b>(m)</b>	( <b>m</b> )	<b>(</b> Ω*m)	0	(mA)
1	1	0.25	674.89	0.022	100
2	2	0.25	323.84	0.026	100
3	3	0.25	126.65	0.046	100
4	4	0.25	86.016	0.027	100
5	5	0.25	65.718	0.086	100
6	5	0.25	77.474	0.023	100
7	7.5	1	61.726	0.03	100
8	10	1	64.68	0.021	100
9	12.5	1	67.232	0.08	100
10	15	1	73.067	0.127	100
11	17.5	1	72.5	0.29	100
12	20	1	75.063	0.447	100
13	25	1	82.924	0.193	100
14	25	5	91.751	0.032	100
15	30	5	95.509	0.017	100
16	35	5	92.115	0.025	100
17	40	5	92.029	0.023	100
18	45	5	93.125	0.078	100

Tabla 28.Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 13 (ELM2).

NIO	<b>AB/2</b>	MN/2	ρa	8	Ι
IN	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	<b>(</b> Ω*m)	0	(mA)
19	50	5	90.259	0.033	100
20	60	5	90.611	0.112	100
21	60	10	85.541	0.048	100
22	70	10	83.359	0.05	100
23	80	10	86.085	0.049	100
24	90	10	90.304	0.05	100
25	100	10	91.026	0.032	100

Posterior a su procesamiento, el perfil, compuesto por 6 capas con un error de 2,94% fue analizado e interpretado (figura 38). El sector de estudio se encuentra constituido por suelo (de tipo transportado seco), depósitos coluviales (con diferentes grados de húmedad) y material calcáreo (calizas biomicríticas con diferente densidad de fracturamiento y grados de húmedad), pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior (tabla 29).



Figura 38. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical ELM2 por medio del software IPI2Win.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalagía agogiada	
Capa	$(\Omega^*m)$	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	Litologia asociada	
1	1.118	0,79	0,79	Suelo transportado seco.	
2	83,8	2,35	3,14	Deposito coluvial húmedo.	
3	37,1	2,93	6,07	Deposito coluvial muy húmedo.	
4	125	16,50	22,57	Calizabiomicríticaaltamentefracturaday saturada perteneciente ala parte superior de la Formación Tibú– Mercedes.	
5	43	31,20	53,77	Caliza biomicrítica saturada con mayor densidad de fracturamiento perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.	
6	323			CalizabiomicríticafracturadaysaturadapertenecientealapartesuperiordelaFormaciónTibúMercedes.	

Tabla 29.	

Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical ELM2.

Las prospecciones geoeléctricas 12 (ELM1) y 13 (ELM2) distantes 70,50 metros, fueron procesadas con el software IPI2Win para obtener un perfil 2D llamado "ELM" con una orientación SSW – NNE y una profundidad total de 56 metros (figura 39)

La primera capa de este perfil se acuña hacia el sector SSW con un espesor muy pequeño (menos de un metro de profundidad total) y resistividades muy altas (1.118  $\Omega$ \*m), relacionado a suelo de tipo transportado en condiciones secas. La capa infrayacente registra valores de resistividad de 18,30  $\Omega$ \*m a 103,30  $\Omega$ \*m y espesor máximo de 5,28 metros (en el costado NNE) y es interpretada como un deposito Cuaternario de tipo coluvial muy húmedo. El estrato que subyace a este desarrolla un gran espesor (mayor a 45 metros) con valores de resistividad desde 43  $\Omega^*$ m hasta 323  $\Omega^*$ m, asociado a material calcáreo, correspondiente a calizas biomicríticas con diferentes condiciones de saturación y densidad de fracturamiento (incrementando el grado de estas características en el sector SSW) pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior.



Figura 39. Perfil ELM integrado por los SEV ELM1 y ELM2.

## **SEV 14: WELM1**

El sondeo adquirido sobre el margen derecho en el kilómetro 2,50 de la vía que conduce desde la cabecera municipal de Málaga al casco urbano de Molagavita, 70 metros antes de la intersección con la quebrada La Magnolia fue llamado WELM1 (predios de la finca de Hernando Castellanos, jurisdicción de la vereda Buenavista, municipio de Málaga). Las coordenadas corresponden a X =1'232.640, Y = 1'147.445, Z = 2.448. La prospección geoeléctrica se realizó con la matriz Wenner donde la separación de los electrodos (a) inició en 6 metros y finalizó en 60 metros, con una extensión total en superficie de 180 metros. Según lo anterior, 10 datos fueron adquiridos (tabla 30).

N°	a (m)	$ ho_a \left( \Omega^* m \right)$	δ	I (mA)
1	6	43.791	0.007	100
2	12	56.762	0.016	100
3	18	68.993	0.015	100
4	24	78.219	0.013	100
5	30	80.161	0.057	100
6	36	84.597	0.05	100
7	42	88.468	0.05	100
8	48	92.897	0.058	100
9	54	92.14	0.064	100
10	60	95.727	0.076	100

Tabla 30. Datos adquiridas por el Sonde Eléctrico Vertical 14 (WELM1).

Por medio del software IPI2Win un perfil de 4 capas con un error del 1,17% fue obtenido (figura 40).



Figura 40. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical WELM1 por medio del software IPI2Win.

Relacionado con depósitos coluviales, el área de estudio también se encuentra constituida por material calcáreo (calizas biomicríticas) con diferente densidad de fracturamiento y grados de saturación, pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes (tabla 31).

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalogía osogiado
Capa	(Ω*m)	( <b>m</b> )	( <b>m</b> )	Litologia asociada
1	38,43	7,39	7,39	Deposito coluvial húmedo.
				Caliza biomicrítica fracturada y
2	122 40	1467	22.06	saturada perteneciente a la parte
2	125,40	14,07	22,00	superior de la Formación Tibú –
				Mercedes.
				Caliza biomicrítica saturada y con
2	70.27	22.08	56.04	mayor densidad de fracturamiento
3	19,21	55,90	50,04	perteneciente a la parte superior de la
				Formación Tibú – Mercedes.
				Caliza biomicrítica fracturada y
4	161 50			saturada perteneciente a la parte
4	161,50			superior de la Formación Tibú -
				Mercedes.

Tabla 31.Interpretación del Sondeo Eléctrico Vertical WELM1.

# **SEV 15: WELM2**

A 70.50 metros del SEV 14 (WELM1) sobre el margen derecho, en el kilómetro 2.50 de la vía que conduce desde la cabecera municipal de Málaga al casco urbano de Molagavita, en predios de la finca de Hernando Castellanos, se desarrolló la prospección geoeléctrica 15 denominada

WELM2, en jurisdicción de la vereda Buenavista, municipio de Málaga. Las coordenadas corresponden a X=1'232.710, Y=1'147.454, Z=2.452.

El S.E.V. se realizó con el arreglo Wenner donde la separación de los electrodos (a) inició en 6 metros y finalizó en 60 metros, con una extensión total en superficie de 180 metros y un registro de 10 datos (tabla 32).

#### N° a (m) $\rho_a (\Omega^* m)$ δ I (mA) 6 77.89 100 0.004 1 2 12 78.389 0.316 100 3 18 85.034 0.019 100 4 24 83.966 0.011 100 5 30 83.27 0.38 100 6 36 85.929 0.039 100 7 42 87.228 0.041 100 8 48 85.981 0.031 100 9 54 96.301 0.029 100 10 60 101.31 0.048 100

Tabla 32.Datos adquiridas por el Sondeo Eléctrico Vertical 14 (WELM2).

Un perfil con 4 capas con un error del 1,73% fue generado (figura 41). La zona de trabajo se encuentra constituida por depósitos coluviales (húmedos), material calcáreo biomicrítico (fracturado y saturado) y calizas micríticas (compactas y secas), perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior (tabla 33).

Los sondeos eléctricos verticales 14 (WELM1) y 15 (WELM2) separados 70,50 metros entre sí, fueron utilizados para generar un modelo 2D, denominado "WELM". Presenta una orientación SSW – NNE y alcanza una profundidad total de 65 metros (figura 42).



Figura 41. Procesamiento del Sondeo Eléctrico Vertical WELM1 por medio del software IPI2Win.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Litalagía agasiada
Capa	(Ω*m)	( <b>m</b> )	<b>(m)</b>	Litologia asociada
1	75,10	10,65	10,65	Deposito coluvial húmedo.
				Caliza biomicrítica fracturada y
2	124.80	6.08	17.63	saturada perteneciente a la parte
2	124,00	0,98	17,03	superior de la Formación Tibú -
				Mercedes.
				Caliza biomicrítica saturada y con
2	50.21	10 25	50.08	mayor densidad de fracturamiento
3	39,51	42,55	39,98	perteneciente a la parte superior de
				la Formación Tibú – Mercedes.
				Caliza micrítica compacta y seca
4	2.925			perteneciente a la formación Tibú –
				Mercedes.

Tabla 33.			
Interpretación del Sondeo	Eléctrico	Vertical	WELM2.

La primera capa alcanza una profundidad promedio de 9,02 metros (mayor espesor en el sector NNE) con resistividad entre 38,43  $\Omega$ \*m y 75,10  $\Omega$ \*m y se encuentra asociada a un depósito

Cuaternario de tipo coluvial húmedo. En el estrato infrayacente la resistividad disminuye hasta 59,31  $\Omega$ \*m relacionado a materiales con mayor contenido de agua, interpretada como una capa de calizas biomicríticas saturadas y altamente fracturadas pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes. El último estrato, de espesor desconocido y solo registrado en el costado NNE, presenta resistividades de 2.925  $\Omega$ \*m y es interpretado como material calcáreo micríticas compacto y seco.



Figura 42. Modelo WELM integrado por los SEV WELM1 y WELM2

# 7.2 Modelos sintéticos 2D

Los perfiles sintéticos de resistividad eléctrica 2D se realizaron con el objetivo de obtener los parámetros óptimos para la adquisición de los datos en campo (configuración de los electrodos) y para el proceso de inversión (número de iteración y factor de amortiguamiento). Fueron generados

6 modelos geológicos y por ende 6 secciones sintéticas de resistividad eléctrica. La localización de cada uno de ellos puede ser apreciada en el mapa de la figura 43.



Figura 43. Localización de los modelos sintéticos (MS) desarrollados.

# Modelo Sintético 1 (UIS)

El perfil geológico 1 (de orientación N - S) designado como UIS se encuentra ubicado en la zona noreste de la cabecera municipal, sobre el flanco oriental del sinclinal de Málaga, en predios adquiridos por la Universidad Industrial de Santander para su ampliación (figura 44).



Figura 44. Perfil geológico 1 llamado UIS.

El modelo sintético fue obtenido adicionando los valores de resistividad eléctrica verdadera de las estructuras que integran el subsuelo sobre el perfil geológico generado. Con una extensión en superficie de 550 metros, la sección sintética se encuentra integrado por 4 capas, donde las dos primeras representan depósitos recientes de tipo coluvial con diferentes condiciones de húmedad. La zona más superficial del modelo (12 metros) corresponde a depósitos Cuaternarios coluviales secos, con un valor de resistividad de 300  $\Omega$ \*m, mientras los 12 metros de material arcilloso húmedo subyacente, pertenecen a depósitos recientes coluviales húmedos, donde el registro de resistividad fue establecido en 150  $\Omega$ \*m. El tercer estrato desarrolla un espesor de 25 metros y se encuentra litológicamente integrado por calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas con resistividad de 250  $\Omega$ \*m. La última capa desarrolla un espesor mayor a 60 metros y es descrito como calizas biomicríticas húmedas y con menor densidad de fracturamiento, generando un aumento en el valor de la resistividad, hasta 400  $\Omega$ \*m. El material calcáreo pertenece a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior (figura 45).



Figura 45. Modelo sintético de resistividad eléctrica 2D del perfil UIS.

El procesamiento directo determina los valores de resistividad aparente, a partir de la distribución de resistividades verdaderas en el subsuelo del modelo sintético. El software, para la matriz Dipolo – Dipolo generó 1.498 datos virtuales, mediante el arreglo Wenner – Schlumberger

1.315 datos sintéticos fueron adquiridos, mientras la distribución Schlumberger obtuvo 721 datos virtuales; representados por medio de una pseudosección de resistividad aparente calculada, de 103 metros de profundidad. La modalidad Dipolo – Dipolo registra valores desde 175  $\Omega$ \*m hasta 358  $\Omega$ \*m, en la configuración Wenner – Schlumberger varía de 198  $\Omega$ \*m a 356  $\Omega$ \*m y el pseudoperfil para la matriz Schlumberger inicia en 195  $\Omega$ \*m y finaliza con 360  $\Omega$ \*m (figura 46).



*Figura 46*. Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. Configuración Dipolo – Dipolo. b. Matriz Wenner – Schlumberger. c. Arreglo Schlumberger.

En el proceso de simulación inversa, se generaron, a partir de los datos sintéticos de los pseudoperfiles de resistividad aparente calculada, los modelos de resistividad invertida. En total las 123 secciones de resistividad invertida creadas, 41 para cada distribución (16 en el primer filtro y 25 en el segundo filtro), fueron comparadas con la estructura sintética de resistividad eléctrica original mediante el software MATLAB (versión R2013a) para su análisis (tabla 34).

Tabla 34.

Configuración		Dipo	olo- D	pipol	0	Wenner-Schlumberger						Schlumberger				
		Perfil 1 (UIS)														
Parámetro		Filtro 1														
Número iteración	5	10	15		20	5	10		15	20	5	10	15	20		
Damping	0,5	3	7		10	0,5	3		7	10	0,5	3	7	10		
		Filtro 2														
Número iteración	18	19	20	21	22	8	9	10	11	12	13	14	15 16	17		
Damping	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	5	6	7	8	9	8	9	10 11	12		

Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las configuraciones realizadas, según el modelo sintético 1.

Los parámetros óptimos identificados para el primer filtro corresponden a 20 iteraciones y 0,5 en damping para la matriz Dipolo – Dipolo. El modelo más cercano al determinado registra igual damping pero 15 iteraciones con una diferencia de 3%, en un procesamiento en el cual, para el mismo número de factor de amortiguamiento, el desajuste disminuye a medida que aumenta el número de iteraciones, donde las secciones con 5 iteraciones y damping 3, 7 y 10 representan los perfiles con desigualdades mayores al 80%. La imagen eléctrica invertida define la estructura pero presenta pobre resolución en determinar el espesor de la primera capa (por las dimensiones de la misma) y la resistividad del tercer estrato (efecto generado por el alto valor de la resistividad de la última capa). Las disimilitudes de acuerdo a la sección sintética original se encuentran distribuidas en el sector central (menores al 20%), en el área determinada entre el límite de las capas (inferior al 40%), mientras las mayores disparidades son observadas en los extremos del perfil (superior a 40%) (figura 47a - b).

Los modelos seleccionados en el segundo filtro determinan 21 iteraciones con 0,6 para el factor de amortiguamiento como los parámetros óptimos y mientras los perfiles con menor desfase a él corresponden con aquellos de damping 0,6 y 0,7 (máximo 21%), el desajuste aumenta en las

secciones con factor de amortiguamiento 0,3 (de 44% a 51%), damping 0,4 (máximos de 84%) y factor de amortiguamiento 0,5 (superior a 90%), en el cual, la imagen eléctrica con mayor diferencia (100%) es aquella con la iteración 18. El modelo invertido desarrolla pobre resolución en la definición de la estructura inicial, donde las menores disparidades (20%) se presentan en el área central y las mayores (superiores al 60%) se distribuyen en los bordes del perfil (figura 47 c-d).



*Figura 47*. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

En el proceso de relacionar los secciones invertidas con las originales, se establecieron los parámetros óptimos en la distribución Wenner – Schlumberger para el primer filtro y correspondieron con 10 iteraciones y 7 para el factor de amortiguamiento, donde el perfil de 15 iteraciones con damping 7 (6% de diferencia) y el modelo de 5 iteraciones con factor de

amortiguamiento 0,5 (8% de desajuste) son los más cercanos al determinado. Las secciones de mayor disimilitud fueron aquellas con factor de amortiguamiento 3 con las iteraciones 15 (73%) y 20 (100%). El perfil invertido define con claridad 3 de las 4 capas de la estructura sintética original, con pobre resolución para determinar el tercer estrato (calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas) y registra un espesor menor de la primera capa (depósitos Cuaternarios coluviales secos). La zona más confiable del modelo es el área central (diferencias menores al 15%), mientras los mayores desajustes se distribuyen sobre los costados y entre los límites de las capas (mayores a 30%) (figura 48 a - b).

Para el segundo filtro, el modelo óptimo corresponde a 12 iteraciones con 9 en el factor de amortiguamiento, sin embargo, los perfiles con igual número de damping pero de 10 y 11 iteraciones representan los más cercanos a él (8% de diferencia), en un procesamiento donde 15 de las 24 secciones restantes desarrollan desajustes mayores al 40% y los mayores desfases son los 5 modelos con damping 0,5 (superiores al 70%). La imagen eléctrica invertida define la estructura, sin determinar con claridad el tercer estrato (material calcáreo altamente fracturado y saturado), mientras el espesor de la primera capa (depósitos coluviales secos) es más pequeño que el modelo sintético inicial. La zona más confiable corresponde a la región central con disparidades menores al 20%, mientras los bordes del mismo presentan máximo 30% de desigualdad y las áreas entre las capas superan el 50%, confirmando este sector como la zona de mayor incertidumbre (figura 48c -d).

Los parámetros óptimos seleccionados en el arreglo Schlumberger para el primer filtro son aquellos con 15 iteraciones y 10 para el factor de amortiguamiento. El perfil más cercano corresponde con igual número para el damping pero con 20 iteraciones (6% de diferencia), mientras el modelo más desajustado registra 0,5 en el factor de amortiguamiento con 20 iteraciones (100%). La imagen eléctrica invertida registra menor espesor en los depósitos coluviales secos (1° capa) y se aprecia la pobre definición de las calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas (3° estrato), con una disparidad mayor al 40%, principalmente en el límite entre las capas y en los bordes del tercer estrato (figura 49 a - b ).



*Figura 48.* Parámetros óptimos para la configuración Wenner – Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

El modelo con 17 iteraciones y 8 para el factor de amortiguamiento se presenta como el óptimo para el segundo filtro. Los parámetros registrados con menor diferencia son las 4 secciones restantes con igual número de damping, es decir la iteración 13, 14, 15 y 16 (desajuste menor a 15%) en un procesamiento donde los 20 perfiles restantes superan el 50% de desajuste, los mayores corresponden con damping 11 e iteraciones 16 (93%) y 17 (100%). La imagen eléctrica invertida define con pobre resolución el modelo inicial con resistividades similares pero espesores muy

diferentes, desarrollando desigualdades mayores al 50% en los extremos de la sección y en el límite entre las capas del mismo (figura 49 c- d).



*Figura 49.* Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

Los parámetros óptimos seleccionados del segundo filtro fueron comparados entre sí, determinando el menor error entre ellos, seleccionando la mejor matriz para ser aplicada en campo, por medio del segundo código generado en el software MATLAB (versión R2017a), creando tres imágenes: el modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, para cada configuración, expresando el error RMS porcentual (figuras 50, 51 y 52).

Las secciones invertidas registran la estructura pero presenta pobre resolución para determinar el espesor de la primera capa (depósitos Cuaternarios de tipo coluvial en condiciones secas) y en la definición del tercer estrato (calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas). Los mayores desajustes de los perfiles óptimos invertidos se distribuyen en los extremos de los mismos y en los límites entre las capas, a diferencia de la zona central que corresponde a la región de mayor confianza del modelo. Las secciones laterales se consideran áreas de incertidumbre por ser información extrapolada del pseudoperfil de resistividad aparente calculada y del error asociado al proceso de inversión. Por su parte, las diferencias entre los límites de las capas corresponden a la respuesta del modelo al cambio en el valor de resistividad entre ellas. El arreglo Dipolo – Dipolo describe desigualdades mayores al 40% en los bordes de la imagen eléctrica y superiores al 50% en el área entre el límite de los estratos, fenómeno también observable para la matriz Schlumberger y la distribución Wenner – Schlumberger, sin embargo, en esta última configuración, los mayores desajustes se encuentran distribuidos solo en los límites entre la capas, las diferencias en los extremos de la estructura corresponden con valores menores al 30%.



*Figura 50*. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Dipolo –Dipolo.



*Figura 51*. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Wenner – Schlumberger.



*Figura 52.* Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Schlumberger.

En la tabla 35 se puede observar el error, expresado en porcentaje (%), de cada arreglo según los parámetros óptimos seleccionados para el modelo sintético 1 (UIS), donde la matriz Dipolo – Dipolo presenta 13,04%, la distribución Wenner – Schlumberger registra 13% y la modalidad Schlumberger 13,01%. El arreglo seleccionado corresponde con Wenner – Schlumberger con los parámetros 12 iteraciones y 9 en el factor de amortiguamiento.

#### Tabla 35.

Error porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético 1 (UIS)

Perfil 1 (UIS)	%
Dipolo – Dipolo	13,04
Wenner – Schlumberger	13,00
Schlumberger	13,01

## Modelo Sintético 2 (Aeropuerto)

En el costado oriental de la pista del Aeropuerto Jerónimo de Aguayo, en la zona nororiental de la cabecera municipal de Málaga, se realizó el perfil denominado Aeropuerto. De orientación NE – SW, el modelo sintético 2 fue desarrollado sobre depósitos aluviales correspondientes a la quebrada Los Molinos y distribuido sobre el eje del sinclinal de Málaga, para evaluar la influencia de esta estructura sobre la acumulación de agua subterránea (figura 53).

Compuesto por 3 capas plano - paralelas, la sección alcanza una extensión máxima en superficie de 550 metros y se encuentra integrado por depósitos Cuaternarios de tipo aluvial (con diferentes grados de húmedad y diversas condiciones de saturación) y calizas altamente fracturadas y saturadas pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes. Los valores de resistividad varían desde 20  $\Omega$ \*m en la primera capa de 15 metros de espesor (depósitos recientes de tipo aluvial saturados) hasta 80  $\Omega$ \*m (material calcáreo) en un estrato mayor a 60 metros, separados entre sí, por una capa de 50  $\Omega$ \*m y 40 metros de espesor (depósitos Cuaternarios de tipo aluvial húmedo) (figura 54).



Figura 53. Perfil geológico 2 llamado Aeropuerto.



Figura 54. Modelo sintético de resistividad eléctrica 2D del perfil Aeropuerto.

El proceso directo se realizó para generar el pseudoperfil de resistividades aparentes calculadas. Se generó una pseudosección para cada configuración de 103 metros de profundidad, con registros desde 18  $\Omega$ \*m hasta 71  $\Omega$ \*m para la matriz Dipolo – Dipolo, de 21  $\Omega$ \*m a 70  $\Omega$ \*m en el arreglo Wenner – Schlumberger, mientras las resistividades aparentes de la distribución Schlumberger inician en 21,1  $\Omega$ \*m y finalizan en 70  $\Omega$ \*m (figura 55).



*Figura 55*. Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. Configuración Dipolo – Dipolo. b. Matriz Wenner – Schlumberger. c. Arreglo Schlumberger.

En el proceso de inversión se determinan los perfiles de resistividad invertida y mediante el código elaborado en el software MATLAB (versión R2017a) se correlacionan con los modelos sintéticos originales para determinar los parámetros óptimos (tabla 36).

# Tabla 36.

Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las configuraciones realizadas, según el modelo sintético 2.

Configuración		Dipol	o- Dipolo	)	Wenner-Schlumberger							Schlumberger				
	Perfil 2 (Aeropuerto)															
Parámetro		Filtro 1														
Número iteración	5	10	15	20	5	10		15	20	5	1(	)	15	20		
Damping	0,5	3	3 7		0,5	3		7	10	0,5	3		7	10		
		Filtro 2														
Número iteración	8	9	10 11	12	8	9	10	11	12	8	9	10	11	12		
Damping	0,3	0,4	0,5 0,6	0,7	5	6	7	8	9	5	6	7	8	9		

En la distribución Dipolo – Dipolo, 10 iteraciones y 0,5 para el factor de amortiguamiento fueron determinados como los parámetros óptimos y mientras el modelo más cercano registra el mismo número de damping pero 15 iteraciones (diferencia de 19%), el procesamiento determina desajustes superiores al 40% en 13 de los 15 perfiles restantes, el mayor de ellos, en secciones con 20 iteraciones y factor de amortiguamiento 10 (95%) y 7 (100%). La imagen eléctrica invertida define la estructura con sus tres estratos, sin embargo, en el último de ellos, identifica resistividades menores en los bordes y costados del mismo (según el modelo sintético inicial), generando desfases mayores al 40% sobre estas regiones, así como en el límite entre los estratos del perfil (figura 56 a - b).

El número de iteraciones correspondió a 8 y el damping seleccionado fue 0,3 para el segundo filtro, con parámetros cercanos a él (factor de amortígüemelo 0,4 con 8 y 10 iteraciones) con diferencias menores al 10%, mientras los modelos más distantes (11 iteraciones con damping 0,6 y 0,7) representan desajustes mayores al 86%. El perfil generado define las 3 capas donde la resistividad en los costados del último estrato es diferente (de menor registro) de acuerdo a la sección sintética original. Los desfases se encuentran distribuidos en la región central (menor al 20%), sobre los extremos de la tercera capa (máximo 30%) y entre los límites de los estratos (mayor al 40%) (figura 56 c- d).

Para el arreglo Wenner – Schlumberger se determinaron 10 iteraciones y 7 en el damping para el primer filtro. Los modelos más cercanos a los parámetros seleccionados corresponden con el mismo número en el factor de amortiguamiento con 15 y 20 iteraciones (diferencia menor a 10%), mientras los perfiles más distantes son las 4 secciones con damping 0,5 (desajustes mayores al 65%). La imagen eléctrica invertida define las tres capas de la estructura sintética original donde

la región más confiable corresponde a la sección central con disparidades menores al 15%, sin embargo, la desigualdad aumenta hasta el 30% en el límite entre los depósitos (Cuaternarios de tipo aluvial húmedo) y el material calcáreo (calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas) y es máxima (40%) en los extremos del tercer estrato, así como en el área entre los dos depósitos de tipo aluvial (saturado y húmedo) (figura 57 a – b).



*Figura 56*. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

El segundo filtro identifica 12 iteraciones con factor de amortiguamiento 7, donde los parámetros más cercanos a estos, corresponden al mismo damping pero con 11 iteraciones, desarrollando una diferencia menor a 0,2% (menor desajuste entre dos conjuntos de modelos en el presente informe). El perfil más distante, 12 iteraciones con 8 en factor de amortiguamiento, presenta un desajuste del 100%. La imagen eléctrica invertida define con claridad las 3 capas con

resistividades y espesores similares a la estructura sintética original, sin embargo, presenta desfases significativos (hasta 40%) en los extremos del último estrato (zonas de incertidumbre por ser información extrapolada de la pseudosección de resistividad aparente calculada) y en el límite entre las capas (respuesta al cambio en el valor de la resistividad entre ellas) (figura 57c -d).



*Figura 57.* Parámetros óptimos para la configuración Wenner – Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

El número de iteraciones y el factor de amortiguamiento óptimo seleccionado para el primer filtro en el arreglo Schlumberger correspondió a 10 y 7 respectivamente, en un procesamiento donde los modelos más cercanos (diferencia igual o menor al 10%) están definidos por 10 iteraciones y 10 en damping, así como por 3 en el factor de amortiguamiento y 5 iteraciones, mientras los perfiles más distantes (superior al 85% de desajuste) se encuentran representados por damping 0,5 (con 5 y 20 iteraciones), así como factor de amortiguamiento 3 con 20 iteraciones. La sección generada define las 3 capas de la estructura, sin embargo, desarrolla desfases iguales o mayores al 40% en los extremos de la estructura y en el área entre el límite de los dos depósitos recientes de tipo aluvial (figura 58 a - b).

El modelo determinado para el segundo filtro describe 9 iteraciones con 8 para el factor de amortiguamiento, en un procesamiento donde 12 conjuntos de parámetros de los 24 restantes desarrollan menos del 30% de diferencia de acuerdo al perfil seleccionado y en el cual la sección de 8 iteraciones con 8 para damping representa el más cercano (3%). El modelo de 12 iteraciones y 5 para el factor de amortiguamiento corresponde al más distante (100% de desfase). La imagen eléctrica invertida define las 3 capas de la estructura, sin embargo, registra pobre resolución en la definición del segundo estrato y en los extremos del tercero, desarrollando desigualdades mayores al 40% en el último sector anteriormente descrito, así como entre el límite de las dos primeras capas (figura 58c -d).



*Figura 58.* Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

Para obtener la matriz que debe ser aplicada en campo, los parámetros óptimos seleccionados del segundo filtro fueron comparados entre sí, por medio del segundo código generado en el software MATLAB (versión R2013a). Los modelos seleccionados e invertidos, según los parámetros óptimos determinados del segundo filtro, pueden ser apreciados en las figuras 59, 60 y 61, definiendo con claridad los 3 estratos (2 capas de depósitos Cuaternarios de tipo aluvial con diferentes condiciones de húmedad y material calcáreo altamente fracturado y saturado) con registros de espesor y resistividad similares según la estructura sintética inicial. Sin embargo, los perfiles invertidos definen una resistividad menor en los bordes del tercer estrato, generada por la extrapolación de información de los extremos de la pseudosección de resistividad aparente calculada sobre la imagen eléctrica invertida, además de la degradación de la resolución del modelo en profundidad. La matriz Dipolo – Dipolo corresponde al arreglo menos representativo, generado por la pobre sensibilidad en la cartografía de estructuras horizontales y la distribución Wenner – Schlumberger representa la configuración óptima para la adquisición de datos en campo por su sensibilidad a estructuras horizontales y verticales. La configuración Dipolo - Dipolo reconoce desajustes máximos del 20% en la región central, mientras los extremos del tercer estrato desarrollan 40% y el límite entre las capas supera el 60%. En la modalidad Wenner -Schlumberger, el área central identifica desigualdades menores al 20%, en contraste con los bordes de la tercera capa y el área entre los límites de los estratos con diferencias menores al 40%. La zona central de la matriz Schlumberger registra disparidades menores al 20% pero la desigualdad supera el 40% en los costados de la tercera capa y en el límite entre los estratos.



*Figura 59*. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Dipolo – Dipolo.



*Figura 60*. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Wenner- Schlumberger.



*Figura 61*. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Schlumberger.

En la tabla 37 se puede observar que el menor error, expresado en porcentaje (%), de cada configuración según los parámetros óptimos seleccionados para el modelo sintético 2 (Aeropuerto), correspondió a Wenner – Schlumberger.

## Tabla 37.

Perfil 2 (Aeropuerto)	<b>%</b> 0
Dipolo – Dipolo	13,33
Wenner – Schlumberger	11,40
Schlumberger	11,62

# Modelo Sintético 3 (Estadio/Normal)

El perfil denominado Estadio/Normal se localiza en un sector adyacente a la falla Málaga – Miranda, perpendicular al curso la quebrada La Magnolia, en la zona occidental del casco urbano del municipio de Málaga. De orientación NE – SW el modelo sintético 3 fue desarrollado para determinar la influencia de la estructura y del curso de agua anteriormente descritos en los procesos de acumulación de agua subterránea (figura 62).



Figura 62. Modelo geológico 3 llamado Estadio/Normal.

El perfil alcanza una extensión de 550 metros en superficie y se encuentra integrado por 3 capas. Litológicamente, la primera de ellas corresponde a depósitos Cuaternarios de tipo aluvial en condiciones húmedas, con una resistividad de 50  $\Omega^*$ m y un espesor máximo de 12 metros acuñándose hacia el sector NE, hasta desaparecer por completo en la abscisa 180 metros. La capa infrayacente también es descrita como depósitos de edad reciente de tipo aluvial pero en condiciones saturadas, con registro de 20  $\Omega^*$ m, incrementando el valor de su espesor desde 20 metros (en el costado SW) hasta 60 metros (en el margen NE). El ultimo estrato supera los 50 metros de espesor, presenta valores de resistividad de 80  $\Omega^*$ m y es definido como calizas altamente fracturadas y saturadas pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior. La sección sintética de resistividad eléctrica 2D Estadio/Normal puede ser apreciada en la figura 63.



Figura 63. Modelo sintético de resistividad eléctrica 2D del perfil Estadio/Normal.

En el modelado directo (Forward Modelling) el software ejecuta una adquisición virtual y genera un conjunto de datos sintéticos, representado por medio tres pseudoperfiles de resistividad aparente calculada (uno por cada distribución) con una profundidad de 103 metros. La matriz Dipolo – Dipolo registra valores desde 17,50  $\Omega$ \*m hasta 59,40  $\Omega$ \*m, la pseudosección de la modalidad Wenner – Schlumberger inicia en 18,30  $\Omega$ \*m y finaliza en 57,20  $\Omega$ \*m, mientras las resistividades aparentes en el arreglo Schlumberger varían de 18,40  $\Omega$ \*m a 57,30  $\Omega$ \*m (figura 64).



*Figura 64*. Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. Configuración Dipolo – Dipolo. b. Matriz Wenner – Schlumberger. c. Arreglo Schlumberger.

En el proceso de inversión se obtienen los perfiles de resistividad invertida, 16 por cada configuración para el primer filtro y 25 por cada matriz para el segundo filtro. Cada modelo es comparado mediante el código elaborado en el software MATLAB (versión R2013a) con las secciones sintéticas originales para determinar los parámetros óptimos (tabla 38).

### Tabla 38.

Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las configuraciones realizadas, según el modelo sintético 3.

Configuración	Dipolo- Dipolo						Wenner-Schlumberger						Schlumberger				
	Perfil 3 (Estadio/Normal)																
Parámetro		Filtro 1															
Número iteración	5	10		15	20	5	1	0	15	20	5	10	) 1	5	20		
Damping	0,5	3		7	10	0,5	3	5	7	10	0,5	3	ŕ	7	10		
	Filtro 2																
Número iteración	3	4	5	6	7	13	14	15	16	17	3	4	5	6	7		
Damping	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1	2	3	4	5		

Los parámetros óptimos determinados para el primer filtro en la matriz Dipolo – Dipolo corresponden con 5 iteraciones y damping 0,5. Los 3 modelos restantes para el mismo factor de amortiguamiento representan los perfiles más cercanos al seleccionado (diferencia menor al 36%), mientras las 8 secciones con damping 3 y 7 (entre 36% y 76%) y las 4 con factor de amortiguamiento 10 (desajuste mayor a 88%) corresponden con los más distantes, en un procesamiento donde, para igual registro de damping, el desfase incrementa a medida que el número de iteraciones aumenta. La imagen eléctrica invertida define la estructura sintética inicial pero desarrolla pobre resolución en el registro del espesor de la primera capa (depósitos aluviales saturados) y en el valor de la resistividad en los extremos del tercer estrato (calizas biomicríticas
altamente fracturadas y saturadas); generando las mayores desigualdades (superiores al 80%) en el límite entre la segunda y tercera capa (figura 65 a - b).

El modelo con 4 iteraciones de damping 0,3 es determinado como el óptimo en el segundo filtro y mientras el modelo más cercano registra el mismo número de iteraciones pero con factor de amortiguamiento 0,6 (diferencia del 17%), el más alejado es aquel de 7 iteraciones y damping 0,7 (100% de desajuste). El perfil generado define la estructura pero con pobre resolución, muy similar al fenómeno observable en el primer filtro, donde las desigualdades se distribuyen en el límite entre la primera y segunda capa (menores al 40% de desfase), en los extremos del tercer estrato (inferiores al 60% de disparidad) y en la zona de mayor incertidumbre, la cual corresponde al área entre el margen inferior de la segunda capa y el borde superior del tercer estrato (entre 60% y mayor al 80% de disimilitud) (figura 65 c- d).



*Figura 65.* Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

El conjunto de parámetros óptimos para la distribución Wenner – Schlumberger son 15 iteraciones y 0,5 en el factor de amortiguamiento. El mismo valor de damping integra tanto el perfil más cercano con 10 iteraciones (diferencia de 7%) como la sección más distante con 5 iteraciones (desajuste del 100%). En el proceso de definición del mejor modelo invertido con la estructura sintética original fue posible observar los 3 estratos, determinando el área central como la zona más confiable con diferencias menores al 30%. Mientras el límite entre la primera capa (depósitos aluviales saturados) con la segunda (material aluvial húmedo) desarrolla disimilitudes superiores al 30%, el área con mayor diferencia (supera el 80%), solo se presentan entre esta última y el tercer estrato (material calcáreo perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú Mercedes del Cretáceo inferior), correspondiente a la sección de mayor incertidumbre (figura 66 a - b).

El segundo filtro seleccionó 14 iteraciones y 0,6 en damping como los parámetros óptimos, donde los 4 perfiles restantes del factor de amortiguamiento 0,6 y las 5 secciones para el damping 0,3 representan los modelos menos alejados con desajustes inferiores al 15%, mientras los 10 estructuras con factor de amortiguamiento 0,4 y 0,5 generan diferencias desde 24% hasta 60% y los 5 perfiles más apartados están determinadas por el damping 0,7 con desfases superiores al 80%. La imagen eléctrica invertida define a la sección sintética inicial y las diferencias máximas (80%) solo se encuentran distribuidas entre la segunda y tercera capa (verificando aquella región como la zona menos confiable). El registro de disparidad disminuye en el límite entre la primera y segunda capa (menor al 30%), así como en el área central (inferior al 25%), corroborando este último sector como el de menor incertidumbre (figura 66 c- d).



*Figura 66.* Parámetros óptimos para la configuración Wenner - Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

En el arreglo Schlumberger, 5 iteraciones y 3 para el factor de amortiguamiento representan el perfil determinado en el primer filtro. La sección más cercana corresponde con 10 iteraciones y damping 7 (diferencia menor al 1%), en un procesamiento que identificó desajustes superiores al 40% solo en 5 de los 15 modelos restantes, el mayor de ellos, relaciona 20 iteraciones y 0,5 para el factor de amortiguamiento (desfase del 100%). La imagen eléctrica invertida con los parámetros seleccionados reconoce las 3 capas de la estructura pero desarrolla pobre resolución en la definición en el límite entre el segundo y tercer estrato, registrando desigualdades superiores al 60% entre el borde inferior y superior de estos estratos, así como en los bordes de la última capa (figura 67 a - b)

El segundo filtro determinó 6 iteraciones y factor de amortiguamiento 5 como los parámetros óptimos, sin embargo, el modelo más cercano es aquel de una iteración más e igual número de damping desarrollando una diferencia igual al 0,5%, donde solo 4 secciones de los 20 restantes superan el 50% de desajuste donde el mayor desfase (100%) está representado por el perfil de 3 iteraciones y damping 1. La imagen eléctrica invertida registra pobre resolución en la definición de la estructura, principalmente para la segunda capa y el tercer estrato, presentando las mayores disparidades (superiores al 80%) en el límite entre ellas (figura 67 c- d).



*Figura 67.* Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

En el proceso para determinar la matriz que debe ser aplicada en campo, tres figuras fueron generadas, el modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, para cada configuración, expresando el error cuadrático medio porcentual (figura 68, 69 y 70). El perfil sintético 3 (Estadio/Normal) corresponde con aquella sección con los mayores errores del presente informe, causado por el procesamiento de un rasgo estructural complejo, discontinuidad estratigráfica entre sedimento (depósitos Cuaternarios de tipo aluvial) y roca (material calcáreo altamente fracturado y saturado), en los cuales se puede observar la respuesta de los arreglos a cambios horizontales y verticales de resistividad. Las imágenes eléctricas inversas determinan las 3 capas del modelo con una pobre resolución en el espesor de la primera y en el valor de la resistividad en los costados del tercer estrato (con registros menores en relación a la estructura sintética original). La matriz Dipolo – Dipolo desarrolla desigualdades menores al 40% en el sector central, pero el valor es superior al 60% en los límites entre las dos primeras capas, llegando a ser máximo (100%) en el área entre el segundo y el tercer estrato, así como en los extremos de este último. La distribución Wenner - Schlumberger define con mayor sensibilidad los cambios horizontales y verticales de resistividad, identificando con claridad las 3 capas de la sección. Registra disimilitudes inferiores al 25% en la región central (zona más confiable), disparidades menores al 40% en el límite entre los dos depósitos Cuaternarios de tipo aluvial y desfases máximos a 80% entre el tercer estrato y la segunda capa (área de mayor incertidumbre). La configuración Schlumberger desarrolla los mayores errores entre los 3 arreglos, con pobre resolución en la definición de los costados del tercer estrato (fenómeno similar a la modalidad Dipolo - Dipolo). Las diferencias son menores al 35% en el sector central, de 40% sobre el límite entre las dos primeras capas y sus mayores desajustes, superiores al 80%, se encuentran distribuidos solo en el límite entre el depósito aluvial húmedo y las calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas.



*Figura 68.* Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Dipolo – Dipolo.



*Figura 69*. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Wenner – Schlumberger.



*Figura 70.* Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Schlumberger.

En la tabla 39 se puede observar el error, expresado en porcentaje (%), de cada configuración según los parámetros óptimos seleccionados para el modelo sintético 3 (Estadio/Normal).

### Tabla 39.

Error porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético 3 (Estadio/Normal).

Perfil 3 (Estadio/Normal)	%
Dipolo – Dipolo	20,40
Wenner – Schlumberger	19,40
Schlumberger	20,43

# Modelo Sintético 4 (Laguna Seca)

El perfil sintético 4 llamado Laguna Seca, con una orientación NNW – SSE, se realizó en el sector sur del área de trabajo, sobre depósitos aluviales generados por la quebrada La Magnolia o Chorrerón (figura 71).



Figura 71. Perfil geológico 4 llamado Laguna Seca.

El modelo sintético se encuentra integrado por 3 capas con una extensión total de 550 metros en superficie. La primera sección de la estructura, entre 18 metros (costado NNW) y 15 metros (región SSE) de espesor, representa depósitos recientes de tipo aluvial en condiciones húmedas con un valor de resistividad de 100  $\Omega$ \*m. Subyace a esta, un estrato de espesor variable, desde 15 metros (en el extremo NNW) hasta 12 metros (sobre el margen SSE) correspondiente a material calcáreo, calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas, pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes, con resistividad de 300  $\Omega$ \*m. La última capa, con espesor superior a 80 metros, también corresponde al miembro calcáreo de la Formación Tibú – Mercedes pero representa calizas micríticas en condiciones secas y compactas, donde el registro de la resistividad fue establecido en 600  $\Omega$ \*m (figura 72).



Figura 72. Modelo sintético de resistividad eléctrica 2D del perfil Laguna Seca.

El procesamiento directo determina los valores de resistividad aparente a partir de la distribución de resistividades en el subsuelo del modelo sintético, representado por medio de una pseudosección de 103 metros de profundidad. Mientras la matriz Dipolo – Dipolo registra valores desde 88  $\Omega$ \*m hasta 496  $\Omega$ \*m, las resistividades aparentes en el arreglo Wenner – Schlumberger varían de 105  $\Omega$ \*m a 564  $\Omega$ \*m y el pseudoperfil para la distribución Schlumberger inicia en 103  $\Omega$ \*m y finaliza en 562  $\Omega$ \*m (figura 73).

En el proceso de simulación inversa, se generaron, a partir de los datos sintéticos de los pseudoperfiles de resistividad aparente calculada, las secciones de resistividad invertida. Con el objetivo de determinar los parámetros óptimos de cada filtro, los modelos generados fueron comparados con la estructura sintética original, mediante el software MATLAB (versión R2013a) (tabla 40).



*Figura 73*. Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. Configuración Dipolo – Dipolo. b. Matriz Wenner – Schlumberger. c. Arreglo Schlumberger.

Tabla 40.

Parámetros	óptimos	del p	primer	y seg	gundo	filtro	para	cada	una	de	las	conf	ïgur	acie	ones
realizadas, s	según el i	mode	elo sint	tético	o 4.										

Configuración	Dipolo- Dipolo Wenner-Schlumberger										er	Schlumberger						
	Perfil 4 (Laguna Seca)																	
Parámetro	Filtro 1																	
Número iteración	5	10	1	5	20	5	10		15	20	5	10		15	20			
Damping	0,5	3	7		10	0,5	3		7	10	0,5	3		7	10			
Filtro 2																		
Número iteración	8	9	10	11	12	8	9	10	11	12	3	4	5	6	7			
Damping	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	8	9	10	11	12	5	6	7	8	9			

El modelo determinado como optimo en el primer filtro de la matriz Dipolo – Dipolo se encuentra integrado por 10 iteraciones y 0,5 en el factor de amortiguamiento, donde el conjunto de parámetros más cercanos a él corresponde con 5 iteraciones e igual número de damping (12% de diferencia) mientras los más distantes están representados por altos valores de iteraciones (15 y 20) con elevado número de amortiguamiento (7 y 10), en el cual, la sección con mayor desajuste (100%) es aquella de 20 iteraciones y 10 en damping. La imagen eléctrica invertida define la estructura, sin embargo, presenta pobre resolución para determinar el segundo estrato y registra resistividades menores en los bordes inferiores del perfil. Se observan desfases menores al 20% sobre los extremos superiores, menores al 30% en el sector central del modelo, superiores al 50% entre el límite de los estratos y mayores al 60% en los costados de la tercera capa (principalmente en el sector SSE) (figura 74 a - b).

El procesamiento seleccionó 8 iteraciones y 0,3 en damping para el segundo filtro, en el cual, las 24 secciones restantes superan el 25% de diferencia con respecto a este (17 de ellas, desfases mayores al 50%), donde el perfil con el mismo número de iteración pero con 0,5 de damping es el más cercano (26%) y aquel de 11 iteraciones y factor de amortiguamiento 0,7 es el más alejado (100%). El modelo invertido reconoce la estructura pero desarrolla el mismo fenómeno del primer filtro (pobre definición del segundo estrato y resistividades menores en los extremos inferiores de la sección), determinando desajustes superiores al 60% sobre los bordes del tercer estrato, así como en el área entre los límites de las capas (figura 74 c-d).



*Figura 74*. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

Fueron establecidos 10 iteraciones y 10 en damping para el primer filtro, según la distribución Wenner – Schlumberger. Los dos modelos más cercanos registran 5 iteraciones con factor de amortígüemelo 7 (5% de diferencia) y 10 (6% de desajuste), mientras las secciones más disparejas desarrollan 20 iteraciones con factor de amortiguamiento 3 (92% de desigualdad) y 0,5 (100% de desfase). La imagen eléctrica invertida determina la estructura original pero se observan disimilitudes en el sector central y sobre los extremos superiores (menor al 20%), en los costados del último estrato (inferior al 40%), entre el margen inferior del depósito Cuaternario aluvial con el techo del material calcáreo y entre la base de las calizas biomicríticas altamente saturadas y fracturadas con el techo del material calcáreo micrítico compacto y seco (mayores a 50%) (figura 75 a - b).

Posterior al proceso de comparación entre los perfiles de resistividad invertida del segundo filtro con las estructuras sintéticas originales, el valor de 8 fue seleccionado como óptimo para el número de iteración y el factor de amortiguamiento. Los 4 modelos restantes para la iteración 8 y las 5 correspondientes a la iteración 9 representan las seccionas más cercanas, en el cual, aquel de 8 iteraciones y damping 9 es el de menor disparidad (menor al 1%), mientras 4 de las 5 perfiles con 12 iteraciones registran los mayores desfases, máximo en aquella con igual valor numérico para el factor de amortiguamiento (100%). La imagen eléctrica presenta buena resolución, determinado con seguridad la zona central como la más confiable (diferencias menores al 20%), mientras la región entre el límite de la primera capa y el segundo estrato es el de mayor incertidumbre (desajustes superiores al 50%) (figura 75c-d).

Para el arreglo Schlumberger, el modelo determinado fue 5 iteraciones y 7 para el damping, en un procesamiento donde para el mismo valor en el factor de amortiguamiento, el desfase, con respecto al óptimo, aumenta a mayor número de iteración. El perfil con menor diferencia registra 5 iteraciones y damping 10 (1,5%) y el máximo corresponde con 20 iteraciones con factor de amortiguamiento 7 (100%). La sección invertida identifica la estructura sintética original pero registra resistividades menores en los bordes inferiores de la estructura. Desarrolla diferencias menores al 20% en el sector central, entre 20% y 50% en los bordes del último estrato y mayores al 50% en la frontera entre la primera capa y la segunda y en la división entre esta última y el tercer estrato (figura 76 a - b ).



*Figura 75.* Parámetros óptimos para la configuración Wenner - Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

El segundo filtro seleccionó 6 iteraciones y 8 en damping, en el cual, los 10 modelos con iteración 5 y 6 desarrollan desfases menores al 23% y mientras las secciones con 4 iteraciones registran desajustes dese 29% hasta 50% de disparidad, las estructuras de 3 iteraciones superan el 84% de desigualdad. El perfil más cercano es el integrado por 6 iteraciones con 6 en factor de amortiguamiento (diferencia de 3%) y el más distante es aquella con 3 iteraciones y damping 5 (100%). La imagen eléctrica invertida describe las 3 capas del perfil pero se observa un valor menor de resistividad en los costados del tercer estrato, relacionado con disimilitudes mayores al 40%, sin embargo, este valor supera el 50% entre el límite inferior de la primera capa y el techo del segundo estrato y entre la base de este y el techo de la tercera capa (figura 76c-d).



*Figura 76*. Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptima) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

Los parámetros óptimos seleccionados del segundo filtro fueron comparados entre sí, determinando el menor error entre ellos, identificando la mejor matriz para ser aplicada en campo. El anterior proceso se realizó mediante el segundo código generado en el software MATLAB (versión R2013a), obteniendo 3 imágenes: el modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Las imágenes eléctricas invertidas para el perfil Laguna Seca definen la estructura sintética original pero presenta pobre resolución en el registro del segundo estrato y determina resistividades menores para los bordes inferiores del modelo, donde la matriz Wenner – Schlumberger corresponde al arreglo con mejor respuesta a los fenómenos anteriormente descritos. Desarrolla mayor sensibilidad al cambio del valor de la resistividad para reconocer la segunda capa y mejora la cartografía del último estrato, reduciendo el desajuste solo a los extremos inferiores

del mismo, indicando el menor error en el proceso de correlación entre esta modalidad y la sección sintética original, favoreciendo la selección de la presente configuración para la adquisición de datos en campo. Las diferencias en el sector central de la distribución Dipolo – Dipolo son menores al 40% pero el desfase supera el 50% en algunas regiones del límite entre los materiales calcáreos (cambio de fase entre calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas con las micríticas secas y compactas) y alcanza el 100% en los costados del tercer estrato, así como en la frontera entre las dos primeras capas (figura 77). La disparidad registrada para la matriz Wenner – Schlumberger no supera el 20% en el sector central, es menor al 40% en los costados del tercer estrato y en la frontera entre los depósitos recientes con el material calcáreo altamente fracturado y saturado, y llega hasta valores mayores al 50% en el área entre los depósitos de edad reciente y las calizas (figura 78). Las desigualdades en el arreglo Schlumberger también se encuentran distribuidas sobre las mismas zonas de la segunda modalidad pero en mayor proporción, menores al 20% en el sector central, superior al 40% en los costados del tercer estrato y en el sector central, superior al 40% en los costados del tercer estrato y mayores al 50 % en el límite de la primera capa con la segunda y en el margen de esta con el tercer estrato (figura 79).

En la tabla 41 se puede observar el error, expresado en porcentaje (%), de cada configuración según los parámetros óptimos seleccionados para el modelo sintético 4 (Laguna seca), en el cual, es posible apreciar que la modalidad seleccionada es Wenner- Schlumberger donde sus parámetros están representados por 8 iteraciones y 8 damping.



*Figura* 77. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Dipolo – Dipolo.



*Figura 78.* Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Wenner - Schlumberger.



*Figura 79.* Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Schlumberger.

## Tabla 41.

Error porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético 4 (Laguna Seca).

Perfil 4 (Laguna Seca)	%
Dipolo- Dipolo	19,60
Wenner-Schlumberger	14,50
Schlumberger	14,76

# Modelo Sintético 5 (Guásimo – Naranjitos)

Sobre los depósitos Cuaternarios aluviales generados por la quebrada Chorrerón o Malagueña, en el área sur de la zona de interés, se desarrolló el perfil sintético 5 denominado Guásimo – Naranjitos, con una orientación SW – NE (figura 80).



Figura 80. Modelo geológico 5 llamado Guácimo - Naranjitos.

Con una extensión total de 550 metros en superficie la sección sintética se encuentra integrada por 3 capas acuñándose hacia el sector NE. La primera de ellas corresponde a depósitos Cuaternarios de tipo aluvial en condiciones secas, con una resistividad de 100  $\Omega$ \*m y un espesor que varía desde 15 metros hasta 10 metros. La capa infrayacente es descrita como material de edad reciente de tipo aluvial en condiciones húmedas, con registros de 50  $\Omega$ \*m y espesores entre 25 metros (en el costado SW) y 17 metros (en el margen NE). El ultimo estrato que supera los 70 metros de espesor, se encuentra integrado por calizas altamente fracturadas y saturadas pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes desarrolla resistividad de 80  $\Omega$ \*m (figura 81).



Figura 81. Modelo sintético de resistividad eléctrica 2D del perfil Guásimo - Naranjitos.

En el modelado directo, el software ejecuta una adquisición virtual y genera un conjunto de datos sintéticos representado por medio de un pseudoperfil de resistividad aparente calculada de 103 metros de profundidad. Abarca valores desde 52,40  $\Omega$ \*m hasta 98  $\Omega$ \*m (para la matriz Dipolo – Dipolo), de 57,50  $\Omega$ \*m a 90  $\Omega$ \*m (en el arreglo Wenner – Schlumberger) y desde 55,90  $\Omega$ \*m hasta 90  $\Omega$ \*m (para la distribución Schlumberger), como se puede apreciar en la figura 82.



*Figura 82.* Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. Configuración Dipolo – Dipolo. b. Matriz Wenner – Schlumberger. c. Arreglo Schlumberger.

En el proceso de inversión se obtienen los perfiles de resistividad invertida, 16 por cada modalidad para el primer filtro y 25 para cada distribución en el segundo filtro. Cada modelo invertido es comparado mediante el código elaborado en el software MATLAB (versión R2013a) con los perfiles sintéticos originales para determinar los parámetros óptimos (tabla 42).

Tabla 42.

Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las configuraciones realizadas, según el modelo sintético 5.

Configuración		Dipolo- Dipolo Wenner-Schlumberger											Schlumberger					
	Perfil 5 (Guácimo – Naranjitos )																	
Parámetro	Filtro 1																	
Número iteración	5	10	)	15	20	5	1	0	15	20	5	10		15	20			
Damping	0,5	3		7	10	0,5		3	7	10	0,5	3		7	10			
Filtro 2																		
Número iteración	8	9	10	11	12	8	9	10	11	12	3	4	5	6	7			
Damping	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	5	6	7	8	9	5	6	7	8	9			

Los seleccionados para la matriz Dipolo – Dipolo corresponden, en el primer filtro, a 10 iteraciones y 0,5 para el damping. Los parámetros del modelo más cercano a los óptimos registran 10 iteraciones y 0,3 en factor de amortiguamiento (diferencia de 4%), mientras que los perfiles con mayor desajuste (igual o superior al 90%) son aquellos con el mayor número de iteración, 20, y de damping, 7 y 10. La imagen eléctrica generada con los parámetros seleccionados define las capas de la estructura sintética original pero la resistividad decae en el margen inferior del último estrato (por la degradación de la resolución del modelo al aumentar la profundidad), sin embargo, los principales desfases se encuentran distribuidos en las secciones laterales del modelo (menor al 30%), sobre las fronteras entre las dos primeras capas (mayor al 30%) y en el margen entre el segundo y tercer estrato (superiores al 40%) (figura 83 a - b).

El segundo filtro determina 10 iteraciones y 0,4 en el factor de amortiguamiento, donde los parámetros con menor diferencia (inferior al 15%) corresponden a las cuatro iteraciones restantes para el mismo valor del damping. Todos los modelos con damping 0,3 y 0,5 registran desajustes entre 39% y 63%, mientras las secciones con factor de amortiguamiento 0,6 y 0,7 superan el 66% de desigualdad, la mayor de ellas (100%) es la de damping 0,6 con la iteración 8. El perfil óptimo

registra las 3 capas de la estructura sintética inicial y determina las mayores disparidades en el límite entre los estratos, con valores superiores al 40% (figura 83 c-d).



*Figura 83*. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertido y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

Para el arreglo Wenner – Schlumberger se determinaron 10 iteraciones y 7 en el damping para el primer filtro. De los 15 conjuntos de parámetros restantes, 8 de ellos son cercanos a los óptimos (diferencia menor a 20%) donde los modelos destacados corresponden a los cuatro para la iteración 5 (damping 0,5, 3, 7 y 10) y los tres restantes para la iteración 10 (factor de amortiguamiento 0,5, 3 y 10); por su parte, los perfiles de 20 iteraciones con damping 3 y 0,5 representan desigualdades superiores al 90%. La sección eléctrica invertida óptima determina con claridad las 3 capas de la estructura sintética original y desarrolla desigualdades menores al 15% en el área central pero mayores al 30% en el límite entre los dos primeros estratos, así como en los extremos superiores de la sección (figura 84 a - b).

El número de iteraciones descendió a 8 y el factor de amortiguamiento a 5 en el segundo filtro, en un procesamiento donde para el mismo valor de damping, el desajuste con respecto al seleccionado aumenta, al incrementar el número de iteración, en el cual, los perfiles más cercanos son damping 7 con 8 iteraciones y factor de amortiguamiento 5 con 9 iteraciones (menor al 10% de diferencia), mientras los modelos con mayor desajuste (superior al 85%) corresponden a los cuatro modelos de 11 y 12 iteraciones con damping 6 y 8. La imagen eléctrica reconoce las 3 capas de la sección sintética inicial y desarrolla disimilitudes con registros menores al 15% en el área central y mayores al 30% en la frontera entre las dos capas de material Cuaternario aluvial, así como entre el margen inferior del depósito aluvial húmedo y el techo de la caliza altamente fractura y saturada (figura 84 c- d).



*Figura 84*. Parámetros óptimos para la configuración Wenner - Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertido y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

En el primer filtro de la distribución Schlumberger, 5 iteraciones y 7 en damping fueron determinados como los parámetros óptimos. El modelo más cercano al seleccionado corresponde con 5 iteraciones y 10 en factor de amortiguamiento (diferencia de 4%), en un procesamiento donde solo 4 secciones superan el 50% de desigualdad, en el cual, el perfil más distante relaciona 20 iteraciones con 3 para damping (100%). La imagen eléctrica invertida generada define la estructura pero presenta registros de resistividad menor en los costados y sobre el margen inferior del tercer estrato, desarrollando diferencias de 20% en el sector central y en los extremos del modelo y menores al 30% entre la segunda capa y tercer estrato pero mayores al 40% en el margen inferior de la primera capa y la división superior de la segunda (figura 85 a - b).

Los resultados del segundo filtro fueron 6 iteraciones y 9 en el factor de amortiguamiento, mientras los parámetros del modelo más cercanos a ellos son aquellos de igual valor de damping pero con 5 iteraciones (diferencia de 1%) y 7 (3% de desajuste). Solo un perfil (número de iteraciones 3 y damping 5) desarrolla desigualdad máxima (100%). La sección generada define las 3 capas del perfil sintético original, donde la sección central se considera la zona más confiable del mismo (desfase menor al 15%) y el área con mayor incertidumbre corresponde con el límite entre la segunda y tercer capa (30%), así como el margen entre la primera y segunda capa (40%) (figura 85 c-d).

Para determinar y seleccionar la matriz que debe ser aplicada en campo, los parámetros óptimos seleccionados del segundo filtro fueron comparados entre sí, por medio del segundo código generado en el software MATLAB (versión R2017a).



*Figura 85.* Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertido y diferencia, medida en porcentaje, entre ellos. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

Los modelos seleccionados e invertidos, según los parámetros óptimos adquiridos, se observan en las figuras 86, 87 y 88, definiendo con claridad las 3 capas de la sección sintética original, sin embargo, el espesor de la primera de ellas, materiales Cuaternarios de tipo aluvial en condiciones secas, es menor al registrado en el perfil inicial, donde la matriz Dipolo – Dipolo corresponde al arreglo con menor resolución para determinar lo anteriormente descrito.

Las mayores diferencias de las imágenes eléctricas invertidas se distribuyen en los extremos de las mismas y en la frontera entre los estratos, caso contrario, es la zona central, definida como la región de mayor confianza de la estructura. Los márgenes laterales se consideran zonas de incertidumbre por ser información extrapolada de la pseudosección de resistividad aparente calculada y del error asociado al proceso de inversión. Por su parte, los desajustes entre los márgenes superior e inferior de las capas es la respuesta al cambio en el valor de resistividad entre ellas. La configuración Dipolo – Dipolo describe disparidades menores al 30% en los bordes del modelo pero mayores al 50% en el límite de los estratos. Mientras la modalidad Wenner – Schlumberger identifica disimilitudes mayores al 30% solo entre la frontera de las dos primeras capas, la distribución Schlumberger registra diferencias superiores al 40% en el costado superior izquierdo, así como en el área comprendida entre los dos primeros estratos del perfil.

En la tabla 43 se puede observar el error RMS, expresado en porcentaje (%), de cada arreglo, según los parámetros óptimos seleccionados para el modelo sintético 5 (Guásimo – Naranjitos).



*Figura 86*. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje entre las dos primeras, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Dipolo –Dipolo.



*Figura* 87. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje entre las dos primeras, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Wenner – Schlumberger.



*Figura 88.* Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje entre las dos primeras, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Schlumberger.

### Tabla 43.

*Error porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético 5 (Guásimo - Naranjitos).* 

Perfil 5 (Guácimo – Naranjitos)	%
Dipolo- Dipolo	9,65
Wenner-Schlumberger	9,30
Schlumberger	9,32

## Modelo Sintético 6 (Km8 – La Mina)

El perfil designado como Km 8 – La Mina fue realizado al occidente del área de trabajo, fuera de los límites de esta última para determinar la influencia del sector adyacente a la zona de interés en los procesos de acumulación de agua subterránea. Presenta una orientación SSE – NNW y puede ser apreciado en la figura 89.



Figura 89. Modelo geológico de Km 8 – La Mina.

El perfil sintético se obtuvo adicionando los valores de resistividad eléctrica verdadera de las estructuras que integran el subsuelo sobre el modelo geológico generado. El perfil sintético (de 550 metros de extensión en superficie) está compuesto por 3 capas acuñándose hacia el sector SSE. La primera de ellas corresponde a depósitos Cuaternarios de tipo coluvial en condiciones húmedas

con resistividad de 100  $\Omega^*$ m y espesor de 10 metros hasta 20 metros. El estrato infrayacente corresponde a calizas altamente fracturadas y saturadas pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior, con un espesor variable de 15 metros (en el costado SSE) a 25 metros (en el sector NNW) y resistividad de 300  $\Omega^*$ m. La última capa presenta material calcáreo, calizas micríticas pertenecientes a la Formación Tibú – Mercedes en condiciones compactas y secas, con registros de 600  $\Omega^*$ m y espesor mayor a 60 metros (figura 90).



Figura 90. Modelo sintético de resistividad eléctrica Km 8 – La Mina.

En el modelado directo, el software ejecutó una adquisición virtual generando un conjunto de datos sintéticos (1.498 para la matriz Dipolo – Dipolo, 1.315 en el arreglo Wenner – Schlumberger y 721 para distribución Schlumberger) representado por medio de un pseudoperfil de resistividad aparente calculada de 103 metros de profundidad. Con resistividades aparentes desde 84  $\Omega$ \*m hasta 505  $\Omega$ \*m (configuración Dipolo –Dipolo), de 92  $\Omega$ \*m a 412  $\Omega$ \*m (modalidad Wenner – Schlumberger) y entre 92  $\Omega$ \*m y 421  $\Omega$ \*m (matriz distribución Schlumberger) (figura 91).



*Figura 91.* Pseudosecciones de resistividad aparente calculada. a. arreglo Dipolo – Dipolo. b. distribución Wenner – Schlumberger. c. configuración Schlumberger.

En el proceso de inversión se obtienen los perfiles de resistividad invertida determinando los parámetros óptimos de inversión para ser aplicados a los datos adquiridos en campo (tabla 44).

### Tabla 44.

Parámetros óptimos del primer y segundo filtro para cada una de las configuraciones realizadas, según el modelo sintético 6.

Configuración		Dipo	lo- I	Dipolo	)	Wer	nner	-Sch	lumb	Schlumberger					
		Perfil 6 (Km8 – La Mina)													
Parámetro		Filtro 1													
Número iteración	5	10	)	15	20	5	1	0	15	20	5	10	15	20	
Damping	0,5	3		7	10	0,5	3	3	7	10	0,5	3	7	10	
Filtro 2															
Número iteración	8	9	10	11	12	8	9	10	11	12	8	9	10 11	12	
Damping	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	5	6	7	8	9	8	9	10 11	12	

Los seleccionados para la matriz Dipolo –Dipolo en el primer filtro, corresponden a 10 iteraciones y 0,5 en damping, donde el modelo con igual factor de amortiguamiento (0,5) e iteración 5 representa el parámetro más cercano al óptimo (diferencia de 6%), sin embargo, los perfiles de 15 y 20 iteraciones con damping 10 son los mayor desajuste (superior al 88%). La imagen eléctrica óptima invertida define con claridad las 3 capas de la estructura sintética original pero desarrolla en el costado SSE un cambio de resistividad muy abrupto, generado por la pobre sensibilidad de esta distribución en la cartografía de estructuras horizontales. Las mayores desigualdades se distribuyen en la parte inferior de la sección (superior al 40%), sobre los bordes del modelo (mayor al 50%) y en los límites entre los dos primeros estratos (superior al 60%) (figura 92 a - b).

El segundo filtro determina 8 iteraciones con 0,3 para el factor de amortiguamiento y el perfil más cercano corresponde con el mismo número para el damping y 10 iteraciones (20% de diferencia) en un procesamiento en el cual 17 de los 24 modelos restantes desarrollan un desajuste del 50% o mayor a los parámetros determinados, donde las secciones con iteraciones 11 y 12 con damping 0,5 y 0,6 son identificadas como aquellos de mayor disparidad (superior al 93%). La imagen eléctrica óptima invertida delimita las 3 capas que integran el perfil sintético original pero realza el cambio de resistividad de forma abrupta (en el costado SSE). Las desigualdades más significativas se registran en los bordes inferiores del modelo (mayor al 40%) en los costados del mismo (superior al 50%) y sobre los límites entre los dos primeros estratos (mayor al 60%) (figura 92c -d).



*Figura 92*. Parámetros óptimos para la configuración Dipolo – Dipolo. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellas. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

Para el primer filtro en el arreglo Wenner – Schlumberger el número de iteraciones es 10 y el damping 7; el modelo más cercano a los parámetros óptimos corresponden con igual valor en el número de iteraciones con factor de amortiguamiento 10 (7% de diferencia), mientras aquellos de 20 iteraciones con damping 0,5 y 3 son los de mayor desajuste (superiores al 86%). La imagen eléctrica invertida define la estructura y las disimilitudes se encuentran distribuidas en el sector central (menores del 15%), en la frontera entre la primera capa con el segundo estrato (mayor al 50%) y entre esta y la tercera capa, así como en los extremos inferiores de la sección, principalmente en el costado SSE (igual o superiores a 60% de desfase), generados durante el proceso de inversión (figura 93 a - b).

El número de iteraciones corresponde a 8 y el factor de amortiguamiento es 7 para el segundo filtro, en un procesamiento donde 16 de los 24 perfiles restantes desarrollan errores inferiores al

40% de diferencia, 9 de los cuales corresponden con 19% o menos. Entre ellos, se destacan los 4 modelos restantes de la iteración 8 (con damping 5, 6, 8 y 9) junto a las secciones de iteración 9 con factor de amortiguamiento 5, 6, 7 y 8 como los más cercanos al óptimo. Los de mayor desfase corresponden con la iteración más alta para este filtro, 12, con factor de amortiguamiento de 8 y 9 (mayor al 78%). La imagen eléctrica registra el sector central como la zona de mayor confianza del perfil (menor al 15% de disparidad), caso contrario, es el margen SSE: en los extremos inferiores del tercer estrato (superior al 50% de desajuste) y el área entre la base de la caliza micrítica altamente fracturada y saturada con el techo del material calcáreo compacto y seco (desigualdad mayor a 60%) (figura 93 c-d).



*Figura 93.* Parámetros óptimos para la configuración Wenner - Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellas. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

En la distribución Schlumberger, 10 iteraciones y 10 de damping corresponden a los parámetros óptimos para el primer filtro. Los modelos más cercanos a los determinados presentan 5 iteraciones con factor de amortiguamiento 3, 7 y 10 (menos de 3% de diferencia), sin embargo, los 3 perfiles restantes para la iteración 10 (con damping 0,5, 3 y 7) también describen poco desajuste con respecto al parámetro seleccionado (menor al 10%); mientras aquellas secciones con mayor disparidad corresponden a 20 iteraciones con factor de amortiguamiento 0,5 y 3 (igual o superior al 80%). La imagen eléctrica desarrolla poca resolución en la definición de las 3 capas del modelo sintético original y las mayores desigualdades se encuentran distribuidas entre la frontera de los estratos (superior al 50%) y en los márgenes laterales de la 3° capa (mayor al 60%) (figura 94 a - b).

Para el segundo filtro 8 iteraciones con damping 9 fueron seleccionados como los parámetros óptimos y el modelo más cercano corresponde con una iteración más e igual factor de amortiguamiento (menos del 2% de diferencia). De los 24 perfiles restantes, 16 de ellos presentan desajustes mayores al 30% donde las secciones con iteración 12 y damping 10, 11 y 12 superan el 85%. La imagen eléctrica invertida describe con poca precisión las 3 capas de la estructura sintética original, registrando las mayores disparidades entre el límite de los depósitos recientes de tipo coluvial húmedo con las calizas biomicríticas altamente fracturadas y húmedas, así como entre la base de este material calcáreo con el techo de la caliza micrítica compacta y seca (mayor al 50%) y en las secciones laterales de este último estrato (superior al 60%) (figura 94c-d).

Para determinar y seleccionar la matriz que debe ser aplicada en campo, los parámetros óptimos seleccionados del segundo filtro fueron comparados entre sí, por medio del segundo código generado en el software MATLAB (versión R2013a), generando tres imágenes (figuras 95, 96 y 97).



*Figura 94*. Parámetros óptimos para la configuración Schlumberger. Gráfica normalizada con valores RMS expresando el desajuste entre el modelo (óptimo) invertido con respecto a las otras secciones. Estructura sintética inicial, imagen eléctrica (óptimo) invertida y diferencia, medida en porcentaje, entre ellas. a y b. primer filtro. c - d. segundo filtro.

Los perfiles invertidos definen las 3 capas del modelo sintético inicial, sin embargo, desarrolla poca resolución para determinar el segundo estrato. Las regiones centrales se caracterizan por ser las zonas más confiables, mientras las mayores diferencias se distribuyen en los costados del tercer estrato, así como en el área entre el límite inferior del depósito reciente con el techo de la caliza altamente fracturada y saturada y entre la base de este material calcáreo con el techo de la caliza micrítica compacta y seca, correspondientes a las áreas de mayor incertidumbre. La matriz Dipolo – Dipolo corresponde al arreglo menos representativo de las 3 distribuciones, registrando en la sección central desajustes menores al 40%, sin embargo, en el límite entre las tres capas, así como en los márgenes laterales (principalmente sobre el costado SSE) las disparidades son iguales a 100%. El arreglo Wenner – Schlumberger y la configuración Schlumberger reconocen desfases menores al 20% en la región central, mientras en la frontera entre la primera capa con el segundo

estrato, entre esta y la tercera capa, así como en los extremos del perfil, determinan valores mayores al 60%, producto del proceso de inversión.



*Figura 95*. Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Dipolo –Dipolo.



*Figura 96.* Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Wenner – Schlumberger.



*Figura 97.* Modelo sintético inicial, el perfil (óptimo) invertido y la diferencia, medida en porcentaje, entre los dos primeros, expresando el error cuadrático medio porcentual. Configuración Wenner – Schlumberger.

En la tabla 45 se puede observar el error, expresado en porcentaje (%), de cada configuración según los parámetros óptimos seleccionados para el modelo sintético 6 (Km 8 – La mina), donde el arreglo Wenner – Schlumberger corresponde a la mejor opción para la recolección de datos y los parámetros óptimos para el proceso de inversión de los datos adquiridos son 8 iteraciones y 7 en el valor del factor de amortiguamiento

Tabla 45.

Error RMS porcentual de las configuraciones utilizadas en el modelo sintético 6 (Km 8 – La Mina).

Perfil 6 (Km 8 – La Mina)	%
Dipolo- Dipolo	22,97
Wenner-Schlumberger	17,70
Schlumberger	18,11
#### 7.3 Tomografías de Resistividad Eléctrica (T.R.E)

En total, 6 líneas de tomografía de resistividad eléctrica (T.R.E) fueron ejecutadas, en los mimos sectores donde se desarrollaron los modelos sintéticos. La adquisición de cada TRE y su correspondiente procesamiento fue determinado por los perfiles sintéticos, es decir, se utilizó la modalidad Wenner – Schlumberger para la obtención de la totalidad de los datos y su tratamiento se realizó por medio de los parámetros óptimos (número de iteraciones y factor de amortiguamiento), propios para cada configuración.

De las 6 prospecciones, 5 de ellas están distribuidas en jurisdicción del municipio de Málaga y la tomografía restante se localiza en territorio del municipio de San José de Miranda (figura 98). La localización de cada prospección (punto inicial y final) puede ser observada en la tabla 46 y apreciada en la figura 99



*Figura 98.* Uso del tomógrafo SuperSting R8/IP/SP para la adquisición de una Tomografía de Resistividad Eléctrica (T.R.E).

46.

Lo	ocaliza	ción	de l	las Tom	ografías	de	Resistivia	dad	Eléctrica	(T.R.E.)	
										\ /	

	TOMOGRAFIAS								
N°	Nombre Coordenadas			das	Vereda (Municipio)	Configuración			
	Tomografía		Pto.	Pto. Final					
			Inicial						
1	UIS 2	X (m)	1'149.193	1'149.174	Casco Urbano	Wenner -			
		Y (m)	1'233.752	1'233.644	(Málaga)	Schlumberger			
		Z(m)	2.227	2.220,80					
2	Aeropuerto	X (m)	1'148.896	1'149.171	Casco Urbano	Wenner -			
		Y (m)	1'233.639	1'233.166	(Málaga)	Schlumberger			
		Z(m)	2.208,30	2.209					
3	Estadio/Normal	X (m)	1'148.304	1'148.227	Casco Urbano	Wenner -			
		Y (m)	1'232.916	1'232.760	(Málaga)	Schlumberger			
		Z(m)	2.210,18	2.215,50					
4	Laguna Seca	X (m)	1'148.668	1'148.749	Yerbabuena (San José	Wenner -			
		Y (m)	1'231.518	1'231.262	de Miranda)	Schlumberger			
		Z(m)	2.165	2.162,48					
5	Guásimo /	X (m)	1'149.108	1'149.216	El Guásimo (Málaga)	Wenner -			
	Naranjitos	Y (m)	1'231.721	1'231.814		Schlumberger			
		Z(m)	2.184,32	2.176,09					
6	Km 8 / La	X (m)	1'146.625	1'146.432	Buenavista (Málaga)	Wenner -			
	Mina	Y (m)	1'232.803	1'232.993		Schlumberger			
		Z (m)	2.638,84	2.669					

Para cada tomografía se puede observar la ubicación de la misma, la separación de electrodos, la profundidad máxima alcanzada, los datos adquiridos en campo (pseudosección de resistividad aparente medida), el procesamiento (pseudoperfil de resistividad aparente calculada) la interpretación (imagen eléctrica de resistividad invertida) y su respectivo análisis estadístico

(*Convergence and Data Misfit*). También se puede apreciar el error asociado al proceso anterior, expresado en valor RMS y norma L2.



Figura 99. Localización de las Tomografías de Resistividad Eléctrica (T) desarrollados.

# ➤ TRE 1: UIS

La TRE 1 designada como UIS fue desarrollada sobre el flanco E del Sinclinal de Málaga, en predios adquiridos por la Universidad Industrial de Santander para su ampliación, sobre el sector nororiental de la cabecera municipal. Posee una orientación N – S, a una altura de 2.227 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) en el margen N y 2.220,80 m.s.n.m en el costado S. Con una separación entre electrodos de 2 metros (extensión total de 110 metros en superficie) alcanza una profundidad estimada de 21,60 metros.

El pseudoperfil de resistividad aparente medida, obtenida en campo, reconoce registros de 48,20  $\Omega^*$ m a 793  $\Omega^*$ m y el modelo de resistividad invertida, adquirida por medio del procesamiento con los parámetros óptimos, recopilados a su vez de los modelos sintéticos (12

iteraciones y 9 para el factor de amortiguamiento) determina resistividades (verdaderas) desde 8,6  $\Omega^*$ m hasta 5000  $\Omega^*$ m con un error RMS de 7,92% y L2 igual a 6,97. La topografía recolectada del terreno fue agregada a la sección, generando el descenso en los valores RMS y L2, establecidos en 6,12% y 4,16, respectivamente (figura 100).



*Figura 100*. Procesamiento de la tomografía UIS con los parámetros óptimos. Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y modelo de resistividad invertida.

Los resultados adquiridos fueron analizados estadísticamente para identificar la información desajustada, la distribución de las zonas más fiables y aquellas regiones de mayor incertidumbre, el número de datos erróneos, su valor RMS en cada iteración, así como la dispersión de cada uno de ellos y el registro del error relativo. El procedimiento anterior se realizó con el objetivo de obtener, en un proceso posterior de inversión, una imagen eléctrica invertida más ajustada, precisa y confiable del subsuelo, reduciendo los desfases. Para realizar el procesamiento fueron utilizadas las herramientas pseudosección de datos desajustados (*Data Misfit Pseudosection*), el diagrama de superficie (*Surface Data Misfit Scatter Plot*), el histograma de datos desajustados (*Data Misfit Histogram*), la curva de convergencia (*Convergence Curve*) y la gráfica de dispersión de datos

desajustados (*Data Misfit Crossplot*) de la opción Convergencia y datos desajustados (*Convergence and Data Misfit*) del menú principal Ver (*View*).

La zona más confiable corresponde con el extremo inferior y el área central del modelo, donde la diferencia no supera el 7% de error. Caso contrario, los datos con mayor desajuste se encuentran localizados en la sección más superficial (distribuidos a una profundidad menor a 4 metros) entre las abscisas 59 metros y 65 metros, con disparidades superiores al 50% y con 1 dato (de 1.288 totales) con desigualdad máxima de 56,50%. El 74,70% de la información recopilada desarrolla menos del 3% de desajuste y el 8,54% supera el 10% de disimilitud. La curva de convergencia representa una gran reducción del valor RMS y L2 en la primera iteración, sin embargo entre esta y la segunda la diferencia es muy pequeña. El fenómeno vuelve a repetirse para la segunda y tercera iteración, donde RMS disminuye 4,67% y L2 decrece 13,70, pero la diferencia no supera el 1% y 1.1, respectivamente, en la cuarta iteración. A partir de la quinta iteración, la disminución es continua hasta llegar al valor observado (RMS de 6,12% y L2 igual a 4,16). La grafica de dispersión está caracterizada por presentar buena correlación para valores bajos de resistividad aparente medida en campo en contraste con la resistividad aparente calculada en el procesamiento, resultado de la homogeneidad de los depósitos Cuaternarios de tipo coluvial húmedos, a diferencia de los registros de media y alta resistividad con elevada dispersión, generado por la heterogeneidad del material calcáreo (calizas biomicríticas) en cuanto a sus características de porosidad, grado de fracturamiento y condiciones de humedad y/o saturación.

Según lo anterior se interpretó el 91,46% de la información recolectada, es decir, los datos con errores relativos menores a 10%. El valor de la resistividad en el perfil invertido inicio en 9,80  $\Omega^*$ m y finalizó en 5.000  $\Omega^*$ m, con RMS de 1,77% y un valor para L2 correspondiente a 0,35.

El pseudoperfil de datos desajustados determina, como se observó en el primer análisis realizado, la zona central y el borde inferior como las áreas más fiables y la región superior como aquella sección de mayor incertidumbre (figura 101). Las mayores diferencias corresponden a 9,70%, localizadas a una profundidad menor de 9,30 metros entre las abscisas de 24 metros y 77 metros, de acuerdo al diagrama de superficie (figura 102). En otras palabras, se presenta la disminución de 46,80% de error, de acuerdo al primer análisis desarrollado.



*Figura 101*. Pseudosección de datos desajustados con las zonas más fiables y aquellas áreas de mayor incertidumbre. a. Primer análisis realizado. b. Segundo análisis desarrollado.



*Figura 102*. Grafica de datos desajustados de superficie con el error relativo de cada uno de ellos. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

El histograma identifica 1.148 datos (de 1.178 totales), es decir, el 97,50% del total de la información por debajo del 5% de desigualdad, sin embargo, ninguno de ellos supera el 10% de disparidad, como se observa en la línea azul de la gráfica de la figura 103, a partir de la cual, no se observan más datos desajustados. La curva de convergencia establece grandes descensos del valor RMS y L2 en las primeras 3 iteraciones, donde el registro es de 4,79% (para RMS) y 2,55 (en L2) mientras para las siguientes, la disminución es menor, sin embargo, al terminar el procesamiento de la 12° iteración (seleccionada como parámetro optimo) los valores corresponden con 1,77% en el caso del RMS y de 0,35 para L2 (figura 104).



*Figura 103*. Histograma de datos desajustados. La línea azul indica el porcentaje de error máximo. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

La gráfica de dispersión mejoró la correlación para valores bajos de resistividad aparente medida en contraste con la resistividad aparente calculada, efecto causado por la homogeneidad del depósito de edad reciente de tipo coluvial húmedo. Caso contrario, la alta dispersión observada en la gráfica para valores medios y altos de resistividad corresponde con la heterogeneidad de las calizas biomicríticas fracturadas y saturadas, así como la porosidad del depósito Cuaternario de tipo coluvial seco (figura 105)



*Figura 104*. Curva de convergencia con la disminución del valor RMS o desajuste de los datos en cada iteración. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.



*Figura 105*. Gráfica de dispersión entre los datos de resistividad aparente calculada con los datos de resistividad aparente medida. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

El modelo obtenido corresponde a un perfil confiable y preciso, por lo cual, se procedió a interpretar la imagen eléctrica invertida, generada por medio del procesamiento realizado con los parámetros óptimos, obtenidos en los modelos sintéticos (figura 106).

La sección más superficial del subsuelo desarrolla una resistividad superior de 221  $\Omega^*$ m en una capa que decrece sus dimensiones desde 10 metros en el margen N hasta 5,18 metros en el extremo S. Lo anterior es interpretado como depósito de edad reciente de tipo coluvial en condiciones secas. Infrayace una capa de 10 metros de espesor promedio con resistividades desde 9,80  $\Omega^*$ m hasta 133,70  $\Omega^*$ m, analizada como material arcilloso perteneciente a depósitos Cuaternarios de tipo coluvial con diferentes grados de humedad y saturación, aumentando el volumen de agua hacia la región S, causal del bajo registro de resistividad indicado. El último estrato presenta al menos 21 metros de espesor (el total es desconocido) con registro prevalente de 221  $\Omega^*$ m, correspondientes a material calcáreo, identificados como calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes, con incremento de la densidad de fracturamiento en el borde N, estableciendo la disminución en el valor de la resistividad.



*Figura 106.* Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 1 (UIS).

## **TRE 2:** Aeropuerto

En la zona nororiental de la cabecera municipal, sobre el costado oriental de la pista del Aeropuerto Jerónimo de Aguayo, fue ejecutada la prospección 2 o Aeropuerto. Distribuida sobre depósitos aluviales correspondientes a la quebrada Los Molinos y localizada en el eje del sinclinal de Málaga, la TRE fue realizada para evaluar la influencia de esta estructura sobre la acumulación de agua subterránea, además de obtener la mayor profundidad de investigación posible, gracias a la capacidad de extender los electrodos (del tomógrafo) la mayor distancia entre sí. Con una orientación NW – SE, a una altura entre 2.208,30 m.s.n.m en el área NW y 2.209 m.s.n.m en el extremo SE, la extensión total en superficie fue de 550 metros (separación de 10 metros entre los electrodos) y la profundidad alcanzada corresponde a 114,30 metros.

La resistividad aparente varía desde 9,40  $\Omega^*$ m hasta 424  $\Omega^*$ m, mientras el modelo de resistividad invertida (adquirida por medio de los parámetros óptimos) desarrolla valores de 1  $\Omega^*$ m a 5.000  $\Omega^*$ m, con un error RMS de 6,31% y L2 igual a 4,42, sin embargo, este valor decrece hasta 5,88% y 3,83 respectivamente, al agregar la topografía del terreno al perfil (figura 107).



*Figura 107.* Procesamiento de la tomografía Aeropuerto con los parámetros óptimos. Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y modelo de resistividad invertida.

Es posible reconocer, en la pseudosección de datos desajustados, al sector central como la región más fiable con errores relativos menores al 9%, a diferencia del margen superior y del borde inferior, los cuales representan las secciones de mayor incertidumbre con desigualdades superiores

al 40%, localizados entre las abscisas 75 metros y 380 metros. El mayor desfase corresponde al 78% pero registrado solo en un dato de los 1.275 totales, según el diagrama de superficie. El histograma identifica el 81,30% de la información recopilada con disparidades menores al 4% y solo el 4,78% de los datos supera el 10% de desajuste. La curva de convergencia desarrolla, en la primera iteración, el mayor descenso en el RMS de los datos, sin embargo, el valor resultante es mayor al 10%. En las siguientes iteraciones, la disminución es menor pero con registros superiores al 6% para RMS y mayor a 4 para L2; solo al terminar el proceso en la 12° iteración (determinado como parámetro óptimo) el RMS y L2 se encuentran por debajo de estos valores. La grafica de dispersión determina buena correlación para registros medios de resistividad aparente medida en relación a la resistividad aparente calculada, resultado de la homogeneidad del material calcáreo correspondiente a calizas biomicríticas fracturadas y saturadas; a diferencia de los valores bajos y elevados de resistividad, responsables de la alta dispersión, efecto causado por la heterogeneidad de los depósitos Cuaternarios referente a sus características de porosidad y grado de humedad y/o saturación.

Según lo anterior, se determinó analizar la información con menos del 10% de error relativo, en otra palabras, el 95,22% del total de los datos. La imagen eléctrica de resistividad invertida infiere valores de 2,80  $\Omega$ \*m a 5.000  $\Omega$ \*m, con RMS de 2,34% y L2 correspondiente a 0,61.

En la pseudosección de datos desajustados es posible observar la zona central como el área más confiable del modelo, con desigualdades menores al 4,80%. Caso contrario, son los extremos superiores e inferiores, con desfases mayores al 8% (pero menores de 10%), interpretadas como los sectores de mayor incertidumbre, localizados entre 125 metros y 360 metros desde el punto inicial de la prospección (figura 108). Las gráficas de superficie de cada análisis pueden ser

apreciadas en la figura 109, donde se evidencia, en la segunda de ellas, una reducción del de 68,30% de error relativo.



*Figura 108.* Pseudosección de datos desajustados con las zonas más fiables y aquellas áreas de mayor incertidumbre. a. Primer análisis realizado. b. Segundo análisis desarrollado.



*Figura 109*. Grafica de datos desajustados de superficie con el error relativo de cada uno de ellos. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

El histograma determina el 93,90% de la información recolectada por debajo del 5% de disparidad y solo 4 datos (0,3% del total) con desajustes máximos de 9,7% (figura 110). El

comportamiento de la curva de convergencia es muy similar al análisis anterior, donde los mayores descensos del valor RMS se obtienen en la primera iteración, mientras en las siguientes, la disminución de este registro es menor, hasta llegar (en la 12° iteración) a 2,43% para RMS y 0,61 en L2 (figura 111).



*Figura 110*. Histograma de datos desajustados. La línea azul indica el porcentaje de error máximo. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.



*Figura 111*. Curva de convergencia con la disminución del valor RMS o desajuste de los datos en cada iteración. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

El procesamiento mejoró el ajuste del perfil, disminuyendo su dispersión, como se observa en la gráfica de la figura 112, determinando una muy buena correlación para valores medios de resistividad aparente medida en contraste con la resistividad aparente calculada, causado por la homogeneidad del material calcáreo. Los valores bajos y altos de resistividad con elevada dispersión son resultado de la heterogeneidad de la porosidad de los materiales recientes no consolidados.



*Figura 112*. Gráfica de dispersión entre los datos de resistividad aparente calculada con los datos de resistividad aparente medida. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

La imagen eléctrica de resistividad invertida de 3 capas generada, mediante el procesamiento de los datos obtenidos con los parámetros óptimos seleccionados en los modelos sintéticos, fue interpretada. La zona más superficial del subsuelo desarrolla resistividades muy bajas (desde 2,80  $\Omega$ \*m hasta 18,20  $\Omega$ \*m), donde el costado NW registra el valor más bajo (correspondiente a 1  $\Omega$ \*m), en una capa que disminuye su espesor desde 25 metros hasta desaparecer en la abscisa de 510 metros. Lo anterior es interpretado como materiales finos, arenosos y lodosos, pertenecientes a depósitos

Cuaternarios de tipo aluvial en condiciones saturadas. Sobre la superficie y en el borde NW se establece una pequeña área con altas resistividades (5.000  $\Omega^*$ m), correspondientes a pequeños drenajes del sector, los cuales se encuentran canalizados, secos y son utilizados como punto de acumulación de material de desecho antropogénico en la construcción de la pista del Aeropuerto, origen del elevado registro. Subyace a esta una capa con resistividades de 18,20  $\Omega^*$ m a 68,10  $\Omega^*$ m y espesor de 43,50 metros, compuesta por materiales similares al superior, depósitos de edad reciente de tipo aluvial pero en condiciones húmedas; sin embargo, esta capa no se registra en el costado SE y solo es observable en el extremo NW. La distribución de esta capa es resultado del proceso de disolución del material calcáreo y el relleno de la misma por materiales finos, arenosos y lodosos, además de la topografía y el carácter estructural de la región. El material litológico infrayacente con resistividades prevalentes de 118  $\Omega^*$ m y espesor superior a 80 metros (el total desconocido) se define como calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas, pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior. A partir de 260 metros desde el punto inicial de la TRE, se observa la influencia del sinclinal de Málaga sobre el estrato, generando la fuerte inclinación del mismo (figura 113).



Figura 113. Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 2 (Aeropuerto).

## TRE 3: Estadio/Normal

La prospección geoeléctrica 3 (Estadio/Normal) se distribuye en un sector tectónicamente activo, adyacente a la falla Málaga – Miranda y perpendicular al curso de la quebrada La Magnolia,

incrementando la posibilidad de localizar materiales con alta concentración de agua o saturados y en altos grados de fracturamiento. La tomografía, ejecutada en la zona occidental del área de trabajo, se realizó para determinar la influencia de la estructura y del curso de agua en la dinámica de los procesos de acumulación de agua subterránea. De orientación NE – SW, la TRE se desarrolla sobre 2.210,18 m.s.n.m. (margen NE) a 2.215,50 m.s.n.m. (costado SW), con 3 metros de separación entre los electrodos (extensión total en superficie de 165 metros), alcanzando una profundidad aproximada de 32,80 metros.

La pseudosección de resistividad aparente medida abarca un registro de 12,90  $\Omega$ \*m a 109  $\Omega$ \*m, mientras el perfil de resistividad invertida (generada por medio del procesamiento con los parámetros óptimos) inicia en 4,40  $\Omega$ \*m y finaliza en 840  $\Omega$ \*m, con un error RMS igual a 1,73% y L2 de 0,33, sin embargo, este valor disminuye hasta 1,25% (RMS) y 0,17 (L2) al agregar la topografía en el modelo (figura 114).



*Figura 114*. Procesamiento de la tomografía Estadio/Normal con los parámetros óptimos. Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y modelo de resistividad invertida.

El análisis estadístico fue realizado por medio de las opciones de convergencia y desajuste de datos (*Convergence and Data Misfit*) del menú principal del software, donde se observó la región superficial del perfil como el área de mayor incertidumbre, localizada a una profundidad menor a 3,85 metros entre las abscisas 97,50 metros y 108 metros, con registros de 19,80% de diferencia. Lo anterior es corroborado por el histograma reconociendo desfases mayores al 10% en 5 de los datos obtenidos (0,39% de la información total adquirida), sin embargo, ningún de ellos se distribuye por encima del 20% de disparidad. En la curva de convergencia el error RMS es reducido, en mayor medida en las primeras iteraciones en contraste con las últimas, donde el descenso es más lento. Es posible apreciar una buena correlación para valores medios y bajos de resistividad aparente medida contrastada con la resistividad aparente calculada, infiriendo homogeneidad en los depósitos Cuaternarios de tipo aluvial saturados.

Según lo anterior, se decidió analizar el 99,61% del total de la información recopilada, correspondiente a los datos con menos del 10% de error. El valor de la resistividad, en el perfil invertido, varío desde 4,0  $\Omega$ \*m hasta 530  $\Omega$ \*m, el RMS descendió a 0,81% y L2 fue igual a 0,07.

El margen superior del modelo continúa como el sector con las mayores diferencias, según el pseudoperfil de datos desajustados, en contraste con el borde inferior y la región central (secciones más fiables). Desarrolla errores máximos de 8,80% (descenso de 11 puntos porcentuales) y en solo dos de los 1.283 datos totales, conforme el diagrama de superficie, ubicados sobre la zona más superficial, a una distancia entre 91,50 metros y 112,50 metros desde el punto inicial de la tomografía, como puede ser apreciado en la figuras 115 y 116.

El histograma registra 1.160 datos con errores menores al 1% y el 99,70% de la información recolectada desarrolla menos del 5% de diferencia, sin datos por encima del 9% de desfase (figura 117).



*Figura 115*. Pseudosección de datos desajustados con las zonas más fiables y aquellas áreas de mayor incertidumbre. a. Primer análisis realizado. b. Segundo análisis desarrollado.



*Figura 116*. Grafica de datos desajustados de superficie con el error relativo de cada uno de ellos. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

La curva de convergencia disminuye el valor RMS en cada iteración, en la cual, el cambio es mayor en las dos primeras, con RMS de 4,30% y L2 en 2.06%, mientras en las siguientes el descenso es menor, sin embargo, al final del procesamiento (en la 14° iteración) el RMS y L2 se encuentran por debajo del 1% (figura 118).



*Figura 117*. Histograma de datos desajustados. La línea azul indica el porcentaje de error máximo. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.



*Figura 118*. Curva de convergencia con la disminución del valor RMS o desajuste de los datos en cada iteración. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

La gráfica de dispersión mejoró su ajuste, de acuerdo a la inicialmente obtenida, determinando una excelente correlación entre los valores medios y bajos de resistividad aparente calculada con la resistividad aparente medida, generado por la homogeneidad de los materiales de edad reciente de tipo aluvial saturados y el material calcáreo, a diferencia de la heterogeneidad de los depósitos Cuaternarios secos y porosos con alto valor de resistividad y elevada dispersión (figura 119).

Posterior al procesamiento y al análisis estadístico realizado, se procedió a desarrollar la interpretación de la sección de resistividad invertida para la prospección 3 (Estadio/Normal).



*Figura 119*. Gráfica de dispersión entre los datos de resistividad aparente calculada con los datos de resistividad aparente medida. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

La zona más superficial del subsuelo abarca un amplio rango de variación en el valor de la resistividad, desde 46,10  $\Omega^*$ m hasta 530  $\Omega^*$ m, registrado en una capa con espesor máximo de 10 metros en el sector SW, decreciendo sus dimensiones hacia el costado NE para finalmente desaparecer por completo en la abscisa de 60 metros. Litológicamente se encuentra integrado por material fino, arenoso y lodoso no consolidado relacionado a depósito Cuaternario de tipo aluvial en condiciones húmedas a secas. Subyace al material de edad reciente, una capa de espesor variable, de 15 metros (sobre el margen SW) a más de 32 metros (en la región NE) y con resistividades bajas (iniciando en 4.0  $\Omega^*$ m y finalizando en 29,85  $\Omega^*$ m), asociado a depósitos Cuaternario de tipo aluvial con diferentes grados de húmedad y saturación, incrementando el

contenido de agua en el borde NE. Para el estrato inferior se identifican mínimo 25 metros de espesor (el total es desconocido), con aumento de su volumen hacia el área SW, con valores desde 29,85  $\Omega$ \*m hasta 101,05  $\Omega$ \*m de resistividad y corresponde con materiales calcáreos, calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes (figura 120).



*Figura 120.* Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 3 (Estadio/Normal).

### TRE 4: Laguna Seca

En la parte baja de la vereda Yerbabuena (jurisdicción del municipio de San José de Miranda), sobre el primer kilómetro de la vía que conduce desde el casco urbano de Málaga a la vereda Tequia, se desarrolló la tomografía 4 denominada Laguna Seca, en el límite sur del área de trabajo, ejecutada sobre depósitos recientes (de tipo aluvial) generados por uno de los dos drenajes principales del área de estudio (quebrada Chorrerón o Malagueña). La presente prospección geoeléctrica, se encuentra sobre una cota topográficamente más alta que la del curso de agua anteriormente mencionada, exhibe una orientación NNW – SSE y fue realizada a una altura entre 2.165 m.s.n.m. (costado NNW) y 2.162,48 m.s.n.m. (margen SSE). Los electrodos están separados 5 metros entre sí (extensión total en superficie de 275 metros) y alcanza una profundidad total de 61,48 metros.

Los valores de resistividad aparentes para la pseudosección oscilan desde 21,60  $\Omega$ \*m hasta 344  $\Omega$ \*m y en el perfil de resistividad invertida, procesada con los parámetros óptimos de los modelos sintéticos (8 iteraciones y 8 para el factor de amortiguamiento) varían de 8,70  $\Omega$ \*m a 5.000  $\Omega$ \*m, con un valor de 2,35% para RMS y 0,61 en L2, sin embargo, estos registros decrecen al 2,08% y 0,48, respectivamente, al agregar la topografía en el perfil (figura 121).



*Figura 121*. Procesamiento de la tomografía Laguna Seca con los parámetros óptimos. Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y modelo de resistividad invertida.

El modelo obtenido fue analizado estadísticamente por medio de las herramientas *Data Misfit Pseudosection, Surface Data Misfit Scatter Plot, Data Misfit Histogram, Convergence Curve y Data Misfit Crossplot.* Las dos primeras opciones determinan el sector central y la zona inferior del perfil como las áreas más confiables del mismo, con errores menores al 4,80%, a diferencia de la región superficial, sobre la cual, se distribuye el mayor desajuste de la información obtenida, ubicada a una profundidad menor a 9,75 metros entre las abscisas 120 metros y 262,50 metros, sin embargo, ningún dato supera el 10% de error relativo (figura 122).



*Figura 122*. Análisis estadístico de la TRE 4. a. Pseudosección de datos desajustados con las zonas más fiables y aquellas áreas de mayor incertidumbre. b. Grafica de datos desajustados de superficie con el error relativo de cada uno de ellos.

El histograma identifica 1.250 datos (97% de la información adquirida) con desfases menores al 5%, 8 de ellos (0,6%) con desigualdades mayores a 8% y solo 3 de los 1.288 datos totales recopilados (0,2%) con valores máximos de 9,6%, como se observa en el histograma de la figura 123



*Figura 123*. Análisis estadístico de la TRE 4. Histograma de datos desajustados. La línea azul indica el porcentaje de error máximo.

La curva de convergencia representa grandes descensos en el valor RMS en las primeras 3 iteraciones, donde el desajuste corresponde a 5,33% (RMS) y 3,15 (L2), mientras en las últimas iteraciones, la diferencia es más pequeña, sin embargo, al realizar las 8 iteraciones, seleccionada como parámetro óptimo, este valor decrece en más de 50% hasta llegar a 2,08% para RMS y 0,48 en L2. Desarrolla una excelente correlación, principalmente para valores altos y medios de resistividad aparente medida en campo en relación con la resistividad aparente calculada expresada en la gráfica de dispersión, efecto causado por la homogeneidad del material calcáreo micrítico y su bajo grado de fracturamiento. Caso contrario, corresponden a los depósitos con bajos registros de resistividad y elevadas dispersiones, generados por la heterogeneidad en su porosidad, grado de húmedad y/ o saturación (figura 124).



*Figura 124*. Análisis estadístico de la TRE 4. a. Gráfica de dispersión entre los datos de resistividad aparente calculada con los datos de resistividad aparente medida. b. Curva de convergencia con la disminución del valor RMS o desajuste de los datos en cada iteración.

Según lo anterior, el perfil de resistividad invertida para la tomografía 4 (Laguna Seca) corresponde a un modelo preciso y confiable, por lo tanto, se procedió a interpretar las 3 capas de resistividad eléctrica obtenidas en el procesamiento de la misma, donde se observó la influencia del sinclinal de Málaga (con su flanco oriental) generando el buzamiento de los estratos presentes (figura 125).



Figura 125. Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 4 (Laguna Seca).

La sección superior registra valores desde 8,70  $\Omega^*$ m hasta 125,85  $\Omega^*$ m en una capa con un espesor muy variable, 12 metros en el margen SSE y menos de 8 metros en el costado NNW, donde desaparece, con un espesor máximo de 20 metros en la región central. La capa anteriormente descrita es analizada como material fino, arenoso y lodoso de edad reciente, pertenecientes a depósitos Cuaternarios de tipo aluvial con diferentes grados de humedad, aumentando el contenido de agua hacia el extremo SSE, generando la reducción en el valor de la resistividad. El material litológico infrayacente desarrolla un espesor máximo de 24 metros (en el área NNW) en un estrato que se acuña hacia la zona central (8 metros de espesor) y desaparece en el sector SSE. De resistividad prevalente de 209  $\Omega^*$ m, es identificado como calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas, pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes, con incremento del grado de fracturamiento en algunas secciones del borde NNW. La última capa, caracterizada por el aumento de la resistividad (valores mayores de 615,50  $\Omega^*$ m) y grandes espesores (superiores a 60 metros, el total es desconocido), es reconocida también como material

calcáreo de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior pero en este estrato las calizas corresponden a micríticas y se encuentran en condiciones secas y compactas, con aumento de la densidad de fracturamiento hacia el margen NNW, generando el descenso en el registro de resistividad. Sobre esta capa, en la abscisa de 170 metros a una profundidad de 16 metros (aproximadamente en la cota 2.141 m.s.n.m) se observa el proceso de disolución del material calcáreo.

#### TRE 5: Guásimo - Naranjitos

La tomografía 5 fue obtenida en el borde inferior del área de trabajo, margen sur del casco urbano de Málaga, jurisdicción de la vereda El Guásimo, sector Naranjitos, sobre depósitos recientes (de tipo aluvial) generados por uno de los dos drenajes más importante de la región (quebrada Chorrerón o malagueña). Con una orientación SW – NE, la prospección geoeléctrica fue realizada topográficamente por debajo del nivel del curso de agua anteriormente mencionado, a una altura de 2.184,32 m.s.n.m. a la cota 2.176,09 m.s.n.m. La separación de electrodos fue establecida en 3 metros, extensión total de 165 metros en superficie y aproximadamente 31,39 metros de profundidad.

La pseudosección de resistividad aparente medida identifica valores desde 21,70  $\Omega$ \*m hasta 174  $\Omega$ \*m, mientras la resistividad verdadera adquirida con los parámetros óptimos varia de 6,70  $\Omega$ \*m a 497  $\Omega$ \*m, con un error RMS de 2,62% y L2 igual a 0,76, sin embargo, al incluir la topografía del terreno en el perfil, el valor RMS desciende hasta 2,11% y la norma L2 decrece a 0,50 (figura 126).

El análisis estadístico de los datos recopilados determina la zona central e inferior del modelo como la región más fiable, a diferencia del costado superior, donde es posible observar los mayores desajustes, con errores relativos máximos de 22,20%, distribuidos entre las abscisas 64,50 metros

y 91,50 metros. Desarrolla 18 datos de los 1.288 totales (1,40%) por encima del 10% de desfase y 4 de ellos (0,3%) con disparidades superiores al 20%. La curva de convergencia representa el descenso en el valor RMS de la información recolectada en cada iteración, con mayores diferencias en las primeras. Presenta una buena correlación para valores medios de resistividad aparente calculada, en relación a la resistividad aparente medida, resultado de la homogeneidad del material calcáreo. Caso contrario, las altas resistividades pertenecientes a los depósitos Cuaternarios de tipo aluvial seco con heterogeneidades en sus características de porosidad, grado de saturación y/o condiciones de humedad, son responsables del mal ajuste en el gráfico de dispersión.



*Figura 126.* Procesamiento de la tomografía Laguna Seca con los parámetros óptimos. Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y modelo de resistividad invertida.

Según lo anterior, se procedió a analizar el 98,60% de la información adquirida, los cuales representan menos del 10% de disparidad. La imagen eléctrica de resistividad invertida establece valores desde 9,20  $\Omega^*$ m hasta 399  $\Omega^*$ m con RMS de 1,25% y L2 igual a 0,17.

La pseudosección de datos desajustados reconoce la región inferior y central del modelo como el área más confiable, caso contrario, es la sección superior del mismo como la zona de mayor incertidumbre. El diagrama de superficie indica disparidades máximas de 9,40%, ubicadas entre 73,50 metros y 97,50 metros desde el punto inicial de la tomografía. Según lo anterior, se obtuvo una disminución de 12,82% de error según el primer análisis realizado (figura 127 y 128).



*Figura 127*. Pseudosección de datos desajustados con las zonas más fiables y aquellas áreas de mayor incertidumbre. a. Primer análisis realizado. b. Segundo análisis desarrollado.



*Figura 128*. Grafica de datos desajustados de superficie con el error relativo de cada uno de ellos. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

En el histograma de datos desajustados es posible apreciar a 1.251 datos (98,50% de la información) con errores menores al 5%, sin datos por encima del 10% de desigualdad relativa

(figura 129). No se observan cambios significativos en la curva de convergencia donde las disparidades descienden con cada iteración hasta llegar, en la 8°, al valor establecido (1,25% RMS y L2 0,17) (figura 130).



*Figura 129*. Histograma de datos desajustados. La línea azul indica el porcentaje de error máximo. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.



*Figura 130*. Curva de convergencia con la disminución del RMS o desajuste de los datos en cada iteración. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado.

La dispersión de la información disminuyó, de acuerdo al primer análisis realizado, mejorando el ajuste y aumentando la confiabilidad del modelo. Presenta una excelente correlación para valores medios de resistividad aparente calculada relacionada a la resistividad aparente medida, generado por la homogeneidad de los materiales calcáreos, a diferencia de los depósitos Cuaternarios de tipo aluvial con bajos y altos valores de resistividad, respectivamente y con elevadas dispersiones, generados por la heterogeneidad en sus características de porosidad, grado de húmedad y saturación (figura 131).



*Figura 131*. Gráfica de dispersión entre los datos de resistividad aparente calculada con los datos de resistividad aparente medida. a. Primer análisis realizado b. Segundo análisis desarrollado

Posterior a su procesamiento y análisis 3 capas de resistividades eléctricas fueron interpretadas (figura 132). La parte más superficial del subsuelo, de espesor variable (desde 5 metros hasta 12 metros) y con los valores más altos de resistividad de la presente prospección (de 108,50  $\Omega$ \*m a 399  $\Omega$ \*m) corresponde a material fino, arenoso y lodoso, pertenecientes a depósitos recientes de tipo aluvial en condiciones secas; sin embargo, solo es apreciable en el sector central y en el costado NE de la tomografía. Posterior a esta, se registra una capa con valores entre 9,20  $\Omega$ \*m y 42,35  $\Omega$ \*m con espesores de 8 metros en el margen SW a 10 metros sobre la región NE, máximo

de 25 metros en la zona central, interpretada como materiales Cuaternarios de tipo aluvial con alto grado de húmedad, aumentando esta característica hacia la región SW, generando el descenso en el valor de resistividad. Sobre estos materiales subyace un estrato con espesor superior a 25 metros (el total es desconocido) y resistividad desde 42,35  $\Omega$ \*m hasta 108,50  $\Omega$ \*m, con valor prevalente de 61  $\Omega$ \*m, analizado como material calcáreo, calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas) pertenecientes a la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes.



*Figura 132*. Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 5 (Guásimo - Naranjitos).

#### TRE 6: Km 8/La mina

Sobre la vía entre el casco urbano de Málaga y la cabecera municipal de Molagavita, se ejecutó, sobre el kilómetro 8 en jurisdicción de la finca La mina sobre la vereda Buenavista en el área rural del municipio de Málaga, la prospección geoeléctrica 6 llamada Km 8 / La Mina. Distribuida sobre depósitos Cuaternarios de tipo coluvial en el occidente del área de trabajo, fuera de los límites de esta última para determinar la influencia del sector adyacente a la zona de interés en los procesos de acumulación de agua subterránea, la tomografía presenta una orientación SSE – NNW. Realizada a una altura entre 2.638,84 m.s.n.m. y 2.669 m.s.n.m., los electrodos fueron separados 5 metros, es decir, la extensión en superficie correspondió a 275 metros y la profundidad máxima alcanzada fue de 65 metros.

Las resistividades aparentes se distribuyen desde 25,90  $\Omega$ \*m hasta 522  $\Omega$ \*m y el modelo de resistividad invertida (procesada con los parámetros óptimos, 8 iteraciones y 7 para damping) registra valores de 6,90  $\Omega$ \*m a 5.000  $\Omega$ \*m, con un error RMS de 1,11% y L2 igual a 0,14. La adición de la topografía disminuyó el porcentaje de desajuste, 1,10% para el RMS y 0,13 en L2 (figura 133).



*Figura 133*. Procesamiento de la tomografía Km 8 / La mina. Pseudosección de resistividad aparente medida, pseudoperfil de resistividad aparente calculada y modelo de resistividad invertida.

El análisis estadístico incluyó la pseudosección de datos desajustados, el diagrama de superficie, el histograma, la curva de convergencia y la gráfica de dispersión de datos desajustados. La primera de ellas reconoce la alta confianza del perfil invertido y mientras la región central e inferior corresponden a los sectores más confiables con errores menores a 3,70%, en el margen superior se distribuye la información con mayor diferencia, ubicada a una profundidad de 6,5 metros entre las abscisas de 95 metros y 210 metros, identificadas como las zonas de mayor incertidumbre, sin embargo, el error no supera el 7,40%, según el diagrama de dispersión de superficie (figura 134).

El histograma de datos desajustados relaciona el error relativo porcentual entre la información adquirida, registrando el 86,80% del total de datos obtenidos (1.118) con menos del 1% de desfase, el 99,40% no supera el 6% de disparidad y solo 1 de los de los 1.288 datos totales desarrollan desigualdades mayores al 7% pero inferiores al 8% como indica la línea azul en la figura 135, a partir de la cual, no se presentan datos con disimilitud.



*Figura 134*. Análisis estadístico de la TRE 6. a. Pseudosección de datos desajustados. b. Diagrama de superficie de datos desajustados.



*Figura 135.* Análisis estadístico de la TRE 6. Histograma de datos desajustados. La línea azul indica el porcentaje de error máximo.

La gráfica de dispersión presenta una excelente correlación principalmente para valores altos y medios de resistividad aparente medida en contraste con la resistividad aparente calculada, causado por la homogeneidad del material calcáreo micrítico y su bajo grado de fracturamiento. Caso contrario, materiales no consolidados de bajas resistividades desarrollan altas dispersiones, generada por heterogeneidad de su porosidad, grado de humedad y/o saturación. Durante el procesamiento el valor RMS de los datos decrece significativamente en las primeras 3 iteraciones donde el registro corresponde a 1,45% (y 0,42 para L2), mientras en las últimas, la diferencia es más pequeña hasta llegar al error identificado (1,10% de RMS y 0,13 de L2) en la 8° iteración (figura 136).



*Figura 136*. Análisis estadístico de la TRE 6. a. Gráfica de dispersión entre los datos de resistividad aparente calculada con los datos de resistividad aparente medida. b. Curva de convergencia con la disminución del valor RMS o desajuste de los datos en cada iteración.

Los datos recopilados en la etapa de campo para la prospección geofísica 6 (km8/La Mina) infieren un perfil confiable y preciso. Según lo anterior, se procedió a interpretar la imagen eléctrica invertida, resultado del procesamiento realizado con los parámetros óptimos, obtenidos

en los modelos sintéticos. La sección invertida desarrolla 3 capas de resistividad eléctrica, donde la primera de ellas se encuentra representada por valores entre 6.90  $\Omega^*$ m y 110,30  $\Omega^*$ m, con un espesor variable de 10 metros (en el margen SSE) a 15 metros (en el costado NNW), analizada como material arcilloso perteneciente a depósitos Cuaternarios de tipo coluvial con diferentes grados de húmedad, incrementando el volumen de agua hacia el borde NNW, generado por aguas de infiltración desarrollando flujos hipodérmicos. La capa infrayacente identifica una resistividad desde 110.30  $\Omega^*$ m hasta 573,50  $\Omega^*$ m con un valor prevalente de 185  $\Omega^*$ m en un estrato que se acuña desde el extremo NNW, donde es registrado el mayor volumen con 25 metros de espesor, hasta la zona SSE, en la cual, el espesor es menor a 5 metros. Lo anterior es determinado como calizas biomicríticas altamente fracturadas y saturadas, perteneciente a la parte superior de la Formación Tibú - Mercedes del Cretáceo inferior. El material litológico infrayacente, caracterizado por resistividades mayores a 573,50  $\Omega^*$ m y espesor de al menos 40 metros (el total es desconocido), fue definido como material calcáreo micrítico compacto y seco, distribuidos principalmente en la región SSE, es decir hacia el centro del sinclinal de Málaga. Las calizas micríticas compactas y secas desarrollan, en el borde NNW, un patrón de densidad de fracturamiento, generando el descenso en el valor de la resistividad sobre esta área (figura 137).



*Figura 137*. Interpretación de la sección de resistividad invertida de la tomografía 6 (Km8/La Mina).

#### 8. Discusión de Resultados

El estudio de resistividad 2D se ha aplicado con éxito a la exploración de aguas subterráneas, en la investigación de filtraciones de presas y a otros estudios ambientales en diferentes partes del mundo (Aluko, *et al*, 2017). La información geofísica obtenida y los modelos geoeléctricos generados permiten una caracterización más robusta del subsuelo en el área perimetral en el municipio de Málaga, en el departamento de Santander (Colombia).

Las técnicas de resistividad eléctrica y en general, la prospección geofísica corresponden a estudios de exploración indirecta, los cuales deben ser complementados con geología de campo. Para el presente trabajo de investigación fueron ejecutados 15 Sondeos Eléctricos Verticales, se realizaron 6 modelos sintéticos y 6 Tomografías de Resistividad Eléctrica fueron desarrolladas. Adicional a estos datos, se adquirió un buen registro de campo (información de apoyo y/o de control).

En el presente caso de estudio, los resultados indican que la construcción o implementación de secciones sintéticas 2D mejora el procesamiento de datos de resistividades verdaderas en una prospección geoeléctrica, en concordancia con la información de Cruz (2016), Díaz (2010) y Tapias *et al* (2005). La metodología aplicada es útil para establecer un perfil geoeléctrico representativo de una región de estudio y se podría aplicar en una zona con capacidad acuífera y con ausencia de información sobre el subsuelo.

La prospección geoeléctrica corresponde a un proceso rápido, económico, no invasivo y no destructivo que describe la variabilidad horizontal y vertical del subsuelo (Tabbagh et al., 2000). Son útiles para detectar cuerpos y estructuras altamente conductores, corroborando una relación
directamente proporcional (salvo algunas excepciones) entre el espacio entre los electrodos y la profundidad máxima de investigación. Sin embargo, cuanto mayor sea el espaciamiento, menor será la resolución, tanto lateral como verticalmente, por lo que no será posible detectar un cuerpo pequeño a gran profundidad (Mussett y Khan, 2000). Además, se confirmó la relación inversa entre la profundidad media de investigación y la nitidez, a medida que aumenta la primera, la resolución en los primeros metros será menor. El método Schlumberger desarrolla una mayor nitidez en la sección más superficial del subsuelo, en comparación con la configuración Wenner, resultado de la pequeña distancia de separación entre los electrodos de potencial (MN), en relación al par de corriente (AB). Para el arreglo Wenner, la separación equidistante entre los electrodos de corriente y potencial (a) genera una profundidad de investigación mayor en los primeros metros, disminuyendo la nitidez.

A partir de los 15 perfiles 1D recolectados, procesados y analizados, se ejecutaron 7 modelos geoeléctricos 2D por medio de la unión de dos secciones 1D obtenidas en sectores contiguos (Bobachev, *et al.*, 2000), con el objetivo de visualizar las variaciones espaciales y en profundidad de las resistividades de los materiales del subsuelo mediante la correlación entre el valor de la resistividad, el espesor y la profundidad de las diferentes capas o estratos que integran cada imagen eléctrica.

El procesamiento de los modelos sintéticos de resistividad eléctrica 2D determinó los parámetros óptimos (Samouëlian, *et al*, 2005), es decir, la mejor configuración de los electrodos para recolectar la información en campo y las mejores características para realizar el modelado inverso de los datos recopilados (número de iteraciones y factor de amortiguamiento o damping). El proceso, propuesto por AGI (2009), corresponde con la correlación entre el perfil sintético invertido generado con la sección sintética original.

Sin embargo, cada uno de los perfiles bidimensionales invertidos generó, en la zona más superficial, secciones de máxima energía, producto de la distribución de la fuente, los electrodos y el proceso de simulación inversa; similares al fenómeno denominado huellas o *footprints* en sísmica de reflexión que suelen ser fuente de errores interpretativos (Chelotti *et al*, 2018), ocultando zonas o enmascarando sectores con diferencias significativas entre la imagen eléctrica invertida y los modelos sintéticos originales. Además, los datos de la estructura de resistividad invertida, presentados en una sección rectangular, son generados a partir de un pseudoperfil de resistividad aparente sintética de sección triangular, causal de efectos de borde, agregando información incompleta al modelo (Perdomo, 2009), generando ruido en los bordes del mismo en la medición de resistividad (Gabarrón, 2013) debido a la mala resolución de los dos extremos (AGI, 2009), extrapolando el valor de las secciones de los bordes del pseudoperfil de resistividad aparente sintética sobre los extremos de la estructura invertida (figura 138).

Es necesario identificar los diferentes patrones de ruido para poder realizar la atenuación o en caso de ser posible, la remoción de los mismos, si se desea que el perfil invertido sea representativo dentro de proceso de comparación y selección. Lo anterior radica en la influencia generada por los datos ruidosos o desajustados sobre la extensión lateral y en profundidad del modelo, así como en la simulación inversa, la selección de los parámetros óptimos y en el error asociado al proceso. En sísmica, por ejemplo, la huella es realzada y atenuada por medio de atributos sísmicos (Cuellar y Chávez, 2013).

Para evitar el fenómeno de las huellas, se determinó analizar el perfil después de los primeros 5,20 metros de profundidad, que corresponden con la mayor profundidad media de investigación (para la primera adquisición virtual generada) de las tres configuraciones utilizadas en el presente estudio. El tratamiento para el efecto de borde correspondió con relacionar solo las secciones

trapezoidales de los modelos de resistividad invertida y las estructuras sintéticas originales, es decir, el área comprendida entre las dos líneas trazadas a 45° (pendiente 1) desde los extremos superiores de los perfiles. Lo anterior genera una relación entre el desplazamiento horizontal y la profundidad, opción predeterminada en el software en 1 (AGI, 2009). En otras palabras, comparar el área central donde los datos son confiables, excluyendo los bordes de cada uno de ellos. El error o la diferencia se obtienen de comparar solo la sección trapezoidal de los dos modelos correlacionados, sin embargo, las gráficas se observan completas para mejorar la visualización.



*Figura 138*. Ejemplo de los patrones de ruido sobre los modelos invertidos. a. Efecto de *footprints* o huellas. b. Influencia del fenómeno de efecto de borde.

Las imágenes eléctricas invertidas para los perfiles sintéticos 2D definen la estructura original pero generan áreas de mayor incertidumbre distribuidas sobre los márgenes laterales de las mismas, en los bordes del último estrato y en el área entre los límites de las capas, caso contrario, es la zona central que corresponde a la región de mayor confianza del modelo. Las secciones laterales se consideran áreas de incertidumbre por ser información extrapolada del pseudoperfil de resistividad aparente calculada, además del error asociado al proceso de inversión. Los extremos del último estrato no representan información fiable a causa de la degradación de la resolución (AGI, 2009) y la disminución de la sensibilidad del modelo al aumentar la profundidad de investigación (Samouëlian, *et al*, 2005), generada en los métodos de resistividad. Por su parte, las diferencias entre los límites de las capas corresponden a la respuesta del modelo a la variación en el valor de resistividad entre ellas, además de los cambios litológicos que representan, límites entre depósitos de edad reciente no consolidados y materiales litológicos con diversos grados de humedad y/o saturación y diferentes condiciones de densidad fracturamiento.

Para el procesamiento de los perfiles sintéticos de resistividad eléctrica 2D, por cada modelo geológico, se generó una imagen eléctrica sintética de resistividad, tres pseudosecciones de resistividad aparente calculada (una por cada configuración), 48 estructuras de resistividad invertida para el primer filtro (16 por cada matriz) y 75 perfiles de resistividad invertida para el segundo filtro (25 por cada arreglo). Es decir, se determina la mejor sección entre 123 modelos de resistividad invertida para una sección geológica. En total, 738 imágenes eléctricas de resistividad invertida fueron generadas, analizadas y comparadas entre sí, determinando la distribución de electrodos y los parámetros óptimos de inversión. La modalidad de electrodos determinada correspondió a Wenner – Schlumberger, configuración seleccionada como óptima para la adquisición de datos, la cual genera una mejor respuesta a los cambios laterales y verticales de

resistividad, en comparación con otras matrices (Loke, 2012). El número de iteraciones y el factor de amortiguamiento resultante del procesamiento son propios para cada perfil.

Las tomografías de resistividad eléctrica fueron recolectadas por medio de la configuración establecida en los modelos sintéticos (Wenner- Schlumberger) y procesadas según los parámetros indicados como óptimos. La zona central de las tomografías corresponde con las áreas de mayor confiabilidad, a diferencia de la región superficial, la cual desarrolla los mayores desajustes; similares a los sectores más fiables y de mayor incertidumbre en los modelos sintéticos 2D. Sin embargo, los parámetros anteriormente descritos solo son recomendados para ser aplicados en la zona de estudio y bajo las determinadas condiciones de húmedad, saturación y densidad de fracturamiento de dicha región.

La topografía incorporada sobre los modelos sintéticos y en las tomografías de resistividad eléctrica permitió analizar el efecto del relieve en el procesamiento de un conjunto de datos y evaluar su influencia en el proceso de inversión (Loke, 2000), relacionando el modelo adquirido a la topografía de la superficie terrestre; determinando la disminución del error relativo o el valor RMS y de la norma L2, corroborando que las grandes variaciones de resistividad cerca a la superficie en un perfil con relieve homogéneo generan resultados de baja confiabilidad.

El tratamiento realizado para cada sondeo eléctrico vertical desarrollo errores desde 0,52% hasta 5,49%. En el proceso de comparación entre el modelo sintético inicial y la imagen eléctrica invertida la medida de desajuste varió entre 9,30% y 20,43%, mientras los perfiles sintéticos óptimos determinaron diferencias desde 9,30% y 19,40%. Sin embargo, los parámetros de las secciones anteriormente seleccionadas en el tratamiento de los datos de las tomografías de resistividad eléctrica registran disparidades que oscilan entre 0,81% a 2,34%. El valor registrado para L2 comprendió desde 00,7 hasta 0,61. Los desajustes obtenidos validan el proceso

metodológico planteado y permiten analizar modelos de resistividad invertida representativos, precisos y confiables.

Para los datos adquiridos virtualmente en los modelos sintéticos, así como para la información obtenida en campo, se determinó que según la elección de una configuración electródica es posible identificar con mayor certeza un tipo específico de estructura geológica (Ávila, 2016). Para el área de estudio, se corroboro la información de Loke (2012) donde la modalidad Dipolo – Dipolo es más eficaz en la cartografía de estructuras verticales, mientras el arreglo Schlumberger es efectivo para detectar cambios horizontales de resistividad y la configuración Wenner – Schlumberger caracteriza estructuras verticales, además de presentar buena intensidad en su señal.

Los materiales más superficiales de la zona de estudio corresponden a suelo, de dos tipos, transportado y residual, generalmente con alto contenido de agua y de espesores menores a 3 metros. El suelo transportado de grano grueso, en condiciones similares de húmedad y/o saturación desarrolla mayor valor de resistividad en relación con los suelos residuales de grano fino, de acuerdo a la información de Gabarrón (2013). El suelo transportado se encuentra ubicado en los flancos del sinclinal de Málaga, con resistividades menores a 100  $\Omega$ \*m (en condiciones saturadas) a mayores de 1.000 con  $\Omega$ \*m (con bajo grado de húmedad). El suelo de tipo residual, distribuido sobre el núcleo de la estructura, desarrolla valores desde 20  $\Omega$ \*m (materiales saturados) hasta valores superiores a 1.000  $\Omega$ \*m (suelo seco).

Los depósitos Cuaternarios de tipo aluvial están compuestos por materiales finos, arenosos y lodosos, generalmente húmedos a saturados y distribuidos bajo el casco urbano del municipio de Málaga, en el sector central de la zona de trabajo, asociados a los dos principales drenajes de la región, las quebradas La magnolia y Chorrerón o Malagueña. Con registros menores a 30  $\Omega$ \*m (depósito saturados) a mayores de 150  $\Omega$ \*m (materiales secos) y espesores máximos de 43,50 metros. Los depósitos Cuaternarios de tipo coluvial se encuentran integrados por materiales arcillosos, localizados sobre los extremos del área de estudio: costado norte, margen occidental y borde oriental. Los registros abarcan resistividades menores a 20  $\Omega^*$ m (depósitos saturados) hasta mayores a 150  $\Omega^*$ m (materiales secos) en capas con espesores inferiores a 30 metros. No representan interés hidrogeológico por su composición y el pequeño espesor que desarrollan, favoreciendo el almacenamiento del recurso hídrico subterráneo pero generando dificultades para transmitir y ceder el agua del subsuelo, además de la elevada demanda de energía necesaria para extraer o drenar el agua de estos materiales. Sin embargo, desarrollan recarga por rezume (goteo vertical) hacia los materiales infrayacentes.

Las rocas de interés en el presente estudio corresponden a calizas biomicríticas y micríticas., las cuales forman parte de la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior. Las calizas biomicríticas son las que presentan interés hidrogeológico, debido a su alta densidad de fracturamiento y elevada saturación (contenido de agua), con valores de 20  $\Omega$ \*m a 400  $\Omega$ \*m y espesores superiores a 80 metros (tabla 47). La alta densidad de fracturamiento favorece el fenómeno de karstificación como resultado de procesos de disolución del material calcáreo y las fracturas son los canales necesarios para permitir el flujo de agua a través de ella, necesarias para permitir el almacenamiento del recurso hídrico subterráneo. Sin embargo, el material calcáreo anteriormente descrito también se presenta pero en menor proporción, en condiciones húmedas y con menor densidad de fracturamiento (registros desde 400  $\Omega$ \*m a 600  $\Omega$ \*m). Las calizas micríticas, por su parte, se encuentran compactas y secas, desarrollando resistividades mayores a 600  $\Omega$ \*m en estratos superiores a 60 metros, pero el espesor total es desconocido. El material calcáreo micrítico no representa interés hidrogeológico por registrar altos valores de resistividad, interpretados como calizas en ausencia de agua y con poca o nula densidad de fracturamiento, característica indispensable para permitir el almacenamiento de agua subterránea.

Litología	Grado de húmedad/fracturamiento	Resistividad	
		Eléctrica	Espesor [m]
		[Ω*m]	
Suelo residual	Suelo residual saturado	< 20	
	Suelo residual húmedo	20 - 100	1 – 3
	Suelo residual seco	> 100	
Suelo transportado	Suelo transportado saturado	< 100	
	Suelo transportado húmedo	100 - 1000	1 – 3
	Suelo transportado seco	> 1000	
Depósito coluvial	Depósito coluvial saturado	< 20	
	Depósito coluvial húmedo	20 - 150	5 - 30
	Depósito coluvial seco	> 150	
Depósito aluvial	Deposito aluvial saturado	< 30	
	Deposito aluvial húmedo	30 - 150	5 - 40
	Deposito aluvial seco	> 150	
Caliza	Caliza biomicrítica fracturada	y 20 400	20 80
	saturada	20 - 400	20-80
	Caliza biomicrítica fracturada	y 400 - 600	60 – Espesor total
	húmeda	400 - 000	descenecide
	Caliza micrítica compacta y seca	> 600	uesconociuo

Tabla 47. Correlación entre las características geológicas y las propiedades físicas.

### 9. Conclusiones

En el procesamiento de datos sintéticos 2D se analizó la respuesta de un flujo de corriente eléctrica a través del subsuelo, es decir, se evaluó el efecto generado de una prospección geofísica sobre modelos descriptivos sintéticos representativos de determinados materiales y estructuras reales en el subsuelo; examinando la influencia de los cambios en el valor de la resistividad eléctrica de capas y estratos que se acuñan o aumentan su espesor y volumen a través de su extensión lateral en el perfil, además del efecto de la disposición topográfica, el relieve del terreno y los procesos que deforman, pliegan y fallan la corteza terrestre como el sinclinal de Málaga y/o efectos generado por la falla Málaga – Miranda; determinando la mejor estrategia para la recolección de información y las mejores características en el modelado inverso en un entorno geológico – geofísico establecido.

En las campañas de sondeos y tomografías eléctricas, las resistividades y espesores de las estructuras que integran el subsuelo infieren condiciones óptimas y favorables para la ocurrencia de agua subterránea bajo el casco urbano del municipio de Málaga y su periferia. El miembro de interés hidrogeológico corresponde al estrato calcáreo de la parte superior de la Formación Tibú – Mercedes, integrado litológicamente por calizas biomicríticas saturadas y altamente fracturadas con porosidad secundaria, de espesores y resistividades adecuadas, representando interés para su explotación.

Los perfiles 1D y los modelos 2D generados a partir de la información adquirida en campo y procesados por medio de softwares especializados para dicho fin, contribuyen, mejoran y

profundizan en el conocimiento, caracterización y descripción del subsuelo del área de trabajo. La interpretación de las secciones 1D y de las imágenes eléctricas 2D estableció una profundidad máxima de investigación de 114,30 metros, registrando los materiales que integran o componen la zona de interés, identificando suelo (transportado y residual), depósitos recientes (de tipo aluvial y coluvial) y calizas biomicríticas y micríticas; todos ellos con diferentes condiciones de humedad y/o saturación y, en el caso de los materiales consolidados, el grado de fracturamiento. El material calcáreo presente pertenece a la Formación Tibú – Mercedes del Cretáceo inferior.

Los resultados obtenidos revelan las características del subsuelo presente en la periferia y bajo el casco urbano del municipio de Málaga y determinan la presencia de un acuífero confinado, aislado de la atmósfera por una capa impermeable constituida por arcilla - limo, materiales altamente meteorizados y depósitos de baja energía, localizados en el eje del sinclinal de Málaga, bajo la zona urbana.

La información obtenida corresponde al punto de partida para posteriores estudios de mayor detalle con el fin de conocer, en su totalidad, el recurso hídrico subterráneo del área de interés para generar el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de Málaga (Santander).

#### **10. Recomendaciones**

La información aquí presentada debe ser tomada como un aporte en el conocimiento (geológico y geofísico), caracterización y descripción del subsuelo del área urbana del municipio de Málaga (Santander) y la periferia de este, convirtiéndose en el primer paso en el proceso de evaluación integral de recursos hídricos del área de interés, que sirva de soporte técnico – científico a las diferentes autoridades (ambientales, territoriales, locales y educativas) como punto de partida para futuros estudios.

Es aconsejable desarrollar estudios de mayor detalle para determinar la naturaleza de las aguas subterráneas en el área delimitada de este estudio, así como su difusión, movimiento, régimen y reservas. Además, es necesario realizar pozos exploratorios en las zonas de las tomografías (Apendice A) para ejecutar sus respectivas pruebas de bombeo con el fin de analizar las propiedades hidráulicas de la capa de interés hidrogeológico, así como las propiedades físicas, químicas, organolépticas, bacteriológicas y radioactivas de la misma. Esto debe hacerse con el objetivo de determinar las condiciones de uso, regulación y evacuación o extracción de aguas subterráneas presentes en el área de trabajo para mejorar las condiciones sociales de la comunidad e impulsar el crecimiento económico de la misma.

Es necesario realizar análisis de la evolución geoquímica de las aguas subterráneas, la construcción de la curva meteórica local, el balance hídrico local y la edad de la misma, con el fin de determinar las reservas del recurso, la velocidad de recarga, estableciendo la composición química e isotópica del acuífero para definir el grado de aprovechamiento y explotación del mismo.

Se recomienda desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de Málaga (Santander) con el objetivo de observar y dar seguimiento al sistema de flujo de agua subterránea para conocer, en su totalidad, el acuífero infrayacente y definir su explotación en beneficio de la planta de tratamiento municipal, estableciendo políticas necesarias para la conservación y preservación de las zonas de recarga, garantizando en el tiempo la dotación para el servicio de acueducto municipal.

Se sugiere llevar a cabo un proyecto para evitar las pérdidas de agua del sistema de acueducto y de alcantarillado, así como cualquier descarga que pueda contaminar el acuífero, que tiene un alto potencial de explotación, para complementar la red de suministro urbana.

Nota: Los resultados de la presente investigación fueron divulgados a través de una ponencia en el XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, X Congreso Argentino de Hidrogeología y VIII Seminario Hispano – Latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea, celebrado en el Centro de Convenciones del Hotel Internacional Salta Alejandro I, en la ciudad de Salta, República Argentina, del 23 al 26 de Octubre del 2018, así como de una artículo científico publicado en el Boletín de Geología de la Universidad Industrial de Santander).

### **Referencias Bibliográficas**

- AGI. (2009). Instruction manual for EarthImager 2D. Version 2.4.0. Resistivity and IP Inversion Software. Advanced Geosciences Inc.
- Alcaldía de Málaga, Santander. (2017). "Con nuestra gente y por sus derechos". Nuestro municipio. [Fecha de consulta: 10 de Enero del 2017]. Disponible en www.malaga-santander.gov.co/informacion\_general.shtml.
- Aluko, K., Raji, W., and Ayolabi E. (2017). Application of 2-D resistivity survey to groundwater aquifer delineation in a sedimentary terrain: A case study of south-western Nigeria. Water Utility Journal 17: pp. 71-79. E.W. Publications.
- Asfahani, J. (2007). Geoelectrical investigation for characterizing the hydrogeological conditions in semi-arid region in Khanasser valley, Syria. *Journal of Arid Environments*, 68(1), 31-52. doi: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.03.028.
- Auge, M. (2008). Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea. Universidad de Buenos Aires. 27 p. Buenos Aires, Argentina.
- Ávila, S. (2016). Regularización de datos de resistividad aparente. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Befus, K., Cardenas, M., Tait, D., and Erler, D. (2014). Geoelectrical signals of geologic and hydrologic processes in a fringing reef lagoon setting. *Journal of Hydrology*, 517, 508-520. doi: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.070.
- Bobachev, A., Modin, I., and Shevnin, V. (2000). IPI2Win user's guide. Moscow State University, Moscov, Russia.
- Cadena, W. (2015). Caracterización geoeléctrica del subsuelo para la prospección de agua subterránea en el área de Menzuly campestre, Piedecuesta, Santander. Escuela de Geología.

Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Universidad Industrial de Santander. 98 p. Bucaramanga, Colombia.

- Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M. et al (2018). Procesos sísmicos especiales. Tema 18. Cátedra de Geofísica Aplicada, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Chubut, Argentina.
- Cruz, S. (2016). Tomografías de resistividad eléctrica 3D en la pirámide del Castillo en Chichén Itzá, Yucatán, México. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Cuellar, M. y Chávez, S. (2013). Atenuación de huella de adquisición guiada por atributos sísmicos. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XV (número 2), p199-208.ISSN 1405-7743. Universidad nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Daza, F. (2012). Métodos geoeléctricos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Concepción. 256 p. Concepción, Chile.
- Díaz, E. (2010). "Implementación del código zondres2d para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2D". Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Edwards L. (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. Geophysics, 42, 1020-1036.
- Empresas públicas de Málaga E.S.P., 2015. Evaluación integral de prestadores empresas públicas municipales de Málaga E.S.P. superintendencia delegada para acueducto, alcantarillado y aseo dirección técnica de gestión de acueducto y alcantarillado. Bogotá. Colombia.
- EOT Málaga (2015). Esquema de Ordenamiento Territorial, Málaga (Santander). Alcaldía municipal de Málaga, Santander. Con nuestra gente y por sus derechos. pp. 32 62.
- EOT San José de Miranda (2003). Esquema de Ordenamiento Territorial, San José de Miranda. (Santander). Alcaldía municipal de San José de Miranda, Santander. Unidos por una nueva Miranda. pp. 63 121.

- FAO. (2016). AQUASTAT. Uso del Agua. Discusión Temática. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Consultado el 01 de agosto del 2017. http://www.fao.org/NR/WATER/aquastat/water\_use/indexesp.stm.
- Gabarrón, M. (2013). Evaluación de la técnica de tomografía eléctrica para la estimación de propiedades fisicoquímicas de residuos mineros. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España.
- García, S., Gómez, E. (2015). Modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos – Santander, Colombia. Escuela de Geología. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Universidad Industrial de Santander. 143 p. Bucaramanga, Colombia.
- Gasulla, M. (1999). Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo. En: Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Electrónica,
- Herman, R. (2001). An introduction to electrical resistivity in geophysics. En: American Journal of Physics. Septiembre, 2001. Vol. 69, p. 943 952.
- Hidalgo, A., Loke, M., Faton, O., & Cara, E. (2000). Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (tomografía eléctrica 2D y 3D). 24p.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). An introduction to geophysical exploration. 3° Edition. ISBN 0-632-04929-4. 266p. Malden, Estados Unidos.
- Loke, M. (2000). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Copyright. 62p.
- Loke, M. (2012). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Malaysia: Geotomo Software.
- Loke, M., and Barker, R. (1995). *Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. Geophysics*, 60(6), pp.1682-1690. doi: https://doi.org/10.1190/1.1443900.

- Loke, M., and Barker, R. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi –Newton method. Geophysical Prospecting, 44, pp. 131-152. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Mahmoud, H., and Tawfik, M. (2015). Impact of the geologic setting on the groundwater using geoelectrical sounding in the area southwest of Sohag Upper Egypt. *Journal of African Earth Sciences, 104,* 6-18. doi: https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.01.004.
- Mohamaden, M. (2016). Delineating groundwater aquifer and subsurface structures by using geoelectrical data: Case study (Dakhla Oasis, Egypt). *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 5(1), 247-253. doi: https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.05.001.
- Mussett, A., y Khan, M. (2000). Looking into the Earth. Illustrations by Sue Button. ISBN 978-0-521-78085-8. Cambridge University Press. 470p. Cambridge, Reino Unido.
- Orellana, E. (1982). Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. 2ª edición. Volumen 1. 580 p. Editorial Madrid: Paraninfo. Madrid, España.
- Perdomo, S. (2009). Tomografía Eléctrica en apoyo de la investigación Arqueológica. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. La Plata, Argentina.
- Portilla., M. (1999). Evaluación de la Amenaza por Deslizamiento en Málaga, Santander, aplicando la metodología de los Conjuntos Difusos: Un tema de geología ambiental. Geología Colombiana 24. pp. 159 – 176. Santafé de Bogotá.
- Roy, A., Apparao, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. Geophysical Prospecting. Volumen 36, pp. 943-959.
- Royero, J. (2014). Caracterización geoeléctrica del subsuelo en el sector Floreña NW 6, Yopal Casanare. Universidad Industrial de Santander. 129p. Bucaramanga, Colombia.
- Royero, J., Clavijo, J. (2001). Mapa geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1:400.000. Memoria Explicativa. Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear INGEOMINAS, 92p. Bogotá, Colombia.

- Rueda, A., Tavera, C. (2016). Zonificación de la susceptibilidad relativa por movimientos en masa empleando el método matemático de lógica difusa en un área de 150 km2 pertenecientes a la plancha 136 I B. Escala: 1:25.000. Universidad Industrial de Santander. 168 p. Bucaramanga, Colombia.
- Salamanca, M. (2017). Caracterización del subsuelo mediante prospección geofísica de resistividades (Tomografía de Resistividad Eléctrica "TRE" y Sondeos Eléctricos Verticales "SEV's") con fines hidrogeológicos en la sede de Málaga de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. and Richard G. (2015) Electrical resistivity survey in soil science: A review. Soil and Tillage Research 83(2):173-193. DOI: 10.1016/j.still.2004.10.004.
- SGC (2013). Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000. Plancha 136 – Málaga. Servicio Geológico Colombiano. Universidad industrial de Santander. Convenio especial de cooperación No 009. Bucaramanga, Colombia.
- Tabbagh, A., Dabas, M., Hesse, A. and Panissod, C., 2000. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation. Geoderma, 97, 393-404.
- Tarazona, J. y Rueda, N. (2018). Estudio para la prospección de aguas subterráneas en la zona urbana y perimetral del municipio de Málaga, Santander. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- UAF. (2018). Nasa Earth Data University of Alaska Fairbanks. Vertex: Alaska Satellite Facility Data Portal. V3. 04 55. Consulted in August 1st 2017. https://vertex.daac.asf.alaska.edu/.
- UGR (2013). Tema 2. Prospección eléctrica en corriente continúa. Universidad de Granada. Área de Geofísica Aplicada. Instituto Andaluz de Geofísica. Fundación centro internacional de hidrología subterránea. pp. 10 15.
- UNIL (2007). Curso de Geofísica. Universidad de Lausanne. Instituto de Geofísica. Lausanne, Suiza.

- Van Nostrand, R., y Cook, K. (1966). Interpretation of Resistivity Data. Geological Survey Professional paper 449. U.S. Geological Survey. 310 p.
- Vargas, R., Arias, T., Jaramillo, L., y Téllez, N. (1976). Geología de la plancha 136 Málaga. Cuadrángulo I-13. Escala 1:100.000. INGEOMINAS, Informe N° 1712, 123p.
- Vélez, M. (1999). Hidráulica de aguas subterráneas. Segunda Edición. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. pp. 47 52. Bogotá, Colombia.
- Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H. & Gómez, E. (1973). Mapa Geológico de Colombia. Cuadrángulo H-12 Bucaramanga. Planchas 109 Rionegro 120 Bucaramanga. Cuadrángulo H-13 Pamplona. Planchas 110 Pamplona 121 Cerrito. Escala 1:100.000. Memoria Explicativa. Boletín Geológico, número XXI, número 1-3 Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS. 144 p. Bogotá, Colombia.
- Yang, X., and Lagmanson, M. (2013). Planning resistivity surveys using numerical simulations. Austin, Estados Unidos.
- Zúñiga, R. (2011). Detección de zonas de riesgo en la ciudad de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de México. pp. 37 – 40. México D. F, México.

# Apéndices

## Apéndice A: Posibles localizaciones de pozos exploratorios



Pozo Proyectado