

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se muestran las imágenes obtenidas de la distribución de la conductividad eléctrica del subsuelo a partir de datos experimentales. El capítulo 5 mostró que el método de Marquardt-Levenberg era el que ofrecía mejores resultados en la localización de objetos locales. Por lo tanto, será el único método de reconstrucción utilizado para obtener las imágenes experimentales.

Se realizan primero medidas de laboratorio en una cubeta de plástico llena de agua, donde se introducen objetos esféricos y cilíndricos aislantes y conductores. Los errores debidos a las dimensiones finitas de la cubeta se reducen realizando una medida de referencia antes de introducir los objetos. Las imágenes 3D permiten obtener una imagen más realista de las estructuras inmersas en el subsuelo.

Medidas de campo realizadas en un terreno agrícola situado en Santa Eulalia de Ronçana (Barcelona) han permitido detectar una tubería de plástico de 8 cm de radio enterrada previamente a una profundidad de 24 cm. El Apéndice E muestra imágenes de la zona donde se han realizado las medidas y del sistema automático de medida.

6.1. Medidas de laboratorio

Se ha utilizado una cubeta de plástico (40 cm × 35 cm × 20 cm) llena agua hasta un nivel de unos 17 cm, donde se han sumergido diferentes objetos esféricos y cilíndricos. Se ha utilizado una agrupación de 16 electrodos separados 2 cm (1 unidad) y se han implementado 2 configuraciones: Schlumberger y doble dipolo (Capítulo 2). Las medidas se han realizado con el sistema basado en el detector DIES (Figura 4.15). Previamente se determina con el sistema PROGEO (Figura 4.3) que el medio (agua) es resistivo. El generador HP3245A inyecta una señal cuadrada de 20 V_{pp} y frecuencia 1 kHz. También se han realizado medidas con el sistema de campo (Figura 4.25), que utiliza una agrupación de 8 electrodos, como validación previa a las medidas de campo descritas en el apartado 6.2.

6.1.1. Objetos esféricos

La Figura 6.1a muestra la imagen obtenida cuando sumergimos una esfera de goma de radio 2,2 cm (1,1 unidades) situada en $x = y = 0$ a una profundidad de 4 cm (2 unidades). El modelo utilizado es de $16 \times 1 \times 5$ celdas de lado unidad. La impedancia mutua Z en (5.33)

$$\Delta\Sigma = (S^T S + \mathbf{I}\mathbf{I})^{-1} S^T \Delta Z = (S^T S + \mathbf{I}\mathbf{I})^{-1} S^T (Z - Z^0)$$

se obtiene a partir de las medidas experimentales realizadas con la agrupación de electrodos situada en $y = 0$. En cambio, Z^0 se ha obtenido a partir de la solución analítica para un medio homogéneo

de conductividad 0,15 S/m (conductividad del agua del grifo). La imagen no permite confirmar la presencia de la esfera. Ello es debido a que la anomalía producida por las dimensiones finitas de la cubeta enmascara la contribución de la esfera, como se vio en el apartado 3.4.5. La Figura 6.1b, donde se ha utilizado un modelo con celdas de $2 \times 2 \times 2$ unidades, muestra con más claridad este efecto. Las celdas más oscuras (conductividad menor) corresponderían a las paredes de la cubeta, siendo difícil distinguir la contribución de la esfera.

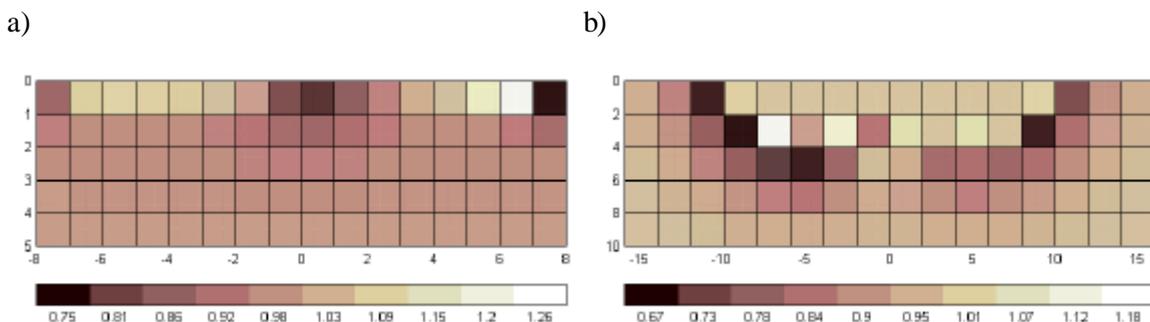


Figura 6.1. Imagen 2D obtenida con la configuración Schlumberger sustituyendo Z_{en} (5.33) por los datos experimentales obtenidos para una esfera aislante de radio 1,1 situada en $x = y = 0, z = 2$ ($\mathbf{I} = 9,97 \cdot 10^{-4}$). Z^0 se ha obtenido analíticamente El modelo utilizado es de a) $16 \cdot 1 \cdot 5$ celdas de dimensión $1 \cdot 2 \cdot 1$ unidades, b) $16 \cdot 1 \cdot 5$ celdas de dimensión $2 \cdot 2 \cdot 2$ unidades.

Franco (1999) muestra que la contribución de la cubeta se puede minimizar utilizando la diferencia relativa entre las medidas realizadas con y sin el objeto. El apartado 3.4.5 también confirma este resultado a partir de medidas experimentales realizadas en la cubeta. En este caso el algoritmo basado en el método de Marquardt viene dado por (5.52)

$$\Delta \Sigma_{rel} = (S_{rel}^T S_{rel} + \mathbf{I})^{-1} S_{rel}^T \Delta Z_{rel}$$

donde Z y Z^0 son ahora los datos experimentales obtenidos con y sin el objeto (en lugar de sacar el objeto del agua es más práctico colocarlo en una esquina del fondo de la cubeta). De esta manera se reducen también los errores debido a la inexactitud en la posición de los electrodos (Barber y Brown, 1988). Cada dato se obtiene promediando 10 medidas y se da la relación S/N . El sistema de medida tarda unos 35 minutos en realizar 104 medidas (una configuración electródica), y es probable que contenga errores proporcionales a las medidas debidos a la variación de la resistividad con el tiempo (cambios de temperatura, inclinación de la superficie libre del agua, ...). Estos errores no aparecen en la relación S/N medida. El apartado 5.4.6 muestra que es mejor utilizar la expresión (5.52) para reducir el efecto de estos errores proporcionales a la medida (que son los que dominan una vez se excluyen las medidas con menor relación S/N medida). En este apartado se confirma este resultado experimentalmente.

La Figura 6.2a muestra la imagen obtenida utilizando (5.52). Los valores corresponden a cambios relativos de la conductividad respecto a la conductividad del agua (0,15 S/m aproximadamente). La esfera se localiza correctamente y los resultados son muy similares a los que

se obtienen con datos sintéticos para una esfera de radio 1,1 unidades situada en $x = y = 0, z = 2$. (Figura 6.2b). La Figura 6.3 muestra las imágenes cuando se utiliza la configuración doble dipolo. En este caso el valor de λ utilizado para las medidas experimentales es más elevado debido al mayor error presente en las medidas.

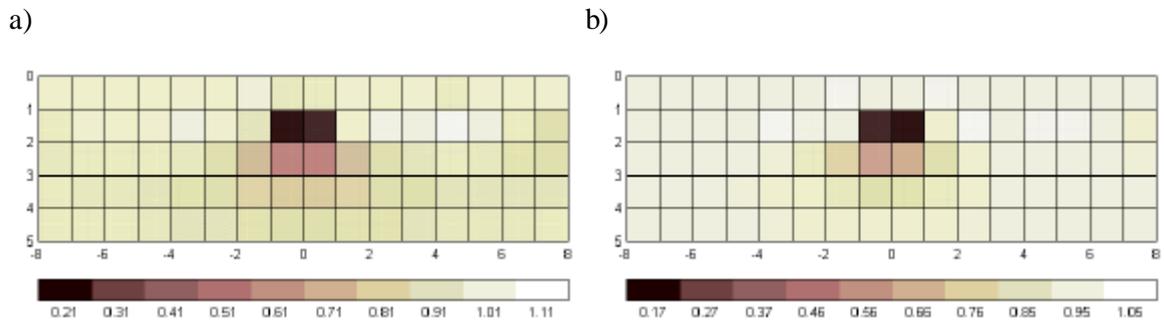


Figura 6.2. Imagen 2D obtenida con la configuración Schlumberger para una esfera aislante de radio 1,1 unidades situada en $x = y = 0, z = 2$ a partir de datos a) experimentales ($\lambda = 9,19 \cdot 10^{-4}$) y b) sintéticos ($\lambda = 9,97 \cdot 10^{-4}$). El modelo utilizado es de $16 \cdot 1 \cdot 5$ celdas de dimensión $1 \cdot 2 \cdot 1$ unidades. Los resultados son similares

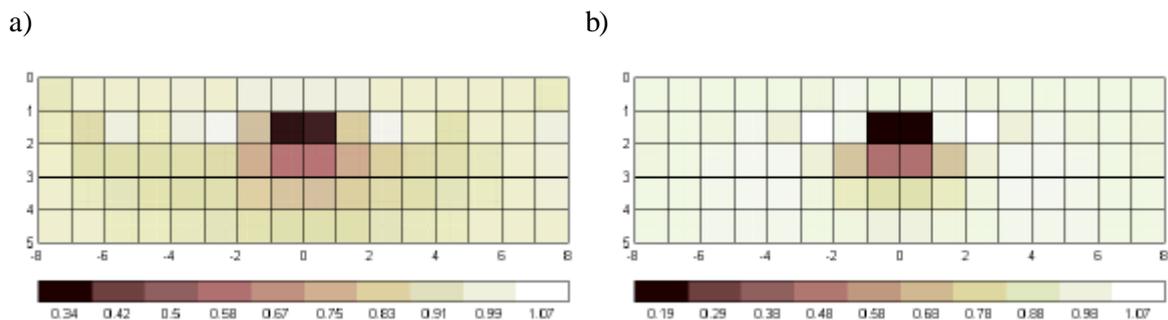


Figura 6.3. Imagen 2D obtenida con la configuración doble dipolo para una esfera aislante de radio 1,1 unidades situada en $x = y = 0, z = 2$ a partir de datos a) experimentales ($\lambda = 1,99 \cdot 10^{-2}$) y b) sintéticos ($\lambda = 9,79 \cdot 10^{-4}$). El modelo utilizado es de $16 \cdot 1 \cdot 5$ celdas de dimensión $1 \cdot 2 \cdot 1$ unidades.

La Figura 6.4 muestra las imágenes experimentales con las dos configuraciones electrónicas cuando la esfera se desplaza 4 unidades a la derecha ($x = 4, y = 0, z = 2$). La localización de la esfera en los dos casos es correcta. Los resultados son similares cuando desplazamos la esfera a la izquierda.

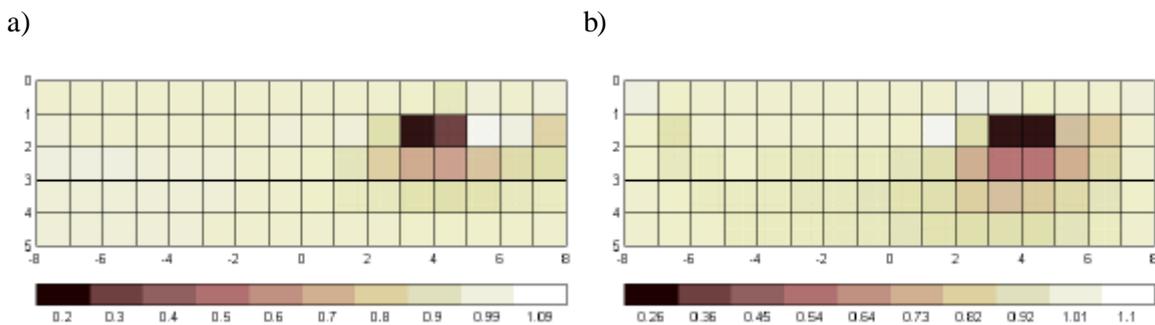


Figura 6.4. Imagen 2D obtenida a partir de datos experimentales para una esfera aislante de radio 1,1 unidades situada en $x = 4$, $y = 0$, $z = 2$, con la configuración a) Schlumberger ($I = 4,47 \cdot 10^{-4}$) y b) doble dipolo ($I = 9,04 \cdot 10^{-3}$).

La Figura 6.5 muestra la imagen obtenida con la configuración Schlumberger para una esfera conductora de radio 1,75 cm (0,875 unidades) situada en $x = y = 0$, $z = 2$. El cambio relativo de conductividad es ahora de signo contrario que en el caso de la esfera aislante.

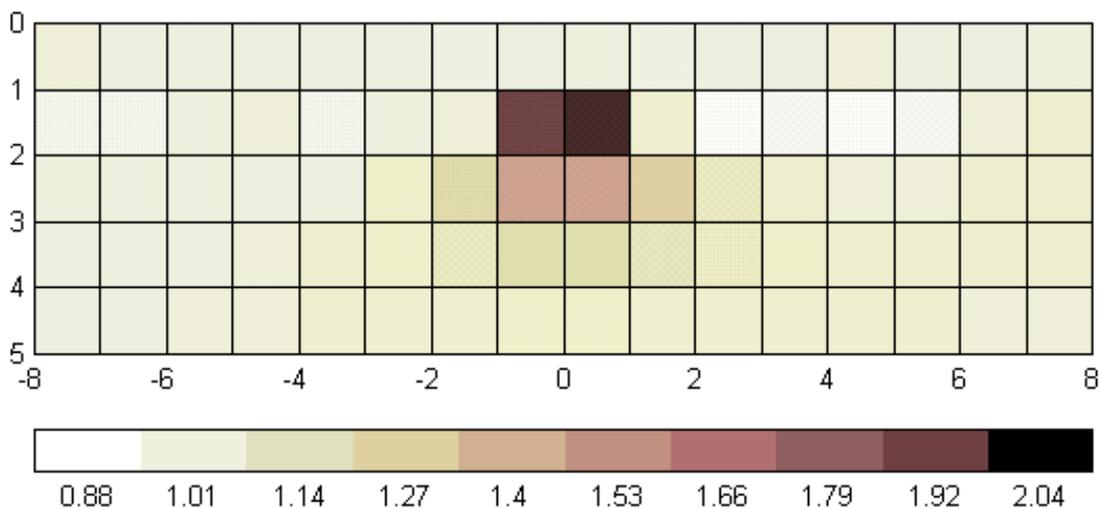


Figura 6.5. Imagen 2D obtenida con la configuración Schlumberger a partir de datos experimentales para una esfera conductora de radio 0,875 unidades situada en $x = 0$, $y = 0$, $z = 2$ ($I = 1,12 \cdot 10^{-3}$).

La Figura 6.6 muestra la imagen obtenida con las dos configuraciones para una esfera aislante de radio 1,1 situada en $x = y = 0$, $z = 3$. La imagen se deteriora debido a los errores en las medidas, a las dimensiones finitas de la cubeta y a la variación de la conductividad del agua. Ahora el efecto de estos errores es más importante debido a que la esfera está situada a mayor profundidad y, por tanto, la anomalía que produce es menor. Además, el cambio relativo en la conductividad es menor porque se atribuye a más celdas.

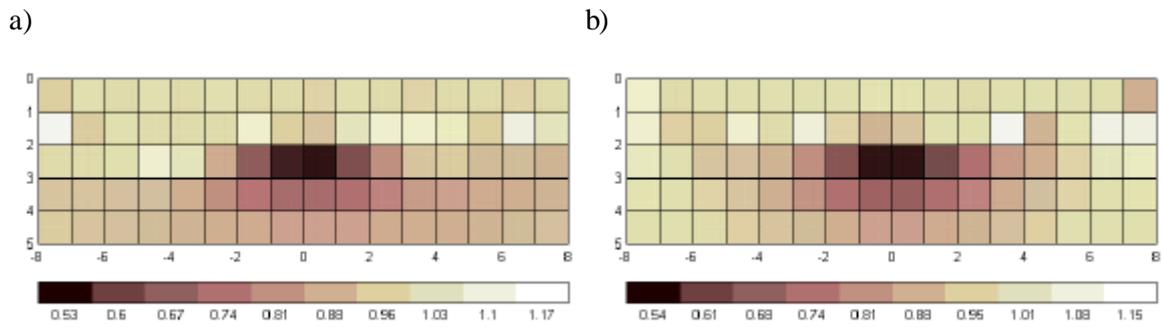


Figura 6.6. Imagen 2D obtenida a partir de datos experimentales para una esfera aislante de radio 1,1 unidades situada en $x = y = 0$, $z = 3$, con la configuración a) Schlumberger ($\mathbf{l} = 9,19 \cdot 10^{-5}$) y b) doble dipolo ($\mathbf{l} = 6,55 \cdot 10^{-3}$).

La Figura 6.7 muestra las imágenes obtenidas para la esfera situada en $x = y = 0$, $z = 4$. La configuración Schlumberger localiza incorrectamente la esfera en $z = 3$ con un cambio relativo de conductividad menor que en la Figura 6.6a. Este efecto ya se observó en la Figura 5.39 al obtener imágenes a partir de datos sintéticos contaminados con un ruido del 0,1 %. La imagen correspondiente a la configuración doble dipolo (Figura 6.7b) aparece muy distorsionada debido a que los errores relativos son mayores.

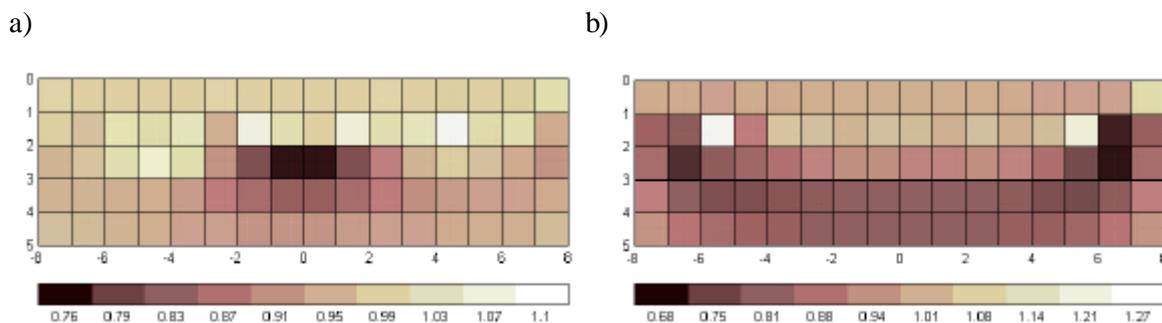


Figura 6.7. Imagen 2D obtenida a partir de datos experimentales para una esfera aislante de radio 1,1 unidades situada en $x = y = 0$, $z = 4$, con la configuración a) Schlumberger ($\mathbf{l} = 1,43 \cdot 10^{-4}$) y b) doble dipolo ($\mathbf{l} = 4,31 \cdot 10^{-3}$).

El apartado 5.4.6 mostró que para la configuración doble dipolo las imágenes mejoran si se eliminan las medidas con una relación S/N medida menor. La Figura 6.8 muestra las imágenes para la esfera aislante situada en $x = y = 0$, $z = 3$ y $z = 4$, donde se han eliminado las medidas con una relación S/N medida menor a 70 dB. Ahora es posible localizar correctamente la esfera situada en $z = 4$. Las imágenes son mejores que las obtenidas en la Figura 6.6 y en la Figura 6.7 con la configuración Schlumberger. En la configuración Schlumberger la relación S/N siempre es mayor a 70 dB por lo que el procedimiento descrito no es aplicable. El mejor comportamiento de la configuración doble dipolo (una vez eliminadas las medidas más “ruidosas”) es debido, como se comentó en el apartado 5.4.6, al mejor acondicionamiento de la matriz de sensibilidad.

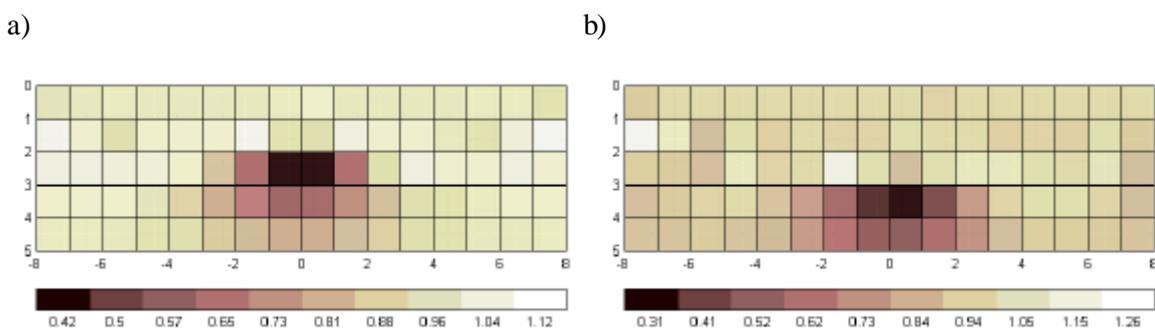


Figura 6.8. Imagen 2D obtenida con la configuración doble dipolo a partir de datos experimentales para una esfera aislante de radio 1,1 unidades situada en $x = y = 0$, a) $z = 3$ ($\mathbb{I} = 1,37 \cdot 10^{-4}$), b) $z = 4$ ($\mathbb{I} = 2,23 \cdot 10^{-5}$). Sólo se han utilizado los datos con S/N > 70 dB.

En el apartado 3.4 vimos que era posible determinar la profundidad y el radio de una esfera centrada entre los electrodos inyectoros a partir de las primeras 13 medidas de la configuración Schlumberger. El apartado 3.4.5 mostró que los métodos más robustos eran el de cruce por cero y el de error cuadrático mínimo. La Tabla 6.1 muestra las profundidades y radios hallados con estos dos métodos para los casos de las Figuras 6.3, 6.5, 6.6 y 6.7. Para estimar los errores en los resultados se ha de obrar con precaución ya que la medida del radio es precisa (se realiza con un pie de rey) pero el valor de la profundidad es aproximado. Esto es debido a que el posicionamiento dentro del agua se realiza manualmente con una pequeña polea y un hilo de nylon donde previamente se ha realizado una marca de la profundidad teórica. Los “errores” mayores se producen para la esfera aislante a profundidad 3. En los otros casos la coincidencia con los valores teóricos es bastante buena. Cabe destacar los resultados de la esfera aislante a profundidad 4, ya que la imagen de la Figura 6.7a (configuración Schlumberger) localizaba la esfera a una profundidad 3. Los resultados son complementarios a las imágenes obtenidas, aportando más información para localizar la esfera correctamente.

Esfera	h_z	a_z	h_r	a_r
aislante $h=2$, $a=1,1$	2,26	1,29	2,15	1,20
conductora $h=2$, $a=0,87$	2,18	0,87	2,08	0,83
aislante $h=3$, $a=1,1$	3,63	1,40	3,42	1,27
aislante $h=4$, $a=1,1$	4,15	1,29	4,09	1,20

Tabla 6.1 Determinación de la profundidad y el radio de la esfera aislante y conductora mediante los métodos del paso por cero y del ECM (apartado 3.4).

La Figura 6.9a muestra la imagen obtenida para la configuración Schlumberger a partir de datos experimentales para dos esferas: una conductora de radio 0,875 situada en $x = -2$ y la otra aislante de radio 1,1 situada en $x = 2$ ($y = 0$, $z = 2$, en ambos casos). Las dos esferas se localizan correctamente y los valores de conductividad para cada esfera son similares a los obtenidos con ambas por separado (Figura 6.2 y Figura 6.5). Para distinguir mejor la presencia de los objetos se puede procesar la imagen. Por ejemplo, en la Figura 6.9b los valores de conductividad menores a 0,55 se han igualado al valor mínimo (0,22), los valores de conductividad mayores a 1,45 se han

igualado al valor máximo (2,25), y el resto se ha igualado a la conductividad del medio (1). Un procesado similar podría aplicarse a todas las imágenes mostradas anteriormente con el fin de identificar más claramente el objeto.

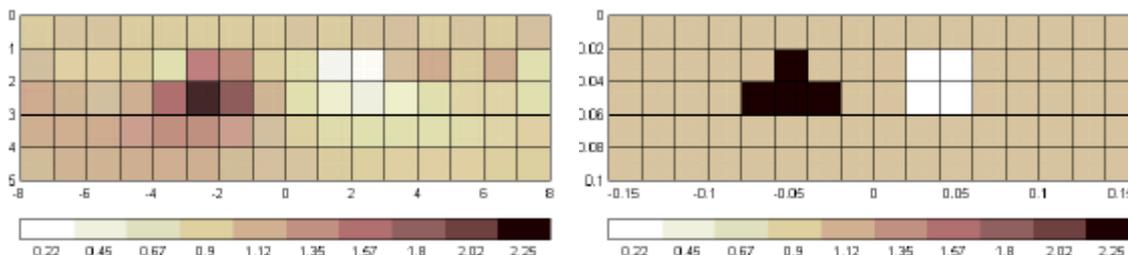


Figura 6.9. Imagen 2D obtenida con la configuración Schlumberger a partir de datos experimentales para una esfera conductora de radio 0,875 situada en $x = -2$ y para una esfera aislante de radio 1,1 unidades situada en $x = 2$ ($y = 0, z = 2$, para ambas), $\mathbf{I} = 1,74 \cdot 10^{-4}$.

En el apartado 5.4.8 se vio que las imágenes 2D pueden conllevar resultados erróneos cuando la esfera no está situada en el mismo plano vertical que la agrupación de electrodos ($y = 0$). Las imágenes 3D permiten obtener una distribución más realista de la conductividad del subsuelo. Un método para realizar medidas 3D es desplazar la agrupación de electrodos a lo largo del eje y . El desplazamiento de la agrupación de 16 electrodos en el sistema de laboratorio es complicado. Además, el efecto de las paredes de la cubeta cambia a medida que desplazamos la agrupación a lo largo del eje y . Una posible solución es desplazar la esfera manteniendo fija la agrupación de electrodos en $y = 0$. Las medidas se han realizado con la esfera situada en $x = 0, y = 0$ y sucesivamente en $y = -2, y = -4, y = -6$. Esta última medida se utiliza como referencia (Z^0). La Figura 6.10 muestra la sección vertical en $y = 0$ y la sección horizontal en $z = 1,5$, donde se ha considerado que la esfera permanece fija y que la agrupación de electrodos se desplaza a lo largo del eje y . La localización de la esfera es correcta.

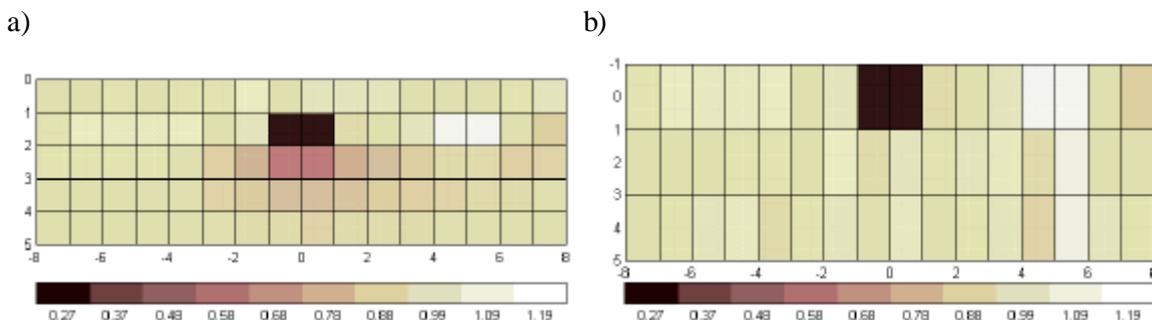


Figura 6.10. Imagen 3D obtenida con la configuración Schlumberger a partir de datos experimentales para una esfera aislante de radio 1,1 situada en $x = 0, y = 0, z = 2$ ($\mathbf{I} = 1,14 \cdot 10^{-3}$). En vez de desplazar la agrupación de electrodos, la esfera se ha situado sucesivamente en $y = 0, y = -2, y = -4$. La medida de referencia se ha tomado con la esfera situada en $y = -6$. a) Sección vertical en $y = 0$. b) Sección horizontal en $z = 1,5$.

6.1.2. Objetos cilíndricos

Un cilindro puede modelar con bastante exactitud galerías, túneles y tuberías. La Figura 6.11 muestra la imagen 2D de un cilindro de PVC (aislante) de radio 2 cm (1 unidad) y longitud 25 cm (12,5 unidades). El cilindro está situado longitudinalmente debajo de la agrupación de electrodos a una profundidad 4 cm (2 unidades). Para confirmar que el cilindro se encuentra efectivamente debajo de la agrupación de electrodos necesitaríamos una imagen 3D.

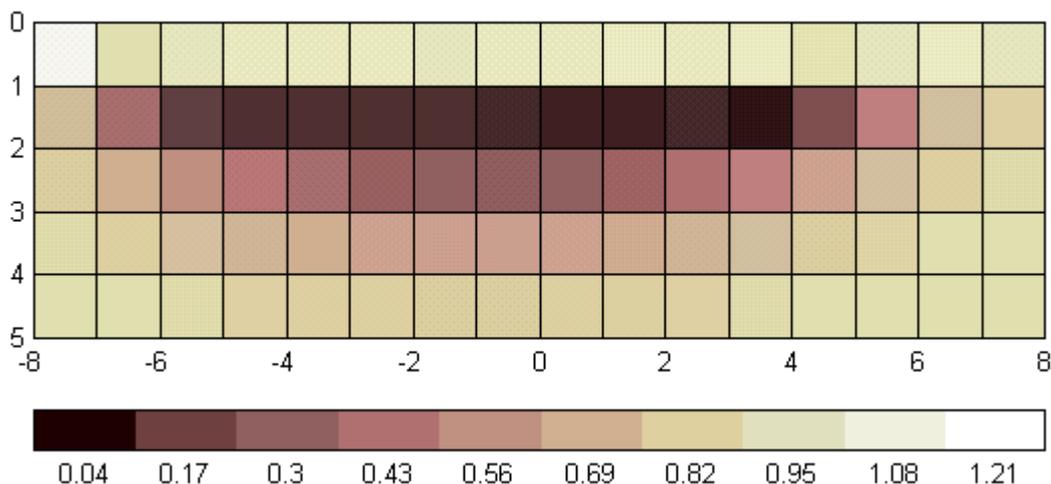
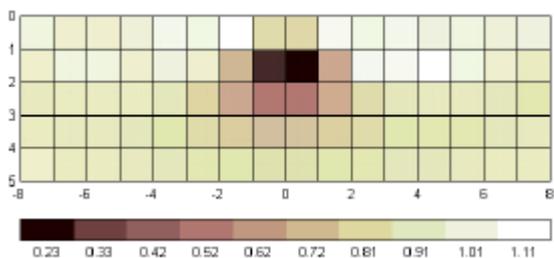


Figura 6.11. Imagen 2D obtenida con la configuración Schlumberger a partir de datos experimentales para un cilindro de PVC de radio unidad y longitud 12,5 situado a una profundidad de 2 a lo largo de $y = 0$ ($I = 1,21 \cdot 10^{-3}$).

Como vimos en el capítulo 5, si sabemos que el eje del cilindro es perpendicular a la agrupación de electrodos, es mejor utilizar un modelo con celdas de dimensión infinita a lo largo del eje y . Así, no es necesario desplazar la configuración de electrodos, lo que ahorra tiempo de medida y de cálculo. La Figura 6.12 muestra la imagen para un cilindro situado en $x = 0$, $z = 2$, con su eje paralelo al eje y . Se han realizado dos conjuntos de medidas con la agrupación de electrodos situada en $y = 0$, una con el cilindro situado correctamente y la otra con el cilindro situado en el fondo de la cubeta.

a)



b)

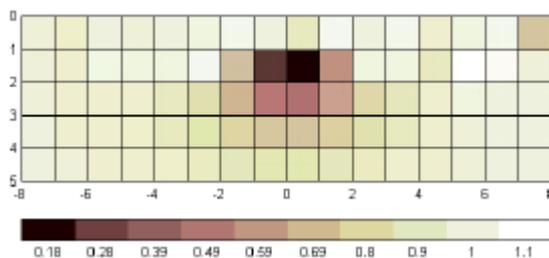


Figura 6.12. Imagen 2D $\frac{1}{2}$ obtenida con la configuración Schlumberger a partir de datos experimentales para un cilindro de PVC de radio unidad y longitud 12,5 situado en $x = 0$, $z = 2$, con su eje paralelo al eje y . Configuración a) Schlumberger ($I = 8,79 \cdot 10^{-3}$), b) doble dipolo ($I = 8,42 \cdot 10^{-2}$)

La Figura 6.13 muestra la imagen con la configuración Schlumberger para el cilindro situado en $x = -4$, $z = 2$. La imagen se deteriora debido a la proximidad del objeto a una de las paredes de la cubeta.

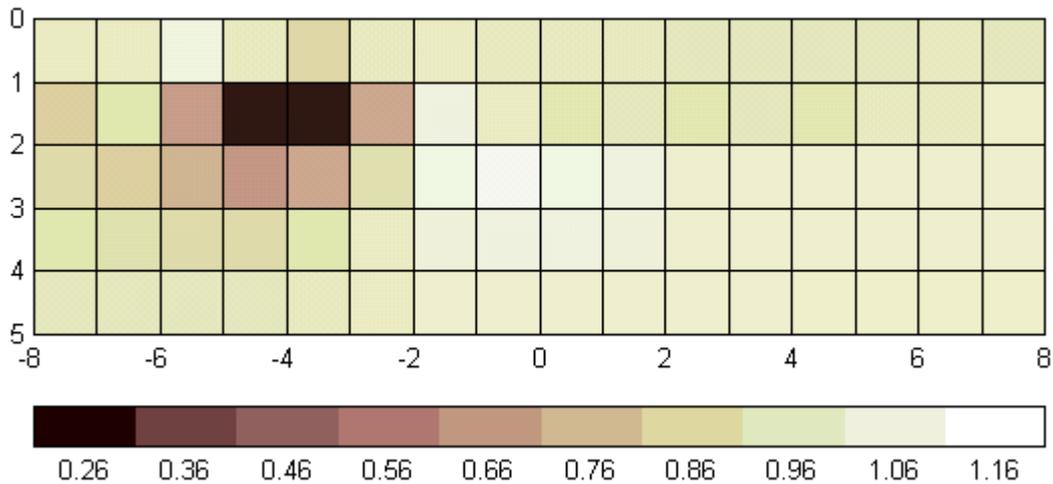


Figura 6.13. Imagen 2D $\frac{1}{2}$ obtenida con la configuración Schlumberger a partir de datos experimentales para un cilindro de PVC de radio unidad y longitud 12,5 situado en $x = -4$, $z = 2$, con su eje paralelo al eje y ($\rho = 3,73 \cdot 10^{-3}$).

La Figura 6.14 muestra la imagen con la configuración Schlumberger para un cilindro conductor situado en $x = 0$, $z = 2$, con su eje paralelo al eje y . El cambio de conductividad es de signo contrario al caso del cilindro aislante.

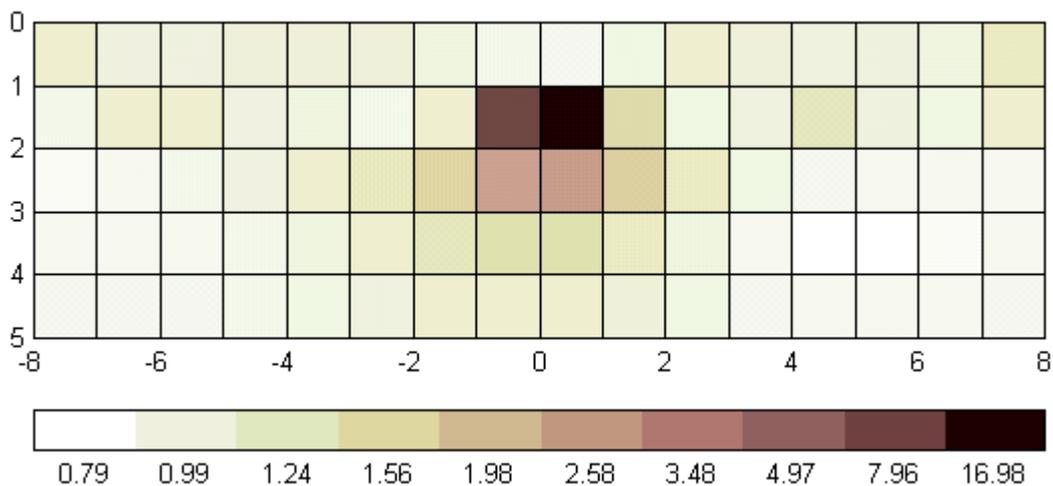


Figura 6.14. Imagen 2D $\frac{1}{2}$ obtenida con la configuración Schlumberger a partir de datos experimentales para un cilindro conductor de radio unidad y longitud 12,5 situado en $x = 0$, $z = 2$, con su eje paralelo al eje y ($\rho = 1,35 \cdot 10^{-3}$).

La Figura 6.15 muestra la imagen obtenida con las dos configuraciones para un cilindro aislante de radio unidad situado en $x = 0, z = 3$. Las medidas con la configuración doble dipolo presentan errores relativos mayores y la imagen correspondiente aparece más distorsionada. La Figura 6.16 presenta las imágenes para el cilindro a profundidad 4. La configuración Schlumberger localiza erróneamente el cilindro en $z = 3$ (como en el caso de la esfera). La imagen con la configuración doble dipolo aparece totalmente distorsionada y no permite la detección del cilindro.

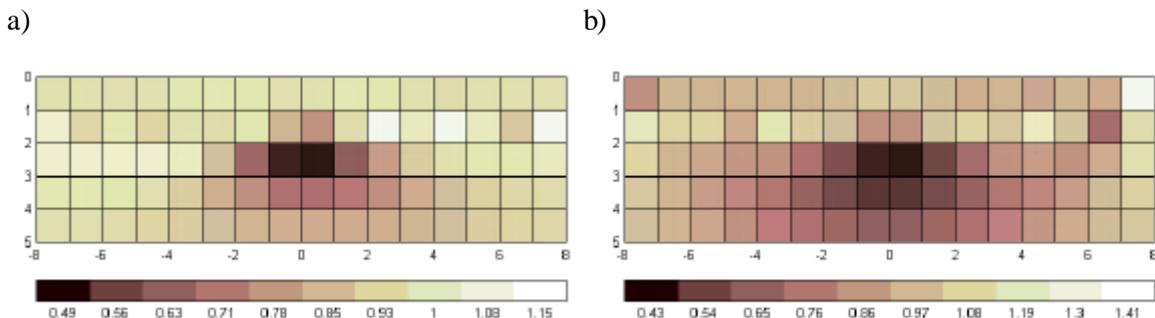


Figura 6.15. Imagen 2D $\frac{1}{2}$ obtenida a partir de datos experimentales para un cilindro de PVC de radio unidad y longitud 12,5 situado en $x = 0, z = 3$, con su eje paralelo al eje y , a) con la configuración Schlumberger ($I = 4,86 \cdot 10^{-4}$), b) con la configuración doble dipolo ($I = 8,42 \cdot 10^{-3}$).

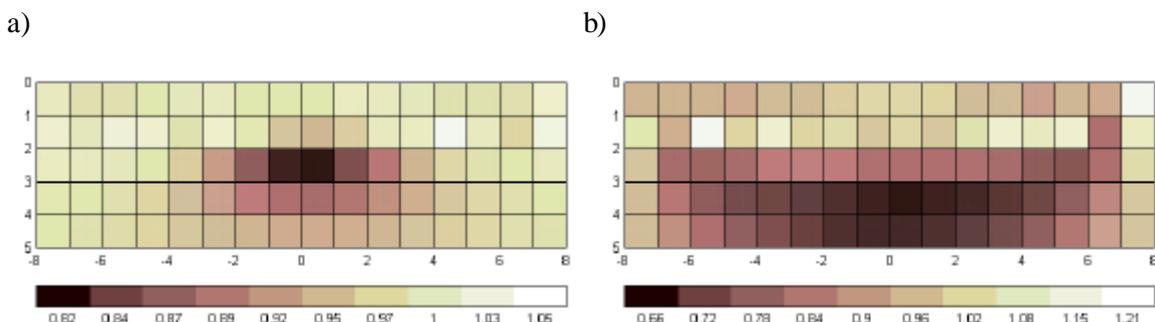


Figura 6.16. Imagen 2D $\frac{1}{2}$ obtenida a partir de datos experimentales para un cilindro de PVC de radio unidad y longitud 12,5 situado en $x = 0, z = 4$, con su eje paralelo al eje y , a) con la configuración Schlumberger ($I = 1,58 \cdot 10^{-3}$), b) con la configuración doble dipolo ($I = 1,20 \cdot 10^{-2}$).

Sin embargo, si en la configuración doble dipolo eliminamos las medidas con relación $S/N < 70$ dB para $z = 3$ (Figura 6.17a) y con relación $S/N < 60$ dB para $z = 4$ (Figura 6.17b) la imagen mejora notablemente y permite la correcta localización del cilindro.

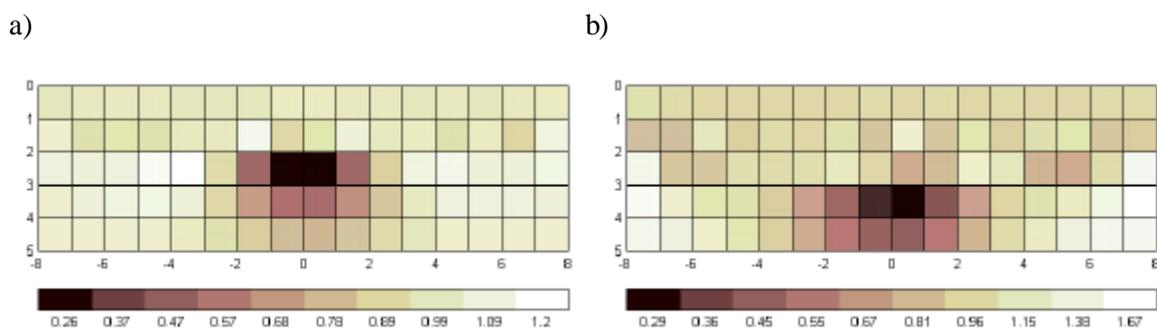


Figura 6.17. Imagen 2D $\frac{1}{2}$ obtenida con la configuración doble dipolo a partir de datos experimentales para un cilindro de PVC de radio unidad y longitud 12,5 situado en $x=0$, a) $z=3$, b) $z=4$, con su eje paralelo al eje y . Sólo se han utilizado los datos con a) $S/N > 70$ dB, b) $S/N > 60$ dB.

Al igual que en el caso de la esfera podemos utilizar los métodos descritos en el apartado 3.4 como información complementaria a las imágenes obtenidas. La Tabla 6.1 muestra los resultados utilizando las primeras 13 medidas de la configuración Schlumberger. La profundidad y el radio hallados se aproximan bastante a los valores teóricos.

Cilindro	h_z	a_z	h_d	a_d
aislante $h=2$, $a=1$	1,91	0,97	1,98	1,01
aislante $h=3$, $a=1$	3,00	0,96	3,08	0,98
aislante $h=4$, $a=1$	4,66	1,06	4,26	0,97

Tabla 6.1 Determinación de la profundidad y el radio de la esfera aislante y conductora utilizando las primeras 13 medidas de la configuración Schlumberger (apartado 3.4).

6.1.3. Medidas con el sistema de campo

Las medidas de campo que se describirán en el apartado 6.2 utilizan el sistema de campo (Figura 4.25), donde el número de electrodos es de 8. El número de medidas independientes para una configuración electródica es ahora de 20. Para verificar su correcto funcionamiento se han realizado previamente medidas en el laboratorio. En estas medidas no se utiliza el amplificador BOP 100-2M (Kepco). La Figura 6.18 muestra la imagen 3D obtenida con la configuración Schlumberger para la esfera de goma situada en $x=0$, $y=0$, $z=2$. La distancia interelectródica es de 2 cm. El volumen se ha dividido en $16 \times 2 \times 5$ celdas de $1 \times 2 \times 1$ unidades. La agrupación de electrodos se ha situado sucesivamente en $y=0,5$, $y=1,5$, $y=2,5$, $y=3,5$. Esta última se ha tomado como medida de referencia. El desplazamiento de la agrupación de electrodos es ahora más sencillo y las paredes de la cubeta tienen un efecto menor. A pesar de que el número de medidas (60) es bastante inferior al número de celdas (160), la curva L queda bien definida y el parámetro λ se puede determinar correctamente.

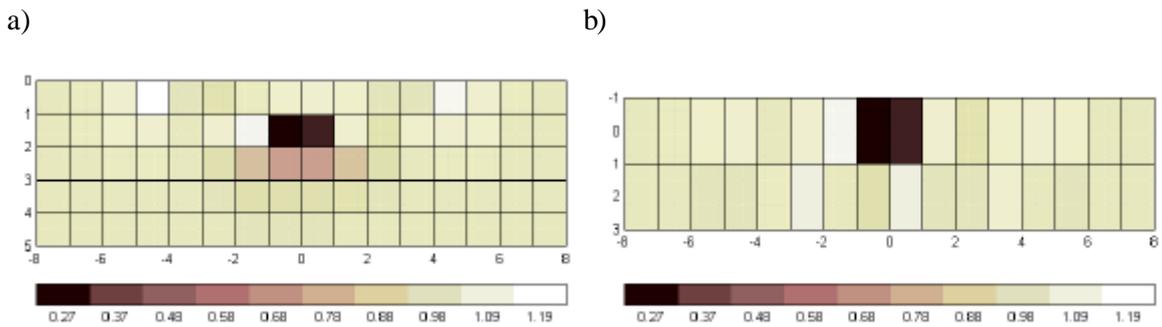


Figura 6.18. Imagen 3D obtenida con la configuración Schlumberger utilizando el sistema de campo para una esfera aislante de radio 1,1 situada en $x = 0$, $y = 0$, $z = 2$. El volumen se ha dividido en $16 \cdot 2 \cdot 5$ celdas de $1 \cdot 2 \cdot 1$ unidades. Las medidas se han realizado con la agrupación de 8 electrodos situada sucesivamente en $y = 0,5$, $y = 1,5$, $y = 2,5$, $y = 3,5$, que se ha tomado como medida de referencia. a) Sección vertical en $y = 0$. b) Sección horizontal en $z = 1,5$. ($\mathbf{I} = 3,26 \cdot 10^{-5}$).

La Figura 6.19 muestra la imagen 3D para un cilindro de PVC de radio 1 cm (0,5 unidades) y longitud 25 cm (12,5 unidades), con su eje paralelo al eje x y situado en $y = 0$, $z = 1,5$ unidades. El volumen se ha dividido en $16 \times 2 \times 5$ celdas de $1 \times 2 \times 1$ unidades. Las medidas se han realizado con una agrupación de electrodos situada sucesivamente en $y = 0,5$, $y = 1,5$, $y = 2,5$, e $y = 3,5$, que constituye la medida de referencia. El cilindro se localiza correctamente.

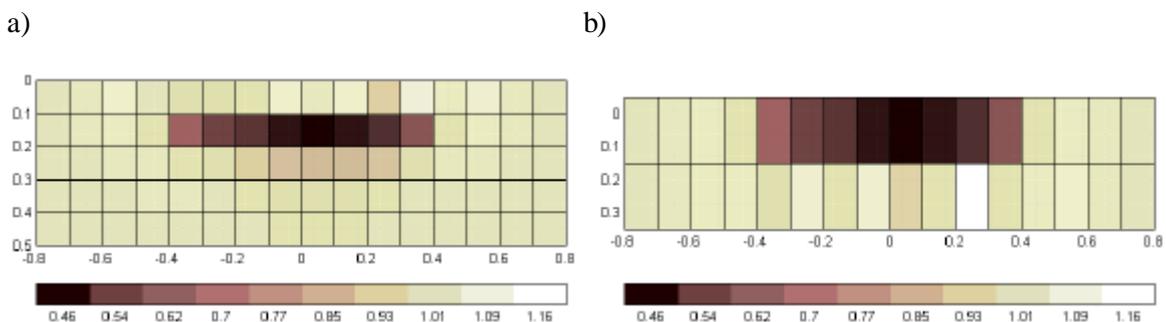


Figura 6.19. Imagen 3D obtenida con la configuración Schlumberger para un cilindro de PVC de radio 0,5 y longitud 12,5 unidades con su eje paralelo al eje x y situado en $y = 0$, $z = 1,5$ unidades. El volumen se ha dividido en $16 \cdot 2 \cdot 5$ celdas de $1 \cdot 2 \cdot 1$ unidades. Las medidas se han realizado con la agrupación de 8 electrodos situada sucesivamente en $y = 0,5$, $y = 1,5$, $y = 2,5$, y $y = 3,5$, que se ha tomado como medida de referencia. a) Sección vertical en $y = 0$. b) Sección horizontal en $z = 1,5$. ($\mathbf{I} = 3,48 \cdot 10^{-5}$).

6.2. Medidas de campo

Las medidas de campo se han realizado en una parcela situada en Santa Eulalia de Ronçana (Barcelona). La Figura 6.20 muestra un croquis de la zona de medida, donde se ha enterrado previamente una tubería de PVC de 8 cm de radio, 1.06 m de largo a una profundidad de 24 cm. El eje de la tubería es paralelo al eje x . El terreno está formado por unos 32 cm de capa fértil sobre un substrato rocoso con una ligera inclinación hacia el oeste. Para inyectar agua con el fin de simular

una fuga se usa un tubo de plástico de 7 cm de diámetro situado en el lado sur de la tubería (Figura 6.21).

Se utiliza el sistema de campo mostrado en la Figura 4.25. El amplificador BOP 100-2M (Kepco) inyecta una señal cuadrada de 100 V de pico y frecuencia 1 kHz. Se utilizan 8 electrodos de acero inoxidable (de diámetro 1 cm y longitud 20 cm) insertados 5 cm en el terreno y separados 20 cm (1 unidad). Los electrodos se disponen sobre un soporte de madera donde se han efectuado 8 orificios a fin de mantener fijas las distancias interelectródicas. El primer electrodo está en $x = -3,5$ y el octavo en $x = 3,5$ unidades. La agrupación de 8 electrodos se ha situado sucesivamente en $y = 2, y = 1, y = 0, y = -1, y = -2, e y = -3$, que se toma como medida de referencia a fin de eliminar el efecto del sustrato rocoso en las imágenes.

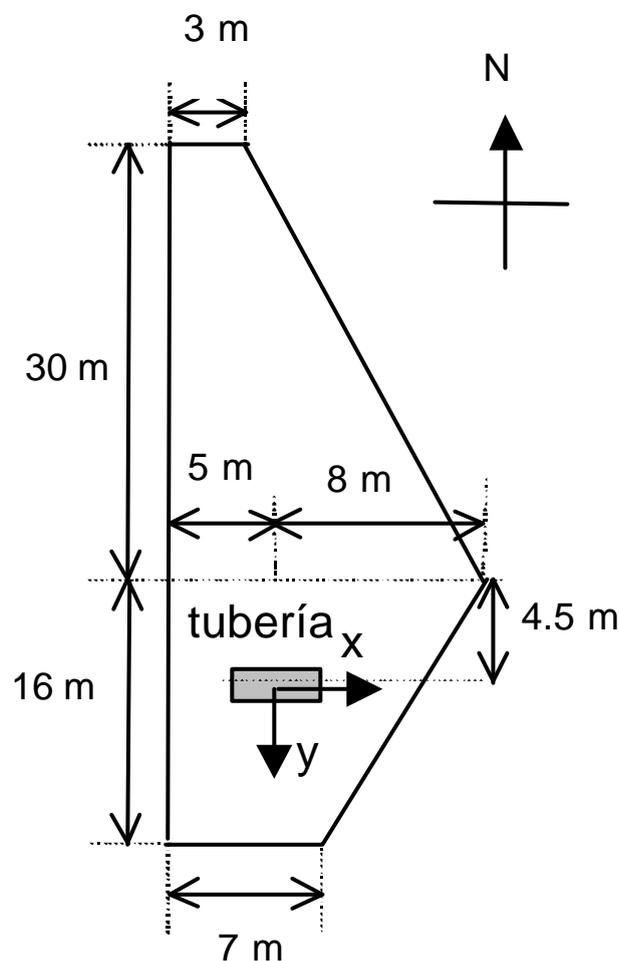


Figura 6.20. Croquis de la zona de medida. La tubería de PVC mide 1,06 m de largo, 8 cm de radio y está enterrada a una profundidad de 24 cm.

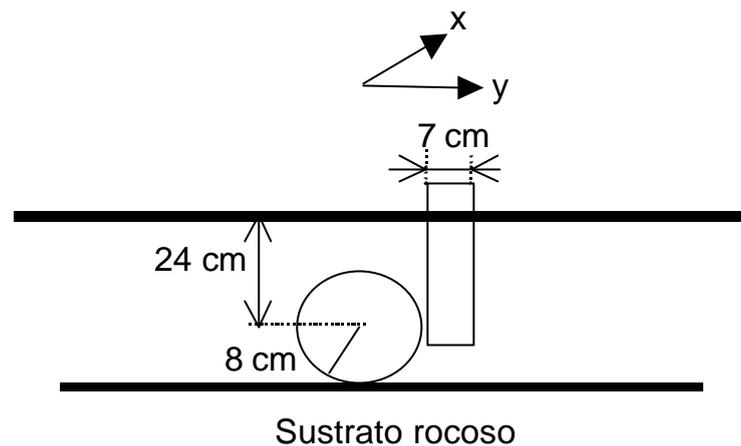
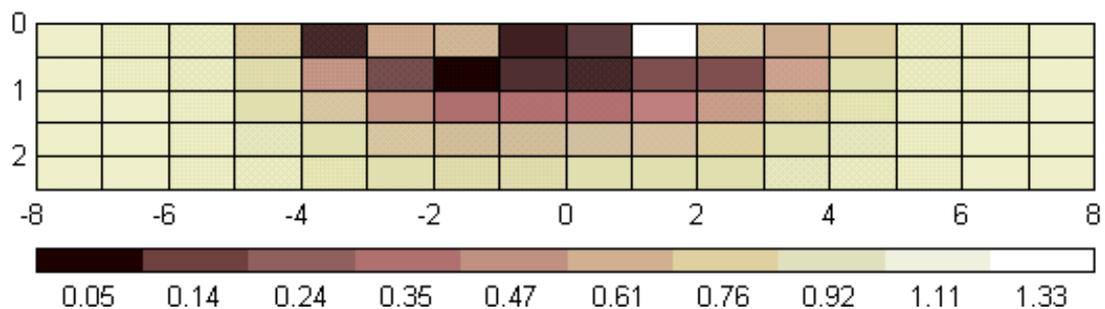


Figura 6.21. Tubería enterrada y tubo para simular la fuga situado en su lado sur.

La Figura 6.22 muestra la imagen 3D obtenida con la configuración Schlumberger, donde se ha utilizado un modelo de $16 \times 5 \times 5$ celdas de $1 \times 2 \times 0,5$ unidades. Las conductividades mostradas están normalizadas respecto a la conductividad del terreno (aproximadamente 0,01 S/m). La penetración nominal para $f = 1$ kHz y $r = 100 \Omega\text{m}$ es $\delta = 159$ m (apartado 4.2), mucho mayor que la profundidad del objeto (0,24 m). El corte transversal en $y = 0$ (Figura 6.22a) muestra una disminución de la conductividad en la zona central cerca de la superficie. La disminución en las celdas más superficiales se corresponde con el tubo vertical en la Figura 6.21. La disminución de conductividad en las celdas de la segunda y la tercera fila corresponden a la tubería de PVC. El corte horizontal en $z = 0,75$ (Figura 6.22b) refuerza la anterior afirmación ya que se observa un cambio de conductividad mayor en las celdas centrales. El efecto lateral en el lado sur de la tubería podría ser debido en parte al tubo vertical.

a)



b)

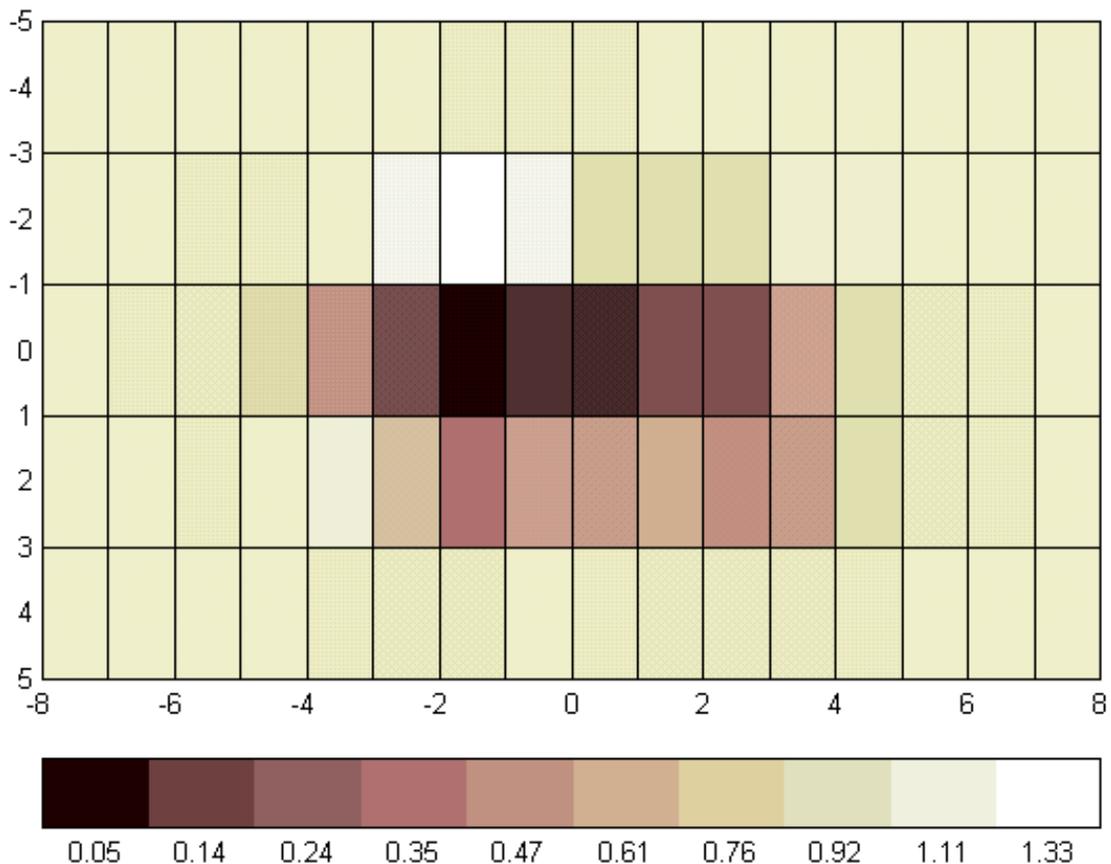


Figura 6.22. Imagen 3D de un cilindro de PVC de radio 8 cm (0,4 unidades) con su eje paralelo al eje x y situado en $y = 0$ a una profundidad 24 cm (1,2 unidades). Las medidas se han realizado con la agrupación de 8 electrodos en $y = 2$, $y = 1$, $y = 0$, $y = -1$, $y = -2$, $y = -3$, siendo esta última la medida de referencia. a) Corte vertical en $y = 0$, b) corte horizontal en $z = 0,75$. ($I = 3,29 \cdot 10^{-2}$)

Para detectar la fuga, la agrupación de electrodos se dispone en $x = 0$, en dirección perpendicular a la tubería, con el primer electrodo situado en $y = -4$ y el octavo situado en $y = 3$. Las medidas se han realizado antes (medida de referencia) y después de verter el agua (unos 7 litros) por el tubo vertical (Figura 6.21). La Figura 6.23 muestra la imagen 2D obtenida con la configuración Schlumberger y doble dipolo, donde se ha dividido el volumen en $8 \times 1 \times 5$ celdas de lado unidad. El incremento de conductividad indica la presencia de la fuga (conductora), que se localiza entre $z = 1$ (20 cm) y $z = 2$ (40 cm) y debajo del tubo vertical por donde se inyecta el agua. El cambio de conductividad es mayor en la configuración Schlumberger. Esto puede ser debido a que las medidas se han realizado con posterioridad a las de la configuración doble dipolo y por tanto la fuga ha tenido tiempo de expandirse más y provocar una anomalía mayor.

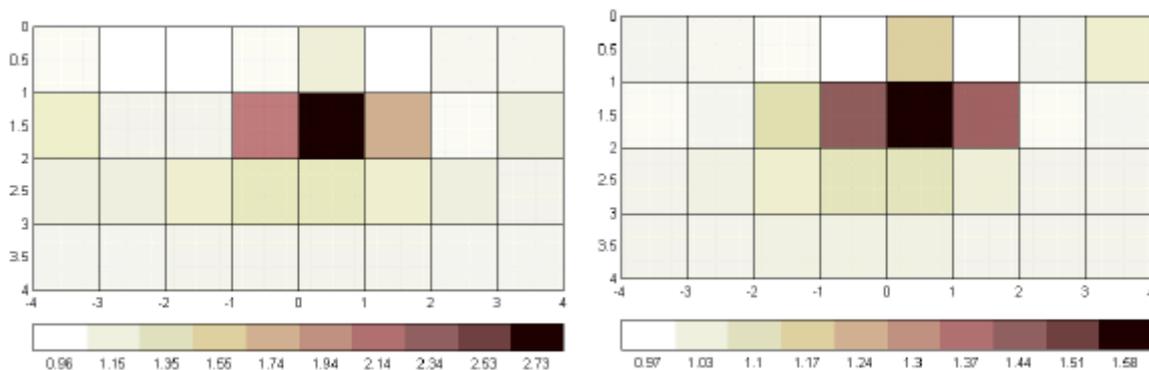


Figura 6.23. Imagen 2D de la fuga de agua. La agrupación de electrodos se dispone en $x = 0$, en dirección perpendicular a la tubería, con el primer electrodo situado en $y = -4$ y el octavo situado en $y = 3$. Las medidas se han realizado antes y después de verter el agua (unos 7 litros) por el tubo vertical (Figura 6.21) con la configuración a) Schlumberger ($k = 8,35 \cdot 10^{-5}$) y b) doble dipolo ($k = 2,38 \cdot 10^{-3}$)

En el caso de la fuga, la cancelación de los efectos provocados por el substrato rocoso y por la inexactitud en la posición de los electrodos es más efectiva que en el caso de la detección de la tubería, ya que la configuración electródica permanece fija. Por lo tanto, en general es más fácil detectar una variación temporal que una variación espacial de la resistividad del subsuelo.

6.3. Resumen

Para validar experimentalmente la detección de objetos locales inmersos en el subsuelo se han realizado medidas de laboratorio y de campo. El modelo de laboratorio es una cubeta de plástico ($40 \text{ cm} \times 35 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) llena de agua donde se sumergen diversos objetos esféricos y cilíndricos tanto aislantes como conductores. Las medidas se realizan con el sistema de medida basado en el detector DIES (agrupación de 16 electrodos) y con el sistema de campo (agrupación de 8 electrodos). Las configuraciones utilizadas son la Schlumberger y la doble dipolo. Las medidas de campo se han realizado con el sistema de campo y una agrupación de 8 electrodos en un terreno agrícola situado en Santa Eulalia de Ronçana (Barcelona), donde previamente se ha enterrado una tubería de plástico de 8 cm de radio a una profundidad de 24 cm.

Para cancelar el efecto de las dimensiones finitas de la cubeta y de la inexactitud en la posición de los electrodos en el sistema de laboratorio, se realiza una medida de referencia con el objeto lejos de la agrupación de electrodos. Los objetos esféricos aislantes y conductores se localizan correctamente a profundidades iguales al diámetro de la esfera, tanto si están centrados como desplazados lateralmente. Las imágenes se deterioran con la profundidad del objeto. La configuración Schlumberger localiza correctamente la esfera hasta una profundidad igual a tres veces su radio. La configuración doble dipolo permite localizar objetos esféricos hasta una profundidad igual a cuatro veces su radio si previamente se eliminan las medidas con más error. Las conclusiones son similares para un cilindro dispuesto perpendicularmente a la agrupación de electrodos. En éste caso los coeficientes de sensibilidad se calculan realizando una integración

previa en la dirección del eje del cilindro. La determinación de la profundidad y el radio de los objetos esféricos y cilíndricos a partir de las primeras 13 medidas de la configuración Schlumberger proporciona una información complementaria a la obtenida con las imágenes. Las imágenes 2D pueden llevar a resultados equívocos si el objeto no se encuentra justo debajo de la agrupación de electrodos. Las imágenes (y medidas) 3D permiten una correcta localización de los objetos. En este caso las medidas se pueden obtener desplazando la agrupación de electrodos perpendicularmente. Éste es el caso con la agrupación de 8 electrodos. Sin embargo, el desplazamiento de la agrupación de 16 electrodos en el sistema de laboratorio es complicado por lo que se desliza la esfera manteniendo fija la agrupación de electrodos.

Las medidas de campo se han realizado con una agrupación de 8 electrodos de acero inoxidable (de diámetro 1 cm y longitud 20 cm) insertados 5 cm en el terreno. Los electrodos se disponen sobre un soporte de madera donde se han efectuado 8 orificios separados 20 cm a fin de mantener fijas las distancias entre electrodos al desplazar la agrupación. Las imágenes han permitido detectar una tubería de PVC de 8 cm de radio, 1.06 m de largo, que ha sido enterrada previamente a una profundidad de 24 cm. La agrupación de electrodos se ha dispuesto paralela al eje del cilindro (dirección este-oeste) y se ha desplazado de norte a sur. Para eliminar el efecto del substrato rocoso (que tiene una ligera inclinación hacia el oeste) se escoge una medida de referencia. Para inyectar agua con el fin de simular una fuga se usa un tubo de plástico situado en el lado sur de la tubería, se usa para inyectar agua con el fin de simular una fuga. Las medidas se realizan antes y después de verter el agua. Las imágenes obtenidas permiten detectar la fuga en el lado sur de la tubería justo debajo del tubo de plástico.