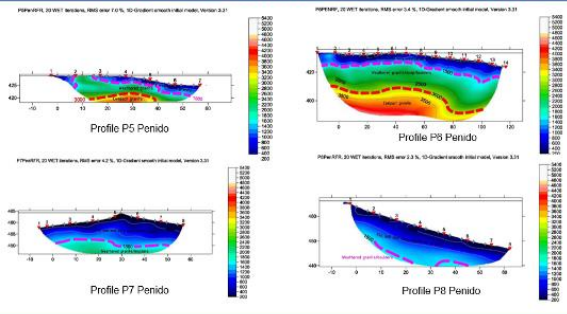


SUSTAMINING

RESULTS REFRACTION PROFILES. PENIDO QUARRY



Asociación NOTIO

**Centro Tecnológico de Actividades de la Construcción
C/ Río Cabriel s/n – 45007 Toledo**

Tel.: 925 24 11 62 – 630 96 87 86

[**info@notio.es**](mailto:info@notio.es)

[**www.notio.es**](http://www.notio.es)

CONTENIDO

1. FICHA TÉCNICA DEL EQUIPO DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA SYSCAL JUNIOR SWITCH 72 3

 1.1. Equipo: 3

 1.2. Software: 3

2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA TÉCNICA GEOFÍSICA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA
4

 2.1. Comportamiento eléctrico de las rocas 4

 2.2. Aplicaciones 7

 2.3. Metodología Operativa 8

 2.3.1. Esquema teórico..... 9

 2.3.2. Ventajas e inconvenientes de los métodos a utilizar 10

 2.3.3. Planificación de campo y elección del método 10

 2.4. Tratamiento de datos y análisis de resultados 11

1. FICHA TÉCNICA DEL EQUIPO DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA SYSCAL JUNIOR SWITCH 72

La Asociación NOTIO dispone de un equipo de tomografía eléctrica SYSCAL JUNIOR SWITCH 72. Los 72 electrodos, separados cada 5 metros, pueden realizar una exploración longitudinal máxima en superficie de 355 metros y una profundidad máxima de exploración de 40-50 metros.

1.1. EQUIPO:

- Caja interna con 72 nodos. Tensión de salida máxima; 400 V, potencia de salida máxima; 100 W y amperaje de salida máximo, 1.200 mA.



- Cuatro bobinas con cuatro cables con 18 salidas separadas cada 5 metros y conectores.
- 72 electrodos con las correspondientes pinzas.



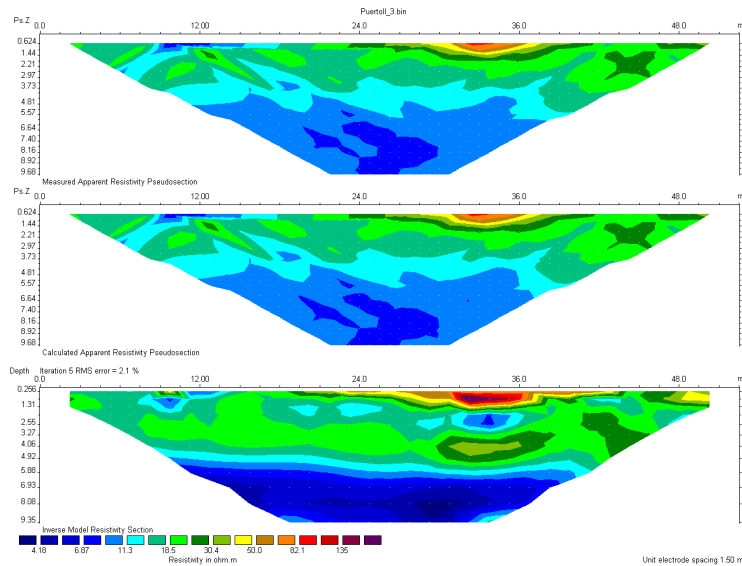
1.2. SOFTWARE:

- RES2DINV, software para realizar la inversión 2D.

La interpretación de los datos tomados en campo con RES2DINV consiste en la resolución del problema inverso, es decir, calcular una distribución espacial de resistividades en función de la profundidad, que genera un perfil 2D de la sección de las resistividades aparentes medidas en campo.

Para ello el programa, mediante algoritmos de diferencias finitas o elementos finitos (parametrizable por el usuario), sigue un proceso iterativo partiendo de una hipótesis de modelo inicial y calculando la sección de resistividades aparentes que produciría

este modelo en superficie. En el proceso de inversión se tiene en cuenta el valor del punto donde se realiza el cálculo y los valores de resistividad de las cada celda o bloque adyacente al mismo.



Perfiles de tomografía eléctrica.

2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA TÉCNICA GEOFÍSICA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

La tomografía eléctrica es un método de prospección eléctrica en corriente continua que permite modelizar la estructura del subsuelo mediante la medida de las resistividades de los materiales que lo constituyen.

2.1. COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE LAS ROCAS

El comportamiento eléctrico de las rocas depende de la naturaleza de los minerales que las constituyen, la porosidad y grado de alteración (fisuras, fracturas, etc.) y el contenido de fluidos en sus poros y/o fracturas, así como la naturaleza de los mismos.

Si la conductividad de las rocas dependiese únicamente de los minerales que las forman, prácticamente todas las rocas deberían considerarse aislantes, ya que los minerales que componen la gran mayoría de rocas presentes en la naturaleza así lo son (cuarzo, silicatos, calcita, sales, etc.). Sólo las menas metalíferas, con una cantidad apreciable de minerales semiconductores en su composición, podrían considerarse semiconductoras. Sin embargo, prácticamente todas las masas pétreas tienen poros/fracturas/fisuras en mayor o menor proporción, que suelen estar ocupados total o parcialmente por fluidos, más o menos conductores, de lo cual resulta que las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable. Por tanto, la resistividad de la roca depende, generalmente, de seis factores.

- De la porosidad, es decir, la relación de espacios o huecos vacíos con respecto al volumen total de la roca. En principio, un mayor volumen de huecos en la masa rocosa (**mayor porosidad**) implica una **menor resistividad**, siempre y cuando estos huecos NO estén vacíos. Si los huecos están vacíos (caso de cuevas, galerías, etc.) la resistividad será anormalmente alta debido al carácter dieléctrico del aire.

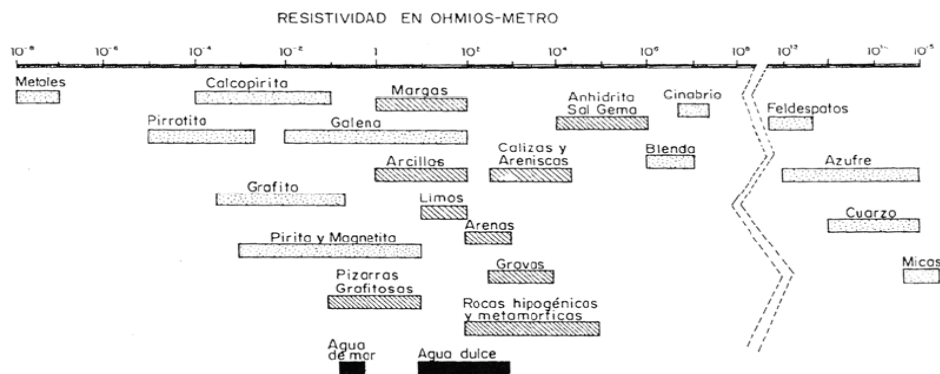
Litología	Margas	Arcilla	Gravas	Arena y Grava	Arena uniforme	Arena fina y media	Aluvión reciente	Calizas	Pizarras o esquisto
Porosidad (%)	47-50	44-50	25-40	20-35	35-40	30-40	5-15	0,5-17	1-10

Porosidad de algunas rocas (los valores dependen del grado de compactación)

- De la disposición geométrica de los poros (denominado factor de formación o F). La resistividad disminuye cuando los poros son más alargados y están orientados de forma que exista una mayor conexión entre ellos, ya que se facilita la movilidad de los fluidos entre ellos.
- Grado de saturación del terreno (Ks). Una mayor proporción de huecos rellenos de agua implica una disminución de la resistividad, debido a que el agua permite una mayor circulación de la corriente eléctrica que el aire. Por lo tanto, en la zona saturada de un acuífero aluvial, la resistividad será menor que en la zona no saturada, permitiendo conocer el nivel freático, pese a que siempre se encontrará ligado a otros factores.
- De la naturaleza del agua. Este factor, se encuentra muy asociado a la salinidad del agua. El agua pura es muy poco conductora debido a su reducida disociación. La resistividad del agua destilada es de unos 105 $\Omega.m$ por lo que puede considerarse como aislante. Las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan, sin embargo, conductividad apreciable, pues siempre tienen sales disueltas. Las aguas subterráneas tienen resistividades de 1 a 100 $\Omega.m$, y las aguas marinas de unos 0,15-0,33 $\Omega.m$ debido a la alta salinidad del mar. Por tanto, a mayor conductividad del agua, menor será la resistividad de la formación que la contiene debido al menor tiempo de interacción agua-iones.
- De la temperatura; este parámetro influye notablemente en la resistividad de los fluidos que hay en los poros. En concreto, un descenso de la temperatura provoca un aumento de la resistividad y en el punto de congelación el agua pasa de ser un dieléctrico a un mal conductor.
- Tipo de roca. Las rocas ígneas y metamórficas generalmente tienen altos valores de resistividad (entre $10^3 - 10^5 \Omega.m$). La resistividad de estas rocas depende mucho del grado de fracturación que presenten y del porcentaje de agua que rellene las fracturas. Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido en agua lo que normalmente hace disminuir los valores de la resistividad.

Los suelos son una mezcla de rocas, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos. Esta composición provoca que la resistividad del suelo, aparte de depender de su composición intrínseca, dependa de otros factores como la temperatura, humedad, presión, etc. que pueden provocar que un mismo suelo presente diferentes resistividades con el tiempo. La humedad es el factor más importante. Diferentes grados de humedad para un mismo suelo pueden dar lugar a resistividades diferentes que podrían conducir a interpretaciones erróneas en cuanto a la composición de los materiales constituyentes del mismo. Los suelos arcillosos normalmente tienen valores más bajos de resistividad que los suelos arenosos. Los suelos mojados tienen valores de resistividad entre 1 y $10^3 \Omega.m$.

La resistividad del agua del terreno varía entre 10 y 100 $\Omega.m$ dependiendo de la concentración de sales disueltas. La baja resistividad del agua de mar (0,2 $\Omega.m$) se debe al alto contenido en sal, lo que origina que el método de tomografía eléctrica sea una técnica ideal para la delimitación de la filtración en profundidad de viejas presas de tierra o para delimitar la intrusión salina.



Resistividad en ohms / m según el tipo de lo litología.

En cuanto a los contaminantes industriales, los metales, como el hierro, presentan valores de resistividad sumamente bajos (10^{-8} - $10^{-7} \Omega.m$). Los químicos, tal como el sodio y cloruro de potasio, pueden reducir mucho el valor de la resistividad del agua del terreno (a menos de 1 $\Omega.m$ con moderadas concentraciones). El efecto de los electrolitos, tal como el ácido acético, es comparativamente menor. Los compuestos de hidrocarburos, como el xileno o el tolueno, normalmente tienen unos valores muy altos de resistividad ($>10^{14} \Omega.m$).

Los valores de resistividad varían en un amplio rango comparado con otras magnitudes físicas obtenidas por otros métodos geofísicos. La resistividad de las rocas y el suelo en un área de estudio puede variar en varios órdenes de magnitud. En comparación, en investigaciones gravimétricas en las que se miden diferencias de densidades, frecuentemente los cambios se producen por debajo de un factor de 2. Las velocidades sísmicas normalmente no cambian a de un factor de 10. Esto hace que el método de tomografía eléctrica sea una técnica geofísica muy versátil.

2.2. APLICACIONES

- Identificación de rocas alteradas. Una de las aplicaciones más comunes es la localización y definición de la extensión de la banda de alteración en terrenos graníticos para conocer la posibilidad de ripar o la necesidad de someter a voladura determinados tramos de una obra lineal. Por lo que respecta a la banda de alteración de los granitos, es bastante normal que aparezca en la parte alta y, consecuentemente, pueda controlarse su presencia. Pero tampoco resulta infrecuente que se localice este material más disgregable a mayor profundidad, por debajo de un tramo superficial más compacto, cuya imposibilidad de observación obliga a una detección por prospección geofísica.
- Determinación del recubrimiento de alteración sobre rocas metamórficas como los esquistos.
- Localización de fracturas en terrenos calcáreos cubiertos por una capa de material arcilloso. En las rocas compactas se presentan isolíneas de alta resistividad. Cuando se produce una discontinuidad en estas líneas, la zona de inflexión indica la presencia de fracturas. Se ha comprobado que la tomografía eléctrica resuelve con éxito las estructuras geológicas formadas por un zócalo fracturado en bloques de diferente tamaño (detecta las fracturas) y cubierto por una capa sedimentaria detrítica.
- Localización de galerías y karstificaciones. Las galerías de mina y karstificaciones presentan altos valores de resistividad si el fluido que las ocupa es aire, con lo cual son perfectamente identificables con el método de tomografía eléctrica.
- Localización de canalizaciones; el carácter conductor que provoca una canalización básicamente metálica por la que circula el agua provoca la presencia de anomalías muy poco resistivas que pueden ser identificadas como canalizaciones, lo que permite identificar su posición y profundidad.
- Identificación y cartografiado de restos arqueológicos; los restos aislados, como el caso de las tumbas y, sobre todo, las edificaciones, presentan unas características geométricas que, tras ser detectadas pueden ser cartografiadas y con ello mostrar su distribución y extensión.
- Caracterización acuífera y flujos de agua; permite conocer unidades acuíferas, así como identificar estructuras complejas como: paleocanales o ciertos cambios laterales de facies.
- Deslizamiento de tierras; facilita discernir entre la estructura y volumen que procede de movimientos de tierras y la matriz rocosa.
- Penachos de contaminación; detecta los focos y las plumas de contaminación acuífera antrópica, o natural como la intrusión marina.
- Conocer la envergadura de vertederos; permite cuantificar el volumen de residuos que se encuentran en un vertedero.



Disposición de electrodos en campo

2.3. METODOLOGÍA OPERATIVA

El método de tomografía eléctrica se basa en la implantación de numerosos electrodos, con una separación determinada, en un perfil longitudinal sobre el terreno. Todos los electrodos se conectan a un cable que a su vez va unido al equipo de medida, determinando, antes de realizar las mediciones, cuales serán los cuadripolos de todo el perfil que realizarán las medidas y con qué disposición.

Cada uno de estos cuadripolos realiza una medida de la resistividad que se atribuye a un determinado punto geométrico del subsuelo cuya posición y profundidad en el perfil dependen de la posición de dicho cuadripolo y de la separación entre los electrodos que lo conforman.

El dispositivo consta de dos pares de electrodos, dos emisores y dos receptores. A través de los electrodos emisores se inyecta corriente continua y en el segundo par de electrodos se mide la diferencia de potencial.

Los perfiles que se obtienen en la realización de los estudios de tomografía eléctrica son secciones del terreno que reflejan la distribución de los valores de resistividad aparente a diferentes profundidades, correspondientes a las distintas capas de investigación. Esta información es tratada posteriormente mediante algoritmos matemáticos de inversión para obtener las imágenes de resistividades reales del subsuelo.

La profundidad de investigación depende del espaciado entre electrodos y del dispositivo utilizado, si bien, a menor penetración de investigación se consigue una mayor resolución ya que a menor profundidad se tiene mayor densidad de medidas al ser posible utilizar una malla más cerrada (menor distancia entre electrodos). En

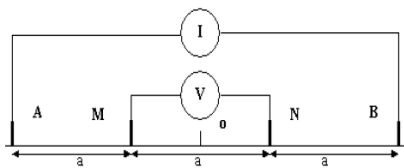
principio, la resolución de la investigación disminuye logarítmicamente con la profundidad.

El método consiste en realizar perfiles longitudinales en los que quede reflejada en perfiles 2D, la distribución de las resistividades del subsuelo.

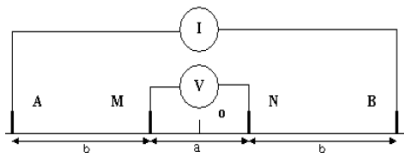
2.3.1. Esquema teórico

Todos los métodos funcionan mediante la determinación del diferencial eléctrico entre 4 electrodos (A, B, M y N). Se colocan los electrodos de corriente (A y B) que emiten electricidad conectados a un miliamperímetro, entretanto los electrodos de potencial (M y N) se conectan a un voltímetro para medir el diferencial y obtener posteriormente la resistividad aparente, es conveniente colocar el número de electrodos necesario entre (A, B, M y N) para obtener los resultados deseados. El valor A siempre será constante, el B (AM y NB) será diferente respecto A, y constante en cada medida pero irá variando su valor en M para cada perfil que se realice. En cambio, el valor N, no será constante en ninguno de los casos y su distancia se escogerá en función del método a utilizar.

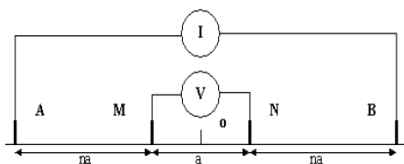
Existen tres métodos, estos se diferencian según la distancia a la que se coloquen los electrodos entre sí, a mayor espaciado de los electrodos se obtiene mayor profundidad de investigación pero menor resolución. Para el método Wenner los cuatro electrodos deben colocarse equidistantes entre sí, siendo (M y N) los ubicados en el centro y (A y B) en el exterior siempre todos ubicados a una distancia a equidistante. En Schlumberger, (M y N) se colocan en medio a una distancia a equidistante y se desplazan (A y B) progresivamente con una distancia b. Para el método Wenner-Schlumberger los electrodos (M y N) permanecen a una distancia determinada a equidistante, y se desplazan los electrodos A y B una distancia n según el perfil que se realice, sin importar la ubicación de los electrodo (A y B) respecto a (M y N).



WENNER α



SCHLUMBERGER



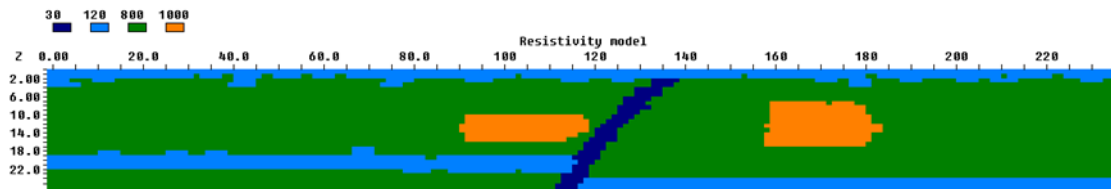
WENNER-SCHLUMBERGER

n = 1 \Rightarrow Wenner
n \geq 2 \Rightarrow Schlumberger

Imagen esquemática de cómo se deben distribuir en campo los electrodos según el método escogido.

2.3.2. Ventajas e inconvenientes de los métodos a utilizar

Cada método tiene sus ventajas e inconvenientes, con el método Wenner, se obtienen transectos con pocos puntos de observación. Normalmente los perfiles son más cortos, de gran resolución y con resultados fiables, pese a obtener resultados de poca profundidad al realizar transectos cortos, se utiliza para hallar estructuras verticales como diques.



Modelo de resistividades aparentes creado con RES2Dmod, a partir de los resultados obtenidos en campo.

Schlumberger permite obtener un mayor número de puntos de observación al realizar transectos muy largos, su principal inconveniente, es que genera mucha “corriente parásito” debido al espaciado entre electrodos. La ventaja, es que la distancia entre electrodos de corriente y potencial no tiene que ser constante permitiéndote modificarla según las necesidades del estudio. Se utiliza para detectar unidades horizontales como movimientos de tierras o penachos de contaminación. Wenner-Schlumberger, permite encontrar todo tipo de estructuras, normalmente se utiliza para hacer un primer barrido de la zona de estudio si ésta no se conoce o si dispone de poco tiempo. Pese a ser eficaz para todo tipo de unidades y estructuras debido a ser un método flexible en la colocación de los electrodos, los límites muy verticales y horizontales no tendrán la misma nitidez que con los métodos anteriores.

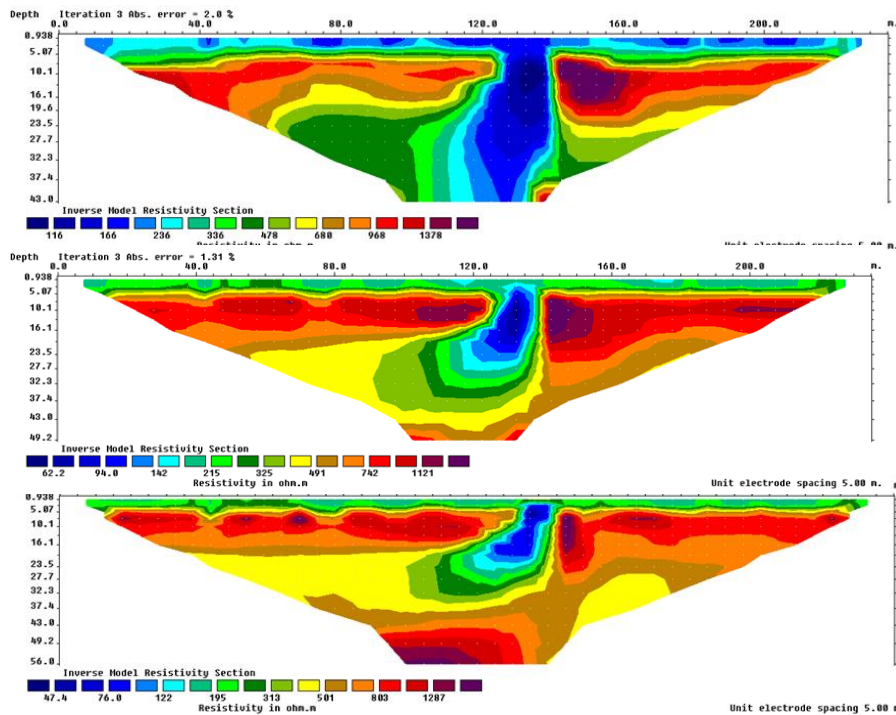
El número de puntos de observación, siempre dependerá del número de electrodos que registren los valores correspondientes al diferencial de potencial entre los electrodos (M y N) y (A y B).

2.3.3. Planificación de campo y elección del método

Antes de iniciar el trabajo de campo, se recomienda realizar un trabajo bibliográfico con el fin de optimizar el tiempo y obtener mejores resultados. Lo primero, es tener claro cuáles son nuestros objetivos y cómo lograrlos. Después, hay que conocer topográficamente la zona de estudio, para ello se pueden utilizar fotos aéreas actuales o software de fotogrametría como Autodesk, Global Mapper o GIS. Siempre que sea posible se intentará realizar el estudio en un terreno lo más plano posible. Una vez se conoce el acceso, se recomienda tener un esquema conceptual sobre la geología de la zona de estudio, y las principales estructuras presentes para conocer la orientación aproximada de la estructura que se busca y utilizar el método más objetivo y eficaz en función de su profundidad y disposición.

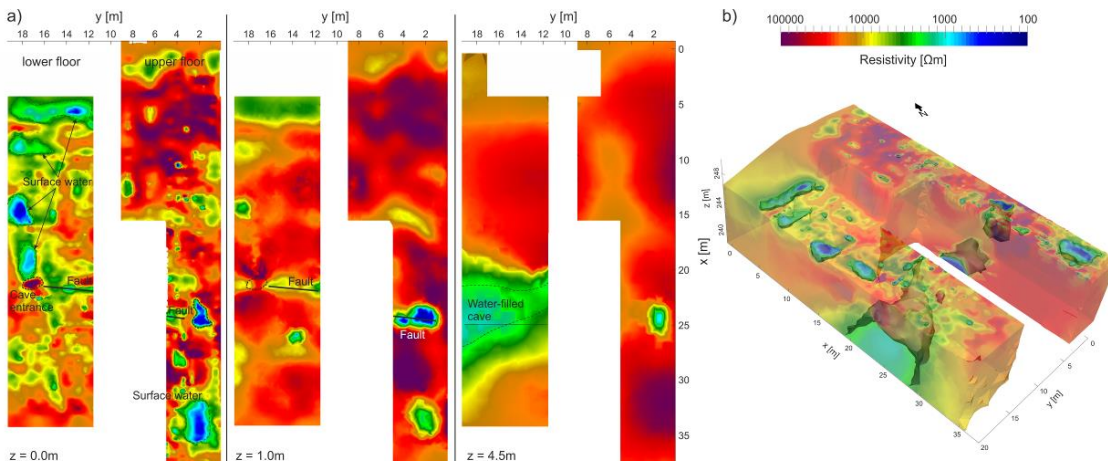
2.4. TRATAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante los trabajos de gabinete, se deben exportar todos los resultados de campo y modelizar mediante el software RES2Dmod las resistividades aparentes. Una vez se tiene el modelo, se realiza la inversión de las resistividades aparentes con el software RES2Dinv. Se convierten las resistividades aparentes en resistividades reales. El modelo funciona a través de algoritmos matemáticos que facilitan la inversión de las resistividades de los modelos 2D de mayor resolución. La limitación de la inversión, es que los límites de los contactos suavizados (cambios laterales de facies) serán poco claros mientras que los límites abruptos (diques) serán muy nítidos.



Modelos de resistividades reales realizados con el método Wenner, Schlumberger, y Wenner-Schlumberger, a través del software RES2Dinv.

A través de varios modelos de resistividades reales en malla, es conveniente realizar modelos 3D en cuadrícula “Snake”.



Modelo de 3D de resistividades reales.