

14

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO Y MODELADO DE ESTRUCTURAS EN MAPAS DE RESISTIVIDAD EN SITIOS ARQUEOLÓGICOS

Ana Beatriz Cosenza

Erick Reyes Andrade

Universidad de San Carlos de Guatemala

ABSTRACT

SOIL CHARACTERIZATION AND STRUCTURAL MODELING IN RESISTIVITY MAPS AT ARCHAEOLOGICAL SITES

We propose a methodology for measuring, in the laboratory, the resistivity apparent at different depths in soil samples obtained from the South Coast of Guatemala, with the objective of characterizing superficially, the material surrounding archaeological structures susceptible to detection by geophysical prospection. Afterwards, computer programs model the response that different configurations of archaeological structures would produce in the presence of resistivity measures at surface, assuming that these structures are found within a similar medium to that of the sample under study. In this way, the first attempt can be made to characterize anomalies produced from these configurations in resistivity maps as an aid to the correct interpretation of cartography obtained in future geophysical prospecting.

En el estudio de la Arqueología, el uso de tecnología es cada vez más frecuente, y se hace más necesario en la medida en que se incorporan las ideas de conservación del patrimonio, la eficiencia de los estudios y sus correspondientes relaciones costo/beneficio. Para ello, se requiere de un equipo de especialistas calificados, convirtiendo la actividad arqueológica en un quehacer multidisciplinario.

En la planificación de la prospección arqueológica tradicional, se establecen los elementos “objetivo” de la investigación y se procede a realizar las pruebas y excavaciones para su hallazgo. Dado el carácter invasivo de este tipo de prospección, se corre el riesgo de destruir elementos inesperados y, necesariamente, se altera de modo irreversible el medio estudiado, perdiendo información acerca de la geología, materiales orgánicos, etc., que en dicho momento no eran objeto de estudio (Arroyo 2004; Reyes y Cosenza 2008).

En la búsqueda de elementos monumentales en el subsuelo, las principales herramientas de orientación son los elementos recuperados visiblemente sobre el suelo, algún vestigio de visibilidad mayor, o bien la presencia de montículos o alteraciones locales en la vegetación. De cualquier forma, la eficiencia de esta búsqueda es baja. En aras de obtener un mejor rendimiento, la Arqueología ha empezado a servirse de la Geofísica de superficie como herramienta no invasiva para la orientación de sus excavaciones; en particular de los métodos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos. El presente estudio pretende documentar mejor la experiencia de proyectos donde la principal guía para situar las prospecciones arqueológicas son los mapas geofísicos. En una primera fase, se hace un estudio de la resistividad eléctrica de muestras de suelo tomadas a diferentes profundidades y en distintas locaciones. Ésta es la fase de caracterización del suelo. Se escogieron tres puntos de muestreo: la región cercana a la base de la acrópolis y el taller de obsidiana, ambos sobre el sitio arqueológico El Baúl, separados una distancia aproximada de 1 km; y la región del sitio arqueológico El Castillo, alejada aproximadamente 5 km de las anteriores.

En una segunda fase, se hace un estudio de la respuesta que producirían diversas estructuras arqueológicas enterradas en el subsuelo, ante medidas de resistividad realizadas en superficie. Ésta es la fase del modelado de mapas de resistividad. Se realizaron varias simulaciones cambiando diversas variables en las estructuras para observar el comportamiento de las anomalías que producen en la cartografía de resistividad eléctrica.

JUSTIFICACIÓN

El mapeo de resistividad eléctrica refleja las anomalías producidas por el contraste entre la resistividad de los elementos que se encuentran enterrados en el subsuelo y la de su medio circundante. Cuando se trata de estructuras arqueológicas enterradas, se espera hallar ciertas características geométricas correspondientes a posicionamientos de materiales que no ocurren fácilmente en la naturaleza, tales como la formación de circunferencias, paralelogramos, ángulos rectos, alineaciones, entre otros, que son más bien producidos por la actividad humana. Sin embargo, hay que considerar que el material de construcción de dichas estructuras no es diferente del material que se encuentra disperso en la zona. Este es el caso de los vestigios de la costa sur de Guatemala, en donde se encuentra un alto contenido de sedimento debido a la actividad volcánica y donde, por ende, la roca de basalto era el material preferido para la construcción. Además, esta roca se puede encontrar dispersa en los alrededores de los monumentos, siendo la actividad agrícola y la habitación humana reciente, dos de los principales contribuyentes a dicha dispersión. Todo esto se refleja en los mapas geofísicos y puede confundirse con posibles conjuntos de estructuras en el momento de la interpretación.

Este estudio busca generar herramientas de interpretación de mapas de resistividad eléctrica para las condiciones particulares de una región dada.

METODOLOGÍA

Para hacer la caracterización del suelo, se tomaron muestras de 6.36 kg en promedio, extraídas de los rangos de profundidades entre 0 - 0.15 m, de 0.15 - 0.3 m y de 0.3 a 0.5 m.

Tradicionalmente, la resistencia eléctrica del suelo se mide en laboratorio colocando la muestra dentro de un recipiente cilíndrico aislante –para evitar corrientes parásitas en él–, cerrado, excepto en el centro de las tapaderas de plástico por donde se insertan las puntas del multímetro (velleman) modelo DVM98. Siguiendo este procedimiento, se obtuvo una lectura de resistencia con variación creciente en el tiempo, debido al establecimiento de nuevas líneas de corriente entre la tierra (muestra) y el óhmetro del multímetro. Estas medidas erráticas se distorsionaban también según el grado de humedad. Por ello, para poder establecer una medida acorde a la de una prospección geofísica, se utilizó una fuente externa de corriente conectada en serie con un amperímetro para obtener una medición de corriente (I), mientras se medía el valor del voltaje (V) de la misma. Estas 2 cantidades están relacionadas por la ley de Ohm

$$V = I \cdot R \quad (1)$$

de la cual se obtiene la resistencia (R)

$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

A partir de esta resistencia y de la geometría del recipiente, se puede calcular la resistividad por medio de la ecuación

$$\rho = R \left(\frac{A}{L} \right) \quad (3)$$

donde A es el área de las tapaderas del cilindro, L es su longitud y ρ es la resistividad aparente, denominada así por ser un valor compuesto por las contribuciones de las resistividades de todos los elementos que componen la muestra heterogénea.

Se aplicó el mismo procedimiento para medir la resistividad de una roca de basalto, cuya geometría se aproximó a la de un cilindro, por medio del desgaste con otra roca del mismo material.

Se sabe, además, que la resistividad del suelo depende de múltiples factores además de la geometría, tales como la densidad de los materiales, la humedad, el contenido en sales, la porosidad e interconexión de los poros, entre otros (Orellana 1972). Por ejemplo, al multiplicar (3) por L/L , se obtiene

$$\rho = R \left(\frac{A * L}{L^2} \right) \quad (4)$$

de modo que

$$\rho = R \left(\frac{V}{L^2} \right) \quad (5)$$

donde V es el volumen, que puede expresarse en términos de masa y densidad para obtener

$$\rho = R \left(\frac{m}{DL^2} \right) \quad (6)$$

donde m es la masa que se está midiendo, D es la densidad de todo el material de muestra. Esta ecuación nos muestra la relación de la resistividad con la densidad y con la humedad. Así, para un suelo en una zona de cultivo, la alta concentración de humedad provocará una disminución de la resistividad eléctrica, de igual manera que lo haría la presencia de poros interconectados llenos de agua y con sales disueltas. Por el contrario, la presencia de espacios llenos de aire, que es un aislante eléctrico, aumentará los valores de resistividad.

Una vez obtenido un conjunto de valores de resistividad de los suelos superficiales de la región, se procedió a la fase de modelación de la respuesta eléctrica de estructuras arqueológicas enterradas en el suelo. Para ello se utilizó el programa ELEC3D, desarrollado por el Laboratorio de Geofísica Aplicada de la Universidad Paris 6, UMR7619 Sysiphe, por Alain Tabbagh, Jacques Vassal, Jeanne Tabbagh, Roger Guérin y Cédric Parnissod (2004). Dicho programa permite modelar objetos tridimensionales dentro de un suelo tabular de tres capas diferenciadas por sus resistividades (siempre y cuando todos los objetos estén en la segunda capa), utilizando el método de momentos (Tabbagh 1985).

Con la información obtenida en la etapa de caracterización del suelo y algunas referencias de estudios previos realizados en la región (Cosenza 2006), se propusieron suelos de dos capas para los sitios escogidos a las profundidades de interés (la segunda y tercera capa se han considerado una sola pues se les ha asignado el mismo valor de resistividad a ambas). Así, en todos los casos se propone una primera capa de 0.15 m, y la segunda no tiene una profundidad asignada, por ser la última capa que nos interesa. Luego se generaron estructuras tridimensionales en la segunda capa, representando segmentos de muros, esquinas formadas por dos paredes, calzadas y patios. Estos elementos se colocaron en diversas posiciones buscando observar, para los tres sitios de estudio escogidos, cómo cambiaban sus imágenes como anomalías de resistividad de superficie, ante las variaciones de profundidad de las estructuras, tamaño, orientación y posición respecto de los perfiles de medida, y dispersión de los materiales.

Para cada corrida, es necesario definir el tipo de dispositivo de medición para el método eléctrico a utilizar. En todos los casos, se escogió el dispositivo Wenner (Pérrot *et al.* 2005), que es un cuadrupolo lineal con igual separación entre electrodos, por ser uno de los más prácticos para la realización de mapas de resistividad. La separación entre electrodos fue de 0.50 m, lo que permite la suficiente resolución para poder observar las anomalías producidas por las estructuras típicas que se esperaría tener en la región: bloques y muros de 0.30 - 0.50 m de espesor, 0.50 m de altura, que se encuentran entre 0.15 y 0.50 m de profundidad. Los mapas se hicieron para cubrir regiones de 10 x 10 m, siguiendo perfiles con 21 electrodos (18 medidas colocadas cada una al centro de los cuadrupolos), en la dirección x , y haciendo 11 perfiles paralelos separados 50 cm entre sí, avanzando en la dirección positiva de y . El primer electrodo se colocó en la posición $x = 0$, $y = 0$.

Una vez ingresada toda la información referente a la resistividad y espesor de las capas de suelo, las dimensiones y resistividad de las estructuras enterradas, así como las características del dispositivo de medición, el programa realiza el cálculo de la resistividad aparente medida en la superficie como consecuencia de la presencia de todos estos factores (Cosenza 2006). Al final, con los valores de resistividad calculados, se elabora el mapa de resistividad correspondiente a las estructuras. Esto es lo

que se denomina la “solución del problema directo en Geofísica”, es decir, el cálculo de las medidas que se obtendrían en superficie, a partir de parámetros físicos dados en profundidad.

RESULTADOS

El cilindro contenedor tenía 0.19 m de longitud y 0.19 m de diámetro, por lo que el volumen fijo definido era de 5.40 E-3 m^3 . Se trató de mantener la misma densidad en todas las medidas, siendo ésta de 1178.65 kg/m^3 . Con estos datos, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Región cercana a la acrópolis de El Baúl: entre 0.15 y 0.3 m de profundidad, una resistividad de $759.51 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; entre 0.3 y 0.4 m de profundidad, una resistividad de $557.8 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, notándose más humedad que en la muestra anterior.
- Taller de obsidiana (región con alta concentración rocosa): entre 0 y 0.15 m de profundidad, la resistividad es de $102,140.35 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; entre 0.15 y 0.3 m de profundidad, la resistividad es de $43,774.43 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; y, por último, entre 0.3 y 0.5 m de profundidad, la resistividad es de $15,339.74 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$.
- El Castillo: entre 0.15 y 0.4 m de profundidad, la resistividad es de $29,218.54 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$. La primera muestra, correspondiente al intervalo de 0 a 0.15 m de profundidad, se despreció debido a una alta contaminación urbana (basura), puesto que existe población a escasos metros de esta región.
- Roca de basalto: resistividad de $2,335.57 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, valor que cae dentro del rango correspondiente al tipo de roca establecido en la literatura (Orellana 1972).

Se observa así la fuerte variación en la resistividad superficial del suelo de una región a otra. A partir de esta información, se plantearon los siguientes suelos a dos capas para el modelado:

- Región cercana a la acrópolis de El Baúl: primera capa, con 0.15 m de espesor y resistividad de $200 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; segunda capa, con resistividad de $500 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$.
- Taller de obsidiana: primera capa, con 0.15 m de espesor y resistividad de $100,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; segunda capa, con resistividad de $30,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$.
- El Castillo: primera capa, con 0.15 m de espesor y resistividad de $1,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; segunda capa, con resistividad de $30,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$.

Para la resistividad del basalto se tomó un valor de $2,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$., de donde es de esperarse que las estructuras de este material produzcan anomalías de alta resistividad en la región de la acrópolis, y anomalías conductoras en las otras dos regiones.

Los mapas de resistividad se muestran en un plano xy donde además aparece una vista de la estructura modelada, acompañados de un plano xz (con escalas distintas en los ejes, la dimensión z está exagerada) que muestra otra vista de las estructuras. Los resultados del modelado se discuten a continuación:

- La Figura 1 muestra los resultados obtenidos al variar la profundidad de una estructura que simula ser una esquina formada por dos segmentos de muro de basalto, entre 0.15 y 0.50 m, para las condiciones del sitio cercano a la acrópolis. El área transversal de los muros es de $0.50 \times 0.50 \text{ m}$ con 1 m de largo en sus lados externos. Aparece, como era de esperarse, como una anomalía resistiva debido al tipo de contraste de resistividades con el medio propio del lugar. La forma de la anomalía resistiva observada no representa la forma original de la estructura. Sin embargo, toma sus valores más altos justo sobre la misma. Además, se observa que la anomalía

se vuelve más difusa y grande, cuanto más profundamente enterrada se encuentra la estructura. A pesar de este cambio de tamaño, son los valores máximos de resistividad los que nos indican su localización.

- La Figura 2 muestra lo que ocurre al variar la longitud de las estructuras. Se inicia con la misma esquina del inciso anterior, a 0.50 m de profundidad, en el sitio del taller de obsidiana. Como resultado se observa una anomalía conductora, que concuerda con el tipo de contraste de resistividad entre el medio propuesto y el basalto, y que no difiere mucho de lo observado en el caso de la acrópolis en cuanto a forma. Al alargar los muros hasta 2 m, la anomalía cambia significativamente, aproximándose un poco más a la forma angular real de la estructura, pero sin dejarla bien definida. Siguen siendo los valores extremos de la anomalía los que indican la ubicación de la estructura, dando una mejor cobertura en los alargamientos paralelos a los perfiles, que en los perpendiculares.
- La Figura 3 compara, para las condiciones de la región de El Castillo, las anomalías producidas cuando los perfiles pasan por las orillas de las estructuras, a 0.50 m de profundidad, y aquellas que se producen cuando los perfiles pasan justo por encima de éstas. En este caso se modela un segmento de muro, con las mismas características geométricas de los anteriores. Las anomalías resultan ser más difusas en el primer caso, cubren una mayor extensión, y los valores extremos de resistividad abarcan la estructura y parte de su exterior. En el segundo caso, los valores extremos se concentran en el interior del área sobre la estructura, definiéndola mejor. En ambos casos, las anomalías muestran alargamientos en la dirección paralela a los perfiles, los cuales son más difusos cuando los electrodos pasan por las orillas de las estructuras, y mucho más afilados, siguiendo la línea del perfil, cuando éstos pasan por encima de ella. Estos alargamientos laterales podrían ser confundidos fácilmente con estructuras más pequeñas y dispersas, o con extensiones de estructuras inexistentes. En otras simulaciones se observó que este efecto sigue líneas más definidas conforme la estructura está más cerca de la superficie.
- La Figura 4 muestra las diferencias entre las anomalías producidas por estructuras cuya posición es paralela a los perfiles de medición y las producidas por estructuras que se alinean de forma perpendicular a los mismos. Es claro que la anomalía representa mucho mejor la forma de la estructura cuando ésta, que es un segmento de muro, es paralela al perfil. En este caso, su tamaño sobreestima el tamaño real, pero esto se debe a la profundidad de la estructura. Cuando la posición es perpendicular, no sólo se tiene el efecto de la profundidad, sino también una deformación o ensanchamiento paralelo al perfil, que podría hacer pensar en estructuras más anchas de lo que realmente son.
- La Figura 5 muestra la anomalía producida por un conjunto de diez cuerpos que simulan los vestigios de un muro a 0.5 m de profundidad. Se tiene dos cuerpos formando la esquina (con las mismas características que las de la Figura 1), más seis cuerpos simulando rocas de 0.2 x 0.2 x 0.3 m que se han desprendido del muro, tres en su parte paralela a los perfiles y tres en la parte perpendicular. Además se colocaron dos objetos representando rocas pequeñas de 0.1 x 0.1 x 0.1 m a 0.15 m de profundidad, colocadas una sobre la estructura principal y la otra fuera de ella, en las cercanías del ángulo recto. Para los tres sitios de estudio se obtuvo un resultado similar. Ante la presencia de una estructura grande, el efecto de rocas pequeñas es despreciable. Por otro lado, las rocas desprendidas del muro en la dirección paralela a los perfiles muestran un mayor efecto sobre la anomalía que aquellas desprendidas en la dirección perpendicular.
- Se modeló también una especie de piso o calzada, de 4 m de ancho y 0.30 m de espesor, a 0.30 m de profundidad, produciendo una anomalía perfectamente bien definida para las condiciones del sitio cercano a la acrópolis, debido al tamaño y a la poca profundidad de la estructura, como se puede observar en la Figura 6. Una calzada de las mismas dimensiones, pero formada por elementos separados y un poco más irregulares produce la segunda anomalía mostrada en la misma figura, cuya forma ya no tiene la misma definición, pero que permite aún identificar los límites de la estructura.

- Por último, se modeló una calzada no perfectamente plana, pandeada en su centro, con una depresión máxima de 0.20 m, por variación en su profundidad de 0.30 m en las orillas hasta 0.50 m en su centro, con un espesor de 0.30 m. La anomalía producida se muestra en la Figura 7, y es bastante clara y precisa. Muestra algunas irregularidades al compararla con la de la Figura 6, debido a las variaciones en la profundidad.

CONCLUSIONES

El proceso de caracterización de la resistividad de los suelos en términos de sus propiedades eléctricas y su interpretación, requiere de la aplicación de conocimientos de electromagnetismo que permitan solventar las dificultades prácticas que se presentan y evitar errores sistemáticos durante el experimento.

Los resultados obtenidos en la medición de la resistividad obedecen a varios factores: la densidad de la tierra, la humedad, concentración de rocas, espacios con aire, entre otros.

En estudios que implican la aplicación de Geofísica de superficie, no se puede asumir un solo valor de resistividad para áreas tan pequeñas, puesto que los valores son muy sensibles a la variación de las condiciones ambientales (viento, lluvia, riego, transporte). Sin embargo, para las áreas de interés durante la prospección geofísica, los valores obtenidos orientan respecto a los contrastes entre la roca de las construcciones y un medio más o menos homogéneo a gran escala, permitiendo hacer algún tipo de modelado de respuesta eléctrica de las estructuras.

Para dar cuenta de variaciones más importantes de resistividad en profundidad, sería de gran utilidad tener pozos de referencia, de corta profundidad.

La caracterización de la resistividad de los suelos proporcionó información útil para la modelación de la respuesta eléctrica de las estructuras arqueológicas de una región dada. Además, mostró fuertes variaciones de resistividad entre los suelos de la misma región.

La modelación de mapas de resistividad con diversas estructuras arqueológicas provee herramientas para la interpretación de mapas reales obtenidos en sitios arqueológicos. Reveló que las anomalías observadas reflejan muy bien la ubicación de las estructuras, pero no su forma, la cual aparece distorsionada en función de su profundidad, posición, tamaño y orientación. También mostró que la presencia de rocas pequeñas en comparación con las estructuras principales, no afecta significativamente la detección de dichas estructuras.

La simulación de posibles estructuras, teniendo como base los datos obtenidos en laboratorio, nos da una percepción más real de la forma en que éstas se manifiestan en un mapa de resistividad para las condiciones propias de la región estudiada, ofreciendo un medio para facilitar su discriminación respecto de otros elementos discordantes dentro del mapa.

De acuerdo con los resultados de los modelos, el mapeo de resistividad eléctrica representa un método geofísico de interés para las investigaciones arqueológicas en la región estudiada. Sería de gran utilidad ponerlo a prueba en áreas donde se conoce la ubicación y forma de las estructuras enterradas.

AGRADECIMIENTOS

A Pantaleón, S. A., por su anuencia a permitir la realización de estudios arqueológicos en su propiedad, en particular el presente estudio. A Stuardo Rodríguez, por su colaboración en la fase de caracterización del suelo. A Cristián Lamport por su colaboración en la fase de modelado de mapas de resistividad. A Roger Guérin y la Unité Mixte de Recherche 7619 Sysiphe, por haber facilitado el software para la realización de las simulaciones.

REFERENCIAS

Arroyo, Bárbara

- 2004 Metodologías no tradicionales para la identificación y análisis de sitios en la costa del Pacífico de Guatemala. En *XVII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2003* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo, H. Escobedo y H. Mejía), pp.20-27. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

Cosenza, Beatriz

- 2006 *El sondeo eléctrico vertical como metodología geofísica en el estudio de capas acuíferas en la finca "El Baúl", Santa Lucía Cotzumalguapa*. Tesis de Licenciatura, Licenciatura en Física Aplicada, Facultad de Ingeniería, USAC, Guatemala.

Orellana, Ernesto

- 1972 *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Paraninfo, Madrid.

Pérrot-Minnot, S., E. Reyes, B. Cosenza, O. Chinchilla, A. Mojica, L. Pastor, R. Vanhoeserlande y R. Guérin

- 2005 Prospección geofísica en la zona de Cotzumalguapa: resultados de la VI escuela centroamericana de Geofísica aplicada. En *XVIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2004* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp.1009-1017. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

Reyes, E. y B. Cosenza

- 2008 Metodologías arqueofísicas utilizadas en Guatemala en los últimos veinte años. En *XXI Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2007* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp. 907-915. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

Tabbagh, A.

- 1985 The response of a three-dimensional magnetic and conductive body in shallow depth electromagnetic prospecting. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 81:215-230.

Tabbagh, A., Jacques Vassal, Jeanne Tabbagh, Roger Guérin y Cédric Panissod

- 2004 *Notice des programmes 3D en MT, TDEM, EM, ELEC, et Electrostatique*. UMR7619 Sysiphe, Francia.

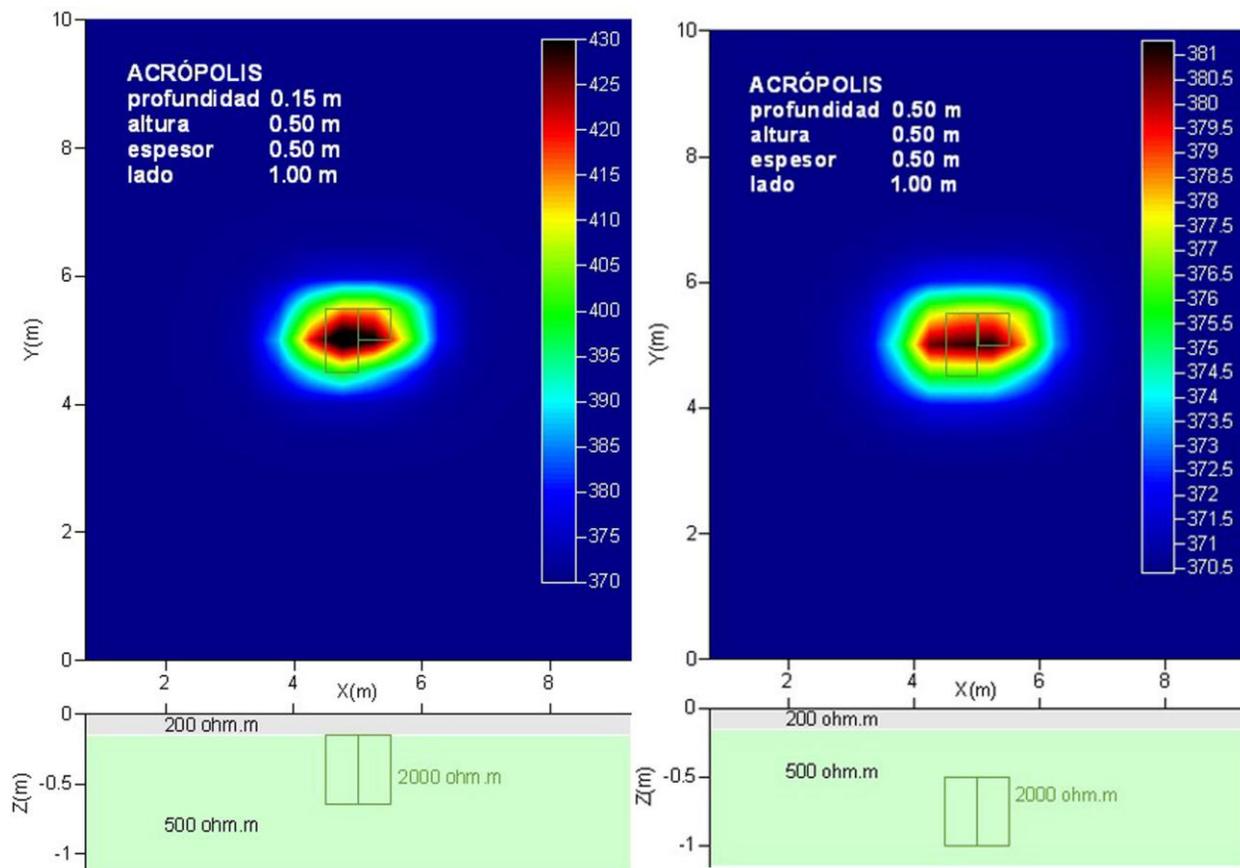


Figura 1 Modelo de mapas de resistividad eléctrica variando la profundidad de la estructura

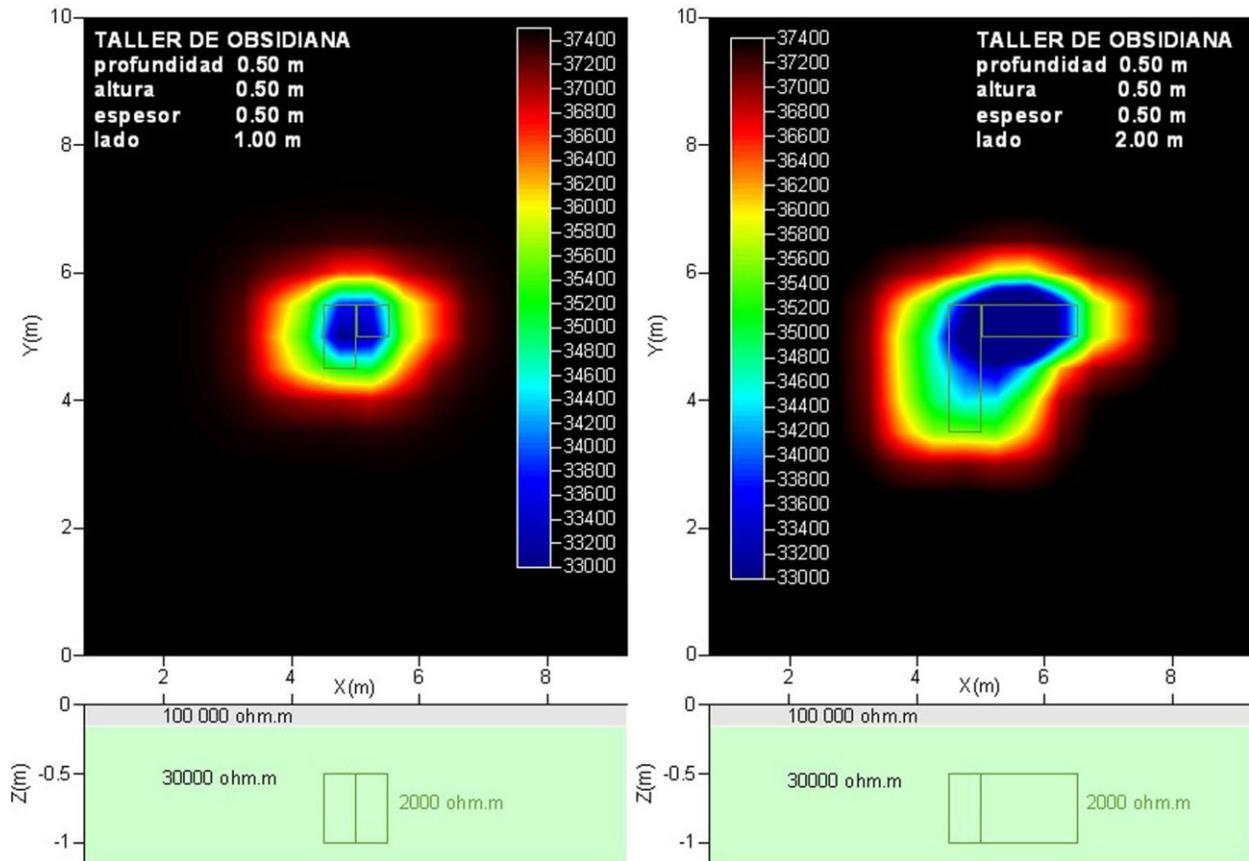


Figura 2 Modelo de mapas de resistividad eléctrica variando la longitud de la estructura

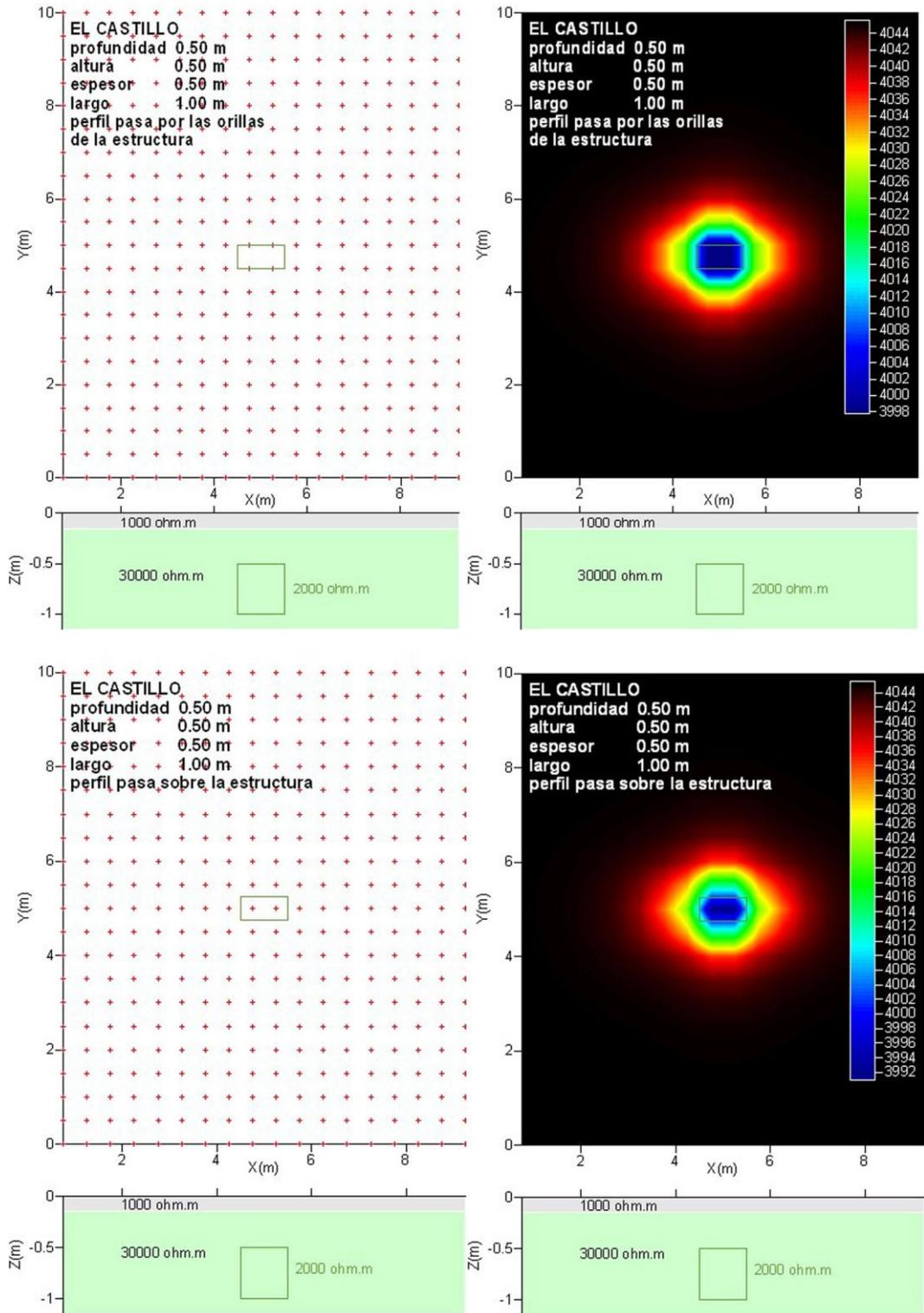


Figura 3 Modelo de mapas de resistividad eléctrica cuando los electrodos pasan al borde de la estructura (arriba) o sobre la estructura (abajo)

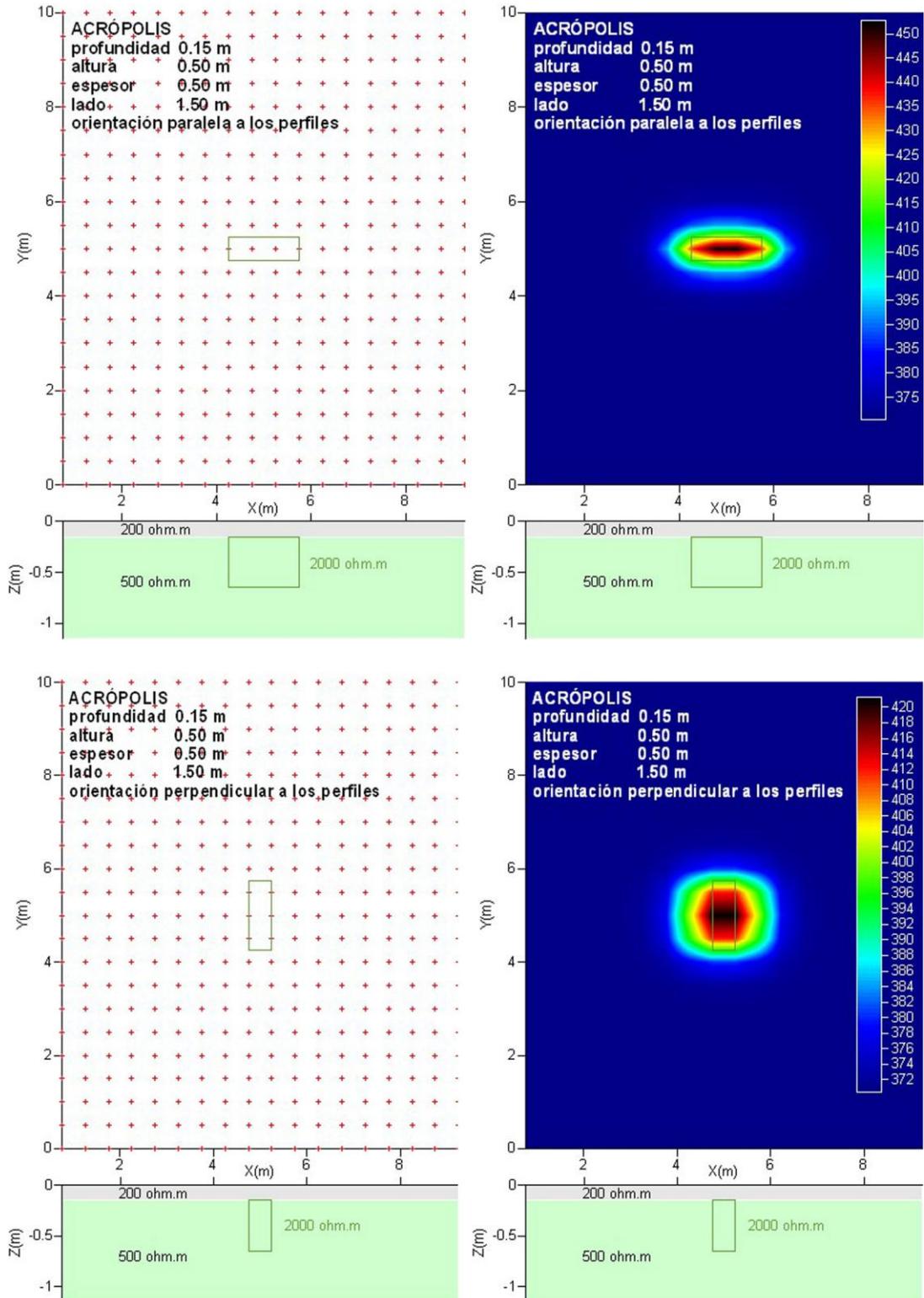


Figura 4 Modelo de mapas de resistividad eléctrica con estructuras paralelas (arriba) y perpendiculares (abajo) a los perfiles eléctricos

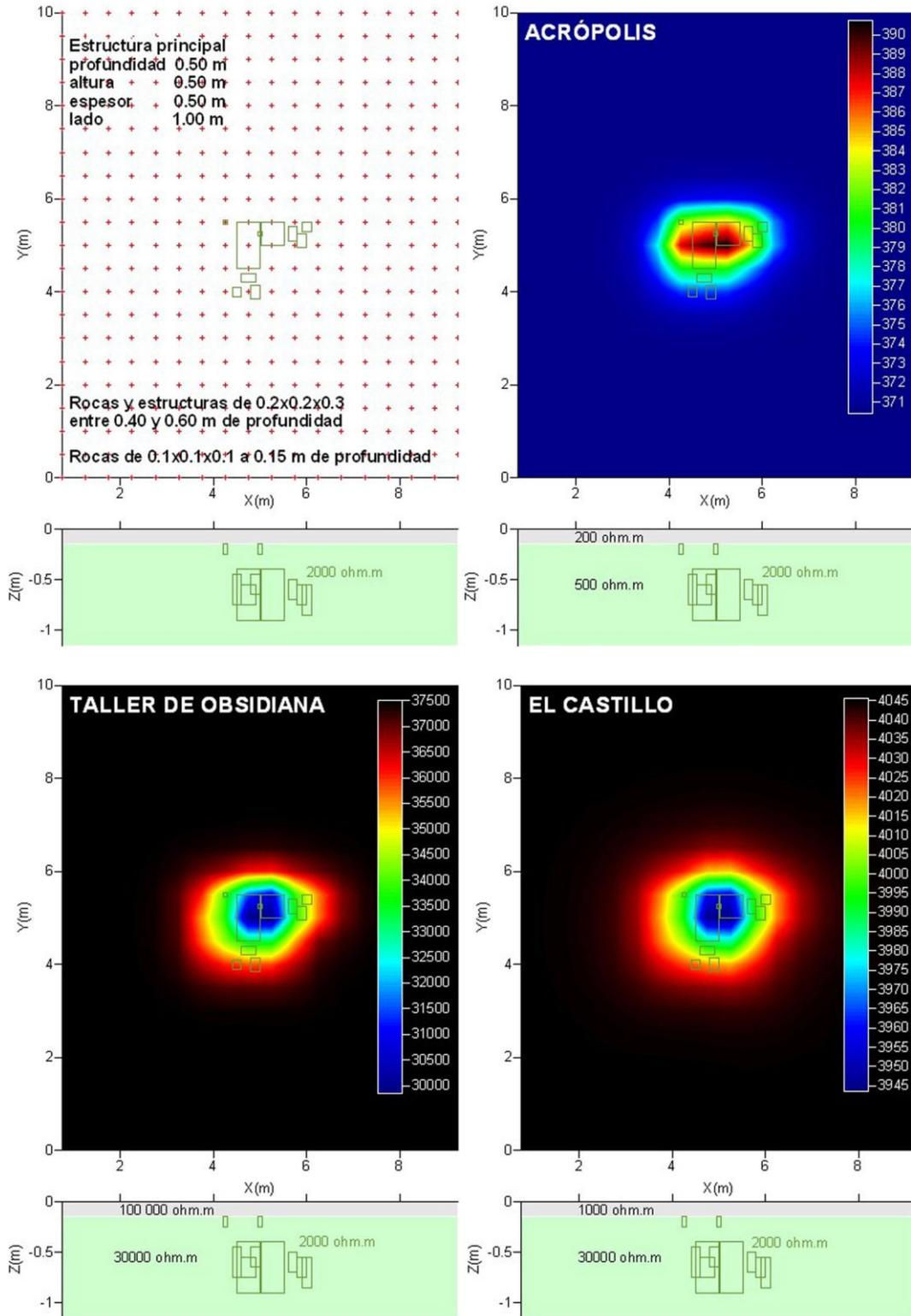


Figura 5 Modelado de mapas de resistividad eléctrica sobre los vestigios de una esquina formada por dos muros

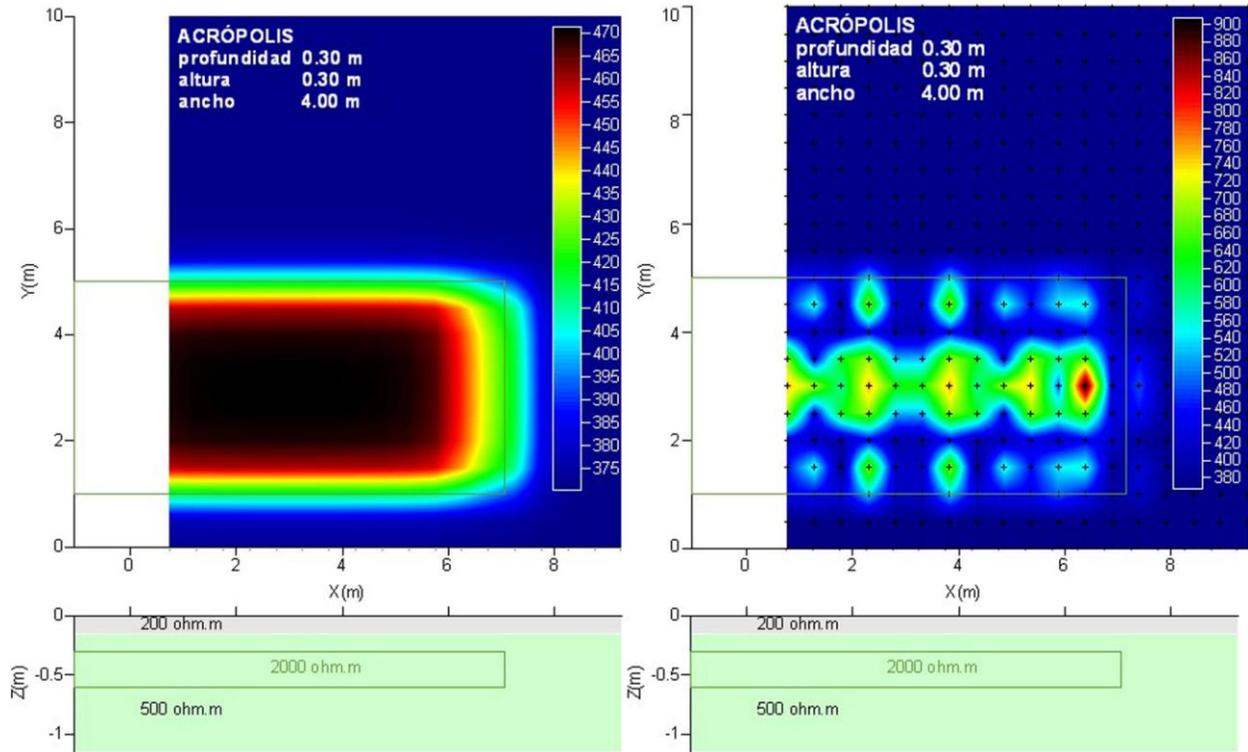


Figura 6 Modelado de mapas de resistividad eléctrica para un piso o calzada plana (izquierda: estructura compacta, derecha: estructura irregular)

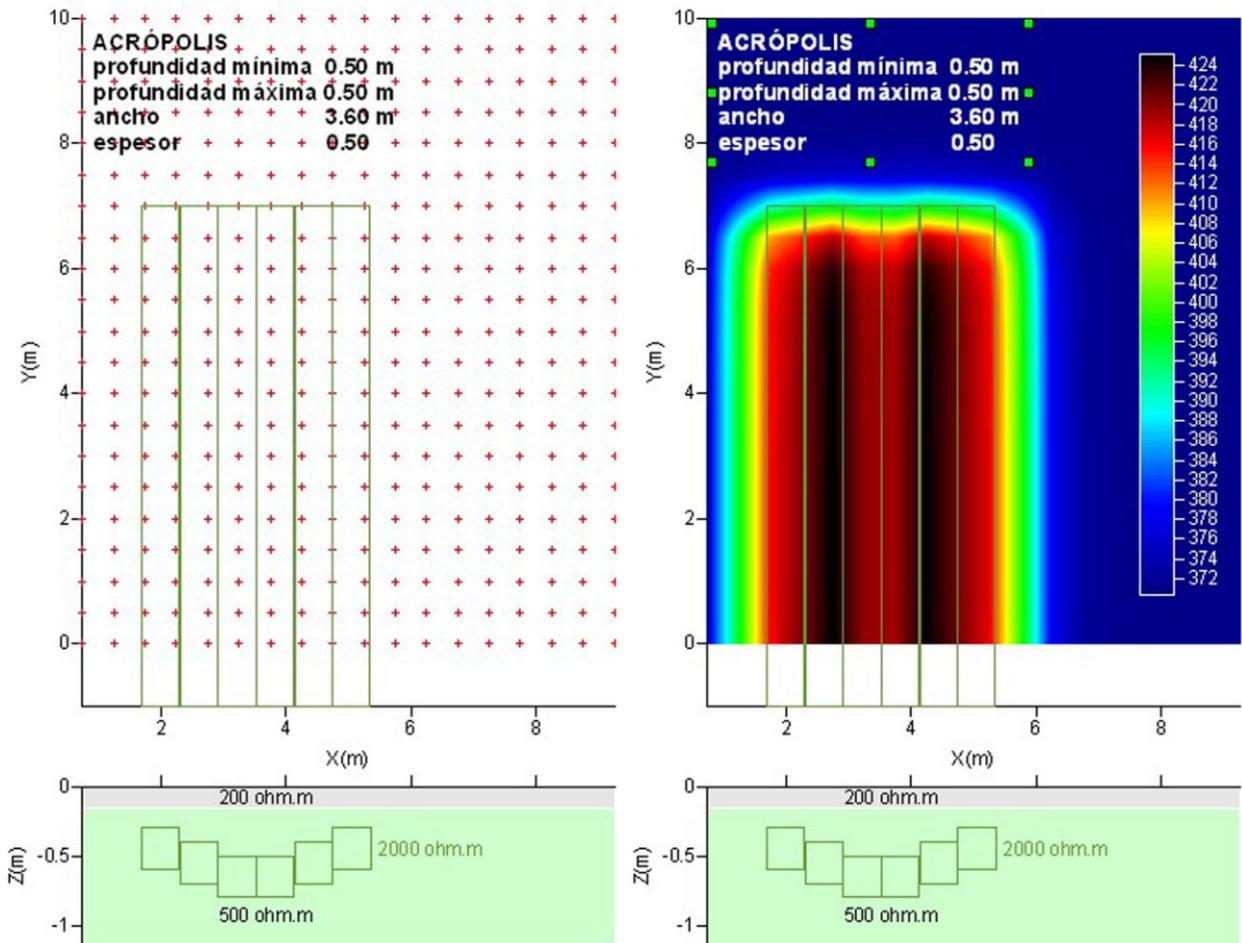


Figura 7 Modelado de mapas de resistividad eléctrica para un piso o calzada con hundimiento