

RESEARCH ADVANCE

TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA 3D EN LA CATEDRAL DE MORELIA, MÉXICO

3D Electrical Resistivity Tomography in Morelia Cathedral, Mexico

*Gerardo Cifuentes-Nava,¹ Roberto Cabrer-Torres,²
Andrés Tejero-Andrade,³ Esteban Hernández-Quintero,¹
Alejandro García-Serrano,³ René Chávez-Segura,¹
Avto Goguitchaichvili,¹ Miguel Cervantes-Solano²*

¹ Instituto de Geofísica, UNAM, México; ² Escuela Nacional de Estudios Superiores-Morelia, UNAM, México; ³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

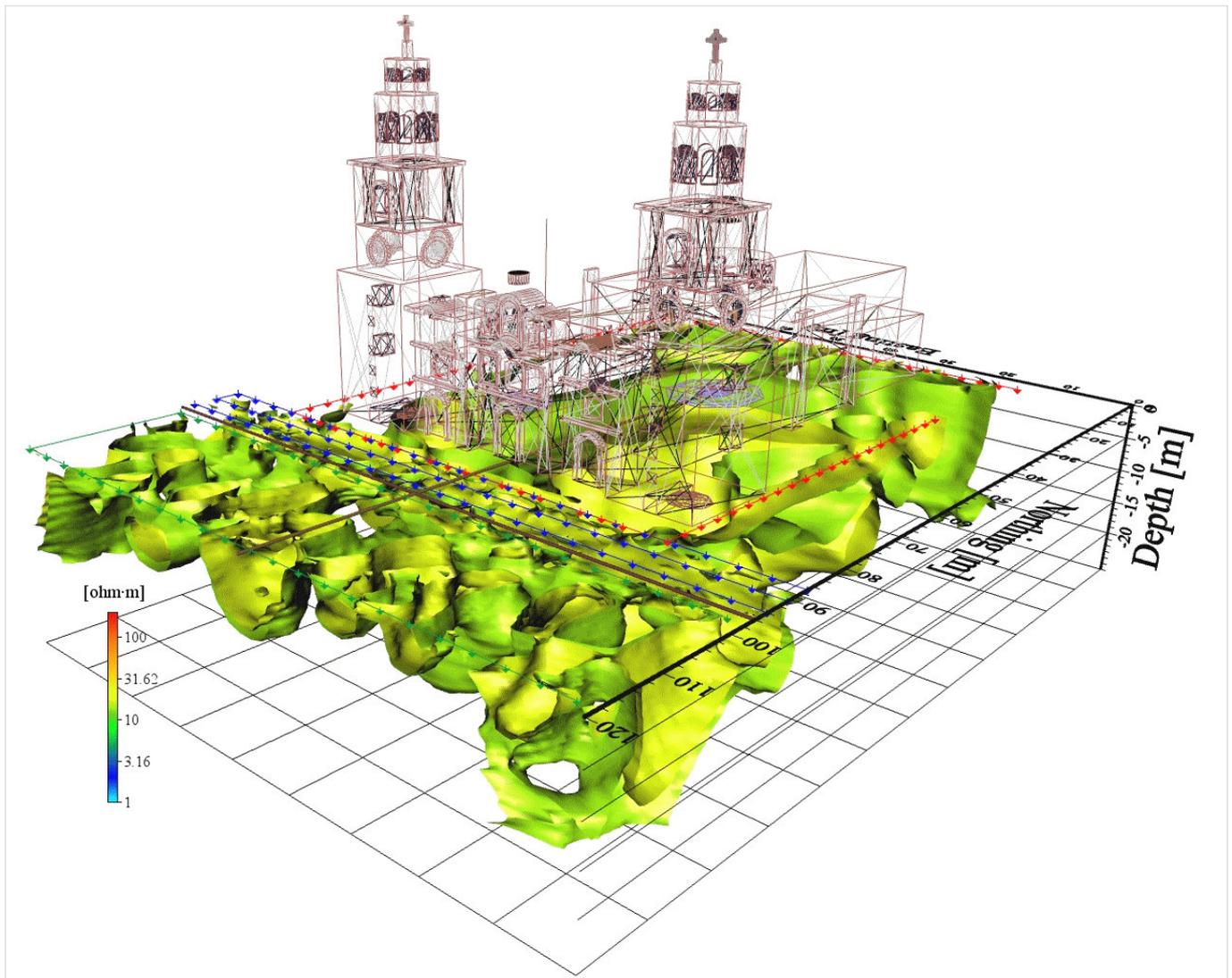


Figura 1. Anomalía en colores falsos mostrando superficies de isoresistividad de la TRE-3D, en una vista NW de la Catedral de Morelia.

Recibido: 21-10-2017. Aceptado: 26-10-2017. Publicado: 4-11-2017.

Edited & Published by Pascual Izquierdo-Egea. English proofreading by Emily Lena Jones.
Arqueol. Iberoam. Open Access Journal. License CC BY 3.0 ES. <http://purl.org/aia/364>.

RESUMEN. *La tradición oral en la ciudad de Morelia, México, así como evidencias parciales en algunos edificios, han llevado a la creencia de la existencia de túneles subterráneos en el centro de esta ciudad, los cuales pertenecerían a la época colonial de nuestro país. Dicho centro fue declarado patrimonio cultural de la humanidad en 1991 por la UNESCO, por lo que es poco factible la excavación o perforación directa destructiva con la intención de explorar. En este contexto, la implementación de técnicas no invasivas es perfecta para localizar zonas de interés, de tal forma que los métodos de exploración geofísica son adecuados, al no ser destructivos y proporcionar una imagen del subsuelo para corroborar la existencia indirecta de estructuras en profundidad. Se presentan los estudios con tomografía de resistividad eléctrica tridimensional (TRE-3D) llevados a cabo en 2014, 2016 y 2017 en la Catedral de Morelia y su frente norte, en donde se pueden ubicar estructuras organizadas no acordes con el entorno geológico del sitio, los cuales pueden suministrar indicios de la existencia de diversas estructuras de origen antrópico. La TRE-3D aplicada para este estudio es una combinación entre metodologías convencionales y no convencionales; ofrece una imagen de la distribución de estructuras en profundidad que muestran características concordantes con tradiciones orales y hechos históricos documentados referentes al desarrollo de la Catedral de Morelia a través del tiempo.*

PALABRAS CLAVE: *Catedral de Morelia, exploración geofísica, tomografía de resistividad eléctrica tridimensional, estructuras subterráneas.*

ABSTRACT. *Oral traditions, as well as partial evidence in some buildings, have led to a belief in the existence of underground tunnels dating to the colonial period in downtown Morelia, Mexico. The city of Morelia was declared a UNESCO World Heritage Site in 1991, making excavation impossible. Nondestructive geophysical exploration methods, however, can provide an image of the subsoil to test for existence of tunnels or other subterranean structures. This paper reports results from survey using three-dimensional electrical resistivity tomography (TRE-3D) carried out in 2014, 2016 and 2017, in Morelia Cathedral and along its northern front. The survey identified the location of deep structures which cannot be explained by geological context, suggesting the existence of a variety of subterranean structures of anthropogenic origin. The TRE-3D used in this study combines conventional and unconventional methodologies to offer insights into the distribution of subterranean structures at Morelia Cathedral, in accordance with both oral traditions and documented history.*

KEYWORDS: *Morelia Cathedral, geophysical exploration, three-dimensional electrical resistivity tomography, subterranean structures.*

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Valladolid (actual Morelia) fue fundada en el año 1541, sin embargo no cobró importancia hasta 1580 con el traslado de poderes eclesiásticos de Pátzcuaro a Valladolid (Ramírez-Romero 1985). La catedral actual comenzó a construirse en 1660 y fue terminada en 1744 con un proyecto original de Vicente Barroso; cabe mencionar que existió un primer proyecto que inició su construcción poco antes de la versión actual y que los cimientos de dicha estructura se encuentran en el sitio pero se desconoce su posición exacta (Ramírez-Montes 1987).

De los personajes y documentos descritos por Ramírez-Montes (1987) no existe ningún indicio de la construcción de túneles o drenajes en el subsuelo del edificio actual. Por otro lado, el desarrollo de los componentes interiores sí está bien documentado, ya que en 1897 se renovó completamente el interior del edifi-

cio y resalta el desplazamiento del altar mayor y el coro de los canónigos del centro hacia el ábside. La cripta original de los obispos se encontraba por debajo del altar mayor original y se construyó una nueva, en el proceso de esta remodelación, por debajo del altar actual.

La exploración geofísica con el objetivo de buscar estructuras en profundidad no es nueva. Asociaciones civiles y entidades gubernamentales, como Morelia Patrimonio de la Humanidad A. C. y el Instituto Nacional de Antropología e Historia, entre otros, han participado y solicitado estudios a particulares y especialistas en el tema, como la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En particular, esta última, a través del Instituto de Geofísica y la Facultad de Ingeniería, ha llevado a cabo estudios de *radar de penetración terrestre* (GPR) y *tomografía de resistividad eléctrica tridimensional* (TRE-3D) en 2006 y 2009. Los resultados han sido bastante alentadores, sobre todo en

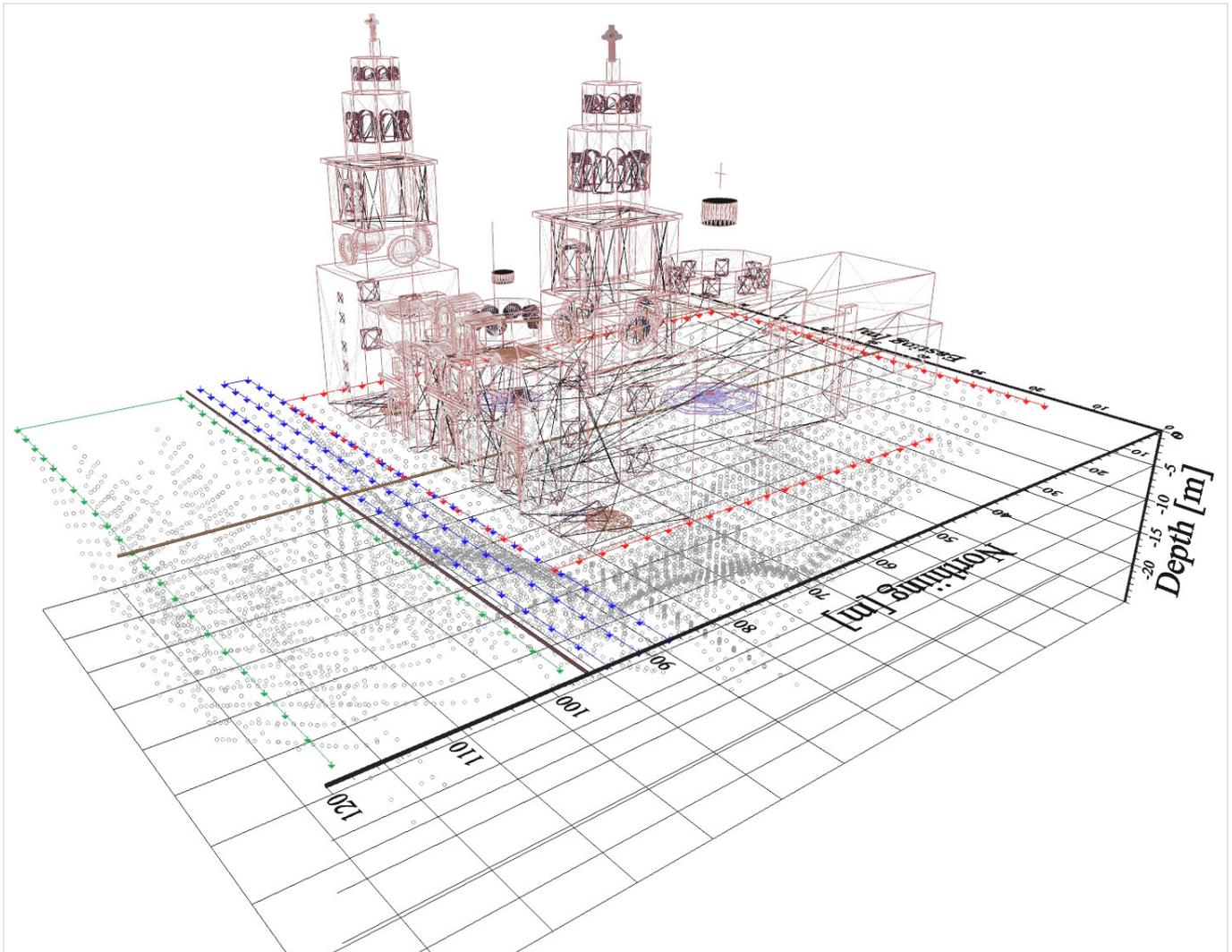


Figura 2. Emplazamiento de los electrodos para los años 2014, 2016 y 2017 (flechas verdes, azules y rojas, respectivamente) y los puntos de atribución de cada medición para la TRE-3D.

2009, donde se localizaron al menos 4 estructuras de interés en cada uno de los costados del edificio de la catedral (Chávez *et al.* 2010). Los estudios TRE-3D que se presentan para los años de 2014, 2016 y 2017 se llevaron a cabo empleando metodologías convencionales de adquisición (2014 y 2016) y no convencionales (2017), este último basado en los arreglos diseñados y analizados por Tejero-Andrade *et al.* (2015).

METODOLOGÍA

La TRE-3D es una técnica de prospección ampliamente usada para explorar el subsuelo con objetivos muy diversos, como geotécnicos, arqueológicos y de recursos naturales, entre otros (Chávez *et al.* 2015; Argote *et al.* 2013). Este método determina la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo, indicando

la capacidad de los materiales para conducir electricidad, de tal forma que, conociendo el comportamiento del parámetro físico de estos y de estructuras geológicas, se puede hacer una interpretación de la imagen obtenida después de un proceso de adquisición e inversión matemática. La propiedad física dependerá en gran medida no solo de su composición química sino también de su tamaño de grano, porosidad y contenido de humedad (Loke 2010). Es muy importante conocer que los valores de resistividad de cada material tienen un rango, de tal forma que usualmente existe traslape de valores y, como consecuencia, hay interpretaciones ambiguas bajo determinadas circunstancias. La adquisición depende de los arreglos de los electrodos que se empleen, existiendo convencionales, con perfiles paralelos de electrodos instalados en superficies libres de obstáculos (Loke y Barker 1996), o no convencionales, diseñados para cuando se tiene un obstáculo como es

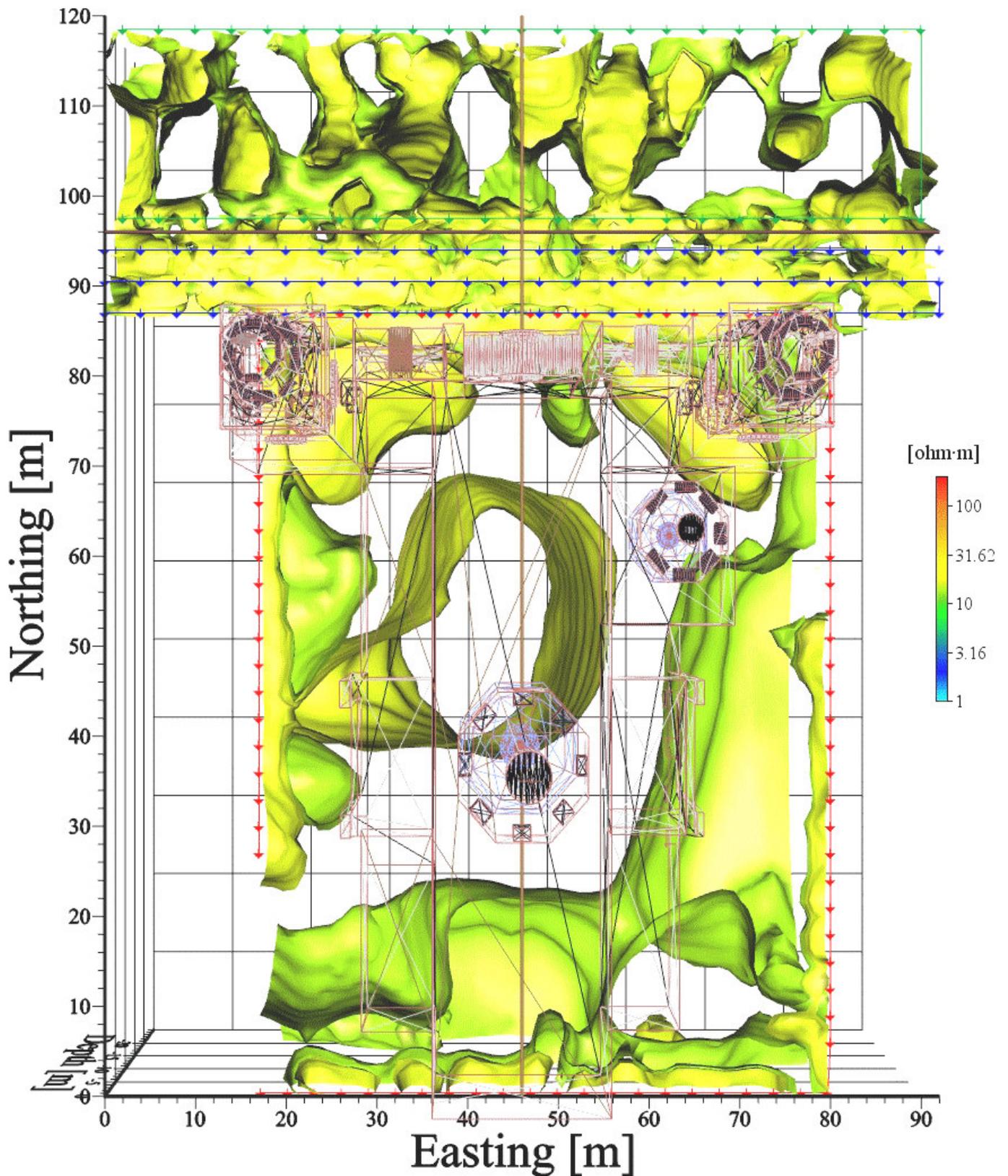


Figura 3. Vista superior de las superficies de isoresistividad de TRE-3D, donde se aprecian las estructuras tubulares del norte en la avenida Madero y el atrio, así como la estructura tubular oeste, la forma de olla central y la cuadrada en el ábside del subsuelo.

el edificio de la Catedral de Morelia (Tejero-Andrade *et al.* 2015). En los estudios realizados en la avenida Madero y el atrio de la Catedral (2014 y 2016) fueron usados arreglos de electrodos convencionales de TRE-

3D, ya que no se presentaban obstáculos que impedirían la instalación de los mismos; en 2017, empleando metodologías no convencionales, se estudió el edificio de la catedral. Las tres etapas se realizaron en la tempo-

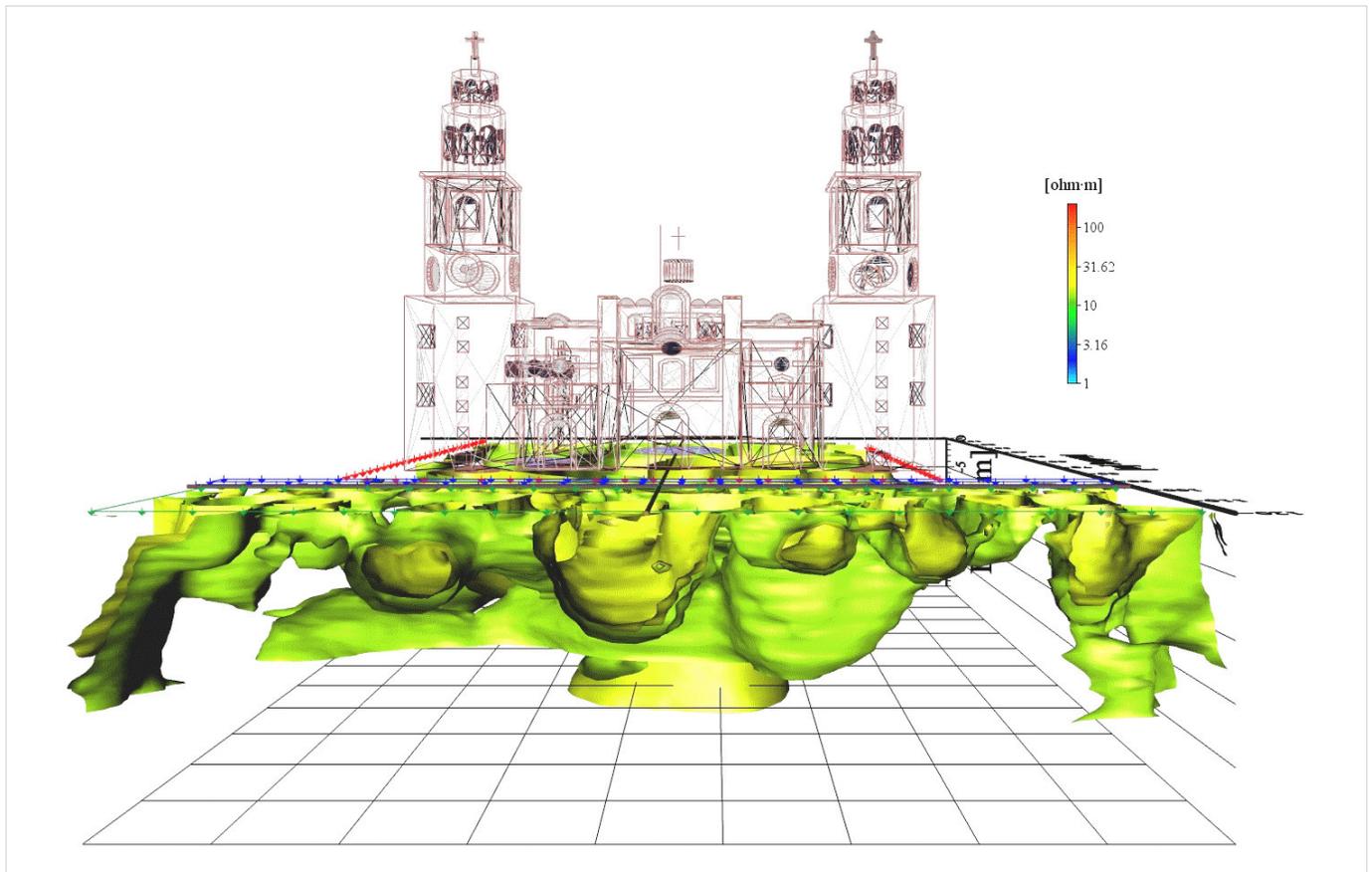


Figura 4. Vista frontal del lado norte, donde las superficies de isoresistividad definen al menos 3 estructuras tubulares con continuidad.

rada de estiaje para la zona de estudio, concretamente en el periodo de diciembre a enero. Los arreglos convencionales empleados fueron Wenner-Schlumberger (WS), ecuatorial (Eq) y mínimo acoplamiento (MA); mientras que los no convencionales fueron los arreglos en L para WS y Centroide desarrollados por Tejero-Andrade *et al.* (2015).

La combinación del uso de todos los arreglos forma un mapeo del subsuelo donde, para cada medición, existe un punto de atribución en profundidad. Para la Catedral de Morelia, la composición de 2014, 2016 y 2017 posee una densidad muy detallada de la información que proporcionará el estudio TRE-3D, teniendo en total 6477 mediciones del subsuelo, cubriendo un volumen en profundidad de 47,797 m³ (fig. 2). Para los arreglos usados, la separación entre electrodos fue de 4 m para 2014 y 2016, mientras que para 2017 fue de 3 m.

RESULTADOS

La imagen de TRE-3D obtenida del subsuelo de la Catedral de Morelia, su atrio y la avenida Madero, re-

presentada a través de una escala de colores falsos, muestra un subsuelo complejo, con un valor de fondo de la resistividad cercano a los 20 [ohm·m], representativo de los materiales geológicos de origen volcánico, ignimbritas principalmente (Garduño-Monroy *et al.* 2001), que componen el subsuelo con cierto grado de humedad por lo bajo de su valor de resistividad. Sin embargo, se pueden diferenciar claramente superficies de isoresistividad que determinan estructuras organizadas, elementos que pueden pertenecer a formas tubulares por un lado y, por el otro, a elementos que corresponden a modificaciones realizadas a la catedral a finales del siglo XIX (fig. 1), descritas por Ramírez-Montes (1987).

En la figura 1, perspectiva noroeste de la anomalía TRE-3D de la catedral, se pueden apreciar, en lo que corresponde a la avenida Madero y el atrio, estructuras tubulares con una dirección preferencial norte-sur que se dirigen hacia la catedral; al menos una de estas, en la porción central, se puede conectar con una estructura similar en el subsuelo del edificio, coincidiendo perfectamente con la puerta central de acceso. Otra estructura tubular se puede apreciar muy bien definida en el

costado oeste del edificio, por debajo del acceso respectivo, cuyo centro está a 10 m de profundidad, donde lo más importante es que tiene continuidad con una estructura mayor en forma de olla, que se aprecia mucho mejor en la figura 3 y que aparenta cubrir toda la altura de la anomalía de TRE-3D. Esta estructura se corresponde muy bien con la cripta original de los obispos, desplazada en 1897 al ábside, donde se observa una estructura cuadrangular que coincide con la posición de la cripta actual, donde incluso se denota el acceso a la superficie, al este de la misma, y una posible conexión hacia el sur que no ha sido posible verificar, pero que algunas personas piensan que es una conexión con el templo de San Agustín, localizado a dos calles de la Catedral de Morelia. Asimismo, parece que la estructura que corresponde a la primera cripta de los obispos solo tiene una estructura de entrada y es la que se mencionó en la parte oeste de la misma (fig. 3).

La parte norte de la catedral, particularmente lo que corresponde a la avenida Madero y el atrio (fig. 4), como se mencionó, muestra al menos tres estructuras tubulares muy bien definidas y que, sobre todo, tienen continuidad. De las tres, la única que presenta en la anomalía de TRE-3D una prolongación hacia el subsuelo de la catedral es la central, las otras dos tienen una desviación que las lleva hacia la estructura central, pareciendo que se unen justo antes de llegar al edificio. Las profundidades del centro de las mismas van de los 5 hasta los 10 m.

DISCUSIÓN

Las anomalías de TRE-3D descritas en los resultados parecen confirmar al menos la existencia de estructuras organizadas que pueden corresponder a túneles por su geometría y continuidad. Se confirma la presencia de al menos 3 estructuras en la porción norte, que parecen unirse y continuar en una sola hacia el subsuelo del edificio, y una cuarta muy bien definida en la parte oeste, comunicada con la estructura en forma de olla. El diámetro de cualquiera de estas estructuras no debe confundirse con las dimensiones reales de lo que se define, por dos motivos: el primero porque la técnica define los contrastes entre materiales en profundidad pero de forma progresiva en todo el rango de valores de resistividad que definen las estructuras; el segundo se debe a la resolución del estudio, la cual tiene que ver con la separación entre los electrodos, que establece la detectabilidad de un objeto y su definición en la ima-

gen final. Por lo tanto, la dimensión real de los objetos seguramente es más pequeña que la imagen que los representa, aunque el valor de la profundidad o localización del centro de la estructura es completamente válido para cualquier cuerpo.

En la estructura en forma de olla y la cuadrada en el ábside del edificio hay que tomar en cuenta un aspecto importante, además de lo que se ha mencionado con respecto a la separación entre electrodos. En ambos casos parecen ser estructuras que abarcan toda la altura de la anomalía. Esto, como lo demostraron Tejero-Andrade *et al.* (2015), es una extrapolación matemática del proceso de inversión debido a la ausencia de puntos de observación por debajo y por encima de la estructura detectada, que es común para los arreglos no convencionales de TRE-3D; sin embargo, la detectabilidad horizontal es muy buena y, por lo tanto, es mejor para localizar estructuras lateralmente.

En el siguiente paso, una vez localizadas estructuras de interés, asociadas no solo a la tradición oral sino además a registros históricos de la construcción y modificaciones de la Catedral de Morelia, debe llevarse a cabo la verificación directa de estas a través de excavaciones arqueológicas, con la certeza en la posición del lugar de búsqueda que nos indicó el resultado de la TRE-3D.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a los alumnos y profesores de Ingeniería Geofísica participantes, de la Facultad de Ingeniería y Licenciatura en Geociencias de la Escuela Nacional de Estudios Superiores-Morelia, ambas de la UNAM, así como a la Asociación Civil Morelia Patrimonio de la Humanidad y la Gerencia del Patrimonio Cultural de la Ciudad de Morelia por su ayuda en el desarrollo de este proyecto. El financiamiento fue aportado con proyectos personales y grupales del Instituto de Geofísica y la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Contacto

GERARDO CIFUENTES-NAVA (gercifue@geofisica.unam.mx).
AVTO GOGUITCHAICHVILI (avto.gogichai@gmail.com).

REFERENCIAS CITADAS

- ARGOTE-ESPINO, D., A. TEJERO-ANDRADE, G. CIFUENTES-NAVA, L. IRIARTE, S. FARIAS, R. E. CHÁVEZ, F. LÓPEZ. 2013. 3D electrical prospection in the archaeological site of El Pahñú, Hidalgo State, Central Mexico. *Journal of Archaeological Science* 40/2: 1213-1223.¹
- CHÁVEZ, R. E., A. TEJERO, G. CIFUENTES, E. HERNÁNDEZ. 2010. *Localización de túneles en los alrededores de la Catedral de Morelia mediante el método de tomografía eléctrica*. Instituto de Geofísica, UNAM (inédito).
- CHÁVEZ, R. E., A. TEJERO, G. CIFUENTES, E. HERNÁNDEZ, D. AGUILAR. 2015. Imaging Fractures beneath a Residential Complex Using Novel 3-D Electrical Resistivity Arrays. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 20/3: 219-233.²
- GARDUÑO-MONROY, V. H., E. ARREYGUE-ROCHA, I. ISRADE-ALCÁNTARA, G. M. RODRÍGUEZ-TORRES. 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 18/1: 37-54.
- LOKE, M. H. 2010. *2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Tutorial. <http://www.geotomosoft.com/>.
- LOKE, M. H., R. D. BARKER. 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting* 44/3: 499-523.
- RAMÍREZ-MONTES, G. 1987. *La escuadra y el cincel: documentos sobre la construcción de la Catedral de Morelia*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- RAMÍREZ-ROMERO, E. 1985. *Morelia en el espacio y en el tiempo*. Morelia: Gobierno del Estado de Michoacán.
- TEJERO-ANDRADE, A., G. CIFUENTES, R. E. CHÁVEZ, A. E. LÓPEZ-GONZÁLEZ, C. DELGADO-SOLÓRZANO. 2015. L and CORNER arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative in urban zones. *Near Surface Geophysics* 13/4: 355-367.³

¹ <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440312003858>.

² <https://doi.org/10.2113/JEEG20.3.219>.

³ <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2015015>.