

Estudio Geofísico para la localización de túneles de época colonial en los alrededores de la Catedral de Morelia (Estado de Michoacán, México)

(Nº Proyecto AL10-PID-12)

Responsable del proyecto: **Mª Encarnación Cámara Moral**

Coordinador del proyecto en la Universidad Latinoamericana: **René E. Chávez Segura**
Universidad Nacional Autónoma de México (Instituto de Geofísica)

I.- Introducción

Este proyecto forma parte del programa de investigación “Aplicación de métodos geofísicos para interpretar estructuras superficiales” financiado por la Universidad Nacional Autónoma de México, a través del proyecto: “Monitoreo de zonas de riesgo mediante métodos geofísicos” (PAPIIT–IN1117408) y cofinanciado por la Universidad Politécnica de Madrid hasta el año 2007, mediante los proyectos: AL98-0510-2.21, AL99-0510-2.23, AL00-0510-2.17, AL2001-0510-2.30, AL2002-0510-2.26, AL2003-0510-2.34, AL2004-0510-2.27, AL2005-AC_0007, AL06_EX_AC_008, AL07-PAC-016.

A través de documentación bibliográfica y oral se conoce la existencia, de túneles construidos durante los siglos XVI y XVII, en el entorno de la Catedral de la Ciudad de Morelia. Las autoridades locales tienen interés en conocer la ubicación y trayectoria de estas estructuras, tanto desde un punto de vista histórico, turístico y de riesgo para los edificios que se encuentren sobre las mismas.

La realización de este proyecto permitirá determinar la existencia o no de estos túneles; para lo cual, se llevará a cabo un proceso de medición sobre el terreno empleando varios métodos de prospección geofísica. En particular, se realizará un estudio de tomografía eléctrica y otro mediante radar de penetración terrestre (GPR). Con el método eléctrico, se emplearán dos tipos de dispositivos: el capacitivo (de contacto), y el galvánico (los electrodos están enterrados en el suelo). El primero se utiliza para estudios someros (profundidades menores de 8 m) y sobretodo por la imposibilidad de alterar el contexto del área de trabajo. El segundo tiene una profundidad de investigación mayor (hasta 20 m). Para el método de GPR se empleará un levantamiento sobre las líneas prospectadas con el método geoelectrico. Mediante una tomografía eléctrica 3D se determinará el estado actual de la cimentación de la Catedral.

Una vez realizadas las medidas, se procesarán los datos realizando inicialmente un filtrado para eliminar ruido y finalmente se llegará a un modelo conceptual del área estudiada; se interpretarán los resultados obtenidos para posteriormente, realizar la

cartografía de la zona de estudio, que reflejará las zonas anómalas relacionadas con las estructuras buscadas.

II.- Descripción detallada del proyecto

II.1.-Antecedentes

La ciudad de Morelia (Antigua Valladolid) fue declarada por la UNESCO *Ciudad Patrimonio de la Humanidad*. La restauración de la zona centro de la ciudad ha puesto de manifiesto la enorme riqueza cultural que se ve reflejada en sus edificios construidos entre los siglos XVI y XVII. Por otro lado, las tradiciones orales de la población y algunas evidencias encontradas en el Palacio de Gobierno, frente a la Catedral, y en la Casa de Cultura dejan entrever la existencia de túneles construidos por debajo del centro de la ciudad y que comunicarían los principales edificios, entre ellos la Catedral. En particular se conoce la existencia de un túnel en dirección a la Iglesia de San José proveniente de la Casa de Cultura.

La localización de estas estructuras significaría un hallazgo importante dentro del acervo cultural de esta ciudad, además se podrá evaluar el riesgo de hundimiento que pueda suponer para los edificios que se encuentren sobre las mismas. Desde el punto de vista cultural, los túneles podrán ser expuestos parcialmente y convertirse en un atractivo turístico más de esta ciudad.



II.2.- Actividades previstas

Para la realización del estudio de resistividad eléctrica se utilizará un equipo por acoplamiento capacitivo modelo Ohm-Mapper (Geometrics). Además se utilizará el método galvánico en los perfiles seleccionados empleando un dispositivo tetrapolar en su modalidad de Dipolo-Dipolo con un equipo *SySCAL-Pro* (Iris Instruments) de 48

canales, ambos propiedad del Instituto de Geofísica de la UNAM. Inicialmente se plantea la realización de 10 perfiles de tomografía eléctrica.



Dada la influencia que tiene el dispositivo de medida de los equipos de resistividad en la calidad de los resultados, y su dependencia de las características geoelectricas del conjunto antrópico-geológico, se plantea la necesidad de realizar una inspección previa por parte de investigadores de la UNAM y de la UPM para la optimización de los dispositivos de medida.

En el estudio con el método GPR, se utilizará un equipo modelo SIR-3000 (GSSI). La frecuencia que se elegirá para la antena será determinada a partir de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas durante la primera visita al sitio de estudio.

Como parte del programa de colaboración establecido, se interpretaran los resultados obtenidos utilizando, además de los paquetes informáticos comerciales de mayor implantación científica (RES2DINV, GRADIX,...), distintos procesos de interpretación desarrollados por los grupos de investigación de la UPM y de la UNAM, que participan en este proyecto.

Tanto en los procesos de medición como en la fase de interpretación, se trabajará conjuntamente con el grupo de investigación de la UNAM en México.

III.- Participantes en el proyecto

Universidad Politécnica de Madrid

- ❖ Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
 - **M^a Encarnación Cámara Moral** (Responsable del proyecto). Profesora Titular de Universidad.
- ❖ Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas
GI “Métodos No Destructivos de Caracterización de Materiales, Medios Geológicos y Estructuras”:
 - **Jesús Díaz Curiel**. Profesor Titular de Universidad.
 - **Bárbara Biosca Valiente**. Ingeniero de Minas. Investigador Contratado.
 - **Lucía Arévalo Lomas**. Ingeniero Geólogo. Becario de Investigación de la UPM.

Universidad Nacional Autónoma de México

- ❖ Instituto de Geofísica
 - **René E. Chávez Segura** (Responsable del proyecto en la Universidad LA). Jefe del Departamento de Exploración y Geomagnetismo. Investigador Titular.
 - **Gerardo Cifuentes Nava**. Técnico Titular.
 - **Esteban Hernández Quintero**. Técnico Titular.
- ❖ Facultad de Ingeniería
 - **Andrés Tejero Andrade**. Profesor Titular.

IV.- Cronograma de trabajo

Las actividades descritas anteriormente se desarrollarán siguiendo el siguiente programa de trabajo:

Fase I (Semestre 1º):

- Primer Trimestre: Inspección previa y realización de medidas de Tomografía Eléctrica y GPR a lo largo de los perfiles seleccionados.
- Segundo Trimestre: Inicio de la interpretación de los datos de Tomografía eléctrica y GPR.

Fase II (Semestre 2º):

- Tercer Trimestre: Comparación y correlación de los modelos obtenidos con ambos métodos y la obtención de un mapa de localización de los túneles.
- Cuarto Trimestre: Elaboración del informe del proyecto e inicio de la redacción de un artículo científico con los resultados obtenidos.

V.- Estudio Geofísico realizado

El levantamiento geofísico se diseñó de manera que se cubrieran los cuatro costados del edificio de la Catedral, tanto en su interior, como en el atrio.

Los resultados obtenidos han sido altamente satisfactorios. En este momento se están preparando una serie de publicaciones en las que se recoge el estudio realizado y los resultados obtenidos. Por este motivo, no se adelanta ningún resultado en esta página. Sin embargo, sí que se presentan algunas conclusiones derivadas del estudio geofísico realizado.

VI.- Conclusiones

- El estudio somero realizado con el método capacitivo, ha permitido definir las condiciones del subsuelo a unos 5 m de profundidad. Se logró establecer que la unidad resistiva sobre la que está parcialmente cimentada la Catedral corresponden a sedimentos piroclásticos que pertenecen a la formación *Alegría* (Arreygue-Rocha et al., 2002). Se puede observar en este horizonte que el grado de humedad se incrementa con la profundidad. El límite de saturación puede variar dependiendo de la estación. En época de lluvias el grado de humedad sobre el edificio de la Catedral puede aumentar, poniendo en riesgo la propia construcción. También se interpretaron algunas anomalías de alta resistividad, algunas con formas alargadas, que corresponden al material de relleno y a tuberías.
- El método galvánico empleado se realizó en dos modalidades, modo 2D y modo 3D. El primero consistió en tres perfiles en donde se modeló la distribución lateral y a profundidad de la resistividad del subsuelo hasta los 20 m. Se observó de manera general un estrato de material de relleno de resistividad intermedia, que corresponde a una secuencia piroclástica conocida como ignimbrita (Cantera de Morelia). En el perfil N se observaron anomalías que se asocian a trabajos de mantenimiento desarrollados hacia la puerta principal NE debido a un hundimiento (~5 m).
- El método 3D para TRE fue más contundente y resolutivo. Los resultados proporcionaron información útil sobre el estado de los cimientos de la Catedral y pusieron de evidencia la existencia de túneles en los alrededores de dicha estructura, así como también de otros rasgos muy interesantes que ayudarán a describir en un futuro la evolución constructiva de la Catedral. El diseño de este experimento permitió cubrir hasta una profundidad de aproximadamente 20 m con un total de 2.480 observaciones.
- Se detectaron cuatro anomalías que poseen una geometría muy regular. Esta geometría hace pensar que sean estructuras hechas por la mano del hombre, indicando la presencia de túneles. Cabe mencionar que estos cuerpos se encuentran en los cuatro costados de la Catedral. Estas estructuras se encuentran por debajo de la cimentación de la Catedral, aunque no sería posible afirmar si fueron construidas antes o después de la cimentación del edificio.

- Se han encontrado también, varias anomalías que son muy interesantes, entre ellas la generada por la llamada Cripta de los Obispos, que aparece claramente en las imágenes 3D.

Por último, es importante mencionar que el estudio de Tomografía 3D realizado en la Catedral de Morelia es el primero de tal envergadura que se realiza en México, tomando en cuenta las dimensiones del edificio estudiado

VII.- Agradecimientos

Es importante mencionar en esta sección la valiosa colaboración de algunos estudiantes del posgrado en Ciencias de la Tierra y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México que participaron en este proyecto.

Se agradece también el apoyo prestado por parte de los miembros de la Asociación Morelia Patrimonio de la Humanidad, para la obtención de permisos y la asistencia prestada en la logística de campo.

Igualmente se extiende el agradecimiento a las autoridades de Transito y Protección Civil municipales, que proporcionaron un gran servicio durante el cierre de algunas calles y, protegieron parte del equipo, en la fase de adquisición de datos, en las calles con fuerte tráfico.