

# EMPLEO DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA PROSPECCIÓN ARQUEOLÓGICA URBANA: LA BASÍLICA DE NUESTRA SEÑORA DE LA SALUD, PATZCUARO, MÉXICO

## *GEOPHYSICAL METHODS EMPLOYED IN URBAN ARCHAEOLOGICAL PROSPECTING: THE BASILICA DE NUESTRA SEÑORA DE LA SALUD, PATZCUARO, MEXICO*

ROCÍO PONCE (\*)  
DENISSE ARGOTE (\*)  
RENÉ E. CHÁVEZ (\*)  
M.<sup>a</sup> ENCARNACIÓN CÁMARA (\*\*)

### RESUMEN

El objetivo de este estudio es la localización de los restos de la construcción de una antigua nave anexa al edificio principal de la actual iglesia de Nuestra Señora de la Salud construida a mediados del siglo XVI en la ciudad de Patzcuaro, Michoacán.

Se aplicaron dos métodos de prospección geofísica: el magnético, en la modalidad de gradiente vertical, y el denominado Radar de Penetración Terrestre (GPR).

Las imágenes de GPR definieron un reflector, cuya profundidad fluctuó entre 1,4 m y 2,2 m de profundidad, con una dirección NE-SW, formando un ángulo aproximado de 45° con relación al norte geográfico.

Los datos magnéticos confirmaron la presencia de las estructuras definidas por el GPR, y además se pudo advertir, mediante un análisis de filtrado, la presencia de un patrón de anomalías que podrían relacionarse con vestigios prehispánicos, más antiguos que los posibles restos de la nave anexa a la catedral.

### ABSTRACT

*The purpose of this investigation is to locate the foundations of an ancient nave annex to the main building of*

*today's Basilica of Nuestra Señora de la Salud built in the middle of the XVI century, situated in the City of Patzcuaro, Michoacán. A series of Vertical Magnetic Field and Ground Penetrating Radar profiles were carried out. These included 20 equidistant GPR profiles in the interior of the church's atrium. Also, 16 vertical magnetic gradient profiles were surveyed, with a station separation of 0.4 m, and profiles 0.8 m apart. GPR images defined a reflector, whose depth varied between 1.4 m and 2.2 m beneath the atrium's floor, with a NE-SW direction making an angle of 45°, approximately related to the geographic north. Magnetic results confirmed the presence of some structures defined by the GPR, but also the presence of an anomalous pattern of rectangular shape could be observed, after a filtering process was applied. These structures could be related to ancient pre-Hispanic remains, older than the church's foundations of the expected wing.*

**Palabras clave:** Estudio urbano. Prospección geofísica. Radar de penetración terrestre. Gradiente magnético. Imagen. Época colonial. Anomalía magnética.

**Key words:** Urban study. Geophysical exploration. GPR. Magnetic gradient. Image. Colonial time. Magnetic anomaly.

### INTRODUCCIÓN

Hasta mediados del siglo pasado, aproximadamente, la excavación era la única herramienta con que contaba el arqueólogo para la localización de estructuras arqueológicas enterradas. Es en 1946

(\*) Dpto. De Exploración, Instituto de Geofísica, UNAM. Cd. Universitaria, Circuito Exterior s/n, 04510 México D. F. Correo electrónico: rocioponcelo@yahoo.com, dplopez@avantel.net, exprene@tonatiuh.igeofcu.unam.mx

(\*\*) Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Gutiérrez Abascal 2. Madrid, España. Correo electrónico: ecamara@faii.etsii.upm.es

Recibido: 2-VII-03; aceptado: 9-I-04.

cuando Atkinson, en Inglaterra, y H. De Terra, en México, realizan los primeros ensayos de medidas en superficie (Hesse 1966). Sin embargo, es una decena de años más tarde cuando los métodos geofísicos adquieren un nuevo desarrollo en los laboratorios de varios países europeos. Los métodos más utilizados eran el método eléctrico y el método magnético.

En España, aunque se había realizado con anterioridad algún estudio aislado, principalmente por equipos extranjeros, es a partir de 1983 cuando aparece un gran interés por la aplicación de la geofísica en la arqueología. Por una parte, surge la inquietud entre algunos geofísicos de adecuar los métodos convencionales de prospección para aplicarlos a estas investigaciones a pequeña escala, es decir, estructuras enterradas a poca profundidad y de pequeñas dimensiones. Por otra parte, y a la vista de los resultados obtenidos por los geofísicos, son muchos los arqueólogos que solicitan la realización de estudios geofísicos en sus yacimientos a fin de rentabilizar su tiempo y dinero, pues pueden dirigir desde el primer momento la excavación a las zonas de interés detectadas por los geofísicos. Durante la década de los 80 se realizaron estudios tanto en yacimientos situados en campo abierto, como en zonas urbanas y en el interior de edificios (Cámara 1989).

En la literatura científica no aparecen documentados demasiados estudios realizados en el interior o en los alrededores de centros religiosos. Sin embargo, puede mencionarse el trabajo realizado por Blizkovski (1979). El, realiza un levantamiento de microgravimetría en el interior de la iglesia de San Venceslas (Checoslovaquia). El mapa de anomalías de microgravedad muestran la existencia de una cripta conectada por un corredor bajo el suelo de esta iglesia. En 1988 se realizó en el interior de la Sinagoga del Tránsito (Toledo, España) un estudio geofísico mediante el método eléctrico en su modalidad de calicata eléctrica. El resultado del estudio puso en evidencia la presencia de estructuras arqueológicas en el subsuelo de la Gran Sala de la Sinagoga (*Museo Sefardi*, Ministerio de Cultura de España 1995). También existen estudios sobre localización de murallas romanas en algunas ciudades europeas utilizando distintos métodos de prospección (Scollar 1986; Hernández *et al.* 1988).

En México se ha empezado recientemente la aplicación de los métodos geofísicos en arqueología. Se realizaron estudios para la localización

de túneles ceremoniales en la pirámide de la Luna (Arzate *et al.* 1990) y en la pirámide del Sol (Chávez *et al.* 2001) en donde se utilizaron los métodos: magnético, eléctrico y de radar de penetración terrestre. Igualmente se han hecho estudios geofísicos en zonas cerradas, como es el caso del Templo Mayor de la Ciudad de México (Barba *et al.* 1997)

Mediante la aplicación de métodos geofísicos en arqueología es posible localizar estructuras siempre y cuando el contraste en alguna magnitud física (resistividad eléctrica, susceptibilidad magnética,...) entre la estructura y el medio sea lo suficientemente grande como para poder ser medida, al igual que sucede en cualquier otra investigación geofísica. A pesar de ello, en algunas ocasiones, el llevar a cabo una investigación de este tipo no implica la consecución de un alto rendimiento de la misma. Por ejemplo, si el yacimiento está en zona urbana.

Este tipo de yacimientos presenta una serie de limitaciones a la hora de llevar a cabo la investigación geofísica, como son: el trazado urbanístico de la zona, que influye en la elección de la dirección y el tamaño de los perfiles; la red subterránea de alcantarillado, que puede enmascarar la anomalía producida por estructuras de interés e incluso impedir la realización de medidas; o la existencia de tendidos eléctricos, que condiciona la elección del método geofísico a utilizar. Otra limitación de los estudios geofísicos realizados en zona urbana o en el interior de edificios, si el método que permite obtener un mayor rendimiento en la investigación es el método eléctrico, es la imposibilidad de introducir los electrodos convencionales en el terreno. Una posibilidad para superar este problema es utilizar, por ejemplo, *electrodos blandos* (Cámara 1989), que se sitúan directamente en la superficie sin necesidad de perforarla.

Debido a la problemática que encierra este tipo de yacimientos, su investigación presenta un mayor interés para los geofísicos por los retos que se deben superar tanto en la fase de medición como en la de interpretación. En el presente artículo se recoge el estudio realizado en una zona urbana, en la ciudad de Pátzcuaro del estado de Michoacán en México (Fig. 1).

El área de investigación se localiza en el atrio del costado sur de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud, ubicada al oeste de la ciudad de Pátzcuaro. Este edificio ha tenido gran importancia social, cultural, religiosa e histórica para la población an-

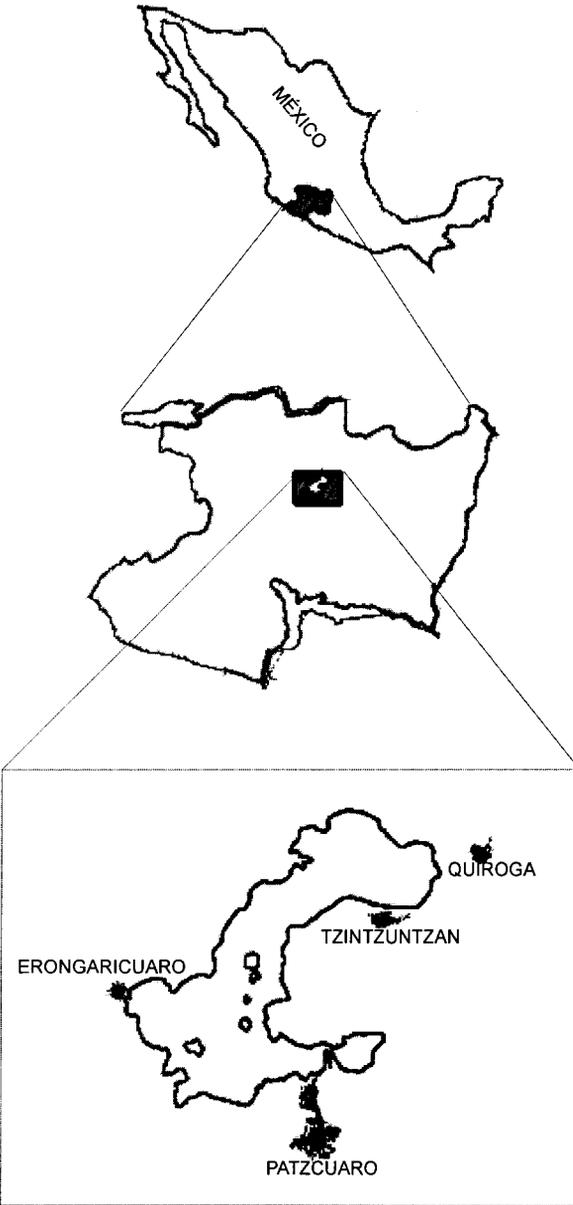


Fig. 1. Localización del área de estudio. Se muestra la región del Lago de Patzcuaro (abajo), en el Estado de Michoacán. Se destacan por su importancia Patzcuaro, Ihuatzio, y Tzintzuntzan como los principales centros religiosos en época prehispánica.

figura y moderna. Su diseño, desde el punto de vista arquitectónico y de la visión religiosa de la época, representa una innovación como se puede deducir al observar la figura 2. El objetivo de la investigación geofísica era la localización, bajo la basílica actual, de los restos de la catedral que mandó construir Vasco de Quiroga en 1540.

ASPECTOS HISTÓRICOS

En Pátzcuaro se han llevado a cabo trabajos principalmente de tipo histórico, con bases documentales que han sugerido la existencia de los cimientos de cuatro naves anexas a la nave central de la actual basílica, formando una planta pentagonal (Ramírez 1986). Según reconstrucciones hechas a partir de documentos históricos (ver Fig. 2), se dedujo que la planta original, atribuida a Vasco de Quiroga, tenía “figura de mano” (Ramírez 1986) extendida, cuyos dedos representaban cada una de las naves; sin embargo, no se tenían evidencias físicas de que los muros de las otras cuatro naves se hubieran levantado realmente. Con el fin de comprobar la existencia de estos cimientos, surge la idea de utilizar métodos geofísicos de prospección que proporcionen la información necesaria para ello (Toussaint 1942; Ponce 2003).

La importancia de esta iglesia, calificada un caso excepcional, radica tanto en su original planta como en las soluciones constructivas aplicadas. Posiblemente inspirado en las ideas de grandes humanistas de la época como Tomás Moro, entre otros, Quiroga concibió este singular diseño para la construcción de la sede catedralicia. Quiroga llevó a la práctica las ideas del libro de “Utopía”, escrito por Moro, buscando separar a las distintas comunidades que componían la población de Pátzcuaro por barrios, sexos y edades dentro del templo, lugar donde convergían todos los sectores de la sociedad

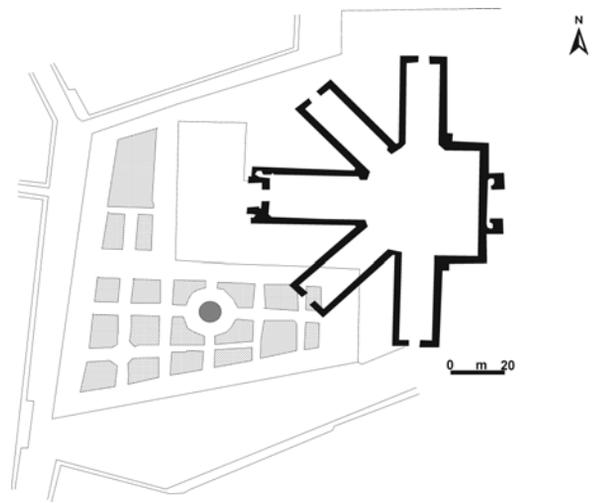


Fig. 2. Plano original de la Basílica (Modificado de Chanfón 1994). Se ha superpuesto el plano original sobre el jardín y calles actuales.

indígena y española. Los asistentes estarían congregados en un solo lugar pero sin mezclarse, de tal manera que tendrían una clara visión de las celebraciones y, a la vez, el sacerdote mantendría un buen control sobre los feligreses (Ramírez 1986). Sin embargo, la incomprensión, tanto de la funcionalidad como de las soluciones y las técnicas constructivas de esta obra, causó malestar entre las autoridades civiles y eclesiásticas quienes promovieron su cancelación y la mudanza de la sede catedralicia a otra ciudad. Hasta la fecha permanecen como incógnitas los avances logrados durante los casi 30 años de construcción -1540 a 1570-, ya que el proyecto quedó inconcluso debido, en parte, a los problemas con las autoridades, al traslado de sede y al abandono que sufrió después de la muerte del obispo Vasco de Quiroga. La única nave techada fue la central, la cual funcionó como catedral dedicada a San Salvador sólo durante seis años. Después de ese tiempo, a instancia de la mayoría de la población española, la sede se trasladó a otra ciudad; con el transcurso de los años, la piedra de los muros que conformaban las cuatro naves restantes fue reutilizada en otras construcciones, razón por la cual desaparecieron totalmente y su existencia, forma y dimensiones quedaron en el olvido. La iglesia actual, erigida basílica a partir del año 1924, consta de una sola nave que correspondería a la nave central del proyecto original.

## DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La ciudad de Pátzcuaro se localiza en las coordenadas geográficas 19°30' N, 101°36' W, a una altura aproximada de 2140 metros sobre el nivel del mar. Se encuentra al sur del lago y a 64 km al este de Morelia, capital de Michoacán. Es un sitio que ha contenido tanto asentamientos de origen prehispánico, principalmente del período Posclásico (1200-1524 d.C.), e históricos como modernos. Ha sido sede de los poderes cívico y religioso desde la época prehispánica y durante el virreinato español. Muchos investigadores han sugerido la recuperación de los vestigios arqueológicos e históricos por medio de métodos que no destruyan el contexto histórico, pero que permitan evaluar y definir sitios precisos de excavación.

La ciudad de Pátzcuaro esta dentro de una región lacustre conformada por una cuenca cerrada, que forma parte del sistema de cuencas lacustres elevadas dentro del Sistema Volcánico Transversal



Lám. I. Imagen de la actual Basílica de Nuestra Señora de la Salud. Nótese la estructura actual y compárese con el plano de la figura 2.

Mexicano. La región pertenece a una zona de continua actividad sísmica y volcánica. Está rodeada de un sistema montañoso de origen ígneo que forman las sierras de Santa Clara y Tingambato al Sur, la de Pátzcuaro y la Comanja al Oeste, y Tzirate al Norte (Macías 1978).

La gran actividad sísmica de la región ha afectado continuamente la historia constructiva de esta iglesia, teniendo que ser restaurada y reconstruida en múltiples ocasiones, principalmente en el siglo XIX (Chanfón 1994). La iglesia actual (Lám. I) tiene una nave rectangular de orientación E-W, cuya fachada principal se encuentra hacia el W, con ábside semicircular. La sacristía, notaría parroquial y cuartos anexos están acoplados en el costado sur del presbiterio. Al frente y en el costado sur se desplazan el atrio y la plaza. El atrio está limitado por celosía de ladrillo interrumpida por pilares de cantera rematados con perillones y candiles de hierro forjado. En el costado sur (Lám. II) se encuentra la portada del atrio con rejas de hierro forjado estilo Art Nouveau a eje con la portada lateral, de grandes dimensiones, del templo. En este costado se aprecian las características constructivas de la basílica como los gruesos muros de mampostería de más de 2 m de espesor (los muros de la iglesia presentan un ancho que varía de los 2.30 a los 2.80, excepto en el presbiterio con muros de 1.80 m de ancho).

Hacia el este del atrio se encuentra el edificio por el cual se accede a la notaría y oficinas parroquiales; su frente lo conforma un espacio semiabierto con cuatro columnas dóricas de madera (Lám. II). En este espacio sur de la basílica se realizaron los



Lám. II. Imagen fotográfica de la zona de levantamiento geofísico. Obsérvese hacia el norte la pared sur de la Basílica, hacia el este las oficinas parroquiales y hacia el sur puede verse la sombra de las rejas que separan la propiedad de la iglesia con los jardines de la municipalidad.

trabajos de prospección geofísica. Es un área libre de obstáculos y coincide con la ubicación de una las naves en dirección diagonal, de acuerdo a los documentos históricos consultados.

Chanfon (1994) reporta que los cimientos de la iglesia estaban construidos sobre suelo rocoso (basaltos) muy compactado propio de la ladera y sobre una plataforma artificial (de origen prehispánico) formada por sedimentos consolidados y reforzada con restos de los edificios prehispánicos. Los muros y cimientos, construidos con técnicas indígenas, estaban hechos de mampostería con paramentos de cantería semilabrada muy regular con juntas uniformes y mortero de cal (Ramírez Romero 1986). Las naves se construyeron con diferente anchura siendo la central, de casi 22 m, la más ancha; las dos naves diagonales medirían 13 m de ancho y 10 m

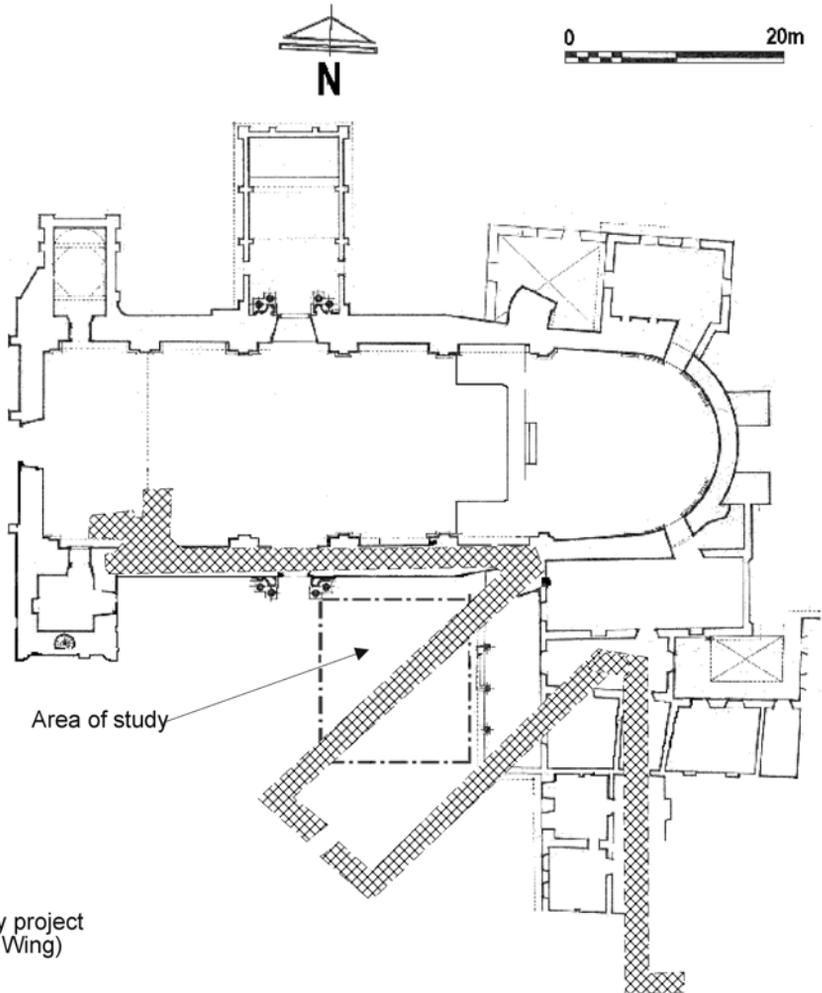


Fig. 3. Plano arquitectónico de la iglesia actual (línea continua) y posición probable de las paredes de la nave SW (línea discontinua). Obsérvese el grosor de los muros de la iglesia actual.

las dos perpendiculares (ver Fig. 2). La cubierta de las naves y la bóveda de la iglesia se construirían de madera, y sobre la entrada principal del templo se levantaría una torre (Toussaint 1981).

Estos testimonios son de gran utilidad en la planificación del estudio geofísico. A partir de esta información se eligieron los métodos que pueden proporcionar mejores resultados, además de diseñar la logística del levantamiento: la distancia entre lecturas, la distancia entre perfiles, la dirección que deben tener éstos, etc.

## ESTUDIO GEOFÍSICO

Se seleccionó un área de 16 x 15 m dentro del mencionado espacio abierto. Esta zona que se encuentra hacia el costado sur de la Basílica, posee un piso muy plano de laja de cantera (Lám. II y Fig. 3). Tomando en cuenta lo discutido en la sección anterior, se consideró que los métodos más óptimos eran: el método magnético, en su modalidad de gradiente vertical con el fin de eliminar las variaciones temporales del campo magnético así como señales de alta frecuencia o ruido cultural producido por la gran cantidad de objetos metálicos y campos eléctricos espurios y, el método electromagnético de radar de penetración terrestre (GPR).

Para el levantamiento de datos magnéticos se utilizó un magnetómetro SCINTREX, modelo ENVIMAG, en modo de gradiente. La altura al sensor inferior fue de 1 m y la separación entre sensores de 1 m. Se llevaron a cabo 18 perfiles de dirección E-W separados entre sí 0,8 m. La distancia entre lecturas fue de 0,4 m. Las dimensiones de la estructura a localizar determinó la elección de las distancias entre perfiles y entre estaciones. Como el objetivo del estudio era comprobar la posible existencia de la pared de una de las naves de la Basílica, no era necesario realizar una toma exhaustiva de datos, lo cual hubiera incrementado el tiempo de medición, con el correspondiente aumento económico del trabajo.

Para el levantamiento mediante radar, se utilizó un equipo SIR 2000 con antena de 200 Mhz en modo mono-estático y blindada para permitir que la energía electromagnética penetre en su totalidad en el subsuelo, evitando pérdidas. Se tomaron datos continuos a lo largo de 20 líneas con orientación E-W de 15 m de longitud y una separación de 0,8 m entre cada línea. La ventana de tiempo de observación fue inicialmente dispuesta para observar

200 ns, aunque posteriormente fue modificada a 100 ns.

Se llevaron a cabo una serie de experimentos para estimar la permitividad eléctrica relativa, encontrándose un valor de 15. Estos estudios previos se hicieron en un área en donde se sabía exactamente la posición y profundidad de un antiguo desagüe. Se hicieron varias líneas de prueba para estimar la velocidad de las ondas electromagnéticas y posteriormente obtener la constante. Este valor se utilizó para convertir las señales obtenidas en función del tiempo, en términos de profundidad.

## Procesamiento de los datos magnéticos

Las observaciones de gradiente magnético vertical se muestran en la Fig. 4. Como puede observarse, se obtiene un mapa del gradiente vertical muy suave, debido a que la disposición de los sensores es tal, que atenúa las anomalías magnéticas asociadas con estructuras superficiales, actuando como un filtro.

En esta figura se observa que hacia el W del área de estudio el campo medido parece ser muy suave y no existen rasgos de gran interés, probablemente debido a que hay material de relleno con idénticas características magnéticas. Sin embargo, hacia

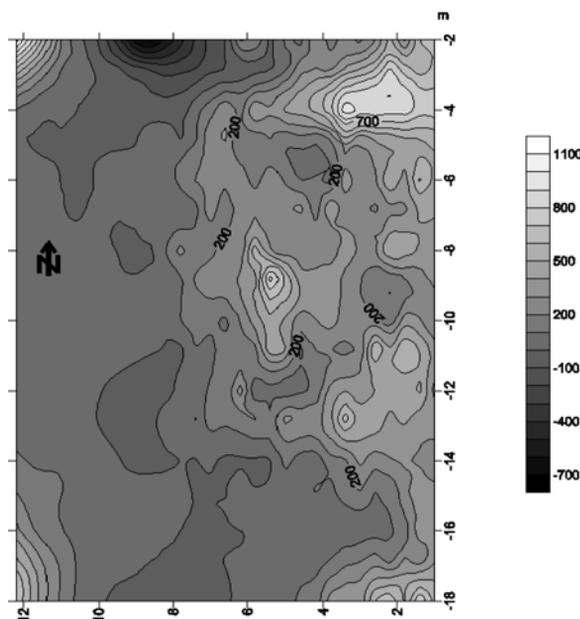


Fig. 4. Mapa de gradiente vertical magnético. En tonos claros se muestra el valor más alto del gradiente y en oscuro el más bajo. Obsérvese el patrón de anomalías hacia el NE del mapa.

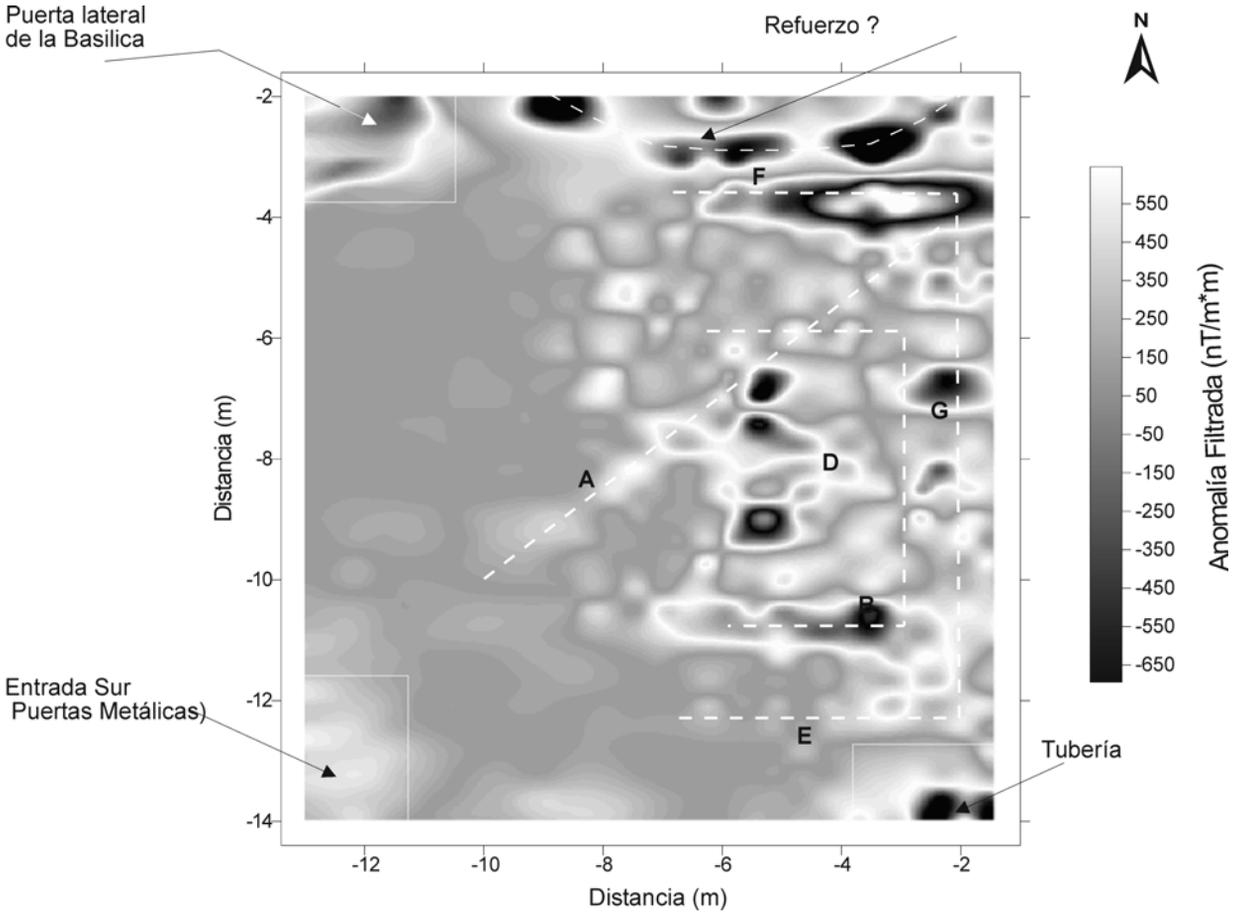


Fig. 5. Mapa filtrado del gradiente vertical magnético. Se ha aplicado un filtro direccional (S-N) que intenta realzar las anomalías de mayor interés. Las principales anomalías se describen con letras (ver texto para su explicación).

el E aparece una serie de anomalías que siguen un patrón geométrico muy singular. Éste presenta una forma rectangular, en cuyo interior existen anomalías magnéticas de mayor intensidad. Para definir mejor la tendencia de estas anomalías, se aplicó un filtro direccional con orientación hacia el norte magnético. Este filtro fue capaz de realzar los rasgos geométricos de los materiales del subsuelo.

La Figura 5 muestra de manera más clara los rasgos de interés, los cuales han sido especificados con líneas punteadas y letras. Se observa principalmente una serie de anomalías de forma rectangular hacia la parte E del mapa (letra B). Posteriormente, se aplicó a la imagen un filtro en el dominio del espacio para la detección de bordes en todas sus direcciones, de forma que realzara los contornos de las anomalías más importantes y atenuará el resto de la información. Además se aplicó un filtro de

dilatación, el cual aumenta las proporciones de los bordes, haciéndolos más visibles.

Los filtros de detección de bordes enfatizan las áreas de contraste y los contornos de una imagen al oscurecer ésta después de iluminar los bordes (Jensen 1986). Para obtener contornos oscuros en un fondo blanco, ya sea por propósitos de visualización o impresión, se obtiene un negativo de la imagen anterior. El filtro de dilatación es un filtro morfológico que expande los elementos no blancos de una imagen; es decir, produce un crecimiento uniforme de los objetos de la imagen en su extensión espacial (Lira 2002). Con este procedimiento, anomalías magnéticas suaves pueden ser expuestas. Matemáticamente, la dilatación se define como

$$X \oplus B = \{x \mid B_x \cap X \neq \emptyset\}$$

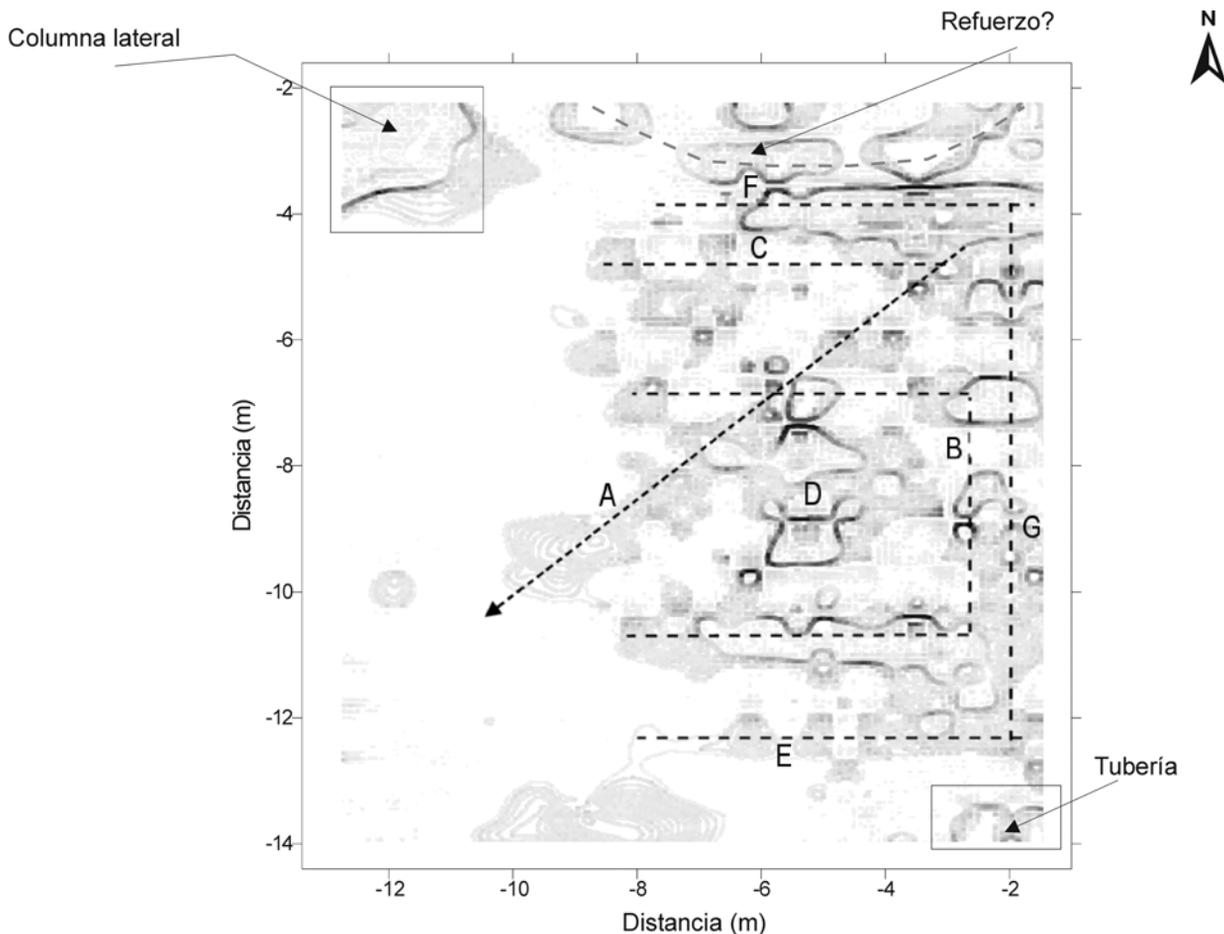


Fig. 6. Mapa filtrado del gradiente vertical magnético. Se aplica un filtro de detección de bordes que enfatiza las áreas de alto contraste, además se ha introducido un filtro de dilatación para expandir los elementos no nulos. Obsérvese el patrón magnético obtenido hacia la parte central del mapa (ver texto para explicación).

donde el objeto  $X$  y el elemento estructural  $B$  son representados como conjuntos en un espacio euclidiano bidimensional, y  $B_x$  es la traslación de  $B$  cuyo origen se localiza en  $x$ . La dilatación de  $X$  por  $B$  es entonces definida como el conjunto de puntos  $x$  tales que  $B$  interseca a  $X$  (Lira 2002).

Los resultados de aplicar estos filtros se observan en la Figura 6. En ella se pueden apreciar con mayor claridad una ligera tendencia en dirección NW-SE (letra A), que puede ser una evidencia de la presencia de los cimientos de la nave cuya dirección forma un ángulo de  $45^\circ$ , aproximadamente con respecto del cuerpo central del edificio principal y que pasaría por debajo de la zona de estudio.

Se siguen apreciando también las anomalías magnéticas hacia el E del mapa (letra B). Muy claramente aparecen resaltadas, al lado de las representaciones anteriores, tres alineaciones de direc-

ción E-W (letras C, D y E). En medio de ellas se encuentran anomalías más pequeñas, tal vez asociadas a material de derrumbe.

### Procesamiento de datos de GPR

Los datos de GPR, esencialmente desplegados en forma de radargramas, fueron editados utilizando el programa RADAN (Geophysical Survey Systems, Inc. 1995-1997). Inicialmente fueron normalizados y puestos a un mismo origen para poder adecuar la escala de los mismos. Se hizo un recorte de la ventana de tiempo a 100 ns para eliminar los efectos de saturación. Posteriormente, los datos de GPR fueron procesados por medio del software REFLEX. Mediante este programa se aplicó un filtro pasa bandas tipo *butterworth* con una frecuen-

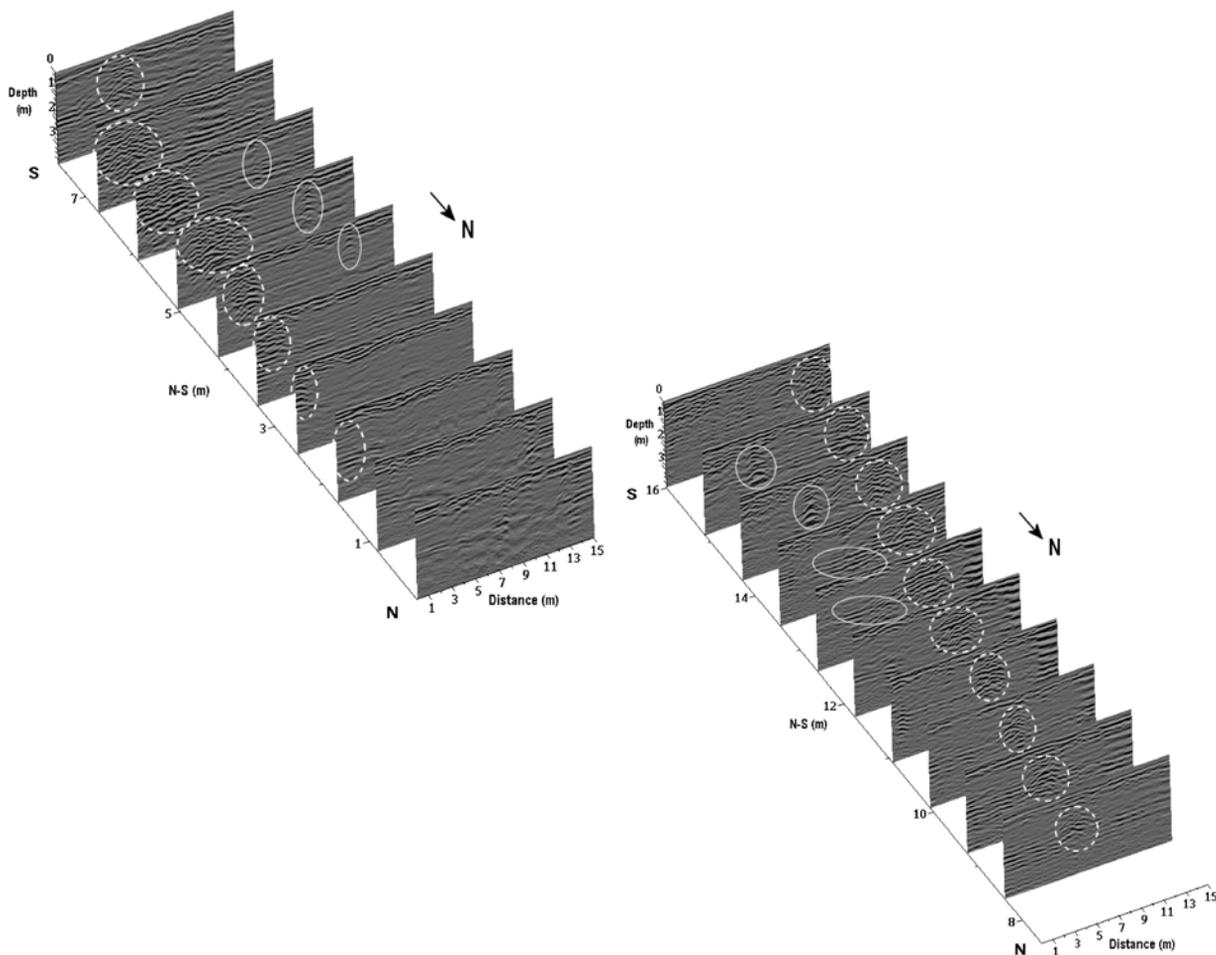


Fig. 7. Radargramas obtenidos en la zona de estudio. Se enmarcan en círculos punteados las anomalías más importantes detectadas por el radar. Obsérvese la continuidad y orientación del reflector interpretado.

cia de corte a los 25 y 400 Mhz para eliminar señales de baja y alta frecuencia, de acuerdo al análisis de la señal en el dominio de las frecuencias. Se aplicó un filtro de substracción de la media (*subtract-mean*) y un filtro de promedios móviles (*running average*) para el suavizado de los datos, así como un *declipping* de 5 trazas para realzar las ganancias.

La Figura 7 despliega 20 perfiles tomados en el patio interior de la Iglesia en forma de cortes transversales, siguiendo la dirección de observación. Este efecto se ha obtenido utilizando el programa SLICER (Fortner Research LLC 1990-1996). Los 20 perfiles presentan un conjunto de reflectores con características similares. Obsérvese que las reflexiones más superficiales en cada perfil, corresponden a los primeros estratos debajo del piso. Este es el relleno apisonado sobre el que se construye el piso actual de la Basílica. Se pone de manifiesto la

existencia de una estructura que se refleja en todos los perfiles, a partir del quinto, de una forma más evidente. Haciendo un seguimiento global, ésta tiene una dirección NW-SE (Fig. 7, círculos punteados) y continúa en el resto alejándose paulatinamente del origen en esa dirección, con una inclinación aproximada de 45°. La profundidad media de las estructuras asociadas con las anomalías se encuentra entre los 0,5 m y los 2,0 m. Este alineamiento parece concordar con la posición de los cimientos de la nave buscada.

En círculos continuos se han identificado otras anomalías sin aparente relación con la anterior. También se observan anomalías aisladas en los perfiles 18 y 19 que pueden corresponder a una tubería. En los radargramas 3, 4 y 5 se ven algunos rasgos más profundos, entorno a 2 m.

Mediante el programa SLICER (Fortner Resear-

ch LLC 1990-1996) es posible también construir cortes transversales y a profundidad, llamados niveles, que pueden ser en tiempo o en profundidad. En este caso se han realizado una serie de cortes en términos de la profundidad. La Figura 8 presenta una serie de cortes a diferentes intervalos de profundidad, en donde se señalan las tendencias principales con líneas punteadas y letras.

El primer corte ( $z=0,6$  m) corresponde a la parte más superficial. Como es de esperarse, se observan diferentes señales que no tienen mucha coherencia. Sin embargo, se empieza a descubrir la mencionada tendencia en la dirección NW-SE (obsérvese la alineación de los máximos, tonos claros en la Fig. 8). El segundo corte ( $z=1,4$  m) muestra un menor número de anomalías, pero se observa con mayor claridad la tendencia de un reflector (letra A), que se asume corresponde a los vestigios de la estructura de la nave (obsérvese la alineación de los valores máximos). Hacia el tercer plano de información ( $z=2,2$  m), se sigue apreciando la presencia de ese reflector y además aparecen nuevas anomalías. De ellas caben destacar dos de dirección E-W a 3,8 m (letra F) y a 14 m (letra E) unidas por otra anomalía de dirección N-S (letra G), observada en la parte inferior del nivel (hacia el este), que podrían delimitar un recinto. Dentro de esta última anomalía, hacia los 6 m, aparece otra, muy puntual e intensa (letra D), que se aprecia también en niveles más profundos.

El cuarto nivel ( $z=3,0$  m) define con mucha claridad una pequeña estructura hacia la parte inferior del plano, que se correlaciona con la observada en el plano superior (letra D), siendo ya mucho más débil la presencia del alineamiento observado en los planos anteriores. Finalmente, en el plano obtenido a 3,8 m se observan dos alineamientos de dirección EW y unidos por uno de dirección NS (grupo B). A mayores profundidades no se observan claramente más reflectores de importancia.

### Correlación entre datos magnéticos y GPR

El mapa de anomalías magnéticas muestra tendencias y estructuras que también aparecen reflejadas en los niveles más profundos de los datos de GPR, es decir, a partir del tercero (ver Fig. 8). Esto hace suponer que la información obtenida mediante el método de gradiente vertical está asociada a fuentes magnéticas situadas a una profundidad del orden de 2 m, pasando desapercibidas las estructuras más

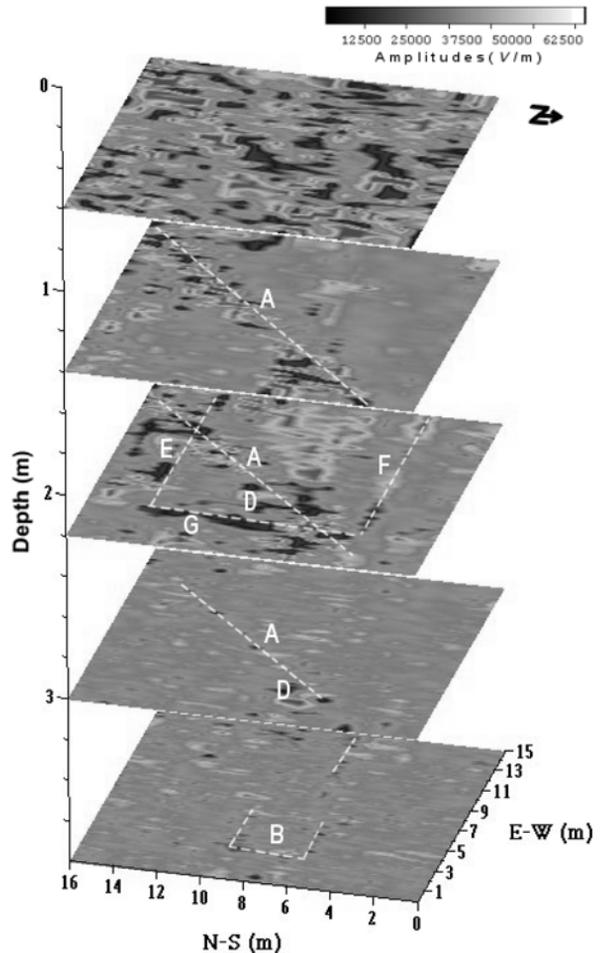


Fig. 8. Presentación en capas 3D de los resultados de la Fig. 7. Mediante un proceso de interpolación se forma un cubo de trabajo en 3D. Se despliegan capas a diferentes profundidades. Obsérvese la cantidad de anomalías sin coherencia aparente para la primera capa (0,6 m). Las siguientes dos capas (1,4 m y 2,2 m) muestran el reflector mostrado en la Fig. 7. La tercera capa muestra además otros reflectores (en letras, para explicación ver texto), que conforme se profundiza se atenúan de forma importante. Nótese la última capa.

superficiales. Como ya se ha comentado anteriormente, ello es debido a que el sensor inferior estaba situado a un metro sobre el suelo, altura mayor de la que se suele emplear en arqueología (de 0,3 m a 0,5 m, Cámara 1989; Chávez *et al.* 1995), a fin de eliminar ruidos de tipo ambiental. Es posible que, por la posición del sensor, se hayan podido atenuar las anomalías debidas a estructuras de interés más superficiales y que aparecen reflejadas en el nivel 2 de GPR (letra A). Pero también puede suceder que en este nivel los contrastes magnéticos sean pequeños y no sean detectados por los sensores.

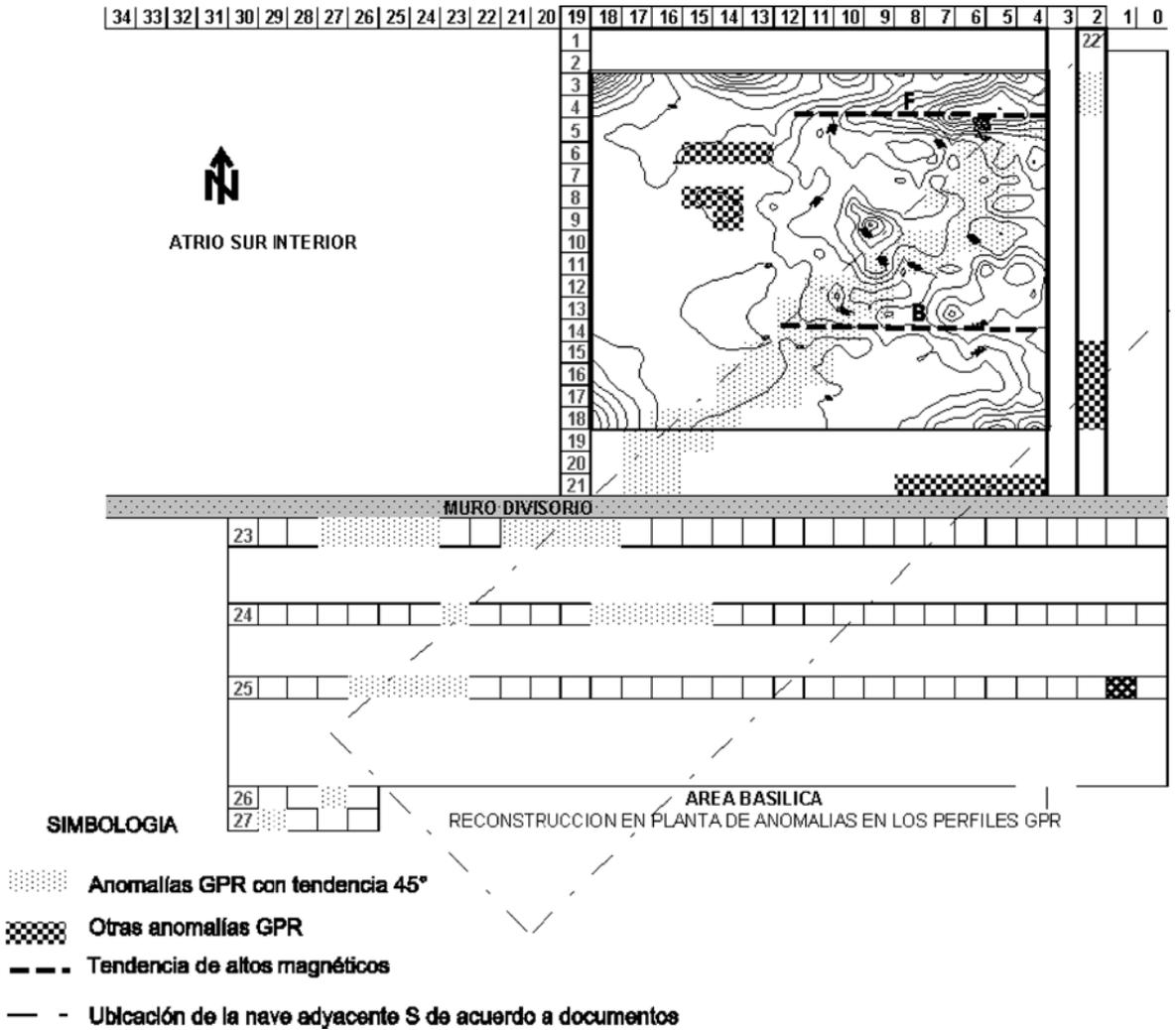


Fig. 9. Integración de resultados. En este diagrama se muestra la dirección y posición tanto del reflector principal como de la nave SW. Se han puesto la posición del resto de las anomalías de GPR y de gradiente magnético vertical.

Aún así, tanto en los mapas de GPR como en el de gradiente magnético existe una gran correspondencia en la posición de las anomalías (las cuales se han denominado con las mismas letras en ambos mapas). Por ejemplo, la tendencia A del mapa magnético se ve principalmente reflejada en los niveles 2 y 3 del radar; la figura rectangular demarcada por las tendencias E, F y G se muestra claramente en el nivel 2 del radar. Así mismo, el grupo de anomalías magnéticas B se ubica en el nivel 5. Según la posición a profundidad de las anomalías y atendiendo a la ley de superposición ampliamente aplicada en la arqueología, se podría sugerir que la tendencia A es menos antigua y que la B es más antigua, encontrándose en medio las demás.

En la Figura 9 se ha esquematizado la posición y el ancho aproximado de las anomalías que representarían los cimientos de la nave buscada. Se han añadido la información suministrada por los perfiles que se realizaron en los jardines, fuera del patio interior, y que no se muestran en este artículo, como apoyo a la interpretación obtenida pues muestran la continuidad y tendencia de los supuestos restos de la antigua nave.

Sobre este mismo mapa, se ha colocado esquemáticamente la posición del posible muro con base en testimonios documentales de la época. Obsérvese que la alineación de las anomalías de GPR y de gradiente vertical coinciden con la posición teórica del muro.

## CONCLUSIONES

La interpretación de los datos obtenidos en investigaciones geofísicas aplicadas a la Arqueología resulta complicada porque muchas de las estructuras a localizar dan una respuesta débil, y además no se encuentran aisladas por lo que sus efectos se superponen. Esta dificultad se incrementa cuando el estudio se realiza en zona urbana, donde los valores obtenidos recogen además el ruido ambiental producido por los materiales de construcción humana (cables de luz, rejas metálicas, edificios, etc.).

Las limitaciones por el hecho de trabajar en un área urbana no sólo surgen en la fase de interpretación sino que ya se han dejado sentir en la fase de programación. El tamaño y dirección de los perfiles han tenido que acomodarse al trazado urbanístico, la elección del método geofísico o el modo de operar con dicho método está condicionada por el medio en que se trabaja (por ejemplo, con el método magnético es recomendable que se realice en el modo de gradiente vertical, como se ha hecho en este trabajo).

A la vista de los resultados obtenidos y sin olvidar las limitaciones que se acaban de comentar, se puede inferir que existen evidencias para suponer que las anomalías encontradas hacia la parte sur de la Basílica se corresponden con la nave anexa a la principal de la Iglesia, que señalan los documentos históricos, al menos en esta zona estudiada.

La existencia de una estructura de dirección NW-SE aparece reflejada por los dos métodos geofísicos aplicados, aunque con mejor resolución a través del método de GPR. La correlación entre los dos métodos es mayor a profundidad, debido a que la disposición de los sensores del gradiómetro, tal y como se ha señalado anteriormente, habrá atenuado anomalías magnéticas asociadas con estructuras superficiales.

No cabe duda, que sería deseable disponer de la información de una excavación arqueológica para poder contrastar con los resultados geofísicos. Esto no es posible, por lo que sólo se pueden contrastar con la documentación bibliográfica.

Hay que señalar que los métodos geofísicos no destruyen el contexto histórico (Scollar 1986) y se ha mostrado su utilidad en la definición y caracterización en sitios de interés arqueológico (Cámara *et al.* 1995; Chávez *et al.* 1995). En zonas urbanas, que poseen un contexto arqueológico, generalmente es imposible llevar a cabo una excavación; la realización de estudios geofísicos permite cartografiar

esta riqueza arqueológica y así conocer y proteger el Patrimonio Arqueológico ante futuros cambios urbanísticos.

El estudio realizado en la ciudad de Pátzcuaro, considerada patrimonio de la Humanidad, es un ejemplo donde los métodos geofísicos demuestran ser una herramienta fundamental para caracterizar sitios de interés arqueológico e histórico.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos la participación en el trabajo de campo del M. en C. Pedro López y del Ing. Oscar Díaz. Estamos en deuda con la familia Ponce por haber sido excelentes anfitriones durante el periodo de trabajo en la ciudad de Pátzcuaro. Les damos las gracias también a las autoridades civiles y eclesíásticas por permitirnos trabajar dentro y en los alrededores de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud. Finalmente, este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto interno IGE-B117; los doctores Chávez y Cámara fueron apoyados por un proyecto de intercambio académico entre la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Politécnica de Madrid.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARZATE, J.A., FLORES, E.L., CHÁVEZ, R.E., BARBA, L. y MANZANILLA, L. 1990: "Magnetic prospecting for tunnels and caves in Teotihuacan, México". En S.H. Ward (ed.): *Investigations in Geophysics 5*. Estados Unidos. *Geotechnical and Environmental Geophysics* 3: 155-162.
- BARBA, L., LAZOS, L., ORTIZ, A., LINK, K. y LÓPEZ, L. 1997: "La arquitectura sagrada y sus dioses. Estudio geofísico y químico de la Casa de las Águilas, Tenochtitlan, México". *Revista de Arqueología Española XVII*: 44-53.
- BLIKOVSKY, M. C. 1979: "Processing and applications in microgravity surveys". *Geophysical Prospecting* 27: 848-861.
- CÁMARA, M.E. 1989: *Métodos geofísicos aplicados en investigaciones arqueológicas*. Ph.D. Thesis, Universidad Complutense de Madrid: 377.
- CÁMARA, M.E.; HERRERA, J.; HERNÁNDEZ, M.C. y CHÁVEZ, R.E. 1995: "Application of the fast fourier transform to interpret geoelectric anomalies: preliminary results". *Journal of Archaeological Science* 22: 619-628.
- CHANFÓN, C. 1994: *Arquitectura del siglo XVI. Temas escogidos*. Colección Arquitectura 6. Facultad de Arquitectura-UNAM.

- CHÁVEZ, R. E., HERNÁNDEZ, M.C., HERRERA, J. y CÁMARA, M.E., 1995: "A magnetic survey over La Maja, an archaeological site in northern Spain". *Archaeometry (Great Britain)* 37-1: 171-184.
- CHÁVEZ, R.E.; CÁMARA, M.E.; TEJERO, A.; BARBA, L. y MANZANILLA, L. 2001: "Site Characterization by Geophysical Methods in the Archaeological Zone of Teotihuacan, México". *Journal of Archaeological Science* 28: 1265-1276.
- HERNÁNDEZ, M.C.; CÁMARA, M.E.; FERNÁNDEZ OCHOA, C. y GARCÍA, P. 1988: *Prospección eléctrica en zona urbana: aplicación al estudio del trazado de la muralla romana de Gijón*. Coloquio de arqueología del Noroeste Peninsular. Oporto (Portugal).
- HESSE, A. 1966: *Prospecciones Geophysiques a faible profondeur. Applications a L'Archéologie*. Paris. Ed. Dunod.
- JENSEN, R. 1986: *Introductory digital image processing. A remote sensing perspective*. New Jersey Prentice Hall.
- LIRA, J. 2002: *Introducción al tratamiento digital de imágenes*. CIC-UNAM-FCE.
- LÓPEZ ÁLVAREZ, A. M.<sup>a</sup>; PALOMERO PLAZA, S. y MENÉNDEZ ROBLES, M.<sup>a</sup> L., 1995: *Museo Sefardí (Toledo)*. Ministerio de Cultura. Madrid.
- MACÍAS, P. 1978: *Pátzcuaro*. Monografías Municipales del Estado de Michoacán. Imprenta Madero, México.
- PONCE, R. 2003: *Arqueología urbana en Patzcuaro: Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Antropología e Historia: 110*. México.
- RAMÍREZ, M. 1986: *La catedral de Vasco de Quiroga*. El Colegio de Michoacán, Zamora.
- RAMÍREZ ROMERO, E. 1986: *Catálogo de monumentos y sitios de la región lacustre. Primer tomo. Pátzcuaro*. Univ. Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán.
- SCOLLAR, I. 1986: "Display of archaeological magnetic data". *Geophysics* 51: 623-633.
- TOUSSAINT, M. 1942: *Patzcuaro*. Imprenta Universitaria, UNAM, México.
- 1981: *Claudio de Arciniega, arquitecto de la Nueva España*. UNAM, México.