

PROSPECCIÓN CON GPR PARA LOCALIZAR UNA CISTERNA Y UNA GALERIA EN UN SITIO HISTORICO URBANO

GPR PROSPECTION TO LOCATE A WATER WELL AND A GALLERY IN AN URBAN HISTORICAL SITE

Bonomo, N^{1(*)}; Martinelli, P¹, Osella, A¹ y de la Vega, M¹

¹ Grupo de Geofísica Aplicada y Ambiental, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA / IFIBA, CONICET. Ciudad Universitaria, Pabellón 1, Dto. de Física, 1428 Buenos Aires, Argentina.

*E-mail: bonomo@df.uba.ar

RESUMEN

En este trabajo se presentan las metodologías y los resultados de una prospección geofísica realizada con GPR en la Manzana de las Luces (Buenos Aires, Argentina), cuyo principal objetivo fue localizar con precisión una cisterna y una galería, construidas durante los siglos XVII-XVIII. Otro objetivo fue detectar estructuras de origen más reciente, tales como partes del piso y tuberías. Esta información resultará útil para la planificación de intervenciones arqueológicas en el lugar, y contribuirá a la preservación de dichas estructuras históricas, frente a obras arquitectónicas o de ingeniería civil que puedan realizarse en un futuro. Desde el punto de vista geofísico, el sitio estudiado presenta una capa de suelo con contenidos de arcilla y humedad apreciables, lo que implicaba niveles medios a altos de atenuación de las ondas de GPR y, consecuentemente, limitada penetración. Asimismo, el sitio se encuentra en un ámbito urbano, con proliferación de objetos cercanos –tanto en el suelo como en el aire– y fuentes variadas de radiofrecuencia, lo cual anticipaba la posibilidad de obtener secciones de datos complejas, con reflexiones numerosas y próximas entre sí, con formas e intensidades diversas. Estas características requerían alcanzar un buen nivel de resolución en las secciones de datos para que dichas reflexiones pudieran ser distinguidas y correctamente interpretadas. Para eso era necesario tener ciertos recaudos, especialmente al momento del diseño de la prospección y durante el análisis e interpretación de los datos. La realización de pruebas previas a la prospección definitiva permitió definir un conjunto de parámetros de medición que hizo posible detectar reflexiones con amplitudes intermedias y bajas, con buena definición de las mismas. Además, la representación simultánea de los datos en las formas de secciones verticales y plantas favoreció la detección de reflexiones que, en principio, eran detectables en sólo una de estas formas de representación. Las reflexiones detectadas mediante ambos tipos de gráficos fueron correlacionadas entre sí, clasificadas y finalmente interpretadas en términos de sus probables orígenes. La metodología empleada permitió determinar las ubicaciones de la cisterna y la galería, con una precisión de unos pocos centímetros. También se detectaron tuberías, así como diversas discontinuidades y una malla de refuerzo en la estructura del piso. Los objetos que fueron centro de esta investigación y el tipo de entorno descrito resultan comunes a distintos sitios arqueológicos de Argentina y el exterior. En este sentido, los procedimientos y resultados mostrados sirven como un ejemplo o caso de referencia al respecto. Un objetivo particular del trabajo es revelar la utilidad y las limitaciones de la metodología empleada, en relación con las condiciones que imponen el tipo de aplicación y entorno. Otros objetivos son ilustrar los distintos tipos de reflexiones que pueden obtenerse en estos casos, y mostrar un análisis pormenorizado de las mismas y sus interpretaciones en términos de los probables orígenes. Es de esperar que estos contenidos resulten de interés para aquellas personas que trabajan con GPR en esta clase de sitios, así como para colegas con un interés más general en estas temáticas.

Palabras Clave: Prospección geofísica, georadar, sitios históricos.

ABSTRACT

This paper describes the methods and results of a geophysical survey carried out with GPR at the historical site “Manzana de las Luces”, located in the city of Buenos Aires, Argentina, whose main objective was to pinpoint a

cistern and a gallery built during the 17th and 18th centuries. Another objective was to detect newer structures, such as parts of the floor and pipelines. The search was prompted by the need to have useful information for planning archaeological research and conservation actions. Besides, the results of the study will contribute to the preservation of the historic structures against possible architectural or civil engineering works that can be performed in the future. From the geophysical viewpoint, the site has a layer of soil with significant clay and moisture contents, which implied intermediate to high attenuation of the GPR waves and, consequently, limited penetration. Moreover, the site is in an urban area with nearby objects -located in the soil and air - and varied sources of radio frequency, which anticipated the possibility of obtaining complex data sections with numerous and close reflections, with different shapes and intensities. The expected characteristics for the reflections due to objects of interest and the proximity of events required a good resolution level in the data sections so that the main reflections could be distinguished and interpreted correctly. That made necessary to take some precautions, especially at the time of survey design and during the analysis and interpretation of the data. Tests performed before the definitive prospecting allowed defining a set of measurement parameters that made possible to detect intermediate to low- amplitude reflections with good definition. Furthermore, the simultaneous representation of the data in the forms of vertical sections and constant-time/horizontal slices favored detecting reflections that in principle were detectable in only one of these forms of representation. The reflections detected from these types of graphs were correlated between them, classified and finally interpreted in terms of their probable origins. This methodology allowed determining the locations of the cistern and the gallery with an accuracy of a few centimeters, as well as detecting floor discontinuities, different pipelines and the presence of a thin mesh in the floor structure. The types of investigated objects and environmental conditions in this study are common to different archaeological sites in Argentina and other countries. In this regard, the procedures and results shown in this paper serve as an example or reference case. A particular goal of this paper is to demonstrate the usefulness and limitations of the applied methodology, in relation to the conditions imposed by the type of application and environment. Other objectives are to illustrate the different types of reflections that can be obtained in these cases, to show a detailed analysis of these reflections and their interpretation in terms of probable origins. It is expected that these contents will be of interest to people working with GPR in this kind of sites, as well as other colleagues with a more general interest in these topics.

Keywords: Geophysical propection, georadar, historical sites.

INTRODUCCIÓN

Métodos de prospección geofísica tales como Georadar (GPR, por la sigla en inglés de Ground Penetrating Radar), Inducción Electromagnética (EMI, por Electromagnetic Induction), Geoeléctrico, Magnético y Gravimétrico (Reynolds, 1998) están siendo cada vez más utilizados para el estudio de distintos tipos de bienes culturales. Entre los más usuales, se encuentran los estudios para la detección y caracterización de muros antiguos enterrados (Bonomo et al., 2012, 2013; Piro y Campana, 2012; Rabbel et al., 2015), túneles (Banks, 2012; Martínez-Lorenzo et al., 2011; Osella et al., 2014) y estructuras arquitectónicas y de ingeniería en general (Apostolopoulos, 2014; Bonomo et al., 2015; Di Mauro et al., 2014; Leucci et al., 2012).

Los métodos geofísicos mencionados son especialmente útiles en estas aplicaciones principalmente por su carácter no invasivo, lo que permite preservar a los objetos en estudio de posibles daños. Otra ventaja de los mismos es que permiten obtener imágenes que dan información sobre dichos objetos en tiempos relativamente cortos, en comparación con los métodos de intervención directa, tales como la excavación o la remoción y recolocación de materiales. En general, estos métodos geofísicos poseen buena capacidad de detección y mapeo de los tipos de estructuras mencionados. Los mapas que se obtienen a menudo son utilizados para el planeamiento de las intervenciones por parte de los especialistas en las diversas áreas de aplicación (Bonomo et al., 2012, 2013, 2015; Hawamdeh et al., 2015; Martino et al., 2006, Rabbel et al., 2015; Urban et al., 2014).

En particular, el método de GPR se encuentra entre los más utilizados para el estudio de estructuras arquitectónicas y de ingeniería, debido a que es uno de los más económicos y con mejor resolución (Reynolds, 1998). El método se basa en la transmisión de pulsos electromagnéticos de corta duración hacia el medio en estudio. Las reflexiones de estos pulsos, usualmente en las discontinuidades de la permitividad dieléctrica y/o la conductividad eléctrica, son registradas en la superficie, proporcionando información sobre las propiedades de dicho medio. La utilización de frecuencias centrales de GPR en el rango de 200 MHz a 1000 MHz es usual en este tipo de aplicaciones, ya que permiten obtener una buena resolución de los blancos superficiales típicos. Para alcanzar blancos a profundidades mayores se usan frecuencias centrales entre 100 MHz y 200 MHz. En general, la resolución aumenta con la frecuencia, mientras que la penetración disminuye ya que la absorción se incrementa (Conyers y Goodman, 1997).

La alta absorción de las ondas de GRP que producen los suelos con contenidos de arcilla y humedad significativos (Jol, 2009), sumada al incremento de la absorción con la frecuencia, hacen que la frecuencia central a utilizar en estos casos para poder alcanzar los blancos de interés deba ser bastante más baja que en otros tipos

de suelo. Como una reducción en las frecuencias implica una merma en la resolución, la selección de la frecuencia puede resultar crítica frente necesidades de resolución y penetración que, bajo otras condiciones de suelo, serían completamente accesibles.

Por otra parte, en los sitios arqueológicos con características urbanas es usual que diferentes estructuras de origen relativamente actual, tales como pisos y tuberías, se ubiquen en el subsuelo por encima de las estructuras históricas y en posiciones cercanas entre sí. Ello produce secciones de datos con reflexiones próximas o parcialmente superpuestas, y con formas y amplitudes diversas. Asimismo, la existencia de objetos aéreos cercanos a las zonas investigadas y fuentes de radiofrecuencia tiende a introducir reflexiones secundarias y ruido en dichas secciones, especialmente cuando se utilizan antenas no blindadas. Para poder lograr un correcto análisis de secciones de datos con estas características es necesario contar con un buen nivel de resolución en las mismas, de modo de poder diferenciar entre las distintas señales que aparecen en ellas. Ello requiere de una selección apropiada de los parámetros de configuración, antes de la adquisición definitiva de los datos, así como de una adecuada selección de los procedimientos de procesado. Por su lado, la complejidad de las formas y las diversas intensidades de las reflexiones requieren de un análisis pormenorizado de estas últimas, de modo de lograr una correcta interpretación de las mismas en términos de sus posibles orígenes, y así poder obtener un panorama confiable del subsuelo.

En este trabajo se presenta un estudio que hemos realizado con GPR en un sector de la Manzana de las Luces, un sitio histórico situado en la zona céntrica de la ciudad de Buenos Aires, conocido como la cuna de la intelectualidad del Río de la Plata. La historia de este sitio comenzó en 1661, con el establecimiento de los jesuitas en el lugar, el cual continuó hasta 1730 (p.ej. Furlong, 1994). En este predio, estos monjes construyeron una iglesia, un colegio, los claustros y la Procuraduría, y desarrollaron grandes huertas para el suministro de alimentos de la misión.

Durante los siglos XVII y XVIII se construyeron túneles en el centro de la ciudad, formando una red que comunicaba iglesias y edificios públicos con el fuerte y la aduana de la ciudad. Al menos tres de ellos funcionaron bajo el sitio de la misión, como se reportó en el plano de la misma correspondiente al período de ocupación jesuítica (Fig. 1), realizado en base a un relevamiento llevado a cabo por el Arq. J. O. Gazaneo, entre los años 1968 y 1980 (Mayochi et al., 2008). Uno de los túneles se extendía de este a oeste y los otros dos aproximadamente de norte a sur. Sin embargo, investigaciones históricas posteriores indicaban que dichos túneles podían ser más largos, y que incluso podía haber otros no registrados oficialmente (Mayochi et al., 2008; Levinton, 2012).

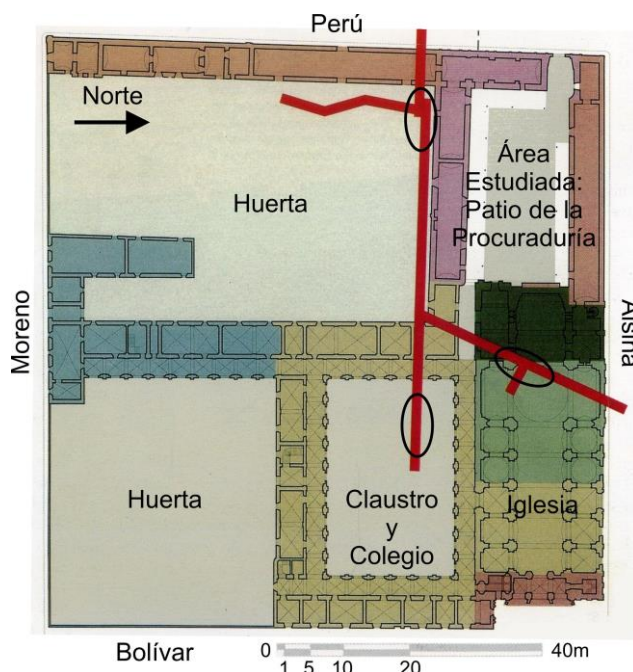


Figura 1. Plano de la Manzana de las Luces durante el período de ocupación jesuítica (1661 - 1730). En rojo se muestran los túneles reportados, y con elipses se marcan los tramos de los mismos a los cuales se puede acceder en la actualidad. En la parte superior derecha de la figura se encuentra el área estudiada con GPR, correspondiente al Patio de la Procuraduría

Figure 1. Plan of the site “Manzana de las Luces” during the Jesuit occupancy (1661-1730). The red lines indicate the location of the reported tunnels, and the ellipses the sectors that can be accessed nowadays. The area studied with GPR can be observed in the upper-right part of the figure, and corresponds to the “Patio de la Procuraduría”.

Durante los últimos años del siglo XX, se inició un proyecto del Gobierno Nacional para recuperar el patrimonio cultural del sitio. En ese marco, en 1983, un tramo de los túneles fue ubicado y acondicionado para su reapertura al público. Además, recientemente se obtuvieron nuevas evidencias de la posible existencia de tramos de túneles no reportados oficialmente, mediante un estudio geofísico realizado con el método geoelectrico en una de las áreas originalmente destinadas a huertas (Osella et al., 2015). Entre los objetivos de este proyecto también se encuentra la puesta en valor del Patio de la Procuraduría (Fig. 1). Por registros fotográficos de principios del siglo XX, se tenía conocimiento de la existencia en este lugar de una cisterna y una galería, que luego fueron cubiertas cuando se construyó el patio actual durante la segunda mitad del siglo XX (Fig. 2); sin embargo, las posiciones de estas estructuras sólo se conocían de manera muy aproximada, ubicándose en áreas probables de aproximadamente 30 m² y 50 m², respectivamente.



Figura 2. a) Foto de las excavaciones realizadas antes de la construcción del patio actual. b) y c) Fotos de una antigua cisterna (izq.) y una galería (der.), luego cubiertas.

Figure 2. a) Photo of the excavations performed before the construction of the current patio. b) y c) Photos of an old cistern (left) and a gallery (right), later covered.

En este contexto, el principal objetivo arqueológico de nuestro estudio con GPR fue localizar con precisión la cisterna y la galería, así como otras estructuras de valor histórico que pudieran encontrarse enterradas en el patio. Esta información podrá utilizarse para guiar intervenciones arqueológicas futuras, con fines de investigación y/o conservación, y asimismo, se espera que contribuya a la preservación de dichas estructuras ante obras arquitectónicas o de ingeniería civil que pudieran llevarse a cabo en el sitio. También buscamos detectar estructuras de origen más reciente, teniendo en cuenta que la presencia de estas estructuras por sobre las estructuras históricas suele dificultar el desarrollo de las intervenciones arqueológicas. En este sentido, la información que pueden proveer los métodos geofísicos no invasivos, tales como el GPR, resulta de gran importancia, porque ayuda en la planificación de intervenciones focalizadas que preservan las estructuras de interés de la manera más eficiente posible.

Respecto del interés geofísico del estudio, el sitio presentaba distintos factores limitantes, así como características relevantes en cuanto al diseño y desarrollo de la prospección, que tienen relación con varias de las cuestiones descritas en párrafos previos. Por un lado, la presencia de una capa de material de relleno por sobre los objetos arqueológicos enterrados, con contenidos de arcilla y humedad apreciables (Weissel, 2010), y la posible existencia de varillas metálicas de refuerzo en la estructura del piso actual, anticipaban un nivel de atenuación significativo para las ondas de GPR. Por otro lado, tres características principales hacían pensar en la posibilidad de obtener secciones de datos complejas, con señales numerosas, diversas y cercanas entre sí. En primer lugar, los objetos arqueológicos enterrados podían presentar estructuras no simples, al igual que el relleno ubicado sobre los mismos (p. ej., inclusión de escombros) y el piso de baldosas. En segundo lugar, el semiespacio aéreo inmediato al volumen de suelo investigado incluye objetos tales como paredes, techos, vigas externas,

lámparas, bancas y macetas, los cuales constituían potenciales fuentes de reflexiones secundarias. En tercer y último término, la ubicación céntrica dentro de una gran ciudad incrementaba las posibilidades de interferencia debida a distintos tipos de emisores de radiofrecuencias. De acuerdo a lo explicado precedentemente, estas características exigen alcanzar una buena resolución en las secciones de datos, de modo de poder diferenciar las distintas reflexiones e interpretar sus orígenes adecuadamente.

En este trabajo se muestran los principales procedimientos y resultados del estudio que realizamos para detectar la cisterna y galería mencionadas, así como las estructuras de origen más reciente, en particular, tendidos de tuberías y partes del piso actual. Dado que estos tipos de objetos y el entorno descrito resultan comunes a distintos sitios arqueológicos del país y del exterior, los contenidos de este trabajo sirven como un ejemplo o caso de referencia al respecto. En particular, en el trabajo se ponen de manifiesto la utilidad y limitaciones de la metodología empleada, en relación con las condiciones que imponen el tipo de aplicación y entorno. Asimismo, también se ilustran los distintos tipos de reflexiones, se realiza un análisis pormenorizado de las mismas, y se muestran las interpretaciones en términos de sus orígenes.

En las secciones que siguen, primero se presentan los resultados de un conjunto de pruebas que realizamos antes de la prospección definitiva, orientado a la selección de los principales parámetros de adquisición de datos y pasos de procesamiento, en función de las características de los blancos y el lugar. A continuación, se detalla la adquisición de los datos definitivos. En la sección Resultados, se muestran secciones de datos verticales y a tiempo constante, con las principales reflexiones detectadas. Las mismas son analizadas, clasificadas e interpretadas en términos de sus probables orígenes. Finalmente, se presentan las Conclusiones del trabajo, donde se discuten la utilidad y limitaciones de la metodología empleada, en cuanto a la detección de los objetos arqueológicos de interés.

METODOLOGÍA

Análisis Para Determinar la Frecuencia y Otros Parámetros de Adquisición de Datos

Antes de la prospección definitiva, se adquirieron datos a lo largo de un conjunto de líneas de sondeo, usando distintas frecuencias de GPR, con el propósito principal de determinar la frecuencia más apropiada, compatible con los requerimientos de profundidad de penetración y resolución para los principales objetos en estudio. Asimismo, se buscó obtener información relevante para la selección de otros parámetros, tales como el espaciado entre líneas, el espaciado entre trazas (o intervalo de muestreo), el incremento temporal y el tamaño de ventana temporal.

Para el suelo se consideró una primera capa compuesta por el piso actual, con espesor aproximado de 30 cm, y por debajo de ella un material de relleno con contenidos de arcilla y humedad apreciables, extendiéndose hasta la profundidad de los objetos históricos de interés, estimada entre 50 cm y 100 cm. Esto se basó en información proveniente de excavaciones realizadas en el patio con anterioridad al desarrollo de nuestro estudio y en información histórica de diversos orígenes (Weissel, 2010). Los contenidos apreciables de arcilla y humedad en el relleno, así como la probable presencia de varillas metálicas de refuerzo en la estructura del piso, planteaban un escenario con atenuación media a alta de las ondas de GPR (Jol, 2009). Además, ante la posibilidad de que las secciones de datos presentaran reflexiones numerosas, cercanas entre sí y con formas complejas, debidas a las diversas estructuras ubicadas en el suelo y espacio aéreo cercano, se procuró un máximo de resolución, compatible con un mínimo de penetración determinado por la profundidad de los objetos en estudio.

Para las pruebas se definieron cuatro líneas de sondeo orientadas a lo largo del patio (coordinada y, en la dirección este-oeste), y distribuidas a través del mismo (coordenada x, en dirección sur-norte) de manera tal de obtener una muestra de respuestas de GPR que resultase representativa del lugar. El equipo empleado, tanto en estas pruebas como en la prospección definitiva, fue un GPR Pulse EKKO Pro, fabricado por Sensors and Software Inc. Durante las pruebas se adquirieron dos conjuntos de datos a lo largo de cada línea de sondeo, usando antenas blindadas de 250 MHz y 500 MHz, respectivamente. Estas frecuencias son utilizadas habitualmente en las investigaciones arqueológicas y de ingeniería civil, porque brindan buena resolución y suficiente penetración en suelos diversos. Aunque también disponíamos de antenas de 100 MHz, con un mayor potencial de penetración, desde un principio se descartó el uso de las mismas debido a su baja resolución y a que, al no ser blindadas, presentaban una mayor exposición frente a potenciales interferencias de reflectores circundantes y señales de radiofrecuencia. Se empleó una configuración de antenas con el transmisor dispuesto a continuación del receptor y dipolos perpendiculares a la línea de sondeo, la cual presenta buena sensibilidad a rasgos lineales transversales para variados tipos de interfaces. Ambas antenas fueron desplazadas conjuntamente a lo largo de las líneas, manteniendo una distancia fija entre ellas (offset) igual a la mínima posible, 40 cm y 25 cm, para las antenas de 250 MHz y 500 MHz, respectivamente. Esto favorece la posibilidad de detectar los blancos más profundos, ya que minimiza la distancia de propagación, reduciendo los efectos de atenuación. El intervalo de muestreo a lo largo de las líneas de sondeo (espaciado entre trazas) fue de 0.025 m y 0.01 m, para las antenas de 250 MHz y 500 MHz, respectivamente. El incremento temporal fue de 0.02 ns y 0.01 ns, respectivamente. Estos

valores se eligieron suficientemente pequeños como para minimizar posibles efectos de aliasing. El tamaño de ventana temporal fue de 90 ns y 70 ns, respectivamente, lo cual garantizaba el registro de reflexiones provenientes de, al menos, hasta 2 m de profundidad, aún en condiciones de muy baja velocidad de propagación. En cada posición de muestreo se adquirieron y promediaron 32 trazas (stacking o apilado de trazas), valor similar al utilizado en otras investigaciones arqueológicas llevadas a cabo por nuestro grupo (p.ej, Bonomo et al., 2012, 2013, 2015) y que resulta compatible con velocidades de avance razonables a lo largo de las líneas de sondeo, para distintas condiciones de entorno y selecciones de variables de sistema (intervalo de muestreo, incremento temporal y stacking).

Los datos fueron procesados y visualizados usando códigos propios desarrollados en plataforma Matlab. La secuencia de procesamiento fue la siguiente: 1) determinación del tiempo cero de las trazas a partir de la localización del primer quiebre en la señal, de modo de posicionarlas correctamente en el tiempo y minimizar los efectos de deriva, 2) resta de la amplitud media, calculada a lo largo de una ventana temporal móvil de dos períodos nominales de extensión ($\tau = 4$ ns y $\tau = 2$ ns, para 250 MHz y 500 MHz, respectivamente), para eliminar componentes de baja frecuencia cuya amplitud decrece con el tiempo, y que se deben al acople entre las antenas, 3) sustracción de la traza promedio espacial, de modo de eliminar las ondas directas y cualquier tipo de ruido de frecuencia espacial constante y 4) aplicación de ganancia, a partir del cálculo de una curva promedio para la envolvente de la amplitud de las trazas como función del tiempo. Para calcular una velocidad de propagación, necesaria para estimar la profundidad de los reflectores, se utilizó un procedimiento estándar para datos adquiridos con offset constante (Reynolds, 1998; Yilmaz, 2000). El mismo se basa en el cálculo de la velocidad media de propagación entre las antenas y un dado difractor, a partir del ajuste de una función hiperbólica entre cuyos parámetros de ajuste se encuentra dicha velocidad. Los ajustes se realizan sobre un conjunto de señales de difracción, seleccionadas a lo largo de las secciones de datos de modo de muestrear la velocidad media en espacio y tiempo en la forma más completa posible. Si las señales de difracción disponibles se hallan distribuidas en espacio y tiempo en forma más o menos uniforme y con suficiente densidad como para dar cuenta de las variaciones horizontales y en profundidad de la velocidad media, es entonces posible deducir un mapa de velocidades de intervalo. Sin embargo, esta situación muy rara vez se da en la práctica, por lo que es usual conformarse con una velocidad promedio, calculada a partir de los valores de velocidad media ajustada disponibles. En este caso se realizaron ajustes sobre un conjunto de 24 señales de difracción siguiendo el procedimiento descrito, obteniéndose una velocidad promedio $v = (8.4 \pm 1.1)$ cm/ns, cuya incerteza corresponde al valor más distante respecto de dicho promedio (desviación estándar = 0.0048 cm/ns). Para estos valores, la incerteza relativa en la profundidad (y velocidad) es 13 %.

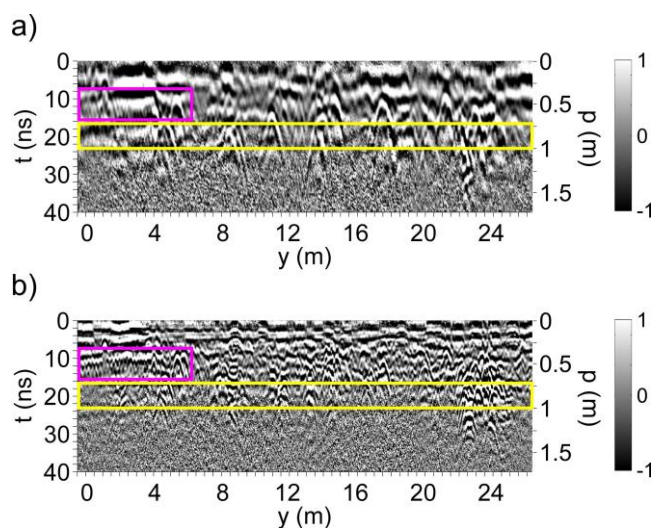


Figura 3. Radargramas obtenidos a lo largo de una de las líneas de prueba, para las frecuencias nominales: a) 250 MHz, b) 500 MHz. En el área marcada con líneas amarillas se observan diferencias debidas a las distintas profundidades de penetración, mientras que en el área marcada con líneas magenta pueden apreciarse claramente las distintas resoluciones.

Figure 3. Radargrams obtained along one of the test lines, for nominal frequencies: a) 250 MHz and b) 500 MHz. Differences due to the different penetration depths for these frequencies are observed in the area marked with yellow lines, while the differences in resolution are clear in the area marked with magenta lines.

En la Fig. 3 se muestran dos secciones verticales de datos, las cuales fueron adquiridas a lo largo de una misma línea de sondeo, y que son representativas de los resultados obtenidos durante las pruebas. Las secciones en las Figuras 3a y 3b corresponden a las frecuencias centrales nominales de emisión 250 MHz y 500 MHz, respectivamente. En la primera de estas secciones se observa que la profundidad de penetración es de

aproximadamente 85-95 cm, mientras que en la segunda, la penetración no excede los 65-75 cm. Las diferencias debidas a las distintas penetraciones ocurren mayormente en el rango de profundidades indicado con líneas amarillas en dichas figuras (75-95 cm de profundidad), donde pueden observarse reflexiones aproximadamente horizontales en la sección de 250 MHz que son apenas visibles o indetectables en la de 500 MHz. El nivel de absorción registrado es del tipo medio o medio-alto, típico de suelos con bajas (aunque no despreciables) a intermedias cantidades de arcilla y humedad. A partir de la comparación de ambas secciones pueden distinguirse las distintas resoluciones laterales resultantes. Por ejemplo, en el área marcada con la línea magenta se aprecia una sucesión compacta de señales de difracción, las cuales son claramente distinguibles para la frecuencia 500 MHz y bastante confusas para 250 MHz. Estas hipérbolas están separadas entre sí por una distancia de aproximadamente 25 cm. La resolución vertical, calculada en base al criterio de cuarto de longitud de onda, resulta de 9-13 cm y 4-6 cm, para los rangos de frecuencias 159-250 MHz y 357-500 MHz, respectivamente. Los valores mínimos en estos rangos corresponden a las frecuencias de pico medidas, mientras que los máximos a las frecuencias nominales. En ninguna de las secciones se observa ruido o reflexiones aéreas significativos, lo que evita pasos de filtrado adicionales. Debido a que la penetración obtenida con las antenas de 250 MHz resultó más cercana al rango de profundidad requerido (50-100 cm) que la obtenida con las antenas de 500 MHz, se seleccionó a las primeras para realizar la prospección definitiva, a pesar de su menor resolución.

Prospección Definitiva

Se prospectaron tres sectores, conforme se muestra en la Figura 4. El objetivo principal en el Sector 1 era la localización del pozo cisterna mostrado en la Figura 2b. Los Sectores 2 y 3 estaban ubicados en la parte del patio donde se esperaba encontrar la galería (Fig. 2c).

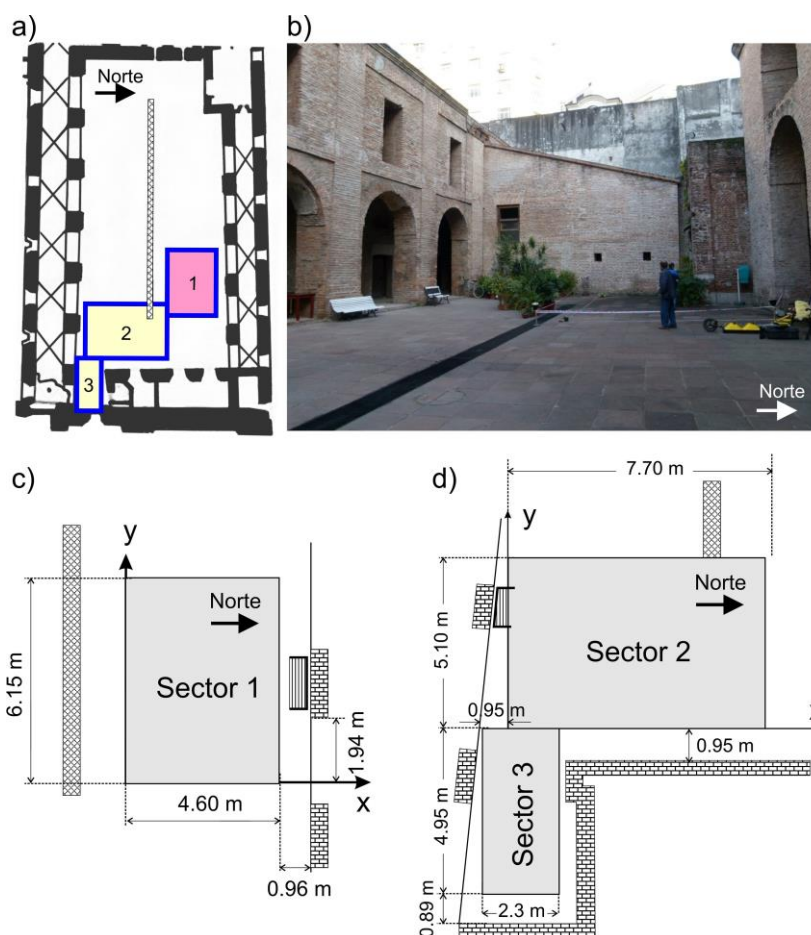


Figura 4. a) Distribución de los sectores estudiados con GPR. b) Foto del patio donde pueden verse la delimitación del Sector 4 y el equipo de GPR utilizado (Pulse EKKO Pro). En la parte central del patio se tiene un desagüe cubierto por una rejilla metálica. c) Plano esquemático del Sector 1. d) Esquema de los Sectores 2 y 3.

Figure 4. a) Distribution of the sectors studied with GPR. b) Photo of the patio showing the delimitation of Sector 4 and the GPR equipment used (Pulse EKKO Pro). In the central part of the patio, there is a drain covered by a metallic grating. c) Schematic plan of Sector 1. d) Scheme of Sectors 2 y 3.

Para realizar la prospección definitiva se seleccionaron las antenas de 250 MHz, de acuerdo a lo explicado en la sección anterior. En cada sector se adquirieron datos a lo largo de líneas de sondeo paralelas entre sí, espaciadas 0.1 m, y orientadas en la dirección longitudinal del patio. El espaciado entre líneas fue elegido para garantizar un adecuado muestreo de las longitudes de onda aparente mínimas registradas durante las pruebas (alrededor de 0.2 m). El espaciado entre trazas se mantuvo igual al utilizado para dichas antenas en las pruebas previas, 0.025 m. Por otro lado, se seleccionó un incremento temporal de 0.04 ns, valor que coincidió con el sugerido por el fabricante del sistema y que garantizaba el correcto muestreo de los periodos mínimos registrados durante las pruebas (aproximadamente, 2 ns). De esta manera, se buscaron buenos niveles de detalles en los perfiles verticales y las imágenes en planta resultantes, que fueran aptos para definir, por ejemplo, difracciones con mediana o baja intensidad debidas a eventuales bordes de la cisterna o a objetos y discontinuidades lineales orientadas a lo largo del patio, reflexiones de limitada extensión espacial, como la que produciría una tapa de la cisterna, cuya sección circular esperada era de aproximadamente 1 m de diámetro, etc. Con el espaciado entre líneas elegido, y el aumento en el valor del incremento temporal respecto del utilizado en las pruebas (0.02 ns), también se buscó optimizar el tiempo de adquisición de datos, de modo tal que la prospección pudiese ser completada con suficiente comodidad en el tiempo disponible (1 día, incluyendo la demarcación de los sectores). El tamaño de la ventana temporal también fue disminuido respecto del usado en las pruebas, dejando como valor definitivo 60 ns, mientras que configuración de antenas y el resto de los parámetros de GPR fueron los mismos que durante las pruebas, al igual que los pasos seguidos para el procesamiento de datos.

A partir de los datos procesados de cada sector, se graficaron secciones verticales o radargramas y secciones a tiempo constante o plantas. Primero se analizaron los radargramas, a fin de determinar las principales características de las señales registradas e identificar reflexiones potencialmente relevantes en cuanto a los objetivos de nuestro estudio. Luego se realizaron estas mismas tareas con los gráficos en planta. En tercer lugar, se correlacionaron los resultados obtenidos a partir de ambos tipos de gráfico, estudiando la continuidad de las reflexiones seleccionadas y definiendo los rasgos de interés. Por último se interpretaron estas reflexiones en términos de sus posibles orígenes. A continuación se presentan los principales resultados obtenidos.

RESULTADOS

Sector 1 – Localización de la Cisterna

Este sector, cuya ubicación en el patio se indica en la Figura 4a, tiene un ancho de 4.60 m y un largo de 6.15 m, los que definen un área de aproximadamente 30 m². Su localización coincidía con el área en la cual se estimaba que se podía hallar la cisterna. Un plano esquemático del sector, junto con el sistema de coordenadas utilizado, se muestran en la Figura 4c. En el mismo se adquirieron 47 líneas equiespaciadas, orientadas en la dirección longitudinal del patio (E-O, eje y de coordenadas).

En la Figura 5 se muestran cortes en planta para profundidades crecientes. La velocidad utilizada en la conversión de la escala de tiempos a la de profundidades, tanto en este sector como en los Sectores 2 y 3, fue obtenida siguiendo el mismo procedimiento que se usó durante las pruebas. En buen acuerdo con lo obtenido previamente, dicha velocidad resultó $v = (8.5 \pm 1.2)$ cm/ns, lo que implica una incerteza relativa en la profundidad de 14 %. Las principales reflexiones detectadas en el Sector 1 han sido marcadas sobre los cortes de la Fig. 5. Cada reflexión o grupo de reflexiones del mismo tipo ha sido identificado con una letra diferente, en orden alfabético a medida que se hace visible en la secuencia de gráficos. Con círculos de color verde se resaltan las reflexiones vinculadas con la cisterna, tal como se explicará más adelante, mientras que con flechas rojas se marcan otras clases de reflexiones.

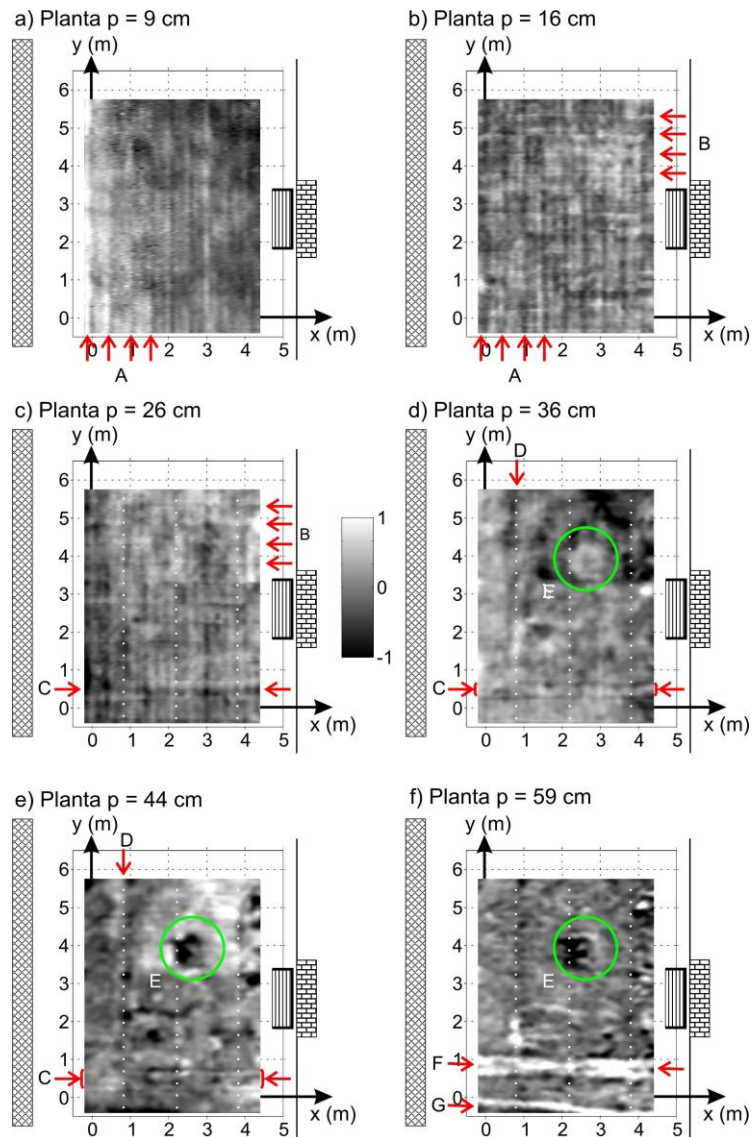


Figura 5. Cortes en planta a distintas profundidades, p . Los círculos verdes indican reflexiones vinculadas con la cisterna. Con flechas de color rojo se indican otros tipos de reflexiones. Las líneas delgadas de puntos blancos en los gráficos (c) a (f) indican las posiciones de los radargramas mostrados en la Figura 6.

Figure 5. Slices at different depths, p . The green circles indicate reflections related to the cistern. Other kinds of reflections are indicated with red arrows. Narrow dotted lines in graphs (c) to (f) indicate the positions of the radargrams shown in Figure 6.

En los gráficos se puede observar lo siguiente:

En el corte a $p = 9$ cm, un conjunto de reflexiones que definen rasgos lineales paralelos al eje y , separados entre sí por una distancia aproximadamente constante de 50 cm. Este conjunto ha sido denominado A.

En el corte a $p = 16$ cm se agrega otro conjunto de rasgos lineales, esta vez dispuestos a lo largo del eje x , el cual ha sido denominado B. Como en el caso de los rasgos A, los rasgos B se hallan separados entre sí por una distancia aproximadamente constante de 50 cm.

En el corte a $p = 26$ cm, los rasgos A y B prácticamente han desaparecido, y aparece un rasgo lineal denominado C.

A profundidad $p = 36$ cm, sigue observándose la reflexión C y aparece un rasgo lineal tenue en la dirección del eje y , denominado D. También empieza a hacerse visible una zona anómala E, que más adelante será vinculada con la cisterna.

En el corte a $p = 44$ cm siguen observándose los rasgos mencionados para el corte a $p = 36$ cm.

Por último, a profundidad $p = 59$ cm el rasgo C ha desaparecido, pero aún puede observarse el rasgo E, haciéndose además visibles dos rasgos intensos denominados F y G.

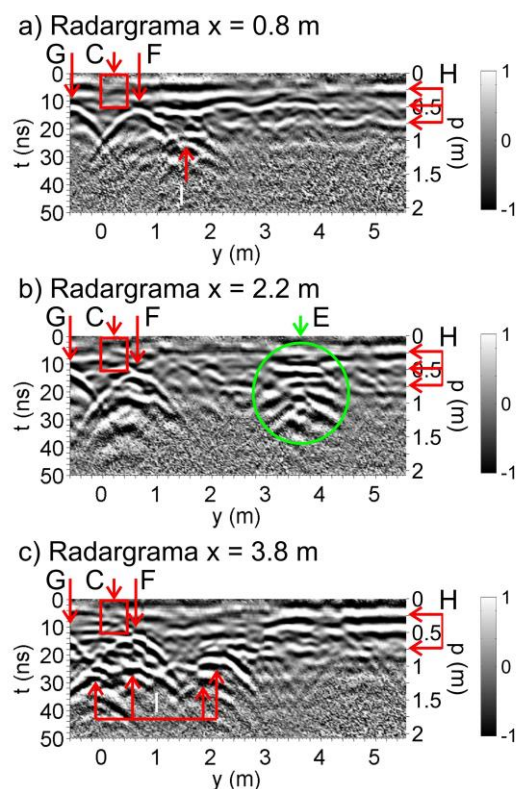


Figura 6. Secuencia de radargramas para distintas posiciones a lo largo del eje x. Se marcan las principales reflexiones detectadas.

Figure 6. Sequence of radargrams for different positions along the x-axis. The main detected reflections are marked.

En las Figuras 6a, 6b y 6c se muestran radargramas correspondientes a las posiciones $x = 0.8$ m, $x = 2.2$ m y $x = 3.8$ m, respectivamente. En esta secuencia pueden observarse muchas de las reflexiones señaladas en la Fig. 5 (reflexiones C, E, F y G), más algunas otras que no eran visibles en dicha figura (reflexiones H e I). Para simplificar la comparación entre ambos tipos de representación, en las Figs. 5c a 5f se habían indicado las ubicaciones de las secciones verticales mostradas en la Fig. 6 (líneas delgadas de puntos blancos). El análisis de la Fig. 6 facilita la clasificación de las reflexiones más importantes, según las siguientes categorías. En primer lugar se tienen difracciones, entre las que se encuentran las reflexiones F, G e I (las reflexiones I tienen profundidades superiores a las de los cortes en planta de la Fig. 5, por lo cual no habían sido señaladas en ellos). Luego, se tiene un conjunto relativamente denso de reflexiones con formas más irregulares que las anteriores y cuyas posiciones coinciden con las de la anomalía E. En tercer término, se aprecia un conjunto de reflexiones aproximadamente horizontales, denominado H, las cuales no eran distinguibles en las secciones en planta de la Fig. 5 debido a su orientación paralela a esos cortes. Por último, puede observarse una discontinuidad lateral poco clara, que corresponde a la anomalía C. Las reflexiones B, señaladas en la Fig. 5, no son distinguibles en las secciones verticales debido a sus bajas intensidades respecto del entorno, mientras que en los cortes en planta, sus formas lineales facilitan la identificación de estas, al igual que la de las reflexiones A. La reflexión D tampoco es visible en las secciones verticales por ser paralela a las mismas y por su baja intensidad.

Al analizar el conjunto de las secciones verticales y cortes en planta obtenidos en el sector, se observa que la anomalía E posee una forma aproximadamente cilíndrica, similar a la que produciría la cisterna, y una extensión horizontal compatible con las esperada para ésta. Por estos motivos se la ha vinculado con la misma. El efecto que generaría el relleno ubicado dentro de la cisterna aparece a partir de los 30 cm, y continúa siendo evidente hasta la máxima profundidad alcanzada en esa área. Como resultados adicionales, las dos grillas de rasgos lineales A y B, mayormente visibles entre los 7 cm y 18 cm de profundidad, poseen profundidades y características geométricas y de intensidad que sugieren que las mismas corresponden a anomalías localizadas en las zonas del subsuelo entre las baldosas o cercanas a ellas. Estas anomalías pueden deberse, por ejemplo, a cambios en el material que rodea a las baldosas o, eventualmente, a la presencia de una malla de refuerzo muy delgada o marco. Por su lado, los rasgos F y G, detectados a partir de los 46 cm y 50 cm de profundidad, respectivamente, muestran características típicas de las reflexiones en tuberías. El rasgo C, detectado a partir de los 21 cm de profundidad, presenta una intensidad más débil que F y G y estaría vinculado con una discontinuidad en la estructura del piso. Algo similar podría ocurrir con el rasgo D, aún más débil que los rasgos anteriores, y visible a partir de los 34 cm de profundidad. También se detectó un conjunto de reflexiones aproximadamente

horizontales, probablemente relacionadas con distintas capas del piso (reflexiones H). Finalmente, se detectó un conjunto de difracciones que no poseen una clara continuidad a través del sector (reflexiones I) y que podrían deberse a distintas inhomogeneidades o inclusiones en el material de relleno (p. ej., piedras, fragmentos de ladrillos o mampostería, etc.), sin mayor importancia en cuanto a los objetivos del estudio.

Sectores 2 y 3 – Localización de la Galería.

Los Sectores 2 y 3 estaban localizados en el área en la cual se esperaba encontrar la galería. Las ubicaciones de estos sectores, contiguos entre sí, es la indicada en la Figura 3a. En la Figura 3d puede verse un esquema detallado de ambos sectores.

El Sector 2 tiene un ancho de 7.70 m y un largo de 5.10 m. En el mismo se adquirieron 78 líneas de 5.10 m de longitud, orientadas en la dirección longitudinal del patio que, nuevamente, fue asociada con el eje y de coordenadas. El Sector 3 tiene un ancho de 2.30 m y un largo de 4.95 m. En él se adquirieron 24 líneas de 4.87 m de longitud en la dirección y.

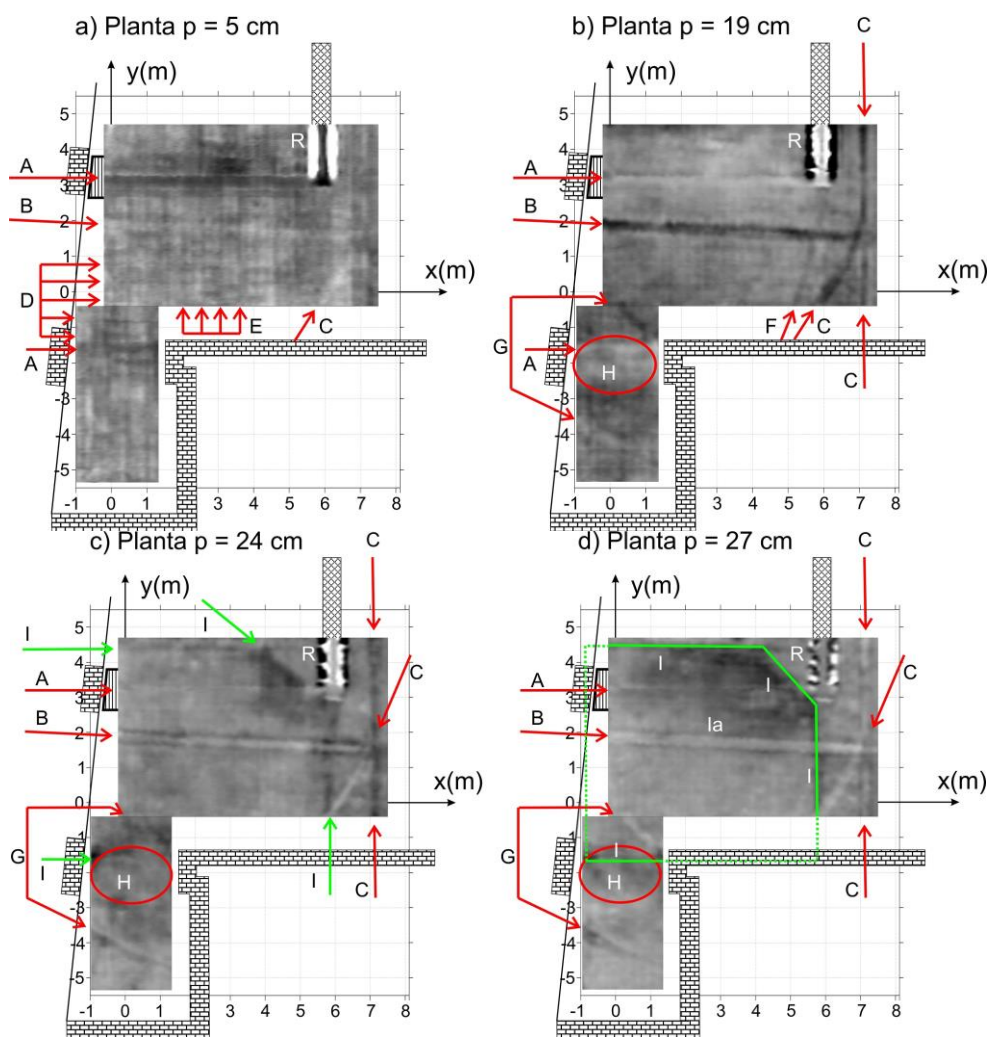


Figura 7. Cortes en planta a distintas profundidades. Las flechas, líneas y elipses indican las principales reflexiones. En verde se señalan las reflexiones vinculadas con la galería.

Figure 7. Slices at different depths. Arrows, lines and ellipses indicate the most important reflections. Reflections related to the gallery are marked in green.

En la Figura 7 se muestran algunos de los cortes en planta obtenidos para estos sectores. Las principales reflexiones detectadas se marcaron sobre ellos, usando criterios similares a los del Sector 1. Con líneas y flechas de color verde se resaltan las reflexiones vinculadas con la galería, tal como se discutirá más adelante. Los rasgos detectados en los Sectores 2 y 3 son más numerosos que en el Sector 1. En las Figs. 7a a 7d se puede observar lo siguiente:

En el corte a $p = 5$ cm, distintos rasgos lineales aislados, denominados A, B y C, y dos conjuntos de rasgos lineales paralelos y equidistantes, uno dispuesto a lo largo de la dirección x, y otro a lo largo de la dirección y, denominados D y E, respectivamente. Ambos conjuntos, D y E, presentan una distancia entre rasgos de aproximadamente 50 cm, tal como ocurría con los conjuntos A y B detectados en el Sector 1. Por otra parte, se observa el efecto de la rejilla metálica del desagüe que corre a lo largo del patio (reflexión R).

A profundidad $p = 19$ cm siguen observándose los rasgos A, B y C antes mencionados. En el caso del rasgo C, puede distinguirse que el mismo está compuesto por tres ramas. También pueden observarse otros reflectores: un rasgo lineal denominado F, un par de rasgos lineales con formas más irregulares que las anteriores, llamados genéricamente G, y un área con mayor intensidad que el entorno, denominada H.

En el corte a $p = 24$ cm comienza a delimitarse un área poligonal, cuyos bordes coinciden con los rasgos lineales identificados como I, y que a profundidades mayores presentará características bien definidas. Esta área y los rasgos I más adelante serán vinculados con la galería.

En el corte a $p = 27$ cm, el área antes mencionada ha quedado bien delimitada. La misma ha sido llamada la.

A profundidad $p = 41$ cm, dentro del área la se hace visible un conjunto de rasgos lineales paralelos entre sí, dispuestos aproximadamente en la dirección del eje x, con un espaciado regular entre ellos de 25 cm. Estos reflectores han sido denominados Ir. Al igual que I e la, estos rasgos también serán vinculados con la galería en los próximos párrafos. Además, en el Sector 3, se detecta un nuevo rasgo lineal del tipo de los rasgos G, pero orientado en una dirección distinta a la de los dos anteriores. Por último, en el Sector 2, aparece un rasgo lineal J cerca de la rejilla R. La mayoría de estas reflexiones sigue siendo visible en el corte a $p = 54$ cm.

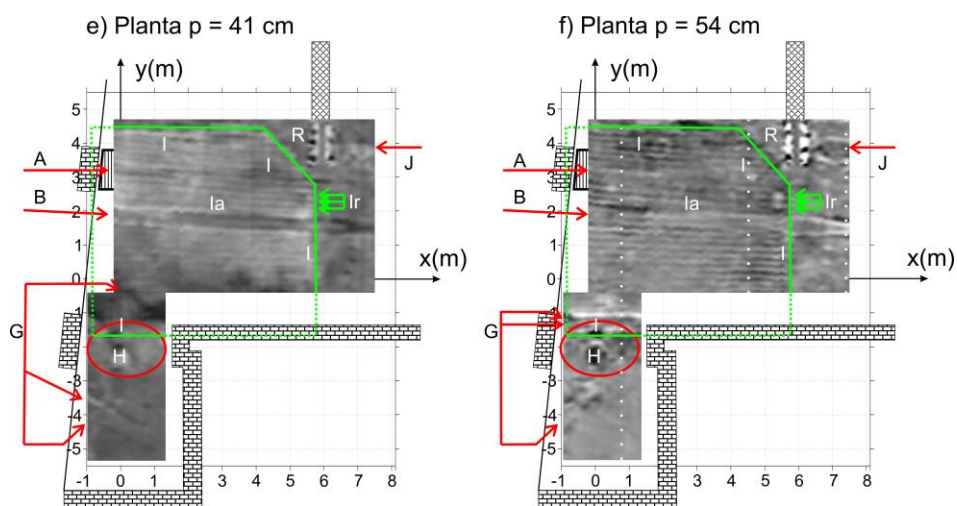


Figura 7 (cont.). Cortes en planta a distintas profundidades. Las flechas, líneas y elipses indican las principales reflexiones. En verde se señalan las reflexiones vinculadas con la galería. Las líneas blancas discontinuas indican las posiciones correspondientes a los radargramas mostrados en la Fig. 8.

Figure 7 (cont.). Slices at different depths. Arrows, lines and ellipses indicate the most important reflections. Reflections related to the gallery are marked in green. The dashed white lines indicate the corresponding positions of the radargrams shown in Fig. 8.

Para mostrar el aspecto que tienen estas reflexiones en las secciones verticales de datos, en las Figuras 8a, 8b y 8c se muestran cortes verticales correspondientes a $x = 0.8$ m, 4.9 m y 7.4 m, respectivamente. En estos radargramas pueden observarse las reflexiones A, B, H, I, Ir y J, así como algunas reflexiones del conjunto D. En la Figura 8a se ve que el área H está formada por un conjunto denso de reflexiones con formas bastante irregulares. Por otro lado, en las Figs. 8a y 8b se observa una reflexión aproximadamente horizontal, denominada lh, la cual se ubica unos centímetros por encima del conjunto de rasgos Ir y abarca toda el área la. Las reflexiones A, B y J aparecen con formas típicas de difracción, con vértices ubicados por encima de Ir en los dos primeros casos. Puede observarse que gran parte de las reflexiones correspondientes al conjunto de rasgos paralelos D prácticamente no son visibles en este tipo de representación debido a sus bajas intensidades respecto del entorno. Por último, en la Fig. 8a se observa una reflexión superficial y relativamente horizontal que ha sido denominada K, la cual no ha sido identificada en los cortes en planta debido a su forma.

Considerando el conjunto de cortes en planta y secciones verticales obtenidos, se observa que el área denominada la presenta una trama de reflexiones, Ir, con características similares a las que puede producir una grilla de varillas de refuerzo o, eventualmente, una superficie acanalada. Esta trama se ubica entre los 35 cm y 55 cm de profundidad. Asimismo, el área la está limitada en su perímetro por una sucesión de rasgos lineales, I, detectados unos centímetros por encima de la trama Ir. El conjunto I-Ir parece corresponder a una estructura ubicada justo sobre la galería, la cual habría servido como refuerzo cuando ésta fue cubierta luego de las

excavaciones mostradas en la Fig 2c. Asimismo, el área que ocupa la reflexión lh coincide con la de la trama lr, mientras que la profundidad de lh es unos pocos centímetros menor que la de lr, por lo que es probable que lh se origine en un tope de la estructura de refuerzo mencionada. Por otro lado, las tramas de reflexiones D y E, visibles entre los 4 cm y 10 cm de profundidad, poseen características similares a las de las tramas A y B detectadas en el Sector 1 y, como estas, parecen tener origen en la zona de las juntas entre baldosas o zonas inmediatas a las mismas. En el caso de los rasgos A, cuyos efectos son visibles desde la superficie hasta los 54 cm de profundidad, se observa que los mismos se originarían en discontinuidades del piso. Por su lado, las características de las reflexiones B, C, F y J indican la probable presencia de tuberías. La hipótesis de tuberías es también la más firme en relación con las reflexiones genéricamente denominadas G, detectadas en la zona cercana a los sanitarios actuales, aunque estos rasgos resultan bastante más confusos que los anteriores por su baja intensidad y su continuidad difícil de establecer. La reflexión K ha sido vinculada con la estructura del piso actual, debido a su forma y profundidad. Por último, la zona anómala H ha sido interpretada como posiblemente debida a un pozo de sección aproximadamente rectangular que incluiría escombros en su interior, además de las mencionadas tuberías que lo atraviesan.

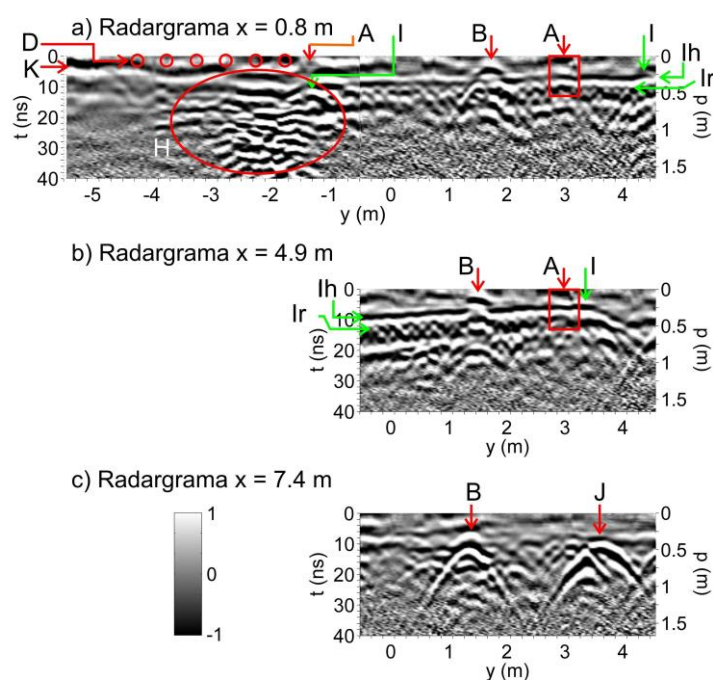


Figura 8. Secuencia de radargramas del Sector 2-3, para distintas posiciones a lo largo del eje x, donde se marcan las reflexiones más importantes.

Figure 8. Sequence of radargrams of Sector 2-3, for different positions along the x-axis, where the most important reflections are marked.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo una prospección con GPR de distintos sectores del patio de la Procuraduría de la Manzana de las Luces, con el objetivo principal de localizar una cisterna y una galería construidas entre los siglos XVII y XVIII, y el objetivo secundario de detectar estructuras de origen más reciente, incluyendo tendidos de tuberías y partes del piso actual.

Antes de la prospección definitiva se realizaron pruebas usando antenas blindadas con frecuencias centrales nominales de 250 MHz y 500 MHz, con el propósito principal de determinar la frecuencia más apropiada compatible con los requerimientos de profundidad de penetración y resolución para los objetos en estudio. La alta atenuación de las ondas de GPR producida por los contenidos apreciables de arcilla y humedad en el subsuelo llevó a que sólo con las antenas de 250 MHz fuera posible alcanzar una profundidad de penetración cercana a la deseada (~100 cm). La penetración máxima fue de 95 cm. Con estas antenas se obtuvo una resolución horizontal en el orden de los 25 cm, a una profundidad de 50 cm, y una resolución vertical de aproximadamente 10 cm. La penetración y las resoluciones alcanzadas son algo escasas para este tipo de aplicaciones, y podrían llegar a resultar insuficientes en otros casos de investigación similares.

A partir de los resultados mencionados se puso de manifiesto la importancia de realizar una evaluación previa de la frecuencia a utilizar en función de la penetración y la resolución requeridas. En general, los valores de

penetración y resolución obtenidos en suelos como el del sitio considerado en este trabajo, dependen fuertemente del contenido y tipo de arcilla presente en el mismo y de su grado de humedad (Jol, 2009). Por ejemplo, en zonas relativamente altas o intermedias de las márgenes de los ríos Paraná y de la Plata se obtuvieron penetraciones de más de 1.5 m, mientras que en zonas un poco más bajas donde aumentaron ligeramente las proporciones de arcilla y humedad, la penetración cayó a 0.5 m o menos (p. ej., Bonomo et al., 2013). El cálculo de penetraciones y resoluciones esperadas a partir de muestras de suelo es altamente complejo y probablemente infructífero en la gran mayoría de los estudios arqueológicos y de ingeniería civil, así como en algunas otras áreas de aplicación, debido al número de variables a considerar y a la alta fluctuación de las mismas en espacio y tiempo. Por ende, la realización de pruebas previas a la prospección definitiva, en condiciones de entorno lo más cercanas posibles a las definitivas, probablemente sea la mejor vía para evaluar dichos parámetros.

Las pruebas realizadas también permitieron seleccionar un espaciado entre líneas que garantizó un buen nivel de detalles en las secciones de datos, verticales y en planta, y optimizó los tiempos de la prospección. Una interlínea mayor hubiera disminuido la calidad de las secciones de datos, mientras que una menor hubiera producido un muestreo redundante, además de haber incrementado el tiempo de adquisición. En este sentido, si se dispusiese de tiempo suficiente, podría resultar útil adquirir un conjunto de datos alternativos usando una grilla idéntica a la utilizada en este trabajo, pero dispuesta perpendicularmente a la misma, o bien cambiar la configuración de antenas respecto de la original, para favorecer la reflexión en distintos tipos de interfases direccionales, incrementando su detectabilidad, según el caso. Por último, las pruebas también permitieron optimizar el incremento temporal y el tamaño de ventana temporal, de modo de que la adquisición definitiva de datos pudiese ser completada en el tiempo disponible y con holgura prudencial.

Durante la prospección definitiva, la configuración de líneas de sondeo, antenas y parámetros de GPR utilizados permitió definir, además de reflexiones intensas, otras con niveles de amplitud intermedios y bajos, incluyendo rasgos lineales débiles orientados perpendicularmente y paralelamente a las líneas de sondeo. La representación simultánea de los datos en las formas de secciones verticales y cortes en plantas favoreció la detección de los distintos tipos de reflexiones. Las secciones verticales permitieron detectar reflexiones extensas y aproximadamente horizontales, no visibles en el otro tipo de representación, mientras que los cortes en plantas hicieron visibles difracciones de baja intensidad y debidas a distintos tipos de rasgos lineales. Las reflexiones detectadas a partir de ambos tipos de gráficos fueron correlacionadas entre sí, clasificadas y finalmente interpretadas en términos de sus probables orígenes. La metodología empleada permitió hallar la ubicación de la cisterna, con una precisión de unos pocos centímetros, lo que demuestra la potencialidad de la misma aún en situaciones relativamente complejas. Las señales provenientes de la cisterna ocuparon un área horizontal de aproximadamente 1 m² en el denominado Sector 1. Esto representa un 1/30 del área en la cual se estimaba que podía hallarse la misma, lo cual da una idea de lo útil que puede resultarle este tipo de información a un arqueólogo o ingeniero, ya que cada metro cuadrado de piso que se remueve demanda considerables esfuerzos físicos, presupuestarios y de tiempo. En este sector también se detectaron dos probables tuberías, cuyas trazas fueron definidas con precisión. Asimismo, se localizaron diversas discontinuidades en la estructura del piso, y la posible presencia de una malla delgada de refuerzo en una parte del piso próxima a la superficie.

También se logró determinar la ubicación de la galería, en una parte de los Sectores 2-3. Esto fue realizado en forma indirecta, a partir de la localización de una estructura de aproximadamente 40m² ubicada justo sobre la misma, la cual habría servido como refuerzo cuando la galería fue cubierta luego de las excavaciones, durante la construcción del patio actual. En estos sectores se localizaron tendidos de varias tuberías, así como distintas áreas de discontinuidad en la estructura del piso. Los niveles de detalles y la precisión obtenidos resultarán de importancia para las actividades de investigación arqueológica que puedan realizarse en el sitio en un futuro, ya que permitirán planificaciones más detalladas de las mismas. Dicha información también resultará de utilidad en cuanto a la implementación de medidas para la preservación de las estructuras históricas, frente a los procesos ambientales que actúan sobre ellas y ante obras arquitectónicas o de ingeniería civil que eventualmente se lleven a cabo en el lugar.

Agradecimientos: Agradecemos especialmente a la Arq. Nani Arias Incollá quién nos brindó la oportunidad de realizar este trabajo. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CONICET y ANPCyT.

BIBLIOGRAFÍA

- Apostolopoulos, G., (2014). Combined geophysical investigation for the detection of ancient metallurgical installations near Keratea City, Greece. *Journal of Applied Geophysics*, 104: 17-25.
- Banks, I., (2012). Geophysics and the Great Escape. *The Leading Edge*, 31(8): 916–920.
- Bonomo, N., A. Osella, H. Martinelli, M. de la Vega, M., G. Cocco, F. Letieri, y G. Frittegotto, (2012). Location and characterization of the Sancti Spiritus Fort from geophysical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 83: 57–64.

- Bonomo, N., A. Osella, and N. Ratto, (2013). GPR investigations at an Inca-Spanish site in Argentina. *Near Surface Geophysics*, 11: 449-456.
- Bonomo, N., D. Bullo, A. Villela, and A. Osella, (2015). Ground Penetrating Radar investigation of the cylindrical pedestal of a monument. *Journal of Applied Geophysics*, 113: 1-13.
- Conyers, L., and D. Goodman, (1997) *Ground Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. Altamira Press, Walnut Creek, CA.
- Di Mauro, D., L. Alfonsi, V. Sapia, S. Urbini, 2014. A neighborhood revealed by geophysical prospection: An example of urbanization at the Phoenician-Punic settlement of Mozia (western Sicily, Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 104: 114-120.
- Eppelbaum, L., (2011). Study of magnetic anomalies over archaeological targets in urban environments. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36: 1318-1330.
- Furlong, G., (1994). *Los Jesuitas y la Cultura Rioplatense*. Chapter 14: Arquitectos, escultores y pintores, Capítulo 19: Colegios, escuelas y bibliotecas. Editorial Biblos, Buenos Aires. 208 p.
- Hawamdeh, A., R. Jaradat, and Z. Alsaad, (2015). Integrated application of geophysical methods for investigation of the Al-Berkat archaeological site in the city of Jerash, Jordan. *Environmental Earth Sciences*, 73(7): 3665-3674.
- Jol, J., (2009). *Ground Penetrating Radar: theory and applications*. Elsevier, Amsterdam, pp. 524.
- Leucci, G., N. Masini, R. Persico, 2012. Time-frequency analysis of GPR data to investigate the damage of monumental buildings. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9: S81-S91.
- Levinton, N., (2012). *Arquitectura de la Compañía de Jesus en Buenos Aires: la creación y el paso inclemente del tiempo*. Capítulo 3. Editorial Contratiempo, Buenos Aires. 280 p.
- Martinez-Lorenzo, J., C. Rappaport, and F. Quivira, (2011). Physical limitations on detecting tunnels using underground-focusing spotlight synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49: 65-70.
- Martino, L., N. Bonomo, E. Lascano, A. Osella, and N. Ratto, (2006). Electrical and GPR prospecting at Palo Blanco archaeological site, northwestern Argentina. *Geophysics*, 71(6): B193-B199.
- Mayochi, E., N. Poitevin, y J. Gazaneo, (2008). *Túneles de Buenos Aires, los túneles de la Manzana de las Luces*. Editorial Instituto de Investigaciones Históricas, Buenos Aires, 3rd. Edition. 34 p.
- Osella, A., P. Martinelli, V. Grunhut, M. de la Vega, N. Bonomo, and M. Weissel, (2015). Electrical imaging for localizing historical tunnels at an urban environment. *Journal of Geophysics and Engineering*, 12, 674-685.
- Piro, S., and S. Campana, (2012). GPR investigation in different archaeological sites in Tuscany (Italy). Analysis and comparison of the obtained results. *Near Surface Geophysics*, 10: 47-5.
- Rabbel, W., E. Erkul, H. Stümpel, T. Wunderlich, R. Pašteka, J. Papco, P. Niewöhner, S. Bariş, O. Çakin, and E. Pekşen, (2015). Discovery of a byzantine church in Iznik/Nicaea, Turkey: An educational case history of geophysical prospecting with combined methods in urban areas. *Archaeological Prospection*, 22(1), 1-20.
- Reynolds, J., (1998). *An introduction to applied and environmental geophysics*. Ed. John Wiley & Sons, Nueva York, 796 p.
- Urban, T., C. Vella, E. Bocancea, C. Tuttle, and S. Alcock, (2014). A geophysical investigation of a newly discovered Early Bronze Age site near Petra, Jordan. *Journal of Archaeological Science*, 42(1): 260-272.
- Weissel, M. (2010). Informe Arqueológico N° 4 – Marzo. Plan integral de intervenciones Manzana de las Luces 2010 – 2016. Unidad de Gestión y Proyecto Plan Integral de Obras Manzana de las Luces. Comisión Nacional de Museos, de Monumentos y Lugares Históricos, 27 p.
- Yilmaz, O., (2000). *Seismic data analysis – Processing, inversion and interpretation of seismic data*. Society of Exploration and geophysicists, Tulsa, EEUU, 2017p.