

II.2.-APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

BENTO CALDEIRA¹, RUI OLIVEIRA², PEDRO TRAPERO FERNÁNDEZ³,
JOSÉ BORGES¹

RESUMEN

En este capítulo presentamos la descripción de los resultados de una prospección con radar de penetración terrestre (Georradar) realizada en Villasviejas del Tamuda, con objeto de complementar la información geofísica de la que ya se disponía en el proyecto. Para conocer con mayor certeza el tipo de estructuras arqueológicas enterradas fue usada una metodología de recogida de datos que permite el procesamiento con vista a la producción de modelos tridimensionales del subsuelo. Se han realizado un total de 6 áreas periféricas a los dos recintos principales de los que se compone el yacimiento y donde previamente ya se habían realizado otras prospecciones con técnicas como la magnética. El equipo de la Universidad de Évora ha utilizado un GPR GSSI de 400 MHz prospectando aproximadamente 2400 m². Se trata de un proyecto realizado con malla pero georreferenciado con GPS de precisión. Los modelos tridimensionales obtenidos, identifican claramente la existencia de distintos reflectores relevantes en el subsuelo a una profundidad aproximada de 2,5 m. Las continuidades laterales revelada por algunos de estos reflectores sugieren que las estructuras arqueológicas que interpretamos se corresponden con diferentes tipos de edificaciones bien conservadas. Junto con estos reflectores constatamos una diversidad de otras alteraciones con distribución espacial mal definida que interpretamos deben corresponder con estructuras antiguas. Se describe el método y equipamientos analizados, así como el análisis de las diferentes reflexiones detectadas, para dar unas pautas interpretativas a tenor de los resultados.

PALABRAS CLAVE

Villasviejas del Tamuja, Georradar, Poblado de la edad del Hierro, Geofísica aplicada a arqueología.

¹ Departamento de Física da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora e Instituto de Ciências da Terra (ICT). bafcc@uevora.pt, jborges@uevora.pt

² Instituto de Ciências da Terra, Universidade de Évora. rui@uevora.pt

³ Departamento de Historia, Geografía y Filosofía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Cádiz. pedro.trapero@uca.es

ABSTRACT

In this chapter, we present the results of Ground Penetrating Radar (GPR) survey carried out in Villasviejas del Tamuja, to complement the geophysical information already available in the project. To know with greater certainty the type of buried archaeological structures, a data collection methodology was used that allows processing intending to produce three-dimensional models of the subsoil. A total of 6 areas have been made peripheral to the two main enclosures of which the site is composed and where other surveys had previously been carried out using techniques such as magnetics. The team from the University of Évora used a 400 Mhz GPR GSSI prospecting approximately 2400 m². This is a project carried out with a mesh but georeferenced with precision GPS. The three-dimensional models obtained identify the existence of different relevant reflectors in the subsoil at an approximate depth of 2.5 m. The lateral continuities revealed by some of these reflectors suggest that the archaeological structures that we interpret correspond to different types of well-preserved buildings. Together with these reflectors, we can see a diversity of other alterations with a poorly defined spatial distribution that we interpret must correspond to ancient structures. The method and equipment analysed, as well as the analysis of the different reflections detected, are described to give some interpretative guidelines based on the results.

KEYWORDS

Villasviejas del Tamuja, Ground Penetrating Radar, Town of the Iron Age, Geophysics applied to archaeology.

II.2.1.-Introducción

En las últimas décadas, una línea destacada del plan de acción de las ciencias físicas se ha centrado en apoyar el desarrollo y la aplicación de las técnicas geofísicas no invasivas para cartografiar y analizar con precisión las huellas de los registros arqueológicos. Dentro de estas técnicas, el georradar es el método electromagnético más utilizado y reciente en Arqueología (Vickers & Dolphin, 1975) y uno de los más utilizados en la actualidad, debido a su rápida adquisición y su alta resolución de datos. El alcance y la resolución varían dependiendo de la frecuencia de las antenas que se utilizan con una oscilación entre 100 MHz y 1,6 GHz (Conyers & Goodman, 1997), lo que permite la detección de estructuras enterradas entre 5 cm y 70 m de profundidad. El procesamiento de los datos registrados nos da la identificación de estructuras en secciones geológicas y, en condiciones de procesamiento adecuadas, la producción de modelos 2.5D que permiten la caracterización geométrica lateral y de profundidad de las estructuras identificadas.

Las prospecciones geofísicas presentadas en este capítulo forman parte de una colaboración entre el Grupo Geofísico de la Universidad de Évora y los equipos del IAM y la Universidad de Extremadura que investigan el yacimiento. Esta exitosa experiencia servirá para cubrir en la presente monografía la aportación que el uso del Radar de Penetración en el Suelo - GPR ha proporcionado para evaluar la presencia de estructuras subterráneas con potencial arqueológico y aclarar su distribución espacial en el subsuelo en Villasviejas. Como ya se señaló en la introducción, en el sitio este método fue empleado en trabajos de prospección previos, desarrollados por el CAI de Arqueometría

II.2.-APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

de la Universidad Complutense. Con posterioridad se realizaron nuevas campañas empleando el propio equipamiento del IAM, y que serán objeto de publicación en el futuro.

Para comprender mejor las estructuras arqueológicas, el equipo de geofísica comenzó por analizar bibliografía sobre la geología y la historia del sitio (Díez Balda *et al*, 1999; Hernández *et al*, 2009; De Tena *et al*, 2019; Mayoral *et al*, 2019; De Tena *et al*, 2020).

La planificación de la campaña se hizo teniendo en cuenta la información reunida, según la cual se decidieron los métodos de adquisición a utilizar y las configuraciones a aplicar. La elección de los sitios a ser prospectados se hizo en conjunto con el equipo del proyecto, en función de la necesidad de contrastar diversos problemas planteados por la investigación previa en el sitio. En función de estas preguntas, se eligieron cinco áreas de estudio que fueron debidamente delimitadas.

En estas áreas se definieron perfiles rectilíneos paralelos para las cuadrículas de exploración. En el caso del GPR, estos perfiles se planificaron para ser marcados y recorridos con una separación de 0,5 m dispuestos de manera que cubran completamente las cinco áreas de estudio del Castro que conforman un área total de aproximadamente 2500m². Se utilizó un sistema GSSI SIR 3000, equipado con una antena de 400MHz, montada en una tarjeta con una rueda taquimétrica. La ubicación precisa de las cuadrículas y perfiles individuales se georreferenció mediante la técnica de geodesia espacial del GNSS en modo diferencial. La campaña de recopilación de datos se llevó a cabo los días 18 y 19 de junio de 2019. El trabajo comenzó con la marcación de las cuadrículas planificadas. A partir de entonces el equipo procedió a examinar los registros de acuerdo con la planificación antes expuesta.

II.2.2.-Método y equipamientos

El Radar de Penetración Terrestre, también llamado georradar o GPR, es una técnica geofísica que utiliza la propagación de ondas electromagnéticas (OEM) a través del suelo, para extraer de ellas información que permita la identificación de estructuras y/o discontinuidades en su interior (Annan, 2001). Las discontinuidades que afectan a la propagación del OEM son variaciones de tres cantidades electromagnéticas de materiales: permisividad dieléctrica relativa, conductividad eléctrica y permeabilidad magnética. Los fundamentos teóricos de los métodos electromagnéticos, como el GPR, resultan de la aplicación de las ecuaciones de Maxwell, la teoría físico-matemática que explica cómo el campo electromagnético evoluciona en un entorno que experimenta una perturbación en un determinado lugar e instante. Es decir, la aplicación de las ecuaciones de Maxwell a un medio físico como el suelo, bajo ciertas condiciones electromagnéticas (permisividad dieléctrica relativa, conductividad eléctrica y permeabilidad magnética) nos permite calcular cómo un pulso de onda producido en una antena GPR se propaga a través de ese medio en un determinado instante y lugar. La forma en que se propaga la onda depende de las propiedades del medio. Por lo tanto, la medición de la onda puede ser inferida de las propiedades electromagnéticas de los lugares donde la onda se propaga. Los que más influyen en la propagación de la onda son la permisividad dieléctrica relativa (o constante dieléctrica) y la conductividad eléctrica, siendo el GPR sensible a estas variaciones.

En la práctica, el GPR funciona con pulsos de ondas electromagnéticas (EM) transmitidos por una antena (Tx) al subsuelo. Cuando estos pulsos, que viajan bajo tierra

encuentran zonas donde la constante dieléctrica varía (discontinuidades o estructuras), una parte de la energía del pulso, mientras varía la dirección de propagación, continúa su camino a través del nuevo medio (refracción). Por otro lado, parte de la energía del pulso se refleja en la superficie de separación y vuelve a la superficie según una dirección dada por la ley de Snell (Annan, 2001). Esta parte reflejada es devuelta y recibida por la antena (Rx), con una amplitud mayor cuanto mayor sea la diferencia de la constante dieléctrica entre el material reflejado y el entorno circundante. El instante de llegada de este pulso está relacionado con la distancia del reflector a la antena (Milsom 2003; Annan 2008). Así, el GPR permite detectar la presencia de objetos en el suelo y determinar la distancia a la que se encuentran de la antena. Sin embargo, como cualquier otro método de medición, está limitado en la detección de cuerpos y capas geológicas. Una de estas limitaciones es la distancia a la que los objetos pueden ser detectados. Otra es la dimensión que los objetos pueden tener para ser detectados. La distancia a la que se puede detectar el objeto depende de la frecuencia del pulso electromagnético utilizado y de la conductividad eléctrica del medio. Cuanto más baja es la frecuencia de las antenas, mayor es la penetración, pero si el medio tiene una alta conductividad eléctrica (por ejemplo, arcilla o suelo húmedo) la atenuación de los pulsos de onda aumenta y, en consecuencia, la distancia que estos pulsos pueden recorrer en el medio, antes de ser totalmente atenuados, es menor. El concepto de resolución indica la distancia mínima entre los reflectores o el tamaño mínimo de un cuerpo que puede distinguirse en los pulsos de georradar con una cierta frecuencia f_c . Considerando la distancia entre las respuestas de objetos muy cercanos, la separación en el tiempo es proporcional a la diferencia de distancias a los objetos dividida por la velocidad de propagación del medio. El límite de resolución del método es determinado por la ecuación de Fresnel (Annan 2005),

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{r \cdot v}{2f_c}}$$

donde Δl se corresponde con el tamaño mínimo del objeto que puede ser detectado a una distancia r desde la antena del GPR. f_c es la frecuencia central del pulso electromagnético, que se propaga en el subsuelo a una velocidad v . Esta, en contexto geológico se puede calcular conociendo la constante dieléctrica del material ϵ_r con la siguiente relación $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$

La información proporcionada por esta técnica se representa en secciones de radar, llamados radargramas. En ellos la coordenada X representa la línea de exploración de la antena, mientras que la Y es el tiempo de propagación de la onda electromagnética. La amplitud de cada pulso reflejado está directamente relacionada con el contraste entre las propiedades dieléctricas de los materiales o estructuras detectados. La detección se basa en la diferencia de reflexión en la interfaz de dos materiales con constante dieléctricas muy distintas. La interpretación de los perfiles de reflexión permite una estimación del lugar de objetos enterrados. Estos perfiles pueden unirse para hacer un mapa en tres dimensiones con las amplitudes de reflexiones. Se puede visualizar bien en 3D o como cortes unidos en 2D (Nuzzo *et al.* 2002).

Para arqueología se utiliza un transmisor y receptor separados por una distancia fija, imitando un dispositivo experimental de reflexión de desplazamiento común. Actualmente los sistemas georradar han mejorado, permitiendo diversos conjuntos de antenas (*arrays*) que permiten la adquisición más rápida de datos, uniendo múltiples antenas de una misma frecuencia; o en su caso combinando antenas de frecuencia diferente, por lo que se consiguen distintas resoluciones en profundidad. En un caso nos

II.2.-APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

interesa el tiempo de prospección, mientras que en el otro conseguimos más datos para la investigación.



Fig. 0-1 Imagen del equipo GPR utilizado en la prospección geofísica.

II.2.2.1.-Equipamientos Utilizados

En esta exploración georradar, se ha utilizado una única antena GPR de la empresa Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI), con un controlador SIR-3000 GPR y con una antena mono canal de 400 MHz, montado en un carro con tacómetro calibrado (Fig. 1). La Fig. 2 representa la configuración utilizada para las mediciones GPR.

Modo de adquisición	Muestreo de Bits	Scans por m	Rango de tiempo	Muestras por trazo	Ganancia	Filtro vertical (IIR)*	Ajustes de superficie
Distance	16 bits/sampl e	50	60 ns	1024	4 Pts (20 dB; 29 dB; 49 dB; 58 dB)	LP** = 800 MHz HP** = 100 MHz	Offset = 4.3 ns; Surface = 7%

*IIR= Infinite impulse response filter; **LP= Low Pass filter; **HP= High Pass filter

Fig. 0-2 Configuración del georradar utilizado en la prospección en Villasviejas del Tamuja.

El equipo GPS utilizado de la marca Spectra es el modelo EPCH 50 (Fig. 3). Para el levantamiento fue usado el sistema de coordenadas UTM WGS-1984, Zona 29.

II.2.2.2.-Método de prospección

El método empleado en la prospección geofísica parte del principio de realizar exploraciones GPR con calles muy estrechas y paralelas unas de otras para poder construir

una visual en planta de las posibles estructuras detectadas. Para ello se han planteado una serie de líneas paralelas, dejando un espacio entre ellas de 0,5 m. Este espaciado es suficiente para poder localizar estructuras que tengan un ancho similar a este mismo patrón de prospección, como puede ser una estructura muraria.

El método para definir las áreas de prospección ha sido el siguiente. Se han definido unas cuadrículas a través de triangulación con cintas métricas y marcando sus límites con estacas. En estas áreas se ha tirado una línea de referencia para hacer las pasadas todas paralelas. La prospección se ha realizado en malla, de manera que se han tomado con GPS centimétrico los límites de la misma, para poder colocarla con precisión en el espacio. La exploración se realiza utilizando un eje de coordenadas de referencia y haciendo zigzag, es decir, prospeccionando en una dirección y en otra en el eje Y, de manera que ahorra tiempo en la exploración. Los límites de la cuadrícula planteada son tomados con precisión con el GPS diferencial, de manera que después se puede georreferenciar la planta prospectada en una herramienta SIG.



Fig. 0-3 Equipo GNSS utilizado en la prospección geofísica.

II.2.2.3.-Procesamiento de los datos GPR

El procesado de datos se ha realizado con el software comercial RADAN-7 (GGSI, Inc.) en dos grandes fases. La primera consiste en la individualización de varios transectos para definir en ellos las fases del procesado y los parámetros a introducir para poder visualizar con buena definición las reflexiones en los perfiles. En este caso concreto de estudio la calidad de la señal ha sido buena, con lo que un flujo de trabajo tradicional ha sido aplicado (Tabla 2), con el objeto de incrementar la amplitud de la señal (corrección de ganancia) y, de manera más importante, incrementar la resolución vertical y lateral (operación de deconvolución). En una segunda fase, el procesado que ha sido definido en la fase de parametrización se ha aplicado a todos los transectos y generando el mapa 3D con el promedio de las amplitudes de los perfiles de reflexión (Conyers 2015). La Fig. 4 muestra los pasos de procesamiento fijos y la Fig. 5 un radargrama procesado en el que se marcan algunos elementos interpretativos. Nos gustaría señalar que la perturbación del tiempo recorrido producida por la variación topográfica es muy pequeña y no necesita corrección.

II.2.- APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

A: Corrección de la superficie	B: Filtro horizontal para eliminar el ruido de fondo	C: Corrección de ganancia exponencial	D: Deconvolución predictiva	E: Migración
-0.2 ns	Longitud = 201 scans	Np = 5 (6;10;13;12;9)	OP longitud* = 31; Lag* = 3; PW* = 10%; GN* = 4	Constante dialéctrica = 8

*Parám de la deconvolución: OP=Longitud del operador (tamaño del filtro en términos del número de muestras); Lag=Lagitud de predicción; PW = Preblanqueo; GN= Ganancia total.

Fig. 0-4 Flujo de proceso utilizado. Parámetros relevantes utilizados en el procesamiento. Se ha considerado adecuada una constante dialéctrica de 8, valor que permite convertir el tiempo en profundidades

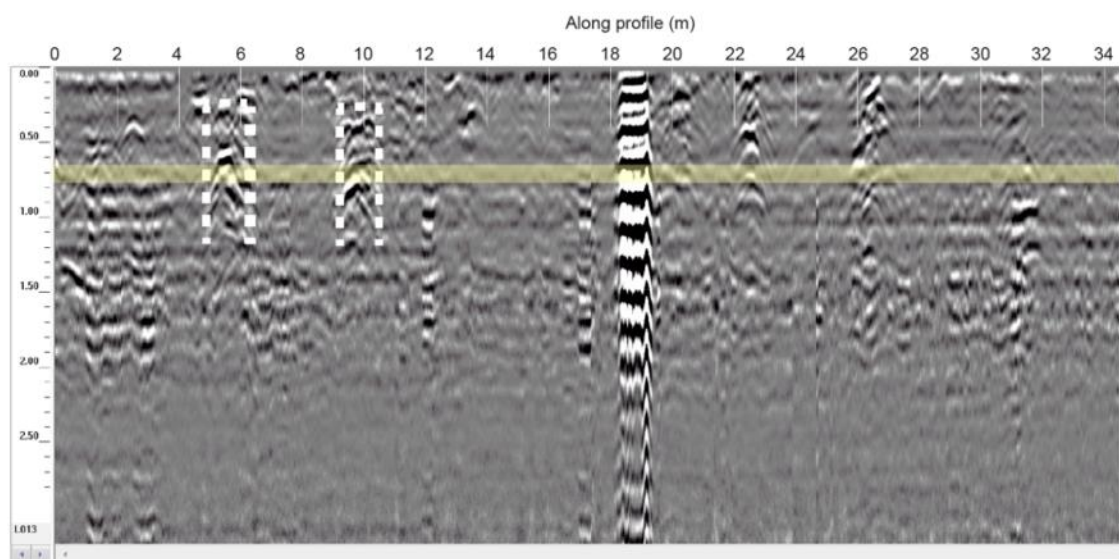


Fig. 0-5 Radargrama procesado con indicación de elementos interpretativos asimilables con líneas de trazos discontinuos. Los números 1, 2, 4, 5 y 6 se corresponden con vestigios de habitaciones. El elemento 3 debe corresponder con un objeto metálico enterrado a ras de superficie, cuya curva horizontal es interpretada como si fuera interfaz suelo-roca.

Los modelos de amplitud en 3D calculados con el programa RADAN se exportaron en formato ASCII utilizando cuadrículas rectangulares $L \times W \times 2m_3$, donde L es la longitud del área prospectada y W su anchura. El tamaño de la malla exportada fue $dx = 0,18m$, $dy = 0,06m$, $dz = 0,1m$. Los datos se importaron posteriormente con el software Voxler (Golden Software. LLC) y se remuestrearon en una malla cúbica con celdas cuadradas de $0,2m$ de lado, teniendo cuidado de aplicar un filtro de mediana 3D que garantice un contenido de frecuencia espacial similar. Se utilizaron dos enfoques para visualizar estos resultados. En el primero, se producen imágenes 3D de volúmenes cuya amplitud de reflexión está en un rango seleccionado. A las áreas donde las amplitudes de reflexión están fuera de este rango se les asigna transparencia (Fig. 6). En el segundo, se representan cortes horizontales de la distribución de amplitudes absolutas correspondientes a la unión de las amplitudes contenidas en una banda vertical de $0,2m$ de espesor del modelo GPR-3D (que llamamos cortes horizontales). En el caso de Villasviejas, el proceso de creación de los cortes horizontales se repitió cada $0,15m$ de profundidad, con el resultado de que los cortes horizontales adyacentes se obtienen con una superposición parcial del 25%. Se utilizó una malla cuadrada ($Dx=Dy$) para la

proyección (Fig 7). En la paleta de colores utilizada en la Fig. 6 y 7, las zonas más oscuras corresponden a reflejos de mayor amplitud, es decir, producidos por materiales con mayor contraste dieléctrico en relación con el ambiente circundante.

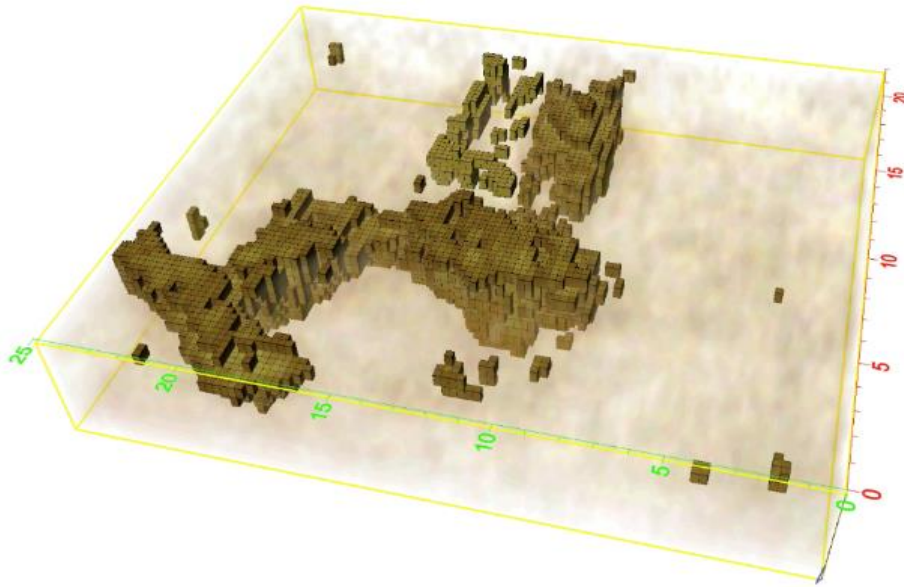


Fig. 0-6 Representación de los volúmenes de un modelo GPR 3D con amplitud de reflexión en un rango seleccionado, haciendo transparentes las amplitudes restantes del modelo.

II.2.3.- Áreas de estudio

Partiendo de las problemáticas para interpretar el yacimiento arqueológico se han seleccionado una serie de áreas de estudio representadas en la Fig. 9. En todos los casos se han realizado con la idea de complementar la documentación existente con otras técnicas, especialmente la prospección magnética. Por tanto, la elección de las áreas sigue la de las prospecciones previas, intentando esclarecer áreas donde la magnética no ha permitido ver estructuras o, en su defecto, donde todavía quedan cuestiones a interpretar. De manera más específica, las cuestiones a valorar en esta campaña fueron las siguientes:

- Necesidad de contrastar la hipótesis de que en el frente Sur de la fortificación del recinto A existiese una doble línea de muralla, fruto de dos fases sucesivas en la configuración de las defensas.
- Necesidad de contrastar la hipótesis de que al sur de estas defensas y ya fuera del recinto A existieran construcciones.
- Necesidad de adquirir datos con un método complementario a los ya empleados (geomagnética y tomografía) para lograr una caracterización más precisa de las construcciones aisladas en el extremo Norte del recinto B.

II.2.- APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

- Necesidad de definir mejor la fisonomía de la cerca amurallada en el extremo Sureste del recinto A, comprobando la posible existencia de un acceso flanqueado por otro bastión previamente no documentado.

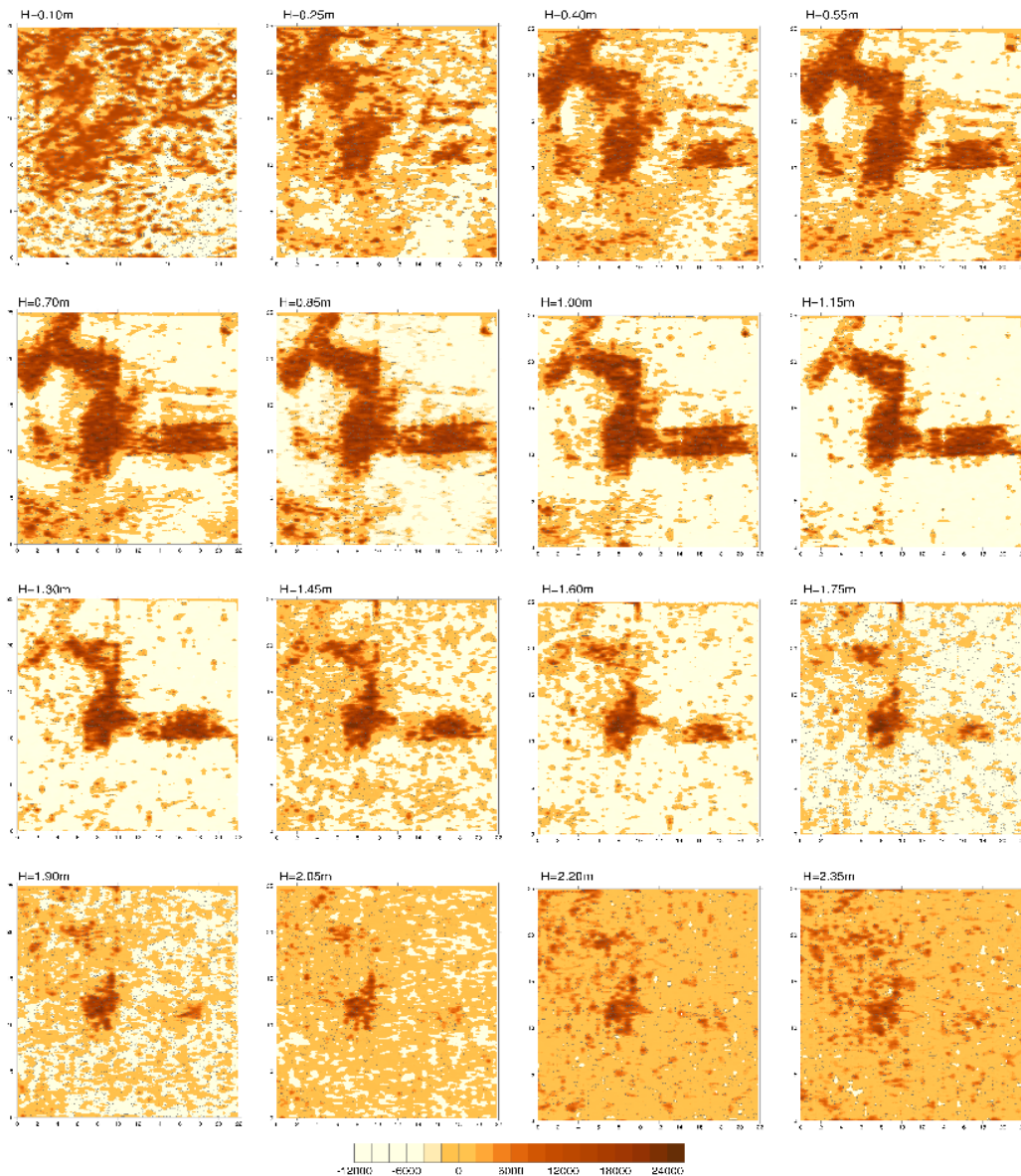


Fig. 0-7 Representación del mismo modelo de la figura 6, segmentado en cortes horizontales de grosor Dz

Para trabajar sobre los dos primeros puntos se definieron las áreas 1 y 2 a caballo entre el estrechamiento que separa los recintos A y B y el talud formado por la muralla del recinto A. Por su parte el segundo punto fue abordado con la delimitación del área 3, en un espacio de pendiente creciente que vierte hacia lo que teóricamente (pues de momento carecemos de evidencias materiales) sería el límite septentrional de la cerca amurallada del recinto B. Nuestro mayor interés en este punto era aclarar la fisonomía de uno de los edificios previamente detectados, aspecto que como veremos en la sección tiene importantes implicaciones sobre el carácter de la ocupación de este recinto en sus etapas finales.

Finalmente, en las áreas 4 y 5 se orientaron a contrastar el último punto señalado: la definición del tramo de la muralla que circunscribe el recinto B en su extremo SE, donde la colmatación del terreno realizada por las labores agrícolas había enmascarado de forma casi total la orografía original del recinto.

La prospección se ha realizado en dos días distintos realizándose tres prospecciones, áreas 1, 2 y 3 el día 18-06-2019; y otras tres, áreas 4, 5 y 6 el día 19-06-2019. La Fig. 8 caracteriza cada una de las áreas prospectadas en términos de dimensiones y otros parámetros característicos de los transectos.

Ref.	Dimensiones [m ²]	Nº de transectos	Orientación de los transectos	Origen de los ejes de referencia
Área 1	24 x 20	49	Norte-Sur	Noreste
Área 2	06 x 43	13	Norte-Sur	Noreste
Área 3	25 x 34	51	Norte-Sur	Sudoeste
Área 4	22 x 25	45	Este-Oeste	Noroeste
Área 5	16.5 x 24	34	Este-Oeste	Noroeste
Área 6(*)	No regular	14	Este-Oeste	-

(*) los transectos fueron realizados a intervalos no definidos para ver la continuación de las reflexiones detectadas en las dos áreas anteriores

Fig. 0-8 Áreas prospectadas con indicación dimensiones, número de transectos y orientación.

II.2.4.-Resultados de la exploración

Los resultados del estudio del GPR se interpretaron a partir del análisis comparativo de dos tipos de elementos gráficos: algunos radargramas procesados, en los que se intenta interpretar un significado a las diversas perturbaciones de amplitudes detectadas, y la observación de los cortes horizontales del modelo GPR-3D, a diferentes profundidades. En estos cortes, tratamos de detectar alineaciones de reflexiones que puedan sugerir la correspondencia con estructuras enterradas. El análisis de los dos tipos de salidas gráficas se realizó con los resultados de todas las áreas prospectadas y luego se caracterizan individualmente.

II.2.4.1.-Área 1.

Los resultados del área 1 se recogen en las figuras 10 y 11. Las secciones horizontales de la Fig. 6 muestran que, aunque la exploración se realizó en dirección Norte-Sur, las imágenes de las diferentes pasadas se pueden colocar respecto a los ejes de coordenadas. Esto significa que el proceso fue efectivo para minimizar este giro. Otra observación relevante de esta figura es la existencia de alineaciones de reflejos desde muy cerca de la superficie (0,10 m) hasta unos 2,35 m. En las secciones horizontales correspondientes a las profundidades en las que se identificaron importantes reflectores, éstos se señalaron a través de rectángulos. Además, para interpretarlos mejor, los perfiles

II.2.-APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

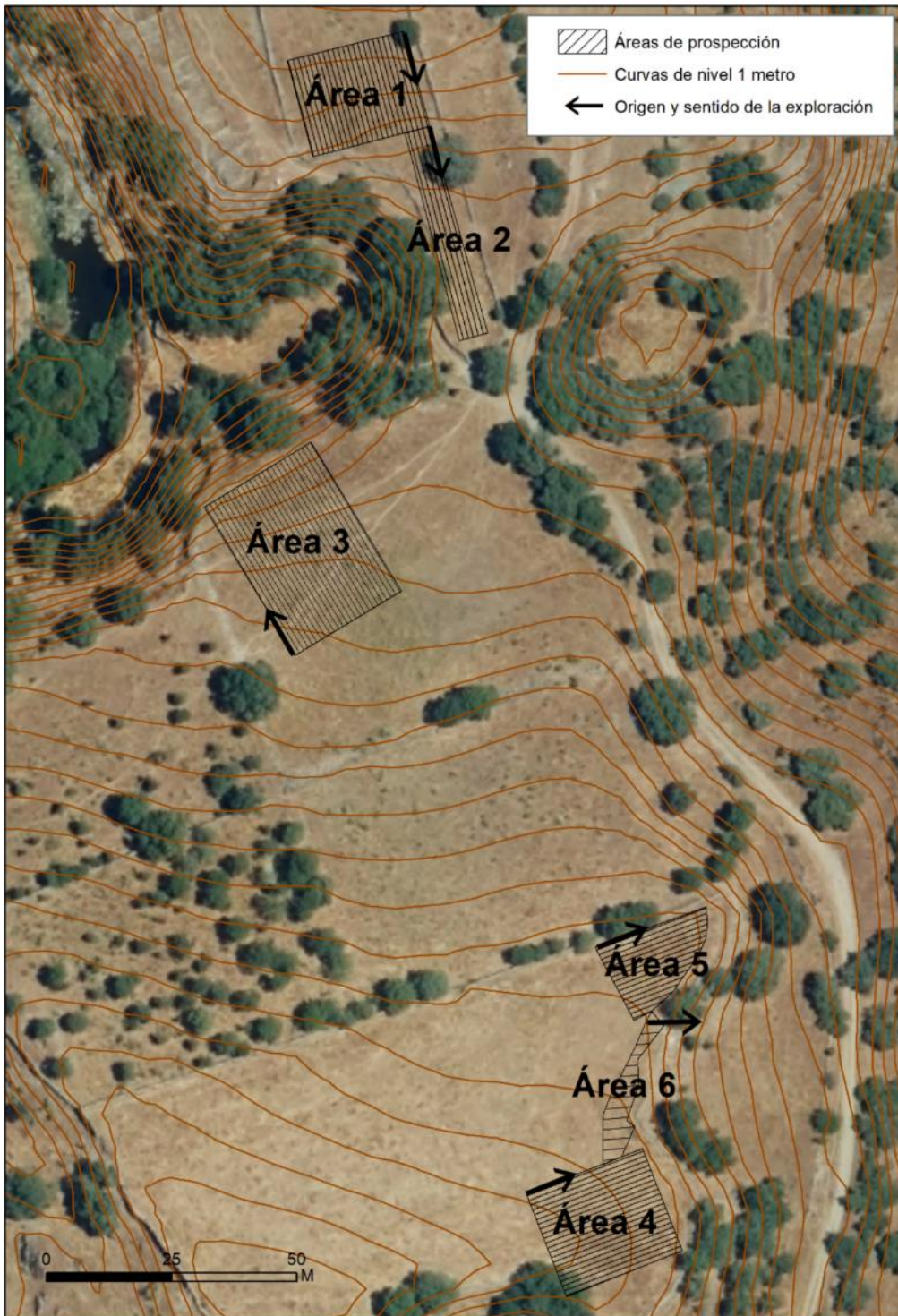


Fig. 0-9 Localización de las áreas prospectadas.

2D (radargramas) que cortan las supuestas estructuras, también se muestran en la Fig. 7. En el área 1 se detectan varias reflexiones producidas por materiales incrustados en el suelo que se desarrollan tanto lateral como verticalmente. El área de 20 x 24 tiene alteraciones lineales pudiéndose dividir su planta en varias áreas para comentar. Para el mismo, nos referiremos a las coordenadas X e Y, haciendo alusión a los códigos donde se identifican los reflejos tanto en el radargrama como en la planta.

En el ángulo cuadrante superior izquierdo, tenemos un área de alto contraste sin forma clara, un conjunto de anomalías que no dibujan alineaciones, pudiendo corresponder con algún tipo de nivel arqueológico con derrumbes, donde los materiales son lo suficientemente grandes para detectarlos con el radar, pero sin guardar alineación. Esta área se encuentra cerca de 1 metro de profundidad.

En el lado izquierdo del rectángulo con el código P006 tenemos una zona de baja amplitud de reflexión que sugeriría un área vacía, donde no se detectan grandes anomalías. El radargrama correspondiente a un perfil que corta esta área (con el código P006-2.5m) muestra claramente el área de bajas amplitudes de reflexión.

En torno a la coordenada X=16, se detecta sobre el perfil P032 unas importantes anomalías que van desde los 0,40 hasta los 0,85 m de profundidad aproximadamente. Al final del perfil, alrededor de Y=18, se nota una discontinuidad en el patrón de

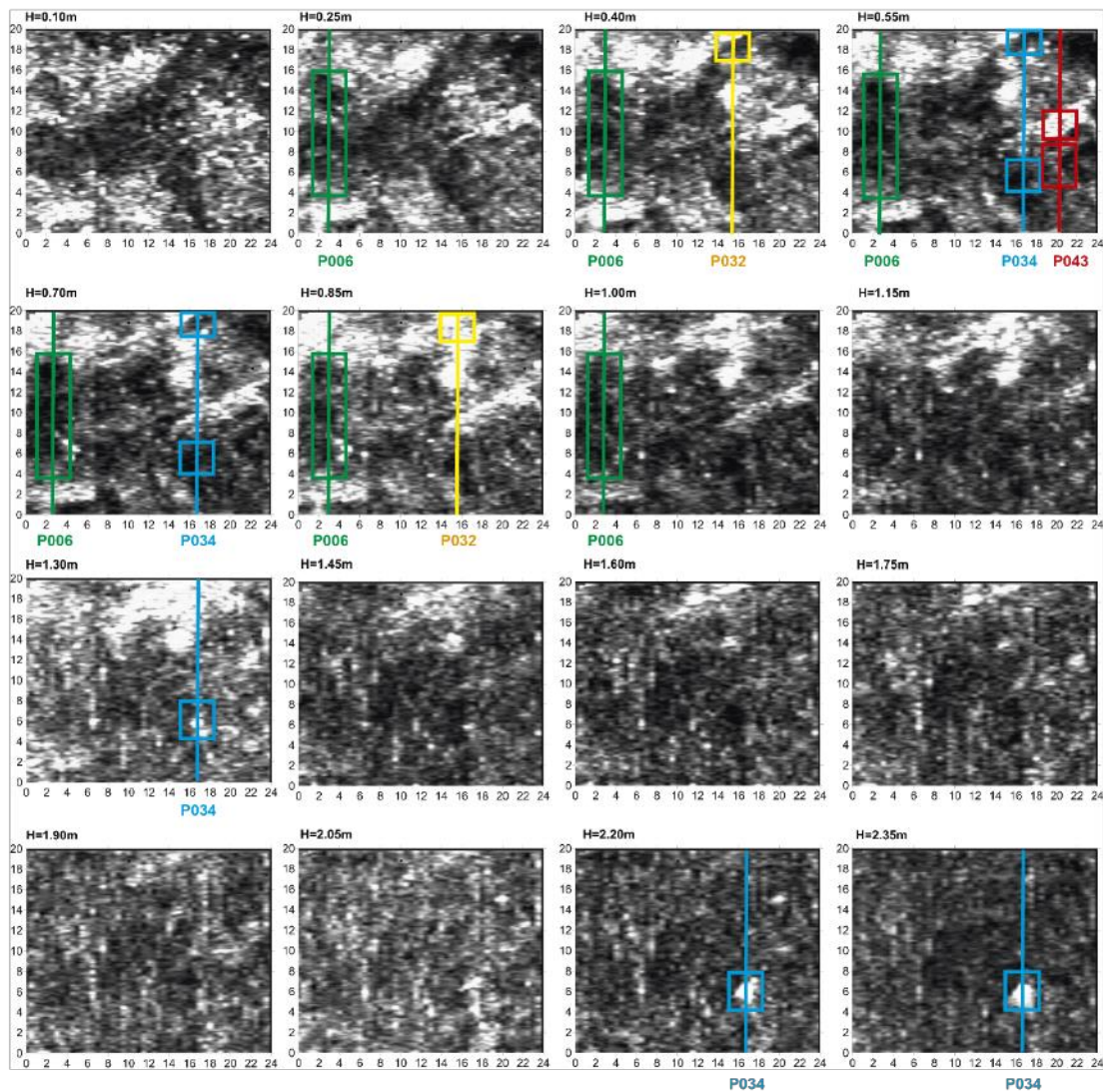


Fig. 0-10 Cortes horizontales del modelo de reflexiones GPR 3D del área 1, correspondientes a cortes sucesivos de 0,2m de espesor entre la superficie y H=2,35m. Se pueden observar alineaciones de reflectores compatibles con estructuras de tipo murario (con dos direcciones perpendiculares preferidas), depresiones flanqueadas por reflectores muy fuertes, cavidades y un pozo flanqueado por las paredes.

II.2.-APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

reflectividad en el corte horizontal $H=40$, que se extiende oblicuamente. Observando el radargrama P032 - 15,5 m, se puede ver que esta discontinuidad resulta de una cavidad de baja intensidad. Otra observación que puede hacerse a lo largo de este perfil alrededor de $Y=8$ m (en cortes horizontales entre $H=0,25$ m y $H=1,0$ m) es lo que parece ser un ángulo recto, que pueda corresponder con una estructura muraria.

Los cortes horizontales atravesados por el perfil de código P043 identifican una serie de reflexiones lineales a la derecha de la planta. Se trata de una posible estructura muraria que atraviesa la exploración de manera oblicua y que tiene una anchura superior a 2 m. Parece continuar en el cuadrante inferior izquierdo de la imagen, después de un tramo sin alteraciones, pero esta otra reflexión tiene una orientación distinta. Debajo de estas anomalías se detecta un claro ángulo recto, de dos estructuras murarias perpendiculares que se unen, a una cota aproximada de 0,55 m de profundidad.

Sobre el perfil con el código P034 se identifica una alteración puntual que se encuentra entre $5\text{ m} < Y < 8$ m y que aparece a gran profundidad. Si se analiza el radargrama P034 -16,5 m se puede observar como una importante reflexión aparece a la cota de -2,20 m. La naturaleza de esta anomalía es desconocida, pero su forma hace pensar que se pudiera tratar de algún tipo de cavidad, dado que su señal puede ser similar a los casos donde el radar atraviesa aire. De la observación del radargrama se puede ver que el área encima de esta potente alteración muestra pequeñas reflexiones, pero en general es un radargrama más limpio, por lo que pudiera tratarse de algún tipo de fosa, donde el material interno es distinto o con distinta compactación que el resto de materiales de alrededor.

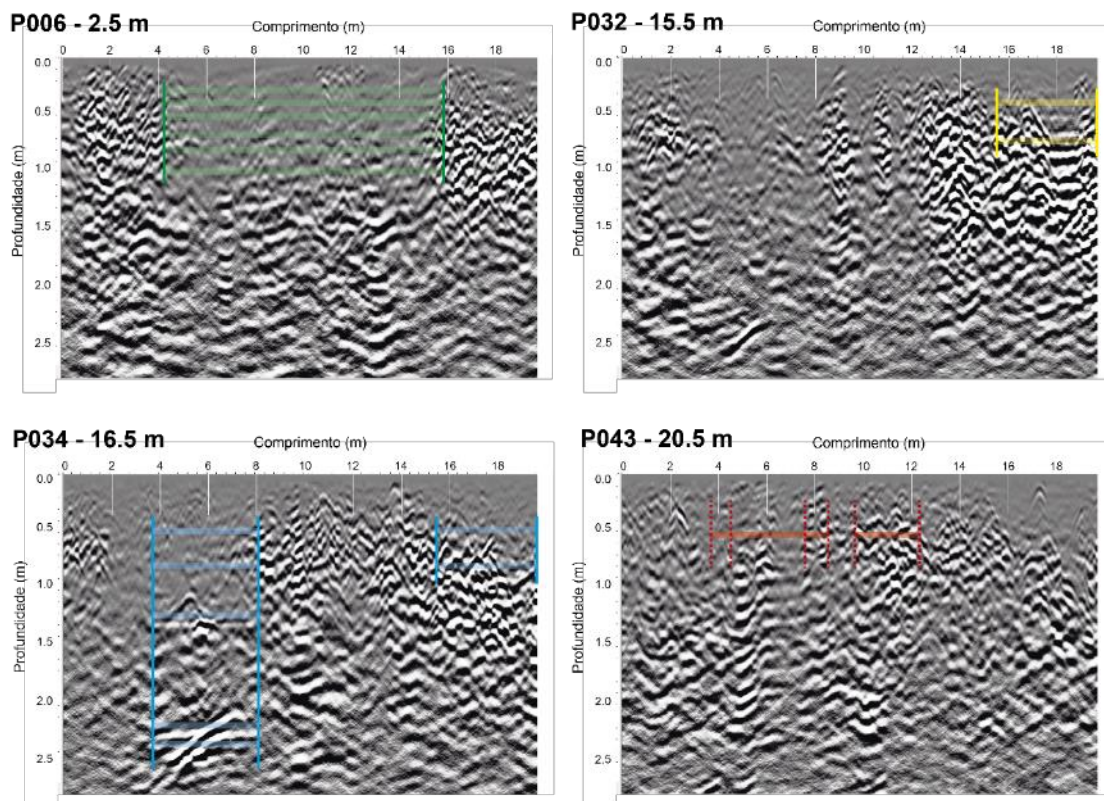


Fig. 0-11 Radargramas relacionados con los cuatro perfiles marcados en las secciones horizontales de la Fig. 6 ($X=2,5$ m, $X=15,5$ m, $X=16,5$ m y $X=20,5$ m). Los conjuntos de reflectores que parecen definir las estructuras arqueológicas aparecen marcados.

II.2.4.2.-Área 2

Al igual que en el área 1, los resultados están reunidos en dos figuras, las 12 y 13. En este proyecto se detectan multitud de reflexiones en un proyecto más largo que ancho. En este caso identificamos diversas alteraciones en todas las profundidades. A lo largo del perfil con el código P003 se localizan diversas anomalías. En el radargrama correspondiente a ese perfil (P003 – 1 m), comenzando por la izquierda (Norte de la exploración), podemos ver un área de múltiples reflexiones de gran envergadura, con una extensión de $\sim 6\text{m}$, y que profundizan hasta más de $-1,5\text{m}$ de profundidad. A continuación, tenemos dos conjuntos de reflexiones que parecen continuar parcialmente el resto de anomalías antes comentadas, pero que se definen mejor en perfil, pudiendo ser algún tipo de estructura muraria. No podemos conocer su continuación, si bien en el tramo de 6 m prospectados no continúan al otro lado. Continuando hacia la derecha, en el radargrama detectamos una serie de anomalías que se localizan hasta gran profundidad. Esta zona aparece desde los $-0,55$ hasta los $2,50\text{m}$ de profundidad. En su lado derecho muestra una anomalía longitudinal oblicua al perfil, que pudiera corresponderse con algún tipo de nivel estratigráfico o geológico. En el origen de estas alteraciones tenemos a la derecha de la imagen al menos dos conjuntos de reflexiones, localizadas en torno a -1m

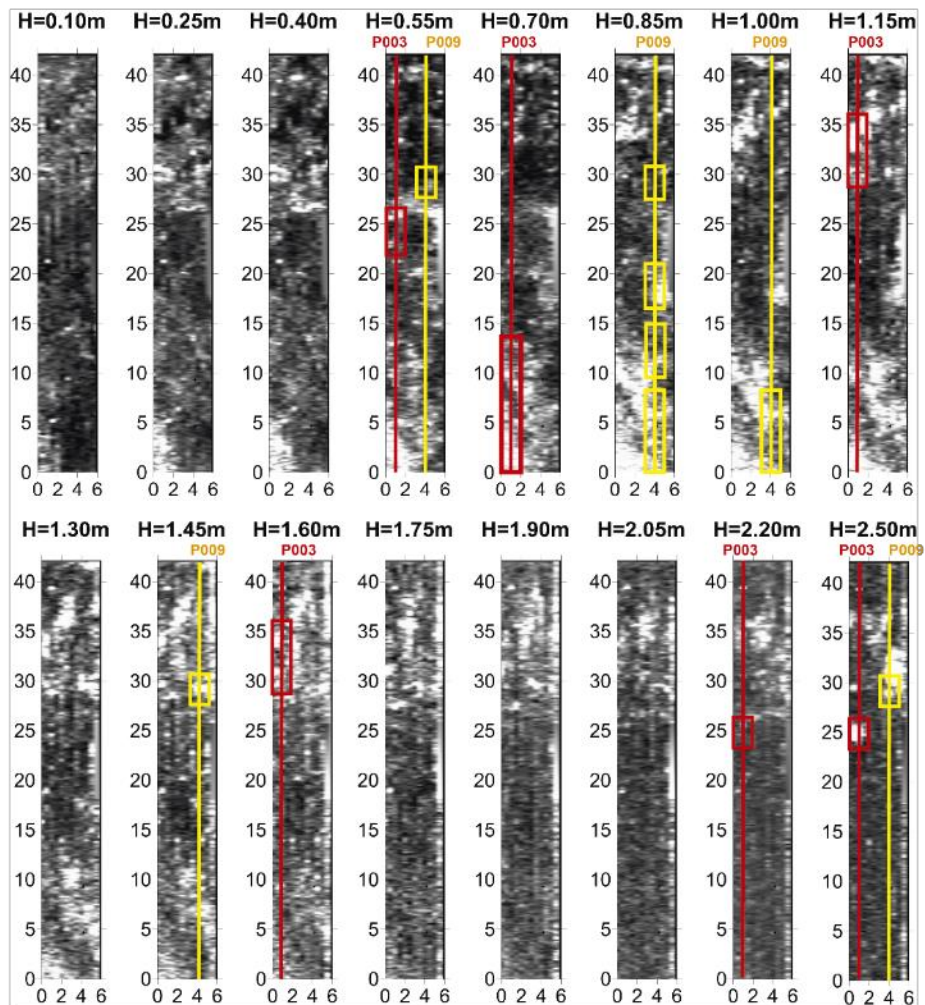


Fig. 0-12 Cortes horizontales que muestran la distribución de amplitudes reflectadas del modelo GPR 3D del área 2 a varias profundidades.

de profundidad. Además de lo antes comentado, aparecen otras reflexiones en $Y = 21\text{m}$

II.2.-APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

y $Y=39$ m que aparecen prácticamente en superficie hasta máxima profundidad, que se corresponden con posibles objetos metálicos superficiales.

A lo largo del radargrama del perfil con el código P009 podemos observar otro conjunto de reflexiones que en general coinciden con las antes comentadas. Destacar principalmente las localizadas a 30 m del eje Y, donde se puede ver anomalías a $-0,5$ m, $-1,5$ m y $-2,5$ m de profundidad. Esto crea un conjunto de reflexiones en el área inferior (Norte de la exploración) sin forma en planta definida, pero que crea importantes reflexiones distintas en los perfiles o radargramas. En el tramo Norte (parte inferior de los cortes horizontales) se detectan importantes reflexiones coincidentes con el área P003. Esta zona parece detectar posibles estructuras soterradas posiblemente lineal. Se trata de algún tipo de estructura con gran volumen y profundidad.

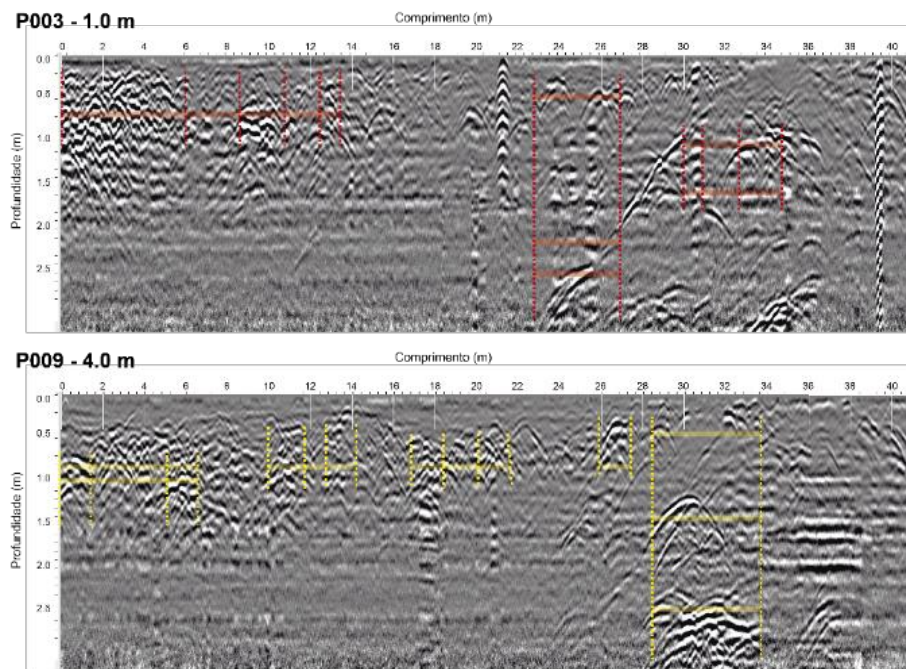


Fig. 0-13 Radargramas obtenidos sobre dos perfiles de GPR registrados en el área 2 en $X=1$ m e $X=4$ m, donde se encuentran conjuntos de reflectores que parecen definir estructuras enterradas

II.2.4.3.-Área 3

Los resultados del área 3 están representados en las figuras 14 y 15. Esta área ya ha sido convenientemente tratada en un artículo reciente (Pro *et al.* 2020). En general es el área con mayor información en planta, ya que se pueden visualizar diversas reflexiones en planta regulares, correspondientes con estructuras arqueológicas murarias. Todo el conjunto de la exploración muestra reflexiones de interés a las mismas cotas de profundidad, en torno a $-0,40$ hasta los $-0,70$ m, por lo que se estaría detectando un mismo nivel arqueológico. A lo largo del perfil marcado con el código P014 sobre el corte horizontal $H=0,55$ podemos ver unos rectángulos marcados en las zonas de mayores amplitudes de reflexión que son identificadas con el radargrama marcado con código P014 – 6.5m. El conjunto de las reflexiones que se observan en varios cortes horizontales nos permiten percibir muros que forman habitaciones cerradas tanto en el ángulo superior de la exploración. Entre ambas alteraciones se detectan otras anomalías más tenues, pero que puede corresponder con otras posibles entidades estructurales murarias.

Con los códigos P021 y P031 se detectan reflexiones que continúan las anteriores y que definen un espacio aparente cerrado. Este tiene un ángulo que no se corresponde con el esto, estando en otra orientación. Finalmente, con el código P035 tenemos el cierre de esta estructura.

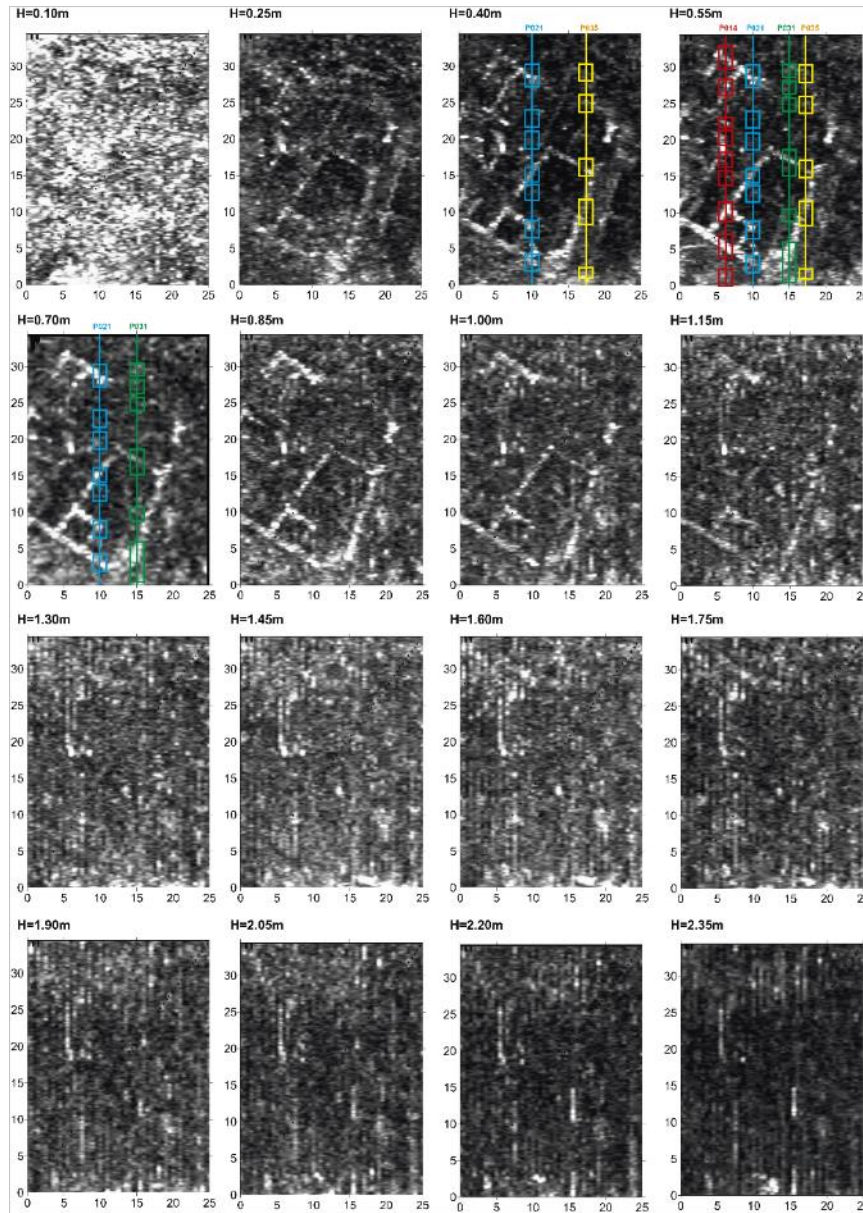


Fig. 0-14 Cortes horizontales que representan la distribución de las amplitudes de reflexión del modelo GPR 3D del área 3 a varias profundidades. Se observan alineaciones de reflexión que definen dos orientaciones preferentes, compatibles con estructuras de tipo mural. El conjunto de alineaciones parece definir las huellas de un complejo de edificios de gran extensión.

II.2.-APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

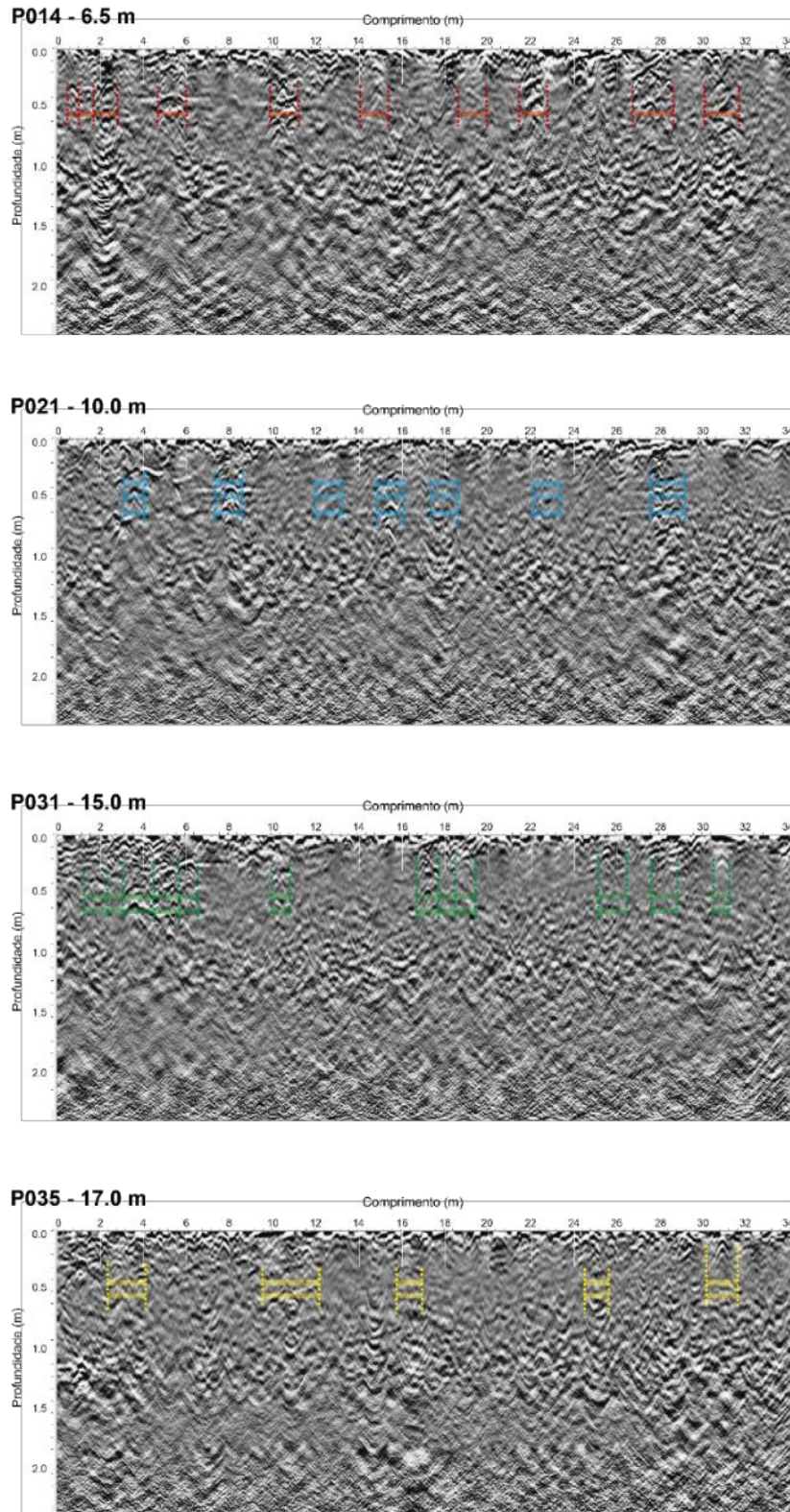


Fig. 0-15 Cortes horizontales que representan la distribución de las amplitudes de reflexión del modelo GPR 3D desde el área 4 hasta varias profundidades, donde se marcaron 4 perfiles particulares.

II.2.4.4.-Área 4:

Los resultados del área 4 están representados en las figuras 16 y 17. En los cortes horizontales de esta área se detecta unas reflexiones de alta intensidad respecto al medio que las rodea. Se trata de entidades que en planta quedan muy bien definidas a una profundidad de en torno a -1 m, si bien se detectan desde prácticamente superficie y se prolongan en algunos casos hasta -2 m. A lo largo del perfil P006 podemos ver el comienzo de estas reflexiones que continúan lateralmente y que muestran, junto con las marcadas en el perfil de código P015 un espacio con niveles más tenues, rodeado de estas anomalías. Se trata de reflexiones de en torno a 2 m de ancho, que se definen muy bien en los radargramas referentes a los perfiles referidos, por lo que deben de tratarse de entidades murarias consistentes. Partiendo del tramo superior izquierdo se detecta un tramo murario recto, que no continúa al otro lado de la exploración. En el centro de este aparece un tramo perpendicular al mismo, haciendo una forma de T, para continuar hacia el tramo inferior de la planta de manera oblicua. Sobre los perfiles los códigos P029 y P039 tenemos la continuación de esta alteración lineal. En esta área nos encontramos probablemente con una estructura defensiva del poblado. Dado que la imagen se encuentra girada respecto al eje de coordenadas (el ángulo izquierdo se encuentra orientado al Sur), podemos intuir que se trata de una torre defensiva o similar.

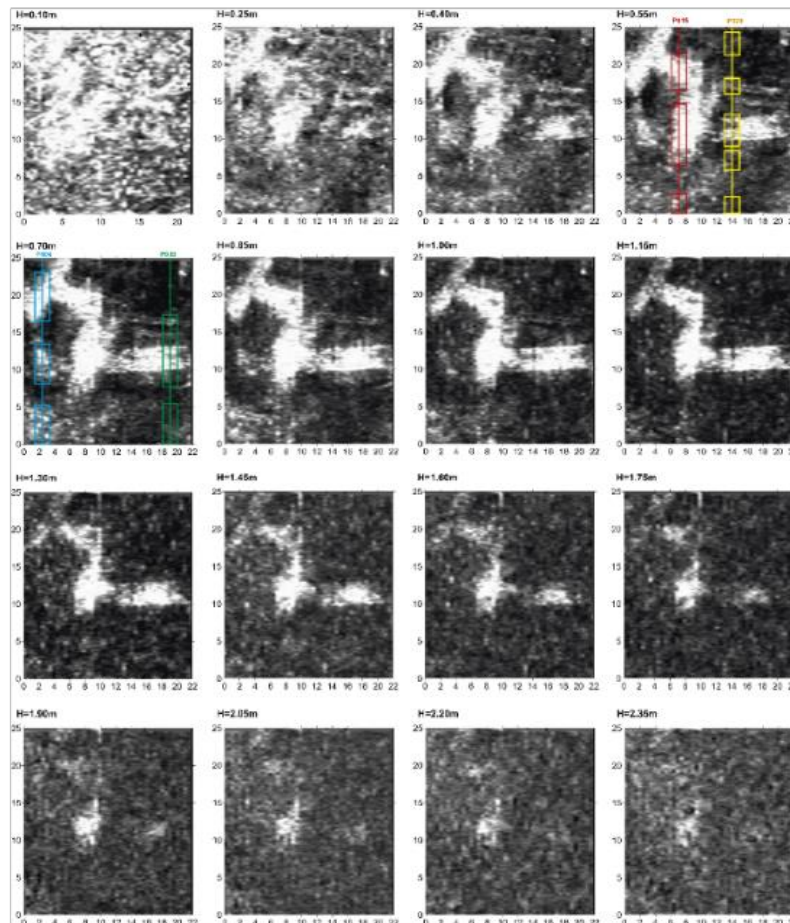


Fig. 0-16 Radargramas obtenidos en cuatro perfiles GPR registrados en el área 3 en $X= 6,5\text{ m}$, $X=15,0\text{ m}$, $X=10,0\text{ m}$ y $X=17,0\text{ m}$, donde se marcaron los conjuntos de reflectores que definen las estructuras enterradas, identificadas en los cortes horizontales.

II.2.- APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

Además de estas, se detectan otras alteraciones de menor envergadura, en torno a la cota de -0,55 m, cota similar a las del área anterior.

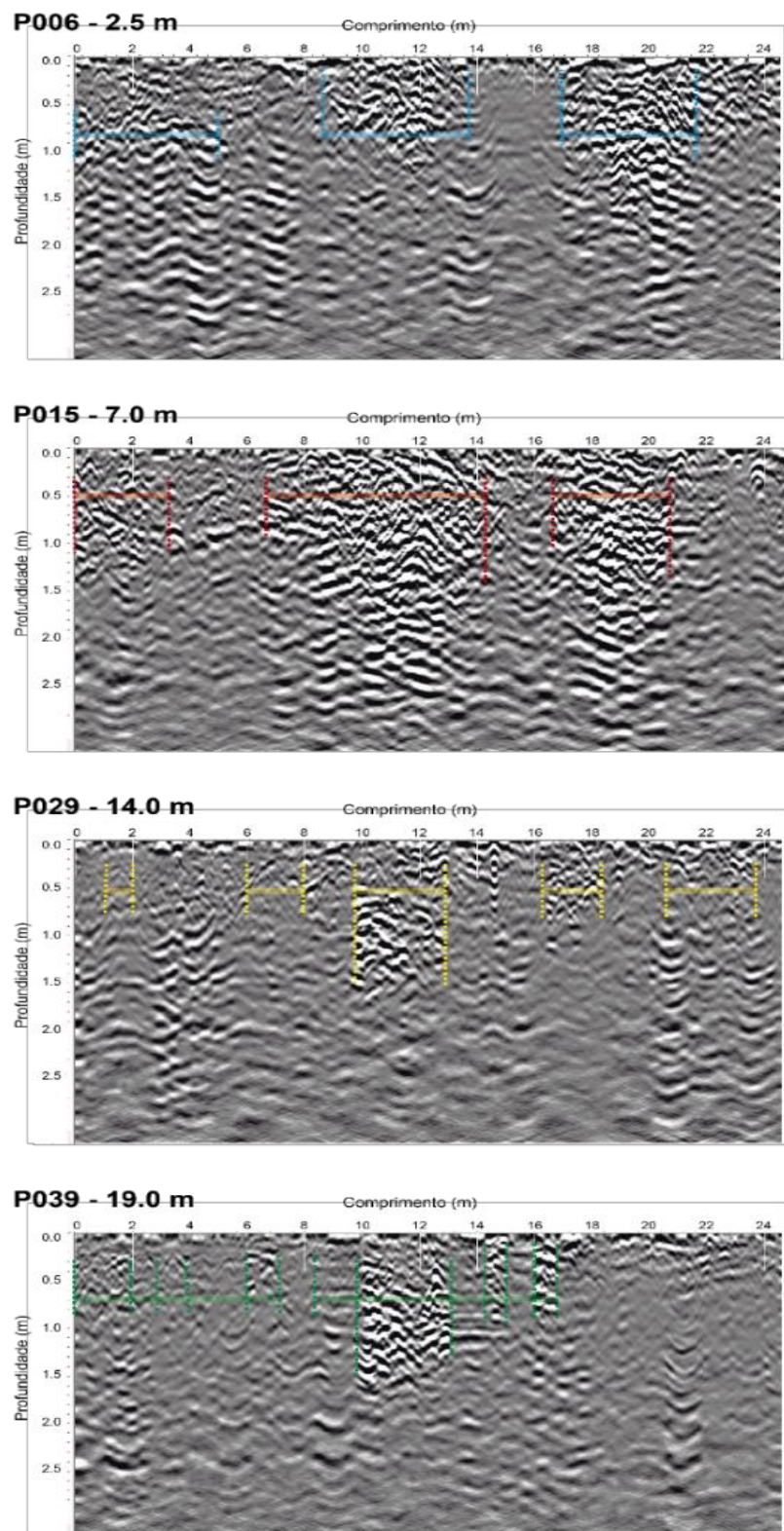


Fig. 0-17 Cortes horizontales del modelo GPR-3D desde el área 5 hasta varias profundidades, donde se marcaron 4 perfiles particulares.

II.2.4.5.-Área 5

Los resultados del área 5 están representados en las figuras 18 y 19. Los cortes horizontales en esta área se continúa la exploración en el borde de la mesa de Villasviejas, donde por la orografía del terreno no se ha podido explorar toda el área detectada. Concretamente en la parte superior de los time slices (Noreste) podemos ver que se detectan, en la zona atravesada por los perfiles P008 y P011, potentes reflexiones, que además se continúan lateralmente y son cortadas por los perfiles P024 y P029. En estos casos solo se ha podido llegar al origen de dichas anomalías, ya que el terreno caía abruptamente varios metros. Se trata por tanto de una posible estructura muraria soterrada, que aparece a los $-0,75$ m aproximadamente, pudiendo corresponder con el tramo murario antes descrito en el área 5. En el tramo inferior de la planta se detectan otra serie de reflexiones menores, pero que bien pudiera marcar algún tipo de ángulo, pudiendo existir alguna estructura muraria y orientada con el tramo antes descrito. Los

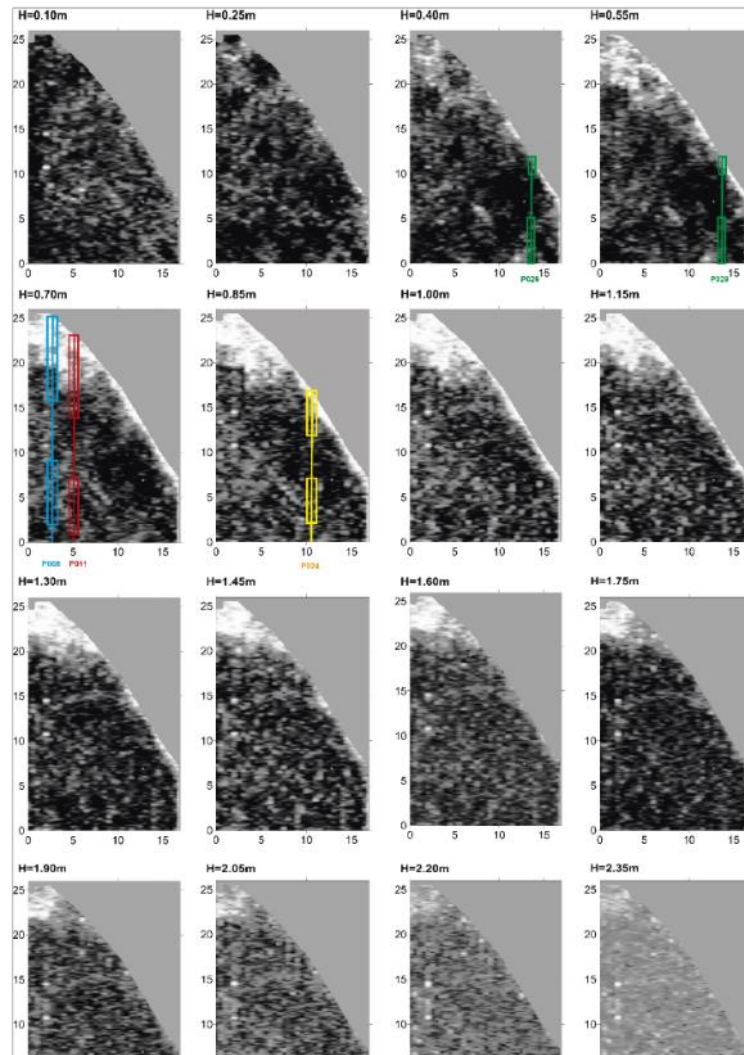


Fig. 0-18 Radargramas obtenidos en los cuatro perfiles GPR marcados en los cortes horizontales representados en la Fig. 12, en $X=2,5$ m, $X=7,0$ m, $X=14,0$ m y $X=19,0$ m.

II.2.-APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

radargramas registrados en los perfiles están representados en el panel inferior de la Fig.

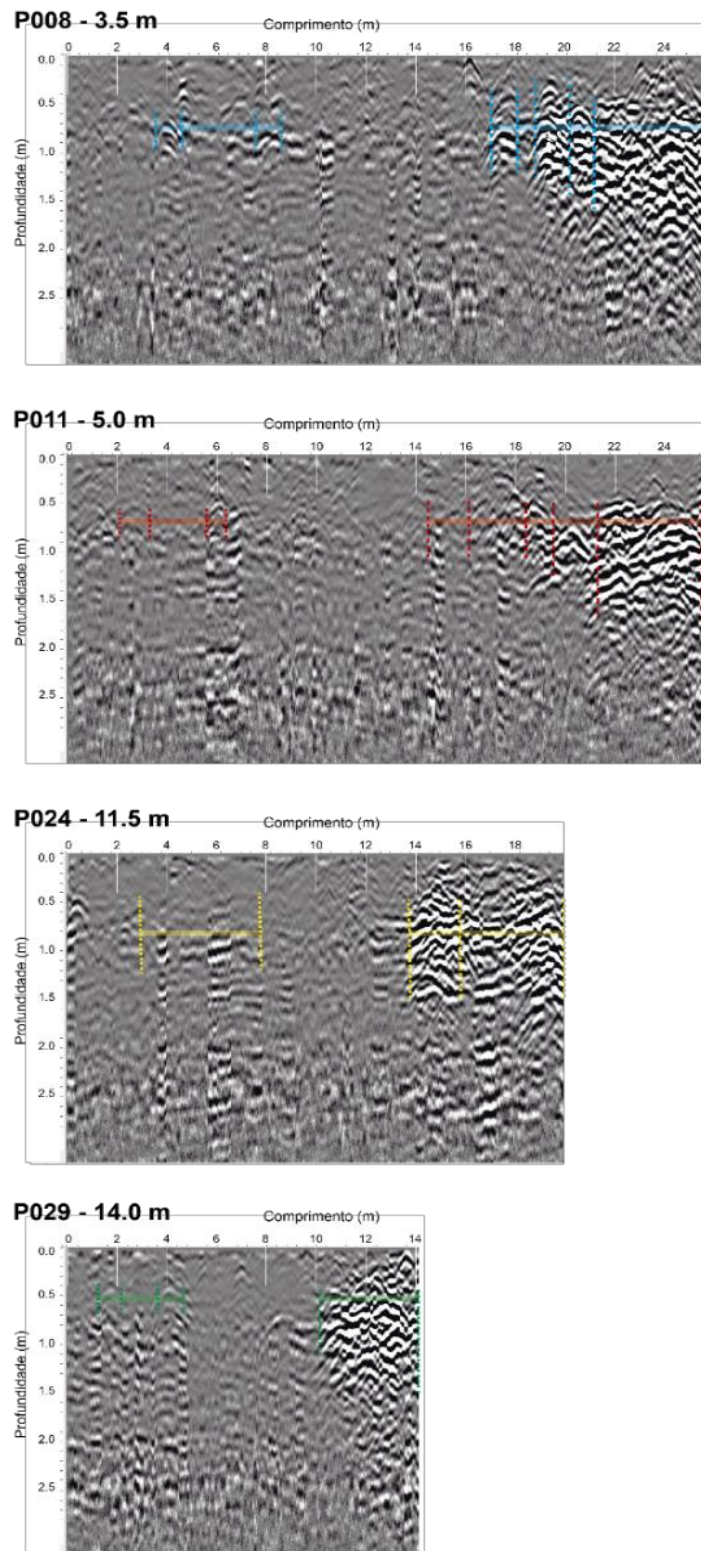


Fig. 0-19 Radargramas obtenidos en los cuatro perfiles GPR marcados en los cortes horizontales representados en la Fig. 14 en $X= 3,5$ m, $X=5,0$ m, $X=11,5$ m y $X=14,0$ m. Las marcas indican los reflectores que definen las estructuras enterradas identificadas en los cortes horizontales.

y confirman la interpretación.



Fig. 0-20 Panel izquierdo - Fotografía del área 6, entre las áreas 4 y 5, donde se pueden ver las piedras que delimitan el rango de altas magnitudes de reflexión detectadas en el GPR. La foto se toma hacia el área 4, donde se encuentra la camioneta. Panel derecho - mapa con cortes horizontales de los modelos GPR-3D de las áreas 4 y 5 y la indicación del rango de altas magnitudes delimitadas por las piedras, cuyas posiciones están marcadas por círculos blancos.

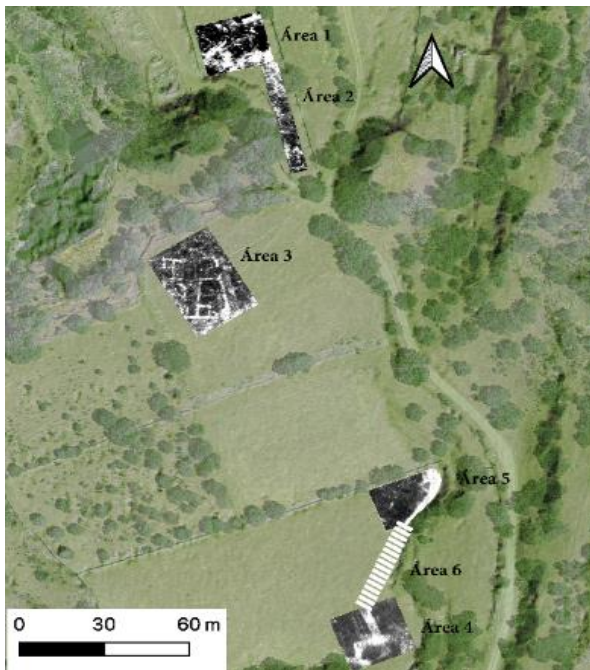


Fig. 0-21 Cortes horizontales en los modelos GPR obtenidos en las seis áreas prospectadas, proyectados en imágenes de satélite (Google).

II.2.4.6.-Área 6:

El área 6 no es un tramo prospectado en cuadrícula como los anteriores, sino una serie de pasadas realizadas entre el Área 4 y 5. El objeto de ello era localizar si se continuaba detectando las potentes reflexiones que aparecen en dichas zonas prospectadas. En concreto se han realizado perfiles individuales con un espaciado indeterminado y cada vez que se detectaba el cambio de las potentes reflexiones antes comentadas se colocaban piedras. Finalmente se tomó la posición de las piedras a través de GPS diferencial. La fotografía del panel izquierdo de la Fig. 20 muestra la distribución de las piedras y en el panel derecho se muestra su posición sobre un mapa que contiene las áreas 4 y 5 y la región de las mayores reflexiones definida por esta metodología.

II.2.5.-Discusión de resultados y conclusiones

En una primera mirada a los resultados del estudio del GPR, distribuidos en las seis áreas de Villasviejas del Tamuja (Fig. 21), visualizamos datos que evidencian restos arqueológicos en todas ellas, pero con importantes diferencias entre áreas. Tenemos situaciones en las que la distribución geométrica de las estructuras nos hace pensar en construcciones de tipo habitacional, otras que sugieren estructuras defensivas y otras cuya observación nos deja dudas sobre su funcionalidad.

Dentro de las áreas prospectadas, la 1 y 2, situadas en el recinto Norte, son las de más difícil interpretación. Son resultados que revelan geometrías mal definidas, que se pueden imaginar compatibles con las paredes de los edificios, pero también con otros tipos de estructuras. Por ejemplo, dentro de lo que parecen ser muros existen reflexiones que sugieren depresiones y cavidades. Una de estas cavidades parece definir un pozo o cisterna, que contiene partes huecas en los niveles profundos, lo que se evidencia por el repentino aumento de los valores de amplitud, generalmente asociado al aire. La interpretación de lo que se capta en las secciones horizontales de los modelos GPR-3D y en los radargramas obtenidos puede mejorarse con la información que proporciona la zona de excavación más cercana, correspondiente a las campañas de Maribel Ongil, y comparando los resultados del estudio magnético realizado en las mismas zonas. La Fig. 22 presenta esta comparación, centrándose en 4 subáreas (A,B,C,D) en las que se detectan anomalías en las dos áreas de resultados. En la subárea A la magnética sugiere la existencia de una estructura orientada al Este-Oeste. El GPR confirma esta suposición añadiendo que la estructura tiene unos 2m de ancho y se desarrolla en profundidad desde cerca de la superficie hasta cerca de 1m. Para la subárea B la magnética detecta una anomalía sin geometría definida; los resultados del GPR discriminan para esta área una geometría reflexiva lineal orientada NE-SW con características geométricas similares a la estructura anterior y engrosada a esta estructura. En la parte Norte se detecta otra estructura más ligera que, por la geometría, sugiere ser la esquina. En la subárea C la

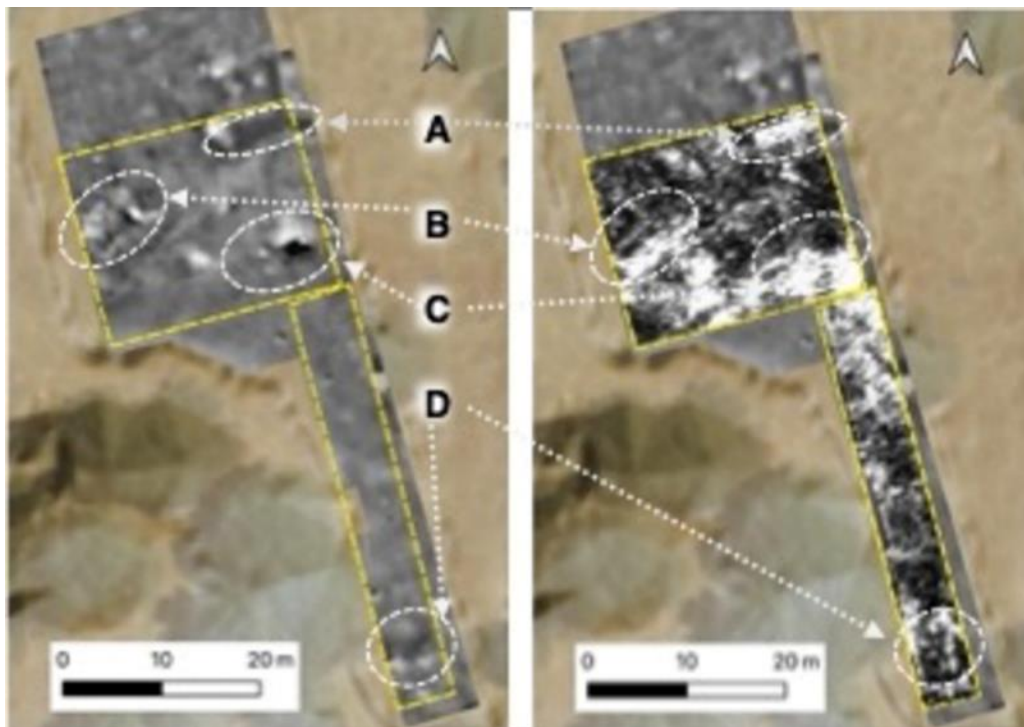


Fig. 0-22 Comparativa de las Áreas 1 y 2 con GPR y magnética.

magnética detecta una fuerte anomalía dipolar sin una forma bien definida o continuidad lateral. Los resultados del GPR muestran que se trata de un extenso rango de contornos mal definidos, probablemente formados por materiales de constante dieléctrica muy distinta del medio envolvente, y fuertemente perturbados en una extensión vertical de 0,4m - 1,5m.

En conclusión, en estas áreas, los datos del GPR pueden definirse con mayor precisión, pero también se detectan otros indicios relevantes, especialmente en el norte del área 2, que podrían corresponder a alguna sección del recinto de la muralla Norte. Una de las problemáticas del yacimiento se encuentra en el cierre de estos recintos y en su caso, la conexión entre ellos. Aunque parece que en esta área 2 se detecta parte de la estructura muraria, en el área 1 no intuye esta continuación.

El estudio realizado en el Área 3, del que se informa en una publicación reciente (Pro *et al*, 2020), permitió descubrir un conjunto muy extenso de rastros de estructuras de tipo murario, que definen un gran complejo de edificios de forma cuadrangular (alineaciones con dos direcciones perpendiculares). En esta área, también se realizaron estudios de tomografía de resistividad eléctrica y e gradiente magnético. El cruce de toda la información obtenida en el mismo sitio permitió probar la existencia de estos restos arqueológicos.

En el Área 4, los resultados muestran un conjunto de alineaciones de reflexiones con alto valor de amplitud y que ocupan un espacio grande. Las alineaciones son compatibles con las estructuras de tipo murario, probablemente compuestas por piezas de tamaño considerable y con espacios vacíos entre ellas (dados los mayores valores de amplitud de reflexión), lo que sugiere que pueden corresponder a trazas de una muralla antigua. En las proximidades de estas estructuras existen alineaciones de reflexión de menor amplitud y menos extensas en el espacio, que son compatibles con las estructuras de tipo murario interior. Las orientaciones preferidas de estas alineaciones son perpendiculares y parecen definir las estructuras construidas.

El Área 5 se encuentra en las proximidades del Área 4 y cerca de uno de los límites hay, en un nivel inferior, rastros de una fortificación. El propósito de este estudio era averiguar si esta estructura amurallada tiene continuidad lateral. Los resultados del estudio en este sitio nos permiten identificar reflejos de alto valor de amplitud, similares a los observados en el Área 4. Su distribución en el espacio también es similar, lo que sugiere que es una estructura grande. Dentro de este, cerca de uno de los límites, se sugiere que hay una cierta compartimentación. En las proximidades de esta estructura hay alineaciones de reflexiones lineales y con dos orientaciones preferentes perpendiculares, compatibles con las estructuras de tipo mural, que parecen definir las estructuras construidas.

Las áreas 4 y 5 muestran sin lugar a dudas un tramo del recinto amurallado Sur, pudiendo detectarse posiblemente una torre o bastión defensivo en el área 5. En el área 4 se detecta un importante quiebro dentro de la muralla, que bien pudiera corresponderse con una estructura defensiva, pero también de algún tipo de estructura de acceso al propio recinto fortificado. Esta interpretación viene por un lado por el conocimiento de la estructura de la muralla en otros tramos excavados. Si se tratase de una torre defensiva, pudiera tener una forma semi hexagonal, pero con uno de sus laterales más derruido, por lo que no se detecta la forma correctamente. El caso de ser una puerta, pudiera ser una estructura que hace un quiebro para poder defender el acceso al recinto (Fig. 23).

II.2.- APLICACIÓN DE GPR PARA LA RECONSTITUCIÓN DE NIVELES CONSTRUCTIVOS DEL POBLADO PROTO-HISTÓRICO DE VILLASVIEJAS DEL TAMUJA (CÁCERES)

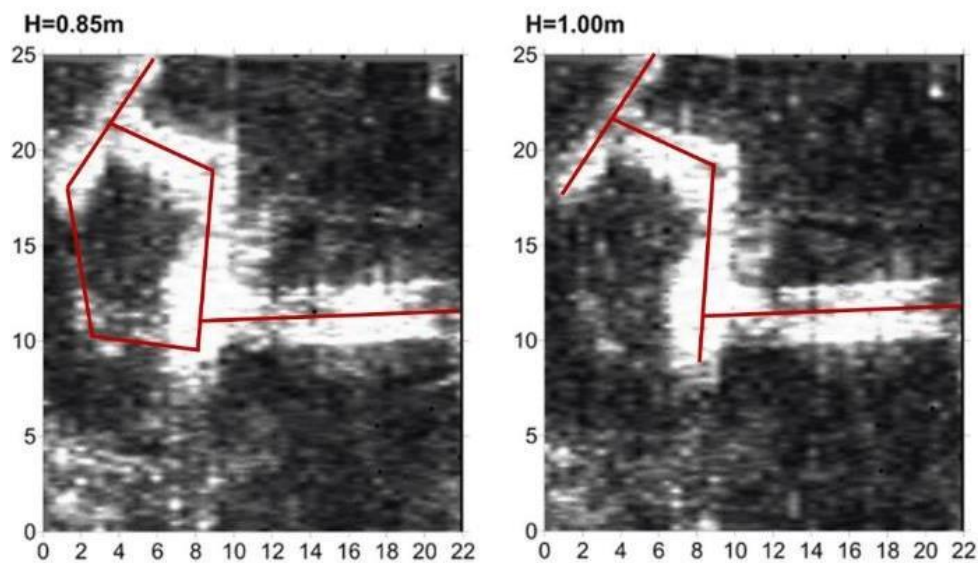


Fig. 0-23 Posibles interpretaciones del Área 4.

Entre las Áreas 4 y 5 se hicieron algunas adquisiciones aisladas para explorar los sitios adyacentes de estas dos áreas. Se identificaron conjuntos de reflexiones, compatibles con los anteriores, que parecen sugerir la continuidad lateral de la estructura de tipo muraria (Fig. 21). El principio y el final de cada conjunto de reflexiones identificadas se localizaron con GPS diferencial para tratar de evaluar más tarde la evolución lateral de esta estructura. Su proyección en imagen de satélite, junto con el análisis de los resultados de estas dos áreas prospectadas, permite observar que las alineaciones identificadas tienen una orientación que sugiere una continuidad entre las estructuras fortificadas del área 4 y 5.

Para concluir, hay que señalar que la discusión sobre estos resultados se remite a la valoración global en la parte V de esta monografía. En todo caso de manera preliminar pueden señalarse algunas conclusiones:

- En las áreas 1 y 2 se reitera la impresión de la complejidad de las estructuras enterradas, evidenciándose tal y como sugería la magnética y la tomografía, la existencia de más de una línea de muralla y de estructuras extramuros.
- El área 3 ha proporcionado la imagen más nítida obtenida hasta la fecha de las estructuras exentas localizadas en esta parte del Recinto B, lo que nos ha permitido una comprensión mejor de su estructura y facilitará su interpretación y búsqueda de analogías.
- Las áreas 4 a 6 han sido de enorme ayuda para seguir el trazado de la muralla del recinto B en su extremo Sureste, permitiendo identificar una fortificación y un acceso previamente desconocidos.

Cabe añadir como reflexiones finales, que la geofísica puede ser una ciencia fundamental para el conocimiento a priori de todo el sitio arqueológico, permitiendo optimizar las acciones de protección del Patrimonio que existe en este sitio. También fue evidente que un método geofísico no es suficiente para llevar a cabo una caracterización en profundidad del sitio. En los lugares con condiciones más difíciles, para obtener datos geofísicos con una calidad que permita una buena evaluación del posible contenido enterrado, es necesario aplicar más de un método. En el Área 3, donde se han aplicado

otras técnicas geofísicas, se ha demostrado que el cruce de estas técnicas beneficia el conocimiento del subsuelo del lugar prospectado.

Referencias

ANNAN, A.P. 2001: “Trends, History, and Future Developments”, *Proceedings of the EAGE 2001 Conference, Delft, The Netherlands*, 905: 18.

ANNAN, A.P. 2005: “Ground penetrating radar”, en Butler, D.K., (Ed.) *Near Surface Geophysics; Investigations in Geophysics* No. 13, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, USA: 357–438.

ANNAN, A.P. 2008: “Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar”, en Jol, H.M., (Ed.), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands: 3-40.

CONYERS, L.B. 2015: “Analysis and interpretation of GPR datasets for integrated archaeological mapping” *Near Surf. Geophys.*, 13: 645–651.

CONYERS, L. B., Y GOODMAN, D. 1997: *Ground-penetrating radar: an introduction for archaeologists*.

DÍEZ BALDA, M. A., VEGAS, R. Y GONZÁLEZ LODEIRO, F. 1999: “Autochthonous sequences in the Central Iberian Zone: Structure”, Dallmeyer, R.D. y Martínez García, E., (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, Springer Verlag, Berlín: 172-188.

DE TENA REY, M.T., REBOLLADA CASADO, E., MUÑOZ BARCO, P. Y CHARRO LOBATO, C. 2019: “Marmitas de gigante en pizarras: Río Tamuja (Botija, Cáceres)”, *En XV Reunión Nacional del Cuaternario*, Asociación Española para el Estudio del Cuaternario, Bilbao, Spain: 377–380.

DE TENA, M.T., PRO, C., CHARRO, C., SALGADO, J.A. Y MAYORAL, V. 2020: “Geological characterisation of the settlement of Villasviejas del Tamuja (Cáceres, Spain)”. *Quaternary International*.

HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, F., GALÁN DOMINGO, E Y, MARTÍN BRAVO, A.M. 2009: “A la vista de las murallas: análisis arqueológico del entorno del castro prerromano de Villasviejas del Tamuja (Cáceres)”, *Complutum*, 20 (1): 109-132.

MAYORAL, V., CHARRO, C., SALGADO, J.A., PRO, C., DE TENA, M.T., CHAPA, T., VALLÉS, J., TERRÓN J.M Y QUIRÓS, E. 2019: “Radiography of an Iron Age hillfort: non-invasive archaeology in the settlement of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres)”, *Trabajos de Prehistoria*, 76, 2: 302-322.

LANGE, A. F., Y GILBERT, C. 2005: “Using GPS for GIS data capture”, *Geographical Information Systems*: 467–476.

MILSON, J. 2003: *Field Geophysics (Vol. 31)*, John Wiley & Sons: West Sussex, England.

NUZZO, L., LEUCCI, G., NEGRI, S., CARROZZO, M.T. Y QUARTA, T., 2002: “Application of 3D visualization techniques in the analysis of GPR data for archaeology”, *Ann. Geophys*, 45: 321–337.

PRO, C., CALDEIRA, B. M.T. DE TENA, C. CHARRO LOBATO, R.J. OLIVEIRA, J.F. BORGES Y V. MAYORAL, 2020: “Exploring the consistency of data collected in archaeological geophysics: A case study from the Iron Age hillfort of Villasviejas del Tamuja (Extremadura, Spain)”, *Remote sensing*, 12(12).

ROHANI, M., GINGRAS, D. Y GRUYER, D. 2014: “Dynamic base station DGPS for cooperative vehicle localization”, *International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE 2014 – Proceedings*: 781–785.

VICKERS, R. S. Y DOLPHIN, L. T. 1975: “A Communication on archaeological radar experiment at Chaco Canyon, New Mexico”, *MASCA Newsletter (Museum Applied Science Center for Archaeology)*, 11(1): 6–8.

WELLS, D., BECK, N., DELIKARAOGLOU, D., KLEUSBERG, A., KRAKIWSKY, E., LACHAPPELLE, G., LANGLEY, R., NAKIBOGLU, M., SCHWARZ, K., TRANQUILLA, J. Y VANICEK, P. 1987: *Guide to GPS Positioning*, Canadian GPS Assoc.