

- Bermejo, J., Campos, J.M.; Sebastiani, R., Fernández, L., Marfil, F., Bermejo A., D'amma, C., 2021b. "El denominado muelle de la linterna en Portus. Primeras investigaciones y resultados". *Actes du 12ème Colloque Historique de Fréjus 16 et 17 novembre 2018 – Fréjus, Les ports dans l'espace méditerranéen antique Fréjus et les ports maritimes*. 303-316
- Bermejo, J., Campos, J.M., Sebastiani, R., Fernández, L., Bermejo, A., Marfil, F., D'amma, C., Baena, E., Domínguez, E., Rodríguez, N. E., Sánchez, L. J. 2021c. "Los puertos imperiales de Roma: investigaciones geoarqueológicas en el muelle este-oeste de Portus", en Campos, J.M., Bermejo, J. (eds) *Del Atántico al Tirreno, puertos hispanos e itálicos. L'erma di Bretschneider*. Roma, 583-610.
- Canina, L. (1830), *Indicazione delle rovine di Ostia e di Porto e della supposizione dell'intero loro stato delineata in quattro tavole*. Roma
- Keay S, Millett M, Paroli L, Strutt K. 2005. *Portus: An Archaeological Survey Of The Portus Of Imperial Rome*. Archaeological Monographs of the British School at Rome 15. London: British School at Rome; 2005.
- Lanciani, R. 1868. *Ricerche topografiche sulla città di Porto*, Roma
- Lugli, G., Filibeck, G. 1935. *Il Porto di Roma Imperiale e l'agro portuense*, Roma.
- Marín, C., Gómez, G., Ruiz, F., Rodríguez-Vidal, J., Gómez, P., Campos, J.M., Sebastiani, R., Bermejo, J., Muñiz, F., González-Regalado, M. L., Abad, M., Izquierdo, T. 2021. "Paleobiología del muelle de la Linterna (Portus, Roma)", en Campos, J.M., Bermejo, J. (eds) *Del Atántico al Tirreno, puertos hispanos e itálicos. L'erma di Bretschneider*. Roma, 635-654.
- Mazzini, I., Faranda, C., Giardini, M., Giraudi, C., Sadori, L. 2011. "Late Holocene palaeoenvironmental evolution of the Roman harbour of Portus, Italy". *Paleolimnol.* 46, 243-256.
- Muñiz, F., Belaústegui, Z., Gómez, P., Rodríguez, J., Bermejo, J., Campos, J.M., Ruiz, F., Cáceres, L., Marín, M., Gómez, G., Toscano, A., González-Regalado, M.L., Abad, M., Izquierdo, T. 2021. "El rol de la zonación icnológica-ecológica en el muelle de la Linterna de Portus", en Campos, J.M., Bermejo, J. (eds) *Del Atántico al Tirreno, puertos hispanos e itálicos*. L'erma di Bretschneider. Roma, 611-634.
- Panziere, C., Ricci, G., Sebastiani, R., Fiorentino, R. .2016. "Le Terme della lanterna", *Forma Urbis, Portus, Archeologia alle porte di Roma*, Anno XXI, n., 12, 41-43.
- Verduchi, P.A. 2004. "Notizie e riflessioni sul porto di Roma", *Le strutture dei porti e degli approdi antichi* (Gallina, A. y Turchetti), *Il Seminario*. Roma-Ostia Antica, 233-246.

3.

Aplicación y desarrollo de métodos y técnicas digitales en el estudio del muelle este-oeste de Portus

A. Bermejo, J. Bermejo

Centro de investigación en patrimonio histórico, cultural y natural. Universidad de Huelva

Resumen

A lo largo de diversas campañas de intervención en el muelle este-oeste de Portus entre los años 2019 y 2021, el grupo de arqueología de la Universidad de Huelva, Vrbánitas. Arqueología y Patrimonio, ha desarrollado múltiples labores de análisis y teledetección con nuevas técnicas digitales aplicadas a la arqueología. En este sentido, en el siguiente capítulo se abordan todas las cuestiones metodológicas, así como resultados obtenidos relativos a los procesos de fotogrametría láser combinada y geofísica, la cual ha abarcado desde mediciones mediante tomografía eléctrica vertical hasta detección mediante georradar. Estos trabajos han aportado un nutrido conjunto de datos, que, de forma conjunta con los obtenidos mediante el proceso de excavación, refuerzan el conocimiento que a día de hoy se tiene del muelle este-oeste de Portus en cuanto a técnica edilicia, articulación de infraestructuras y estado de conservación.

Palabras clave

muelle; georradar; fotogrametría; tomografía eléctrica; Portus

Abstract

Throughout various intervention campaigns on the east-west pier of Portus between 2019 and 2021, the archeology group of the University of Huelva, Grupo Vrbánitas. Archeology and Heritage, has developed multiple analysis and remote sensing tasks with new digital techniques applied to archaeology. In this sense, the following chapter will address all the methodological issues as well as the results obtained with respect to the combined laser photogrammetry and geophysics processes, which have ranged from detection by vertical electrical tomography to detection by georadar. This work has provided a large set of data, which, together with the results obtained through the excavation process, reinforces our current knowledge of the Portus east-west wharf in terms of building technique, infrastructure articulation and state of conservation.

Keywords

dock; georadar; photogrammetry; electrical tomography; Portus

Introducción: Nuevas tecnologías aplicadas a la investigación arqueológica

El desarrollo e incorporación de nuevos métodos no invasivos para la documentación, análisis e incluso la difusión del patrimonio, está suponiendo, cada vez más, un aporte fundamental de información en el ámbito arqueológico que se complementa con los métodos tradicionales de excavación y prospección superficial. En este sentido, y gracias al avance en las nuevas tecnologías, con microprocesadores y computadoras más rápidas y potentes, hoy en día contamos con una numerosa producción científica relacionada con el uso de estas herramientas (Grangeia y Matías 2004; Caro 2012; Cheli 2012; Ortiz 2013; Berenguer 2014; Charquero 2016; Karina y Arévalo 2014; Magalhães Barredo y Gaspar 2018; Bondsall 2019; Bermejo et al. 2021).

En este sentido, Portus también posee un amplio desarrollo de trabajos arqueológicos orientados desde la perspectiva de los métodos no invasivos, en donde destacan, sobre todo, los trabajos de tomografía eléctrica vertical, barrido magnético de protones libres, georradar y fotogrametría desarrollados por la British School y la Universidad de Southampton (Keay y Kay 2017; 2018; Kay et al. 2019; Keay Kay y Pomar 2021) (Figura 1), a los que han venido a sumarse los trabajos con este tipo de métodos desarrollados en el proyecto sobre el muelle de la linterna por parte de la Universidad de Huelva. Así pues, desde el año 2017, se han empleado diversas técnicas no invasivas como la fotogrametría láser combinada y la geofísica, mediante georradar y relevamientos eléctricos

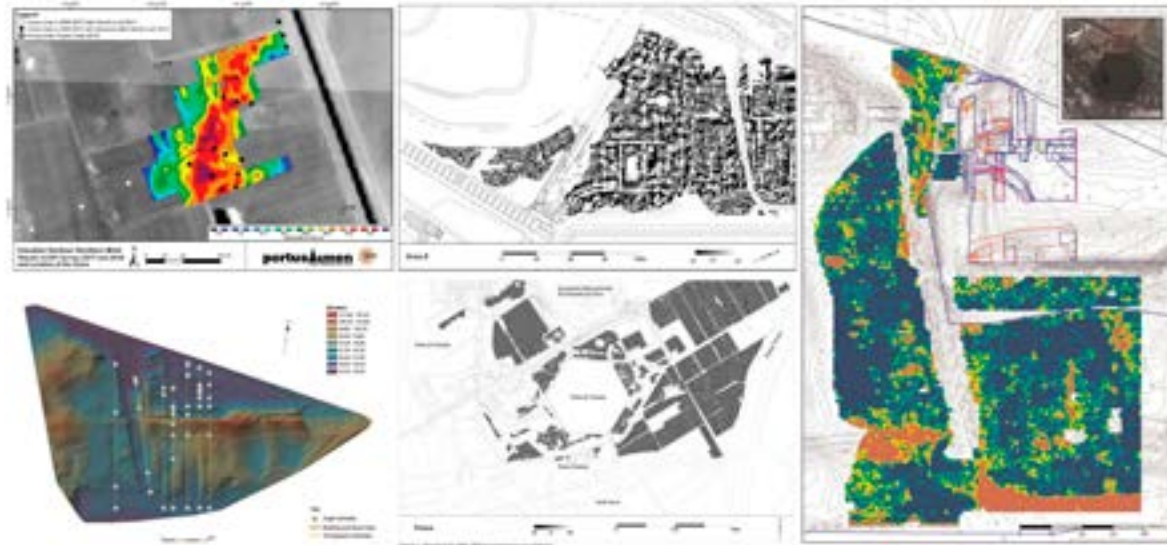


Figura 1. Diversos trabajos no invasivos llevados a cabo en el Parque Arqueológico de Ostia-Antica (A partir de Kay *et al.* 2014 Figs. 3 y 4).



Figura 2. Área analizada mediante sistema fotogramétrico combinado.

mediante tomografía eléctrica vertical, trabajos todos estos, incluidos en el marco de un protocolo de investigación firmado entre el Parco Archeologico di Ostia Antica y la Universidad de Huelva, así como en el contexto de los proyectos de investigación del Plan Nacional de I+D+i “Del Atlántico al Tirreno, los puertos atlánticos béticos y lusitanos y su relación comercial con *Ostia Antica* (DEATLANTIR)” y del Proyecto Arqueológico en el Exterior “Del Atlántico al Tirreno (DEATLANTIR): Investigaciones en las infraestructuras de *Portus-Ostia Antica*. El muelle de la Lanterna”.

El objetivo principal del empleo de estos métodos estaba orientado a la necesidad de conocer de forma más detallada el estado de conservación de las estructuras, así como obtener nuevos datos con respecto al sistema constructivo que vendrían a sumarse a los aportados por otros métodos, caso de la excavación.

Como consecuencia de la aplicación de estos métodos, la documentación mediante fotogrametría estándar de corto alcance y de láser combinada, se han podido obtener modelos escalados muy precisos, de altísima resolución, de todos los sondeos realizados, todas las estructuras documentadas, así como del propio muelle, lo que permite no sólo un cuerpo de infografía de alta resolución en 2D – 3D, sino un recurso digital en el que poder llevar a cabo procesos de retopología y posterior anastilosis virtual mediante los cuales poder comprobar hipótesis iniciales de partida y plantear algunas nuevas.

Fotogrametría láser combinada

La fotogrametría láser combinada radica en la implementación y combinación de varios procesos fotogramétricos estándares de forma conjunta con el escaneo mediante el uso de equipamiento específico para la toma de datos láser masivos en formato nube de puntos. En este sentido, el principal beneficio que se obtiene de realizar este proceso combinado es la obtención de un modelo 3D de la superficie en alta resolución, el cual mantiene unos márgenes de error cercanos al 1-3 mm.

Es por ello por lo que la realización de estos trabajos ha supuesto un punto de partida desde el que analizar y comprender la estructura del así llamado muelle de la linterna, a nivel microespacial, al permitir un análisis con un margen de error mínimo de todos y cada uno de los elementos y unidades constructivas (positivas y negativas) que lo componen.

Estos trabajos se desarrollaron entre las campañas de 2019 y 2020, teniendo como principal objetivo la documentación de toda el área de estudio en extensión, con una superficie de análisis de 707,8 m², la cual comprende la suma total de la superficie escaneada (paramentos, estructuras y suelos) (Figura 2).

En este sentido la fotogrametría convencional se define como un método de levantamiento indirecto que permite medir y registrar coordenadas tridimensionales y producir representaciones muy precisas (gráficas o fotográficas) de todo tipo de objeto, cuya imagen o imágenes puedan ser registradas mediante rayos de luz sobre soportes analógicos o digitales (Cheli, 2012: 25), esta fotogrametría denominada como fotogrametría de alcance corto (*close-range photogrammetry*) presenta múltiples ventajas a la hora de realizar un levantamiento 3D.

Su funcionamiento esta basado en la toma masiva de imágenes del área de estudio de forma consecutiva y lineal, manteniendo una separación constante entre imágenes y un grado de solape u *overlap* igual o superior al 70%. Esta disposición en la toma de datos es la que facilita el calculo de puntos y vectores de dirección en cada imagen y permiten obtener un modelo en tres dimensiones de la superficie en particular (Figura 3). En este sentido, cabe destacar la necesidad de contar con una serie de factores internos y externos que jugarán un papel esencial en el proceso fotogramétrico. Dentro del grupo de factores internos, se encuentran todos aquellos relacionados con el equipo fotográfico que se cuenta (cámara, objetivo, pertiga/trípode...etc), mientras que en el grupo de los factores externos contamos con todos los aspectos relacionados con la climatología, presencia de agua o humedad, exceso de vegetación...etc.

Por su parte, el escaneado laser consiste en el empleo de un equipo específico (escáner geodésico) para la toma de millones de puntos con un margen de error milimétrico mediante un barrido parcial o total en 360° de una estructura, elemento, superficie u objeto. Este tipo de toma de datos tiene su fundamento en la teoría del espectro electromagnético que define la emisión o absorción de radiación de una sustancia expresada en frecuencia, términos de energía y longitud de onda. En este sentido la parte visible del espectro electromagnético es la luz, la cual queda definida como una composición de colores donde cada color representa una longitud de onda diferente. En este caso el uso de luz láser para realizar levantamientos 3D, emplea la medición de tiempo en la variante activa (Figura 4), característica definida como un sistema basado en la emisión de radiación controlada que no necesitan de luz ambiental para escanear y le confiere al proceso rapidez y precisión (Blais 2006). Por lo tanto, los escáneres calculan la distancia entre éstos y el objeto en función del tiempo de vuelo que transcurre entre la emisión del pulso láser y la recepción.

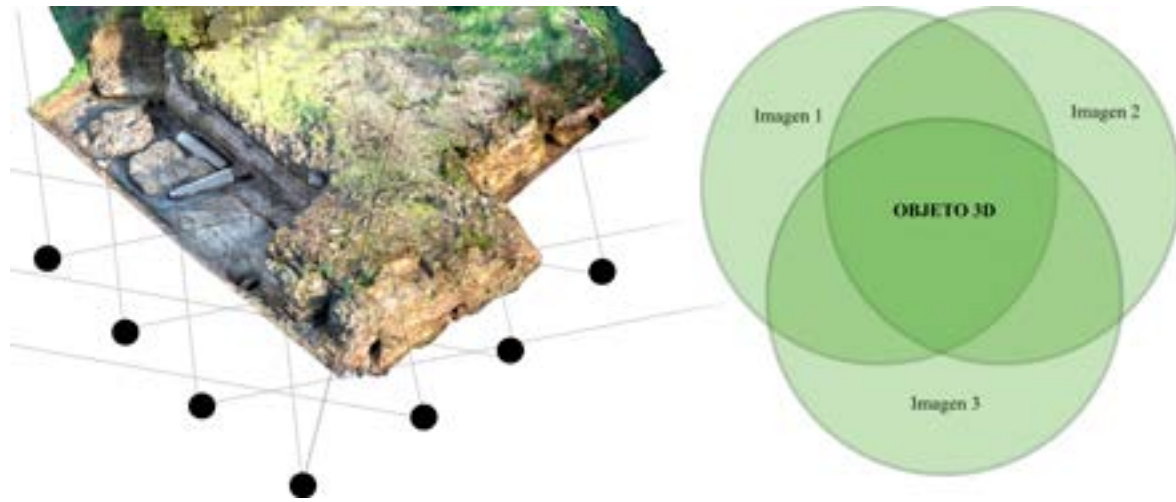


Figura 3. Esquema básico del funcionamiento de la fotogrametría.



Figura 4. Esquema básico sobre el sistema de medida láser.

completa todas las particularidades de cada paramento y estructuras que conformaba el muelle en su parte final. En este sentido, contamos con una primera secuencia de imágenes que fue tomada a una elevación absoluta del suelo de 0,90m, a la cual se le sumó una segunda secuencia a una altura fija de 1,40m que permitía un solape básico y eficiente en altura, la cual se vio reforzada finalmente con una tercera secuencia de imágenes dispuestas a una altura relativa de 1,90-2m. Conjuntamente, dichas tomas de imágenes se encontraban separadas linealmente 0,50m las unas de las otras, asegurando así de forma global un solape óptimo en altura y distancia.

A su vez, las sucesivas tomas de imágenes que compusieron estos tres niveles básicos de altura fueron reforzadas con 4 secuencias más de fotografías, así como con imágenes recogidas con un Drone, con alturas y distancias relativas con respecto a la estructura, en función del contorno/superficie de esta. Este aspecto se presentó como un aporte metodológico fundamental al presentar la estructura objeto de estudio múltiples oquedades y grietas las cuales requerían una atención especial a la hora de su documentación.

Seguidamente, fueron tomados una serie de puntos de control mediante el empleo de la estación total, los cuáles se emplearon en la geolocalización del modelo fotogramétrico en sus diversas fases de proceso y postproceso. Este paso permite posicionar y dimensionar de forma correcta el modelo 3D, obteniendo la escala de cada uno de los elementos georreferenciados global y parcialmente.

Finalmente, este nutrido cuerpo de datos fue sometidos a un proceso computarizado. En este sentido, cada vez más, el empleo de varios softwares específicos de forma conjunta está siendo la mejor forma para obtener resultados óptimos en fotogrametría a corto alcance. En este caso en particular, para el procesado y postprocesado de los datos fue necesario el empleo de diversos softwares como *Agisoft Metashape*, *3DF Zephyr-Aerial* y *Pix4D Mapper*. Para lo cual, tras cargar el conjunto de imágenes, los motores de trabajo de estos softwares trabajan en el cálculo de vectores y puntos referenciales, así como en el de colores para realizar tanto el modelo como la texturización fotorealística del mismo, apoyándose en el grado de solape empleado entre una imagen y otra, el cual en este caso rondaba el 80% (Figura 5).

Estos equipos incorporan un detector de alcance, el cual será el encargado de calcular la distancia a una superficie al controlar el tiempo de regreso (García-Gómez *et al.* 2011).

Teniendo esto presente, se debe considerar una serie de factores a la hora de realizar el escaneado para minimizar el factor error. En primer lugar, tenemos el objeto a documentar, el cual puede suponer la principal fuente de error en lo relativo a su capacidad de reflectancia, la cual irá en función de las propiedades del objeto, el color de la superficie, ángulo de incidencia, rugosidad y temperatura de la superficie (Ingesand y Shulz 2003). En segundo lugar, los factores ambientales, los cuales aglutinan una serie de variables como la temperatura ambiente, la atmosfera, interferencias de luz externas o la distorsión de movimiento, siendo esta última las más difícil de controlar, pues el objetivo principal del trabajo de escaneado es que no haya movimientos relativos entre el objeto y el escáner para evitar vibraciones y ruidos (Reshetyluk 2006). Así pues, y con el posible margen de error provocado por estos factores ya calculado, la metodología a seguir es relativamente sencilla, utilizando una densidad de malla mas baja que la precisión por punto del escáner para evitar el sobremuestreo y simplificando el ruido, sobre todo a la hora de registrar diferentes nubes de puntos en una sola (Lerma y Biosca 2008).

Fotogrametría estándar

El planteamiento fotogramétrico estándar llevado a cabo entre las campañas 2019 y 2020, se desarrolló en tres niveles básicos de altura con la finalidad de abarcar de forma uniforme y

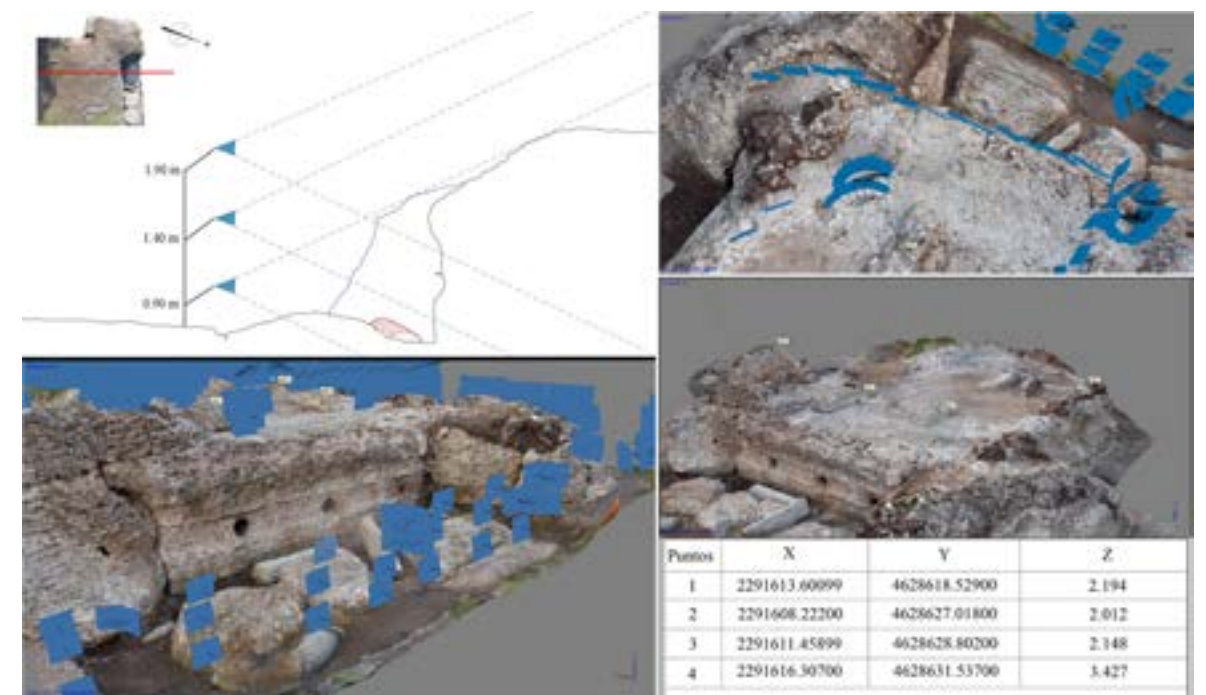


Figura 5. Planteamiento y resultados fotogramétricos de corto alcance en el denominado muelle de la linterna.

Escáner Láser

De forma conjunta con el planteamiento fotogramétrico estándar, se realizó otro mediante el empleo de un láser escáner de pulso (modelo *Topcon GLS-2000-Tipo L*). Las diferencias existentes entre el método estándar y este otro método empleado para realizar fotogrametría, radica en la precisión aportada por el escáner en las nubes de puntos densas. El equipo empleado permite un escaneo con proximidad de puntos que oscilan entre los 3,1 y 6,5mm, lo que permite obtener un modelo digital 3D de alta resolución, alcanzando valores cercanos a ± 1 mm de error, y un alcance (también ajustable) de hasta 500m.

Su funcionamiento en 360° horizontales y 360° verticales permite obtener una nube de puntos densa panorámica, no obstante, debido a las características de la estructura del muelle y su cabeza se hizo preciso plantear dos secuencias de tomas de datos, una en la zona baja y otra en la zona *supra del molo*, alternando escaneos a 6,5 mm y a 3,1 mm los cuales fueron mayoritarios.

Para ello, mediante el empleo de la estación total, se plantearon un total de 22 puntos de escaneo en la zona inferior y 5 en la zona superior. También, debido a la necesidad de la geolocalización de las diferentes nubes densas, se posicionaron un total de 5 puntos de control, complementados con hasta un total de 13 puntos de apoyo y 1 de carácter general para los prismas. Así mismo, para reforzar el posterior proceso de montaje de las nubes densas, se hizo necesario el planteamiento de 4 puntos auxiliares desde los cuales se realizarían escaneos de forma conjunta con algún punto de control. El posicionamiento de todos los puntos, respondieron a la configuración estructural del molo, así como a la necesidad de poseer un ángulo entre el cabezal del escáner y los puntos de apoyo, igual o inferior a 90°, con la idea de optimizar la toma de datos.

Así mismo, al revisar la configuración arquitectónica de la estructura, sobre todo en su zona baja, se consideró pertinente ampliar la toma de datos con una nueva secuencia en los puntos de la zona baja, pero a una altura variable entre los 0,20m y los 0,45m, debido a que se buscó obtener la mayor resolución de nubes concernientes a la estructura interna de la estructura del muelle a través de las negativas dejadas por el propio sistema constructivo.

Siguiendo este planteamiento se realizaron un total de 51 escaneos, 29 de ellos a una ratio de separación entre puntos de 6,5mm, y 22 a una ratio de 3,1 mm. Para el procesado y postprocesado de datos escáner, fue preciso el trabajo conjunto de tres softwares específicos como MAGNET Collage, JRC 3D Reconstructor 4.0 y 3DF Zephyr Aerial. En ellos se trabajó con las diferentes nubes densas producidas por el escáner, para limpiar el ruido generado por la vegetación, realizar procesos de unión y afinamiento de las diferentes mallas, hasta obtener el resultado final que ofrece el procesado con estos softwares, pudiendo sectorizar las zonas de estudio por estructuras o por frentes de trabajo, e incluso obtener modelos digitales del terreno (MDT) de los mismos (Figura 6).

El principal resultado obtenido con este sistema combinado de toma de datos es un modelo fotogramétrico georreferenciado de alta resolución de todo el sector de la cabeza del muelle intervenido y su correspondiente modelo digital de elevación (Figuras 8-11). Asimismo, la obtención de un modelo digital completo de la estructura nos ha facilitado una fuente de información bastante amplia en lo que respecta al sistema constructivo empleado, en base a una serie de detalles que, a simple vista, por la dificultad del terreno o debido a la dimensión de la estructura, no se pueden apreciar.

Otro de los aspectos más interesantes arrojados por la toma de datos del escaneo láser, es la documentación de las negativas dejadas por el sistema de encofrado empleado para la construcción del muelle y su cabeza. Gracias a la toma de datos a diferentes alturas, se pudieron georreferenciar la posición, el número exacto y la orientación de un total de 34 negativas, las cuales en sí mismas

encierran un valioso conjunto de datos que nos permitirá reconstruir prácticamente a la perfección el sistema constructivo empleado (Figura 11).

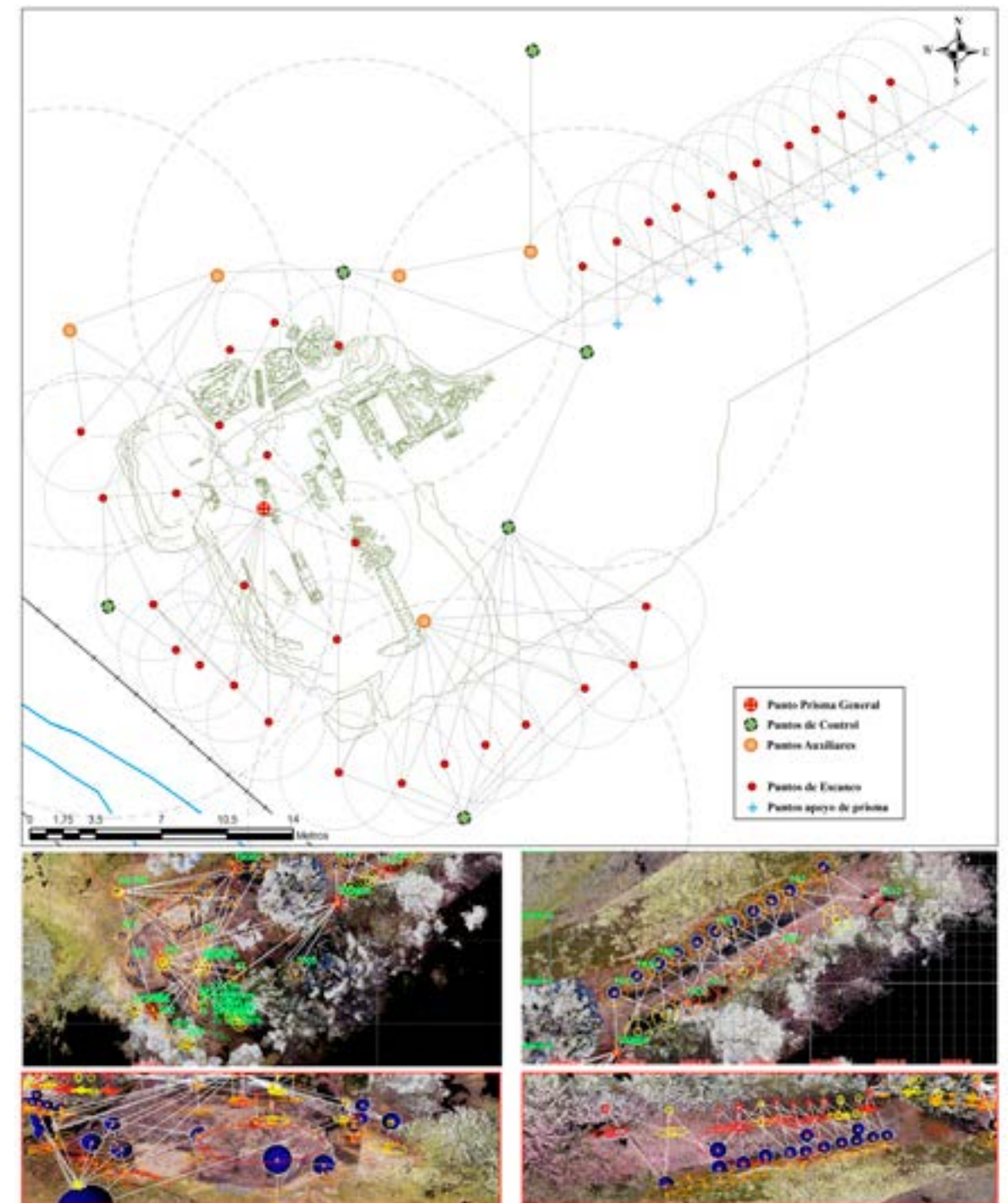


Figura 6. Planteamiento metodológico de escaneo láser de los trabajos realizados entre 2019 y 2020. Visualización previa de los resultados en MAGNET Collage.

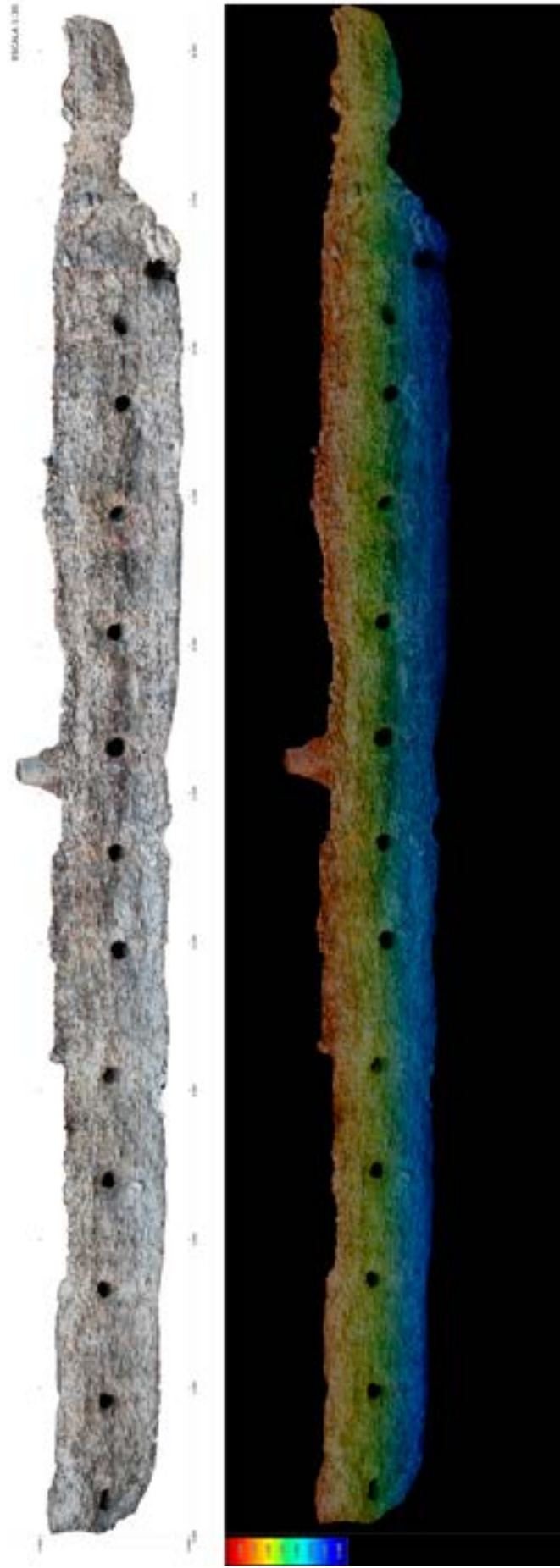


Figura 7. Ortoimagen del tramo final del Muelle de la Linterna en su cara Norte.

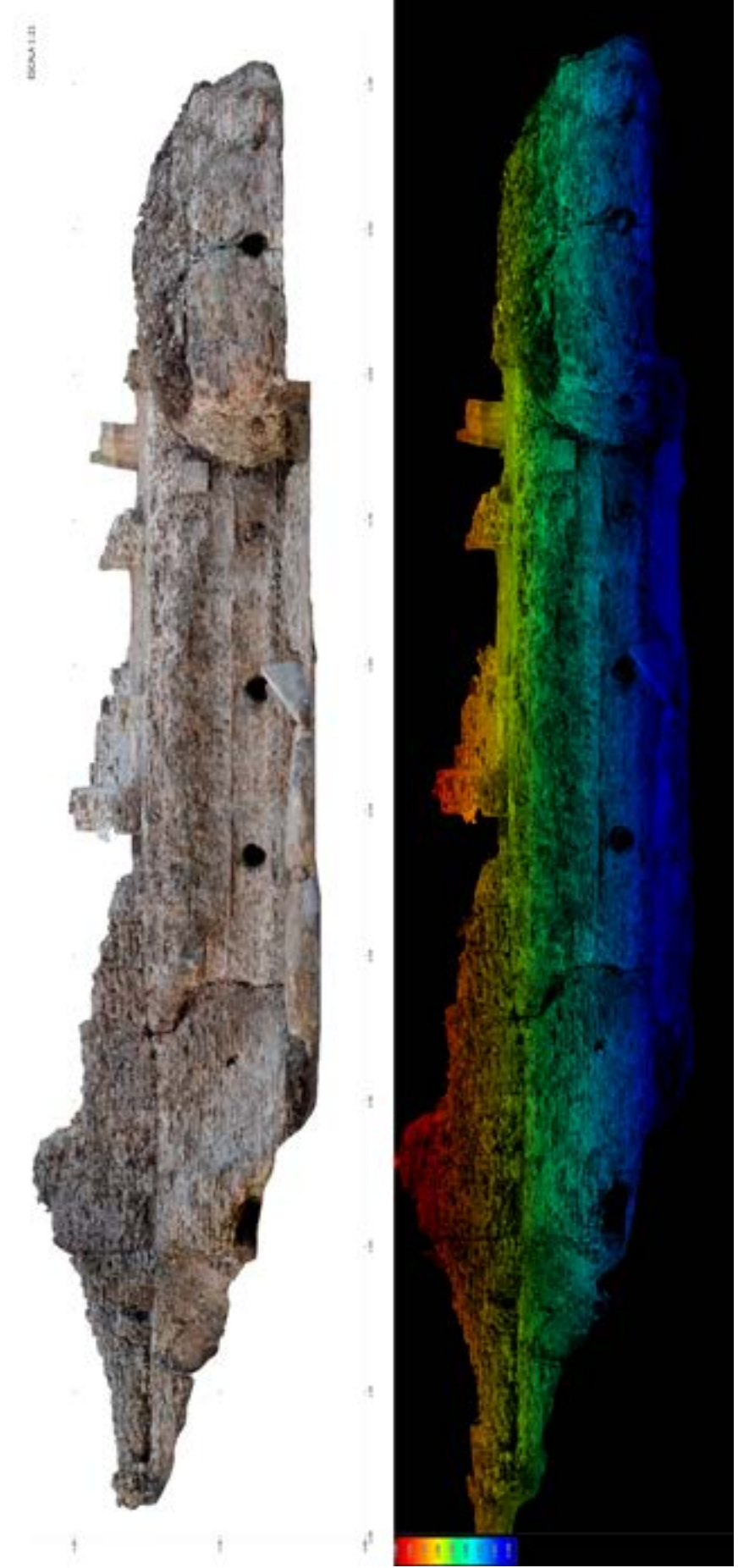


Figura 8. Ortoimagen de la cabeza del Muelle de la Linterna en su cara Norte



Figura 9. Ortoimagen de la cabeza del Muelle de la Linterna en su cara Oeste.

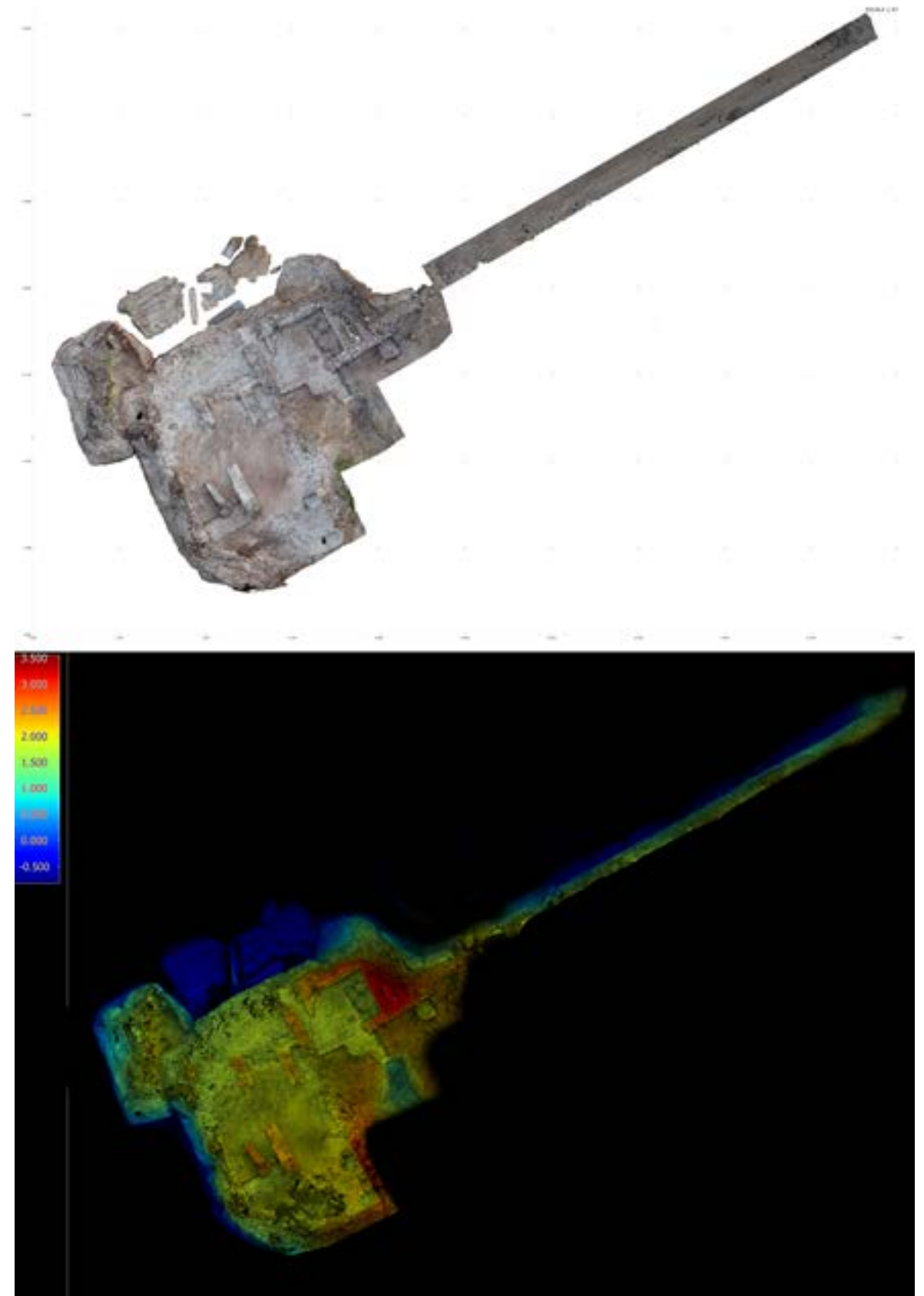


Figura 10. Ortofoto de toda el área escaneada.

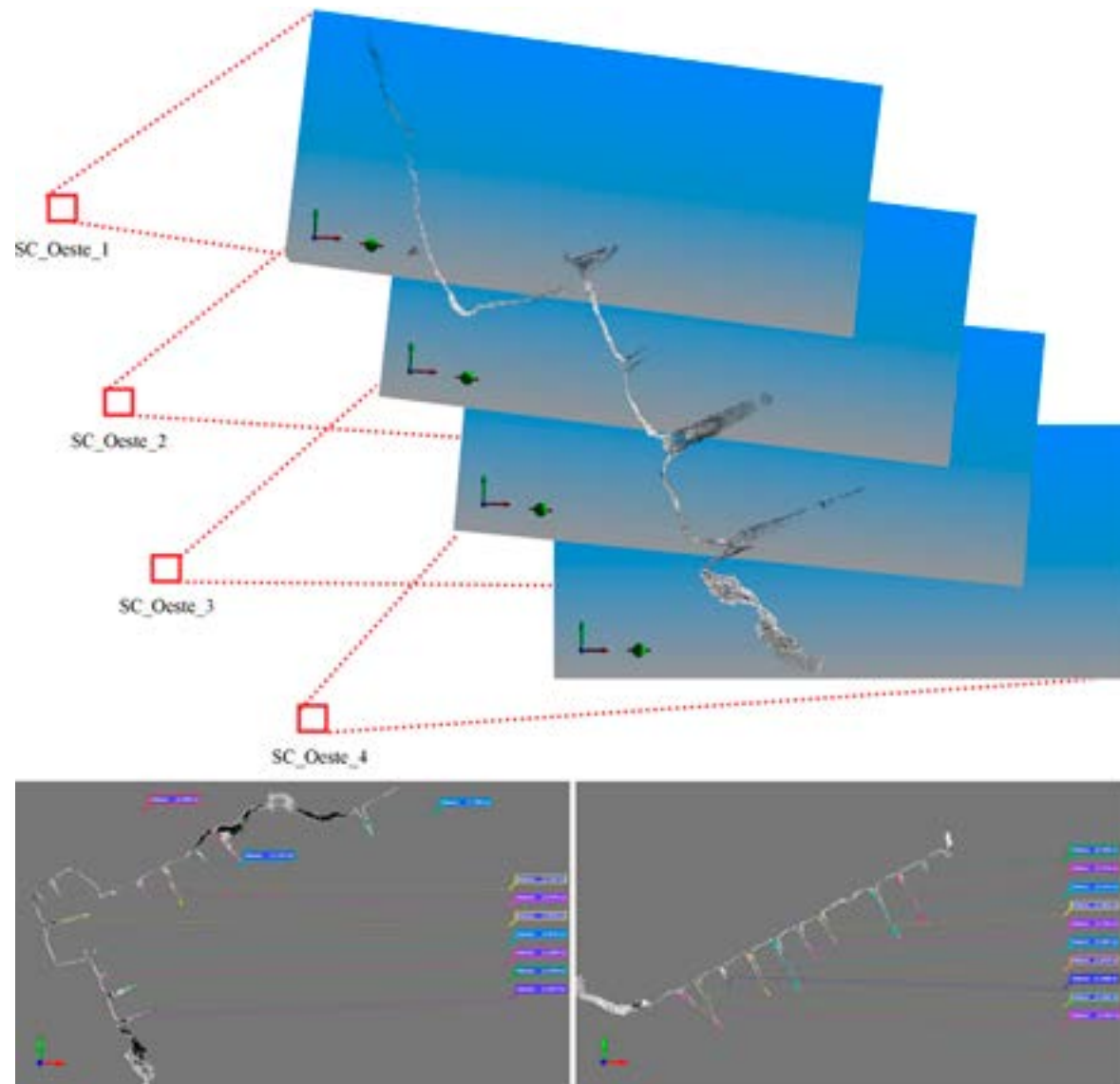


Figura 11. Imágenes de detalle con las medidas de las negativas extraídas (JRC-Reconstructor) en la sección transversal del muelle y la cabeza.

Métodos no invasivos: Georradar y Tomografía Eléctrica Vertical

Georradar

El georradar es un método de prospección geofísica cuya base radica en el empleo de ondas electromagnéticas las cuales son emitidas y recibidas por una antena de determinada frecuencia, y en su tiempo de viaje muestran determinadas anomalías magnéticas asociadas al subsuelo. Su aplicación en la arqueología permite la caracterización del subsuelo de forma no invasiva, lo que se configura como una herramienta muy útil para la identificación de estructuras enterradas y la delimitación de sectores de mayor interés a excavar.

De forma más específica, el método de georradar se basa en la emisión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia hacia el suelo para que, de existir estructuras arqueológicas, (muros, cimientos o piedras sueltas), puedan reflejar una parte de la energía de las ondas. Por medio de una antena se registra la parte reflejada de las ondas, por lo que su amplitud y su tiempo transitorio resultan en la información sobre posibles estructuras en el suelo. La profundidad máxima y la nitidez de

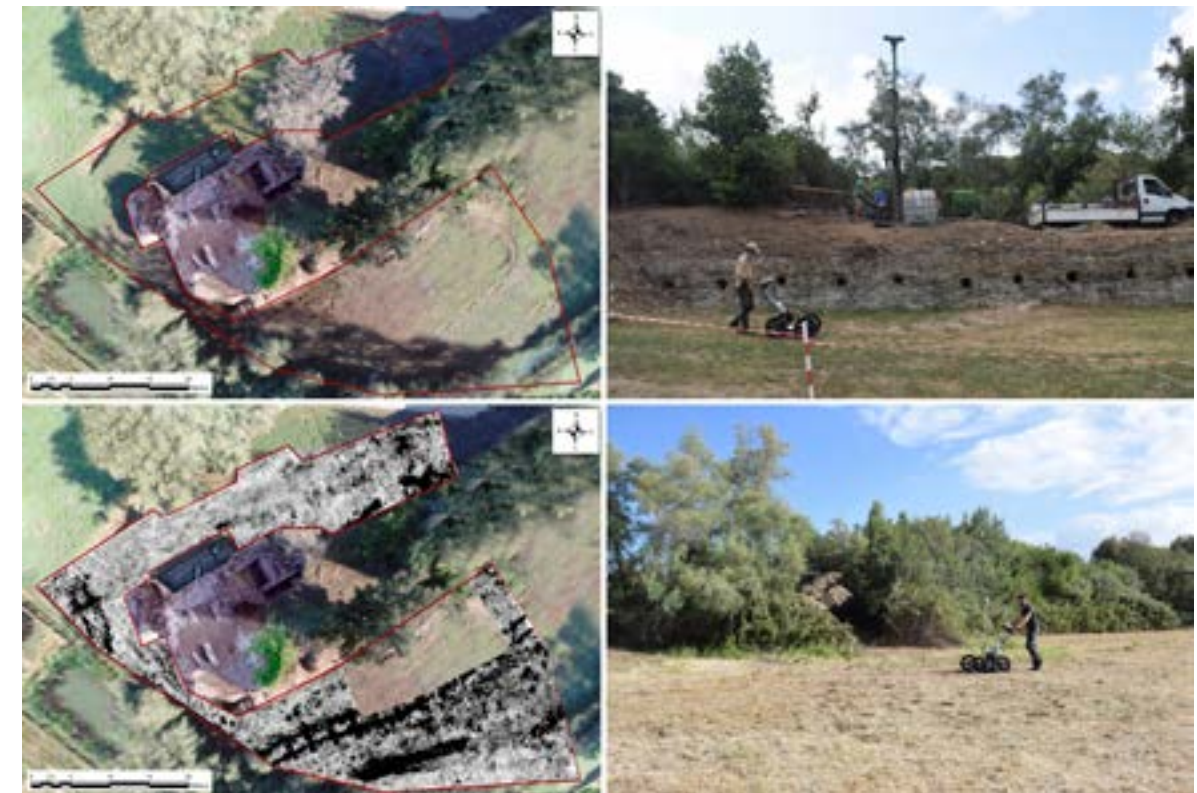


Figura 12. Área prospectada mediante trabajos de georradar y resultados preliminares.

las estructuras localizadas dependen mucho de los materiales y de la estructura/composición del suelo, por lo que generalmente la profundidad máxima es más grande en suelos arenosos en comparación con suelos ricos en arcilla. Además, la frecuencia de la antena genera una relación inversamente proporcional entre profundidad/resolución, es decir, frecuencias bajas (50 hasta 250 MHz, aproximadamente) permiten la penetración de 2 hasta 10 m de profundidad, pero se empobrece la resolución lateral, mientras que, por el contrario, antenas de alta frecuencia (400 MHz hasta 2 GHz) alcanzan una profundidad máxima de 2-5 m con una resolución lateral mejorada.

Asimismo, hay que tener en cuenta que las condiciones de la propagación de las ondas electromagnéticas dependen de las características eléctricas y magnéticas del suelo. Un parámetro clave es el contenido de agua del suelo, pues el líquido elemento tiene una permisividad o constante dieléctrica (ϵ) muy alta que causa un amortiguamiento fuerte de las ondas (más aún si es salada). Por este motivo suelos secos ofrecen mejores condiciones para mediciones de georradar en comparación con suelos saturados. Un segundo efecto importante tiene su origen en la presencia de minerales arcillosos. En suelos ricos en arcillas se observa una penetración escasa de las ondas electromagnéticas. Este efecto tiene su base en la existencia de agua cristalizada ligada en la estructura interna los minerales de arcilla.

La prospección georradar en el entorno del muelle Este-Oeste de *Portus* se realizó durante la campaña de 2021, mediante el empleo de un sistema de georradar MALÅ con receptor de fibra óptica modelo *ProExplorer*. Este equipamiento fue empleado de forma alterna con dos antenas de distinta frecuencia (500 MHz -250 MHz) integradas en un sistema de tracción manual tipo Rover que cuenta con un *encoder* integrado que recibe coordenadas de posicionamiento mediante *RTK-GNNS* Topcon modelo *Hiper HR*. En este sentido se prospectaron un total de 1265 m² (0,12 ha) abarcando los sectores Norte-Oeste y Sur del muelle mediante pasadas longitudinales que formaban un grillado cuya finalidad es obtener un radargrama más denso y tupido con mayor presencia de conexión de datos entre anomalías (Figura 12).

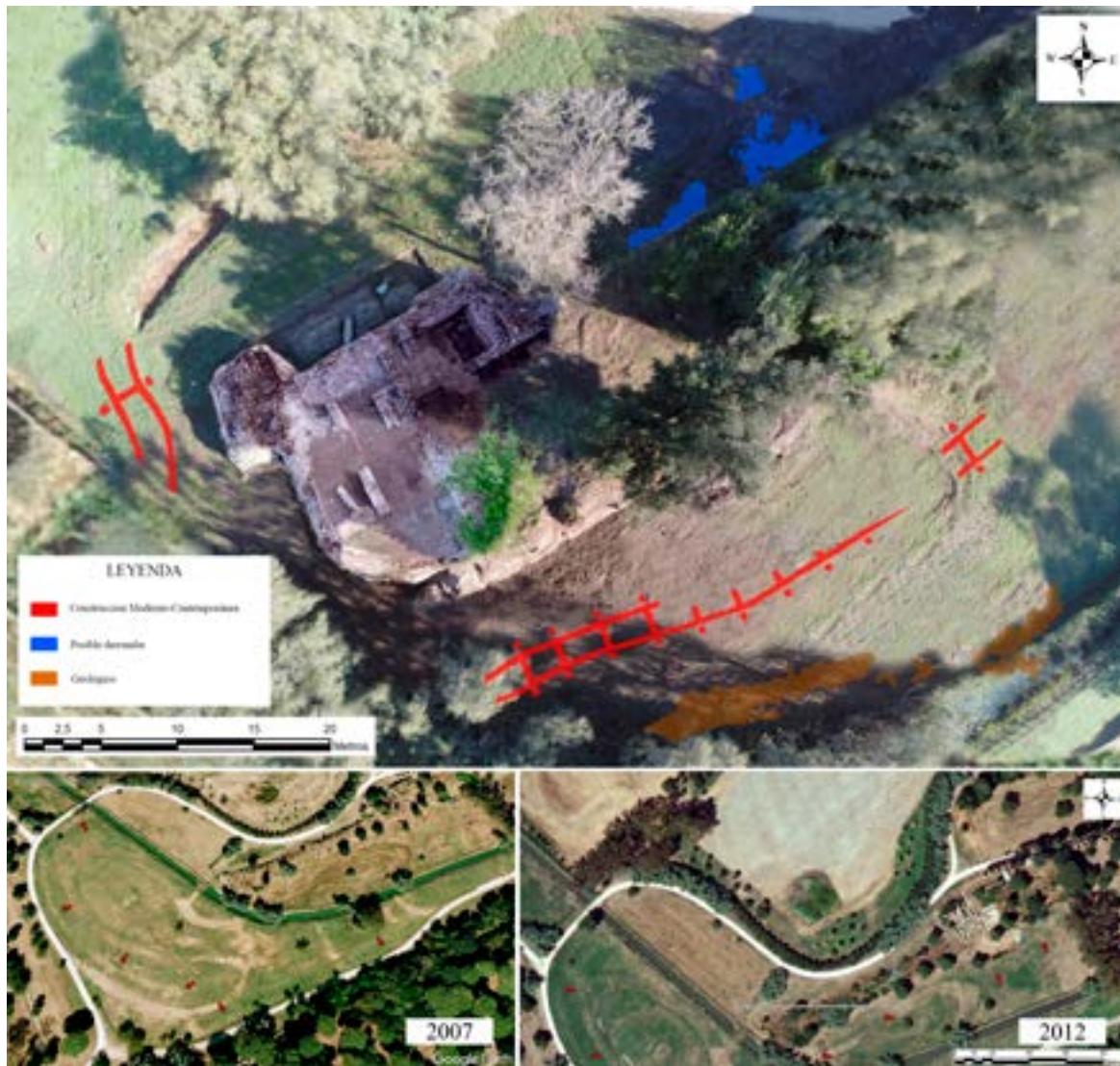


Figura 13. Interpretación de los resultados obtenidos mediante georradar. Imágenes satelitales con indicación de los *crop-marks* provocados por la valla del Zoo-Safari.

La alta resistencia aportada por el sustrato geológico del entorno inmediato del muelle, vino determinado por la presencia de niveles arcillosos y una tasa elevada de presencia de agua, lo que se tradujo en una dispersión de onda corta muy amortiguada que complejizó el postproceso y limitó el resultado de los datos brutos obtenidos durante estos trabajos. Aun así, el proceso de los mismos a través del *software* específico *Reflex 2D-3D*, permitió definir un conjunto de anomalías entre profundidades variables de -5cm y -2m cuya interpretación nos permitió constatar la presencia de diversos elementos constructivos moderno-contemporáneos relacionado con los sistemas de seguridad del parque zoológico ubicado aquí en la segunda mitad del siglo XX y posibles derrumbes de la estructura principal, así como la presencia de algunas anomalías de naturaleza geológica (Figura 13).

Tomografía Eléctrica Vertical

La determinación y cálculo de resistividad real en el sistema 1D, 2D y 3D, se basa en una serie de algoritmos de cálculo directo-inverso como resultado de una lectura de resistividad eléctrica en la distribución del subsuelo (Loke y Barker 1996). En este sentido, la resistividad irá determinada

por un conjunto de factores asociados a la composición geológica del área de estudio, en donde los factores de humedad positiva brindan un entorno, a priori favorable, para la lectura de dicha resistividad. Esto es debido a que los suelos húmedos y con alta presencia de agua en el terreno, así como los suelos arcillosos, tiene valores muy bajos de resistividad lo que permite una conducción eléctrica óptima (Keller y Frischknecht 1966).

Teniendo presente las limitaciones propias de la toma de datos 1D, los relevamientos eléctricos en 2D y 3D son las técnicas comerciales más usadas en la práctica, con el desarrollo relativamente reciente de instrumentos de resistividad multielectrónico (Griffiths *et al.* 1990) y el *software* de inversión de datos (Loke y Barker 1966). Así pues, y entendiendo el modelo bidireccional (2D) como el más preciso, donde la resistividad cambia tanto en la dirección vertical como en la horizontal a lo largo de la línea de relevamiento (Griffiths y Barker 1993; López *et al.* 2010), la obtención de un modelo tridimensional (3D) de resistividad se obtiene mediante la superposición de varios modelos bidireccionales a través de una metodología de campo específica, el grillado.

Estas mediciones se efectúan de forma generalizada empleando un determinado número de electrodos (24 o más) conectados a un cable multi-nodo, el cual permite una distancia interelectrónica constante entre los nodos adyacentes. Así mismo, la cantidad de datos que se puede obtener para cada espaciado entre electrodos en cada caso, donde el número de electrodos es variable a lo largo de una línea de sondeo, depende del tipo de configuración electrónica o arreglo que se emplee (Wenner, Dipolo-Dipolo, Polo-Polo...etc.).

En este sentido, el grupo de arreglos más común para la obtención de imágenes de resistividad eléctrica son, *Dipolo-Dipolo*, *Wenner-Schulumberger*, *Gradiente*, *Polo-Polo-Polo-Dipolo*, existiendo una serie de características por cada arreglo las cuales deben ser tenidas en cuenta a la hora de realizar la medición, pues en función de la profundidad, la sensibilidad a los cambios horizontales/verticales de la resistividad, así como la cobertura horizontal de datos y la relación de la señal/ruido, determinarán en mayor o menor grado la calidad de los resultados obtenidos.

Así pues, en función de su aplicación al ámbito arqueológico, los arreglos más populares para el sondeo mediante tomografía eléctrica vertical son el *Gradiente* y el *Dipolo Dipolo* (Griffiths y Turnbull 1985; Griffiths Turnbull y Olayinka 1990; López 2010). Por lo general el arreglo tipo *Gradiente* es más operativo para la resolución de los cambios de resistividad vertical provocados por ejemplo por un cambio en la composición del estrato, pero bastante pobre en la detección de dichos cambios derivados por la presencia de estructuras verticales estrechas. Para resolver esta carencia, el arreglo tipo *Dipolo Dipolo* se presenta como el más eficiente a la hora de detectar cambios horizontales, de modo que es más útil para detectar estructuras verticales como muros enterrados o cavidades. En definitiva, la combinación de ambos arreglos en una misma medición, se configuran como la base principal y más favorable para obtener una lectura veraz y completa de un sondeo arqueológico.

Los trabajos de tomografía eléctrica vertical en *portus* se realizaron en la campaña de 2021, utilizando un instrumento de resistividad tipo *ABEM Terrameter* modelo *LS2 Advanced*, equipado con 2 cables de multiconexiones nodales de 24 tomas de salida cada uno y 48 puentes multisalida. Se realizaron dos conjuntos de recolección de datos en dos modos o arreglos diferentes, *Dipolo-Dipolo* y *Gradiente*, mediante el uso de 6 carriles de 23 m separados por 1 m entre sí (Figura 14). Para la corrección geográfica de los datos se utilizó un *GPS* Topcon modelo *Hipe HR* y tres *softwares* específicos *Res2Dinv*, *Res3Dinv* y *Voxler V4*.

Como hemos comentado con anterioridad, si el terreno presenta humedad, *a priori* es más conveniente para obtener mejores resultados, pues dado que la conductividad del agua permite una menor resistividad, cualquier elemento no conductor quedaría bien reflejado en nuestro relevamiento 2D-3D. No obstante, la elevada presencia de agua puede, y en este caso en concreto ha sido así, alterar la lectura de aquellos elementos con alta resistividad, pero de naturaleza porosa

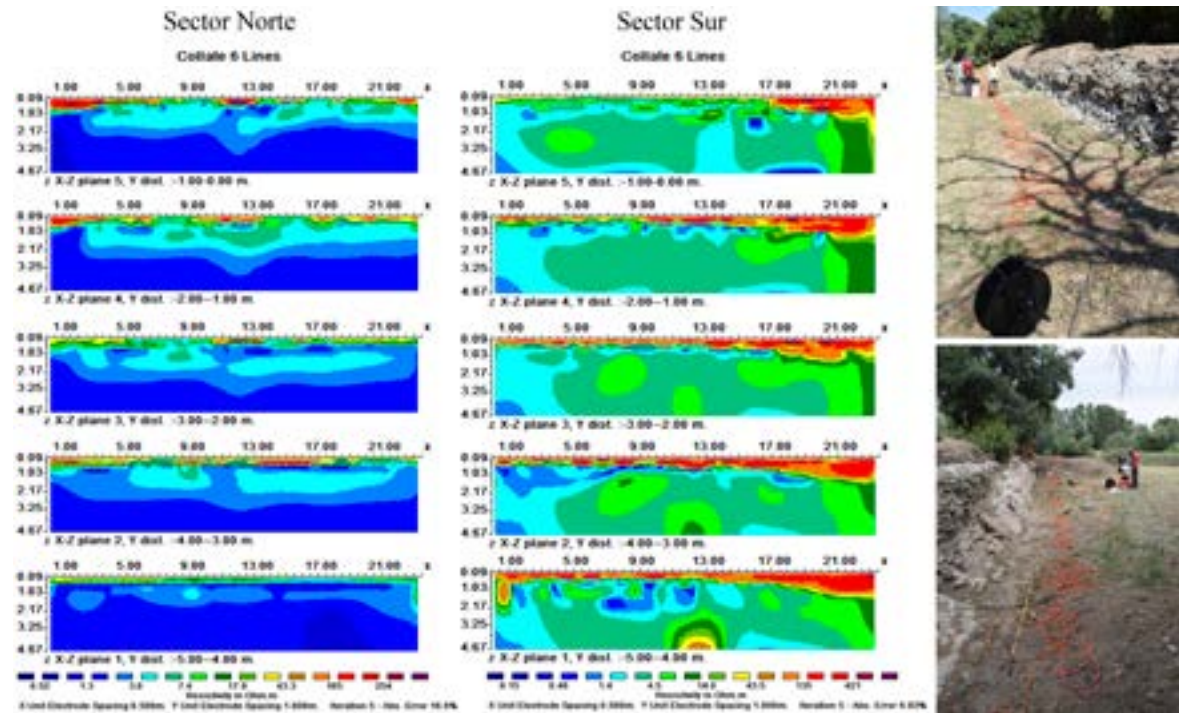


Figura 14. Resultados obtenidos de RE-Ohm.m (Resistividad Eléctrica) en los sectores Norte y Sur. Obtenidos a través de software específico (Res2Dinv/Res3Dinv).

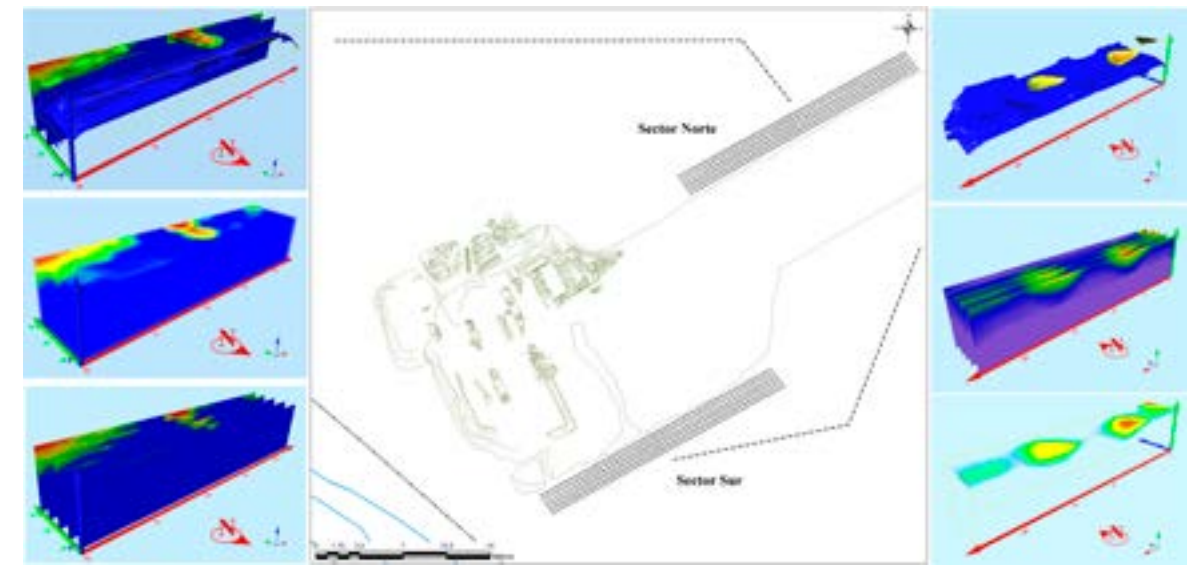


Figura 16. Interpretación tridimensional de los resultados de resistividad (RE-Ohm.m) obtenidos en ambos sectores a través de software específico (Voxler v.4).

u orgánica que han absorbido agua. En este sentido los resultados obtenidos en el muelle de la linterna tanto en el sector Sur como en el Norte, únicamente reflejan unos picos elevados de alta resistividad en las capas más superficiales relacionados sin duda con elementos de derrumbe procedentes de la estructura, y de forma conjunta con dichos picos, un corte de conducción leve-moderado, que evidencian un cambio en la resistividad a partir de los -2m aprox que se mantiene constante a lo largo de la lectura, evidenciando la presencia de la plataforma documentada mediante medios mecánicos en la campaña de 2019, la cual refleja en estas lecturas, debido a su configuración compuesta por elementos porosos o dispersos que permiten la captación y el filtrado de agua, una resistividad moderada o leve frente a la resistividad alta o muy alta que debería reflejar si no contuviese agua. (Figuras 15 y 16).

Conclusiones

Los resultados obtenidos en los trabajos nos invasivos, tanto la fotogrametría láser combinada como la geofísica con georradar y de tomografía eléctrica vertical, han venido a configurarse como un cuerpo de datos muy significativos en el análisis y comprensión del muelle este- oeste. En primer lugar, la obtención de modelos 3D de alta resolución del cuerpo principal del muelle, así como de sus infraestructuras, ha permitido conocer al detalle elementos de su aparejo que, de forma conjunta con el análisis edilicio convencional, corroboran un sistema constructivo caracterizado por el encofrado como solución principal para el alzado del muelle, en una dinámica en donde los vertidos de *caementum* se acoplan longitudinalmente a lo largo de diversas ampliaciones en diferentes fases cronológicas.

Esta dinámica constructiva se ha visto corroborada por los trabajos de excavación, los cuales son abordados detenidamente en los capítulos 4 y 5 de esta monografía. Gracias a estas labores que implicaron la remoción de tierra, se han documentado los restos pertenecientes a la estructura lúnea que conformaba ese encofrado, y sus diferentes niveles de relleno y de nivelación superior para la construcción y desarrollo en altura del muelle. Un sistema compuesto por una plataforma longitudinal paralela al muelle que ejercía como un corredor desde el que poder desarrollar los trabajos de construcción, la cual, además, ha quedado documentada mediante los trabajos de geofísica tanto por su lado norte (documentado mediante trabajos de excavación) como por su lado sur, evidenciado únicamente mediante dichos trabajos de detección.

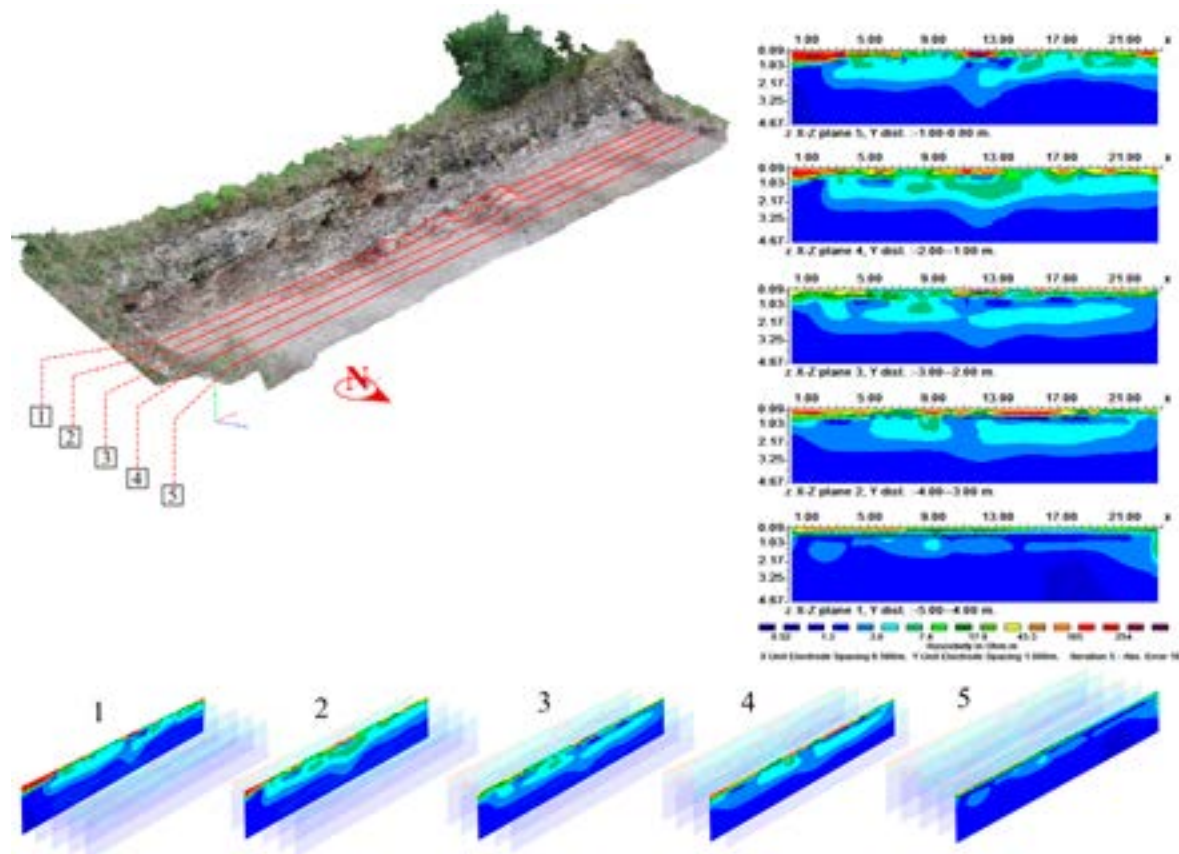


Figura 15. Esquema de ubicación e interpolación de los resultados de RE-Ohm.m del sector Norte.

En definitiva, el desarrollo e implementación de estos nuevos métodos y técnicas no invasivas en los trabajos de excavación y documentación del muelle este-oste han supuesto un punto de apoyo significativo en el avance sobre el conocimiento del mismo. Esto ha permitido contrastar los datos de estas labores con los resultados que se iban obteniendo campaña tras campaña, y aportando en mayor medida, distintos enfoques desde los que abordar su estudio. Asimismo, estos trabajos abren un prometedor camino para futuros proyectos de investigación en esta estructura, la cual aún presenta sugerentes interrogantes por responder.

Bibliografía

- Berenger, F. 2014. Aplicación de técnicas geodésicas y técnicas avanzadas de captura, escáner laser y termografía en el estudio patológico de la estructura y la cimentación en la restauración integral de la Catedral de Santa María de la Asunción de Coria. Tesis doctoral inédita. Universidad de Extremadura.
- Bermejo, J. Bermejo, A., Campos, J.M. y Fernández, L. 2021. Actividad Arqueológica Preventiva de Estudio Diagnóstico, restauración y puesta en valor del Yacimiento del Eucaliptal. (PuntaUmbría, Huelva). Memoria de Intervención inédita.
- Blais, F. 2006. Terrestrial Laser Scanning, in *International Summer School, Digital Recording and 3D Modeling*. Aghios Nikolais. Crete. Grece.
- Bonsall, j. (ed.) 2019. *New Global Perspectives on Archeological Prospection*. Oxford.
- Caro, José L. 2012. *Fotogrametría y modelado 3D: un caso práctico para la difusión del patrimonio y su promoción turística*. Madrid MEC, CNREE
- Charquero, A.M. 2016. Practica de la fotogrametría digital en Arqueología. *Dama* 1: 139-157.
- Cheli, A. E. 2012. *Introducción a la Fotogrametría y su evolución*. Argentina: Hespérides
- Fernandes, A.J. Luiza, A. Gaspar, M. 2018. De Volta ao passado: A Aplicação da fotogrametría para registro arqueológico 3D. *Revista de Arqueología* 31: 185-207.
- Gangregia, C. y Matías, M. 2004. *Técnicas de georadar em prospecção arqueológica: Ançã e S. Martinho de Árvore*. *Revista Portuguesa de Arqueología* vol. 7, 2: 427-434.
- García-Gómez, I. Fernández, M. y Mesanza, A. 2011. Laser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios. *Arqueología de la arquitectura* 8: 25-44.
- Griffiths, D.H. and Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- Griffiths, D.H. and Turnbull, J., 1985. A multi-electrode array for resistivity surveying. *First Break* 3 (No. 7), 16-20.
- Griffiths, D.H., Turnbull, J. and Olayinka, A.I., 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer- controlled array. *First Break* 8, 121-129.
- Ingesand, H., Ryf, A., y Schulz, T. 2003. Performances and experiences in terrestrial scanning. In *Proc. Optical 3D measurement Techniques*. Zurich, Switerland.
- Kay, S., Pomar, E., Keay, S., Strutt, K., Chapkanski, S., Goiran, J.P. 2019. Integrating geophysical and geoarchaeological surveys for the reconstruction of a Roman Port infrastructure: the Claudian Harbour at Portus, in J. Bonsall (ed.) *New Global Perspectives on Archeological Prospection*: 99-103. Oxford.
- Keay, S., Parcak, S.H. y Strutt, K. 2014. High resolution space and ground-based remote sensing and implicaciones for landscape archaeology: the case from Portus, Italy. *Journal of Archaeological Science* , 52: 277-292.
- Keay, S, Kay, S. y Pomar, E. 2021. The Roman Ports Project fieldwork at Portis (Comune di Fiumicino, Provincia di Roma, Regione Lazio). *Papers of the British School at Rome* , Volume 89: 346 – 349.
- Keay, S. and Kay, S. 2017. The Roman Ports Project. *Papers of the British School at Rome*. 13. 220-225.
- Keay, S. and Kay, S. 2018. The Roman Ports Project. *Papers of the British School at Rome*. 86. 317-320.
- Keller, G.V and Frischknecht, F.C., 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press Inc., Oxford.
- Lerma, J.L. y Biosca, J. 2008. Traducción Teoría y práctica del escaneado láser terrestre. Versión 5.
- Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.
- López, A, Loke, H. M., Fanton, G. O. y Rubí, E. C. 2010. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D y 3D). [http://www.goelectrical.com/Articulo.pdf\(15/03/2021\)](http://www.goelectrical.com/Articulo.pdf(15/03/2021)).

- Ortiz, P. 2013. Digitalización automática del patrimonio arqueológico a partir de fotogrametría. *VAR*. Volumen 4, 8: 46-49
- Reshetyuk, Y. 2006. *Investigation and calibration of pulse time-of-flight terrestrial laser scanner*. Royal Institute of Technology (KTH) Department of Transport and Economics.
- Rincón, I. K. Arévalo, B. 2014. Modelado de objetos arqueológicos: Una propuesta usando fotogrametría digital. *Ingenio Ufpso* Vol 7: 143-149