

Estudios con GPR y EMI en el sitio histórico Vuelta de Obligado

Néstor Bonomo¹, M Victoria Bongiovanni², Mariano Ramos³

Resumen Se presenta una serie de resultados correspondientes a los primeros estudios geofísicos realizados en el sitio histórico Vuelta de Obligado, donde en 1845 tuvo lugar la conocida batalla entre tropas de la Confederación Argentina y una alianza entre Francia e Inglaterra que pretendía controlar la navegación de los ríos sudamericanos con el objetivo de imponer el libre comercio. El objetivo principal de los estudios realizados hasta el momento ha sido sondear distintos sectores del sitio en búsqueda de remanentes de estructuras históricas tales como basamentos, trincheras, terraplenes, enterratorios, etc.

Palabras clave Geofísica, georadar, inducción electromagnética, arqueología, Vuelta de Obligado.

Abstract *In this work, we present results of the first geophysical studies carried out at the historical site Vuelta de Obligado, where in 1845 the well-known battle took place between troops of the Argentine Confederation and an alliance between France and England, which sought to control the navigation of the South American rivers with the aim of imposing free trade. The main objective of the studies carried out so far has been to explore different sectors of the site in search of remnants of historical structures such as basements, trenches, embankments, burials, etc.*

Keywords *Geophysics, georadar, electromagnetic induction, archaeology, Vuelta de Obligado.*

INTRODUCCIÓN

El potencial del uso de métodos geofísicos en la detección y análisis de estructuras arqueológicas enterradas es bien conocido (Bigman, 2012; Bongiovanni et al., 2008; Bonomo et al., 2012). En particular, los métodos Georadar (GPR) e Inducción Electromagnética (EMI) son de los más utilizados para ello debido a sus capacidades de prospección de áreas extensas en tiempos relativamente cortos, en forma no invasiva ni destructiva, y con buena eficiencia de detección y calidad de mapeo. La información que a menudo surge de las imágenes de estos métodos facilita la toma de decisiones acerca de la conveniencia de realizar excavaciones, los detalles de éstas, el diseño de acciones de conservación, etc.

La batalla de Vuelta de Obligado tuvo lugar el 20 de noviembre de 1845 en proximidad de una doble curva, en forma de S, que forma el Río Paraná a unos 18 km al norte de la ciudad de San Pedro, nordeste de la Provincia de Buenos Aires. Allí, las tropas comandadas por el General Lucio Mansilla, tendieron, de costa a costa, tres líneas de cadenas sostenidas por 24 barcos sin velamen, con el objetivo de cerrar el paso a la flota anglo-francesa (Peña & Alonso, 2012). Detrás de esa línea de atajo se ubicaron el bergantín Republicano y tres buques menores acompañados por varios lanchones. Por el lado de la Confederación Argentina participó un total de 2.500 efectivos, entre soldados, milicianos, indios amigos, médicos y enfermeras. En el lugar se ubicaron cuatro baterías, tres en barrancas y una a nivel de playa, las que contaban con unos 30 cañones. Por el lado de la flota europea participaron alrededor de 2.000 hombres, con 113 cañones repartidos en 11 buques de guerra que custodiaban unos 100 barcos mercantes que pretendían comerciar con las provincias del litoral y el Paraguay.

¹Grupo de Geofísica Aplicada y Ambiental, Departamento de Física, FCEyN, Universidad de Buenos Aires e IFIBA, CONICET, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Email: bonomo@df.uba.ar

²Facultad de Ingeniería, Universidad Austral, LIDTUA (CIC)-CONICET, Pilar, Buenos Aires, Argentina.

³Programa de Arqueología Histórica y Estudios Pluridisciplinarios (ProArHEP), Departamento de Ciencias Sociales, Universidad Nacional de Luján y Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Durante 1999 se aprobó el proyecto Investigación interdisciplinaria acerca de la batalla de la Vuelta de Obligado, radicado en la Universidad Nacional de Luján, y en mayo de 2000 comenzaron los trabajos de campo en el sitio arqueológico. Las excavaciones sistemáticas dieron lugar a numerosos hallazgos, entre otros, vestigios de dos baterías, un depósito de municiones y parte de las cadenas que cortaban el río (Ramos et al., 2014). En el año 2022, nuestro grupo de investigaciones geofísicas ha sido convocado para contribuir en estos estudios, a través de la exploración de distintos sectores del lugar. Los objetivos actuales se orientan al hallazgo de la tercera batería en playa y las fosas comunes.

En este trabajo, se muestran los principales resultados geofísicos obtenidos hasta el momento en el sitio, correspondientes a una primera etapa de prospección del lugar. Estos corresponden a 2 áreas sondeadas con GPR y EMI, utilizando metodología estándar y cobertura 2.5 D, indicadas en la imagen satelital de la Fig. 1 (Fig. 1a) con trazos amarillos.

ÁREAS PROSPECTADAS Y METODOLOGÍA

Las áreas prospectadas, con la finalidad de detectar las fosas comunes, se ubicaron respectivamente en un claro de bosque del interior del sitio (Área 1, Fig. 1a) y en una zona baja de playa, cercana al barranco costero (Área 2, Fig. 1a). Los contornos de las áreas tuvieron que ser definidos con formas irregulares debido a la presencia de obstáculos en superficie: en el caso del Área 1, desniveles y vegetación de mediano y gran porte y, en el caso del Área 2, el barranco costero y vegetación. Ambas áreas estuvieron conformadas por subáreas rectangulares, que facilitaron la adquisición y procesamiento de datos. La superficie del Área 1 fue de 108 m², mientras que la del Área 2 fue de 746 m².

El equipo de GPR utilizado fue una unidad Pulse EKKO PRO (Sensors & Software), con antenas de frecuencia nominal 250 MHz. La metodología de prospección correspondió a reflexión con cobertura simple. La interlínea utilizada fue de 0.2 m, a excepción de dos subáreas en las cuales fue aumentada a 0.5 m para acelerar la prospección debido a mal clima. El intervalo de muestreo en línea fue de 0.05 m. Se realizó un promedio de 64 trazas en cada posición de registro. Los datos fueron procesados con el programa ReflexW.

El equipo de EMI utilizado fue un GEM-2. Se emplearon 9 frecuencias: 475 Hz, 775 Hz, 1175 Hz, 2575 Hz, 3925 Hz, 8775 Hz, 13575 Hz, 30375 Hz y 47025 Hz. Se utilizó una grilla similar a la de GPR, pero con interlínea de 1 m. El eje del instrumento fue orientado paralelo a la dirección de la caminata y con sus espiras en el plano horizontal. Los datos fueron procesados con el programa EM4Soil (2023).

RESULTADOS

En cada área prospectada, se obtuvo una velocidad de propagación promedio de las ondas de GPR, v , a partir del ajuste de hipérbolas sobre señales de difracción observadas en los radargramas, y el promedio de los resultados. En el Área 1, dicho valor resultó $v = 0.070$ m/ns ($\sigma = 0.024$ m/ns, $N = 33$ datos). En el Área 2, se obtuvo $v = 0.079$ m/ns ($\sigma = 0.028$ m/ns, $N = 39$ datos). A partir de v fue posible convertir el tiempo de tránsito, t , en profundidad aproximada, z , a través de la fórmula $z = vt/2$.

Área 1

Las Figs. 1b-c muestran cortes a tiempo (profundidad) constante de la amplitud instantánea de los datos de GPR procesados y migrados (FK-3D). En la Fig. 1b ($z \approx 0.13$ m), se observa un conjunto de anomalías aproximadamente lineales, denominadas A y B1-B4. Esta característica es central en exploración arqueológica ya que la gran mayoría de los tipos de estructuras culturales producen respuestas con rasgos rectilíneos o con geometrías simples (en tanto el estado de conservación de las

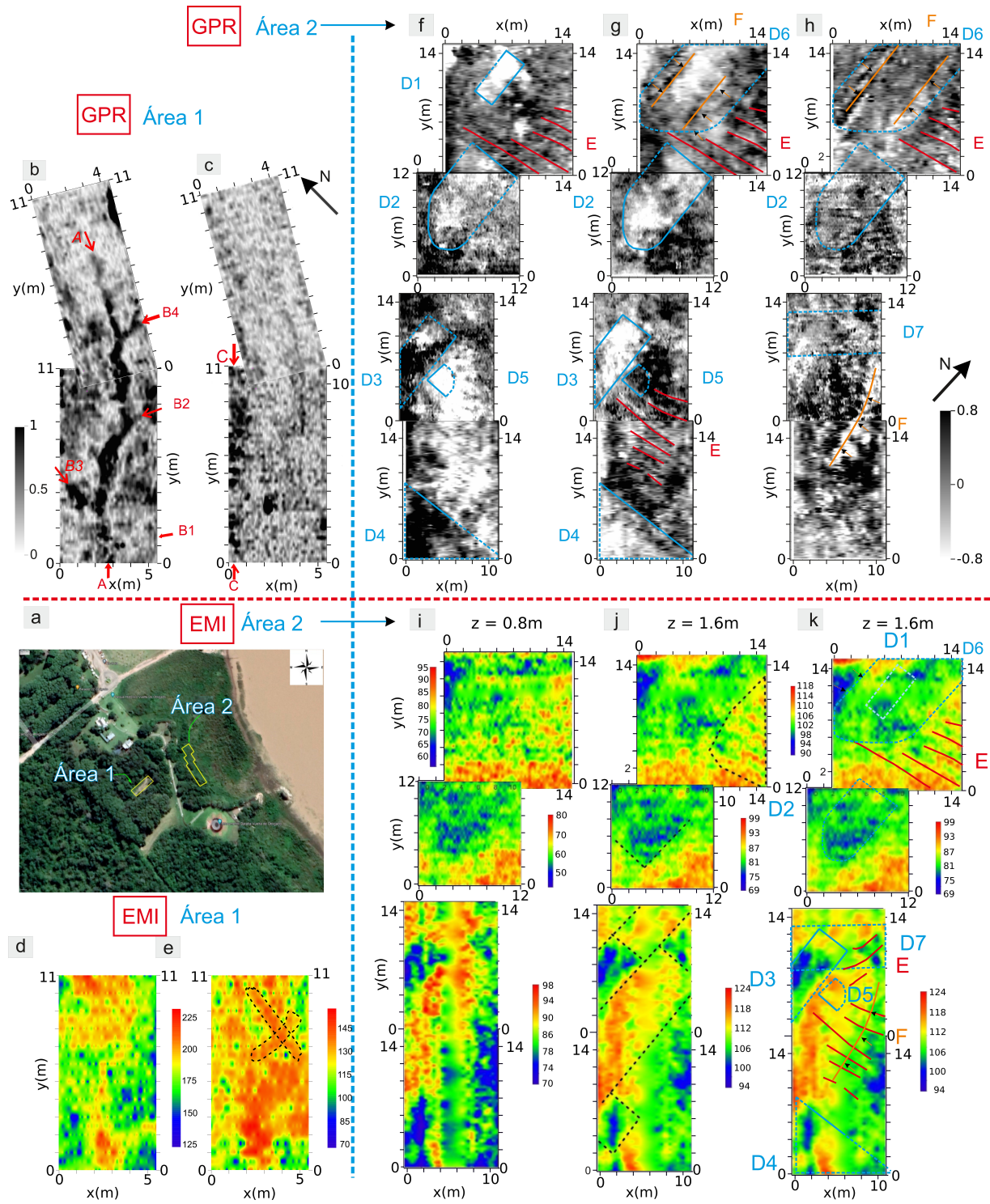


Figura 1. a) Imagen satelital con áreas investigadas indicadas. b-k) Cortes a tiempo / profundidad constante de los resultados obtenidos para el Área 1 (izquierda) y Área 2 (derecha). b-c) Amplitud instantánea de los datos de GPR procesados y migrados. b) $t = 3.6$ ns ($z \approx 0.13$ m), c) $t = 18.4$ ns ($z \approx 0.64$ m). d-e) Conductividad (mS/m) calculada a partir de la componente en cuadratura de los datos de EMI: d) $z = 0.25$ m, e) $z = 0.85$ m. f-h) Amplitud de los datos de GPR procesados y migrados. f) $t = 4.8$ ns ($z \approx 0.19$ m), g) $t = 11.6$ ns ($z \approx 0.56$ m), h) $t = 18.0$ ns ($z \approx 0.71$ m). i-k) Conductividad (mS/m) calculada a partir de la componente en cuadratura de los datos de EMI: i) $z = 0.8$ m y j-k) $z = 1.6$ m. Ver en el texto principal la explicación de las áreas y líneas marcadas.

estructuras no sea muy malo). La anomalía A, tiene dirección promedio NE-SO y ocupa casi toda el área prospectada. B1-B4 son laterales a A. Todas ellas se caracterizan por una amplitud de reflexión mayor que sus entornos inmediatos. Tanto A como B1-B4 comienzan a ser visibles casi desde la

superficie aire-suelo (cortes no mostrados), alcanzan un máximo de visibilidad para $z \approx 0.15$ m (Fig. 1b), y se desdibujan a medida que se incrementa el tiempo. A $z \approx 0.65$ m (Fig. 1c), casi no quedan indicios de estas anomalías, y solo se observan señales de reflexión en objetos ubicados en aire (anomalías C), las cuales compiten en intensidad con las reflexiones en las interfases del suelo y dominan para tiempos mayores.

Debido a las limitaciones climáticas mencionadas, solo una mitad del Área 1 pudo ser prospectada con el método EMI. Las Figs. 1d-e muestran cortes a profundidad constante de la conductividad, calculada a partir de la inversión de la componente en cuadratura del campo. No se incluyen imágenes correspondientes a la componente en fase del campo, ya que esta ha producido resultados con relevancia menor. A profundidades bajas (Fig. 1d, $z = 0.25$ m), la componente en cuadratura muestra una distribución de áreas de máxima conductividad que prácticamente copia la de las anomalías de alta amplitud instantánea de GPR (Fig. 1b). Esta característica se mantiene hasta $z \approx 0.4$ m, profundidad a partir de la cual la correlación entre ambos tipos de resultados disminuye (por ej., comparar las Figs. 1c y 1e). En el corte $z = 0.85$ m de la componente en cuadratura (Fig. 1e), se distingue una anomalía en forma de cruz, cuya posición coincide con la de las anomalías A-B2, con amplitud que disminuye rápidamente con la profundidad, hasta que en $z \approx 3$ m deja de observarse (cortes no mostrados).

Área 2

En esta área, las imágenes de los datos migrados de GPR definen áreas anómalas más claramente que las imágenes de la amplitud instantánea. Las Figs. 1f-h muestran cortes a tiempo constante de la primera variable. Las líneas de color azul, identificadas con D1-D7, delimitan zonas en las cuales distintas reflexiones presentaron diferencias en su tiempo medio respecto del entorno (elevaciones, depresiones, escalones). Estas han sido identificadas a partir del análisis de cortes a t constante y verticales sucesivos. La diferencia de tiempo máxima de estos desniveles es relativamente pequeña para las anomalías más superficiales ($dz \approx 0.08-0.16$ m, para D1-D5) y mayor para las más profundas ($dz \approx 0.55$ m y $dz \approx 0.65$ m, para D6 y D7, respectivamente). Varios tramos de los contornos de D1-D7 presentan rasgos aproximadamente lineales, e incluso rectilíneos. Algunas de estas líneas forman ángulos de aproximadamente 90° entre sí. Por otro lado, las anomalías identificadas con E corresponden a fluctuaciones estrechas y de poca altura en las reflexiones (ancho $a \approx 0.5-1$ m, $dz \approx 0.04-0.16$ m). En la mayoría de los casos, estas presentan trayectorias rectilíneas o ligeramente curvadas. Gran parte de estos rasgos tiene orientación aproximada E-O. Por último, las líneas y flechas naranja, F (Figs. 1g-h), indican el frente y dirección de avance de la pendiente aparente de reflexiones que aparecen con un aspecto relativamente extenso y lineal en las figuras.

La mayoría de las frecuencias EMI utilizadas presentaron importante interferencia externa, lo que se tradujo en imágenes de la conductividad fluctuantes. En la primera imagen (Fig. 1i, $z = 0.8$ m), se distinguen zonas con conductividad media relativamente baja y alta, respecto de la promedio de la imagen, las cuales se definen con mayor nitidez a medida que la profundidad se incrementa (Fig. 1j, $z = 1.6$ m). Las líneas negras en la Fig. 1j delimitan aproximadamente dichas áreas. Se observa una tendencia N-S en la orientación de las anomalías de EMI, tal como en el caso de la mayoría de las anomalías de GPR. En la Fig. 1k, estas anomalías aparecen superpuestas a los resultados de EMI. Se observa que D1-D3 y D6 se correlacionan con áreas de conductividad baja o medio-baja, que probablemente corresponden a suelos más consolidados y secos. Partes de D4 y D7 también muestran este comportamiento. La pequeña anomalía D5 muestra un resultado opuesto al anterior. Por último, las anomalías E se ubican en zonas de conductividad media y alta, probablemente en suelos más sueltos y húmedos.

CONCLUSIONES

Se han mostrado resultados de Georadar e Inducción Electromagnética correspondientes a dos áreas del sitio histórico Vuelta de Obligado, los cuales han sido prospectados en búsqueda de indicios de estructuras de origen cultural. La prospección fue llevada a cabo utilizando metodología estándar 2.5D. Se identificaron distintos tipos de anomalías compatibles con dichas estructuras.

En el Área 1, las anomalías A y B1-B4 presentaron características lineales, rectilíneas por tramos, extensión vertical pequeña y conductividad que son compatibles con la presencia de remanentes de muros y trincheras, pero también con estructuras naturales como canales de escorrentía, entre otros. Se ha excavado una trinchera a lo largo de la posición $y = 8$ m de la subárea SO con el objetivo de determinar el origen de A, B2 y la anomalía en forma de cruz detectada por EMI. Hemos constatado que estas anomalías coinciden con un pequeño canal de escorrentía actual ($dz \approx 0.05$ m). Esperamos poder completar este cateo con otros, especial reuniónmente en el sector NE del Área 1, donde A y B4 se apartan de los mínimos locales de topografía y, por ende, la asociación entre anomalías y el canal actual no es inmediata.

En el Área 2, las anomalías D1-D4 y D6-D7 presentaron características geométricas y de conductividad que resultaron compatibles con la existencia de estructuras naturales y culturales, tales como afloramientos, pisos de ocupación y cortes de las capas de suelo, respectivamente. La anomalía D5 presentó dos laterales bastante rectos que formaron un ángulo de aproximadamente 90° entre sí, lo que induce a pensar en un posible origen cultural de esta. Por el contrario, las anomalías E presentaron características geométricas y de conductividad que remiten a canales de escorrentía naturales. Se espera poder realizar excavaciones en el Área 2 para constatar los orígenes de las anomalías descriptas, tan pronto como las condiciones de nivel de río, climáticas y recursos disponibles lo permitan.

REFERENCIAS

- Bigman, D. P.** (2012). The use of electromagnetic induction in locating graves and mapping cemeteries: an example from Native North America. *Archaeological Prospection*, 19(1), 31–39. <https://doi.org/10.1002/arp.1416>
- Bongiovanni, V., Bonomo, N., de la Vega, M., Martino, L., & Osella, A.** (2008). Rapid evaluation of multifrequency EMI data to characterize buried structures at a historical Jesuit Mission in Argentina. *Journal of Applied Geophysics*, 64, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.11.006>
- Bonomo, N., Osella, A., Martinelli, H., de la Vega, M., Cocco, G., Letieri, F., & Frittegatto, G.** (2012). Location and characterization of the Sancti Spiritus Fort from geophysical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 83, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.04.005>
- EM4Soil** (2023). *Software for electromagnetic tomography*. <http://www.emtomo.com>
- Peña, J. & Alonso, J.** (2012). *La Vuelta de Obligado y la victoria de la campaña del Paraná*. Editorial Biblos.
- Ramos, M., Bognanni, F., Lanza, M., Helfer, V., Toralbo, C. G., Senesi, R., de Lara, O. H., Pinochet, C., & Clavijo, J.** (2014). The archaeology of the battle of Vuelta de Obligado, Buenos Aires Province, Argentina. *Journal of Conflict Archaeology*, 9(2), 69–92. <https://doi.org/10.1179/1574077314Z.00000000032>