

Comparación de magnetómetros basados en UAV: prueba de municiones sin explotar (UXO)

6 de febrero de 2024



Este informe presenta los resultados de una prueba de campo destinada a recopilar datos de referencia utilizando cuatro magnetómetros distintos montados en vehículos aéreos no tripulados (UAV), evaluados frente a objetivos simulados de municiones sin explotar (UXO, por sus siglas en inglés).

La prueba se realizó el 21 de septiembre de 2023 en el sitio de prueba de UAV de SPH Engineering en Baloži, Letonia (N 56.8631°, E 24.1119°). Tres objetos simulados similares a UXO fueron colocados en el campo, conforme al estándar ISO SEEDS, con características magnéticas análogas a proyectiles de 20, 60 y 105 mm. Durante la prueba, los magnetómetros fueron volados sobre los objetivos a distintas altitudes. La detección de los objetivos se realizó mediante software tras el procesamiento de datos. Los dispositivos utilizados fueron: MagNIMBUS de SPH Engineering, MagDrone R3 de SENSYS, MagArrow II de Geometrics y DRONEmag GSMP-35U de GEM Systems.

Datos recopilados por Sergejs Kucenko. Procesamiento de datos e informe por Matīss Brants.

SPH Engineering SIA, Letonia

Descargo de responsabilidad

El término “detectado” en este contexto significa que el intérprete de datos ha identificado una señal suficientemente fuerte que amerita una evaluación o acción adicional. Las interpretaciones son subjetivas y dependen de la experiencia y conocimiento del intérprete.

Ni SPH Engineering SIA, SENSYS Sensorik & Systemtechnologie GmbH, Geometrics Inc., ni GEM Systems Inc. garantizan la detección de los mismos u objetivos similares en condiciones distintas a las del rango de prueba de SPH Engineering utilizando el mismo u otro hardware, software o flujo de trabajo.

Este informe se proporciona “tal cual” con el fin de demostrar las capacidades del sistema descrito y ofrecer orientación para la planificación de estudios UXO.

Métodos

Configuración de la prueba

La prueba se llevó a cabo en el sitio de prueba de UAV de “SPH Engineering SIA” en Baloži, Letonia, un campo abierto de 4 hectáreas rodeado de bosques en una zona magnéticamente tranquila. La configuración UXO incluía tres objetos estandarizados ISO SEEDS colocados a lo largo de un perfil de 8 metros en dirección suroeste-noreste. Estos objetos simulaban proyectiles de 60 mm, 20 mm y 105 mm. En adelante, se hará referencia a estos objetos como “munición”, “proyectil” o “UXO”. El área de prueba podría definirse como no magnética, compuesta principalmente por turba reelaborada, aunque se identificaron algunos pequeños objetos magnéticos antropogénicos en las proximidades, que son visibles en los resultados visualizados.



Figura 1. Los objetos UXO ISO SEEDS utilizados en la prueba.

El proyectil de 20 mm se colocó a 3,4 metros a la derecha del proyectil de 60 mm, mientras que el proyectil de 105 mm se situó a una distancia aproximada de 8,1 metros.

Cada magnetómetro fue volado en líneas paralelas sobre los objetos UXO y el área circundante. Después de cada pasada exitosa, se aumentó la altitud de vuelo desde 0,5 m hasta 2,5 m en incrementos de 0,5 m. Las distintas altitudes simulan la distancia del sensor a la UXO, no la altura sobre el suelo. Por ejemplo, un vuelo a 2,5 m representa un sensor volado a 0,5 m con una UXO enterrada a 2 m de profundidad.

Los vuelos fueron planificados con un margen de 10 m al inicio y final para permitir estabilidad. Todos los vuelos fueron realizados con UgCS de SPH Engineering y el ordenador de a bordo SkyHub. Se utilizó el sistema True Terrain Following (TTF) desarrollado por SPH Engineering para asegurar una altitud precisa.

Magnetómetros

Todos los magnetómetros fueron montados en un dron DJI Matrice 300 RTK, que utilizó GNSS con RTK para posicionamiento preciso. El georreferenciado se hizo de manera diferente para cada magnetómetro:

- **MagNIMBUS:** Registro en SkyHub con coordenadas del receptor GNSS del dron (modo RTK).
- **MagDrone R3:** Registrador interno; coordenadas del GNSS del dron a través de SkyHub.
- **MagArrow Mk2:** Registro interno; GNSS interno en modo no RTK. Coordenadas corregidas con los datos de vuelo grabados por SkyHub.
- **GSMP-35U:** Registro interno con receptor GNSS externo no RTK; coordenadas refinadas con los datos de vuelo de SkyHub.

Se utilizó el sistema TTF para garantizar la altitud precisa (tema tratado en detalle en la sección de discusión).

MagNIMBUS

El sistema **MagNIMBUS** fabricado por SPH Engineering (figura 2) utiliza un magnetómetro de campo total QuSpin situado en el extremo de un «brazo» plegable bajo el UAV, que protege el sistema de daños en caso de colisión con obstáculos inesperados y permite vuelos extremadamente bajos con relativa seguridad. El sensor QuSpin registra la intensidad magnética total a una frecuencia de 500 Hz, lo que le permite filtrar cualquier ruido magnético captado por las partes eléctricas del UAV y las fuentes electromagnéticas alternas cercanas, como las líneas eléctricas. La configuración se voló a una velocidad constante de 1 m/s.



Figura 2. El magnetómetro MagNIMBUS de SPH Engineering.

MagDrone R3

El **MagDrone R3** de SENSYS GmbH es un sistema magnetómetro (figura 3) con dos sensores vectoriales fluxgate de tres ejes integrados en los extremos de un tubo de un metro de longitud. Esta configuración de doble sensor reduce el tiempo de vuelo en al menos un 50 % en comparación con las configuraciones de un solo sensor. El dispositivo se fija directamente a las patas del UAV, lo que proporciona un movimiento estable y relativamente predecible del sensor, al tiempo que coloca los magnetómetros más cerca de la interferencia magnética de los motores del UAV. Ambos sensores registran el campo magnético en los tres ejes a una frecuencia de muestreo de 250 Hz para permitir la eliminación del ruido alterno de los motores del UAV y otras fuentes como las líneas eléctricas. La configuración se voló a una velocidad constante de 2 m/s.



Figura 3. Configuración del magnetómetro SENSYS MagDrone R3.

MagArrow II

El magnetómetro Geometrics **MagArrow II** (figura 4) utiliza una configuración suspendida por cables en una carcasa aerodinámica para situar el sensor del magnetómetro de campo total lo más lejos posible de las interferencias del UAV. Incluso con esta ubicación, la elevada frecuencia de muestreo de 1000 Hz permite filtrar cualquier ruido magnético alterno restante causado por el UAV. La configuración suspendida aumenta el movimiento de la carcasa del magnetómetro, lo que provoca cambios en la lectura del campo magnético. Por lo tanto, se recomienda encarecidamente realizar un vuelo de calibración del rumbo. Para esta prueba, el magnetómetro MagArrow II se suspendió en un sistema de cables de 3 metros de longitud y el vuelo se realizó a una velocidad constante del UAV de 2 m/s.



Figura 4. Configuración del magnetómetro Geometrics MagArrow II.

GSMP-35U

El **GEM Systems DRONEmag GSMP-35U** es un sistema magnetómetro de campo total (figura 5) suspendido en un cable de 3-5 m desde el UAV. Esta configuración proporciona la máxima distancia posible respecto a la interferencia magnética de los motores del UAV. Dicha configuración permite una frecuencia de muestreo mucho menor, de un máximo de 20 Hz, en comparación con los sensores de otros fabricantes. Una frecuencia de muestreo baja también facilita y agiliza el procesamiento de los datos. La configuración se suspendió en un cable de 5 metros de longitud y se hizo volar a una velocidad constante del UAV de 1 m/s.



Figura 5. Configuración del magnetómetro DRONEmag GSMP-35U de GEM Systems.

Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos magnéticos se realizó de la forma más similar posible en todos los sistemas, salvo en el caso de las conversiones de formatos de datos específicos de los sistemas MagDRONE R3 y MagArrow II, que requirieron un software propietario. El flujo de trabajo general se describe en la figura 6, con una descripción detallada paso a paso de todas las configuraciones en el apéndice. El software principal utilizado fue Geosoft Oasis Montaj Standard Edition v.2023.1, utilizando únicamente las funciones del módulo básico y métodos de procesamiento bien documentados. Todos los pasos pueden repetirse con resultados similares utilizando software cerrado y de código abierto.

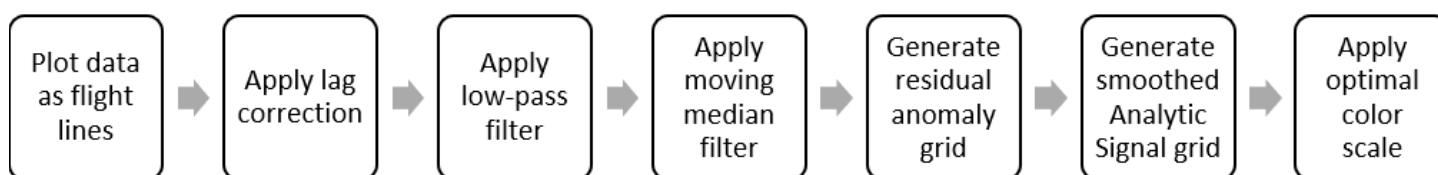


Figura 6. Flujo de trabajo de los pasos de procesamiento de datos.

El flujo de trabajo general está en la Figura 6. Todos los pasos pueden repetirse con software cerrado o de código abierto.

Visualización de datos

La visualización de datos es un paso muy importante a la hora de comparar los resultados de diferentes dispositivos, ya que puede manipularse fácilmente para crear un sesgo hacia un dispositivo en particular. Por lo tanto, se consideró necesario explicar en detalle el razonamiento detrás de las técnicas de visualización. Al igual que el procesamiento de datos, se aplicó un enfoque común para todos los datos de los sensores.

Los datos procesados se visualizaron como cuadrículas de campos magnéticos anómalos residuales y su señal analítica (AS). Se eligió un tamaño de celda de 0,2 metros para tener en cuenta los puntos de muestreo en línea muy densos y la separación relativamente escasa de las líneas de vuelo de 0,5 metros. Esto ayuda a mantener la alta resolución en la dirección paralela a la trayectoria de vuelo, al tiempo que proporciona una cuadrícula más suave perpendicular a las líneas. Se aplicó un sombreado, que simula un relieve, a todas las cuadrículas para mejorar la visualización de las anomalías más pequeñas.

Se crearon dos redes para cada pasada de vuelo y sensor:

1) campo anómalo residual con una escala de colores igualada por histograma

y

2) señal analítica con una escala de colores distribuida normalmente.

Aunque una red AS con una escala de colores igualada por histograma representa mejor las pequeñas anomalías, también realza el ruido (figura 7).

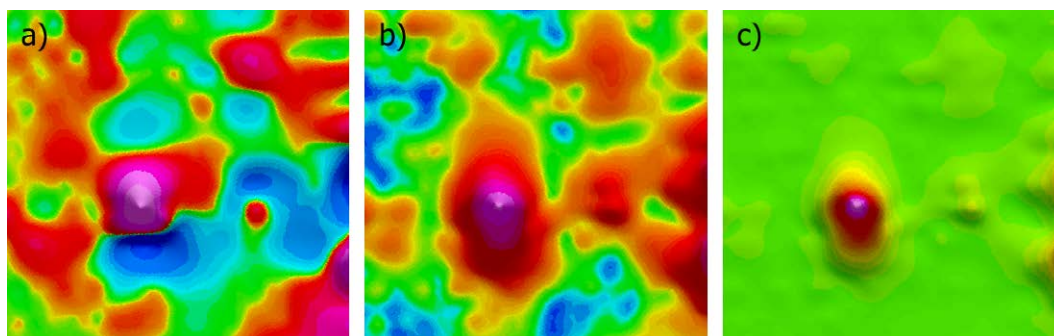


Figura 7. Dos anomalías distintas en diferentes visualizaciones. a) Un campo anómalo residual con una escala de colores igualada por histograma revela dos dipolos magnéticos. b) La señal analítica con una escala de colores igualada por histograma muestra claramente las anomalías y mucho ruido. c) La señal analítica con una escala de colores distribuida normalmente reduce en gran medida el ruido y muestra los picos sobre las anomalías, aunque la anomalía derecha no es clara.

Garantizar una representación justa es especialmente importante a la altitud de vuelo más baja, cuando incluso los cambios más leves en la trayectoria sobre el objeto objetivo provocan cambios significativos en las amplitudes del campo magnético. Aplicar los mismos valores para la escala de colores daría lugar a un sesgo hacia algunos sensores. Por este motivo, los valores de la escala de colores de la cuadrícula para cada magnetómetro se escalan automáticamente en función de las amplitudes de sus propios datos utilizando la herramienta Color Tool de Oasis Montaj.

Resultados por altitud de vuelo

0.5 m

A una altitud de 0,5 metros por encima de los objetivos, todos los sensores detectaron el objeto más pequeño (proyección de 20 mm) en distintos grados. Aun así, la intensidad de la señal dependía en gran medida de la trayectoria del sensor. El dipolo en las cuadrículas de anomalías residuales (figura 8) es muy pronunciado en los datos de MagNIMBUS y GSMP-35U, mientras que en R3 la señal es más débil, aunque sigue siendo inequívoca. En el caso de MagArrow II, el dipolo es casi imperceptible, ya que el sensor pasó principalmente por el lado sur del objeto, aunque la señal se consideraría al menos sospechosa. En todos los casos, las señales dipolo distorsionadas para el proyectil de 105 mm se deben a gradientes magnéticos muy altos.

Las cuadrículas AS (figura 9) señalan los centros de las anomalías. MagNIMBUS muestra claramente todas las anomalías, siendo las anomalías de los proyectiles de 60 y 20 mm inesperadamente similares en tamaño. Sin

embargo, el magnetómetro R3 muestra una diferencia pronunciada entre las anomalías más pequeñas. Tanto MagArrow II como GSMP-35U tienen una señal reducida para las anomalías más pequeñas, pero esto se debe principalmente a la amplitud muy alta de la anomalía del proyectil de 105 mm, que distorsiona la escala de colores. Por este motivo, siempre deben inspeccionarse las redes de campos anómalos residuales y AS. El ruido de fondo es más pronunciado en los datos R3, aunque sigue siendo inconfundible. El GSMP-35U de GEM System muestra el fondo «más limpio», probablemente debido a la distancia de 5 m del UAV.

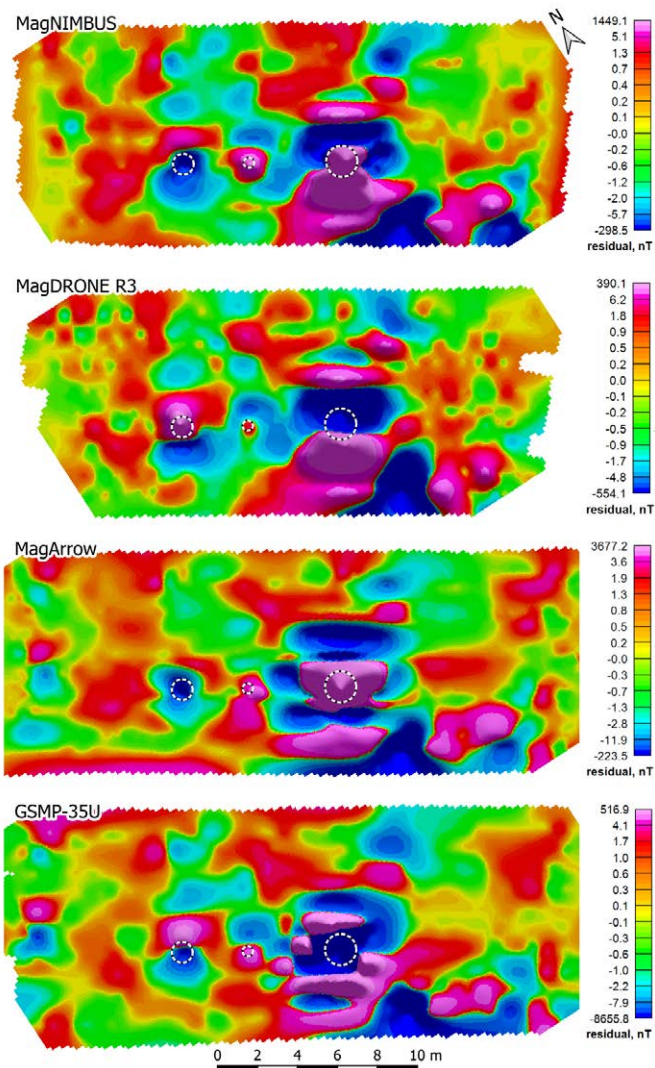


Figura 8. Cuadrícula del campo anómalo residual a una altura de 0,5 metros por encima de los objetivos. Los círculos blancos discontinuos indican la ubicación de los objetivos UXO: izquierda: proyectil de 60 mm; centro: proyectil de 20 mm; derecha: proyectil de 105 mm.

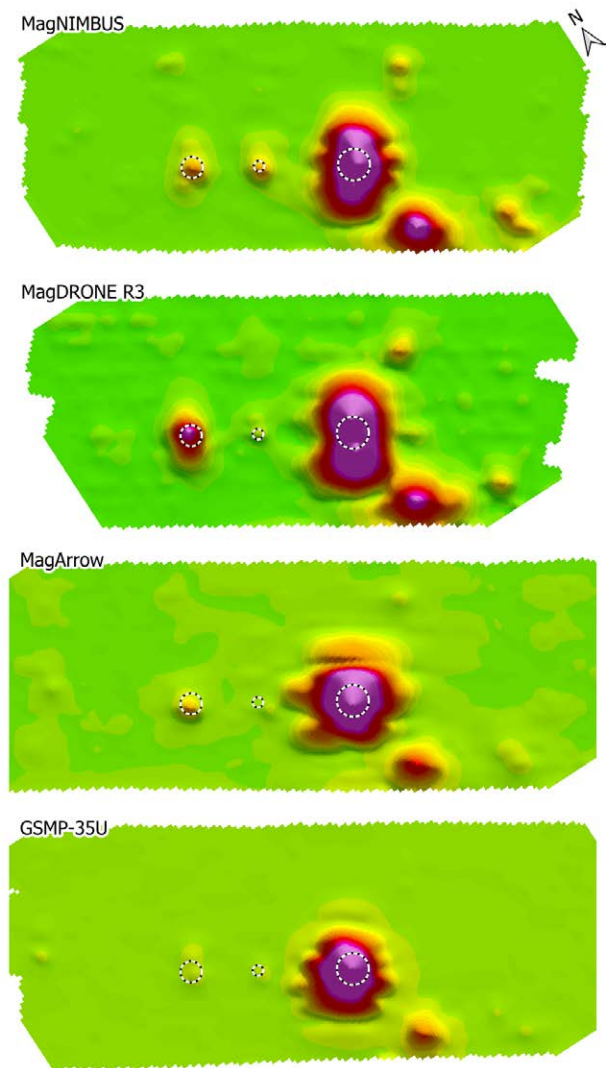


Figura 9. La rejilla de señales analíticas se encuentra a una altura de 0,5 metros por encima de los objetivos. Para ver la leyenda, consulte la figura 8.

1.0 m

Los dipolos de los proyectiles de 105 mm y 60 mm son claramente visibles en las cuadrículas de anomalías residuales a una altura de vuelo de 1,0 m (figura 10). Debido a los gradientes magnéticos más bajos, el dipolo magnético del proyectil de 105 mm ahora también parece más «correcto» en todos los casos. Ningún sensor parece haber detectado ya el proyectil de 20 mm. Aunque MagNIMBUS, MagArrow II y GSMP-35U muestran una pequeña anomalía cerca de la ubicación del proyectil, probablemente sea demasiado similar al ruido como para considerarla un objetivo potencial. Las cuadrículas

AS tampoco muestran signos de una señal de proyectil de 20 mm (figura 11), pero todos los sensores detectaron proyectiles de 60 mm y 105 mm. Aunque MagNIMBUS y MagArrow II muestran una señal de proyectil de 60 mm menos pronunciada, esto parece deberse a que las trayectorias de vuelo casi no alcanzaron el objetivo. Aun así, la señal es clara en la cuadrícula de anomalías residuales. En esta ocasión, el ruido parece ser menor en el sensor MagNIMBUS, pero todos los sensores comienzan a mostrar señales más aleatorias debido a la disminución de la relación señal-ruido.

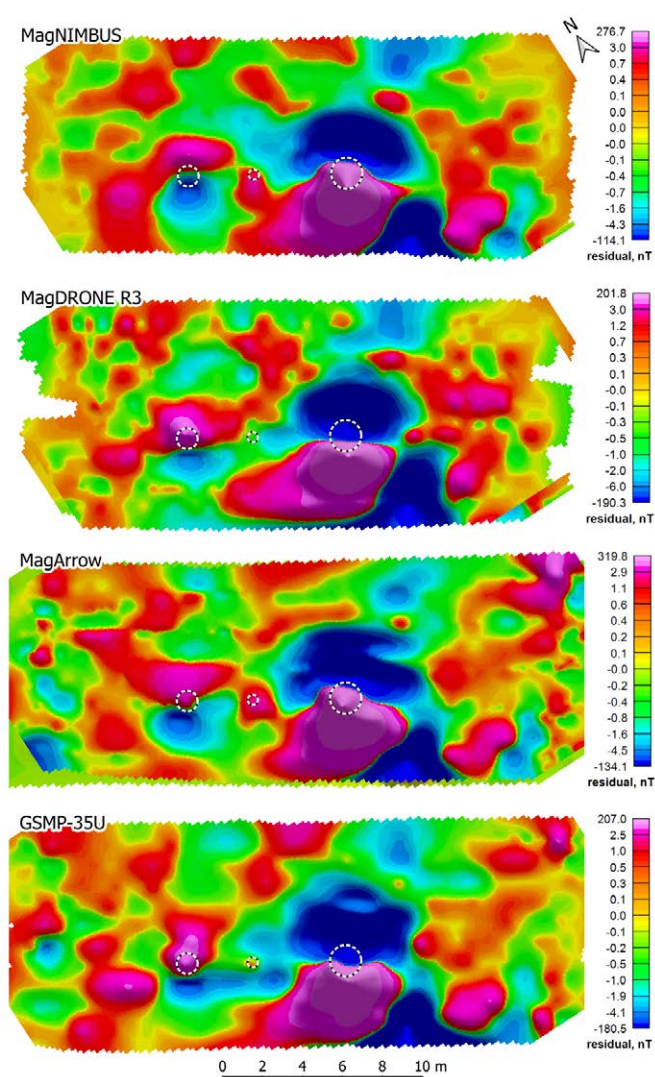


Figura 10. Cuadrícula del campo anómalo residual a una altura de 1,0 metros por encima de los objetivos. Para la leyenda, véase la figura 8.

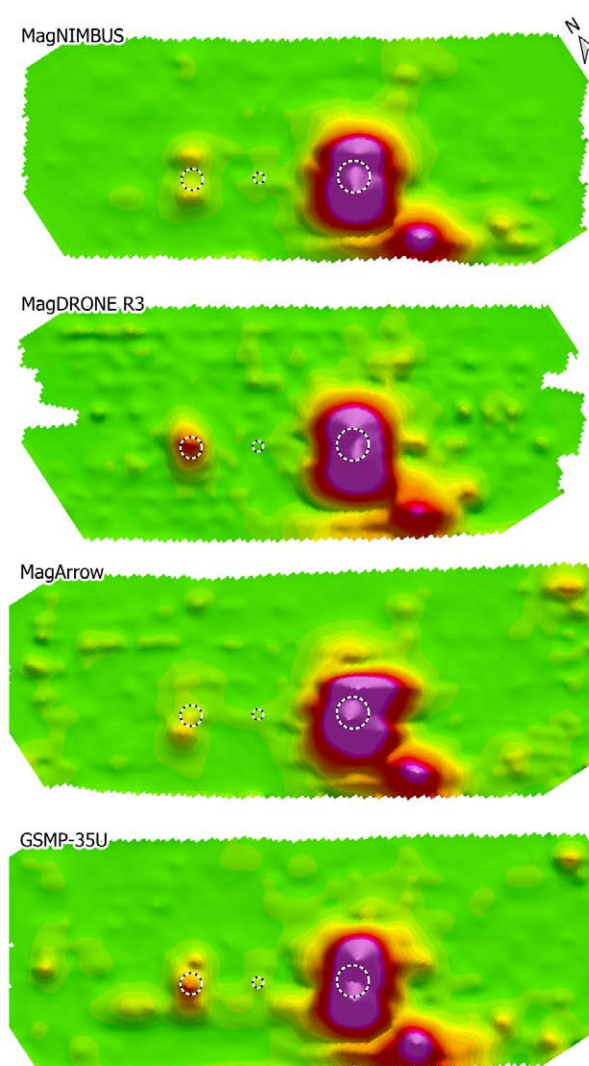


Figura 11. La rejilla de señales analíticas a una altura de 1,0 metros por encima de los objetivos. Para la leyenda, véase la figura 8.

1.5 m

A una altura de 1,5 m, los sensores comienzan a perder la señal del proyectil de 60 mm (figura 12). Mientras tanto, para MagNIMBUS y R3, sigue siendo una señal dipolar clara. El GSMP-35U ha experimentado más ruido, pero MagArrow II sufre errores de rumbo no resueltos a pesar de la corrección del rumbo. No hay señales de la señal del proyectil de 20 mm en ninguno de los sensores.

Las rejillas AS refuerzan estas observaciones (figura 13). El R3 muestra un pico distintivo sobre la ubicación del proyectil de 60 mm, mientras que para MagNIMBUS es una señal más dispersa, pero aún notable, pero en el caso del GSMP-35U, la señal parece algo distorsionada. Sin embargo, sin duda llamaría la atención en una situación real. Estos picos de señal fuertes también parecen rodear la anomalía del proyectil de 105 mm, pero se desconoce la causa. Los errores de rumbo del MagArrow II dan lugar a una larga estela que atraviesa la mayor parte del campo y termina con un pico más fuerte cerca de la anomalía más a la izquierda, pero probablemente no se consideraría un objetivo potencial.

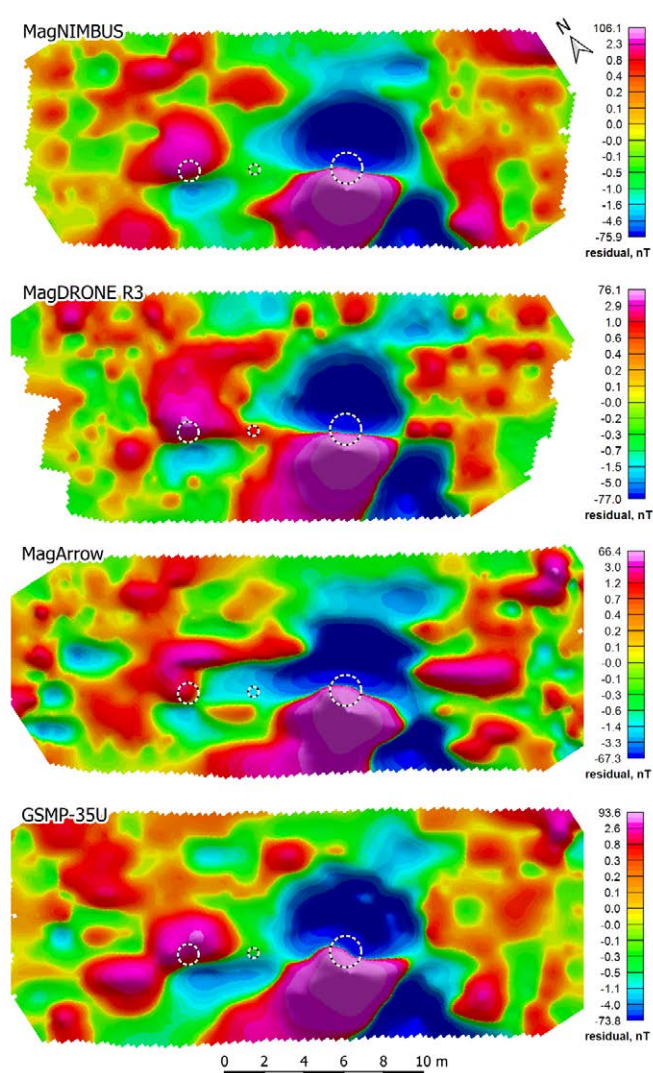


Figura 12. Cuadrícula del campo anómalo residual a una altura de 1,5 metros por encima de los objetivos. Para la leyenda, véase la figura 8.

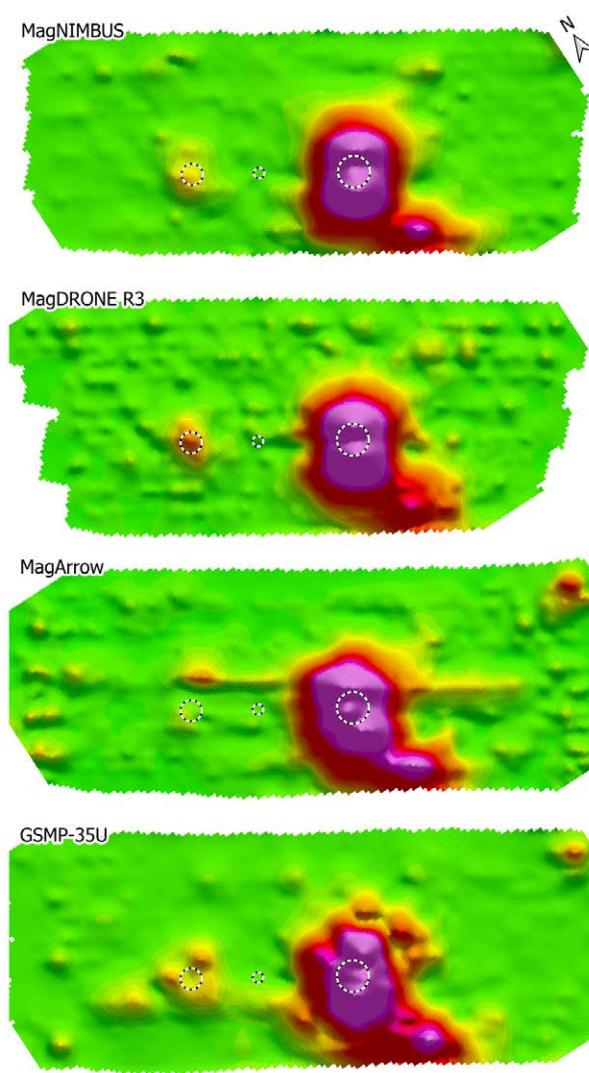


Figura 13. La rejilla de señales analíticas se encuentra a una altura de 1,5 metros por encima de los objetivos. Para ver la leyenda, consulte la figura 8.

2.0 m

A una distancia de 2,0 m (figura 14), la anomalía del proyectil de 60 mm pierde el polo negativo y se convierte simplemente en una anomalía magnética positiva. De todos los sensores, el R3 muestra la señal más clara, mientras que en el resto de los sensores la señal parece estar muy cerca del nivel de ruido y no debe considerarse «detectada». Las rejillas AS (figura 15) muestran en general las mismas tendencias.

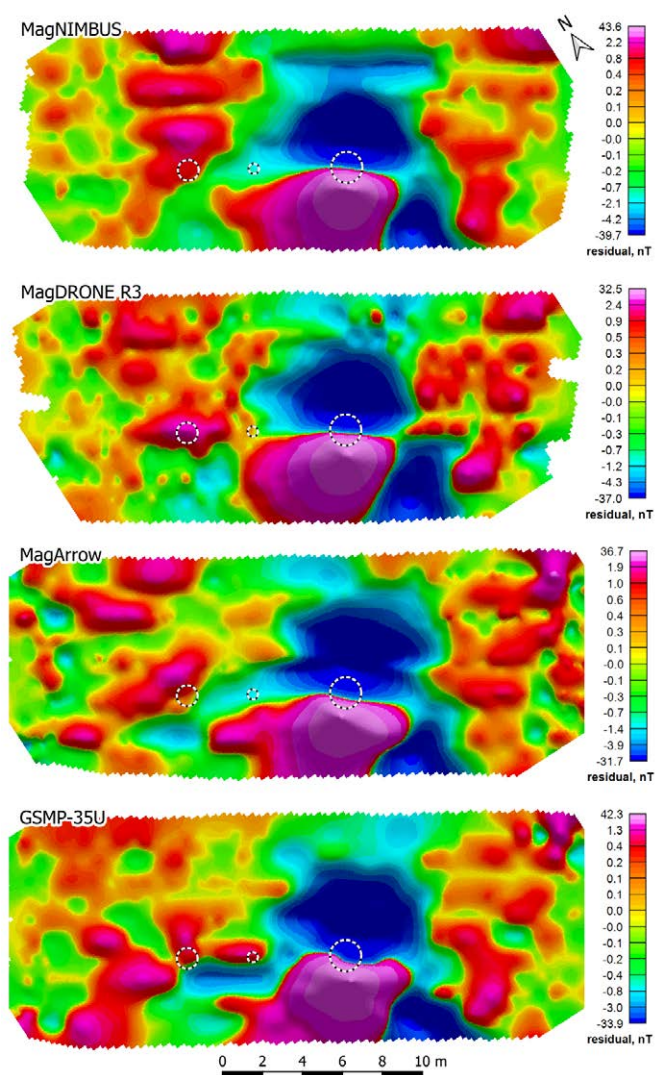


Figura 14. Cuadrícula del campo anómalo residual a una altura de 2,0 metros por encima de los objetivos. Para la leyenda, véase la figura 8.

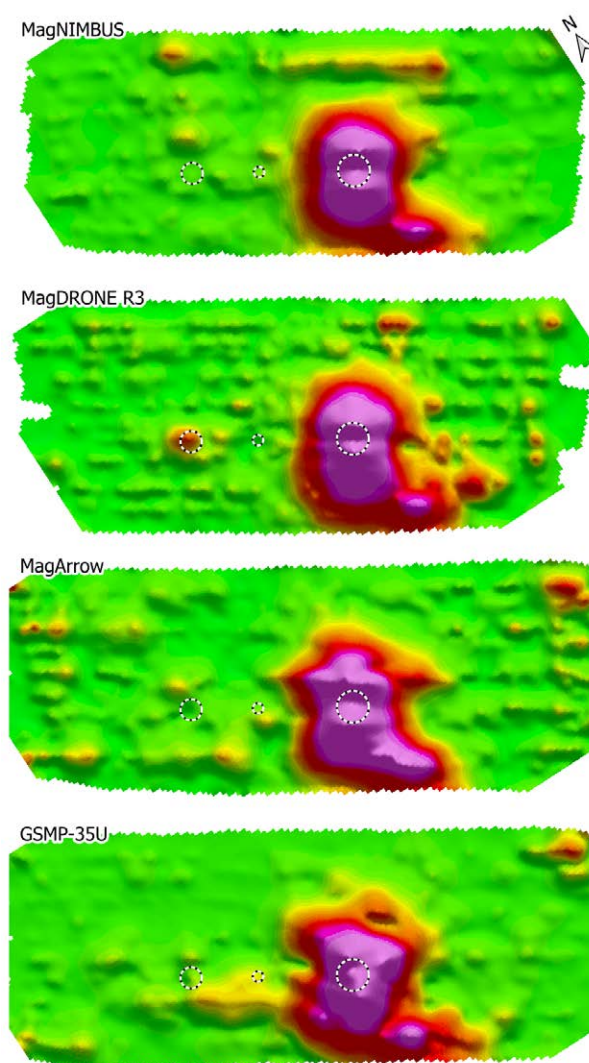


Figura 15. La rejilla de señales analíticas a una altura de 2,0 metros por encima de los objetivos. Para la leyenda, véase la figura 8.

2.5 m

A la altura máxima de 2,5 metros, las cuadrículas de anomalías residuales (figura 16) de todos los sensores siguen mostrando claramente la anomalía del proyectil de 105 mm. Como era de esperar, la relación señal-ruido es la más baja a esta distancia y, para todos los sensores, habría al menos algunos falsos positivos a menos que se utilicen técnicas de filtrado más avanzadas. La señal del proyectil de 60 mm no es lo suficientemente clara en ninguna de las cuadrículas de anomalías residuales, especialmente debido a las notables rayas de ruido. Aun así, en las cuadrículas AS (figura 17), parece haber un pico algo disperso directamente sobre el artefacto explosivo para el sensor R3, que podría contarse como «detectado». En el caso de MagNIMBUS y GSMP-35U, también hay una señal notable, aunque probablemente se descartaría como ruido en forma de rayas.

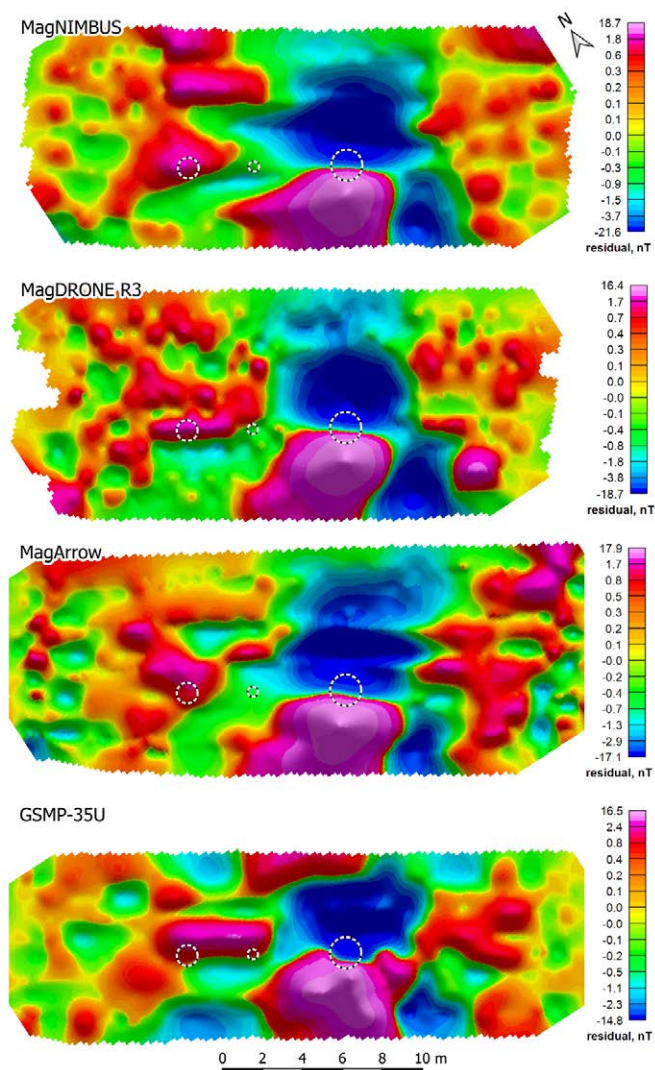


Figura 16. Cuadrícula del campo anómalo residual a una altura de 2,5 metros por encima de los objetivos. Para la leyenda, véase la figura 8.

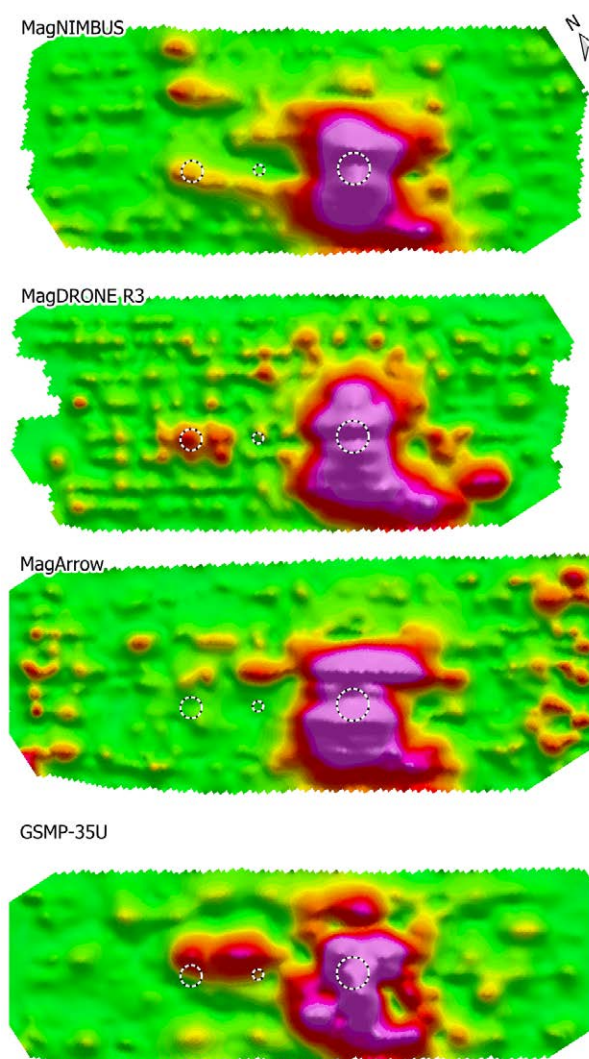


Figura 17. La rejilla de señales analíticas a una altura de 2,5 metros por encima de los objetivos. Para la leyenda, véase la figura 8.

Comparación completa

Todos los resultados anteriores se recopilan en la Tabla 1 para ofrecer una visión general. La confirmación de la detección se da a los casos con una señal suficiente. En todos los demás casos, podría haber sospecha de que la señal fuera ruido o de que no hubiera señal. En una situación real, correspondería a los especialistas incluir todas las señales a costa de un aumento considerable de los falsos positivos o seleccionar solo las señales fiables con el riesgo de perder objetivos.

Tabla 1. Comparación de las capacidades de detección de todos los sensores probados. «Sí» significa que se ha detectado de forma fiable, mientras que «No» significa que no se ha detectado o que la detección es incierta.

Altitude, m	MagNIMBUS			MagDRONE R3			MagArrow II			GSMP-35U		
	105 mm	60 mm	20 mm	105 mm	60 mm	20 mm	105 mm	60 mm	20 mm	105 mm	60 mm	20 mm
0.5	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes
1.0	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No
1.5	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes	No	No	Yes	Yes	No
2.0	Yes	No	No	Yes	Yes	No	Yes	No	No	Yes	No	No
2.5	Yes	No	No	Yes	Yes	No	Yes	No	No	Yes	No	No

Variación en la altitud de vuelo

La búsqueda de artefactos explosivos no detonados (UXO), especialmente los pequeños, basándose en sus señales magnéticas requiere un mantenimiento preciso de la altitud, ya que el campo magnético (y, por lo tanto, la distancia de detección) disminuye con la distancia al cubo. Los UXO más pequeños, que apenas se encuentran en el límite de detección, pueden pasar fácilmente desapercibidos si el sensor no mantiene una altitud precisa sobre el suelo. Por ejemplo, suponiendo un ruido de fondo de 10 nT, un proyectil de 40 mm que un magnetómetro aún puede detectar a una distancia de 54 centímetros probablemente sería indetectable si la altitud de vuelo se elevara solo 15 centímetros (referencia: Billings et al. 2006, *Magnetic Models of Unexploded Ordnance*).

La variación de la altitud de vuelo se muestra en la figura 18 para abordar las posibles preocupaciones relativas a la precisión del mantenimiento de la altitud para las diferentes configuraciones de magnetómetros, especialmente MagArrow II y GSMP-35U, que están suspendidos en cables a 3 y 5 metros por debajo del UAV. Para garantizar que los magnetómetros no interfirieran con el sensor TTF, se colocó en una extensión especial en el lateral del UAV (véanse las figuras 4 y 5 en la sección «Métodos»).



Figura 18. Variaciones de la altitud sobre el nivel del suelo (en centímetros) con el recuento de muestras. Las variaciones se calculan en intervalos de 20 centímetros, ya que cualquier anomalía causada por variaciones de altitud en distancias más cortas se filtraría de todos modos durante el procesamiento de los datos. El recuento de muestras de los sensores difiere debido al tiempo de vuelo (véase la siguiente sección).

Duración del vuelo

Los tiempos de vuelo variaron en función de la velocidad elegida según las recomendaciones del fabricante para las condiciones de prueba, pero en el caso del MagDRONE R3, también se debió a la configuración de doble sensor. Esto permitió realizar un rápido reconocimiento del terreno, completando un vuelo a una sola altitud en solo 1,5 minutos. El MagArrow II voló a la misma velocidad que el R3, pero con un solo sensor, por lo que el tiempo de vuelo fue de 3 minutos. El MagNIMBUS y el GSMP-35U completaron sus vuelos a una sola altitud en poco más de 5 minutos.

Conclusiones

1. SENSYS MagDRONE R3 obtuvo los mejores resultados de todos los sensores probados, detectando el proyectil de 105 mm a todas las alturas y el de 60 mm en la mayoría de las alturas. El SPH Engineering MagNIMBUS y el GEM Systems DRONEmag GSMP-35U no pudieron detectar de forma fiable el proyectil de 60 mm a 2,0 y 2,5 metros, respectivamente. El Geometrics MagArrow II no mostró una señal clara del proyectil de 60 mm a 1,5 m de altitud y nunca detectó el proyectil de 20 mm.
2. Esta prueba demuestra que no hay ninguna ventaja en utilizar un sistema «suspendido» como el MagArrow II o el GSMP-35U frente a un sistema «fijo» como el MagNIMBUS o el R3 en las condiciones específicas de la inspección. Aunque notable, el ruido magnético de los motores del UAV es menos problemático que la oscilación del equipo y el error de rumbo resultante.
3. Los estudios magnéticos de UXO requieren una cobertura fiable del terreno con una distancia de separación fija y un mantenimiento preciso de la altitud para aumentar las posibilidades de detectar pequeñas anomalías y reducir los falsos positivos.

Apéndice: pasos del procesamiento de datos

MagNIMBUS

Utilizando Oasis Montaj:

1. Corrección de desfase aplicada (puntos de referencia):
0,5 m: -50
1,0 m: -140
1,5 m: -130
2,0 m: -140
2,5 m: -140
2. Se aplicó un filtro de paso bajo de 100 fiduciales (correspondiente a una separación entre puntos de ~0,2 m).
3. Se aplicó un filtro de mediana móvil de 10 000 fiduciales (correspondiente a una distancia de ~20 m).
4. Se generó una cuadrícula de anomalías residuales con un tamaño de celda de 0,2 m y una escala de colores con ecualización del histograma.
5. Se calculó la señal analítica basándose en la cuadrícula de anomalías residuales.
6. Se aplicó un suavizado de convolución 3x3 de 1 pasada a la cuadrícula AS y se cambió la escala de colores a distribución normal.

MagDRONE R3

1. Utilizando SENSYS MagDrone DataTool:
 - 1.1. Importación del archivo 20230920_142316_MD-R3_#0207.mdd
 - 1.2. División de las pistas: 20 grados, 1,5 m.
 - 1.3. Sin filtros ni reducción de la resolución.

- 1.4. Carga de los datos GNSS RTK.
- 1.5. Exportación a un archivo .asc.
2. Uso de Oasis Montaj:
 - 2.1. Vuelos divididos según su altura en bases de datos separadas.
 - 2.2. Separación de cada vuelo en líneas por número de sensor.
 - 2.3. Corrección del desfase temporal: +150 fiduciales.
 - 2.4. Aplicación de un filtro de paso bajo de 25 fiduciales (correspondiente a una separación entre puntos de ~0,2 m).
 - 2.5. Se aplicó un filtro de mediana móvil de 2500 fiduciales (correspondientes a una distancia de ~20 m).
 - 2.6. Se generó una cuadrícula de anomalías residuales con un tamaño de celda de 0,2 m y se calculó la señal analítica.
 - 2.7. Se aplicó un suavizado de convolución 3x3 de 1 pasada a la cuadrícula AS y se cambió la escala de colores a distribución normal.

MagArrow II

Utilizando Geometrics Survey Manager:

1. Datos convertidos de MagArrow .magdata a formato .csv.

Utilizando Oasis Montaj:

1. Importación de coordenadas GPS RTK precisas a la base de datos de datos magnéticos.
2. División de los datos en líneas según la altitud de vuelo.
3. Aplicación de la corrección de rumbo con los datos adquiridos en el vuelo de calibración.
4. Aplicación de la corrección de retraso de +750 fiduciales.
5. Se aplicó un filtro de paso bajo de 100 fiduciales (correspondiente a una separación entre puntos de ~0,2 m).
6. Se aplicó un filtro de mediana móvil de 10 000 fiduciales (correspondiente a una ventana de ~20 m).
7. Se generó una cuadrícula de anomalías residuales con un tamaño de celda de 0,2 m y una escala de colores de ecualización de histograma.
8. Se calculó la señal analítica.
9. Se aplicó un suavizado de convolución 3x3 de 1 pasada a la cuadrícula AS y se cambió la escala de colores a distribución normal.

GSMP-35U

Utilizando Oasis Montaj:

1. Se importaron coordenadas GPS RTK precisas a la base de datos de datos magnéticos.
2. Se aplicaron correcciones de retraso (puntos de referencia):
 3. 0,5 m: +15
 4. 1,0 m: +15
 5. 1,5 m: +7
 6. 2,0 m: +7
 7. 2,5 m: +7
8. Se aplicó un filtro de paso bajo de 4 fiduciales (correspondientes a una separación de 0,2 m).
9. Se aplicó un filtro de mediana móvil de 400 fiduciales (correspondientes a una ventana de 20 m).
10. Se generó una cuadrícula de anomalías residuales con un tamaño de celda de 0,2 m y una escala de colores de ecualización de histograma.
11. Se calculó la señal analítica basada en la cuadrícula de anomalías residuales.
12. Se aplicó un suavizado de convolución 3x3 de 1 pasada a la cuadrícula AS y se cambió la escala de colores a distribución normal.