

# RadioUAV: ‘beyond-the-visible’ applications with UAVs (aplicaciones “más allá de lo visible” con UAVs)

García Fernández, María<sup>1,\*</sup>, Álvarez López, Yuri<sup>1</sup>, González Valdés, Borja<sup>2</sup>, Arboleya Arboleya, Ana<sup>3</sup>, Rodríguez Vaqueiro, Yolanda <sup>2</sup>, Las Heras Andrés, Fernando <sup>1</sup>, y Pino García, Antonio <sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Oviedo. Correo electrónico: garciafmaria@uniovi.es, alvarezzyuri@uniovi.es, flasheras@uniovi.es.

<sup>2</sup> AtlantTIC Research Center, Universidad de Vigo. Correo electrónico: bgvaldes@com.uvigo.es, yrvaqueiro@com.uvigo.es, agpino@com.uvigo.es.

<sup>3</sup> Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Rey Juan Carlos. Correo electrónico: ana.arboleya@urjc.es.

\* Autor Principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: garciafmaria@uniovi.es

---

**Resumen:** En esta contribución se presentan dos sistemas para inspección no destructiva basados en el empleo de sensores de radiofrecuencia embarcados en vehículos aéreos no tripulados (UAVs, *Unmanned Aerial Vehicles*). La tecnología desarrollada permite aprovechar las propiedades de las ondas electromagnéticas como, por ejemplo, la capacidad de penetración en ciertos materiales. Ello hace posible detectar fenómenos que no podríamos ver con nuestros propios ojos ni con las cámaras habitualmente embarcadas en UAVs (de ahí el nombre de aplicaciones “más allá de lo visible”). Los sistemas presentados son: GEODRON, que cuenta con un georradar (o GPR, *Ground Penetrating Radar*) embarcado y permite obtener imágenes de alta resolución del subsuelo y de los objetos enterrados en él; y UASAM, que incorpora un detector de potencia de radiofrecuencia y posibilita la medida de antenas in-situ y la detección de fallos en las mismas. El sistema GEODRON es de especial interés en el ámbito de la seguridad y defensa (para detección de explosivos, como minas antipersona) y en tareas de búsqueda y rescate (para detectar personas atrapadas tras un desastre natural). Al estar el radar embarcado en un UAV, se evita el contacto físico con el suelo durante la exploración, garantizando la seguridad en la operación. Por otro lado, UASAM puede aplicarse también en el ámbito de defensa para, por ejemplo, inspeccionar antenas a bordo de embarcaciones militares. El empleo de UAVs posibilita la inspección de zonas de difícil acceso de forma rápida, lo que supone una gran ventaja en este tipo de aplicaciones.

**Palabras clave:** UAV, detección de minas antipersona, medida de antenas.

---

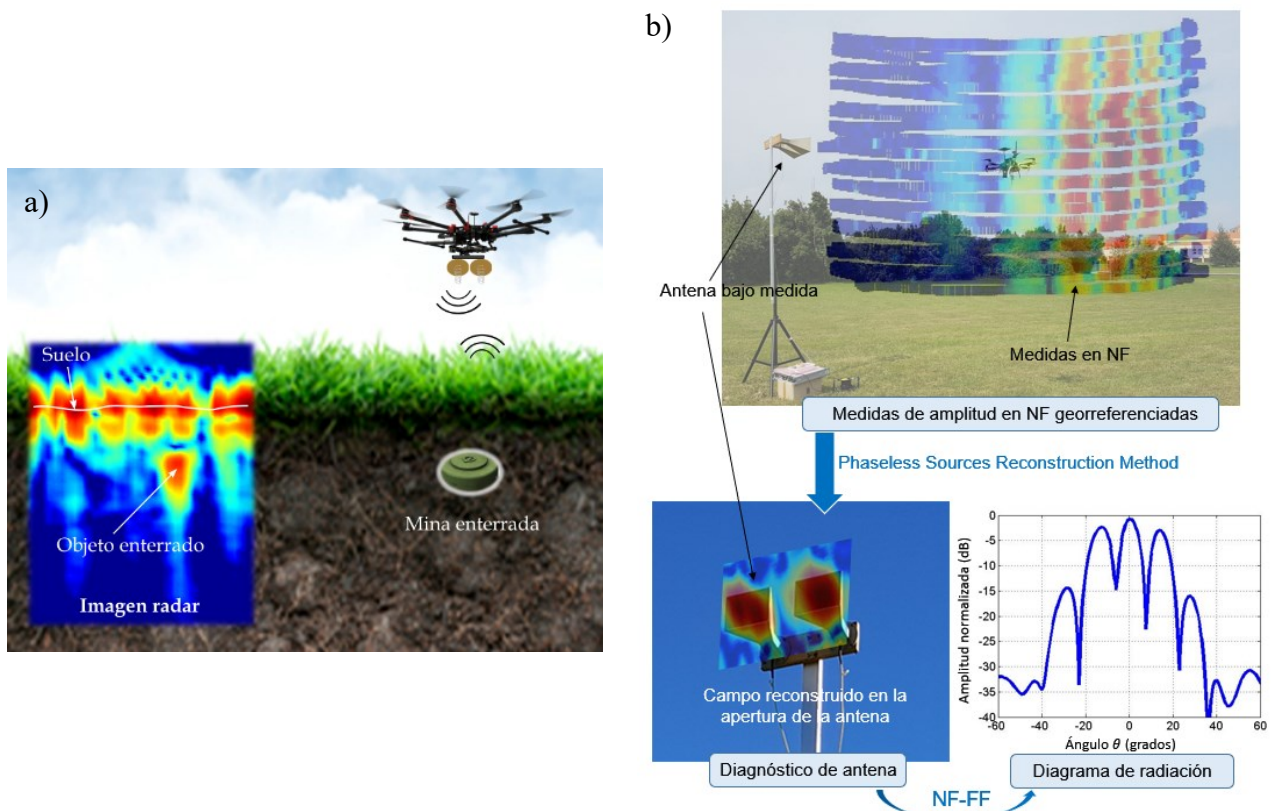
## 1. Introducción

El gran desarrollo experimentado por los vehículos aéreos no tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*) en los últimos años ha dado lugar a nuevas aplicaciones en diversos sectores, como obra civil, agricultura, seguridad y defensa, y comunicaciones. La reducción de coste de los UAVs y de los sensores a embarcar ha contribuido de forma fundamental al rápido crecimiento de este tipo de aplicaciones basadas en UAVs.

En el campo de los sistemas radar embarcados, se han desarrollado prototipos de sistemas SAR (*Synthetic Aperture Radar*) para observación terrestre o superficial [1]. Si bien existen prototipos de sistemas para detectar objetos ocultos enterrados [2], solamente el presentado en esta contribución, GEODRON, permite combinar coherentemente las medidas y, como consecuencia, obtener imágenes radar de alta resolución del subsuelo.

Los UAVs se han utilizado también satisfactoriamente para medir antenas y emisiones electromagnéticas [3]. El sistema desarrollado, UASAM, destaca por trabajar en campo cercano (solventando las limitaciones de los sistemas que trabajan en campo lejano), lo que posibilita aplicaciones de diagnóstico de antenas (por ejemplo, detección de fallos).

En la Figura 1 se representan los objetivos y resultados que se pretenden obtener con cada uno de los prototipos: imágenes electromagnéticas del subsuelo en el caso de GEODRON [4, 5] y el campo reconstruido en la apertura de la antena y su diagrama de radiación en el caso de UASAM [6].



**Figura 1.** Esquema de las soluciones propuestas para detección de minas antipersona (GEODRON) (a) y para diagnóstico y caracterización de antenas (UASAM) (b).

### 1.1. Detección de minas antipersona

Las técnicas de inspección no destructiva (NDT, *Non-Destructive Testing*) son de gran interés para la detección de objetos enterrados en un amplio abanico de aplicaciones, como seguridad y defensa

(para detección de minas antipersona), obra civil, arqueología u operaciones de búsqueda y rescate. Entre estas técnicas, GPR (*Ground Penetrating Radar*) [7] es una de las más eficaces ya que permite detectar objetos tanto metálicos como plásticos y, además, es capaz de proporcionar imágenes electromagnéticas del subsuelo.

Fundamentalmente existen dos tipos de arquitecturas de sistemas GPR: *Forward-Looking GPR* (FLGPR), en el que las antenas se colocan con una cierta inclinación con respecto al suelo manteniendo una distancia de seguridad, y *Downward-Looking GPR* (DLGPR), en el que las antenas se encuentran perpendiculares al suelo. El primero permite aumentar la energía que penetra en el suelo (a costa de una peor resolución), mientras que el segundo permite mejorar la resolución (pero capta mayor energía procedente de la interfaz entre el aire y el suelo, que puede enmascarar a los blancos).

En algunas aplicaciones, como la mencionada de detección de minas, el sistema debe guardar una distancia de seguridad con respecto al área a inspeccionar, lo que es difícil de conseguir en sistemas DLGPR. Una posible solución se basa en el empleo de robots terrestres, con un bajo riesgo de detonación accidental pero una baja velocidad de exploración. Para solventar estos problemas, es decir, minimizar el riesgo e incrementar la velocidad, la solución propuesta en esta contribución se basa en el empleo de un sistema GPR a bordo de un UAV. Además, al emplear un sistema de posicionamiento de precisión, las medidas tomadas con el prototipo pueden combinarse coherentemente con algoritmos de SAR. Ello hace que pequeños objetos próximos entre sí puedan distinguirse en la imagen electromagnética obtenida, mejorando la calidad de los resultados.

### 1.2. Medida de antenas

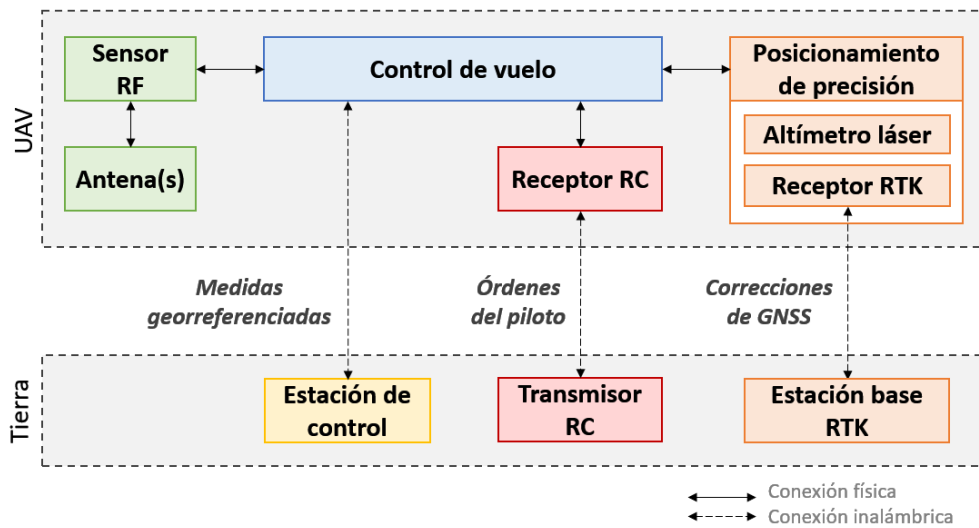
Los sistemas de medida de antenas basados en UAVs permiten caracterizar el funcionamiento de las antenas en condiciones de operación (in-situ). Ello posibilita tener en cuenta la influencia del entorno (por ejemplo, reflexiones en el suelo), a costa de ser menos precisos que las medidas tomadas en instalaciones específicas de medida de antenas (como cámaras anecoicas). Además, estos sistemas basados en UAVs son más baratos y fáciles de operar que otras soluciones similares que se basan en el empleo de aviones tripulados.

Los sistemas desarrollados pueden clasificarse en función de diversos criterios como: i) el tipo de sensores embarcados (un detector de potencia, un analizador de espectros, o un transmisor); y ii) la región de operación, bien sea campo cercano (NF, *Near-Field*) o campo lejano (FF, *Far-Field*). La mayor parte de los prototipos existentes trabajan en campo lejano, el cual, para el caso de antenas que operan a baja frecuencia, puede encontrarse a cientos de metros de la antena. Ello conlleva ciertas limitaciones, debido tanto a restricciones de operación sobre ciertas áreas como a autonomía de vuelo. El prototipo desarrollado trata de solucionar esta problemática trabajando en campo cercano. Para ello se emplea un detector de potencia embarcado, cuyas medidas son procesadas para obtener los campos electromagnéticos en la apertura de la antena (que proporcionan información de diagnóstico), así como el diagrama de radiación.

## 2. Descripción del sistema: arquitectura y metodología

Los dos prototipos desarrollados presentan prácticamente la misma arquitectura, cambiando el tipo de sensor embarcado. En ambos casos, las medidas adquiridas en vuelo, georreferenciadas con alta precisión, se envían en tiempo real a una estación de control donde se procesan para obtener imágenes radar del subsuelo (sistema GEODRON) o información de la antena bajo medida (sistema UASAM). Los prototipos están compuestos por los siguientes subsistemas, tal y como se muestra en la Figura 2:

- Subsistema de control de vuelo, que consta del controlador de vuelo y los sensores de posicionamiento habituales en un UAV. En concreto, estos sensores son: unidades de medida inercial, barómetro y receptor de GNSS (*Global Navigation Satellite System*).
- Subsistema de comunicaciones, compuesto por módulos de radiocontrol a 433 MHz y una red inalámbrica a 2.4 GHz o 5.8 GHz (seleccionándose aquella que no interfiera con las frecuencias de trabajo del radar o de la antena bajo medida).
- Subsistema de posicionamiento de precisión centimétrica. Consta de un sistema de navegación cinética satelital en tiempo real (RTK, *Real Time Kinematic*) y de un altímetro láser. El sistema RTK está compuesto por dos receptores de GNSS: uno en el UAV y otro en tierra en una posición fija y conocida. Este último estima las correcciones a realizar a las señales de GNSS y se las envía al que está en el UAV, lo que hace posible conseguir precisión centimétrica.
- Subsistema sensorial. En el caso de GEODRON consta de un radar UWB (*Ultra-Wide-Band*) en banda C y dos antenas de hélice con polarización circular, mientras que en UASAM está compuesto por un detector de potencia y una antena que funcione en la banda de interés (sonda).
- Estación de control terrena, donde se controla la misión y se reciben las medidas georreferenciadas en tiempo real para ser procesadas posteriormente.



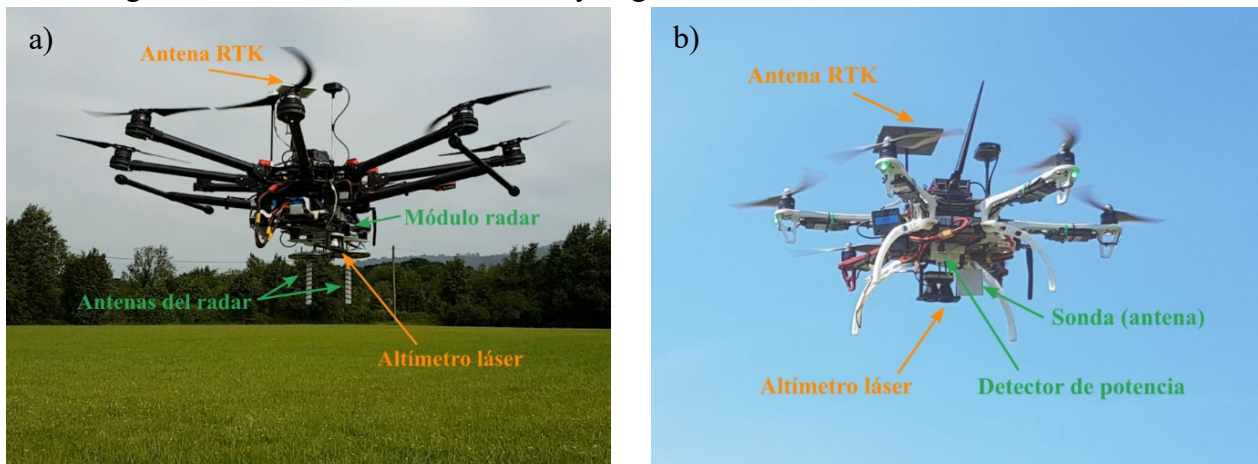
**Figura 2.** Esquema de los principales subsistemas que componen los prototipos y las conexiones entre los mismos.

En la Figura 3 se muestra una imagen de cada uno de los prototipos, donde en naranja se han resaltado los componentes del subsistema de posicionamiento de precisión y en verde los componentes del subsistema sensorial.

### 2.1. Metodología del sistema GEODRON

En cuanto a la metodología empleada en GEODRON, las medidas tomadas por el radar se combinan coherentemente empleando un algoritmo basado en SAR. Asumiendo una configuración cuasi-monoestática donde el campo dispersado  $E_{scatt}$  se mide en  $M$  puntos de adquisición a  $N$  frecuencias, la reflectividad en un punto  $\mathbf{r}'$  viene dada por (1), donde  $\mathbf{r}_m$  es la posición de la medida  $m$ -ésima,  $k_{0,n}$  es el número de onda a la frecuencia  $n$ -ésima  $f_n$  y  $R = \|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}'\|$ .

$$\rho(\mathbf{r}') = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M E_{scatt}(f_n, \mathbf{r}_m) e^{j2k_{0,n}R} \quad (1)$$



**Figura 3.** Prototipos desarrollados de GEODRON (a) y UASAM (b).

En caso de que las medidas se realicen en el dominio del tiempo (como es el caso), se debe realizar una transformada de Fourier antes de aplicar el procesado SAR. Además, con el objetivo de mitigar el clutter (causado por la desadaptación de impedancias en la interfaz aire-suelo), a cada medida se le resta la traza media de todas las medidas.

La gran ventaja del algoritmo de SAR empleado es que permite trabajar con medidas tomadas en superficies arbitrarias (en tanto en cuanto se tengan suficientes medidas para cumplir el criterio de Nyquist). Por ello, es especialmente adecuado para procesar medidas tomadas con un UAV.

## 2.2. Metodología del sistema UASAM

Como el prototipo de UASAM se basa en el empleo de un detector de potencia en lugar de un detector coherente, no se dispone de información de la fase del campo medido, que es necesaria para el post-procesado de las medidas. Para solventarlo, se emplea una técnica de reconstrucción de fase llamada *phaseless Sources Reconstruction Method* (pSRM) [8]. Esta técnica permite obtener una distribución de corrientes eléctrica y magnética equivalente en la apertura de la antena (lo que proporciona información de diagnóstico). A partir de esta distribución se obtiene posteriormente el diagrama de radiación aplicando una transformación de campo cercano a campo lejano (NF-FF).

El empleo de esta metodología permite simplificar el hardware (solamente se necesita un detector de potencia), si bien es necesario realizar las medidas en dos superficies diferentes (por ejemplo, dos superficies cilíndricas concéntricas). De nuevo, la principal ventaja de emplear pSRM es que los puntos de medida pueden estar distribuidos arbitrariamente (cumpliéndose el criterio de Nyquist).

## 3. Validación experimental

La validación experimental se ha llevado a cabo en varias etapas: en primer lugar, la carga útil de ambos prototipos se validó en un ambiente controlado (en el laboratorio); posteriormente, se procedió a su validación en exteriores y, finalmente, se realizaron diversas pruebas de vuelo. En esta sección se muestran algunos de los resultados obtenidos en vuelo.

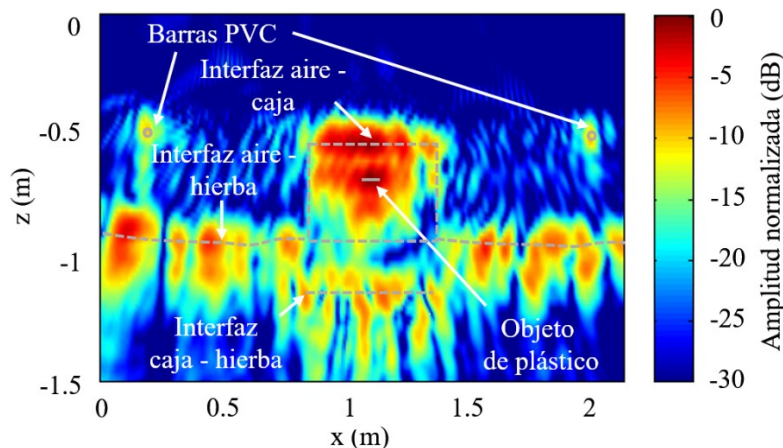
### 3.1. Resultados del sistema GEODRON

Dado que no está permitido cavar en el campo de vuelo en el que se han realizado las pruebas, se ha utilizado una caja de plástico llena de arena (en la cual se han enterrado diversos objetos). La caja, de dimensiones 56 x 78 x 43 cm, se colocó sobre la hierba y se cubrió con una lona, tal y como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Setup para las pruebas de vuelo de GEODRON.

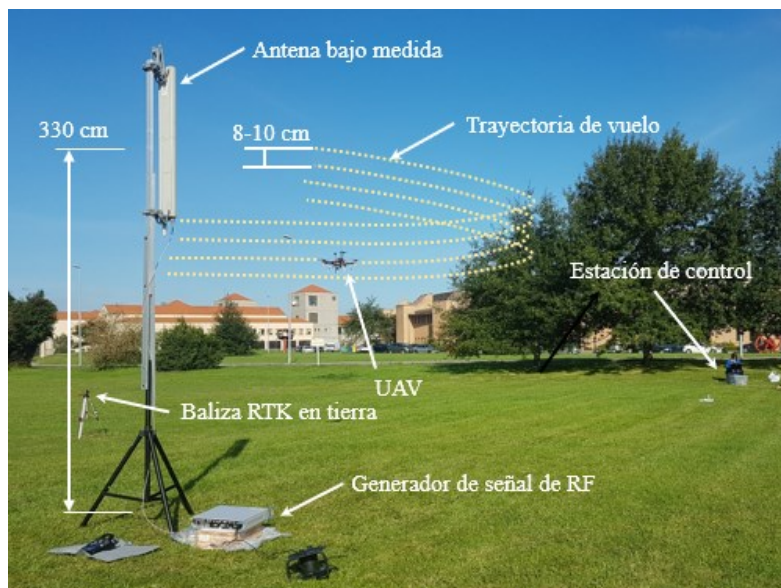
En la Figura 5 se muestra la imagen SAR obtenida cuando en la caja se encontraba, enterrado a 10 cm de profundidad, un cilindro de plástico (de 9 cm de radio y 9.5 cm de altura, relleno de espuma). Tanto el objeto como las interfaces entre los diferentes medios se distinguen claramente en la imagen resultante. El objeto y la interfaz entre la arena y el suelo debajo de la caja se reconstruyen a mayor profundidad de la real, ya que no se está teniendo en cuenta la permitividad de la arena ( $\epsilon_r \approx 2.5$ ). En la Figura 5 también se observan las dos barras de PVC que soportan la lona (situadas a alrededor de 60 y 70 cm de los lados izquierdo y derecho de la caja, respectivamente).



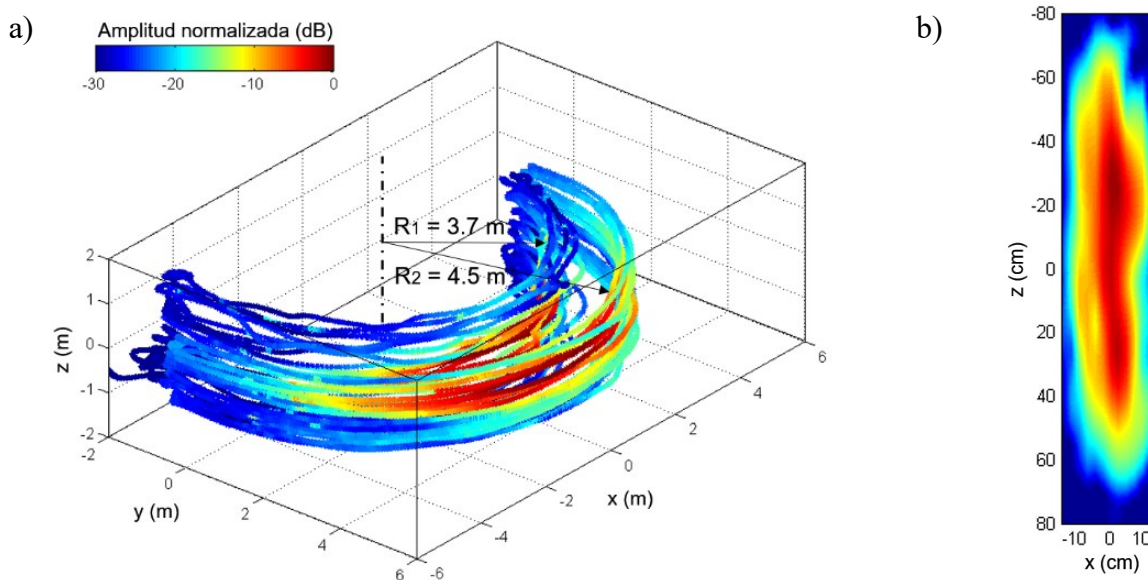
**Figura 5.** Imagen SAR de las medidas con un objeto de plástico enterrado en la caja de arena.

### 3.2. Resultados del sistema UASAM

UASAM ha sido utilizado para medir de forma satisfactoria antenas y *arrays* tanto con polarización lineal como circular, comparando sus resultados con medidas realizadas en una cámara anecoica. En el ejemplo mostrado en esta contribución, se ha medido la antena de una estación base de telefonía móvil a 2.35 GHz. Tal y como se muestra en la Figura 6, la antena se ha colocado en un mástil de 3.30 m de altura. Para tomar las medidas se ha programado el UAV para que describa dos superficies semicilíndricas concéntricas (de 2 a 4.5 m de altura) a 3.7 y 4.5 m de distancia de la antena. Si bien la sonda empleada es un monopolo (que cuenta con un diagrama de radiación prácticamente omnidireccional en el plano horizontal), la parte delantera del UAV siempre apunta hacia la antena bajo medida para minimizar posibles desalineamientos. Una vez adquiridas las medidas de amplitud en campo cercano (Figura 7a), se ha aplicado pSRM para recuperar una distribución de corrientes equivalentes en la apertura de la antena (Figura 7b).



**Figura 6.** Setup para las pruebas de vuelo de UASAM.

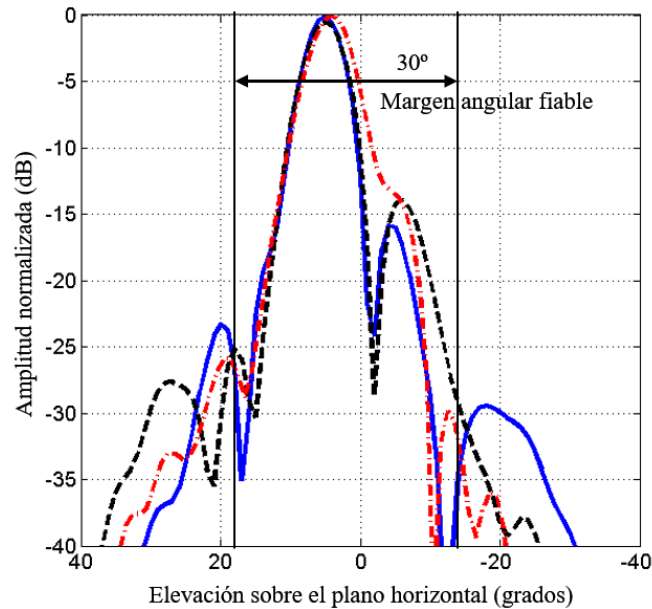


**Figura 7.** Medidas adquiridas con el prototipo (a) y distribución de corrientes reconstruida (b).

Finalmente, a partir de dicha distribución es posible obtener el diagrama de radiación en campo lejano. En la Figura 8 se muestra el diagrama de radiación obtenido a partir de medidas de amplitud y fase en cámara anecoica (traza azul), de medidas de solo amplitud en cámara anecoica (traza negra) y de medidas de sólo amplitud tomadas con el prototipo (traza roja). Existe una buena concordancia en el margen angular de validez del método (en torno a  $30^\circ$ ).

#### 4. Conclusiones

En esta contribución se han presentado dos sistemas novedosos basados en sensores de radiofrecuencia embarcados en UAVs: GEODRON, que permite obtener imágenes electromagnéticas del subsuelo para aplicaciones de inspección no destructiva (por ejemplo, detección de minas antipersona); y UASAM, que posibilita la medida de antenas in-situ. En ambos prototipos, al emplear UAVs se obtiene una mayor velocidad de escaneo y es posible inspeccionar zonas de difícil acceso.



**Figura 8.** Diagrama de radiación.

En el caso de GEODRON, el principal valor añadido proviene del hecho de que el radar empleado está embarcado en el UAV, lo cual evita el contacto físico con el suelo. Otra ventaja importante es que, al emplear un radar, es capaz de detectar objetos tanto metálicos como plásticos. En el caso de UASAM, una característica diferenciadora es que permite identificar posibles fallos en las antenas, así como evaluar su diagrama de radiación empleando medidas en campo cercano (evitando tener que volar a distancias de campo lejano). Además, como la evaluación de la antena se realiza in-situ, posibilita tener en cuenta cómo afecta el entorno al funcionamiento de la misma.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno de España (TEC2014-55290-JIN, TEC2015-73908-JIN, RYC-2016-20280, FPU15-06341), el Gobierno del Principado de Asturias (FC-15-GRUPIN14-114, IDI/2017/000095), el Gobierno de Galicia (GRC2015/018) y AtlantTIC.

### Referencias

1. Llorc M, Aguasca A, Lopez-Martinez C, Martinez-Marin T. Initial evaluation of SAR capabilities in UAV multicopter platforms. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Obs. Remote Sensing*. **2018**;11(1):127-140.
2. Ludeno G, et al. A micro-UAV-borne system for radar imaging: a feasibility study. *Proc. 9<sup>th</sup> Int. Workshop Adv. Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. **2017**.
3. Virone G, et al. Antenna pattern verification system based on a micro unmanned aerial vehicle (UAV). *IEEE Ant. Wireless Prop. Letters*. **2013**;13:169-172.
4. Garcia-Fernandez M, et al. Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board an unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*. **2018**;6:45100-45112.
5. Garcia-Fernandez M, et al. Sistema de GPR embarcado en un UAV para la detección de objetos ocultos enterrados. *Conf. Nacional en I+D para Defensa y Seguridad (DESEI+D)*. **2017**.
6. Garcia-Fernandez M, et al. Antenna diagnostics and characterization using unmanned aerial vehicles. *IEEE Access*. **2017**;5:23563-23575.
7. Daniels D J. Ground Penetrating Radar. *London: IET*; **2004**.
8. Alvarez Y, Las-Heras F, Pino M R. The sources reconstruction method for amplitude-only field measurements. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **2010**;58(8):2776-2781.