

Pings del Más Allá: Cazando Meteoros con Ondas de Radio mediante Dispersión Meteórica en VHF

Brais Feal Allegue • Alberto López Rubal

A Coruña, 43.480036 N, -8.317987 E

Fecha de observación: 14 y 15 de agosto de 2025

Resumen

Se presenta un experimento de radioastronomía pasiva para la detección de meteoros mediante dispersión meteórica (meteor scatter) en banda VHF, empleando la portadora continua¹ del radar GRAVES (143,050 MHz) como iluminador² y un sistema receptor basado en SDR y antena Yagi direccional. Se describen fundamentos físicos (plasma meteórico, ecos underdense/overdense), instrumentación, metodología. Se discuten fuentes de error, comparación con otros modos (Es, troposcatter, EME) y propuestas para convertir el montaje en una estación de monitorización con valor científico.

El día de observación coincidió con el máximo de la lluvia de Perseidas 2025, lo que refuerza el interés del experimento. Durante una hora de registro continuo se contabilizaron 13 ecos meteóricos inequívocos, la mayoría de tipo underdense, con duraciones en el rango de 30–300 ms. Se detectó además un eco de mayor duración (aproximadamente 2 segundos), atribuible a un meteoro overdense.

Palabras clave: dispersión meteórica, meteor scatter, radar pasivo, VHF, SDR, antena Yagi, radar GRAVES, plasma meteórico, ecos underdense, ecos overdense.

1. Introducción

Cada día entran en la atmósfera terrestre miles de pequeñas partículas de polvo cósmico. La mayor parte de este flujo no produce fenómenos luminosos visibles. Aun así, el paso de partículas micrométricas a milimétricas a velocidades hipersónicas genera una columna de plasma en la mesosfera y parte baja de la termosfera (80–110 km), capaz de dispersar o reflejar ondas de radio VHF/UHF. Esta propiedad permite observar meteoros con técnicas de radio, independientemente de nubes, contaminación lumínica o incluso durante el día.

Una de las formas más sencillas de aprovechar este fenómeno es usar un transmisor potente y estable como fuente de iluminación y un receptor en tierra que capte los ecos reflejados en las trazas meteóricas. En este experimento se ha empleado el radar GRAVES (Grand Réseau Adapté à la

¹ Portador continuo: es un emisor que está en constante transmisión

² Iluminador: es el término empleado en dispersión meteórica (meteor scatter) para referirse a la señal rebotada de la fuente de emisión (GRAVES)

VEille Spatiale), un sistema militar francés diseñado para la vigilancia espacial que transmite continuamente en 143,050 MHz. Su potencia, estabilidad y cobertura lo han convertido en una referencia habitual en proyectos amateur y semiprofesionales de dispersión meteórica en Europa.

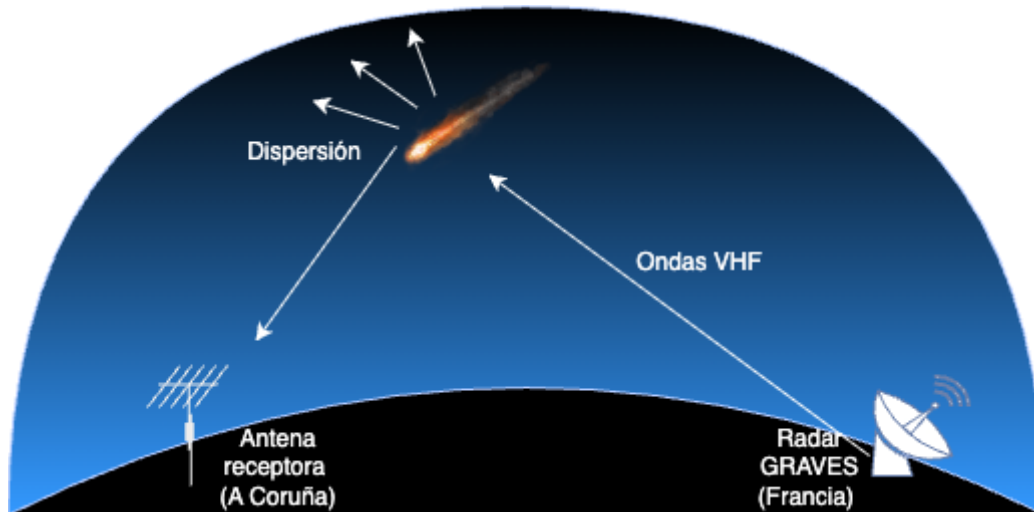


Figura 1. Esquema de funcionamiento de la técnica de dispersión meteórica

En las siguientes secciones se describe el montaje experimental y se presentan los primeros resultados obtenidos durante la lluvia de Perseidas de agosto 2025.

2. Antecedentes y comparación con otros modos

Las ondas de radio en VHF/UHF no siempre viajan en línea recta. Existen distintos mecanismos que pueden hacer que reboten o se dispersen y lleguen mucho más lejos de lo esperado. Antes de centrarnos en la dispersión meteórica, merece la pena repasar brevemente otros mecanismos existentes:

2.1 Esparcida-E (Es)

En ocasiones, la capa E de la ionosfera forma parches de ionización que actúan como espejos temporales. Esto permite contactos de larga distancia en frecuencias de 30 a 150 MHz. En un espectrograma se ven como trazas largas y bastante estables, muy diferentes de los ecos cortos de los meteoros.

2.2 Troposcatter

Otra posibilidad es que la señal se disperse en la troposfera, debido a pequeñas variaciones en la densidad del aire. Este tipo de propagación es más lenta y de banda ancha, y ocurre de manera continua, sin depender de lluvias de meteoros.

2.3 EME (Earth-Moon-Earth)

Existe también la reflexión en la Luna. Las pérdidas superan los 240 dB y el movimiento de la Luna introduce un Doppler significativo. Para lograrlo hacen falta antenas muy grandes y equipos

de alta sensibilidad, lo que lo convierte en un reto más que en un método de uso común por amateurs. Cabe destacar que este mecanismo, a diferencia de los anteriores, requiere de instrumentación necesaria para transmitir señales de radio, dejando de ser un mecanismo pasivo.

2.4 Meteor scatter

Por último, la dispersión meteórica. A diferencia de los anteriores, se caracteriza por producir ecos muy breves, que duran desde milisegundos hasta algunos segundos. La intensidad del eco depende mucho de la orientación del meteorito respecto al transmisor y al receptor. Además, suelen aparecer desplazamientos Doppler de cientos de Hz o incluso varios kHz, según la velocidad del meteorito hacia o desde nuestra posición.

3. Fundamentos físicos del meteor scatter

3.1 Formación del plasma y condiciones de reflexión

Cuando un meteorito entra a gran velocidad, calienta e ioniza el aire a 80–110 km y crea una columna de plasma (aire con muchos electrones libres). Esa columna puede comportarse como un reflector (un espejo) de ondas de radio VHF/UHF dependiendo de la densidad de ionización. Cuanto mayor sea la densidad, más eficaz será la reflexión de las ondas de radio.

3.2 Ecos underdense y overdense

En la práctica, los ecos meteóricos se clasifican en dos categorías principales según esa densidad:

- Columna tenue (underdense): la ionización es baja y apenas hay electrones capaces de reflejar la señal. Esta baja densidad impide que la onda rebote como un *espejo*. En el espectrograma (*waterfall*) se observa un eco muy breve, fino, casi como un *ping* instantáneo, a veces con ligera desviación por el efecto *Doppler*.

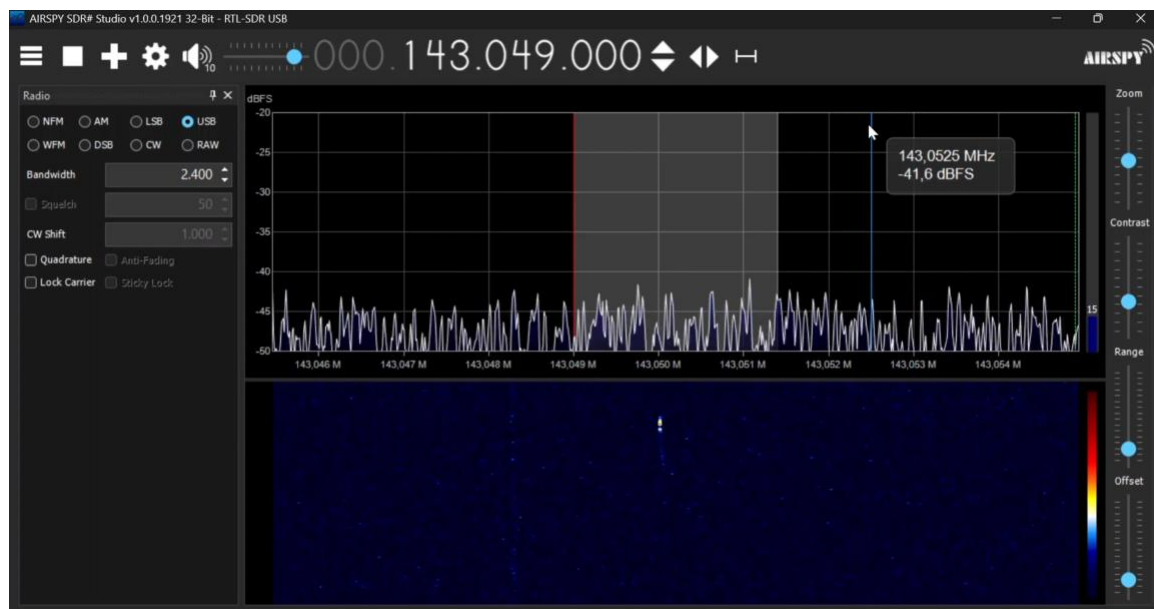


Figura 2. (Sección de abajo) Espectrograma del meteorito detectado bajo underdense

- Columna muy densa (overdense): la ionización es alta y, por lo tanto, la cantidad de electrones que permiten reflejar la señal es alta. Esto permite que la señal rebote como en un *espejo*. En el espectrograma (*waterfall*) se observa un trazo más ancho y prolongado, que puede durar segundos. En ocasiones, este trazo muestra una ligera *deriva*, es decir, un desplazamiento lento de la señal en frecuencia (efecto *Doppler*) o intensidad (debilitamiento de la señal), provocado por el arrastre de la columna de plasma por los vientos a unos 90–100 km.

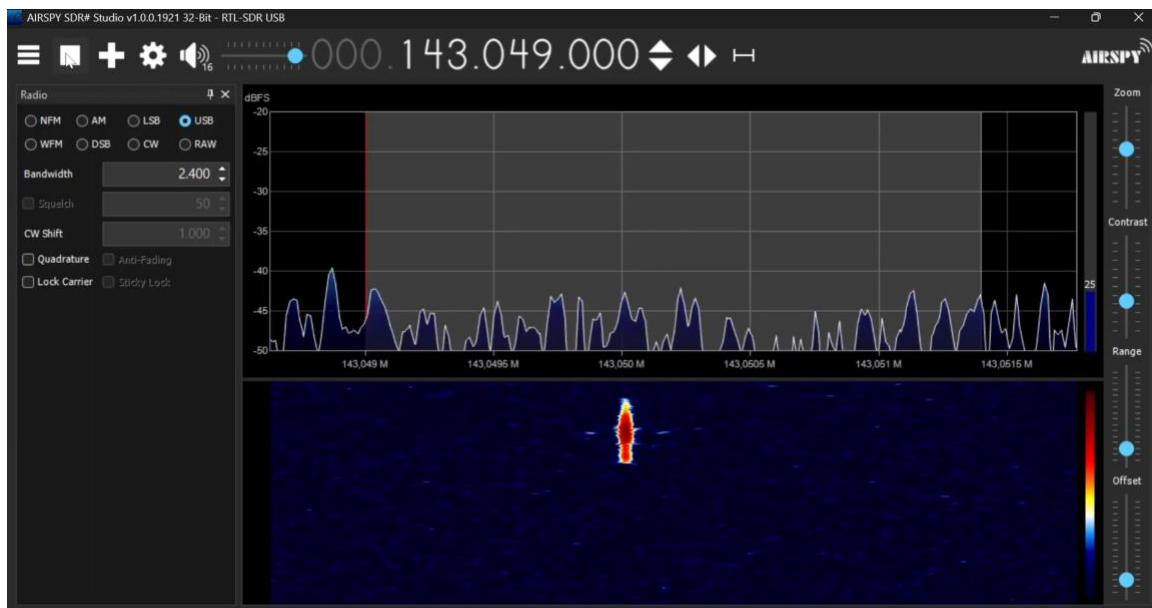
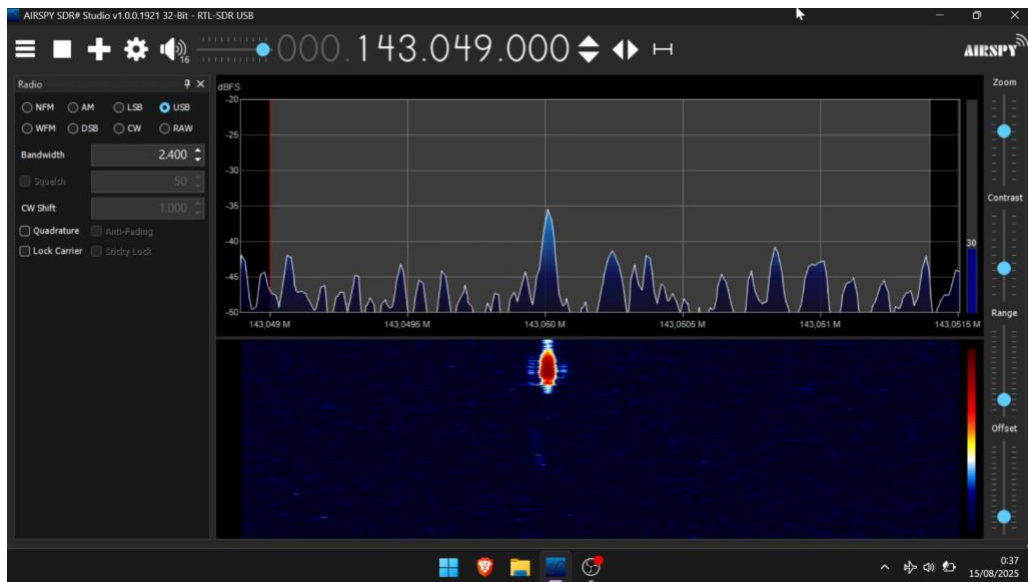


Figura 3. (Sección de abajo) Espectrograma del meteoro detectado bajo overdense

Los ecos underdense (pings rápidos) son los más comunes ya que corresponden a meteoros

pequeños y rápidos. Los overdense son menos frecuentes y se asocian en meteoros grandes/brillantes (bóolidos) que dejan trazos largos y llamativos.

Dicho de forma simple: underdense es como una lluvia ligera que deja destellos, overdense es como una pared metálica que devuelve el reflejo completo.

4. Geometría práctica desde A Coruña hacia GRAVES

El punto de observación en A Coruña se encuentra a unos 1112 km del radar GRAVES. Para interceptar los ecos meteóricos reflejados en la mesosfera (a unos 80–110km de altitud), la antenna debe orientarse hacia el noreste con una ligera componente este (aproximadamente 63°, grados azimut³, desde el norte verdadero). La antenna debe de estar paralela al suelo, con una ligera inclinación hacia arriba de unos 9-13°.

Existe una fórmula para realizar el cálculo teórico de los grados de inclinación. Estos cálculos teóricos se realizan en base a la fórmula resultante de un triángulo imaginario entre el punto de observación (A Coruña), el radar GRAVES (Francia) y el rango de detección de los meteoros (80–110km de altitud):

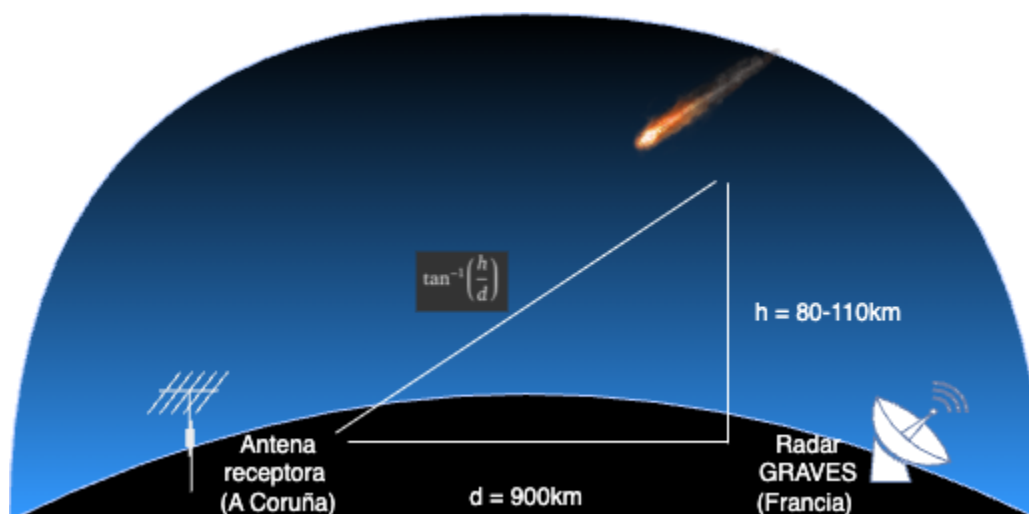


Figure 4. Cálculo teórico del grado de elevación de la antena

$$\text{Elevacion} \approx \arctan\left(\frac{h}{d}\right)$$

$$\text{Elevacion_min} \approx \arctan\left(\frac{80}{1112}\right)$$

³ Azimut: Grados de rotación con respecto al norte verdadero.

$$\arctan(0.0888) \approx 0.0718 \text{ rad}$$

$$0.0718 \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) = 4.11^\circ$$

$$\text{Elevacion_max} \approx \arctan\left(\frac{110}{900}\right)$$

$$\arctan(0.1222) \approx 0.0986 \text{ rad}$$

$$0.0986 \times \left(\frac{180}{\pi}\right) = 5.65^\circ$$

Aunque los cálculos iniciales arrojaban un ángulo de inclinación cercano a **4–5°**, en la práctica se observó que un rango de **9–13°** ofrecía un mejor desempeño en este experimento. Esta diferencia puede deberse a diversos factores, como la **curvatura de la Tierra**, la **posición del meteorito en el momento de la detección** o la **cobertura del lóbulo principal de la antena Yagi**, entre otros.

El radar francés GRAVES, aunque emite en todas direcciones, está diseñado para emitir fundamentalmente hacia el sur, cubriendo con gran eficiencia el centro y norte de Europa. Desde A Coruña la geometría y la distancia es menos favorable: el ángulo de incidencia resulta marginal, lo que reduce la probabilidad de recibir ecos fuertes. Sin embargo, esta limitación también añade interés al experimento, ya que permite comprobar la viabilidad de la técnica en condiciones no óptimas.



Figura 5. distancia entre el punto de observación y Radar GRAVES

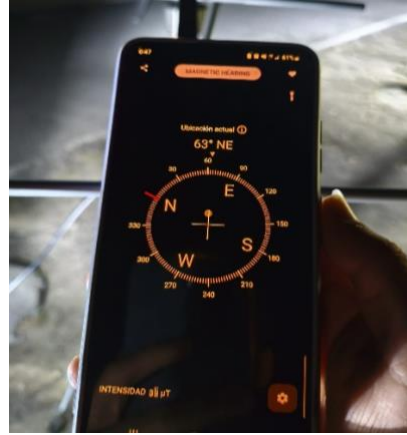


Figura 6. Azimut verdadero

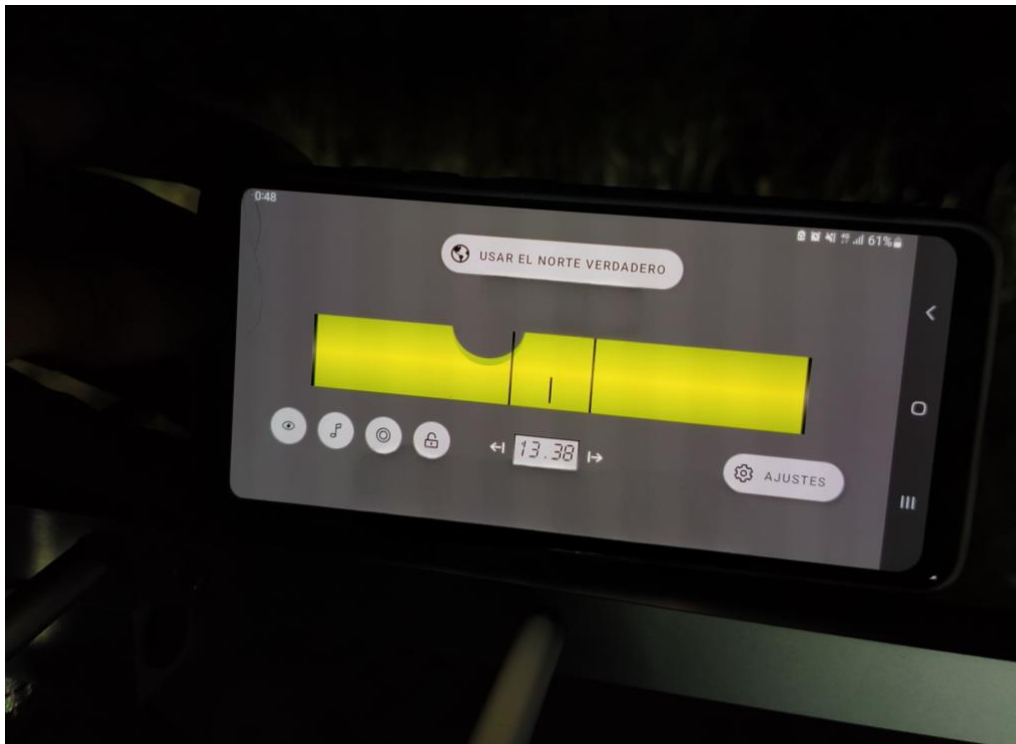


Figura 7. grados de elevación de la antena

5. Instrumentación

El equipo empleado en el experimento es sencillo, pero optimizado para sacar el máximo rendimiento a la señal en 143,050 MHz. El funcionamiento es directo: una antena direccional capta los ecos reflejados en la atmósfera, un amplificador de bajo ruido situado junto a la antena refuerza la señal antes de que se atenúe en el cable, y finalmente un receptor SDR conectado al ordenador permite visualizar y registrar la actividad detectada.

Esquema del experimento de detección de meteoros por dispersión meteórica (GRAVES)

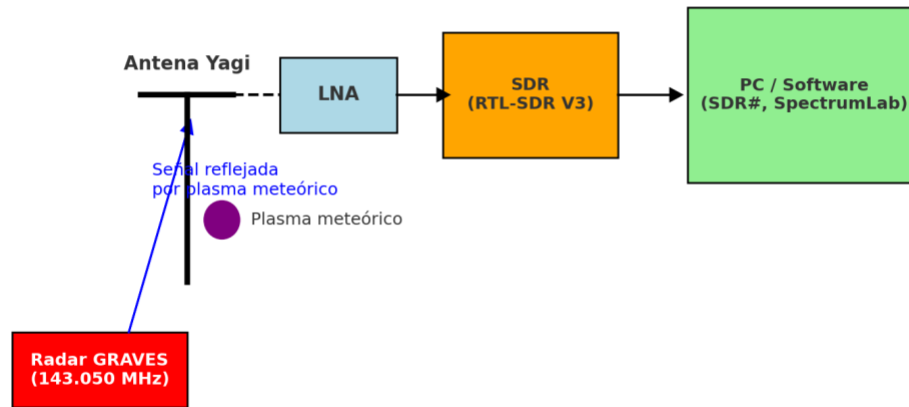


Figura 8. Esquema del montaje de la instrumentación

Después de esta visión general, en los apartados siguientes se explica con más detalle cada parte del sistema.

5.1 Antena

Se empleó una antena Yagi de doble banda (144/430 MHz, 8 elementos) con una ganancia estimada de 8–9 dBi en 144 MHz y un ancho de haz de 50–60° a -3 dB. Esta directividad permitió optimizar la captación de ecos meteóricos en la dirección del radar GRAVES, reduciendo interferencias fuera del lóbulo principal. La antena fue configurada en polarización horizontal, adecuada para la señal en 143,050 MHz.



Figura 9. Antena Yagi de 2 metros

5.2 LNA en mástil

Como primer elemento activo de la cadena se utilizó un LNA RTL-SDR, basado en el amplificador SPF5189Z. Este módulo cubre el rango 50 MHz–4 GHz, con una figura de ruido típica inferior a 1 dB y **una ganancia de aproximadamente 20–22 dB**. La alimentación se realizó mediante el bias tee integrado en el receptor RTL-SDR V3, que entrega 4,5 V, dentro del rango requerido (3–5 V).

La colocación del LNA lo más próximo posible a la antena redujo las pérdidas por atenuación en el tramo inicial de coaxial, optimizando la sensibilidad del sistema para la recepción de ecos meteóricos en la banda de 143,050 MHz.



Figura 10. LNA cerca de la antena Yagi

5.3 Receptor SDR

Para el sistema de recepción se utilizó un RTL-SDR V3, un receptor de bajo coste, pero con prestaciones suficientes para radioastronomía amateur. Se aplicó corrección de ppm. La decodificación y visualización se realizó con el software SDR#, **configurado en modo USB**, con un **ancho de banda de 2,4–3 kHz**, transformada FFT de al menos 2048 puntos y tiempos de refresco en el espectrograma de 100–300 ms, parámetros que permiten resolver tanto ecos meteóricos cortos (underdense) como trazos prolongados (overdense).

6. Metodología

6.1 Selección de emplazamiento

Se eligió un lugar con el horizonte despejado hacia el noreste, minimizando obstáculos físicos (edificaciones, arbolado) que pudieran atenuar la señal reflejada en la mesosfera.

6.2 Alineación de la antena

La antena Yagi se orientó a un azimut de 63° respecto al norte verdadero (corrigiendo la declinación magnética) y con una elevación de $9\text{--}13^\circ$, valores estimados para interceptar el punto especular de dispersión a ~ 90 km de altitud.

6.3 Configuración de sintonía

El receptor se ajustó a **143,049 MHz**, 1 kHz por debajo de la portadora nominal de GRAVES (143,050 MHz) para facilitar la visualización de desplazamientos Doppler. La ganancia se configuró en un nivel alto, pero sin saturar, y el **AGC** se mantuvo desactivado para preservar la linealidad de la señal registrada.

6.4 Registro de datos

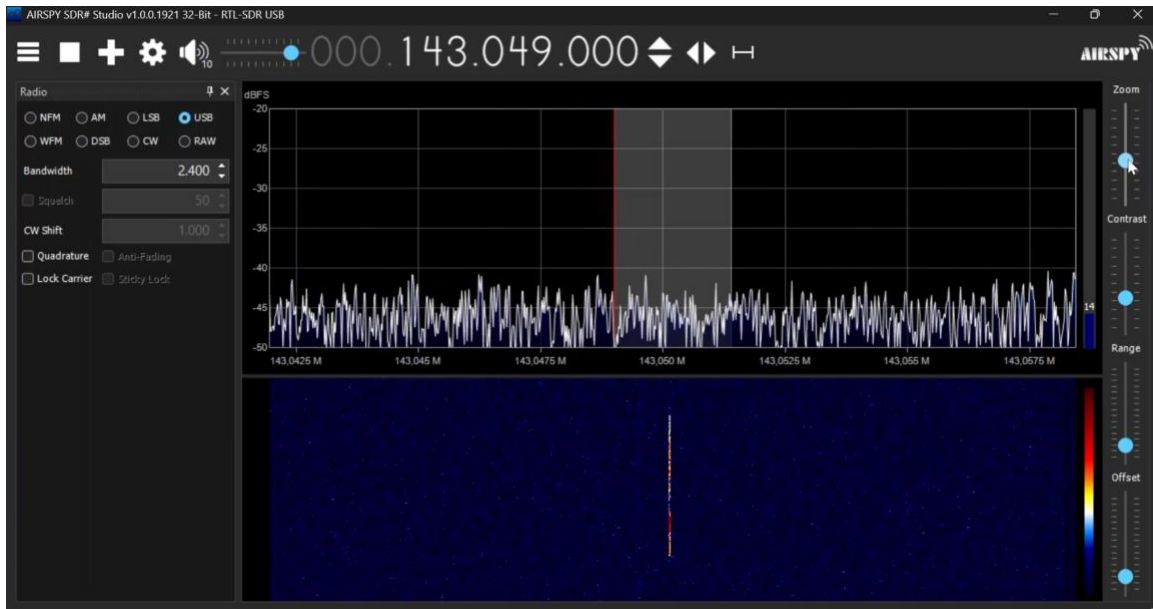
Se efectuaron grabaciones de I/Q completo y, en paralelo, de audio demodulado, con una duración mínima de 60–120 minutos por sesión. Este doble registro asegura la posibilidad de realizar tanto un análisis cualitativo inmediato (audio y espectrograma) como un tratamiento posterior más exhaustivo sobre los datos I/Q.

7. Resultados preliminares

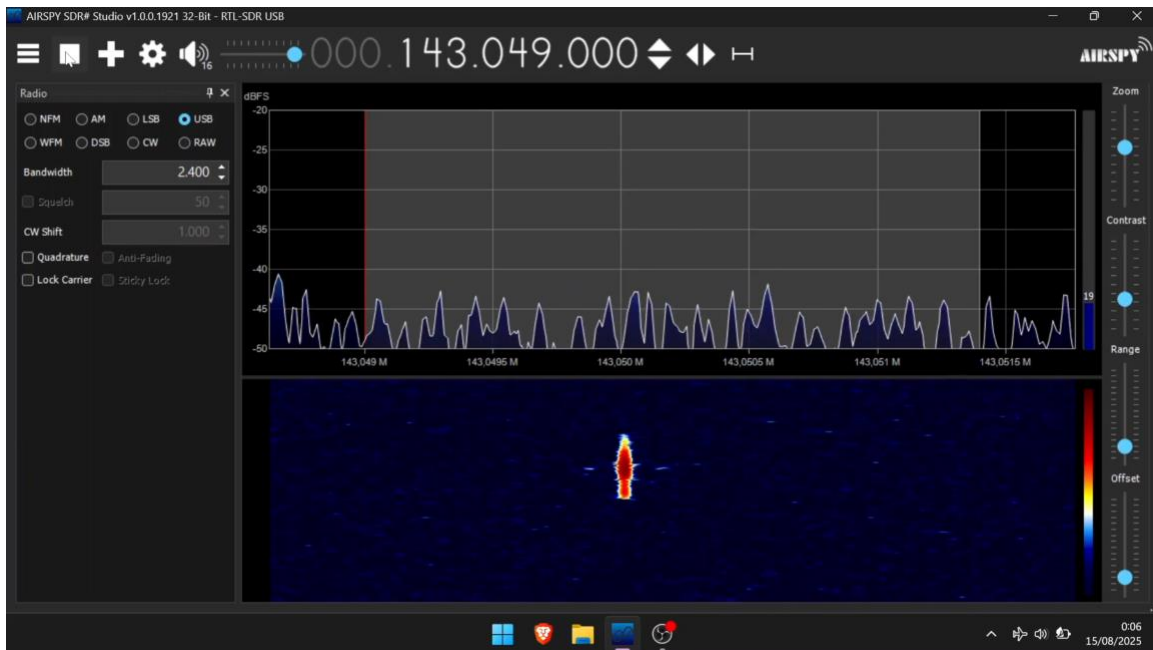
Los registros obtenidos durante la sesión de observación se analizaron a través de espectrogramas, que permiten visualizar la intensidad de la señal en función del tiempo y la frecuencia. En ellos se distinguen con claridad los ecos meteóricos, cuya forma y duración varían según el tipo de ecos (underdense o overdense).

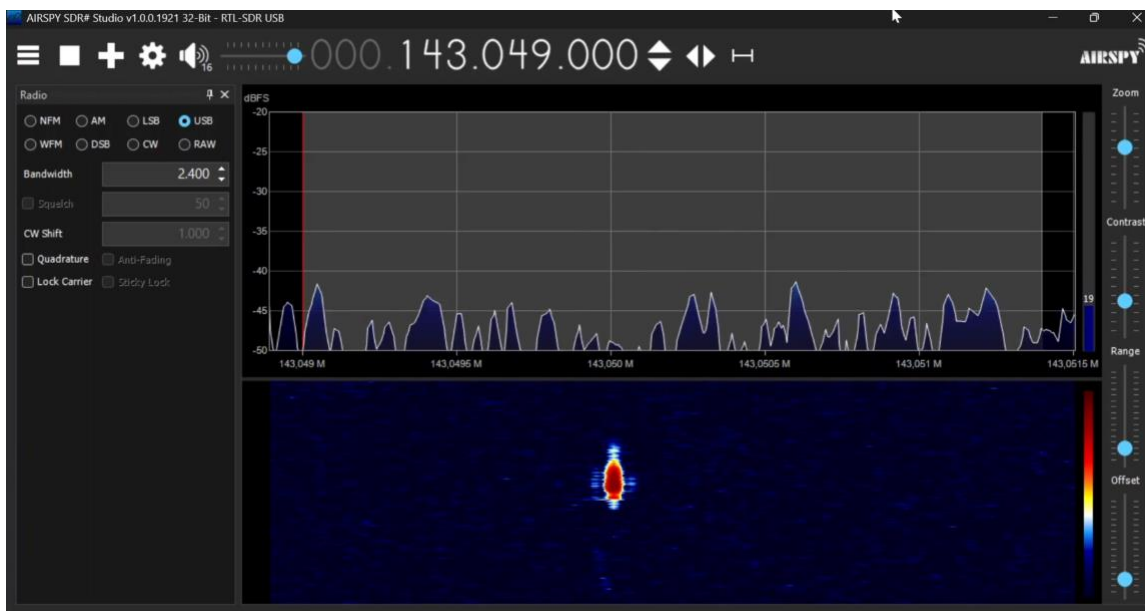
A continuación, se presentan algunas muestras representativas, acompañadas de una breve explicación de las características observadas en cada caso. Estas imágenes permiten ilustrar de manera directa la diferencia entre pings cortos y finos frente a trazos más prolongados y anchos, así como los efectos de Doppler y la deriva producida por los vientos a gran altitud.

La siguiente imagen muestra un eco prolongado y muy fino, con un trazo prácticamente vertical. Este comportamiento sugiere que podría tratarse de un eco underdense con una duración mayor de lo habitual, posiblemente originado por un meteorito pequeño que dejó tras de sí una estela tenue pero relativamente persistente. Resulta llamativo que, pese a su prolongación, no se aprecie un desplazamiento Doppler significativo. Esto podría indicar que el meteorito tardó en desintegrarse y que la estela, al ser tan débil, no llegó a ser arrastrada de forma apreciable por los vientos a gran altitud.

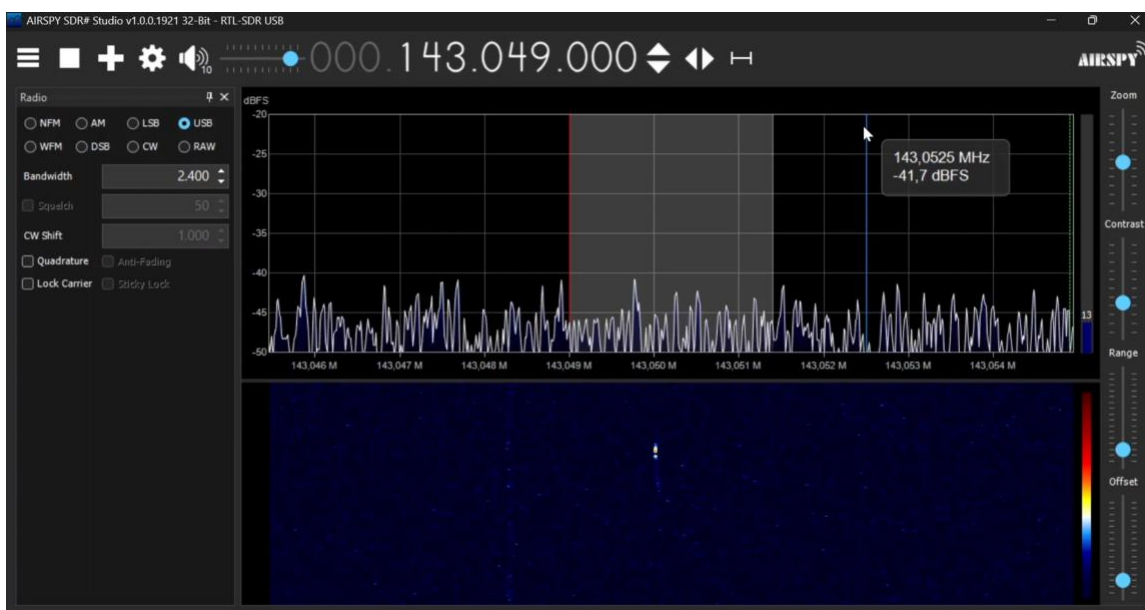


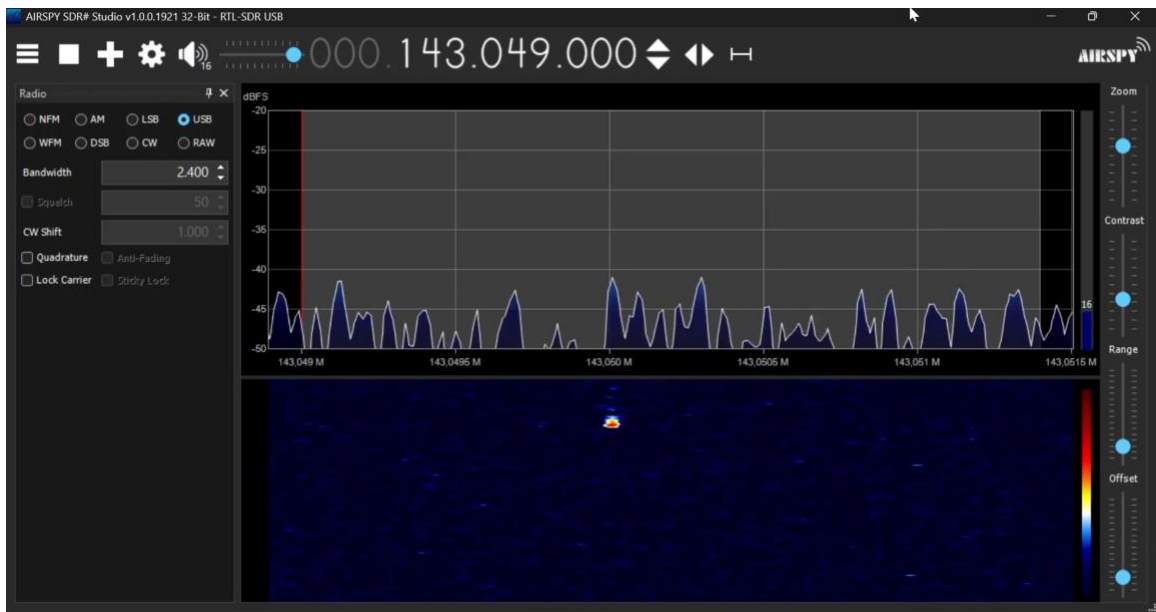
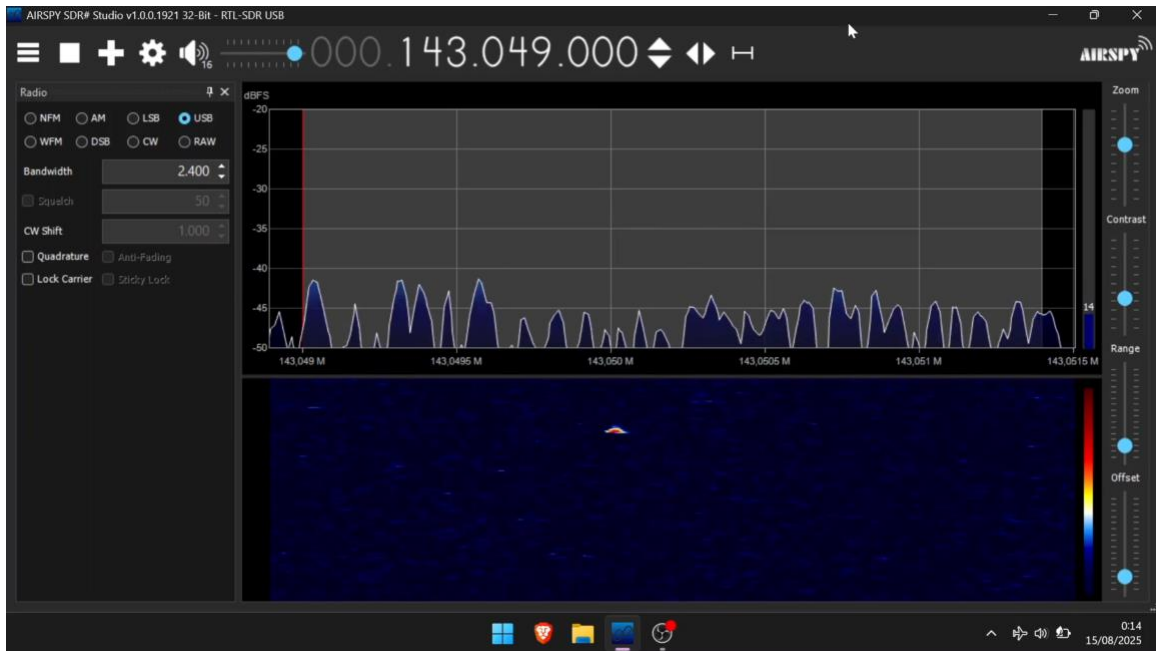
Las dos imágenes a continuación muestran claramente dos ejemplos de eco overdense. Una señal intensa (rojo) con un trazo bastante ancho y una duración más prolongada que una señal típica de undersense. El espectrograma muestra el resultado de dos meteoros más grandes que el anterior y que han generado una estela de plasma de mayor densidad, permitiendo que las ondas originarias del radar GRAVES se reflejen con mayor eficacia.

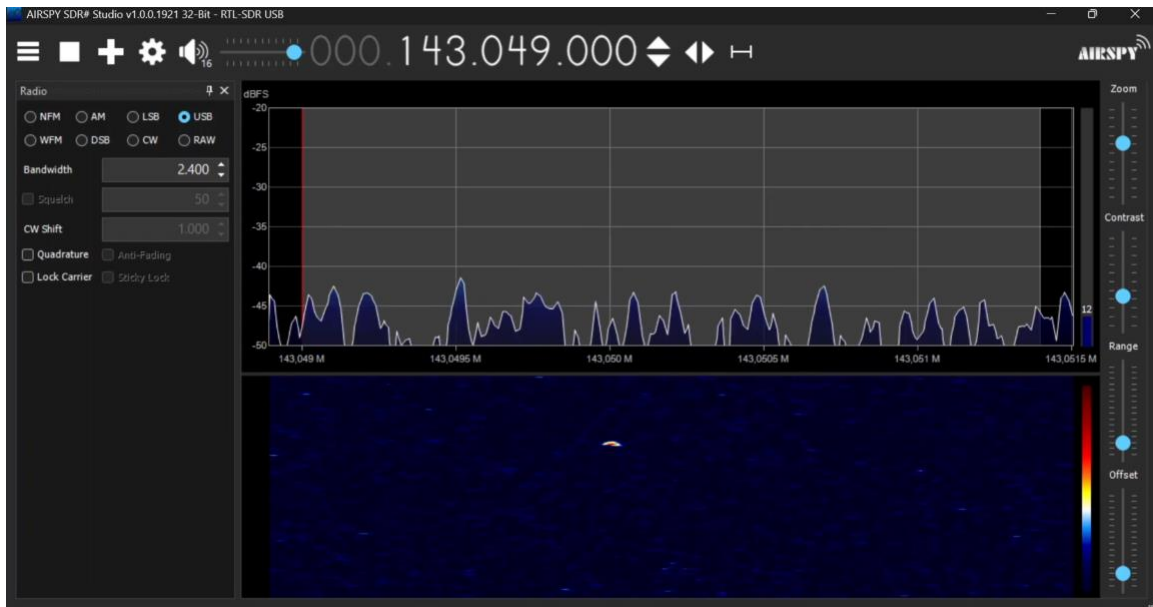




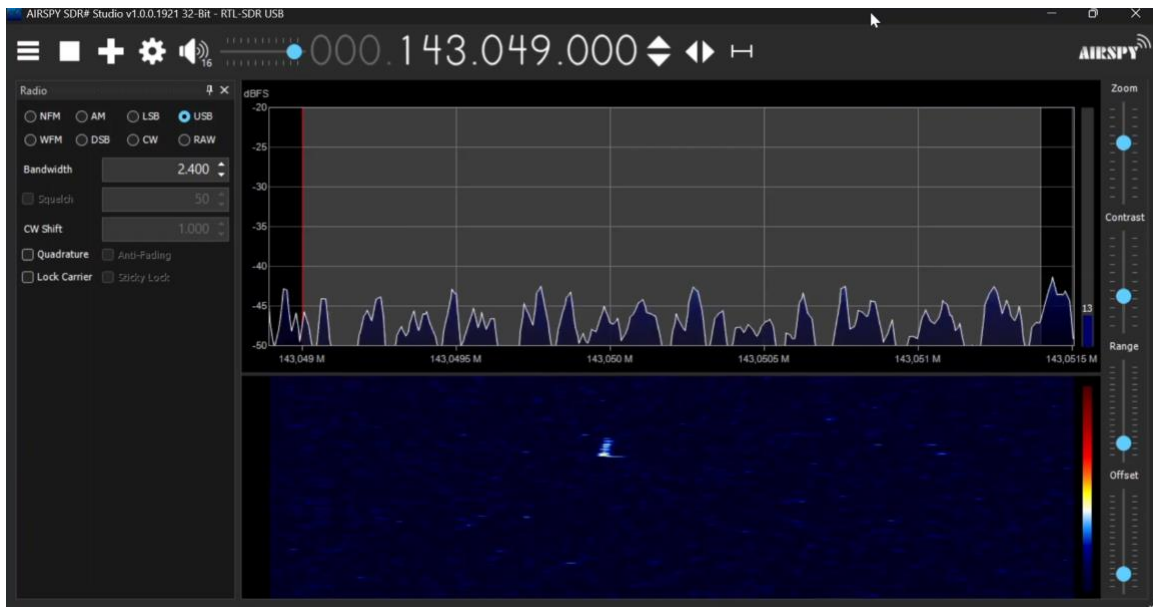
Las muestras a continuación son claros ejemplos de ecos undersense. Muestran señales muy breves y tenues. Estas señales podrían ser resultado de meteoros muy pequeños que se han descompuesto rápidamente en la atmósfera, dejando una estela de plasma tenue y poco densa.



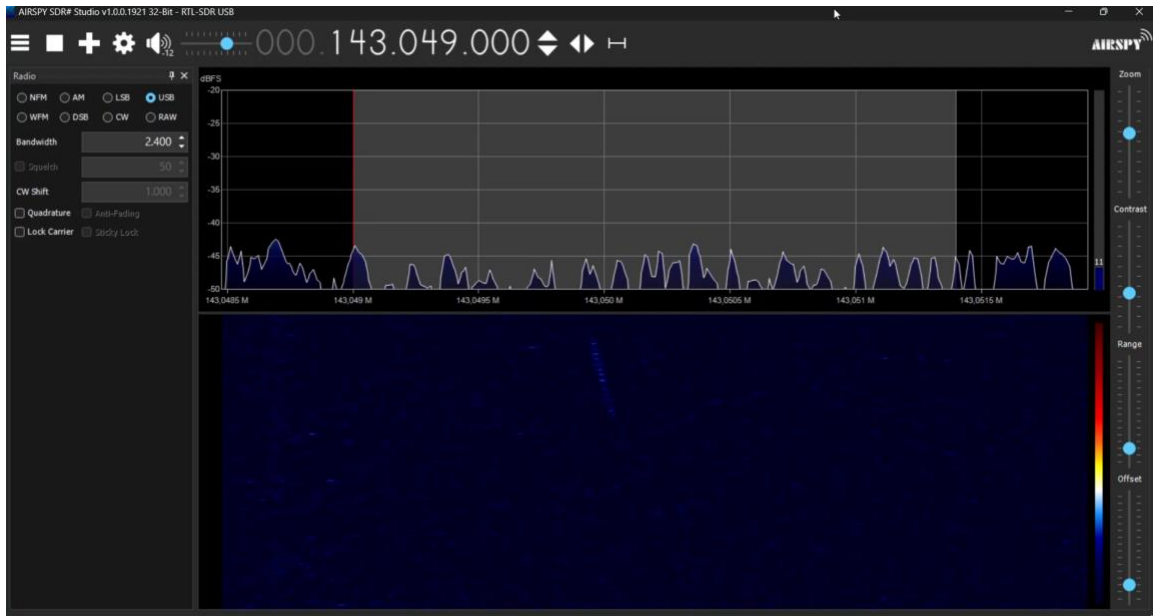
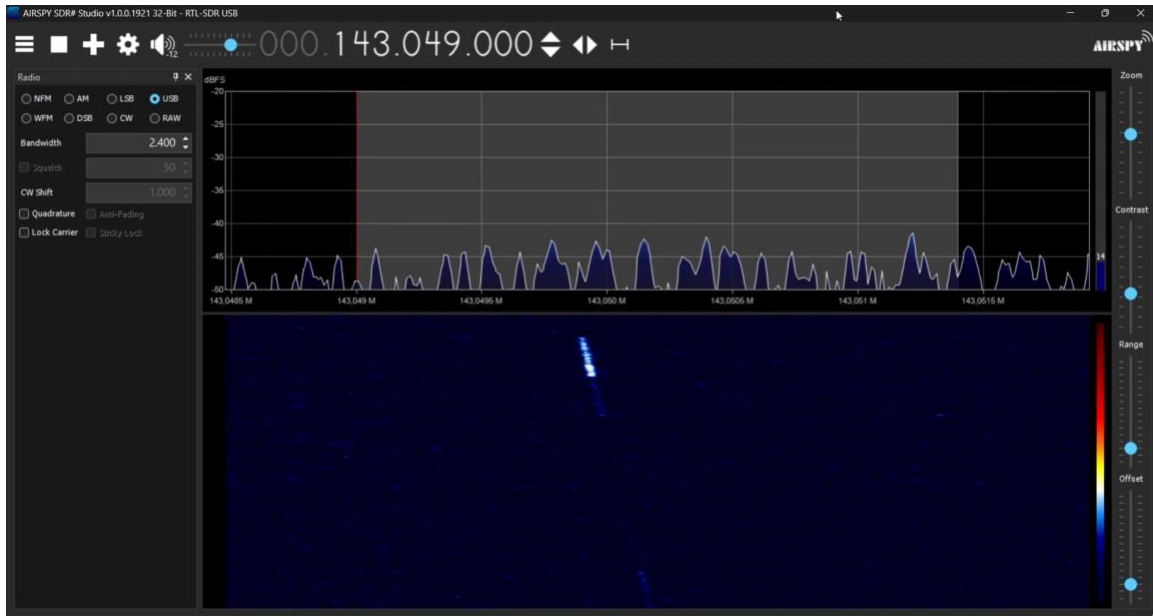


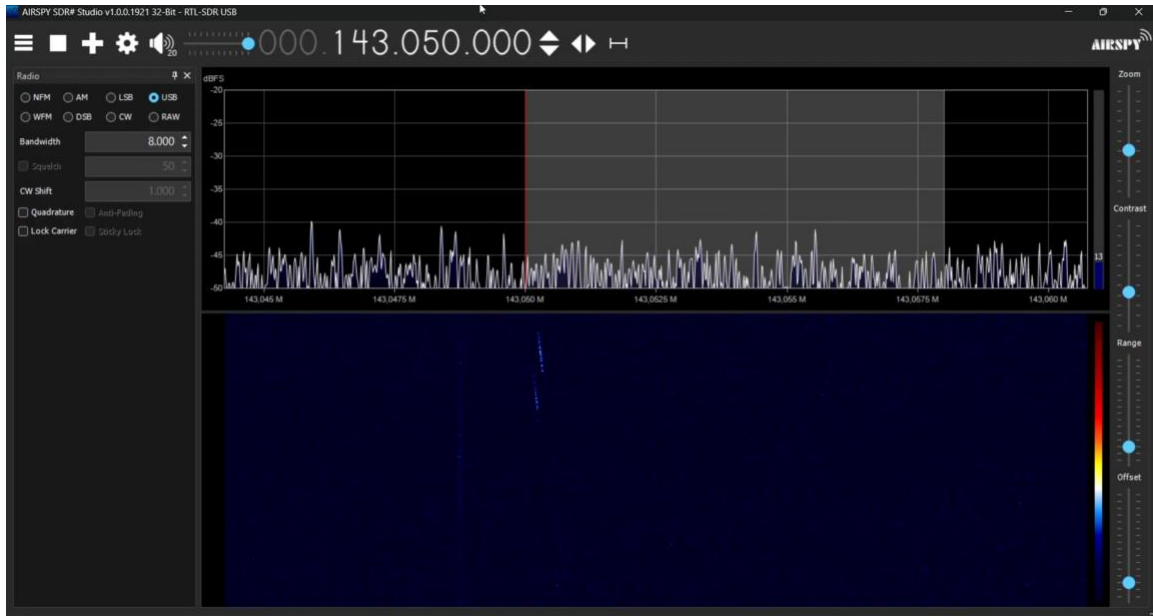


En la siguiente imagen, también underdense, se puede apreciar un ligero efecto Doppler en esa inclinación vertical en el espectrograma. Esto podría ser resultado de otro meteorito pequeño y con su estela poco densa, pero que se ha desplazado por el viento, dando como resultado que las señales reflejadas también se desplacen, generando este efecto Doppler.



El efecto Doppler se observa con mayor claridad en las siguientes muestras, donde puede apreciarse cómo algunos meteoros dejan tras de sí una estela que, al ser arrastrada por el viento, también provoca el desplazamiento de las ondas de radio.





8. Discusión y fuentes de error

8.1 Interpretación de resultados

Los datos obtenidos permiten una primera valoración cualitativa del experimento y de la eficacia del sistema empleado.

Durante una hora de observación coincidiendo con el máximo de la lluvia de Perseidas 2025 se registraron 13 ecos meteóricos, la mayoría de tipo underdense, con duraciones de 30 a 300 ms. Además, se detectó un eco más prolongado, aproximadamente 2 segundos, atribuible a un meteoro overdense. Estos resultados confirman que la técnica de dispersión meteórica en VHF es sensible incluso en condiciones de geometría desfavorable desde A Coruña hacia el radar GRAVES, lo que valida el método y demuestra la viabilidad del sistema con instrumentación amateur.

8.2 Limitaciones del experimento

Aunque el montaje ha demostrado ser efectivo, presenta una serie de limitaciones que condicionan el alcance de los resultados. Entre las más relevantes destacan:

- Cobertura geométrica: GRAVES irradia principalmente hacia el sur, optimizado para Europa central, por lo que el ángulo desde A Coruña es marginal y reduce la probabilidad de ecos intensos.
- Tiempo de observación limitado: sólo se registró una hora de datos, lo que dificulta establecer tasas horarias fiables o comparaciones con curvas de actividad de la lluvia.
- Instrumentación básica: aunque suficiente para detección, el uso de un SDR económico y una Yagi de 8 elementos restringe la sensibilidad y la capacidad de análisis fino del Doppler.

- Ausencia de conteo automático: la falta de software de detección automatizada limita la explotación estadística de los datos.

8.3 Posibles fuentes de error

Además de las limitaciones inherentes al montaje, existen otros factores externos que pueden introducir errores en la interpretación de los resultados:

- Desalineación de la antena: pequeñas desviaciones en azimuth o elevación reducen notablemente la potencia de los ecos recibidos.
- Interferencias en banda VHF: aunque se ha utilizado un LNA para mejorar la sensibilidad, las emisiones locales o ruido industrial pueden enmascarar ecos meteóricos débiles.
- Inestabilidad de frecuencia: aunque el RTL-SDR V3 dispone de TCXO, sin GPSDO pueden producirse ligeras derivas que complican el análisis Doppler.
- Condiciones atmosféricas variables: cambios en la propagación troposférica o presencia de esporádica-E pueden generar trazas que imitan ecos meteóricos.

9. Conclusiones y trabajo futuro

El experimento confirma la viabilidad de la radioastronomía pasiva para la detección de meteoros mediante dispersión meteórica usando GRAVES como iluminador. Se propone desarrollar análisis cuantitativos, ampliar la base temporal de observaciones y evolucionar el montaje hacia una estación de monitorización con valor científico.

9.1 Propuesta de análisis automatizado

Para aumentar el valor científico del montaje, se propone la implementación de software de conteo automático de ecos meteóricos. Herramientas como SpectrumLab, Meteor Logger o RMOB permiten procesar en tiempo real los espectrogramas y contabilizar automáticamente los eventos detectados, clasificando su duración, intensidad relativa y frecuencia.

El uso de este tipo de software ofrece varias ventajas:

- Eliminación de sesgos humanos: el conteo manual es subjetivo y limitado en tiempo.
- Escalabilidad temporal: permite registrar ecos de manera continua (24/7) y construir bases de datos a largo plazo.
- Comparación internacional: los datos obtenidos se pueden integrar en redes colaborativas como RMOB Europe, que agrupan observaciones de distintas estaciones para análisis globales.
- Detección estadística: genera histogramas de duración, tasas horarias y distribuciones de intensidad, lo que facilita comparar con las predicciones de lluvias de meteoros.

En resumen, la implementación de conteo automático convertiría la estación en una plataforma de monitorización permanente capaz de aportar datos de interés tanto en el ámbito amateur como en proyectos científicos colaborativos.