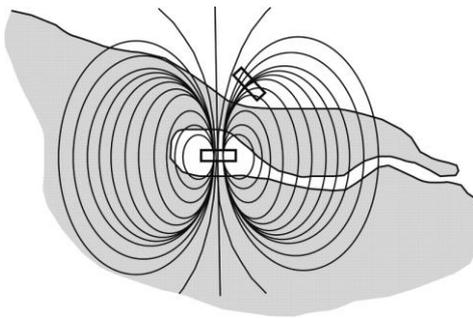


## USO DE LA RADIOLOCALIZACIÓN EN LA EXPLORACIÓN DEL SISTEMA GEC-40 (BOCA AC-18)

### 1- INTRODUCCIÓN.

La radiolocalización es el proceso de localizar un punto emisor mediante el uso de ondas de radio. Dentro de esta técnica se encuentra la radiogoniometría que consiste en la localización del punto emisor de ondas de radio mediante el uso de receptores adecuados, que nos permiten determinar el ángulo de procedencia de la señal y su intensidad. La radiogoniometría ha sido muy utilizada para la determinación de emisoras de radio con fines militares e incluso a nivel de aficionado (caza del zorro). La gama de frecuencias utilizadas en emisoras al aire libre abarca desde unos cientos de Hercios (Hz) hasta el rango de los GigaHercios (GHz).



La radiolocalización (o radiogoniometría) dentro del contexto espeleológico, es el procedimiento usado para la determinación de la posición y profundidad de un emisor de radio situado en el interior de la cavidad mediante medidas en la superficie con un receptor

adecuado. Esto permite entre otras cosas:

- La corrección de datos topográficos.
- La búsqueda de aportes y surgencias.
- La búsqueda de nuevas bocas de acceso a la cavidad.
- En general la proyección de cualquier punto del interior de la cavidad en la superficie exterior y el conocimiento de la profundidad a que se encuentra.

Esta técnica se empezó a usar a mediados de los 50 cuando el uso de los primeros sistemas transistorizados permitió la obtención de emisores de un tamaño razonable para su uso en minas y cavidades. Debido a que las ondas de radio tienen dificultad para atravesar materiales diferentes al vacío (o el aire), se ven fuertemente atenuadas por la roca caliza (o cualquier otro tipo de roca) presente en las cuevas. Afortunadamente esta atenuación es menor conforme se baja la frecuencia del emisor, por lo que tradicionalmente se utilizan las bajas frecuencias (very low frequency, VLF) en el rango de unos pocos Hz o KiloHercios (KHz).

## 2-NUESTRO EQUIPO DE RADIOLOCALIZACION. (NOTA-1)

Nuestro grupo de espeleología, lleva varios años utilizando un sistema de radiolocalización basado inicialmente en un diseño de Brian Pease (ver nota-2 al final del artículo). Posee un emisor relativamente simple, pero el receptor es de una gran complejidad).

Dicho sistema inicial permitía radiolocalizaciones a unos 200 metros de profundidad máxima. Ha sido mejorado a lo largo de los años introduciendo modificaciones y mejoras que permiten radiolocalizaciones que pueden alcanzar 400 metros o incluso más de profundidad.

Entre las mejoras cabe destacar:

**-1.** Uso y diseño de **dos bobinas emisoras** diferentes adaptadas a las necesidades y características de la cavidad, especialmente la profundidad y dificultad de acceso:

### **Bobina-1**

Esta bobina se diseñó para trabajar a grandes profundidades. La bobina emite continuamente un potentísimo campo magnético sinusoidal (entre 4 y 6 Vatios) exactamente a 3496 Hz, capaz de destruir en segundos cualquier sistema de almacenamiento magnético de memoria que este en sus proximidades (tarjetas de banco, teléfonos móviles, ciertos relojes...), pero bastante inofensivo para el cuerpo humano. La bobina emisora, que en realidad es un circuito “tanque” LC en paralelo, esta sintonizada mediante el uso de los condensadores adecuados (C) sobre el valor real de la inductancia de la bobina (L), exactamente a 3496 Hz.

Nuestra bobina, de diseño propio, esta construida sobre un robusto bastidor de madera resistente a la humedad y es de sección rectangular de 56 x 40 cm para facilitar

el paso en zonas estrechas. Posee tres patas de plástico regulables en altura y desmontables y dos niveles de burbuja perpendiculares entre si que facilitan la nivelación horizontal (Foto-1). La nivelación



Foto-1. Bobina-1 emisora

es fundamental para la precisión del sistema.

Sus características son: Bobinado de cobre con hilo esmaltado de 2,5 mm de diámetro, 19 vueltas con toma intermedia en la 3ª. Inductancia del bobinado de 498 microHenrios ( $\mu\text{H}$ ). Condensadores de sintonía de unos 4,2 microFaradios ( $\mu\text{F}$ ). Ancho de banda 113 Hz. Consumo de 0,53 A. Los condensadores tienen que ser de polipropileno (MKP) o en el peor de los casos de poliéster (MKT) para evitar pérdidas de eficacia y excesivo desajuste de sintonía con las variaciones de temperatura (ver nota-2 al final del artículo). Para el ajuste de la sintonía del circuito “tanque” LC a 3496 Hz se mide inicialmente la inductancia de solo la bobina, se calcula el valor de la capacidad de los condensadores necesarios, se instalan estos con un valor ligeramente inferior al calculado y se va añadiendo poco a poco mayor capacidad hasta conseguir el ajuste correcto. Para ello es de gran ayuda el uso de un generador de funciones y un osciloscopio. La bobina y condensadores de acoplo forman un conjunto robusto y el resto de la electrónica van en una pequeña caja estanca alimentada por una batería externa de plomo estanca (SLA) de 12 Voltios (V) y de 2 a 7 Amperios (A).

Ha sido utilizada con éxito en los trabajos de exploración y alzamiento topográfico del sistema de la cueva de Los Chorros en Riopar (Albacete) y más recientemente en el ajuste topográfico del sistema GEC 40. De hecho nos ayudó en la ubicación de la segunda boca de dicho sistema (AC-13)

### **Bobina-2**



Foto-2. Bobina-2 emisora miniatura

Durante el año 2017 y durante los trabajos en el sistema GEC 40 (AC-12, AC-13) nos encontramos con una parte nueva de la cavidad. Esta finalizaba en una diaclasa ascendente de más de 50 metros. Los datos topográficos y los indicios encontrados (raíces, tierra similar a la del exterior...) apuntaban a

una posible boca muy cerca del techo de dicha diaclasa. Esta boca se buscó por el

exterior, de hecho se encontró una boca parcialmente obstruida en la proximidad del punto indicado por la topografía (AC-14 que luego se verifico que estaba a 5.4 metros desplazada). Tras desobstruir esta boca durante varias jornadas, se decidió que la única posibilidad de saber exactamente donde estaba situada la posible nueva boca y a que profundidad se encontraba el techo de la diaclasa, era el mediante el uso del radiolocalizador.

Sin embargo la bobina inicial presenta unos cuantos problemas:



Foto-3. Comparación Bobina-1 y Bobina-2

-Es demasiado voluminosa para los pasos de cierta dificultad (muy estrechos) que se encuentran en esta parte del sistema.

-La nivelación horizontal es imposible si no se dispone de una base para este propósito. La idea era situarla en el techo de la diaclasa ascendente.

-La señal de esta bobina es

excesiva y satura el sistema a no ser que se esté a más de 15-20 metros. Las previsiones según la topografía eran apenas 2-7 metros de paquete calizo hasta superficie.



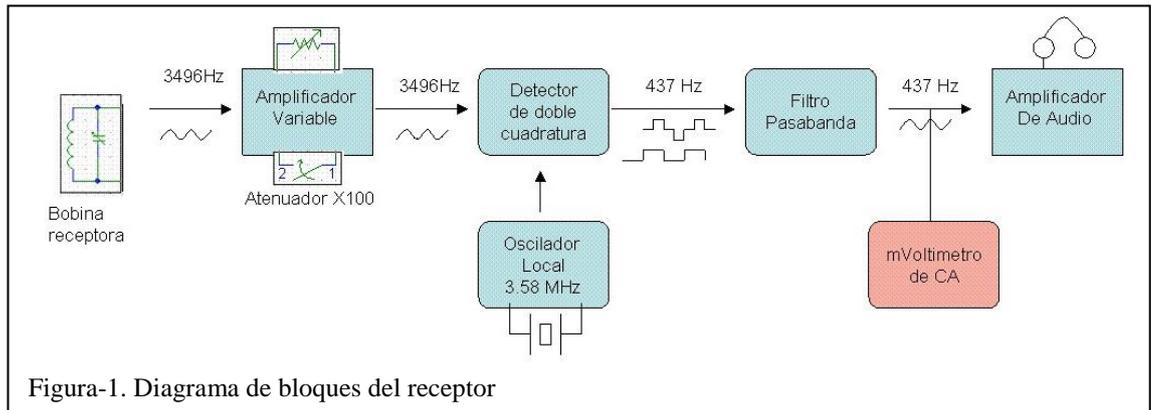
Foto-4. Bobina-2 miniatura montada con electrónica y baterías

Como consecuencia de todo lo anterior se diseñó y construyó una bobina mucho más compacta y manejable (Foto-2 y 3). La bobina, baterías (Ión-litio a 16 voltios) y la parte electrónica (la misma que ya disponíamos) van en un módulo cilíndrico compacto de PVC de 20x9 cm y pesa unos 700 gramos (Foto-

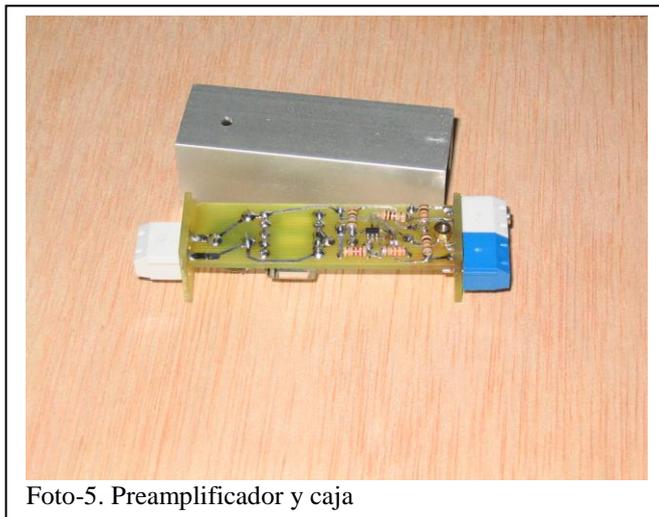
4). Es autonivelante ya que va colgada. Es similar en funcionamiento y ajustes a la bobina inicial, pero posee una potencia del orden de 150 veces inferior. Sus

características son: Bobinado de cobre con hilo esmaltado de 0,5 mm de diámetro, 74 vueltas sin toma intermedia (no se utiliza amplificador clase E). Inductancia del bobinado de unos 540 microHenrios ( $\mu\text{H}$ ). Condensadores de sintonía de 4 microFaradios ( $\mu\text{F}$ ) de polipropileno (MKP). Consumo unos 800 mA.

## -2. Preamplificador de bobina receptora



Ni el diseño inicial nuestro ni el diseño de Brian Pease estaban dotados de este preamplificador (Figura-1). Su incorporación constituye una importantísima mejora del sistema.



adornado a la bobina receptora.

Este consta de un único amplificador operacional miniatura de ultra-bajo ruido con una ganancia de 16. El preamplificador y los condensadores de sintonía de bobina, se alojan en un encapsulado de aluminio alimentado por tres pilas en serie tipo AAA (Foto-5). El conjunto va

### **-3. Cambios en el amplificador variable del receptor**

Al incorporar el preamplificador de bobina la ganancia de la última etapa amplificadora fue reducida.

Como consecuencia de la construcción de la bobina-2 miniatura antes mencionada, esta última etapa amplificadora fue de nuevo modificada. De hecho fue sustituida por un filtro analógico pasa banda centrado a 3496 Hz, con un ancho de banda de unos 30 Hz y una ganancia de 5. De esta forma se reduce notablemente la señal ruido que le llega al posterior detector de cuadratura.

### **-4. Modificaciones realizadas en el detector de doble cuadratura y etapas posteriores.**

Algunos de los cambios más importantes que se han ido realizando han sido:

- Los filtros pasa bajos de 32 Hz y 1 Hz se modificaron a 1 Hz y 0,5 Hz. Hay que hacer notar que con los filtros de 1 Hz y los de 0,5 Hz se consigue una mayor selectividad discriminándose señales interferentes que difieren en apenas 0,2 Hz de la señal del emisor. En este caso el tiempo necesario para que la señal coseno se estabilice aumenta hasta unos 10 segundos.

- El problema de la señales de la primera etapa del sistema de cuadratura que varían lentamente con el tiempo, se solucionaron con el acoplamiento en fase entre el emisor y el receptor. El bucle de acoplamiento de fase (Phase-Locked Loop, PLL) utilizado, impide la deriva de la señal seno y coseno de salida del primer detector de fase modificando ligeramente la frecuencia del receptor para acoplarla de manera exacta a la del emisor. De esta forma la señal seno permanece prácticamente a cero mientras que la señal coseno es máxima. Esta última es llevada a un mVoltímetro de corriente continua para su lectura (mucho más asequible que uno de corriente alterna). Este voltímetro incorpora filtros adicionales de 0,03 Hz que aumentan considerablemente la selectividad del sistema frente a señales de otras frecuencias. Con esta mejora la electrónica desde el segundo detector de fase hasta los auriculares ya no es necesaria, ya que la señal utilizada se toma de la salida coseno del primer detector de fase en el diseño modificado, y puede ser eliminada. Esta modificación es tan importante como la incorporación anteriormente mencionada del preamplificador de bobina.

-Un indicador de sobrecarga que consta de una puerta exclusiva OR (XOR) que activa un diodo LED rojo cuando se produce saturación del amplificador como consecuencia del ruido atmosférico, interferencias de otras fuentes emisoras o exceso de señal procedente del emisor. En este caso se debe bajar la ganancia del amplificador.

-Junto con la incorporación del amplificador PLL se añadió un indicador de bloqueo de fase y alarma que mediante una señal sonora y una indicación visual te avisa de la detección de la señal correcta. Esto permite una mayor tranquilidad durante las esperas de la recepción de señal, al no ser necesario estar continuamente observando el indicador de señal. Este indicador compara las señales seno y coseno de manera continua y se dispara en el momento en que detecta una señal superior a unos mVoltios. Posee un ciclo de histéresis de algunos segundos para evitar continuas falsas alarmas.

Con todas estas modificaciones el diseño de bloques del receptor modificado está representado en la figura-2 y figura-3.

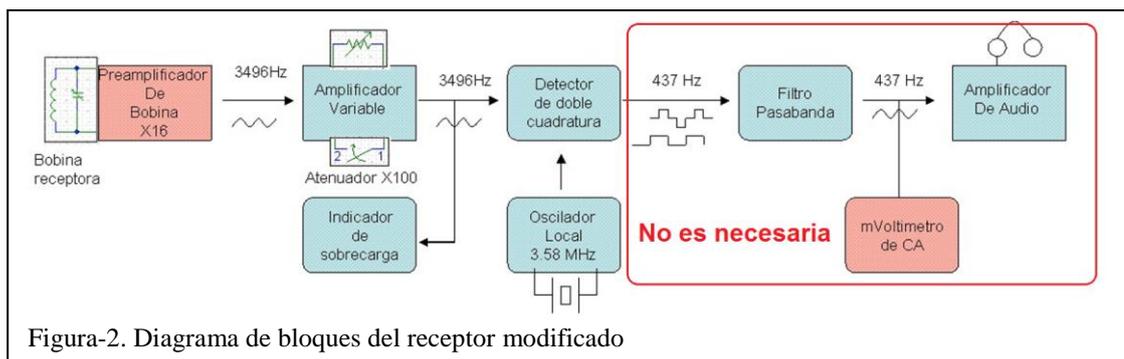


Figura-2. Diagrama de bloques del receptor modificado

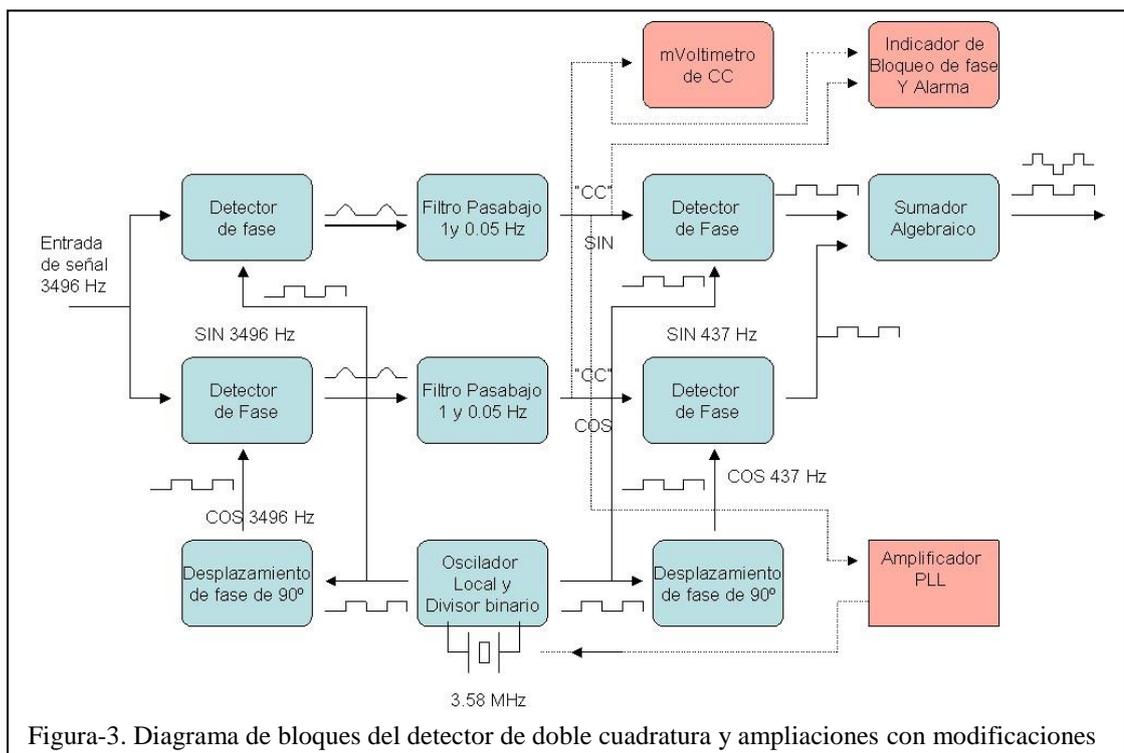


Figura-3. Diagrama de bloques del detector de doble cuadratura y ampliaciones con modificaciones

### 3- MEDICIONES SOBRE EL TERRENO. (NOTA-1)

Es necesario realizar dos equipos:

-El primero constituido por un mínimo de dos personas, se encarga de entrar en la cavidad con la bobina emisora y su correspondiente electrónica. Su misión es colocar el emisor en los puntos elegidos y aproximadamente a la hora establecida.

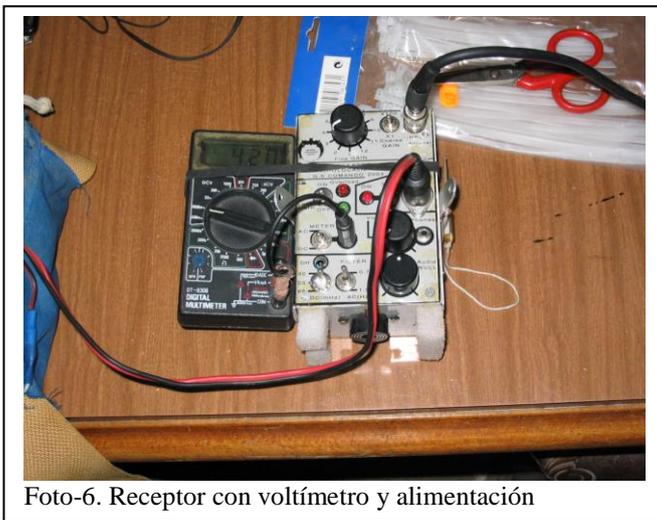


Foto-6. Receptor con voltímetro y alimentación

-El segundo de los equipos trabaja en superficie. El equipo de superficie tiene dos misiones fundamentales: determinar el punto cero (ground zero) en superficie, punto situado justo en la vertical del emisor y determinar la profundidad del emisor. Debe estar constituido idealmente por tres personas. Una de ellas se encarga exclusivamente del manejo de la electrónica de

recepción, que es la parte más compleja. También maneja o ayuda en el manejo de la bobina receptora. Una segunda persona toma todas las anotaciones que le indica el primero y las de GPS y topográficas que realizan el mismo y el tercero de los componentes. El tercero maneja esencialmente la bobina receptora durante las medidas de localización del punto cero (ground zero) y de profundidad y ayuda en los datos topográficos del terreno. Es aconsejable en terrenos con mucha vegetación llevar alguna herramienta para clarear la zona.

#### 3.1- Determinación del punto cero

Con ayuda del GPS o los planos localiza el equipo las proximidades del supuesto punto cero y se sitúa, si es posible, en una zona resguardada a algunas decenas de metros. Conecta el equipo y realiza el ajuste del cero de señal con la bobina desconectada, y tras conectar la bobina sitúa esta tumbada en el suelo. Espera a que la

señal de alarma de detección de señal comience a zumbar, indicación de que ya ha sido conectado el emisor. A partir de este momento y durante 30 a 60 minutos que cuesta realizar el total de las medidas se ha acabado la tranquilidad.

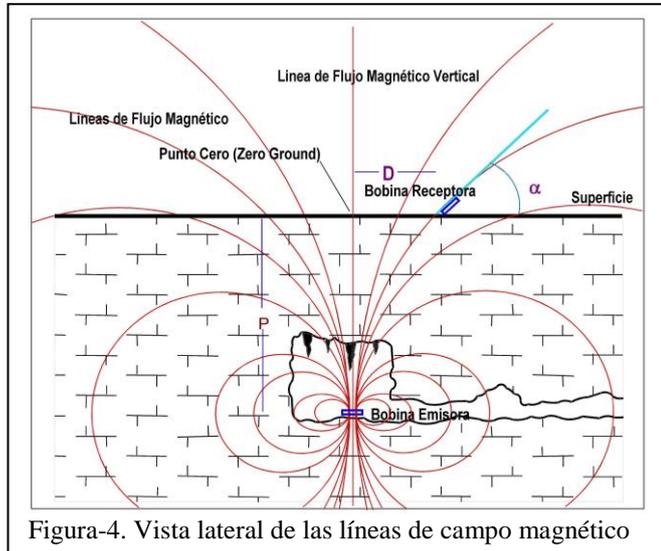


Figura-4. Vista lateral de las líneas de campo magnético

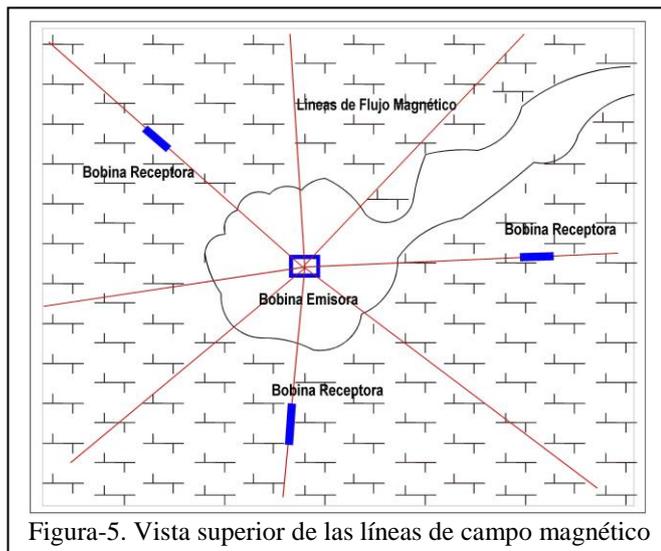


Figura-5. Vista superior de las líneas de campo magnético

Se procede ahora a la localización precisa del punto cero aprovechando el hecho de en dicho punto las líneas de campo magnético salen en posición vertical lo que produce una señal mínima (un nulo) sobre la bobina situada verticalmente (ver Figura-4 y 5).

Medidas realizadas por nosotros a unos 90 metros de profundidad en la cueva de Los Chorros sitúan el punto cero en un cuadrado de solo 10 cm. de lado. Incluso a profundidades de 200 metros y no siendo muy meticulosos en el ajuste del punto cero el cuadrado nunca ha superado el metro de lado.

Todo el proceso se puede llevar a cabo en menos de 15

minutos, siempre que el terreno lo permita y la situación original no este muy alejada del punto cero.

### 3.2- Determinación de la profundidad

Para la determinación de la profundidad se pueden utilizar diferentes métodos entre los que destacan: Intensidad absoluta del campo magnético, Radiométrico, por Angulo de campo magnético y por búsqueda del nulo horizontal.

En este caso comentamos brevemente los dos métodos utilizados en el sistema GEC-40 para la localización de la boca AC-18 (nota-1).

### 3.2.1- Radiométrico o de gradiente de campo

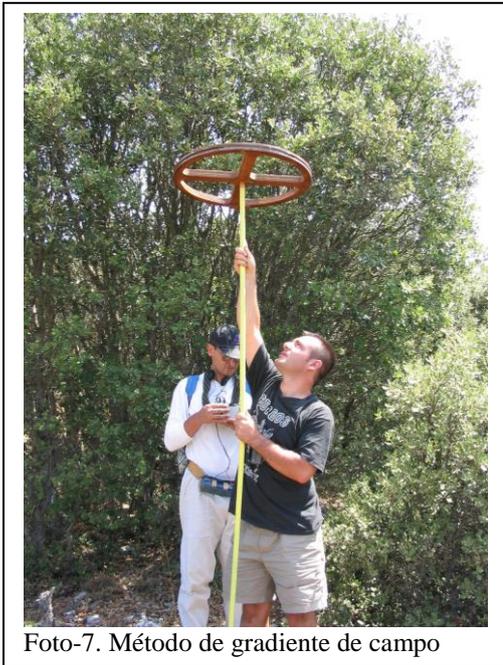


Foto-7. Método de gradiente de campo

Consiste en la medida de la señal en el punto cero y también a una distancia conocida por encima de este, siempre con la bobina receptora horizontal (Foto-7). Para ello se debe mantener durante la segunda medida la bobina en posición horizontal y a unos cuantos metros por encima del punto cero con ayuda de algún alargador. Esto resulta complicado y solo útil con profundidades reducidas en donde la distancia a elevar la bobina sea corta.

### 3.2.2- Angulo de campo magnético

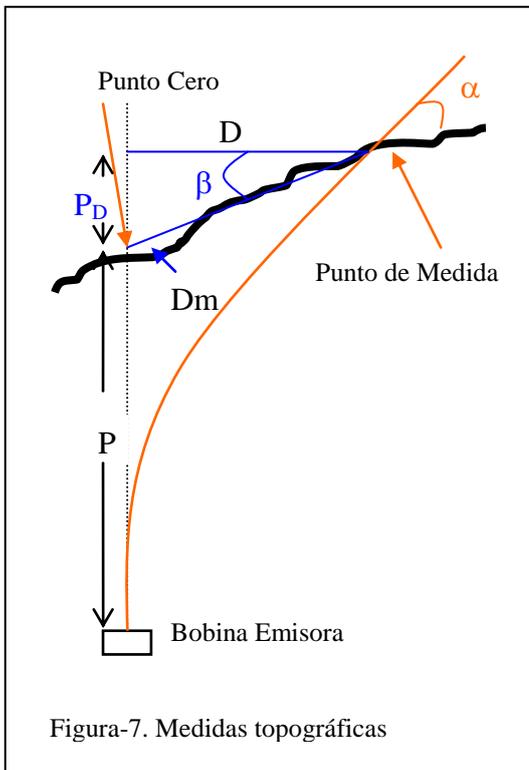


Figura-7. Medidas topográficas

Es el método más empleado por nosotros. Se basa en la medida del ángulo de salida  $\alpha$  de las líneas del campo magnético a una determinada distancia  $D$  del punto cero (Figura-4). Requiere algo más de tiempo que el método anterior ya que exige un desplazamiento por el terreno, cosa que según la orografía puede resultar complicado o al menos molesto. Además precisa de medidas y cálculos topográficos adicionales (figura-7).

#### **4- ERRORES DURANTE LA RADIOLOCALIZACIÓN. (NOTA-1)**

Básicamente podemos dividirlos en dos tipos de errores, los debidos al propio radiolocalizador: errores de emisión y errores de recepción y los debidos a la geología del terreno: presencia de rocas magnéticas, anisotropía del terreno, conductividad eléctrica de las rocas y zona de transición.

##### **-Errores de emisión**

Prácticamente el único error es debido a la incorrecta nivelación horizontal de la bobina emisora. Con una desviación de 1° de la horizontal se produce un error de localización del punto cero de 0,5 metros a una profundidad de 90 metros y afecta también en mayor o menor cuantía a la determinación de la profundidad por cualquiera de los métodos antes mencionados.

##### **-Errores de recepción**

Si la electrónica está correctamente construida y con los componentes adecuados se puede considerar nula su influencia en los errores.

La mala construcción de la bobina receptora y sus niveles de burbuja correspondientes si puede contribuir a producir los errores. En la técnica de medida de profundidad mediante el ángulo de salida de las líneas de campo magnético, el error cometido con una variación de 1° oscila entre 2 a 4% con ángulos de salida de 20° a 65° respectivamente. Es un error fácil de cometer, a esto hay que añadir los posibles errores de topografía en terreno inclinado.

Los errores debidos a la geología del terreno no podemos evitarlos y como resumen comentar que:

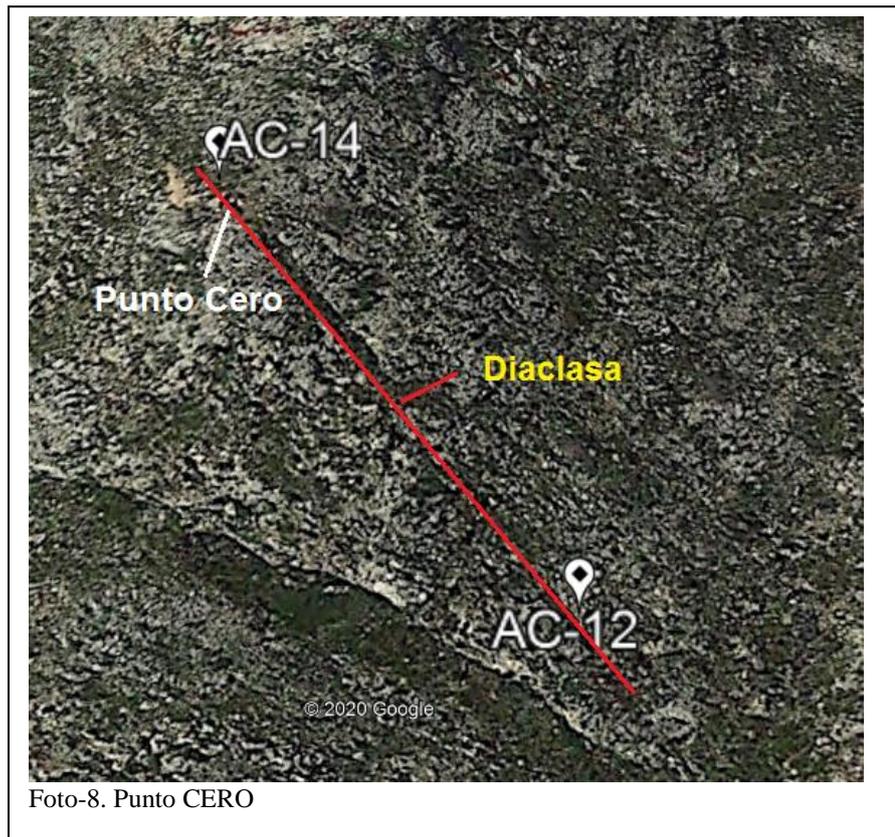
La localización del punto cero (punto situado justo en la vertical del emisor) puede ser realizada con mucha precisión (de unos centímetros) ya que no se ve afectada los errores debidos a la geología del terreno, salvo la presencia de rocas magnéticas o ferromagnéticas.

La precisión en la profundidad sí que es afectada por la geología del terreno. Normalmente el error cometido hasta profundidades de unos 60 metros es muy bajo, del orden de 1 a 2 metros. Pero conforme aumentamos la profundidad el error aumenta

considerablemente. Por ejemplo a unos 200 metros de profundidad el error puede ser de un 15%.

Conociendo la conductividad del terreno se puede corregir parcialmente algunos de los errores y mejorar la precisión en la medida de la profundidad, pero se requieren cálculos más complejos.

## 5- MEDIDAS REALIZADAS EN LA LOCALIZACIÓN DE LA AC-18



En este caso se situó la bobina-2 anclada en la parte superior de la diaclasa ascendente E-52 (ver topografía del sistema).

El punto cero se determinó en el lateral de la diaclasa que va de la ac-12 a la ac-14 (foto-8) y

a unos 5.4 metros de distancia de la ac-14.

Se realizaron tres mediciones de profundidad:-Una con el método de gradiente de campo y dos con el método de ángulo magnético.

Los resultados de profundidad después de los ajustes topográficos realizados en las dos medidas por ángulo magnético resultaron ser de:

- |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| 1- Gradiente de campo | 4.87 metros (foto-9)  |
| 2- Ángulo magnético-1 | 4.47 metros (foto-10) |
| 3- Ángulo magnético-2 | 4.53 metros (foto-10) |

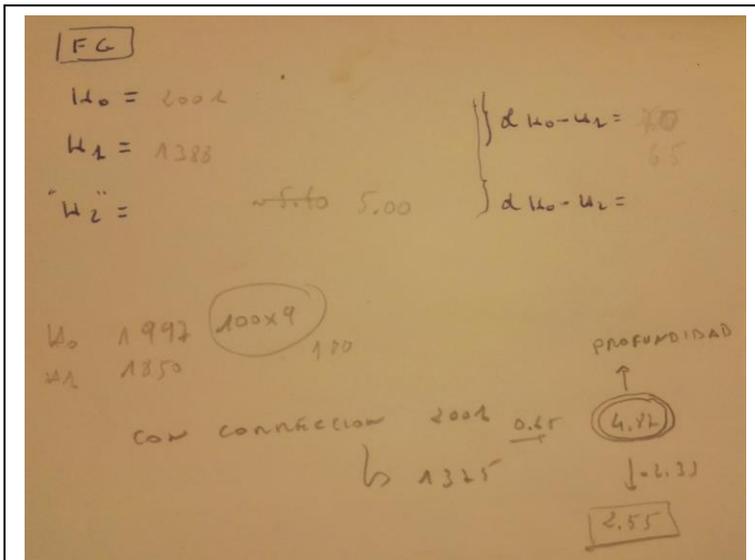


Foto-9. Notas sobre el terreno de las medidas usando el gradiente de campo

Como se observa apenas unos centímetros de error entre las diferentes medidas. Esto era de esperar ya que los errores debidos a la geología del terreno deben de ser bastante reducidos, al ser poca la profundidad medida.

Tras despejar el acceso de la boca AC-18, se realizó

una medida de la profundidad a la que se situó la bobina-2 emisora. Los resultados fueron:

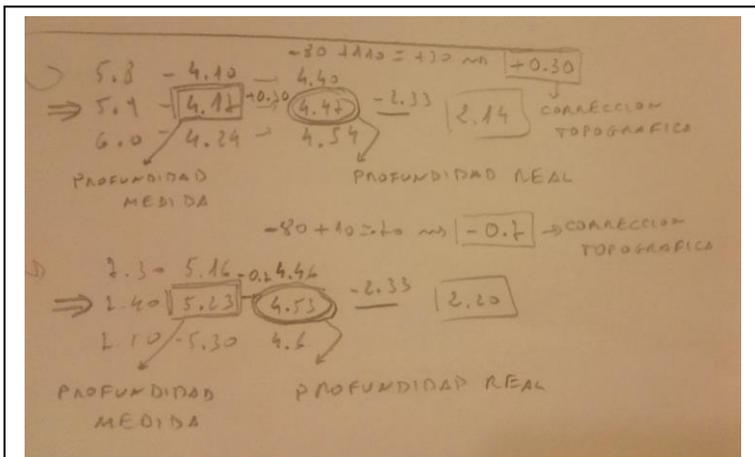


Foto-10. Notas sobre el terreno de las medidas usando el ángulo magnético

-Distancia del punto de anclaje superior de la boca al punto de anclaje del hilo de la bobina-2 +4.10 metros

-Distancia del punto de anclaje del hilo de la bobina-2 al punto de emisión real +0.3 metros.

-Diferencia de altura entre

el anclaje superior de la boca al punto de medida original en donde se situó el punto cero +0.1 metros.

En total  $4.10+0.3+0.1= 4.50$  metros.

Como se puede observar la medida de gradiente de campo dio ligeramente superior (+0.37 metros), pero la media de las dos medidas usando el ángulo magnético  $(4.47+4.53/2=4.50$  metros) dieron exactas.

## 6- NOTAS Y BIBLIOGRAFÍA

1) Para un estudio más exhaustivo y detallado ver nuestras memorias del año 2017.

2) <http://radiolocation.tripod.com/> y referencias citadas.

3) a) The D-Q Beacon Receiver. Brian Pease. Speleonic 21, vol VI nº 1 March 1997, pag 10.

b) Determining depth by radio-location: An extreme case. Brian Pease. BCRA/CREG Journal 27, March 1997.

c) Radiolocation using field gradient techniques. David Gibson. BCRA Cave Surveying Group, Compass Points 22, December 1998.