

PIB-M. FASE PRESENCIAL. 2022
TELEDETECCIÓN PRÁCTICA
RADARES

1.- INTRODUCCIÓN AL RADAR

Jesús Riesco Martín.
jriescom@aemet.es

ÍNDICE TEMÁTICO

- 1.- Concepto de radar y de radar meteorológico
- 2.- ¿Qué ve un radar meteorológico?
- 3.- Parámetros de los radares meteorológicos
- 4.- Tipos de radares meteorológicos
- 5.- Ecuación del radar. Reflectividad

1.- Concepto de radar y de radar meteorológico

¿Qué es un radar?

Radar: sistema electrónico que permite detectar objetos fuera del alcance de la vista y determinar la distancia a que se encuentran proyectando sobre ellos **ondas de radio**.

La palabra *RADAR* corresponde a las iniciales de "**Radio Detection and Ranging**", y fue utilizado por las fuerzas aliadas durante la II Guerra Mundial para designar diversos equipos de detección y para fijar posiciones.

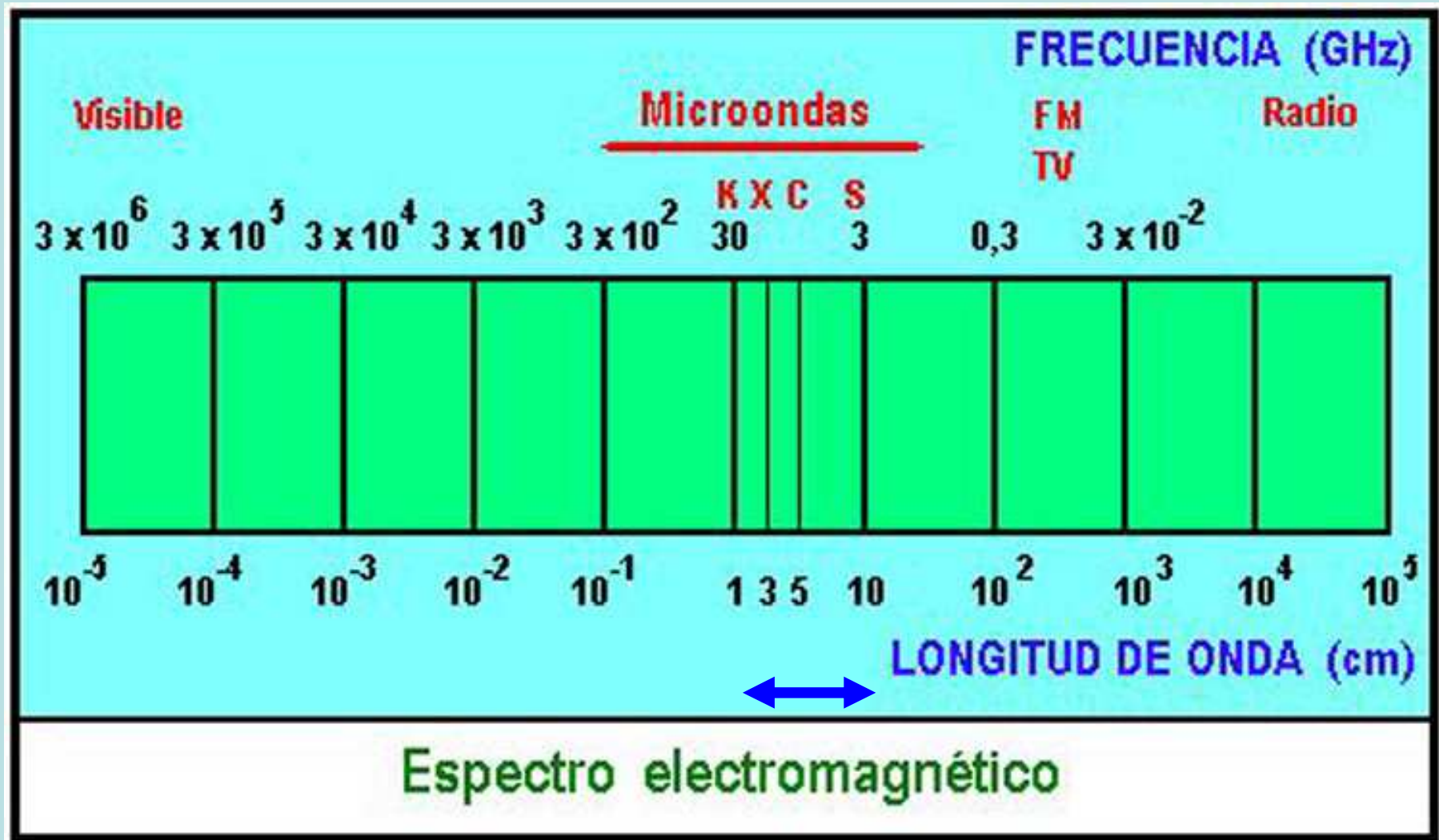
¿Cómo funciona un radar?

- ❑ Los radares “**emiten**” **pulsos de energía electromagnética** (microondas) y miden la energía devuelta por los blancos que encuentran.
- ❑ El **blanco puede ser** un avión, precipitación en una tormenta, bandadas de pájaros, etc.
- ❑ **Si el blanco se mueve** cuando le llega la energía, entonces la onda e.m. sufrirá un cambio en la longitud de onda (frecuencia), **Efecto Doppler**, tras el choque. Es así como podemos medir parcialmente la velocidad del blanco.



Aplicaciones del radar

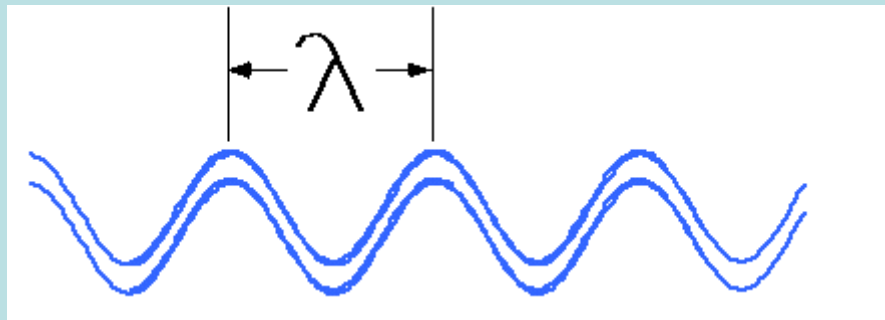
- Aparte de en la navegación marítima y aérea, el radar ha encontrado una aplicación casi universal en **meteorología y predicción del tiempo**. Así los equipos de radar proporcionan información acerca de la **intensidad de las precipitaciones**, y permiten alertar con antelación sobre posibles inundaciones.
- Un importante desarrollo "más reciente" es el uso del **LIDAR** para controlar la **contaminación atmosférica y otras partículas en suspensión**, pues a menudo se puede identificar otros tipos de sustancias químicas y medir su concentración. Otros son el SAR, SODAR, etc.
- La policía utiliza otro tipo de radar en el **control del tráfico**, para determinar la **velocidad de los vehículos y cuantificar la densidad del tráfico** en las principales calles.



- Las ondas se propagan aproximadamente en **línea recta** y a **velocidad constante en el vacío** ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$).
- La **longitud de onda** de la radiación radar es del orden de unos **cm**

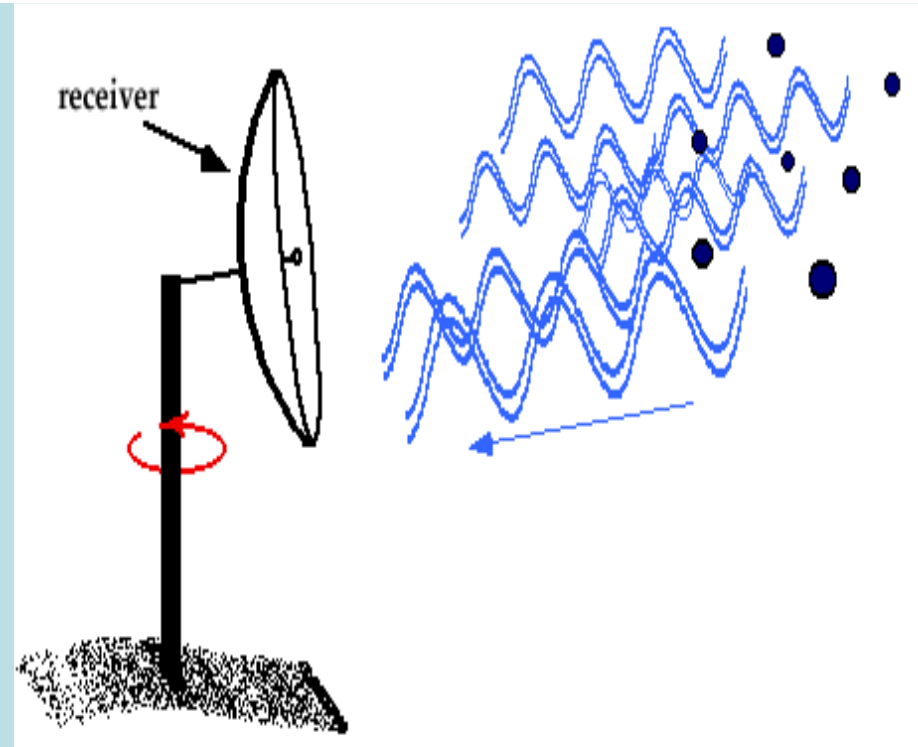
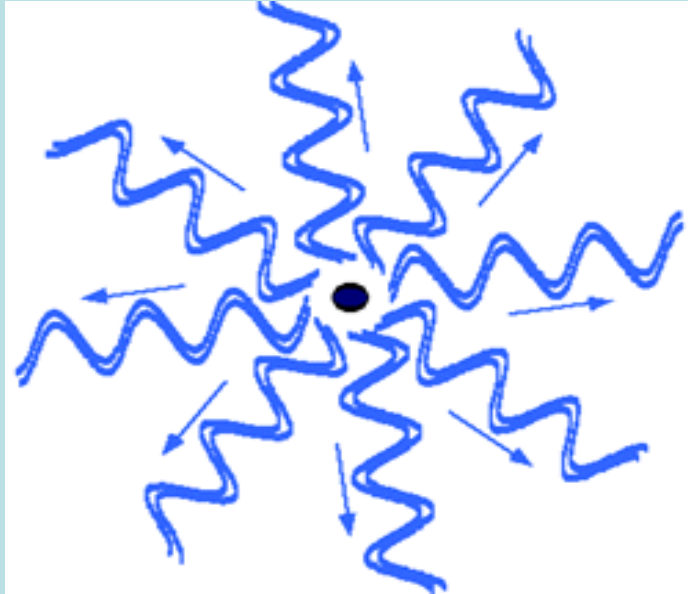
El radar meteorológico convencional emite a la atmósfera, a intervalos de tiempo iguales, potentes impulsos de energía electromagnética muy breves y de frecuencia muy elevada (normalmente operan con longitudes de onda centimétricas).

La energía está concentrada en un haz de pequeña abertura por una **antena directiva**. Los blancos presentes en el haz interceptan una parte de la energía incidente que absorben y difunden en diversas direcciones. La fracción reenviada hacia el radar es la señal útil y recibe el nombre de **eco**.



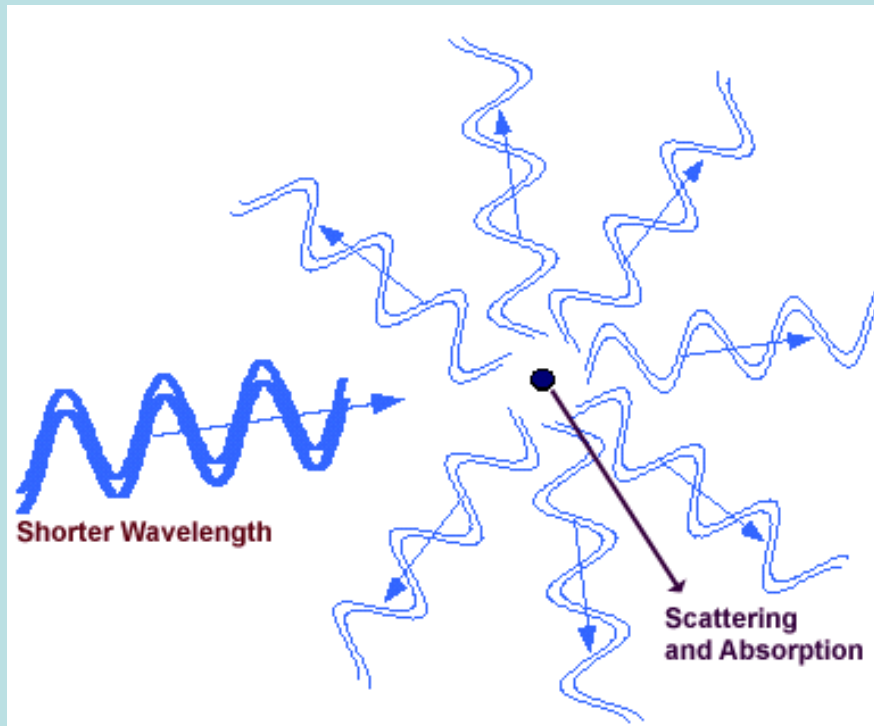
Cuando una onda electromagnética incide sobre un cuerpo inmóvil, parte de la energía del campo incidente es absorbida por el cuerpo y se transforma en calor mientras que otra parte es difundida en todas las direcciones en forma de un campo electromagnético con la misma longitud de onda que el incidente.

Los ecos meteorológicos están compuestos por señales de un gran número de partículas que se mueven unas respecto a las otras por lo que la energía devuelta fluctúa con el tiempo. Es por esto que la señal recibida se promedia para un intervalo de tiempo.

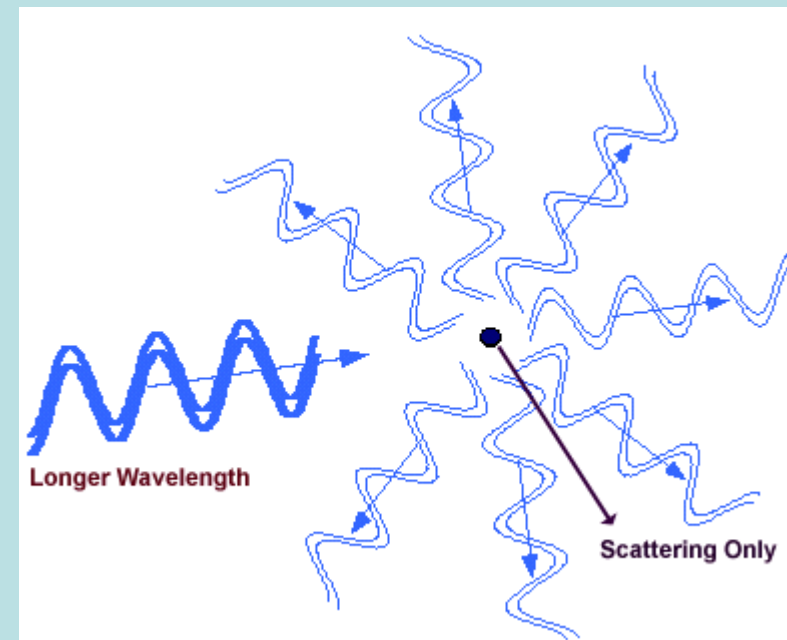


La difusión de la energía e.m. incidente, por parte del blanco se produce en todas las direcciones. Especial interés tiene la **señal devuelta hacia el radar**.

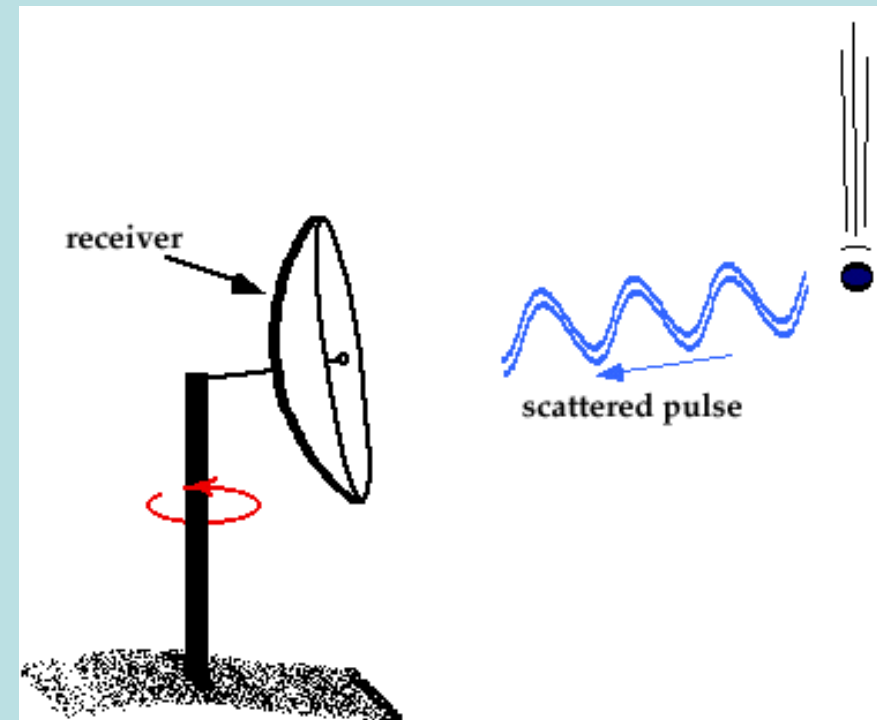
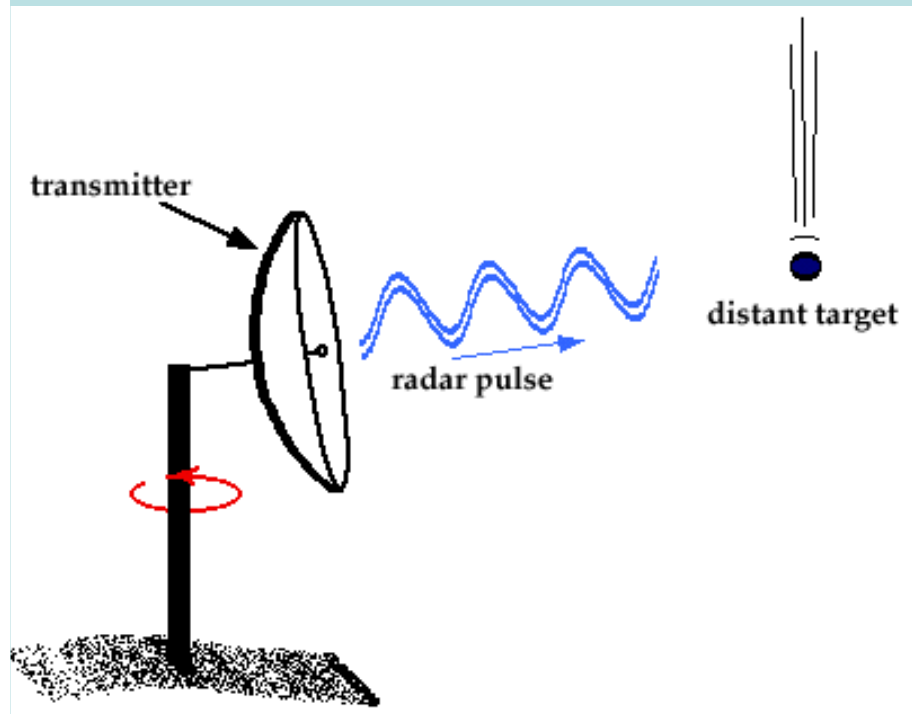
Esta señal es normalmente mucho más débil que la original enviada por el emisor (radar), y la llamamos "**señal devuelta**".



A mayor longitud de onda, menor absorción
(casi sólo dispersión de la onda incidente)



Emisión y Recepción de un pulso energético



La **orientación de la antena** (elevación y acimut) que determina la dirección del pulso y el **tiempo transcurrido** entre la emisión del pulso y la recepción de la señal, permite **localizar la región difusa**.

Componentes del Radar

Transmisor: Genera cortos impulsos de energía en la zona de radiofrecuencias del espectro electromagnético.

Antena: Es la encargada de focalizar la energía emitida en una haz lo más estrecho posible y a la vez interceptar la mayor parte de la energía devuelta por el blanco

Sistema Receptor: Es el encargado de amplificar, detectar y transformar la señal radioeléctrica recibida del blanco en una señal eléctrica para su posterior procesamiento

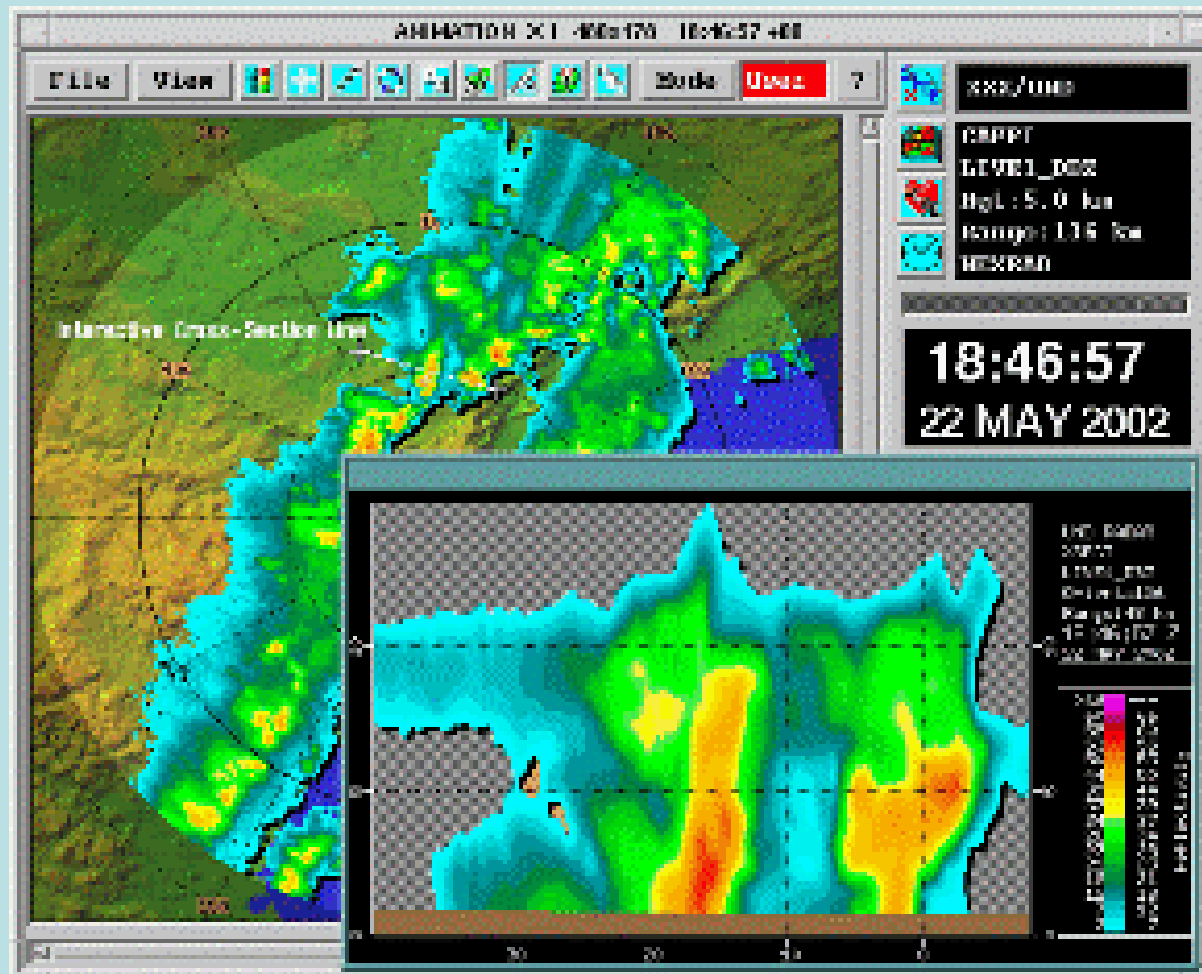
2.- ¿Qué ve un radar meteorológico?

SISTEMA TERRESTRE DE TELEDETECCIÓN ACTIVA (emiten radiación)

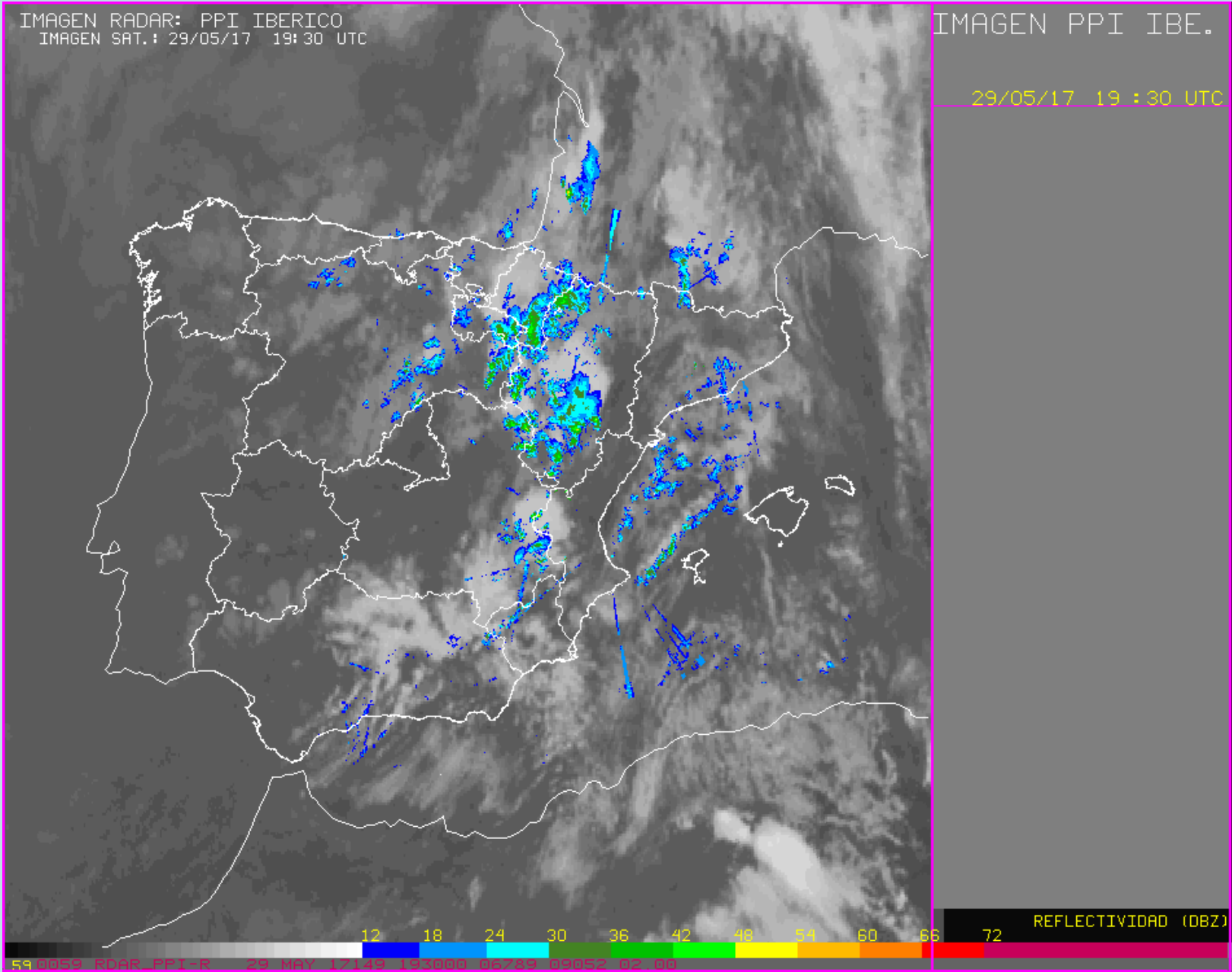
Radar meteorológico:

Detectar y seguir ecos meteorológicos:

- precipitación,
- viento radial y
- turbulencia



http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Data sheets/141216_vaisala_iris_vision_brochure-final-lores-pages.pdf



Muchas veces interesa combinar el radar con otras fuentes de información

¿Qué “ve” un radar meteorológico? (I)

- ▶ Un radar meteorológico detecta un volumen de partículas que hay en la nube tales como gotitas condensadas, gotas de lluvia, nieve, hielo y granizo.
- ▶ Si la longitud de onda del radar es grande comparada con el tamaño de esas partículas, la potencia reflejada será función del número y tamaño de las citadas partículas.



Gotas de lluvia

Tamaño de las gotas	Rango de Diámetros
Muy pequeñas	<0.85 mm
Pequeñas	0.85 a 1.4 mm
Medianas	1.7 a 3.2 mm
Grandes	3.6 a 5.1 mm
Muy grandes	>5.1 mm

¿Qué “ve” un radar meteorológico? (II)

- ✓ Así los radares nos ofrecen una perspectiva del **grado de concentración de “partículas precipitantes”** de las nubes, pero no pueden directamente informarnos del tamaño o tipo (lluvia, nieve, hielo o granizo).
- ✓ Sin embargo, décadas de investigación en meteorología radárica nos ha enseñado cómo interpretar las imágenes radar y **relacionar la potencia recibida** (también conocida como **reflectividad**) con la intensidad de precipitación, probabilidad de granizo, etc.

3.- Parámetros de los radares

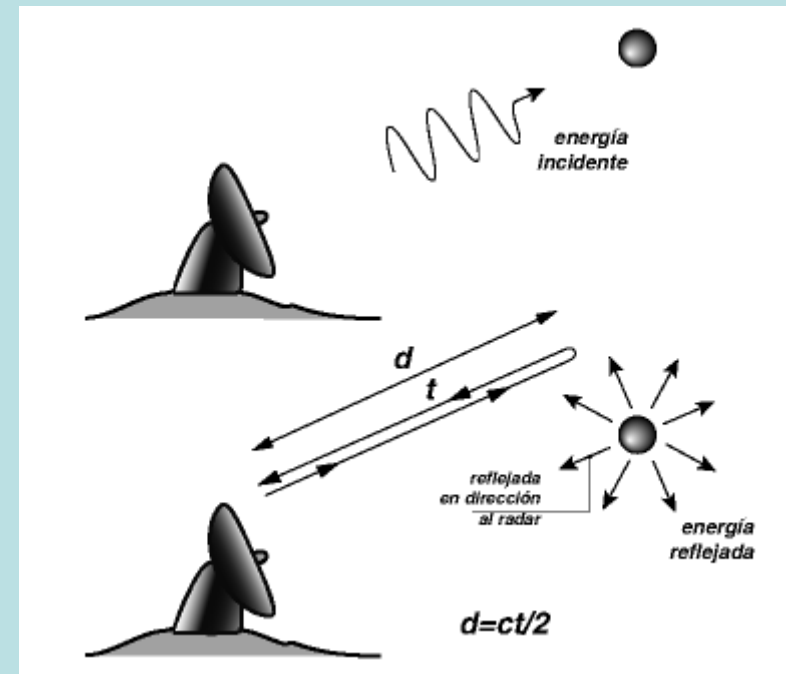
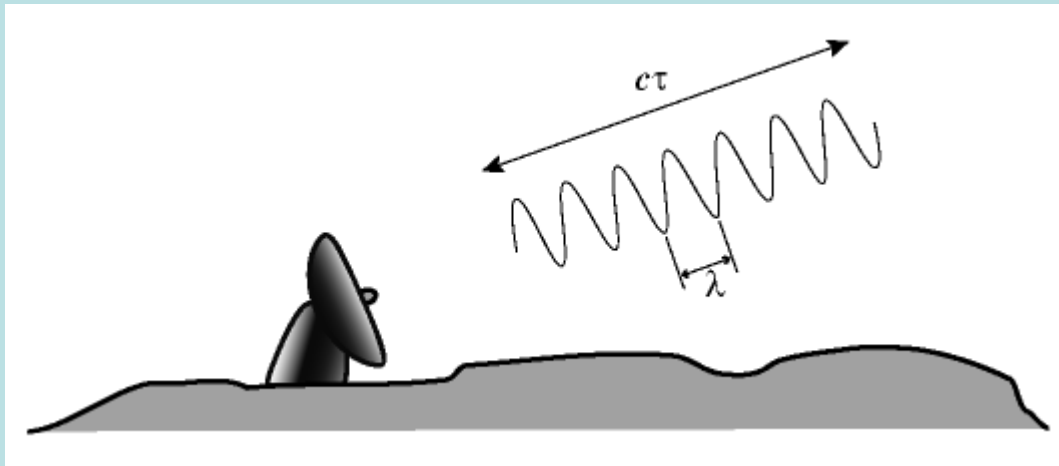
El transmisor genera pequeños impulsos de energía, concentrados en un fino haz.

Los radares utilizan una única antena para emitir y recibir energía devuelta por los ecos.

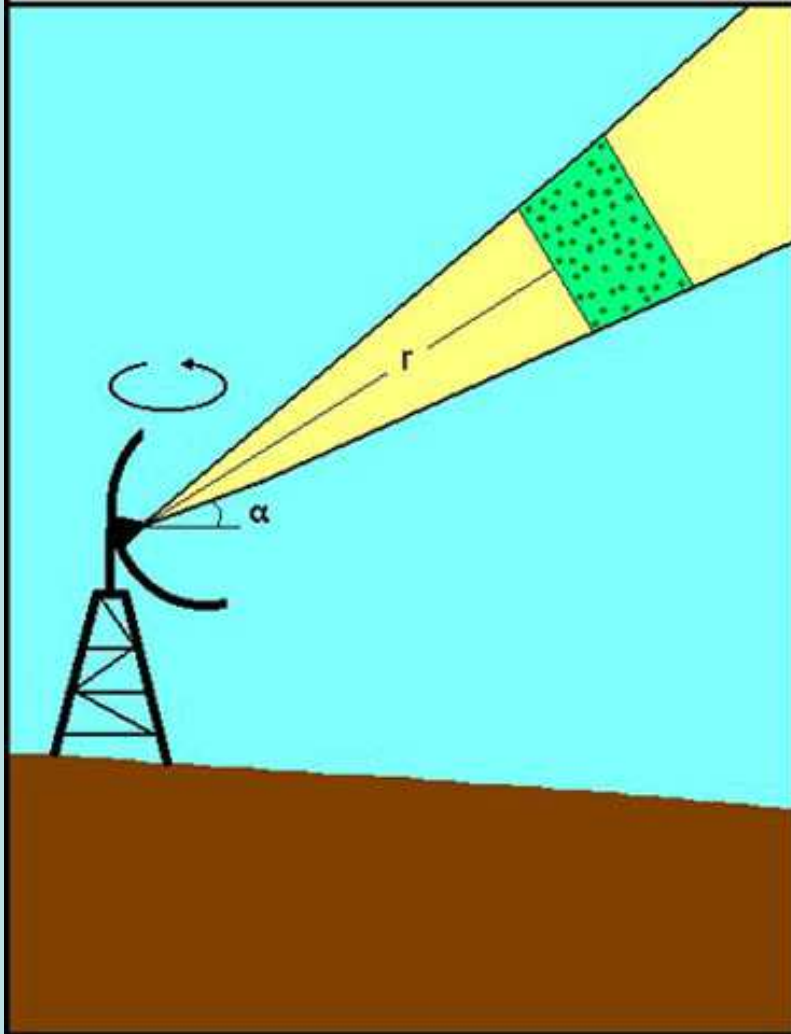
Mediante un interruptor automático se desconecta el receptor durante el cortísimo intervalo de tiempo en que se emite el pulso.

Una vez terminada la transmisión, el interruptor activa automáticamente el receptor, haciendo así que el radar se ponga a la escucha.





RADAR METEOROLÓGICO



t = intervalo de tiempo entre la transmisión y la recepción

r = distancia radial del volumen sondeado

α = elevación de la antena

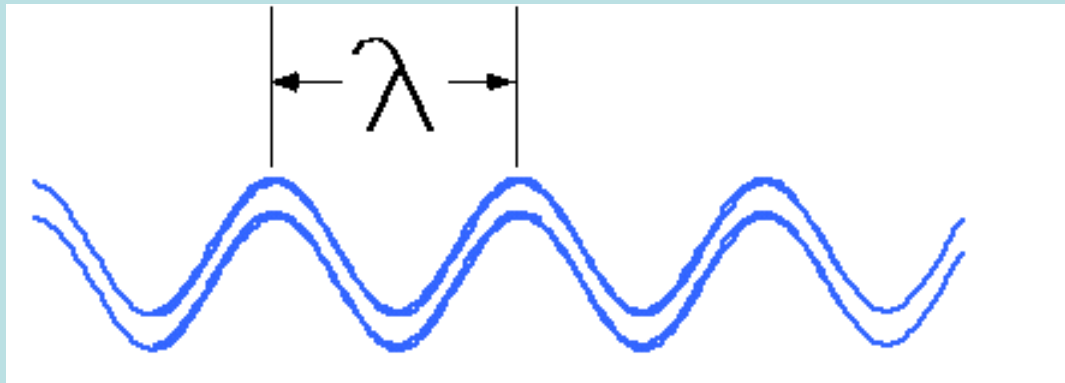
$$r = \frac{ct}{2}$$

La emisión de pulsos electromagnéticos en todas las direcciones permite realizar una **exploración en volumen**.

Longitud de onda (λ) y frecuencia (ν) de la señal

Radars AEMET \longrightarrow $\lambda = 5$ cm (banda C)

$$\lambda \cdot \nu = c$$



Frecuencia de repetición de pulsos (PRF)

Es el número de pulsos que se emiten por segundo.

Este valor determina la distancia máxima de operación del radar para que no exista ambigüedad en la medida de distancias. Cuando el radar no es coherente no se puede identificar a qué pulso corresponde un eco recibido. La distancia máxima viene determinada por el hecho de que los ecos de un pulso deben recibirse antes de emitir el siguiente pulso.

Para el AEMET en modo normal:

PRF = 250 Hz \longrightarrow 1 pulso cada 4 milisegundos

Luego, Distancia máxima = $D_M = \frac{1}{2} c (1/PRF) = 600 \text{ Km}$

Por ejemplo los radares del AEMET emiten un pulso de $2\mu\text{s}$ y se pasan escuchando $3998 \mu\text{s}$

Duración del pulso (τ)

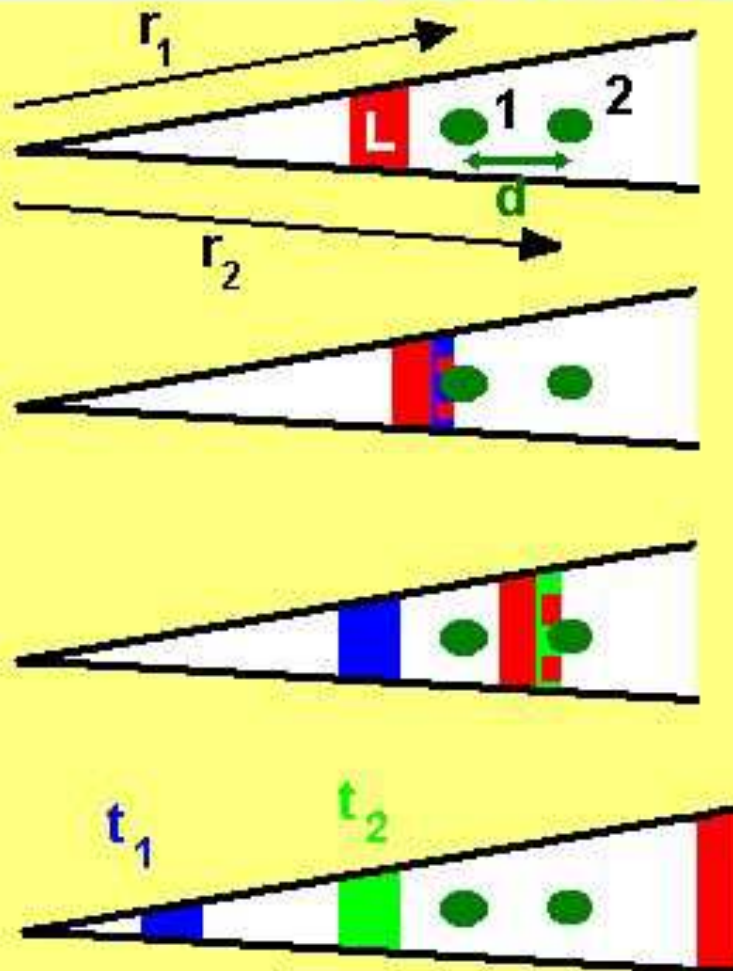
Es el tiempo durante el cual se emite la energía. Va a determinar la resolución radial del radar. Para los radares de AEMET este valor es:

$$\tau = 2 \mu\text{s} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

La resolución radial D se define como la capacidad de distinguir dos blancos situados en una misma dirección pero a diferentes distancias del radar

Si la distancia entre dos blancos es menor que la resolución radial, el eco devuelto será continuo y no dos ecos individuales separados por un período sin señal.

RESOLUCION RADIAL D



$$d = r_2 - r_1 = \frac{1}{2} c (t_2 - t_1)$$

$$L = c \cdot \tau = 600 \text{ m}$$

Para que ambos ecos sean resolubles

El eco del blanco más lejano debe llegar después del final del eco del blanco más cercano

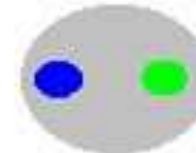
$$t_2 - t_1 > \tau$$

$$d > \frac{1}{2} L = D = 300 \text{ m}$$

$d \leq 300 \text{ m}$



$d > 300 \text{ m}$



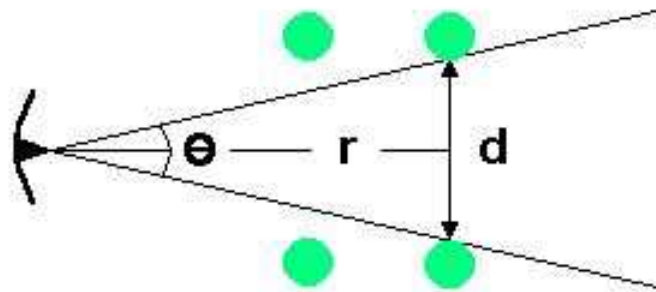
Resolución angular

Se define como la capacidad que tiene el radar para distinguir dos blancos situados a la misma distancia y elevación pero con distintos acimut.

Para distinguir estos dos blancos deben estar separados entre sí más que la abertura del haz

RESOLUCIÓN

ANGULAR (d)



$$d = 2 r \text{ sen } (\theta/2)$$

Para $\theta = 0,9^\circ$

r	d
100 Km	1.571 m

La resolución angular disminuye con la distancia.

Los núcleos de lluvia a grandes distancias aparecen formando sistemas extensos de precipitación. A medida que se acercan al radar, comienzan a identificarse como elementos individuales.

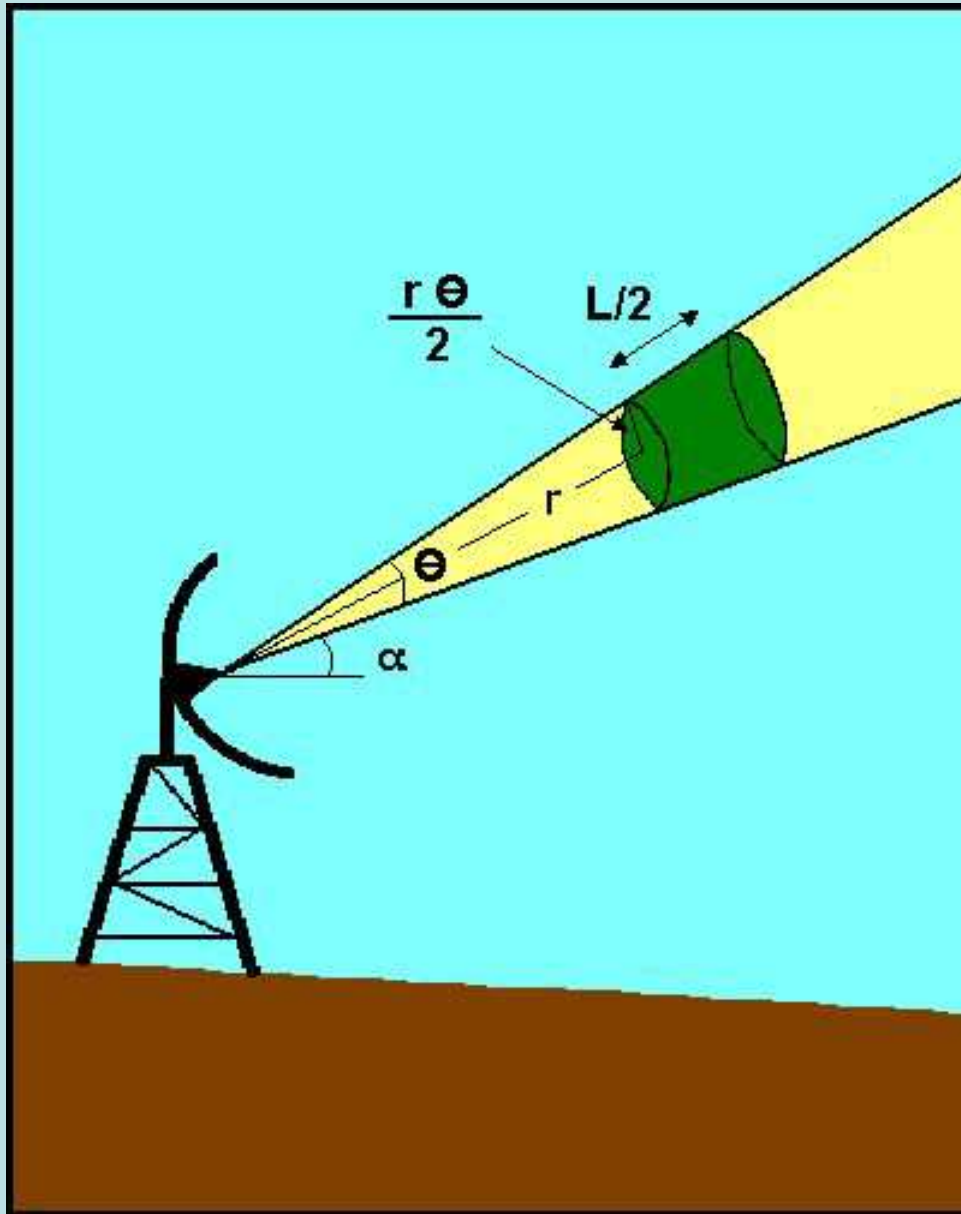
R



Volumen de resolución de un pulso

Es aquél del que provienen las señales recibidas por el radar en un mismo instante y sobre el que la suma determina la intensidad instantánea de la señal.

Este volumen tiene por sección la abertura del haz a la distancia r y un ancho igual a la semilongitud de un pulso



**Volumen de resolución
de un pulso**

$$V = \pi \left(\frac{r\theta}{2} \right)^2 \frac{L}{2}$$

100 Km	200 Km
0,6 Km ³	2,3 Km ³

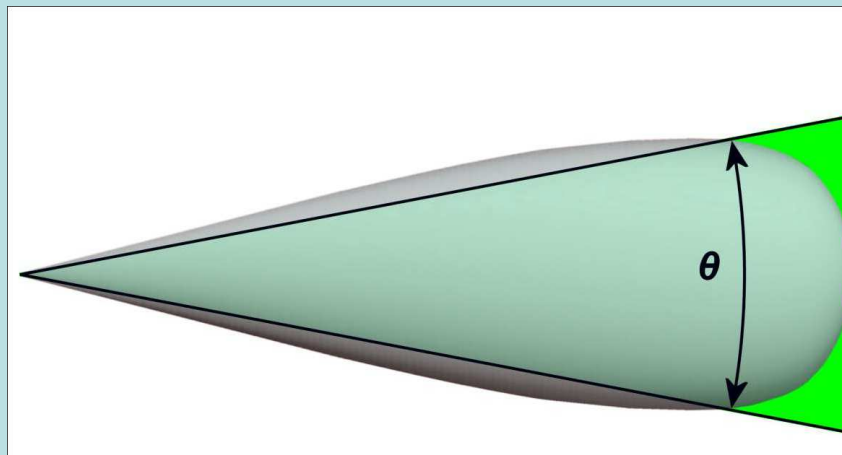
Anchura del haz

Se define por la fracción del lóbulo principal comprendido entre el eje de la antena y la dirección angular para la cual la energía es la mitad del valor máximo en el eje.

Radares AEMET

Anchura del haz $\longrightarrow \theta/2 = 0,45^\circ$

(θ es el ángulo del lóbulo principal)

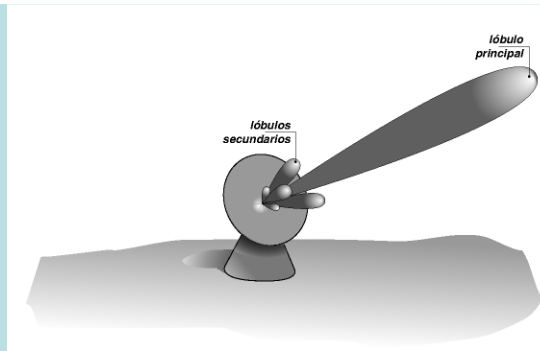


Lóbulos laterales

Al no ser la focalización de la antena perfecta no toda la energía se emite en la dirección del eje de la antena, sino en todas las direcciones.

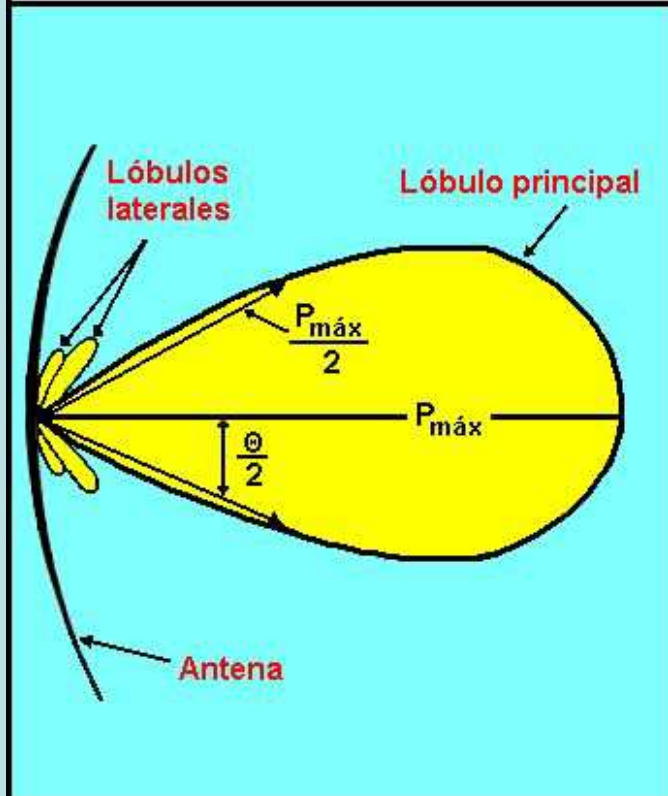
La parte principal de la energía se concentra alrededor del eje de la antena en el llamado **lóbulo principal**. Más allá de este lóbulo aparecen nuevos **máximos secundarios** que son los denominados **lóbulos laterales**

Normalmente la densidad de potencia de un lóbulo lateral no supera el 1% de la del lóbulo principal y la suma de todos los lóbulos laterales no alcanza el 2% ó 3% del total de la energía emitida



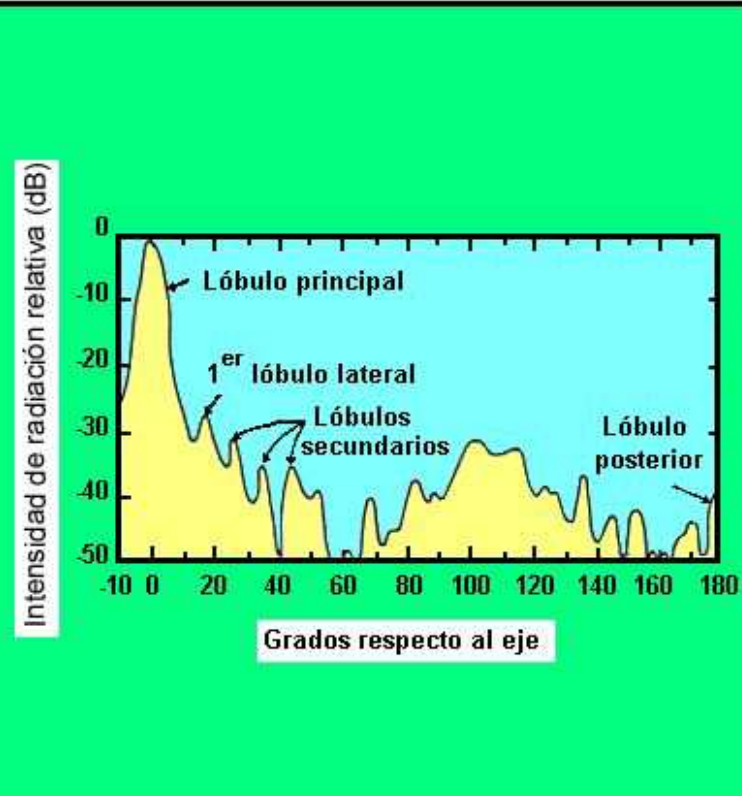
LÓBULOS PRINCIPAL Y LATERALES

(Collier, 1989)



INTENSIDADES DE RADIACIÓN RELATIVAS A LA DEL LÓBULO PRINCIPAL

(Collier, 1989)



4.- Tipos de radares meteorológicos

1.- RADAR DE BANDA S:

- Frecuencia: 2-4 GHz.
- Longitud de onda: 8-15 cm.
- Localización de blancos con precisión en amplios rangos de distancia (0 – 240 km).
- Ventajas:** bastante buena resolución angular, bajo nivel de ruido y sufren muy poca atenuación.
- Desventajas:** para conseguir sus mejores prestaciones necesitan radomos y reflectores de grandes dimensiones. Precio elevado.



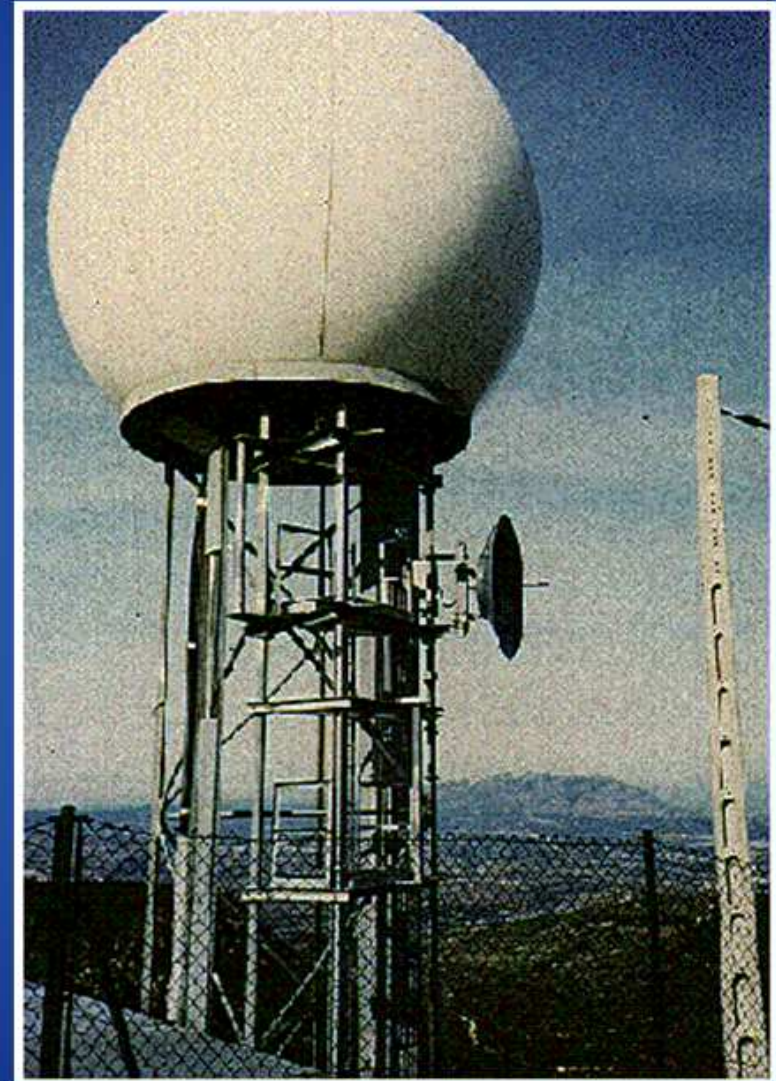
Radars de banda S del Marshall radar Observatory (MRO), en Montreal, Canadá, con un disco de unos 10 m de diámetro



Vista interior del radar de banda S del NSSL donde es posible observar el radomo y el reflector (o disco) de unos 9 m de diámetro

2.- RADAR DE BANDA C:

- Frecuencia: 4-8 GHz.
- Longitud de onda: 4-8 cm.
- Muy útil en rangos intermedios (0-120 km).
- **Ventajas:** buena resolución angular, pequeño tamaño del disco (portabilidad). Precio.
- **Desventajas:** Mayor atenuación que la banda S.



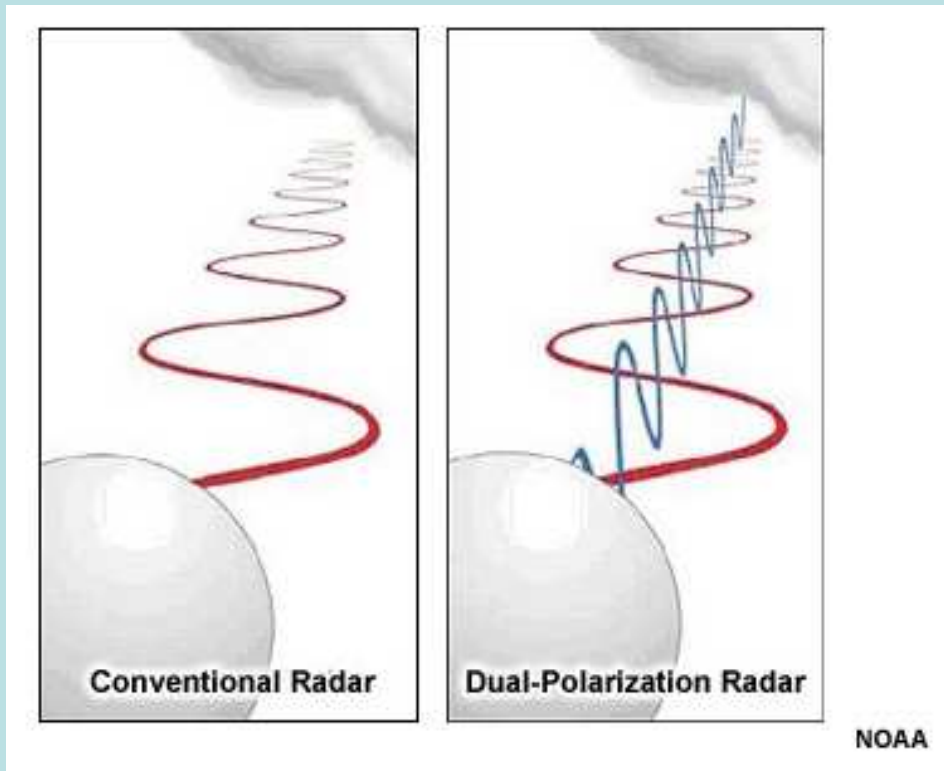
3.- RADAR DE BANDA X:

- Frecuencia: 8-12,5 GHz.
- Longitud de onda: 2,5-4 cm.
- Muy útiles sólo a corta distancia (< 60 km).
- Ventajas: Haces estrechos y muy buena resolución, detección de partículas pequeñas, investigación. Tamaño, precio.
- Desventajas: atenuación muy alta.

4.- RADAR DE BANDA K:

- Frecuencia: 12,5-40 GHz.
- Longitud de onda: 2,5-0,8 cm.
- El resto, id. Banda X.





Los radares polarimétricos también emiten y reciben energía en la dirección vertical, proporcionando más información de los blancos atmosféricos.

Radar polarimétrico, permite a los predictores:

- Identificar blancos no meteorológicos con mayor facilidad
- Diferenciar lluvia y nieve
- Detectar si hay granizo en una tormenta
- Detectar el polvo del suelo de los tornados intensos

5.- Ecuación del radar. Reflectividad

Ecuación del radar

Expresa la relación entre la intensidad media de la señal recibida y las propiedades del volumen difusor o del blanco puntual situado a una distancia r , en función de las características técnicas del radar y de las condiciones de propagación entre el radar y el blanco.

$$\bar{P}_r = C \quad L^2 \quad |K|^2 \frac{Z}{r^2}$$

radar medio blanco

C: constante relacionada con el radar

L: relacionada con la atenuación producida por los gases, nubes y precipitación que existe entre el radar y el blanco

|K|: constante dieléctrica del blanco (relacionada con el índice de refracción y su coeficiente de absorción)

Z: Reflectividad y está relacionada con el tamaño y la distribución de las partículas

r: distancia del blanco

$$\overline{P}_r = P_t \frac{G^2 \lambda^5}{(4\pi)^3 r^4 \lambda^2} |K|^2 \Sigma D^6$$

$D = 2r$ (diámetro de las gotitas)

LA POTENCIA MEDIA RECIBIDA DEPENDE DE:

- **Parámetros del radar** (Potencia transmitida, longitud de onda de trabajo, ganancia de antena,...)
- **Dos factores que únicamente dependen de los blancos:**
 - El valor de $|K|^2$ (Constante dieléctrica del blanco)
 - La magnitud $Z = \Sigma D^6$ (Reflectividad)



Como el rango de valores energéticos es muy amplio se suele usar una escala decibélica:

Así, la potencia recibida queda relacionada con el factor de reflectividad Z [mm^6/m^3], por

$$10 \log P_r = 10 \log Z - 20 \log r + C$$

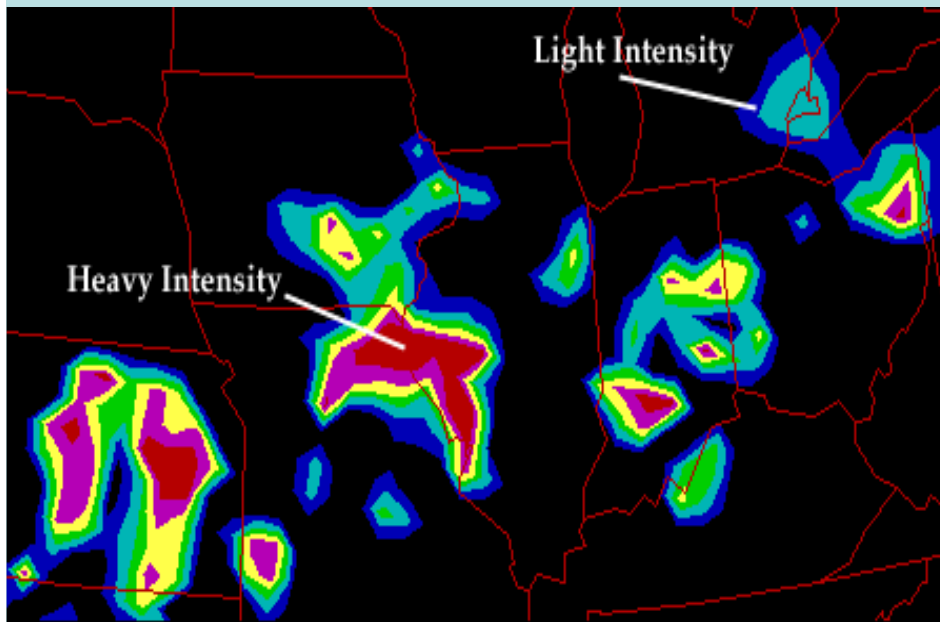
Cuanto más blancos se intercepten, mayor será la señal, pues la señal combinada será integrada

Gotas de gran tamaño producirán una señal mayor que gotas de pequeño radio.

REFLECTIVIDAD

Lo que realmente se representa en las terminales radar es una magnitud llamada Reflectividad (Z)

$$Z = \sum_v D^6 = \int N(D) D^6 dD$$



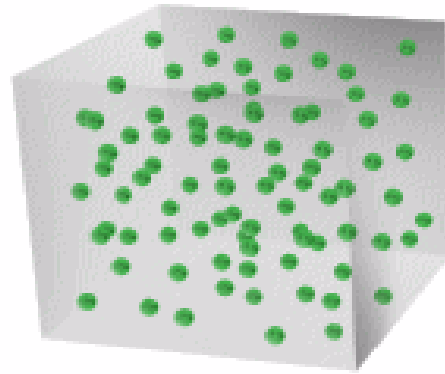
Los colores son una manera de representar diferentes valores de REFLECTIVIDAD.

(En escala logarítmica)

Los radares met. (bandas X, C y S) están diseñados para detectar “partículas del tamaño de gotitas de precipitación, en la atmósfera”.

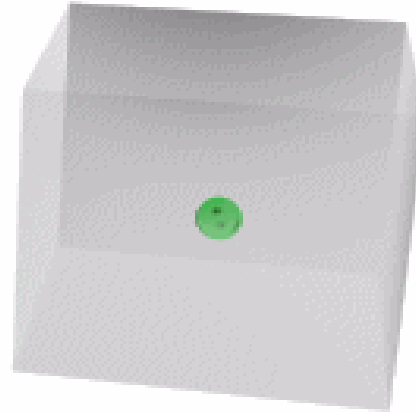
La reflectividad o eficiencia de devolver esa energía depende de (¡¡y por este orden!!):

- ✓ El tamaño de las partículas, (D^6)
- ✓ Concentración de partículas de precipitación, $N(D)$
- ✓ El estado de la pcp (K): líquida (gotitas de agua), sólida (granizo seco, nieve)
- ✓ Forma: redondeada, obloide, plana



729 1mm drops

=



1 3mm drop

Reflectividades equivalentes

729 gotas de 1 mm y 1 gota de 3 mm

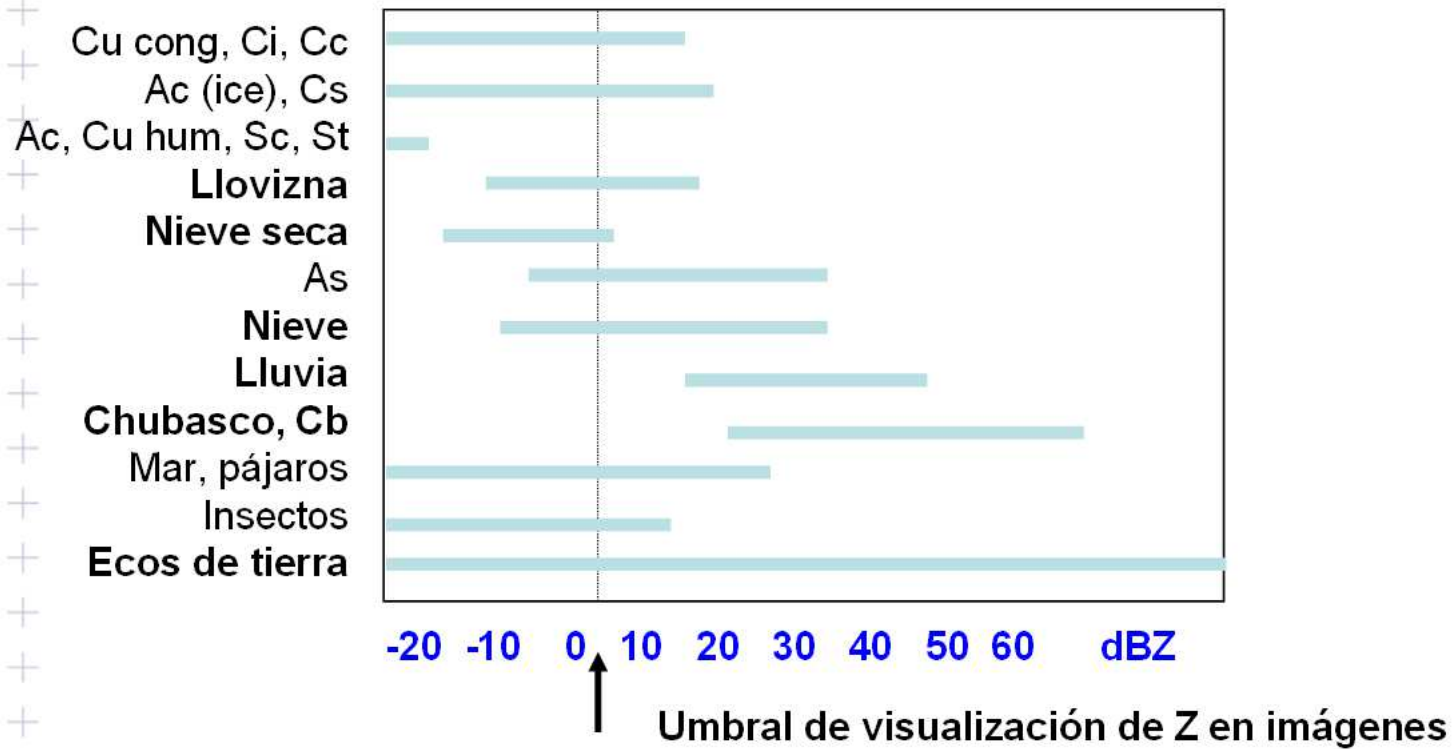
ESCALA DE REFLECTIVIDAD

Teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento del radar, su capacidad y sensibilidad de detección, se ha establecido un umbral mínimo de presentación de datos que por un lado no sature la pantalla de información y por otro que discrimine convenientemente las estructuras meteorológicas que nos interesan.

Para los radares de AEMET este umbral está establecido en 12 dBz.



Valores “orientativos” de Z, en dBZ, de varios fenómenos/blancos para un radar ideal



¿El Sol,
Nubes de polen,
Otros radares
Granizo seco
Granizo húmedo
Parques eólicos?

REFLECTIVIDAD E INTENSIDAD DE PRECIPIT.

$$Z = \sum_v D^6 = \int N(D) D^6 dD$$

donde el subíndice v significa que la suma debe extenderse a la unidad de volumen y $N(D) dD$ es el número de difusores por unidad de volumen con diámetros comprendidos entre D y $D+dD$.

Marshall y Palmer (1948) tras una serie de observaciones encontraron que la distribución por tamaño de las gotas, excepto para tamaños muy pequeños, puede expresarse aproximadamente así:

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D}$$

donde $N(D) dD$ es el número de gotas por unidad de volumen cuyos diámetros están comprendidos entre D y $D + dD$.

Λ depende tan sólo de la intensidad de precipitación R

$$Z = \sum_v D^6 = \int N(D) D^6 dD$$

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D}$$

$$\Lambda(R) = 4,1 R^{-0.21} \quad [mm^{-1}]$$

De acuerdo con la definición que hemos dado en el apartado anterior Z está relacionada con la distribución de tamaños de las gotitas, y utilizando la relación de Marshall-Palmer, resulta que:

En este caso, se puede demostrar que existe una relación entre la Intensidad de Precipitación R [mm/hora] y la Reflectividad Z [mm⁶/m³] que es de la forma

$$Z = a R^b$$

$$Z = a R^b$$

La relación empírica que liga la reflectividad y la intensidad de precipitación que normalmente se usa más es $Z=200 R^{1.6}$, aunque relaciones Z-R hay tantas como investigadores y además, en el fondo, no son lo más importante a la hora de deducir la precipitación a partir de los datos de reflectividad del radar.

a y b son constantes que se determinan experimentalmente.

La precisión de la conversión de Z en R requiere un conocimiento exacto de la distribución por tamaños de las gotas y de la velocidad vertical del viento que varían tanto en el espacio como en el tiempo. Por consiguiente, no pueden obtenerse simples relaciones Z-R que den resultados precisos para cada situación.

EJEMPLOS DE RELACIONES Z/R

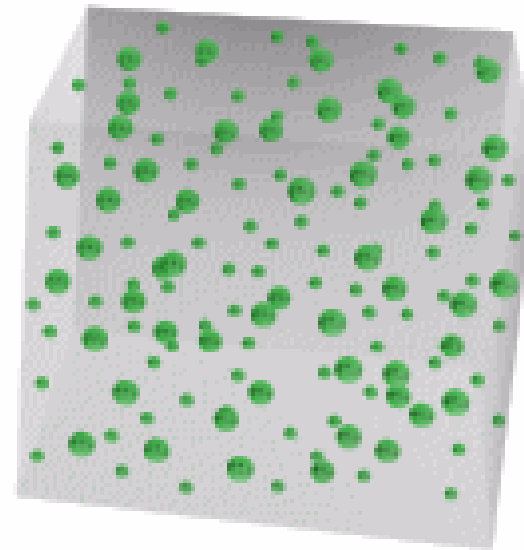
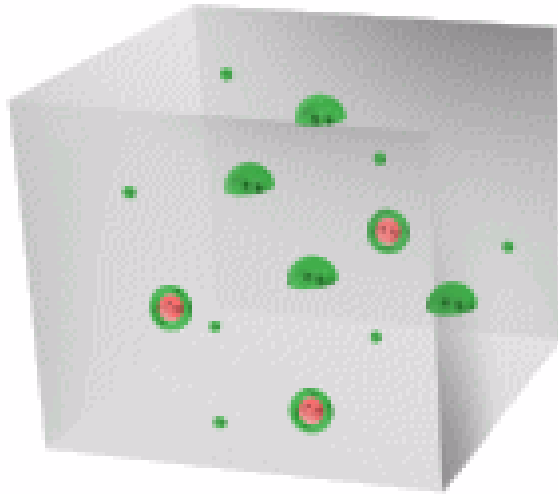
Habrá una relación Z/R empleada según cada tipo de precipitación.

La opción lluvia, la más utilizada, es la relación de Marshall-Palmer

	Llovizna	Lluvia	Chubasco
a	50	200	800
b	1,6	1,6	1,6

Ejemplos de valores de a, b

Equivalent Reflectivity



Greater
Rainrate

Reflectividades equivalentes / Distintas intensidades de pcp

BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN:

- **Curso de radar de Juan Pablo Álvarez Alonso (AEMET)**
- **Radar Research and Development Dept. NSSL (EEUU)**
- **Rafael Sánchez-Diezma (Tesis, 2001) de la UPC**
- **Radar Dept. McGill University (Canada)**
- **Curso de radar de Francisco Martín León (AEMET)**
- **Curso de radar de Ismael San Ambrosio (AEMET)**
- **Módulos COMET (NCAR)**
- **NWS (USA)**
- **[http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/home.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/home.rxml)**