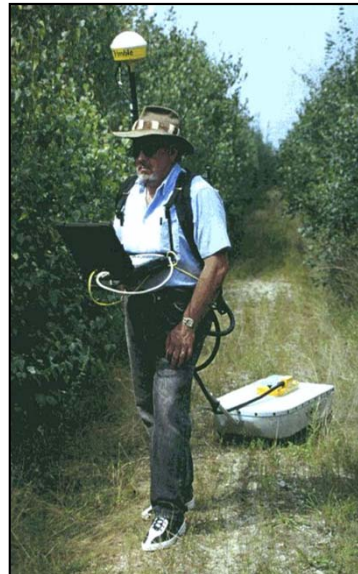
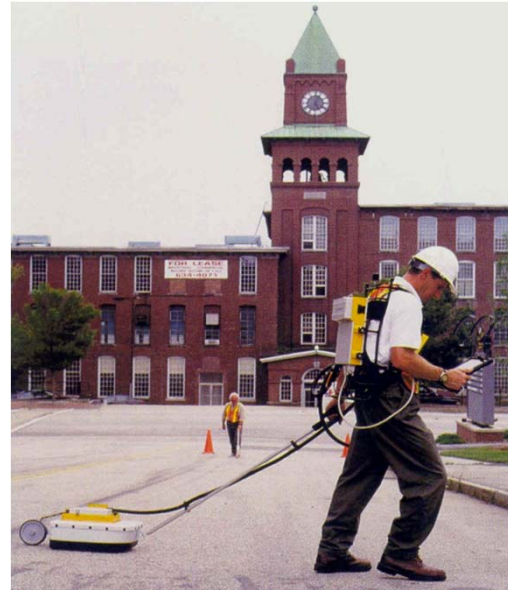


# Georadar

## \* SIR SYSTEM



1

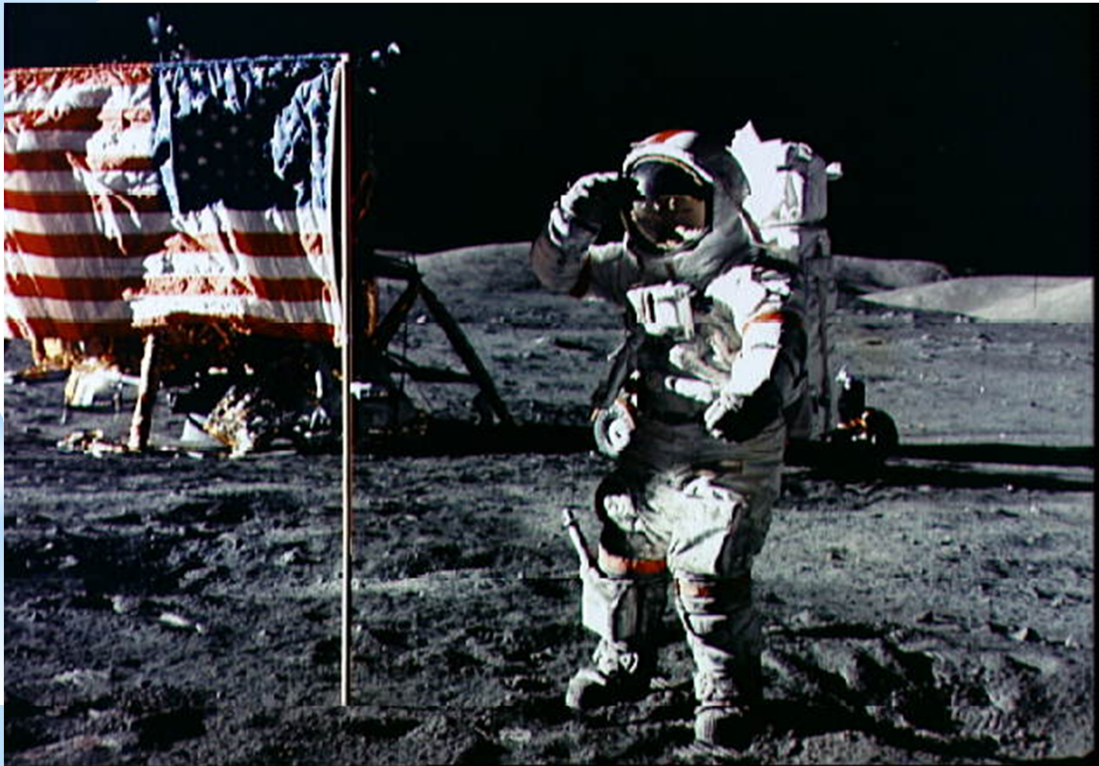
## *RAMAC SYSTEM*



# *Como nace el Georadar*

Una de las primeras aplicaciones de campo del GPR fue la detección de túneles durante la Guerra de Vietnam.

El GPR fue también utilizado en la luna durante el Programa Espacial Apolo.



El primer GPR con fines comerciales fue construido en 1975.

Desde ese momento, la tecnología del GPR ha evolucionado como una herramienta para investigaciones no-destructivas del subsuelo.



# \* Conceptos teóricos más importantes

- \* A lo largo de esta clase se presentan brevemente los conceptos teóricos más importantes, referidos a campos electromagnéticos, en los que se basa la prospección con georadar.
- \* Podemos diferenciar tres partes:
  - \* La primera se refiere a los **parámetros electromagnéticos** de los medios materiales y a la propagación de las ondas electromagnéticas.
  - \* La segunda explica **los fenómenos** que se producen durante la propagación de una onda electromagnética en un medio material: difracción, dispersión de la energía y atenuación de la onda electromagnética.
  - \* La tercera se centra en las **características de la emisión de un radar**, en el funcionamiento de los equipos de radar y en los distintos métodos de trabajo que se utilizan.

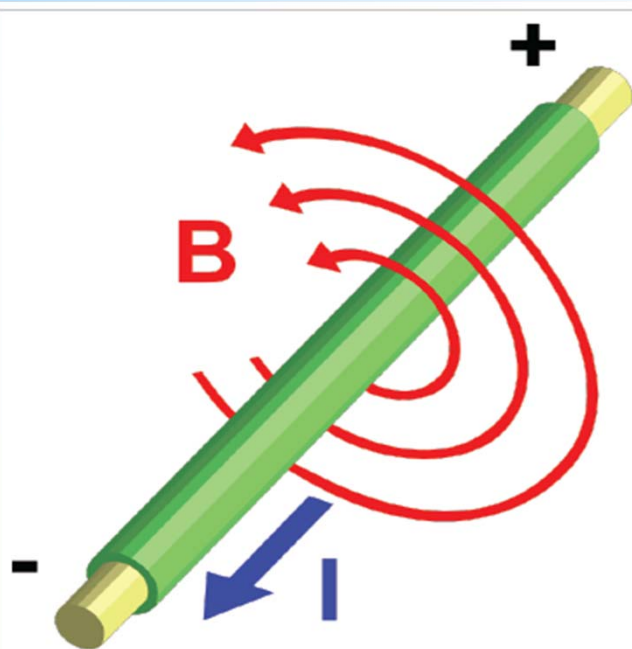
# \*Base teórica

La base teórica de este método de prospección son:

- a) la teoría de campos electromagnéticos, cuyas ecuaciones básicas que relacionan los campos eléctrico y magnético con sus fuentes, fueron formuladas por Maxwell en 1867.
- b) los conceptos de óptica geométrica



# \* Ondas Electromagnéticas



Las cuatro ecuaciones de Maxwell describen todos los fenómenos electromagnéticos, aquí se muestra la inducción magnética por medio de una corriente eléctrica.

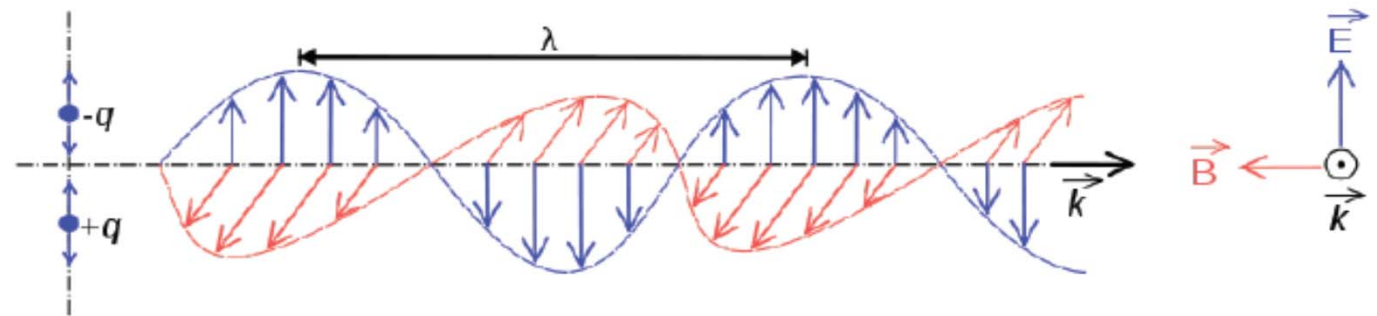
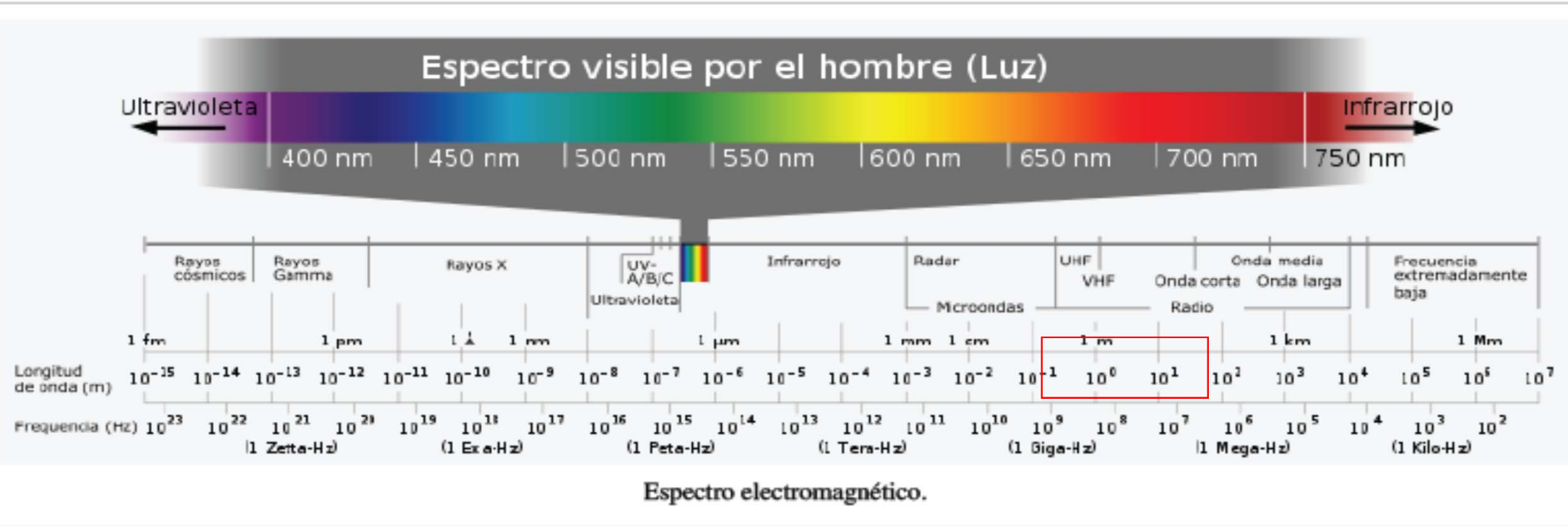


Fig.1 - Una **onda electromagnética polarizada**. Las oscilaciones del campo eléctrico sólo se producen en un plano del espacio, son perpendiculares a las oscilaciones del campo magnético, y ambas son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.



# \* Ecuaciones constitutivas

Para medios homogéneos e isotrópicos, las ecuaciones constitutivas tienen una expresión sencilla, relacionando estas magnitudes por medio de:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{la permitividad dieléctrica } (\epsilon),$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{la conductividad } (\sigma) \text{ y}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad \text{la permeabilidad magnética } (\mu) \text{ del material:}$$

Donde:

**D:** es el vector de desplazamiento eléctrico

**E:** es la intensidad del campo eléctrico (medido en V/m),

**J:** es la densidad de corriente (A/m<sup>2</sup>).

**H:** es la intensidad del campo magnético (A/m),

**B:** es la inducción magnética (medida en W/m<sup>2</sup>),

# \*Importancia de las ecuaciones de Maxwell

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell y con la ecuación general de propagación de ondas se pueden obtener las relaciones que rigen la propagación de una onda electromagnética en función de las propiedades del medio por el que se produce.

Con estas relaciones es posible determinar:

- ✓ la velocidad de propagación de la onda,
- ✓ la longitud de onda en el medio material y
- ✓ la atenuación que sufre la energía durante la trayectoria.



**\*Parámetros  
electromagnéticos de  
un medio.**

# \* *Parámetros electromagnéticos de un medio.*

## Conductividad

Es la capacidad de un medio de conducir corriente eléctrica

En forma estricta:

La conductividad de un medio nos proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad de volumen de corriente debido al movimiento de estas cargas libres

Según la ley de Ohm:

$$\mathbf{J}_f = \sigma \mathbf{E}$$

Donde:  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico externo aplicado,  $\mathbf{J}_f$  es la densidad volumétrica de corriente debido a las cargas libres y  $\sigma$  es la conductividad del material que se expresa en mhos/m.

## \* CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (Siemens/metro (S/m) ó mho/m)

- \* La capacidad de un material para conducir una corriente eléctrica
- \* La recíproca es la resistividad, medida en ohm-metro
- \* Rango de valores desde  $10^4$  hasta  $10^{-9}$  S/m
- \* El valor esta controlado primeramente por el contenido en agua y/o el contenido de arcillas
- \* Altas conductividades hacen que la penetración de la señal de radar sea dificultosa



# \*Tipos de materiales

En general podremos distinguir entre materiales:

- a) **conductores**: aquellos materiales cuya conductividad es mayor a  $10^5$  S/m
- b) **Semiconductores**: entre  $10^{-8}$  y  $10^4$  S/m
- c) **aislantes**: presentan una conductividad menor a  $10^{-8}$  S/m

# \* DIVISION GENERAL DE LOS MATERIALES POR SU CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

- \* **BAJA CONDUCTIVIDAD** - EXCELENTES CONDICIONES PARA GEORADAR (COND.  $< 10^{-7}$  S/m)
  - \* aire
  - \* granito seco, calizas secas
  - \* concreto, asfalto
- \* **CONDUCTIVIDAD MEDIA** - CONDICIONES MEDIAS PARA GEORADAR ( $10^{-7}$  COND.  $< 10^{-2}$  S/m)
  - \* agua dulce, hielo de agua dulce, nieve
  - \* arenas, limos, arcillas secas, basaltos, hielo de agua marina
- \* **ALTA CONDUCTIVIDAD** - POBRES CONDICIONES PARA GEORADAR (COND.  $> 10^{-2}$  S/m)
  - \* arcillas húmedas, lutitas húmedas
  - \* agua marina

## \* Conductividad en rocas y subsuelos

En la mayor parte de las rocas y subsuelos en los que se realizan estudios, la conductividad es principalmente electrolítica.

En estos medios la conducción eléctrica se debe básicamente a la existencia de fluido (con iones disueltos) en poros y fisuras.

Es decir, cuanto mayor sea el contenido de agua, el porcentaje de iones disueltos y la porosidad del medio, mayor será su conductividad.



# \* CONDUCTIVIDAD DE SUELOS NO-SATURADOS Y SEDIMENTOS

## Modelo de índice refractivo

$$\sqrt{\sigma} = n(1 - s)\sqrt{\sigma_a} + ns\sqrt{\sigma_w} + (1 - n)\sqrt{\sigma_s}$$

$\sigma$  = conductividad de capas de sedimentos

$\sigma_a$  = conductividad del aire

$\sigma_w$  = conductividad del agua

$\sigma_s$  = conductividad de las partículas del suelo

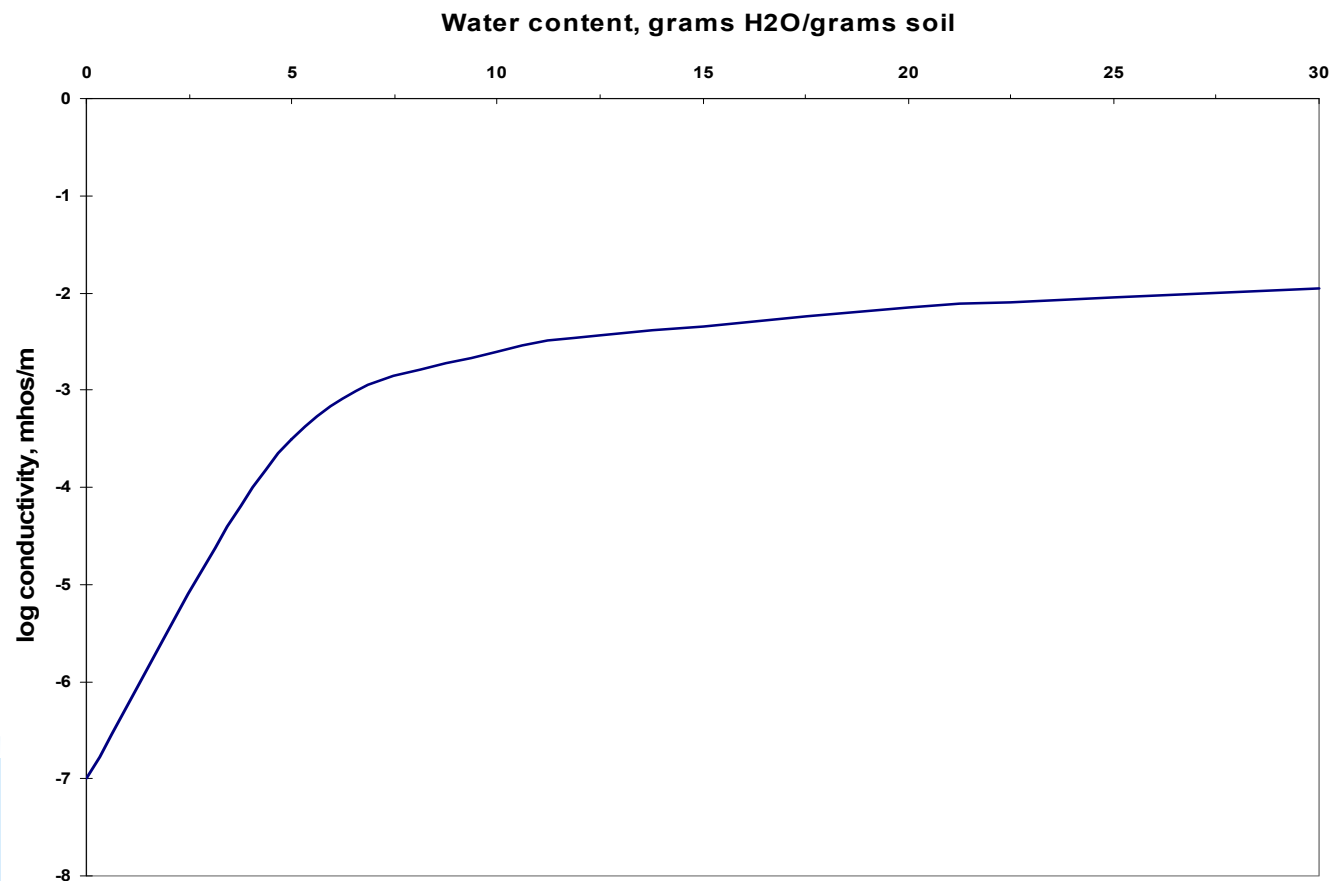
$n$  = factor de porosidad (%)

$s$  = grado de saturación

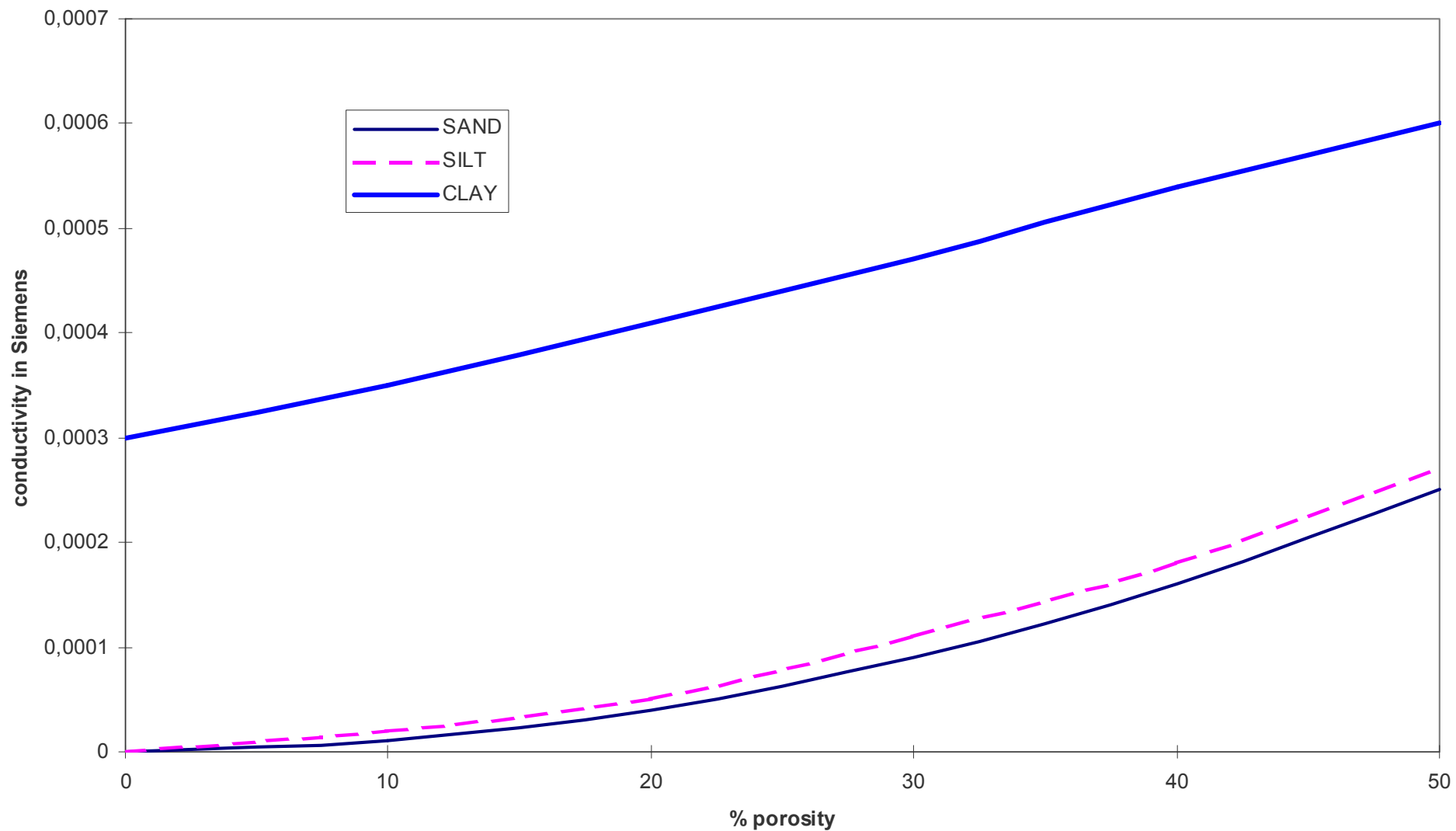
tomado de: hara, t. and sakayama, t., 1985

# \* EFECTOS DEL CONTENIDO DE AGUA SOBRE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

- La atenuación de la señal y, por tanto, la disminución de la penetración de la energía del GPR, es directamente proporcional a la conductividad del suelo.
- Suelos arcillosos y suelos saturados con sales y agua son altamente conductivos.



# \* VARIACIONES DE LA CONDUCTIVIDAD COMO UNA FUNCION DE LA POROSIDAD DE LOS SEDIMENTOS





Al cambiar la temperatura de los medios, la conductividad puede verse modificada.

La temperatura afecta a la movilidad de los iones, de forma que influye en la conductividad electrolítica.

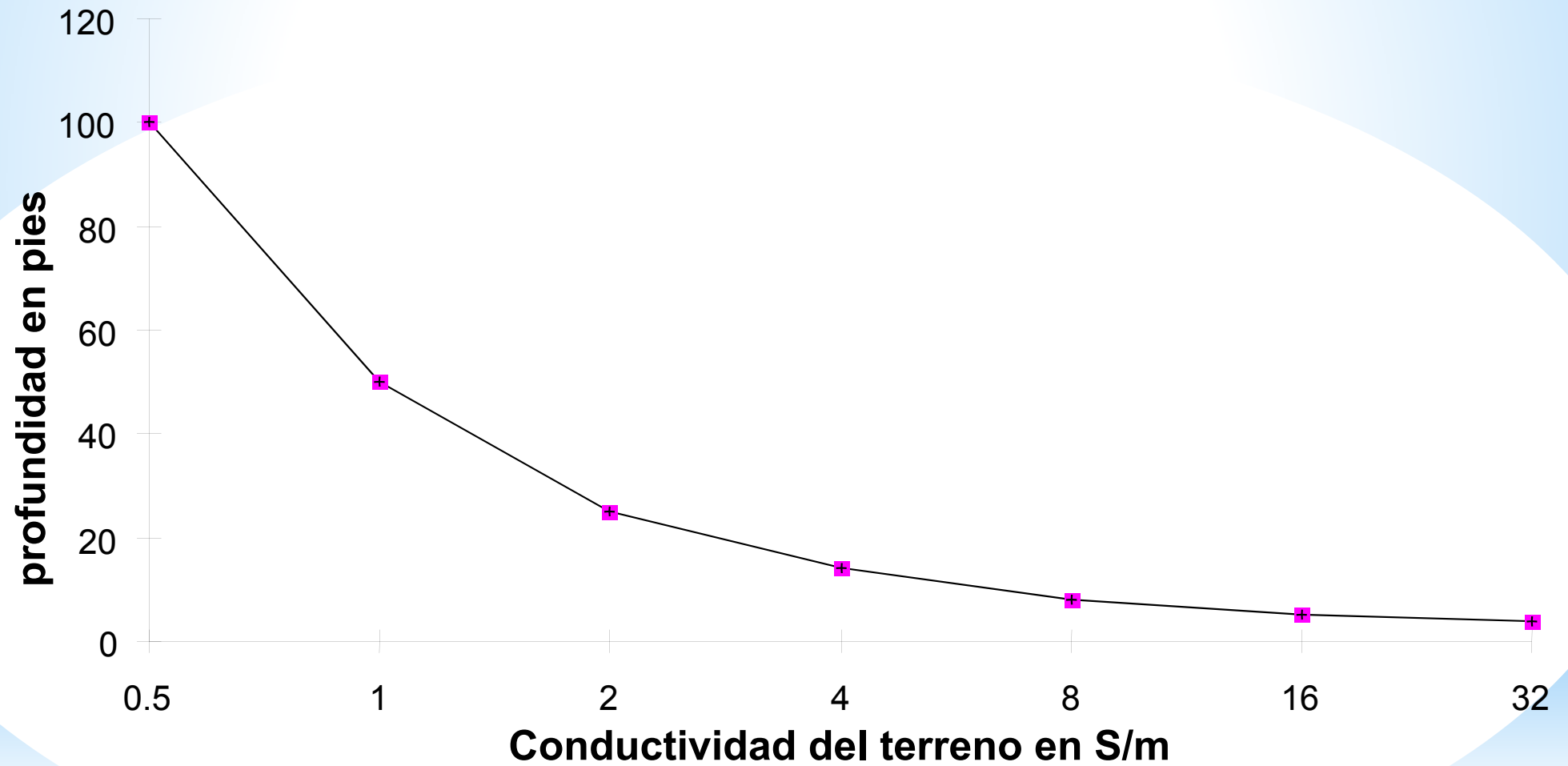
En general, la conductividad es un parámetro fuertemente variable que no depende sólo de los cambios de materiales del medio, ya que puede variar dentro de una misma formación.

En materiales porosos este parámetro es fuertemente variable dependiendo:

- \* *de la naturaleza de los iones disueltos en el fluido intersticial,*
- \* *de la saturación de agua,*
- \* *del número de poros y de su comunicación, entre otros factores.*

# \* PENETRACION DE GPR

## SUPERFICIE A UN BLANCO METALICO



# *\* Parámetros electromagnéticos de un medio.*

## Permitividad dieléctrica.

La permitividad dieléctrica absoluta es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico,  $\vec{D}$ .

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

La permitividad absoluta,  $\epsilon$  (medida en el S.I. en Faraday/metro), se define como el producto entre una permitividad relativa del material ( $\epsilon_r$ ), que es constante, y la permitividad dieléctrica del vacío ( $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m):

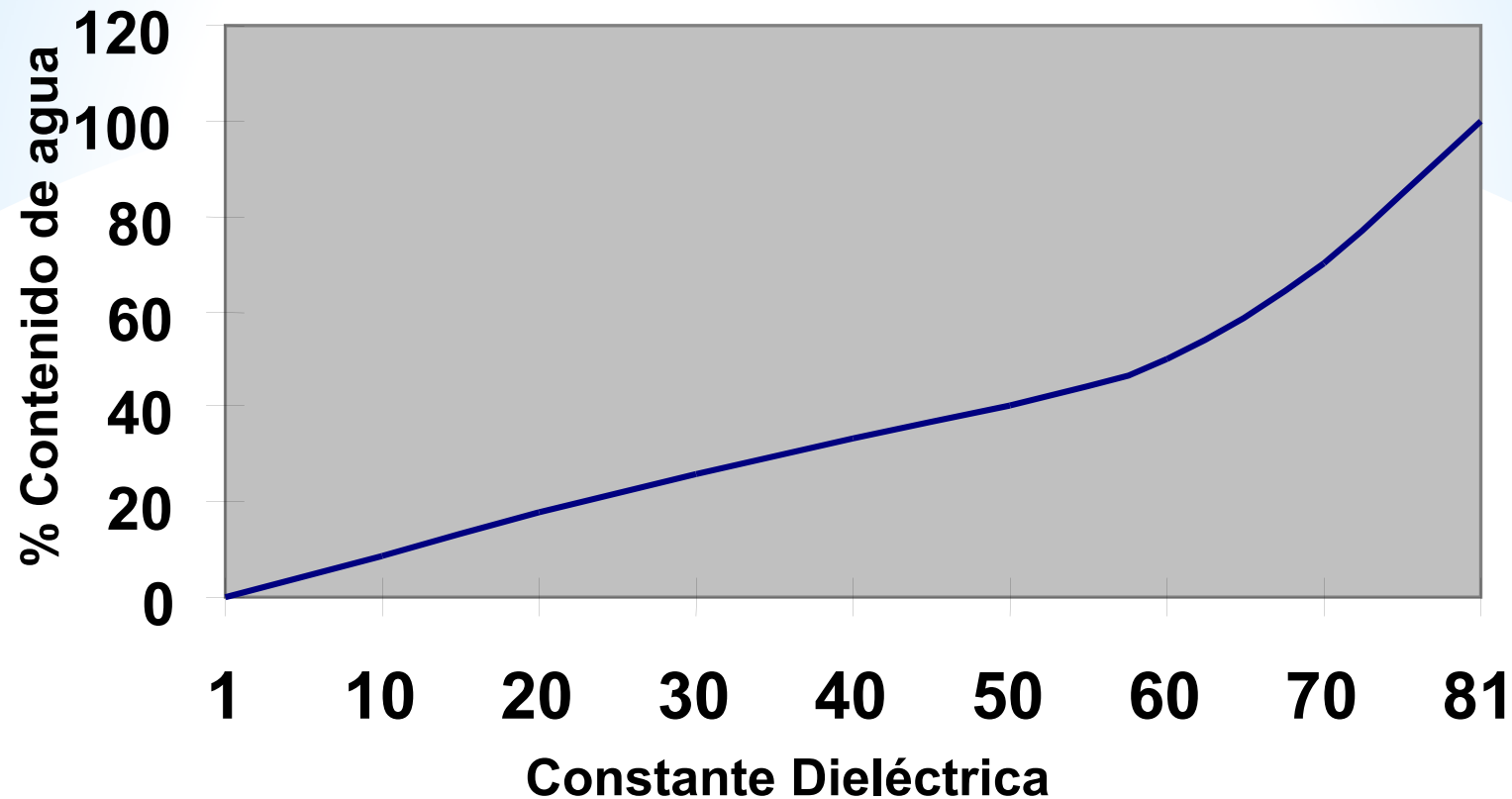
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

*\* los valores de la permitividad  
dieléctrica relativa de un  
medio.*

**La constante dieléctrica relativa del vacío es 1.**

Para la mayoría de los materiales que podemos encontrar en el subsuelo al realizar una prospección electromagnética, los valores de la permitividad dieléctrica relativa se encontrarán entre 1 (la del aire) y 81, siendo esta última la constante dieléctrica relativa del agua a 20° de temperatura.

**La velocidad de propagación de la onda del georadar también se ve afectada por la constante dieléctrica**



$$V = c / [(1 - \varphi)\epsilon_m + \varphi \epsilon_w]^{1/2}$$

**A mayor constante dieléctrica menor velocidad de propagación de la onda electromagnética**



# \* Constantes Dieléctricas, Conductividades y Velocidades

<u>Material</u> <u>(ft/ns)</u>	$\epsilon$	C (mho/m)	v
Aire	1	0	0.98
Agua dulce	80	0.5	0.11
Arena	3-5	0.01	0.44
Arena saturada	20-30	0.1-1.0	0.20
Carbonatitas	4-8	0.5-2	0.40
Pizarras	5-15	1-100	0.34
Limos	5-30	1-100	0.24
Arcillas	5-40	2-1000	0.30

# \* *Parámetros electromagnéticos de un medio.*

## *Permeabilidad magnética.*

La *Permeabilidad magnética* ( $\mu$ ) relaciona la inducción magnética ( $\mathbf{B}$ ), con la intensidad de campo magnético ( $\mathbf{H}$ ).

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu \vec{H}$$

Se mide en Henri/metro y se puede escribir como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ ) y la permeabilidad relativa del material ( $\mu_r$ ).

En la mayor parte de los materiales que nos encontraremos en los estudios con georadar (excepto en aquellos que contengan materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética es próxima a 1, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético.

# \* Relación entre la permeabilidad magnética en el vacío y la permitividad dieléctrica

La relación entre la permeabilidad magnética en el vacío y la permitividad dieléctrica en el vacío se expresa como:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Siendo  $c$  la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío.

**\*Velocidad de propagación y longitud de onda**

## \* VELOCIDAD DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN UN MATERIAL

La velocidad de una onda electromagnética en un material ( $V_m$ ) está dada por:

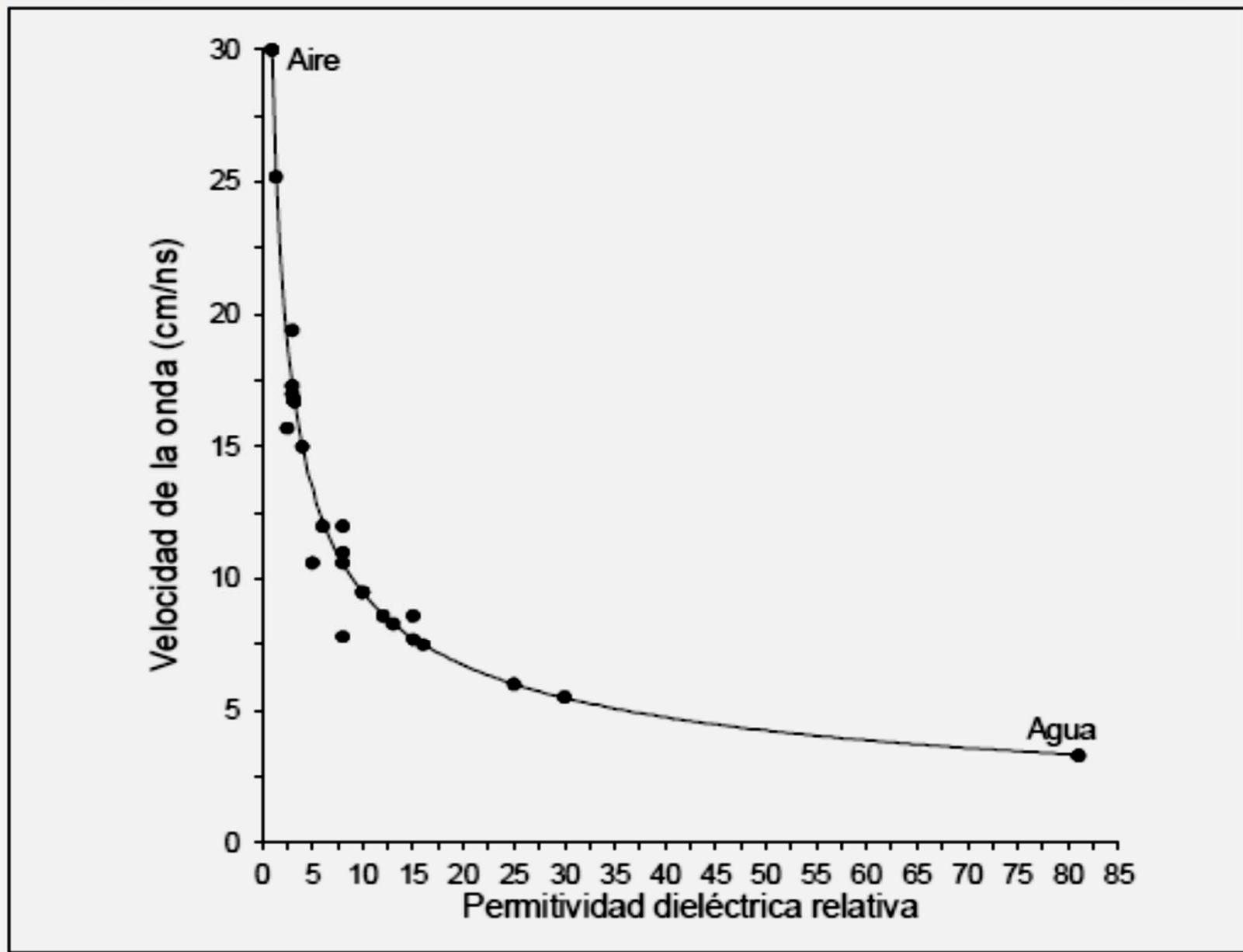
$$V_m = c / \{ (\epsilon_r \mu_r / 2) [(1 + P^2) + 1] \}^{1/2}$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en un espacio libre,  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica relativa, y  $\mu_r$  es la permeabilidad magnética relativa (= 1 para materiales no magnéticos).  $P$  es el *factor de pérdida de energía*, tal que  $P = \sigma / \omega \epsilon$ , y  $\sigma$  es la conductividad,  $\omega = 2\pi f$  (frecuencia angular) donde  $f$  es la frecuencia emitida,  $\epsilon$  es la constante dieléctrica =  $\epsilon_r \epsilon_0$ , y  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del espacio libre ( $8,854 \times 10^{-12}$  F/m).

En materiales de pérdida baja,  $P = 0$ , la velocidad de las radio-ondas es:

$$V_m = 0.3 / \sqrt{\epsilon_r}$$





Variación de la velocidad frente a la permitividad dieléctrica relativa. Los puntos de la gráfica son valores experimentales obtenidos para diferentes materiales. La curva está obtenida a partir de la ecuación anterior.

## \* RELACION ENTRE CONSTANTE DIELECTRICA Y POROSIDAD

La relación entre la constante dieléctrica total ( $\epsilon_r$ ) y la porosidad ( $\phi$ ) es:

$$\epsilon_r = (1 - \phi) \epsilon_m + \phi \epsilon_w \quad (1)$$

donde  $\phi$  es la porosidad,  $\epsilon_m$  y  $\epsilon_w$  son las constantes dieléctricas relativas para la matriz de la roca y el agua fluida contenida en los poros, respectivamente.

Esto es válido cuando un campo externo es aplicado paralelo a la estratificación.

Cuando un campo externo es aplicado perpendicular a la estratificación, entonces :

$$\epsilon_r = \epsilon_m \epsilon_w / [(1 - \phi) \epsilon_m + \phi \epsilon_w]$$

Usando la relación simplificada que  $V = c/(\epsilon_r^{1/2})$ , para materiales de baja pérdida, donde  $c$  es la velocidad de la ondas electromagnéticas en el aire, y sustituyendo en la ecuación (1) para  $\epsilon_r$ , entonces:

$$V = c / [(1 - \phi) \epsilon_m + \phi \epsilon_w]^{1/2}$$

## \* Longitud de onda en un medio diferente del vacío.

La longitud de onda en un medio dado, ( $\lambda_m$ ) esta en relación con la constante dieléctrica efectiva del medio y de la longitud de la onda emitida ( $\lambda_0$ ).

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

En medios no magnéticos ( $\mu_r=1$ ), la expresión se simplifica

La longitud de onda determina la resolución vertical del georadar y dependerá de la frecuencia ( $f=1/\lambda_0$ ) de emisión de la antena y de la constante dieléctrica efectiva del material.

## \* Atenuación.

**El factor de atenuación caracteriza el grado de disminución de la amplitud de la onda conforme se aumenta la distancia al punto en el cual se ha generado, siendo sus unidades  $m^{-1}$**

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Es decir que la atenuación depende de la componente imaginaria (Im) de la permitividad dieléctrica relativa del medio y de su permeabilidad magnética relativa.  $\omega$  = frecuencia de la señal emitida.

**Valores típicos de diversas propiedades físicas, para distintos tipos de materiales y grados de humedad.**

Material	Permitividad relativa $\epsilon$	Velocidad de propagación $v$ (m ns <sup>-1</sup> )	Conductividad $\sigma$ (mS m <sup>-1</sup> )	Coefficiente de atenuación $\beta\sigma$ (dB m <sup>-1</sup> )
Aire	1	0.3	0	0
Agua salada	80	0.033	3000	600
Agua dulce	80	0.033	0.5	0.1
Granito seco	5	0.13	0.01	0.01
Arena seca	5	0.13	0.01	0.01
Arcilla húmeda	10	0.095	500	300
Suelo:				
Arenoso seco	2.6	0.19	1.4	1
Arenoso húmedo	25	0.06	69	23
Arcilloso seco	2.5	0.19	2.7	3
Arcilloso húmedo	19	0.07	500	200
Congelado	6	0.12	0.1	0.1
Caliza lacustre	50	0.04	-	-
Estrato cultural bajo agua	70	0.04	-	-



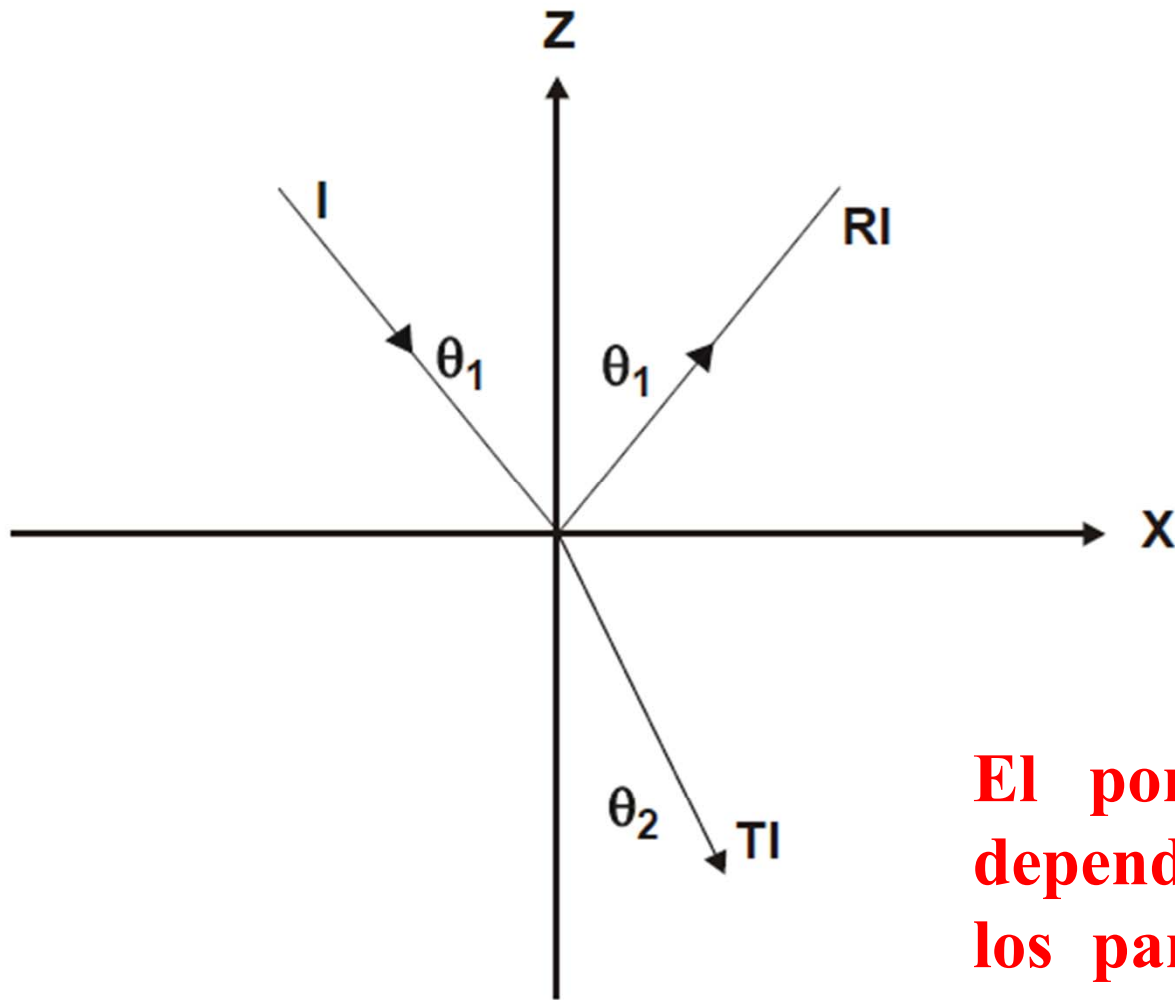
**\*Reflexión y refracción.**

# \*Reflexión y refracción.

**Cuando la energía electromagnética alcanza una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos del medio, se producen los fenómenos de reflexión y de refracción.**

La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con las velocidades de propagación de las ondas en los dos medios que están en contacto.

# \* Refracción y reflexión



El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes materiales de cada medio.

Para cada medio podemos definir la **impedancia del campo electromagnético** de ese medio (**z**) como el cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético.

$$z_2 = \left\{ \frac{\vec{E}_t}{\vec{H}_t} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}} \right\} \quad z = \sqrt{\frac{1}{\epsilon}}$$

Dado que la Permeabilidad magnética ( $\mu$ ) de los materiales naturales es  $\approx 1$ ; y si se cumple que  $\sigma \ll \omega\epsilon$ , entonces:

A partir de las expresiones de las impedancias se pueden calcular los **coeficientes de transmisión y de reflexión** de la energía.

$$R = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

$$T = \frac{2z_2}{z_1 + z_2} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

## Resumiendo:

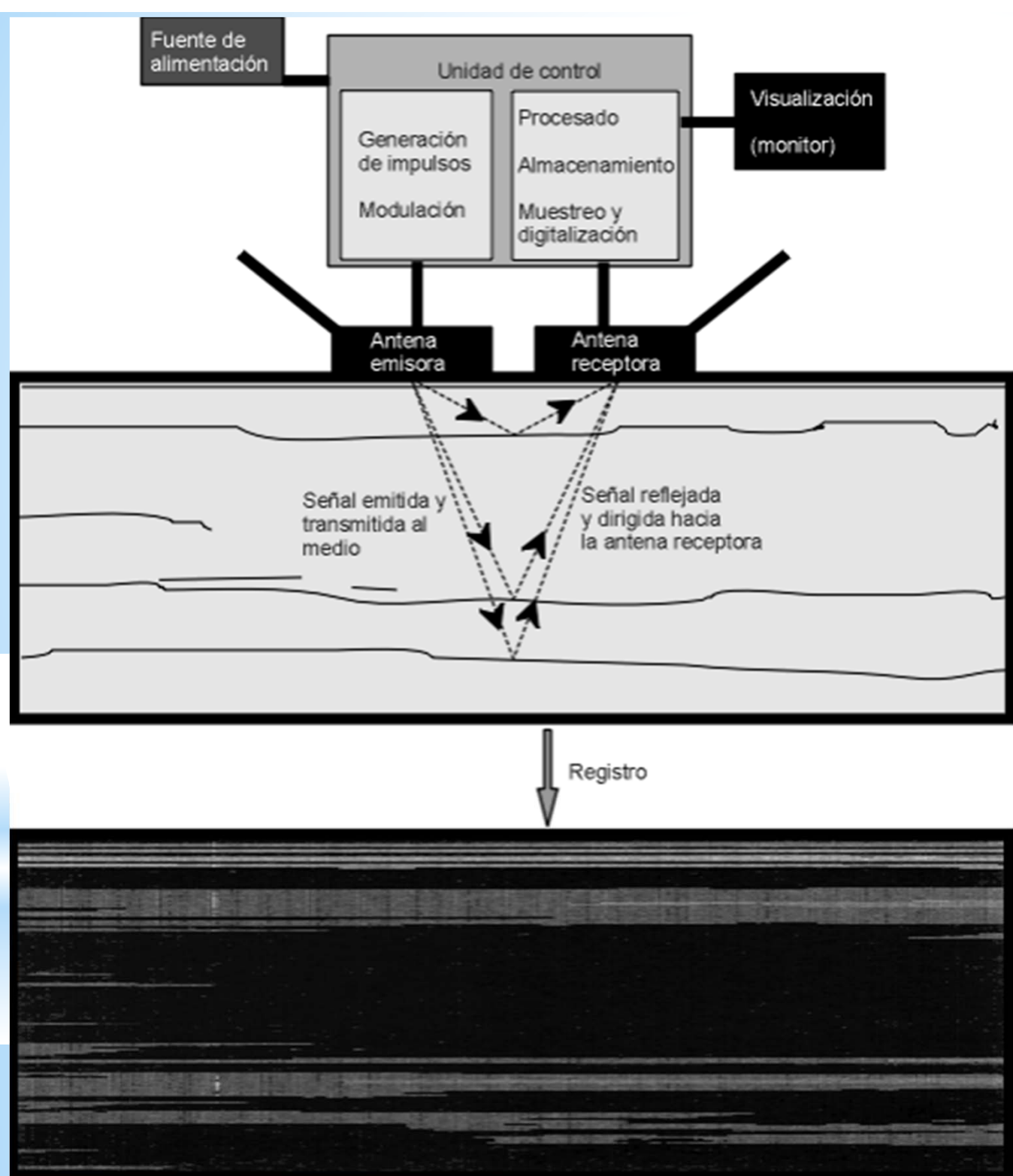
Los parámetros que influyen en la velocidad de la onda son:

- la permitividad dieléctrica relativa del medio,
- la conductividad,
- la permeabilidad magnética y
- la frecuencia de la emisión.

Los tres primeros son característicos del medio, mientras que el cuarto depende de la antena del equipo utilizado.

# \*LA REGISTRACIÓN



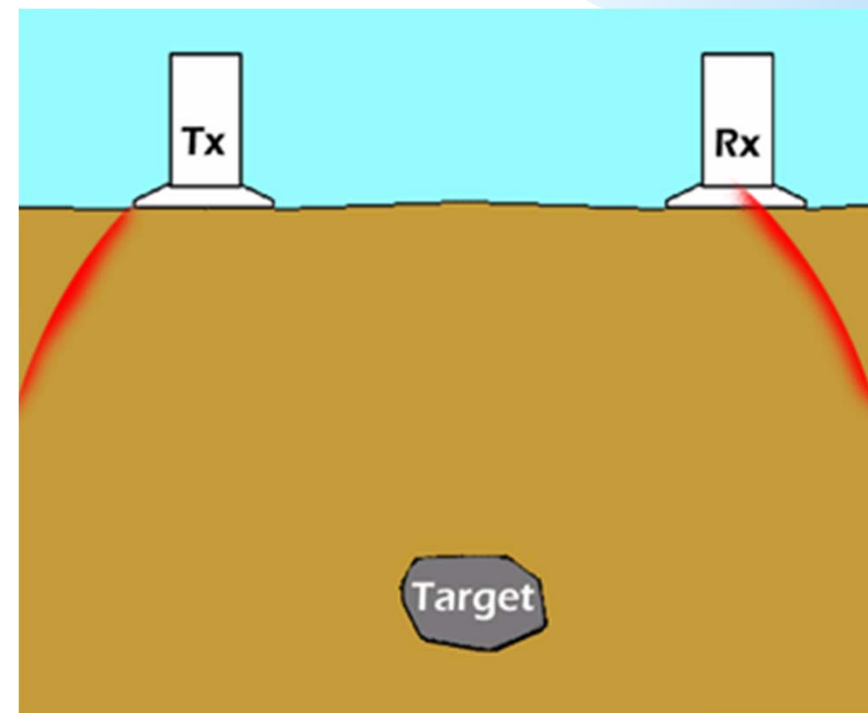


\* Esquema de  
registración

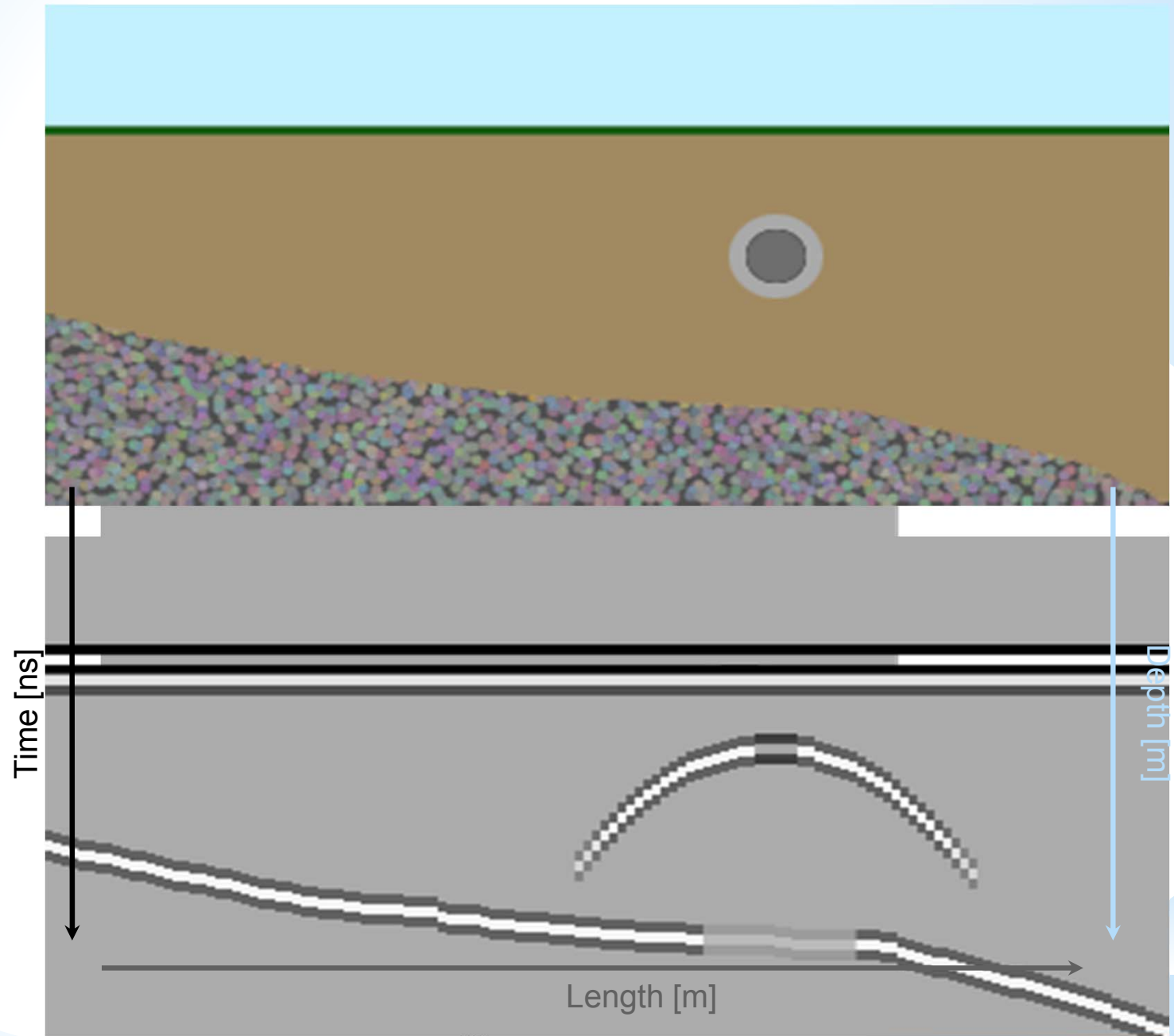
# GEORADAR - Teoria

## Reflexion

- El Transmisor emite un “tren” de impulsos electromagnéticos que se propaga a través del subsuelo.
- La Reflexión ocurre cuando las propiedades eléctricas del subsuelo cambian.
- El Receptor recoge las reflexiones, las cuales se guardan y despliegan en la pantalla de una PC

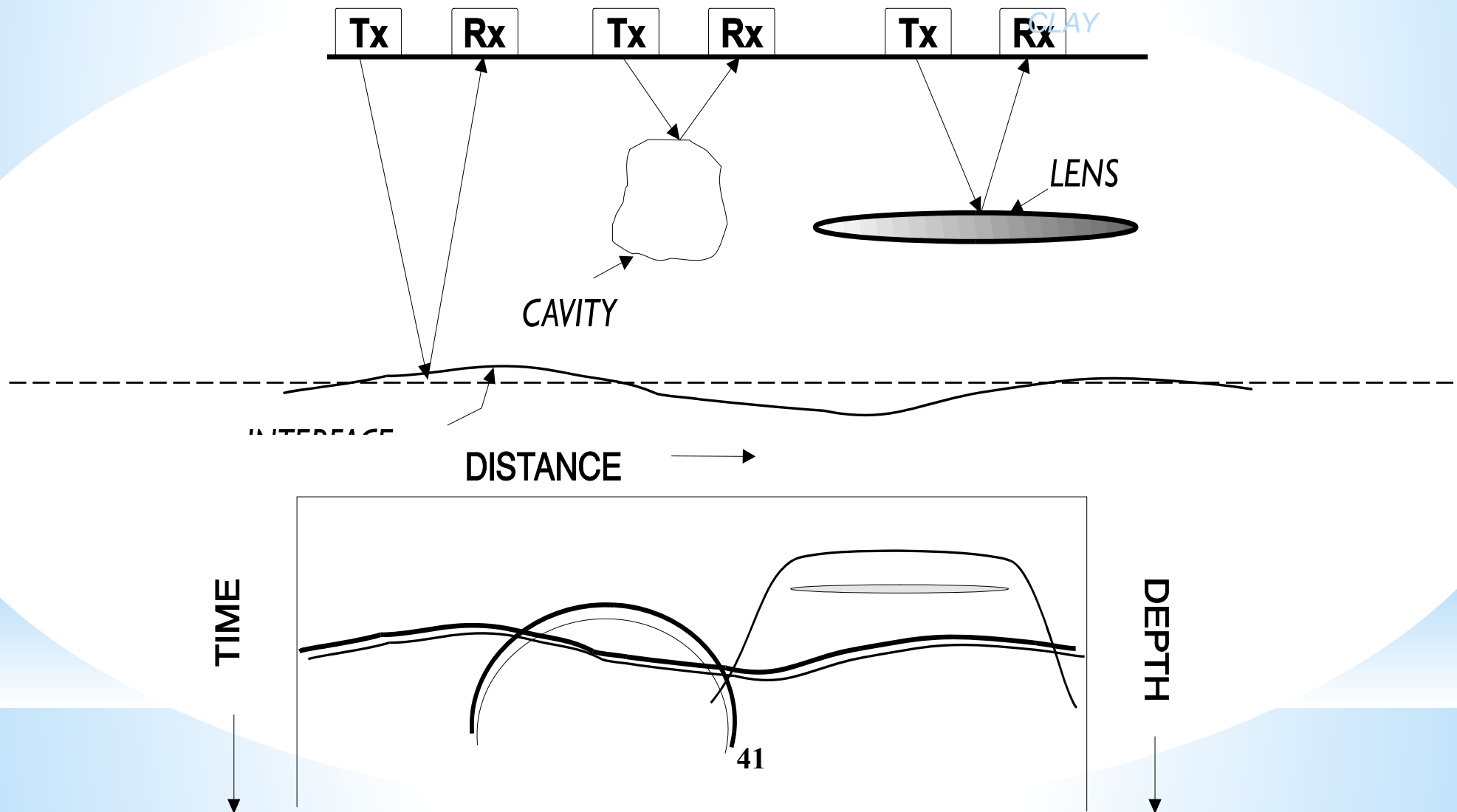


# GEORADAR - Teoria

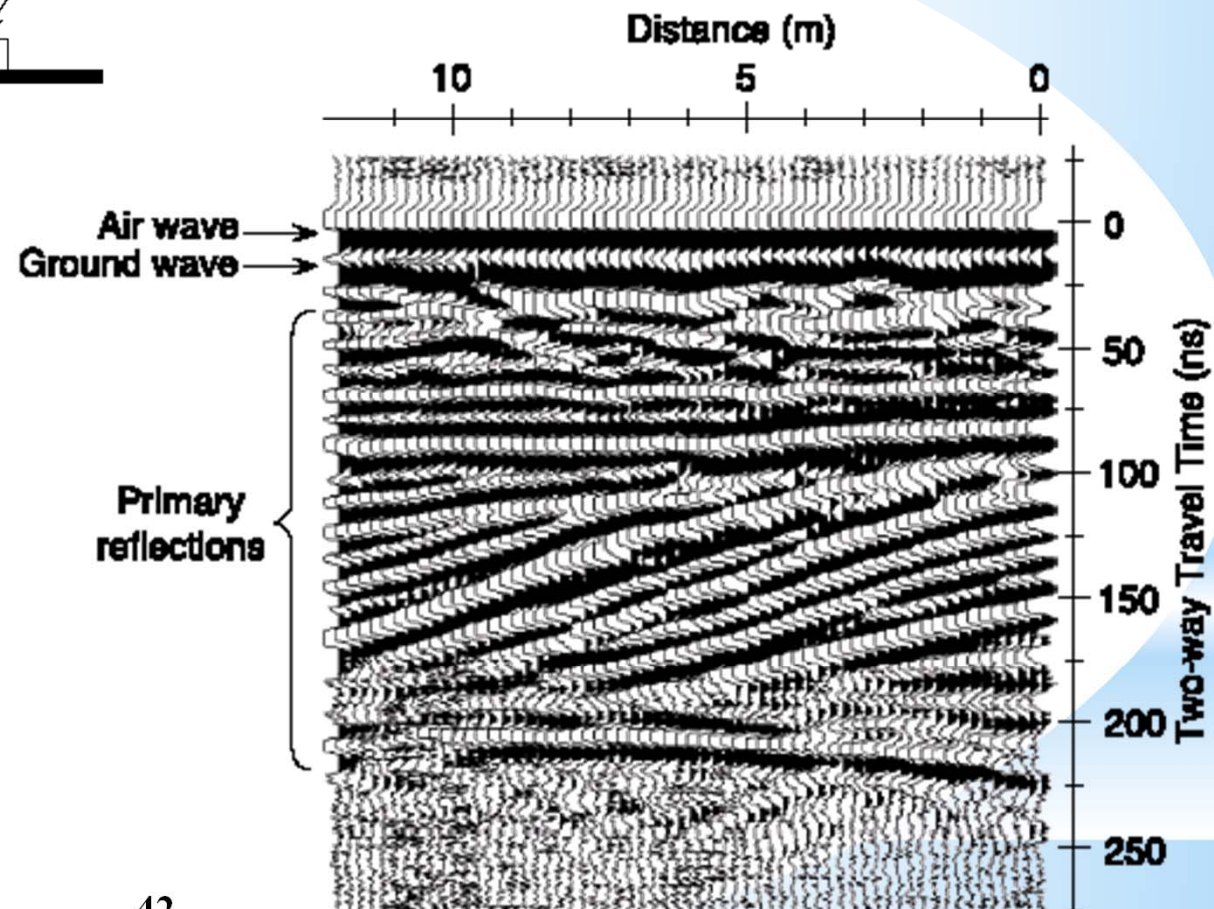
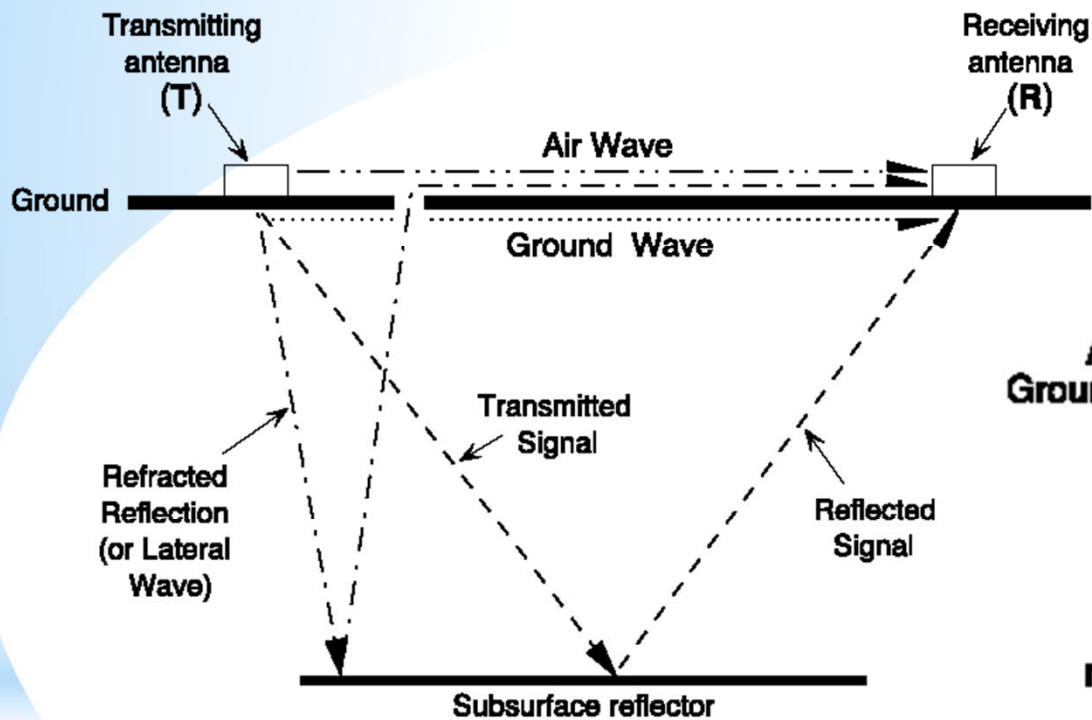


**Reflexion**

# \* CONCEPTOS DE GPR (Ground Penetrating Radar)

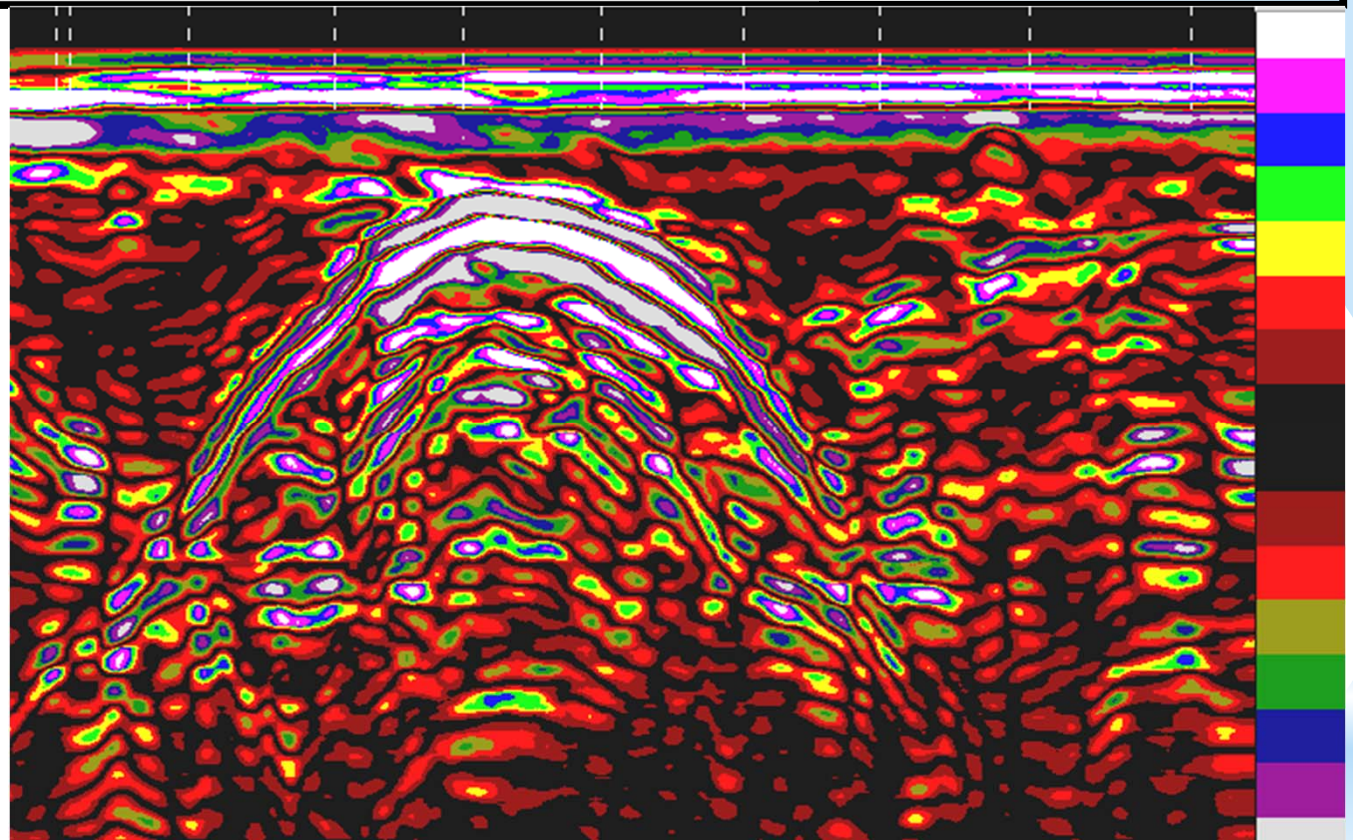
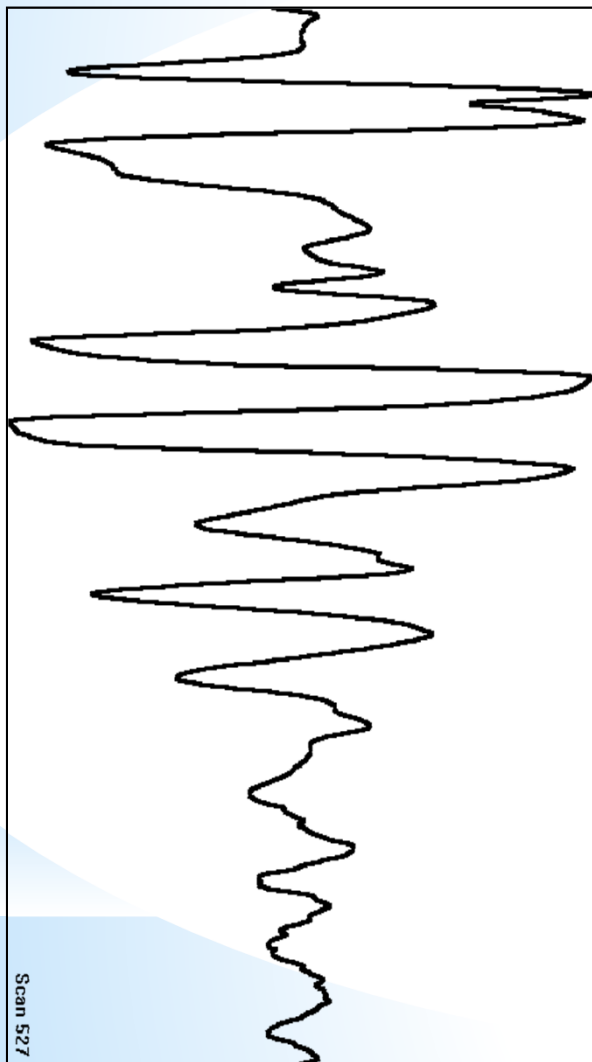


## \* Esquema del registro (radargrama)



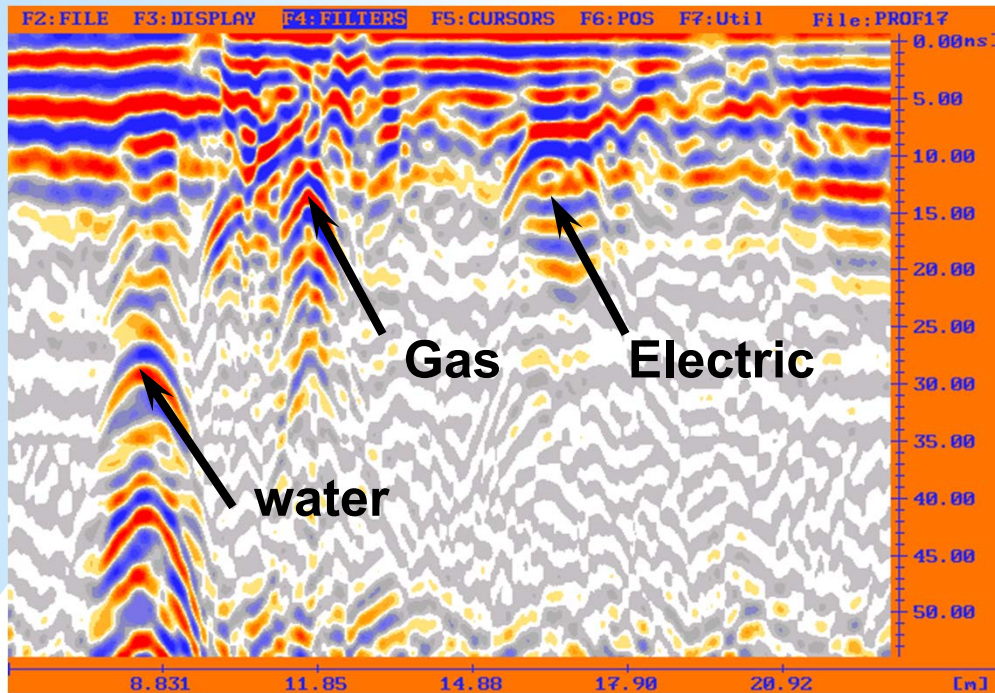


# \* PRESENTACIÓN DE LA SEÑAL RECIBIDA DE GPR Y PERFILES GRAFICOS



RADARGRAMA

# GEORADAR - Teoria

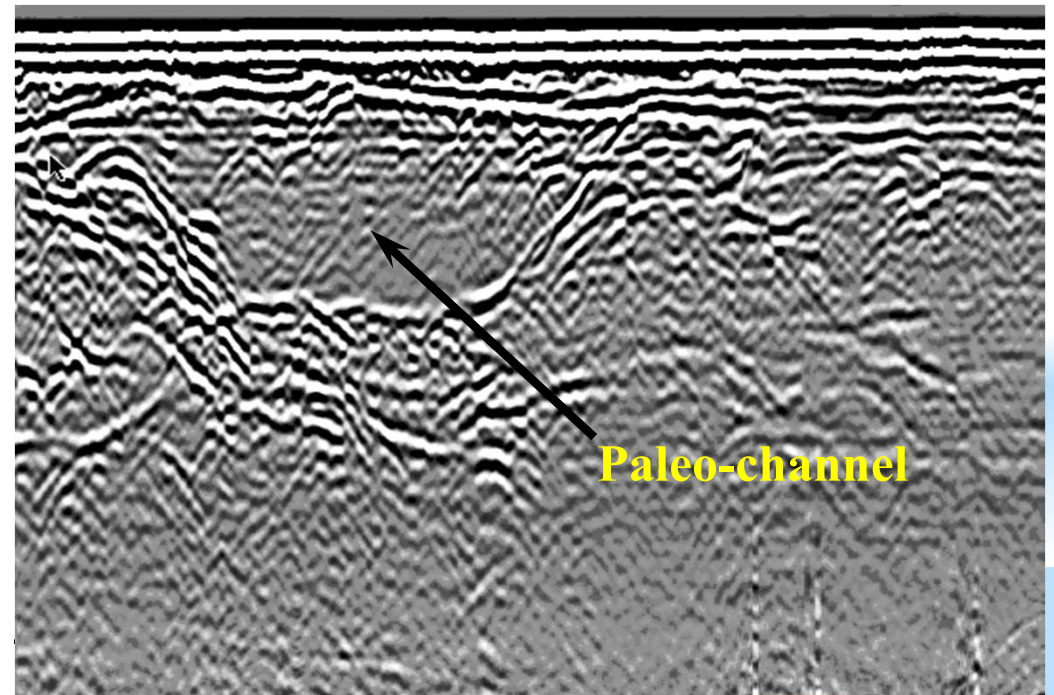


- **Reflectores puntuales:**  
**CABLES y TUBERIAS**
- **Reflectores planares:**  
**PERFILES DE SUELOS**  
**HORMIGONES y TAPAS**

## Reflectores

Los reflectores que se construyen con un GPR pueden dividirse en dos:

- **REFLECTORS PUNTUALES**
- **REFLECTORES PLANARES**





## **Aspectos de interés que afectan la performance del GPR**

- **RESOLUCION DEL GPR**
- **PERMEABILIDAD DIELECTRICA Y CONDUCTIVIDAD**
- **ANTENAS Y APLICACIONES**

# Configuración No-Blindada



Sets de antenas 25, 50, 100 and 200 MHz no blindadas.



Set de antenas de 250 MHz para pozo

# Configuración Blindada

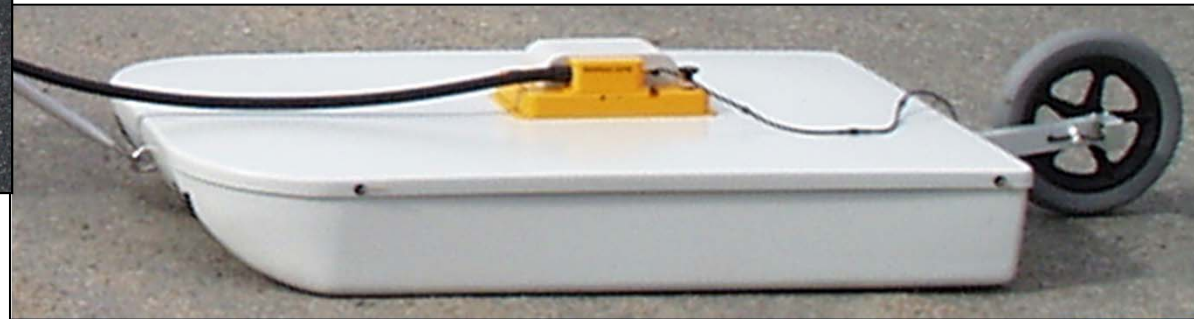


250, 500 & 800 MHz antennas with Shielded Electronics Unit and Survey Wheel  
1000MHz antenna with internal electronics

100, 250, 500, 800 MHz

Interchangeable TX/Rx electronics

1000 MHz stand-alone unit



100 MHz antenna with Shielded Electronics Unit and Survey Wheel

# \* Frecuencia y Resolución

**Frecuencia (MHz)**

**Resolución (m)**

**1600**

**0.005**

**1000**

**0.01**

**800**

**0.02**

**500**

**0.05**

**250**

**0.10**

**100**

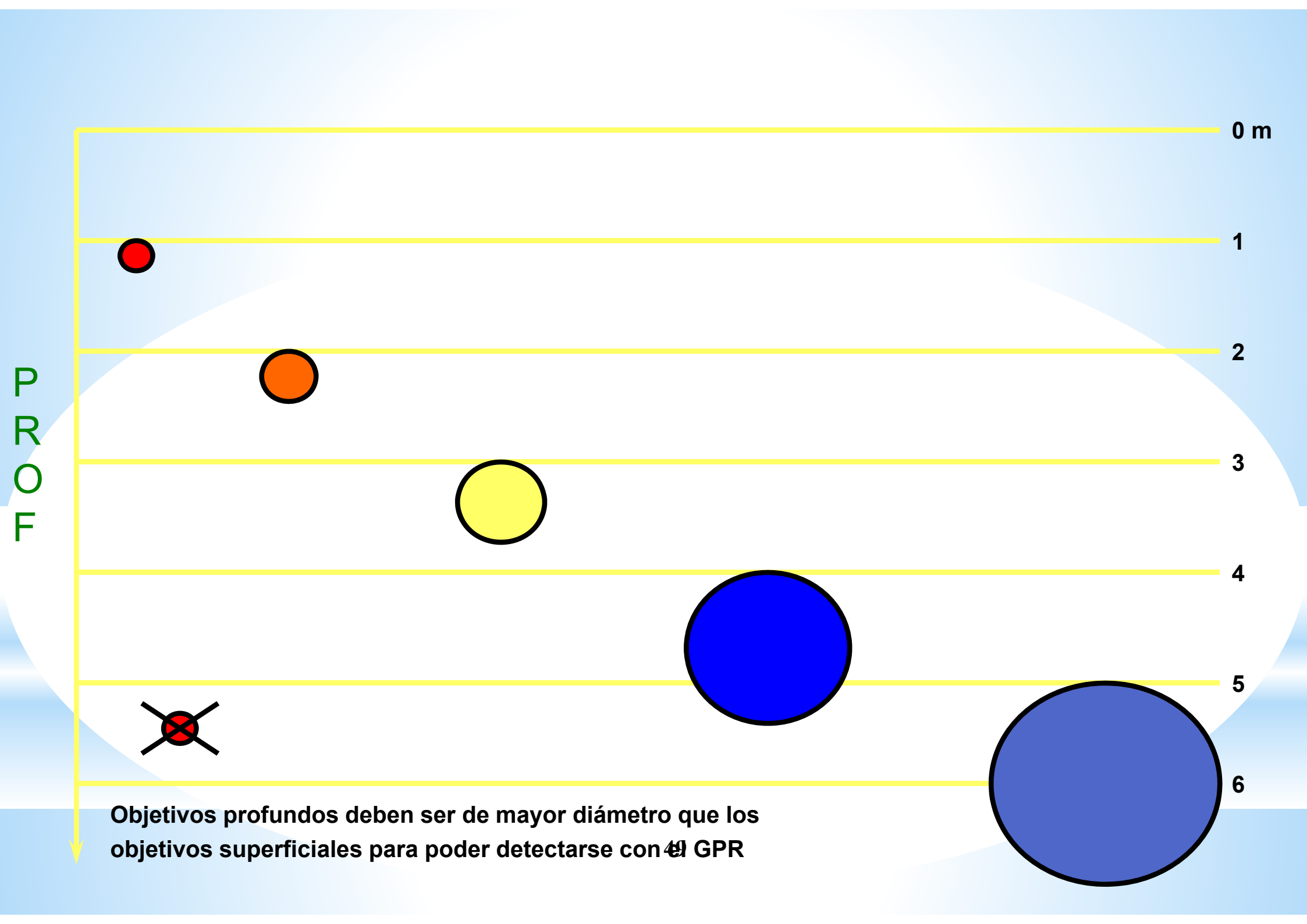
**0.5**

**50**

**0.8**

**25**

**1.5**



0 m

1

2

3

4

5

6

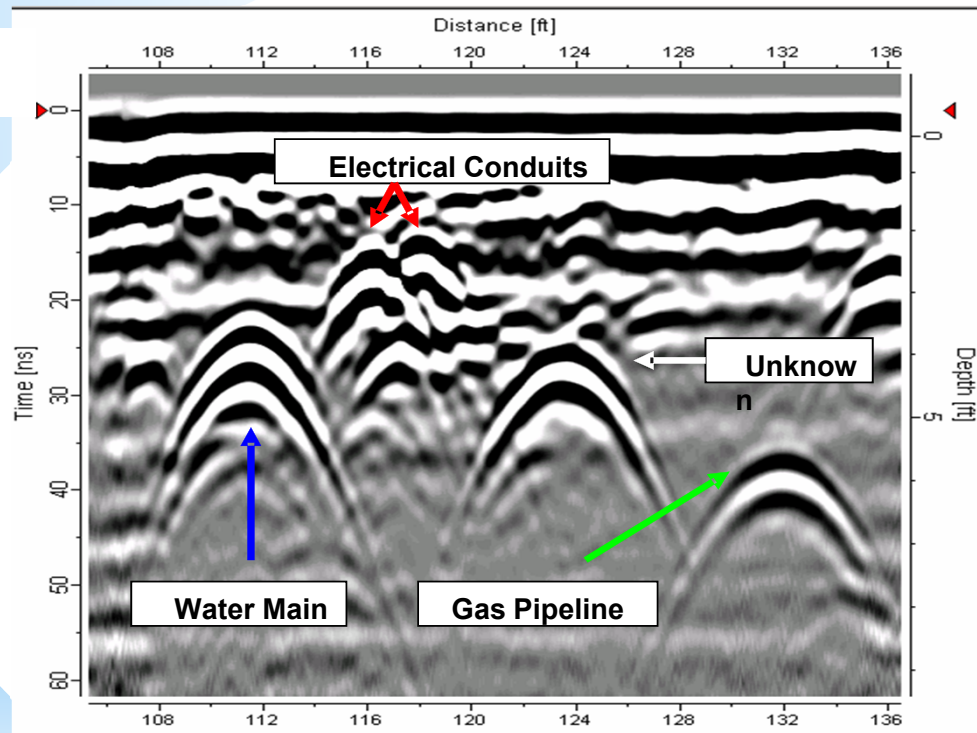
PROF

Objetivos profundos deben ser de mayor diámetro que los objetivos superficiales para poder detectarse con el GPR

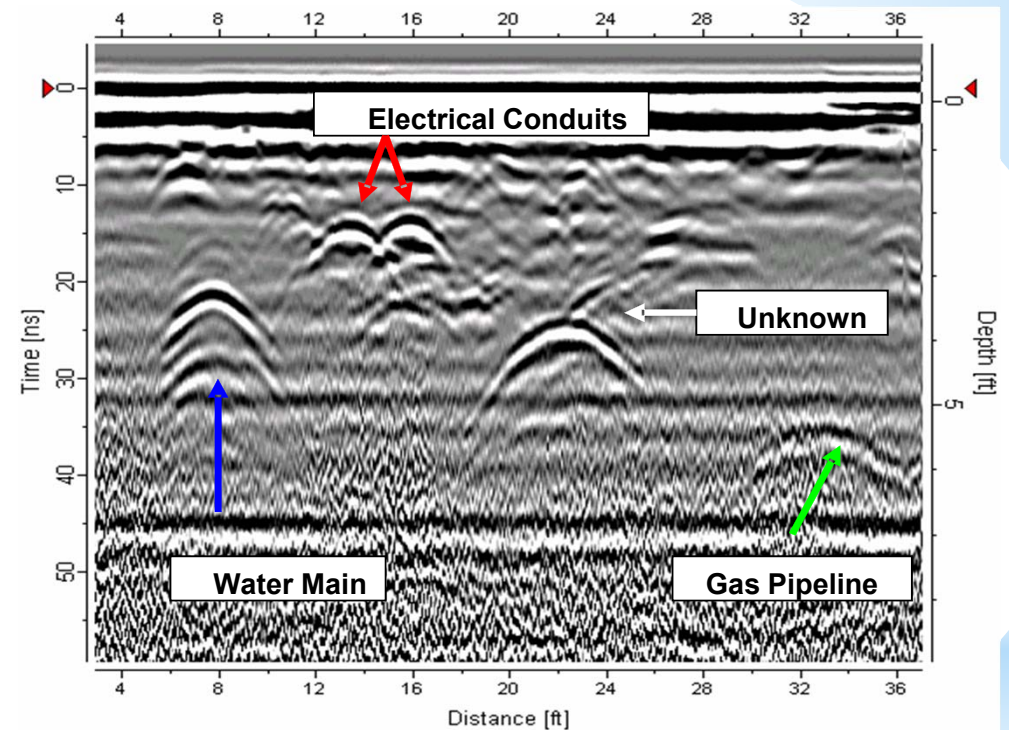


## Ejemplos de un mismo perfil a distintas frecuencias

A) 250 MHz



B) 500 MHz



## \* Frecuencia vs. Resolución

### Frecuencia de la Antena (MHz)

120

500

900

#### ***SUELO***

Longitud de onda (cm) 62.5

15

8

Resolución (cm) 15.6

3.75

2

#### ***BASAMENTO ROCOSO***

Longitud de onda (cm) 92

22

12

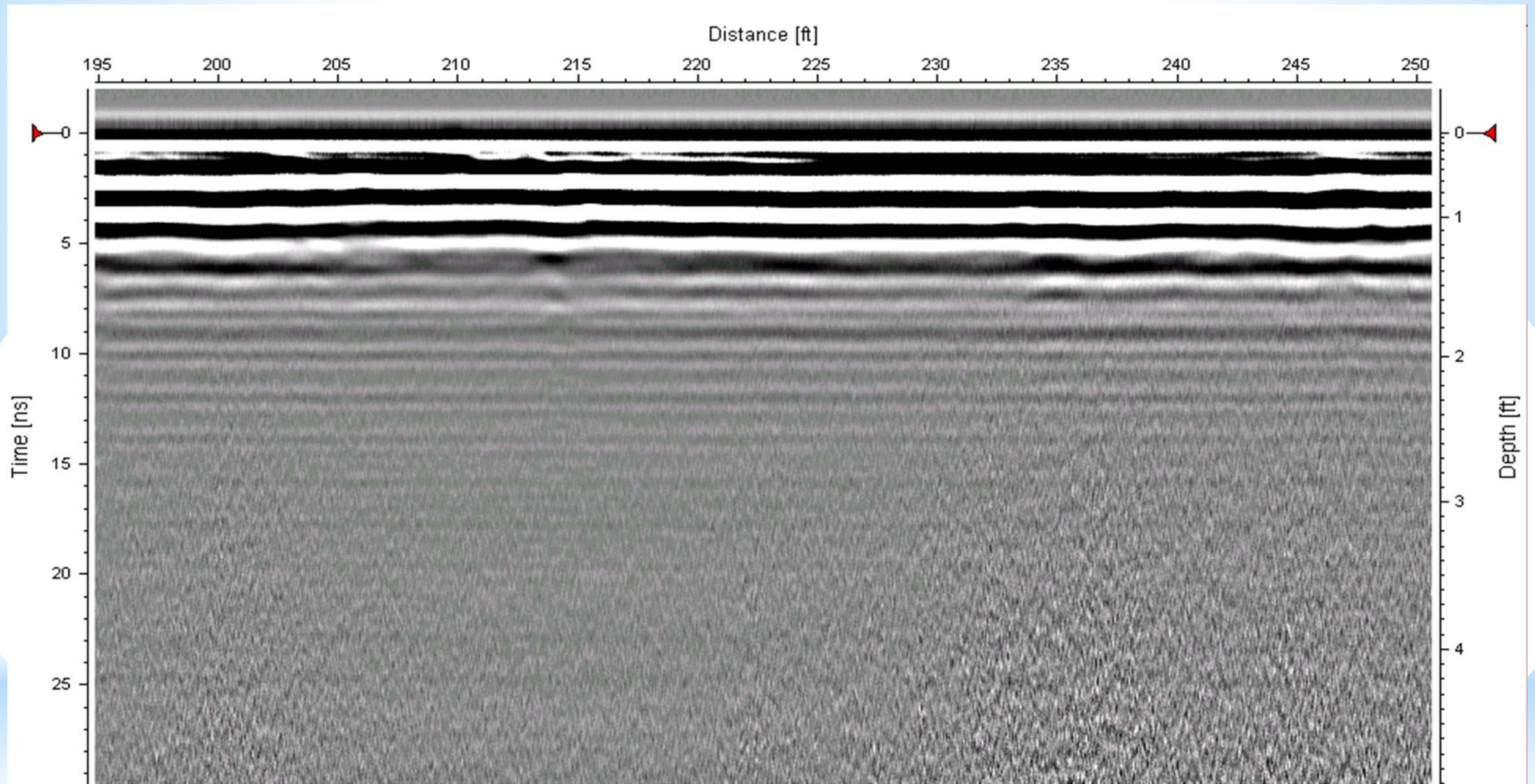
Resolución (cm) 23

5.5

3



## Alta conductividad – malas condiciones de suelo



## Baja conductividad – buenas condiciones de suelo

