

Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas



ÁREA: A
MÓDULO: MECÁNICA DE ROCAS

GEOFÍSICA SÍSMICA

Ponente: Andrés Carbó
Catedrático UCM.
Día: 13/02/07
Hora: 17:00 a 18:00



*Universidad
Complutense
De Madrid*

*Facultad de
C. Geológicas*



MASTER DE ESPECIALIZACIÓN EN TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

Prospección Geofísica Sísmica

**AETOS
Febrero 2006**

Prospección Geofísica

**La parte de la
Geofísica
especializada en el
estudio del subsuelo,
en la zona con
interés económico**

**Geofísica de
Exploración**

**Localización,
estimación de reservas y
caracterización de
minerales y materiales
energéticos. Recursos
hidrogeológicos**

**Engineering
Geophysics**

**Características del
subsuelo que afectan a
las obras de ingeniería**

**Enviromental
Geophysics**

**Investiga las
alteraciones potenciales
o consumadas, en el
subsuelo, como
consecuencia de la
actividad humana.**

**Shallow Geophysics / Near
Surface Geophysics**



CARACTERÍSTICAS GENERALES

- **Métodos no destructivos**
- **Extensivos**
- **Complementarios de los ensayos mecánicos**
- **Aportan información sobre propiedades de los materiales “in situ”**

PROBLEMA INVERSO

- Una causa, origina un efecto
- Un efecto puede estar Originado por varias causas

- CONOCIMIENTOS GEOLÓGICOS
- CALIBRACIÓN CON E. MECÁNICOS
- ADECUACIÓN A LA OBRA



PROSPECCIÓN SÍSMICA

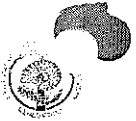
Es el tipo de Prospección que utiliza la transmisión en el subsuelo, de ondas sísmicas generadas artificialmente

Ondas sísmicas

La transmisión de la energía, se produce mediante desplazamientos elásticos de las partículas del medio (i.e. no hay transferencia neta de masa)

Cuando la perturbación sísmica atraviesa un material, la amplitud de la señal disminuye y el medio se deforma elásticamente

Las partículas al ser afectadas por el paso de la perturbación sísmica, desarrollan un movimiento armónico. Y la energía se transmite como un complejo conjunto de movimientos oscilatorios



TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS

ondas de volumen

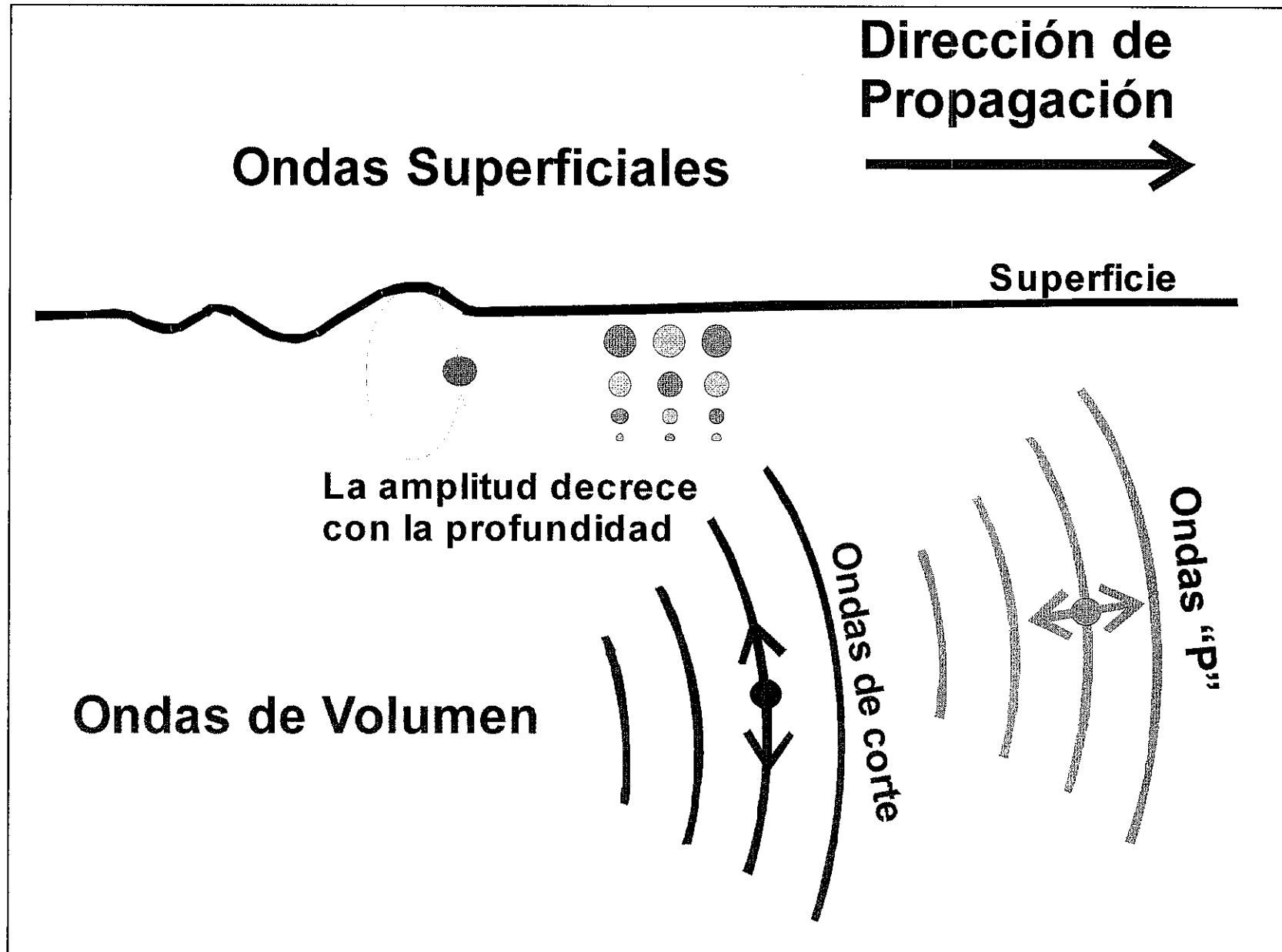
ondas “P” o compresivas

ondas “S” o de cizalla

ondas superficiales

ondas Rayleigh (L_R)

ondas Love



Ondas “P” o Compresivas

- Son las mas rápidas
- Se propagan mediante deformaciones compresivas y extensivas uniaxiales, en la dirección de propagación de la onda, mediante oscilaciones sobre un punto fijo

La relación de la velocidad de las ondas P (V_P) con los módulos de elasticidad es:

$$V_P = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\delta}}$$

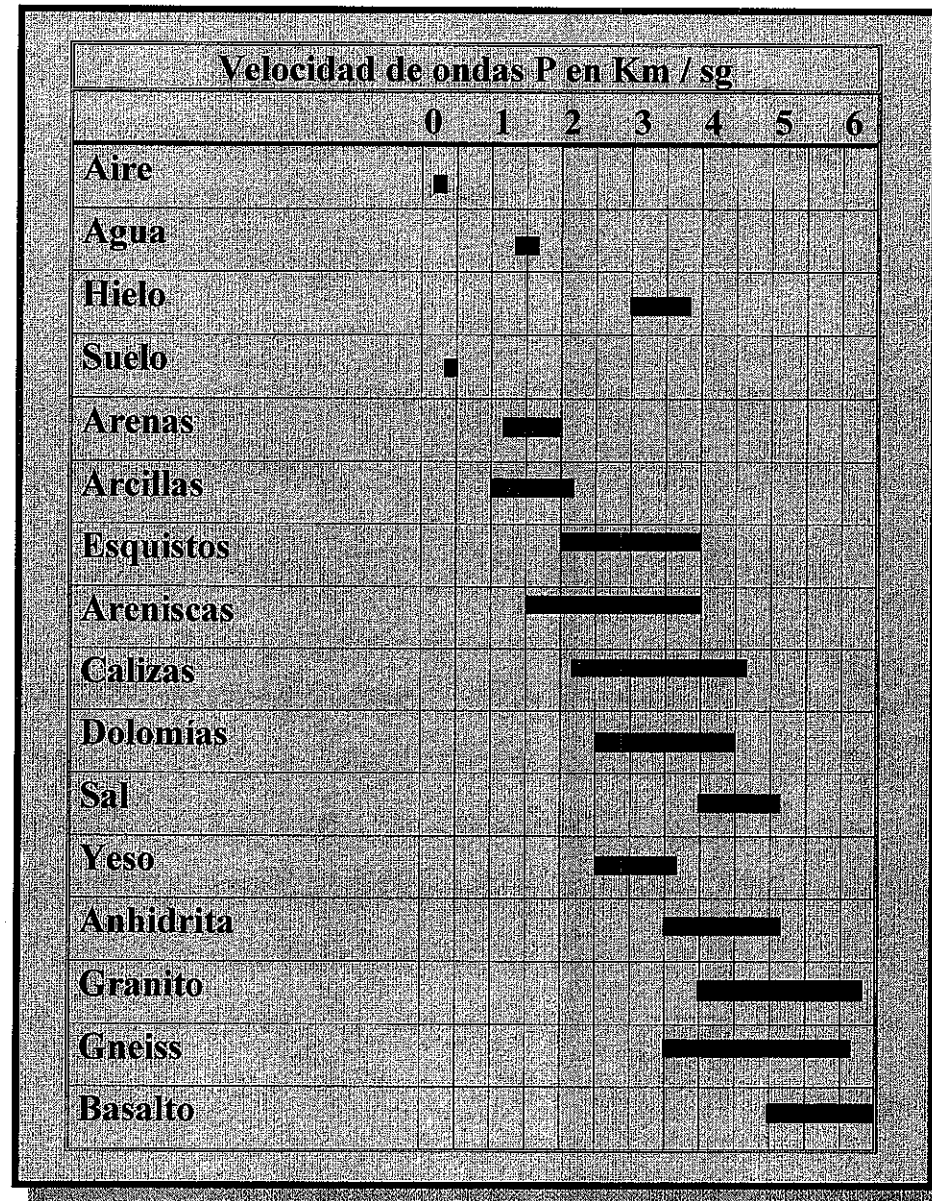
Ondas “S” o de Cizalla

- Son las segundas en llegar
- Se propagan transversalmente al sentido de avance
- Se producen con cambio de forma sin cambios de volumen (def. por *cizalla pura*). Es una oscilación sobre un punto fijo en un plano perpendicular (*ondas plano-polarizadas*).

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\delta(1+\nu)}}$$

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1-\nu)}{(1-2\nu)}}$$

CARACTERÍSTICAS DESDE LAS VELOCIDADES



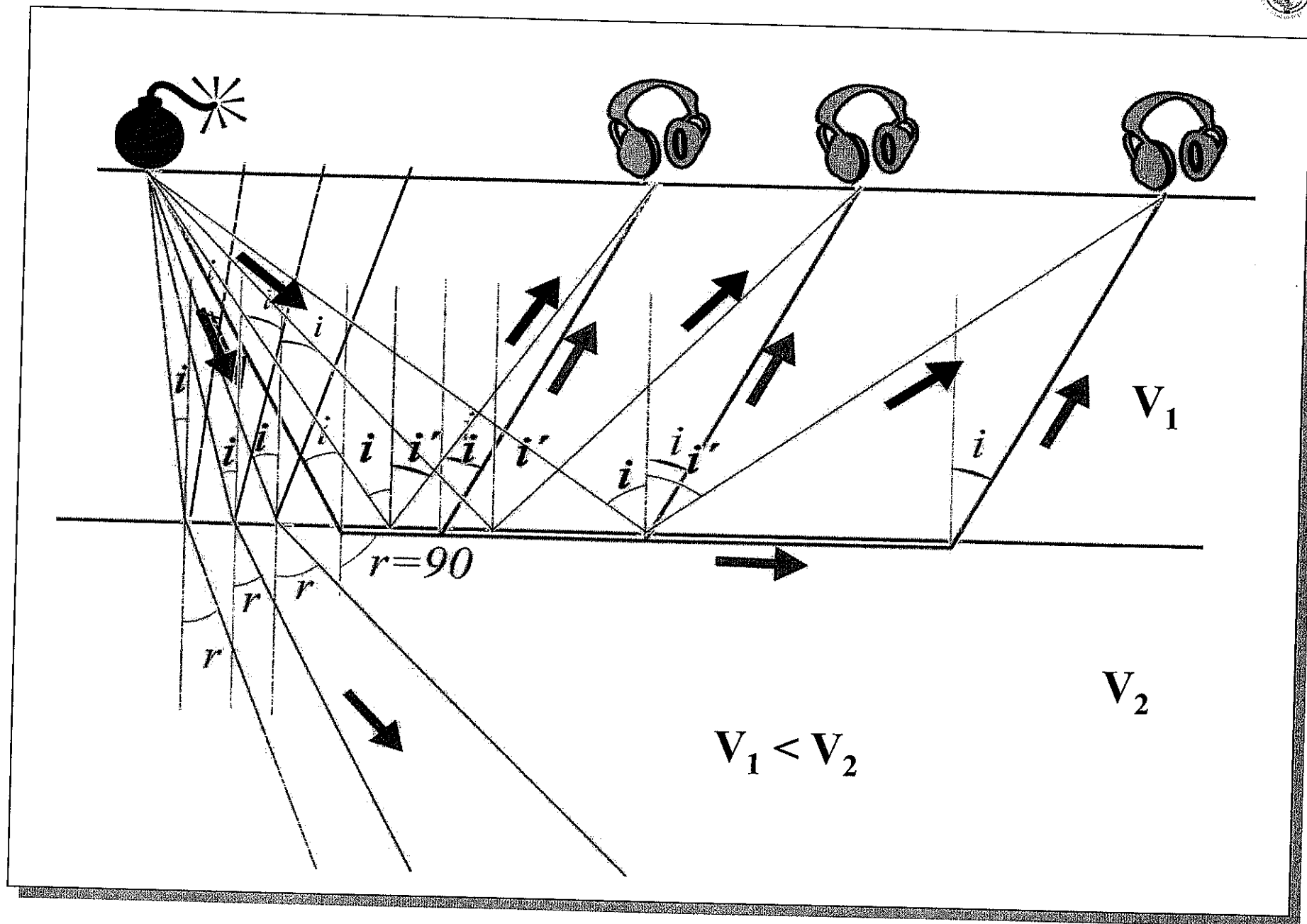


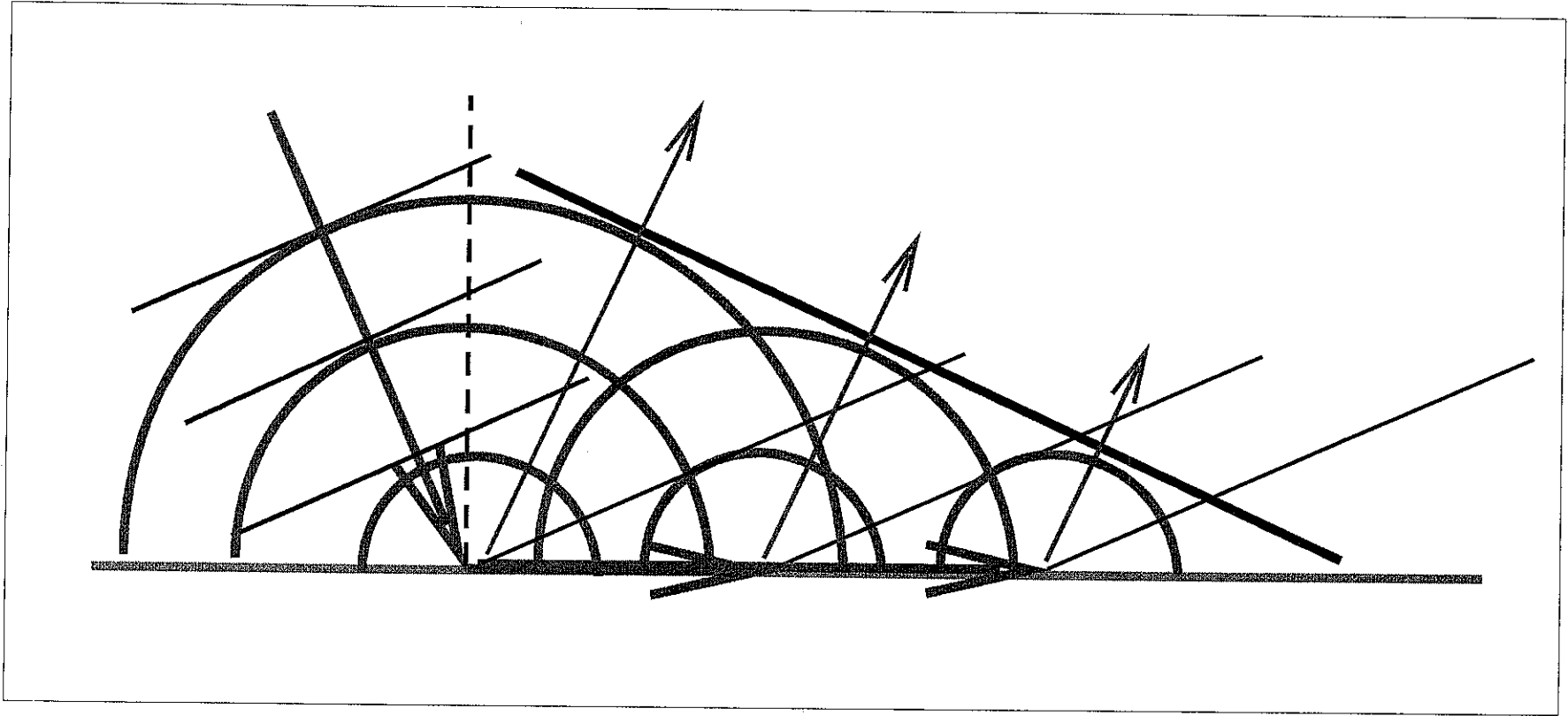
Ondas superficiales

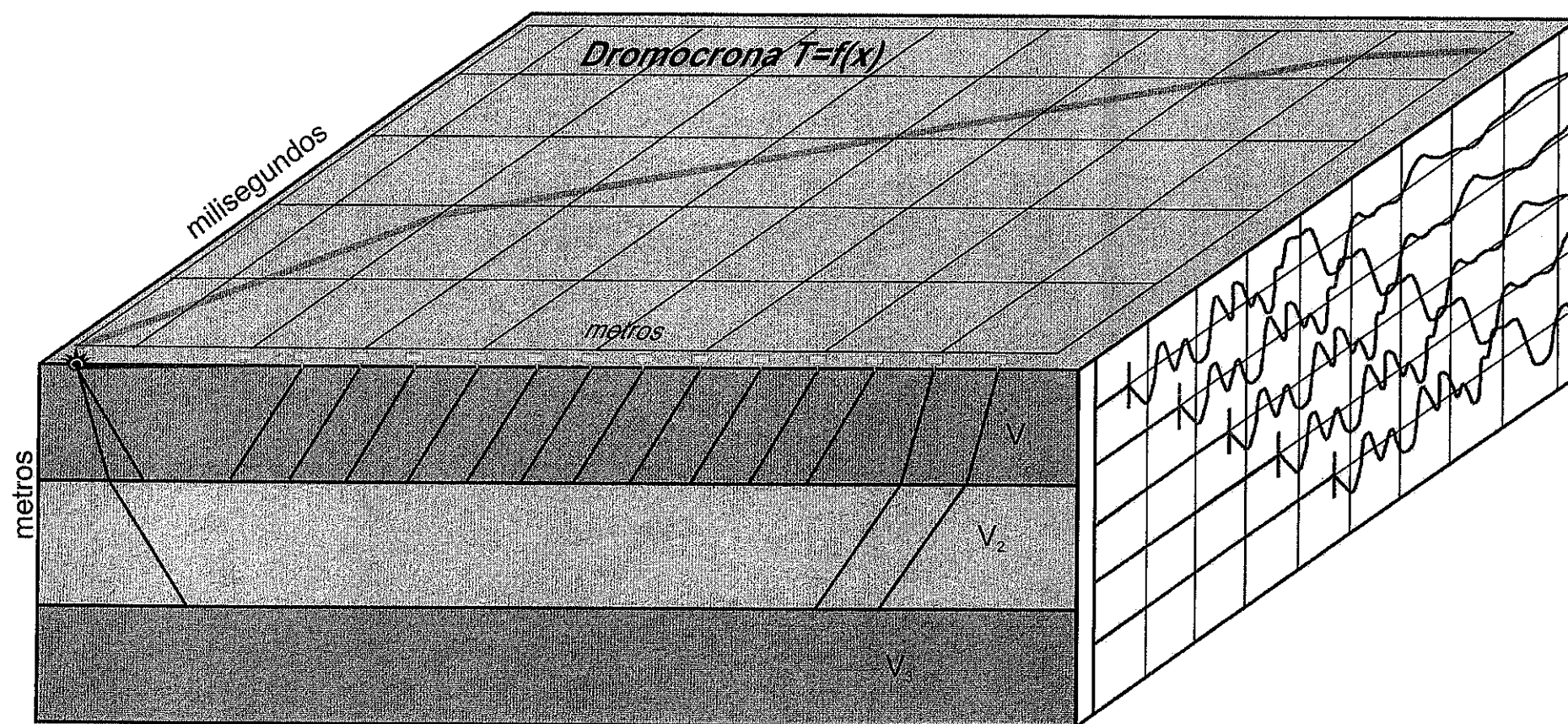
- Se transmiten debido a que el medio presenta una superficie libre
- Se aprecian cerca de la superficie
- Su velocidad de propagación es menor que las de las ondas S, y su amplitud decrece con la profundidad.

Ondas Rayleigh (L_R)

- Su V es baja y su penetración es $f(\lambda)$.



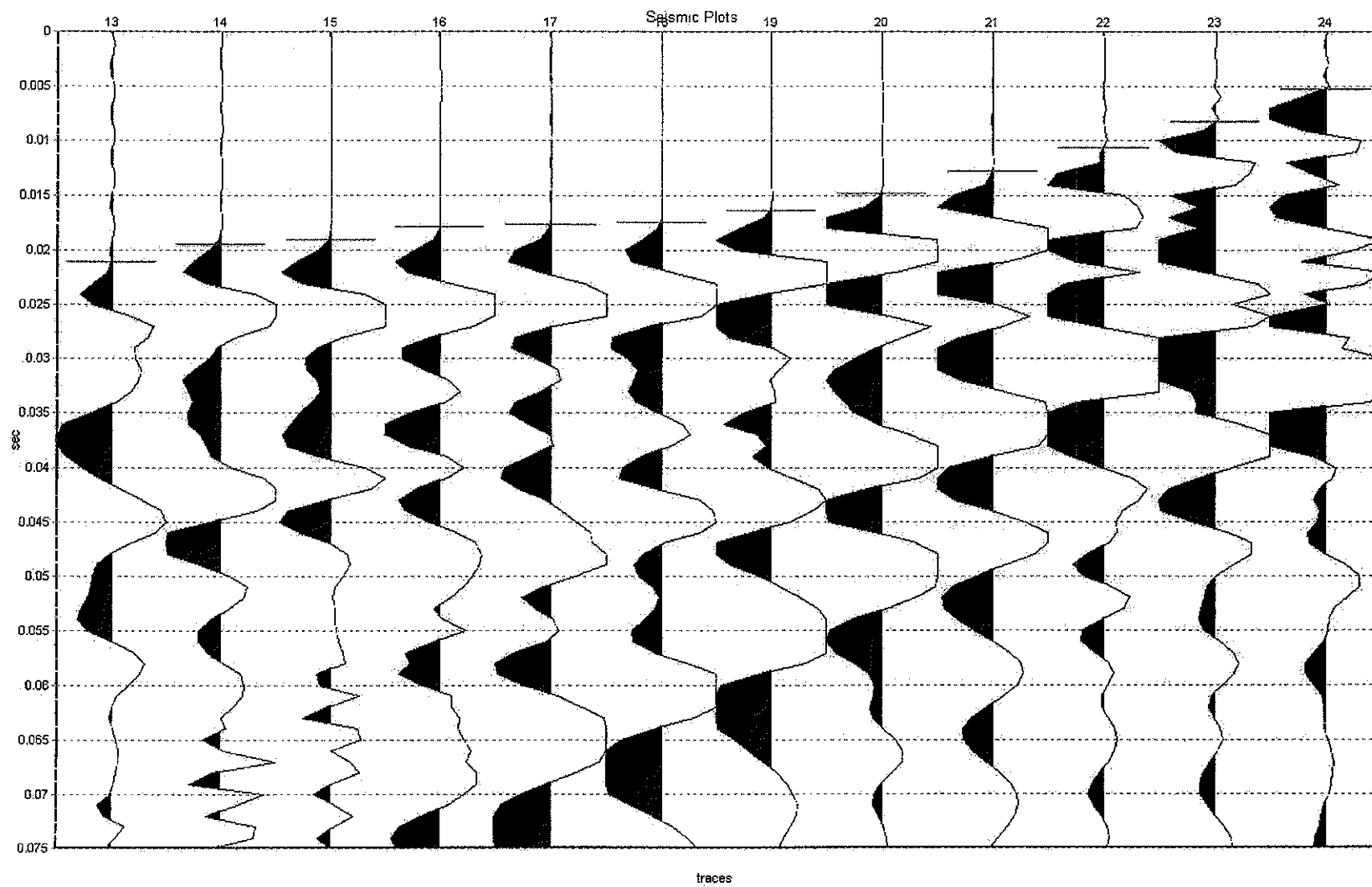


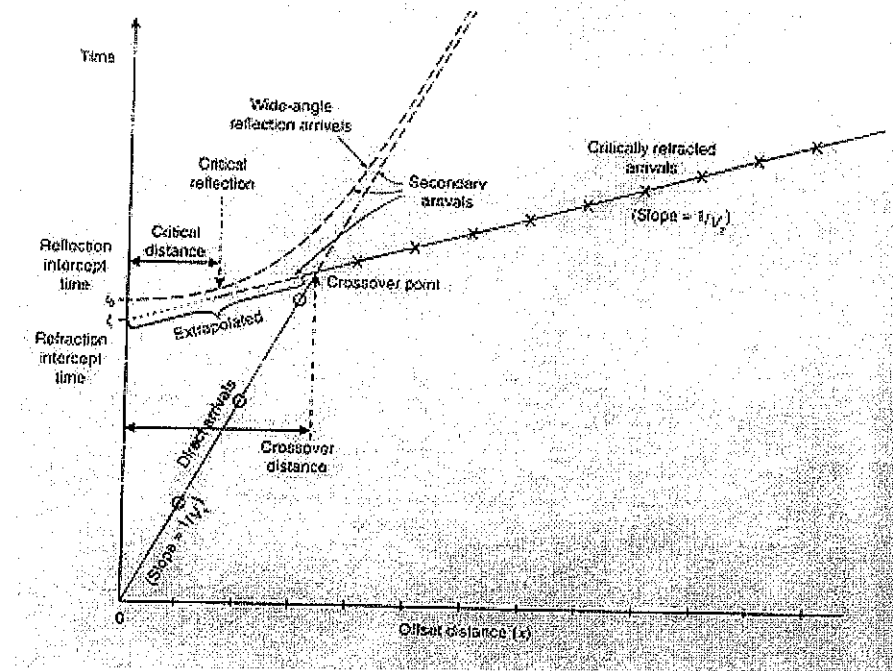


$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\sin i = \frac{V_1}{V_2}$$

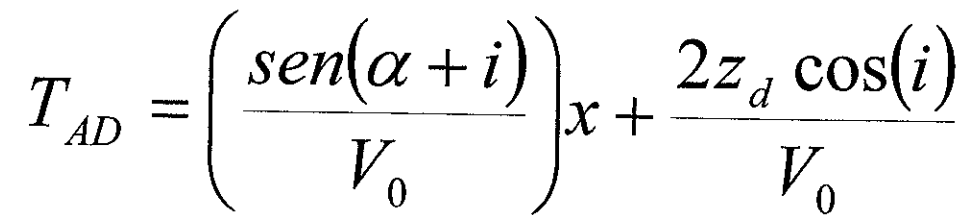
$$V_1 < V_2 < V_3$$





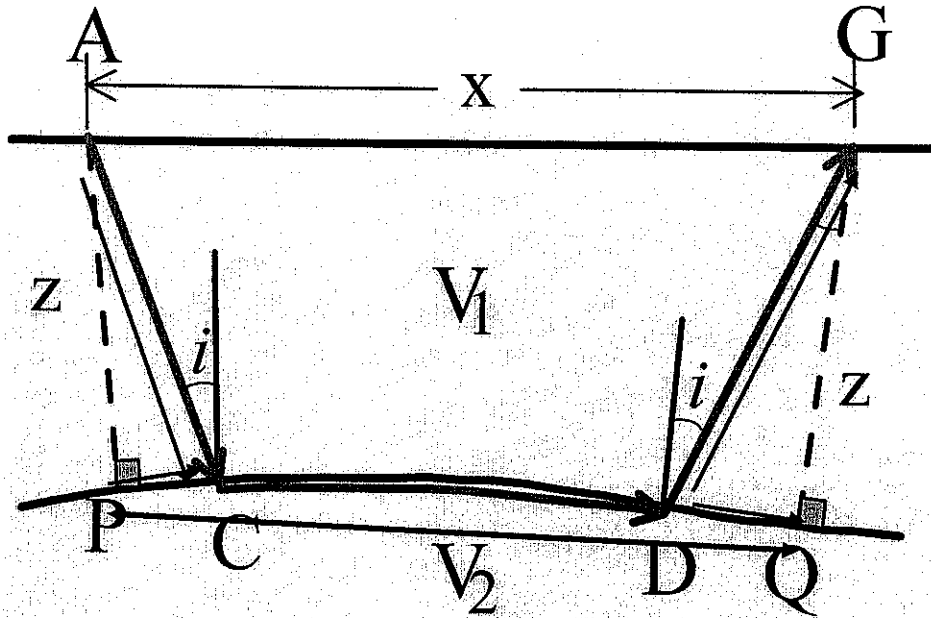
$$t = \frac{1}{V_2} x + \frac{2d}{V_1 \cos(i)} - \frac{2d \tan(i)}{V_2}$$

$$t = \frac{1}{V_2} x + \frac{2d \cos(i)}{V_1}$$



$$T_{AD} = \left(\frac{\text{sen}(i - \alpha)}{V_0} \right) x + \frac{2z_u \cos(i)}{V_0}$$

DELAY - TIME



$$T_{PQ} \approx \frac{X}{V_2}$$

$$\partial_S + \partial_G = T_{AG} - \frac{X}{V_2}$$

$$\partial_t = T_{AG} - T_{PQ}$$

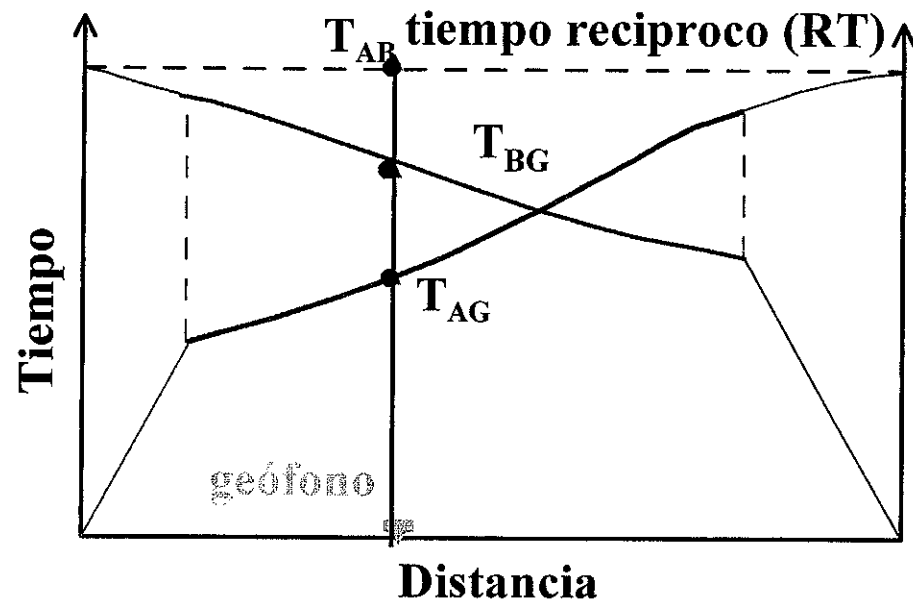
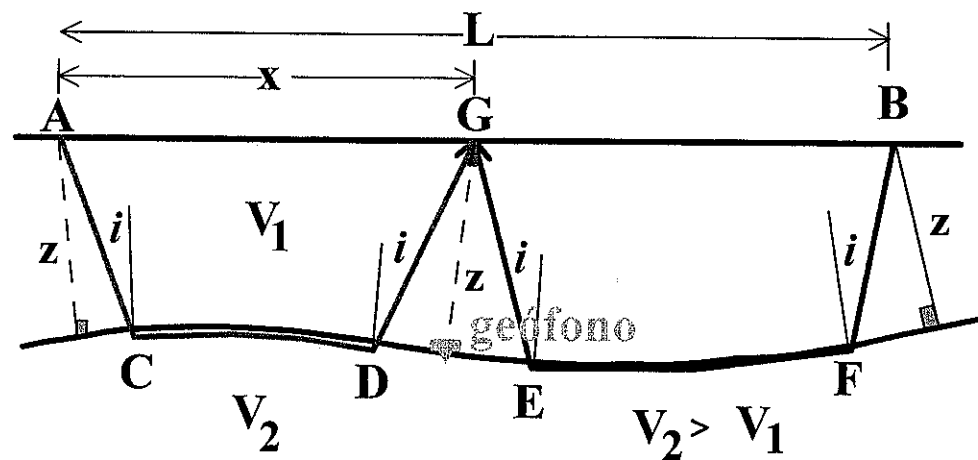
$$T_{AG} = \frac{(AC + DG)}{V_1} + \frac{(CD)}{V_2}$$

$$T_{PQ} = \frac{(PQ)}{V_2} = \frac{(PC + CD + DQ)}{V_2}$$

$$\partial_t = \left(\frac{AC}{V_1} - \frac{PC}{V_2} \right) + \left(\frac{DG}{V_1} - \frac{DQ}{V_2} \right)$$

$$\partial_t = \partial_S + \partial_G$$

$$T_{AG} = \frac{X}{V_2} + \partial_S + \partial_G$$



Hagedorn

$$T_{AG} = \frac{X}{V_2} + \partial_S + \partial_G$$

$$T_{BG} = \frac{(L-X)}{V_2} + \partial_G + \partial_{SB}$$

$$T_{AB} = \frac{L}{V_2} + \partial_S + \partial_{SB}$$

“plus”

$$T^+ = T_{AG} + T_{BG} - T_{AB}$$

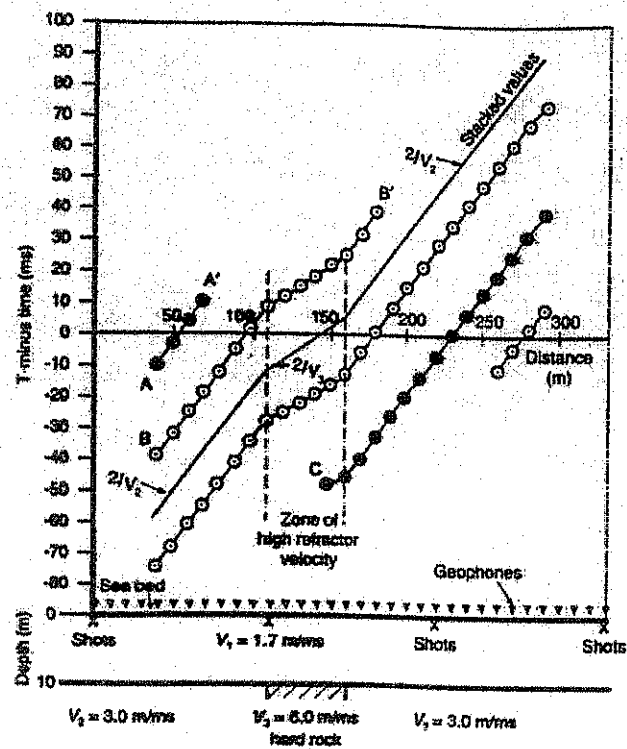
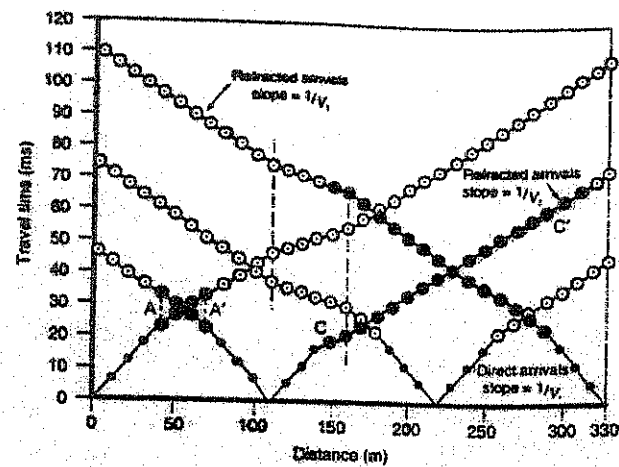
$$T^+ = 2\partial_G = 2\left(\frac{DG}{V_1} - \frac{DO}{V_2}\right) \text{sen}(i) = \frac{V_1}{V_2}$$

$$DG = \frac{Z_G}{\cos(i)} \quad DO = Z_G \tan(i)$$

$$T^+ = \frac{2Z_G \cos(i)}{V_1}$$

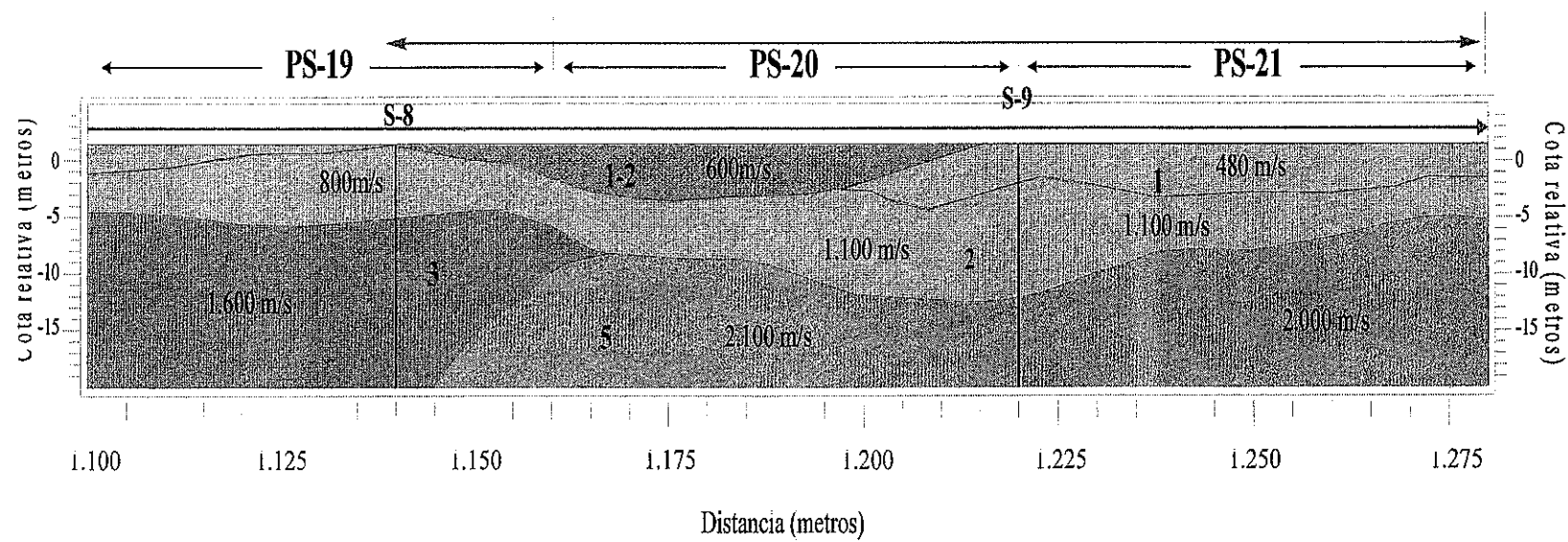
“minus”

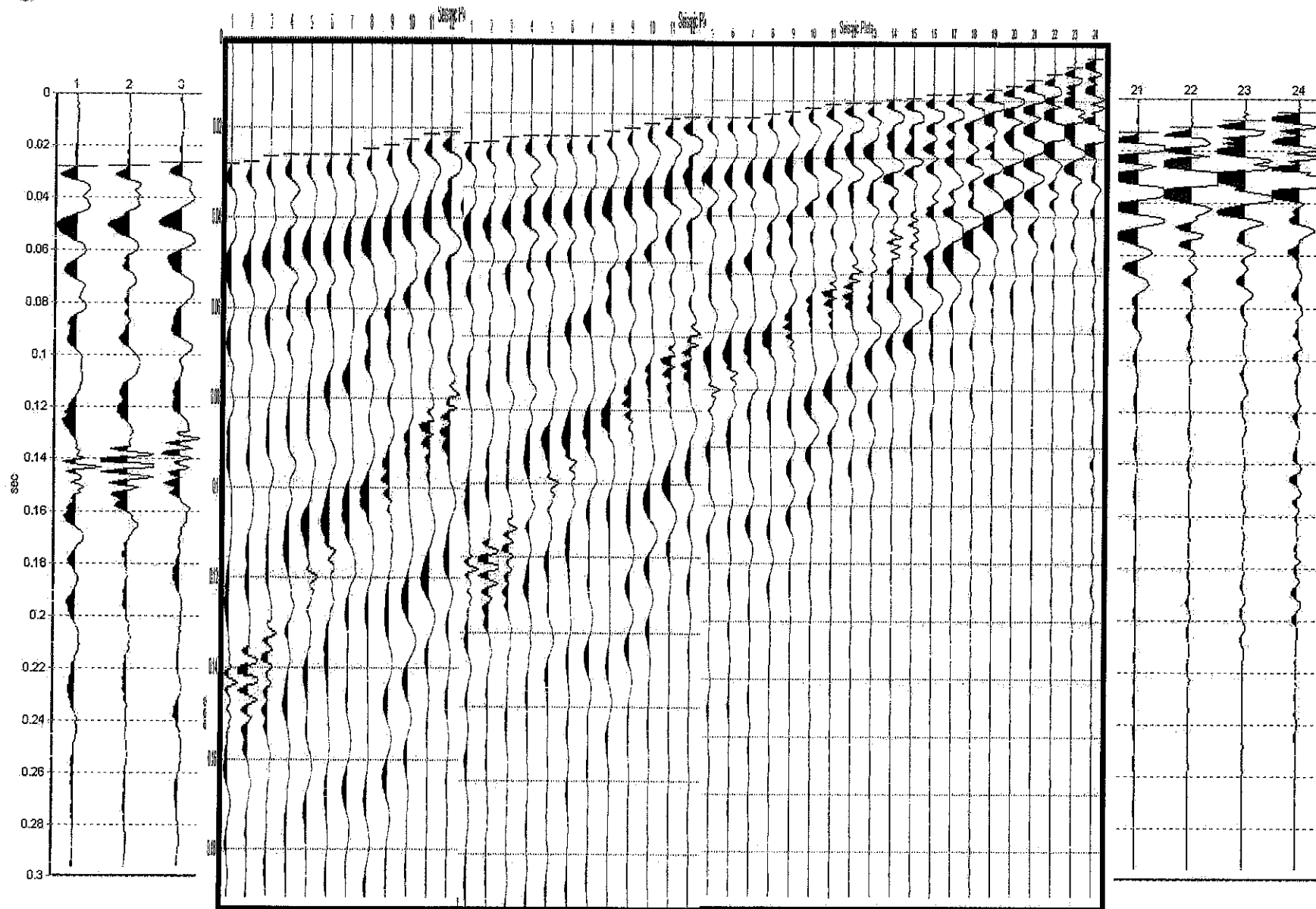
$$T^- = T_{AG} - T_{GB} = \frac{(2X-L)}{V_2} + \partial_S + \partial_{SB}$$

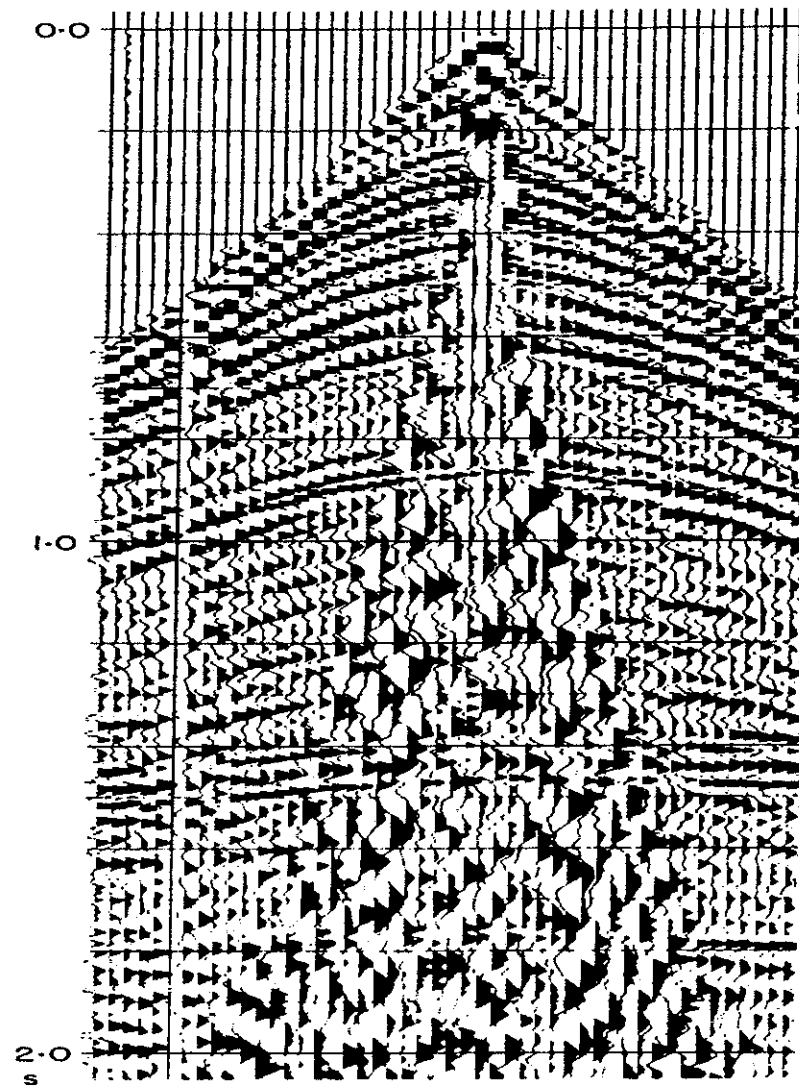


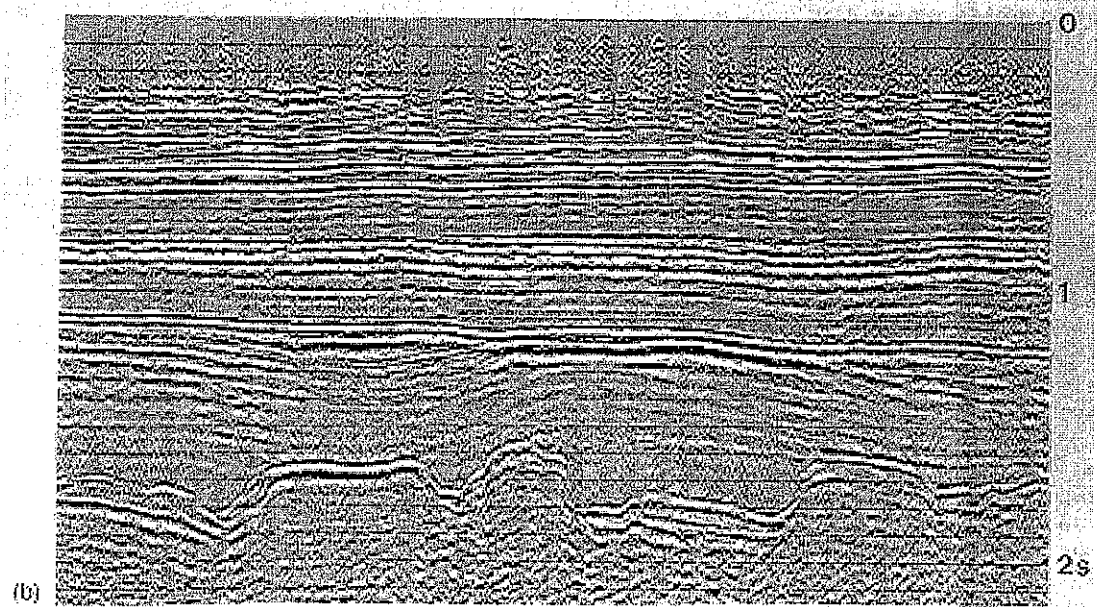
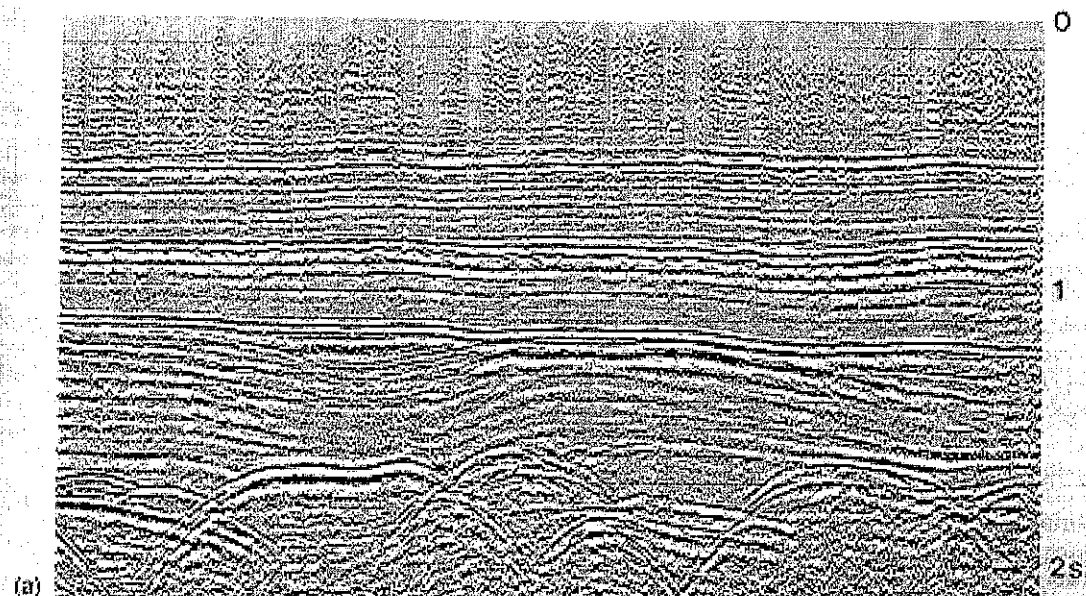
PK- 46+360

PK- 46+540







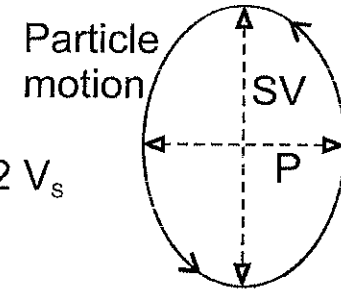




EL MÉTODO DE REFRACCIÓN POR MICROTREMOR (SÍSMICA PASIVA)

INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA EN ZONAS URBANAS

Raleygh wave (Lr)

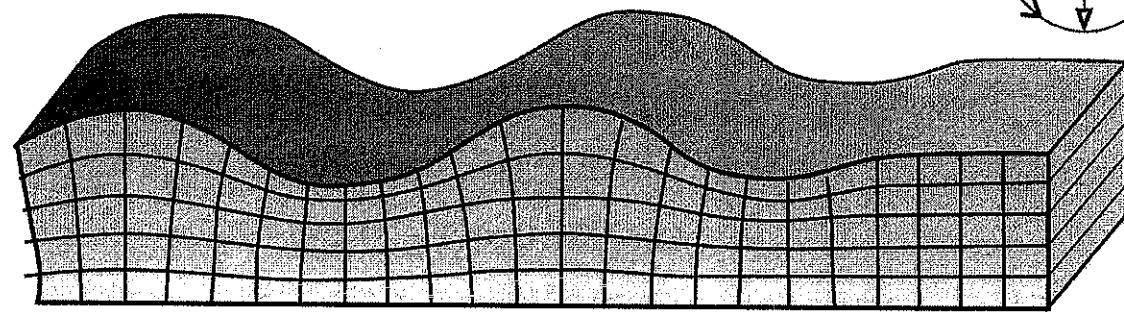


$$V_{LR} = 0.92 V_s$$

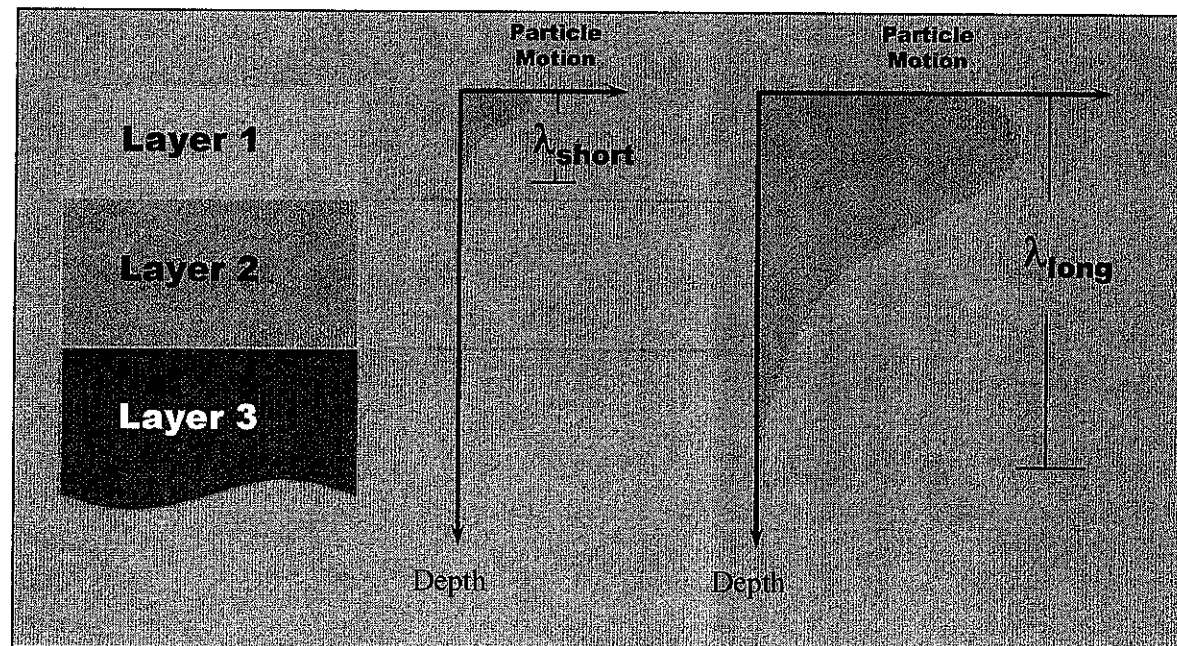
Direction of propagation

$$V_P = \sqrt{\frac{K + (4/3)\mu}{\rho}}$$

Depth



$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$





REFRACTION MICROTREMOR (REMI)



BASADO EN DOS IDEAS:

- LOS EQUIPOS TRADICIONALES (V_p y V_s) REGISTRAN ADEMÁS ONDAS SUPERFICIALES HASTA 2 Hz
- LA TRANSFORMADA (slowness/frecuencia) DE UN MICROTREMOR, SEPARA LAS ONDAS RALEYGH DE LAS OTRAS FASES

FUNDAMENTO:

- UTILIZA LA DISPERSIÓN DE LAS ONDAS RALEYGH

OBJETIVO:

- CARACTERIZAR EL SUBSUELO POR LA ESTIMACIÓN DE VR

RESULTADO:

- PERFILES VERTICALES DE VELOCIDAD PARA CADA DISPOSITIVO





VENTAJAS



IMPLANTACIÓN

- EL RUIDO NATURAL ES LA SEÑAL. APLICACIÓN EN ZONAS URBANAS
- OBTIENE INFORMACION BAJO OBRAS DE FABRICA (LOSAS)

INSTRUMENTALES

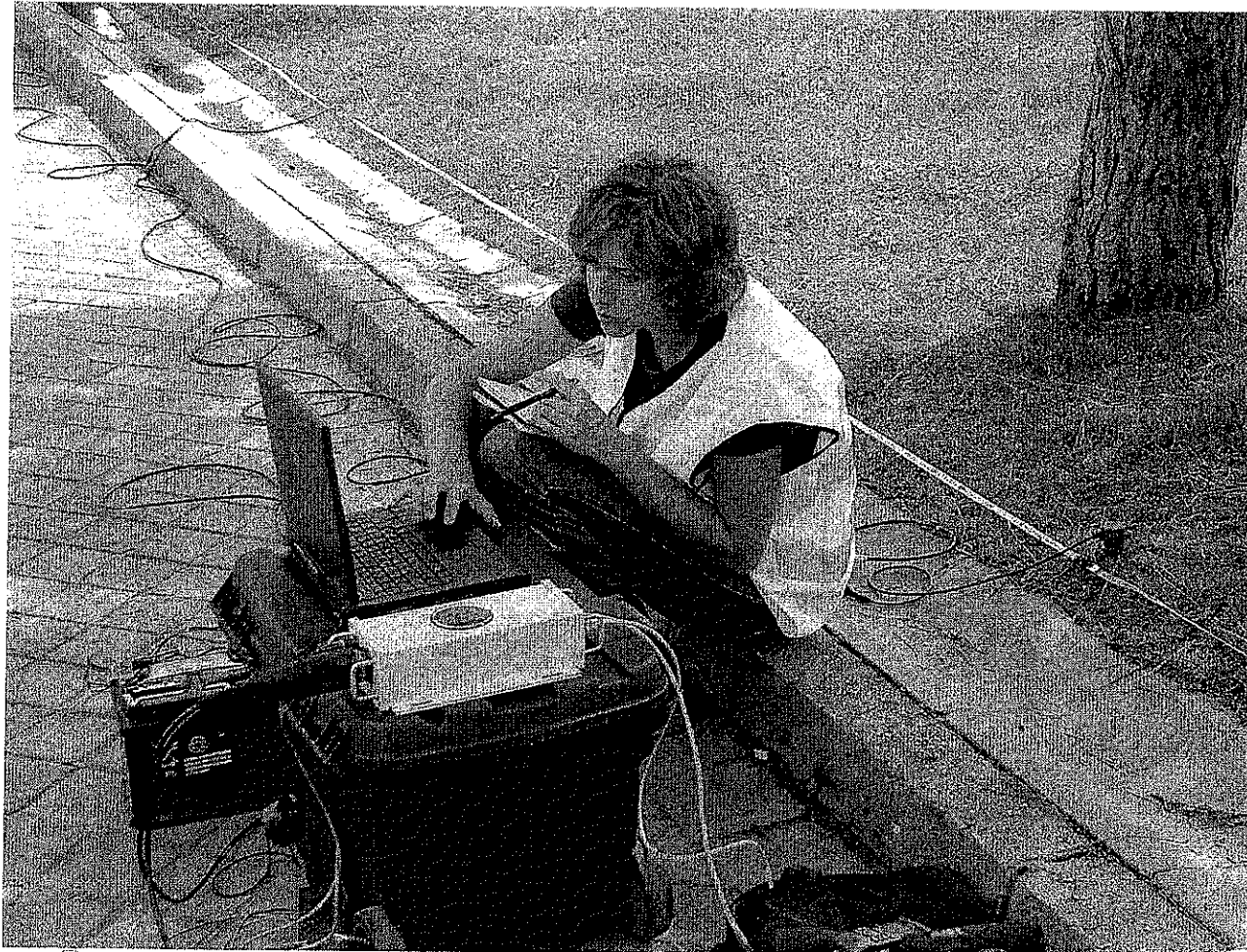
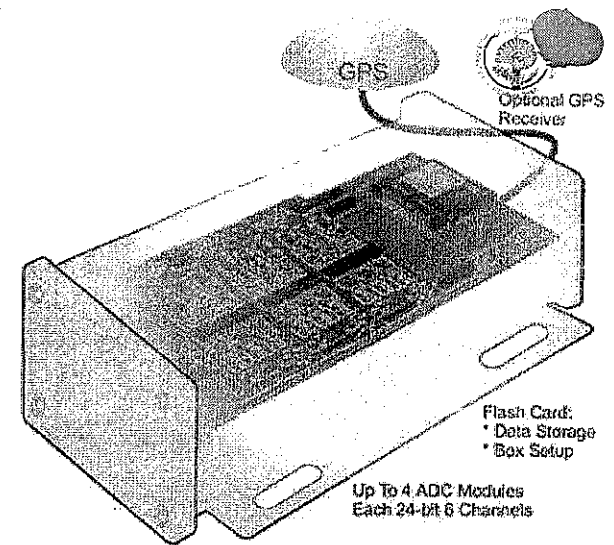
- SE USA EL MISMO EQUIPO QUE EN REFRACCIÓN CONVENCIONAL
- NO HAY QUE GOLPEAR

RESULTADOS

- SE OBTIENE V_{RALEYGH} / V_s
- ALTA SENSIBILIDAD CON POCO CONTRASTE DE VP
- COMBINADO CON REFRACCIÓN CLÁSICA, SE OBTIENEN MÓDULOS DINÁMICOS FIABLES (ZONIFICACIÓN INMEDIATA)
- GRAN PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN (hasta 100 m)

INSTRUMENTACIÓN

SISMÓGRAFO DE 24 CANALES CON 24 BITS
2 LINEAS DE 12 GEÓFONOS
24 GEÓFONOS 10 Hz 0 4.5 Hz
PC PORTÁTIL



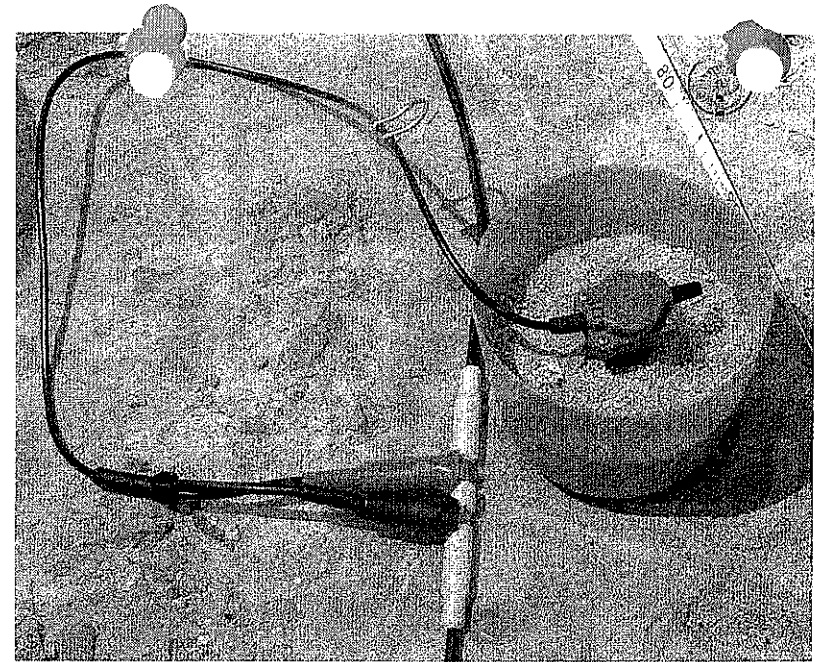
DISPOSITIVO EN CAMPO

POSICIÓN SIMÉTRICA U ORTOGONAL DE LAS ALAS (EN FUNCIÓN DEL RUIDO

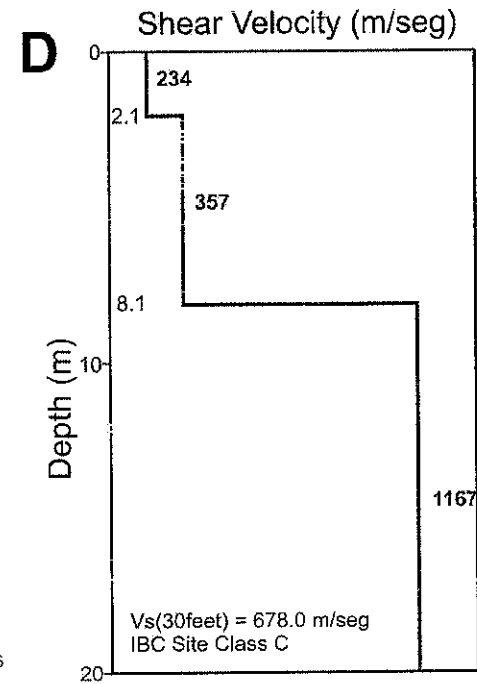
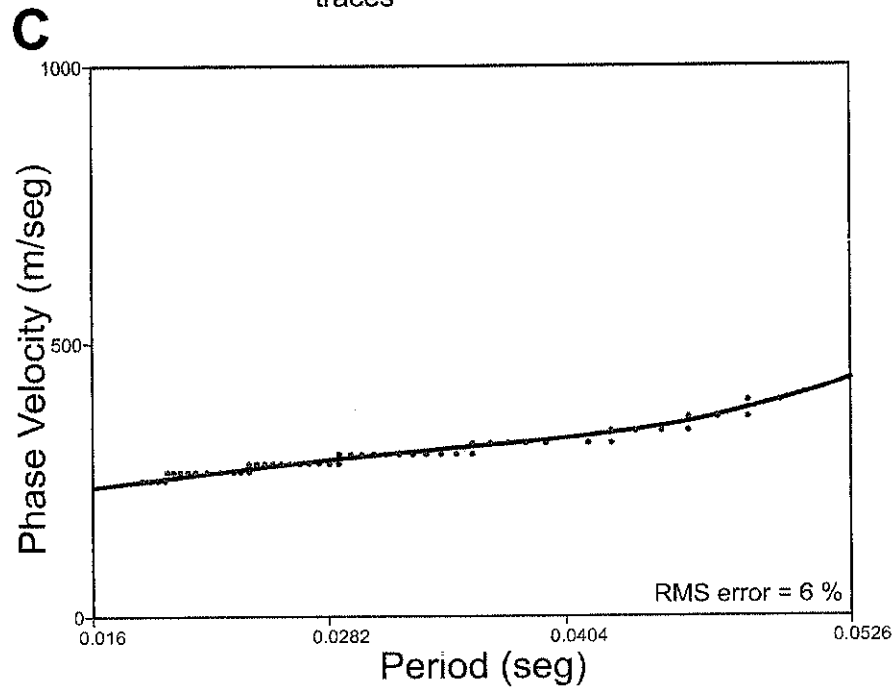
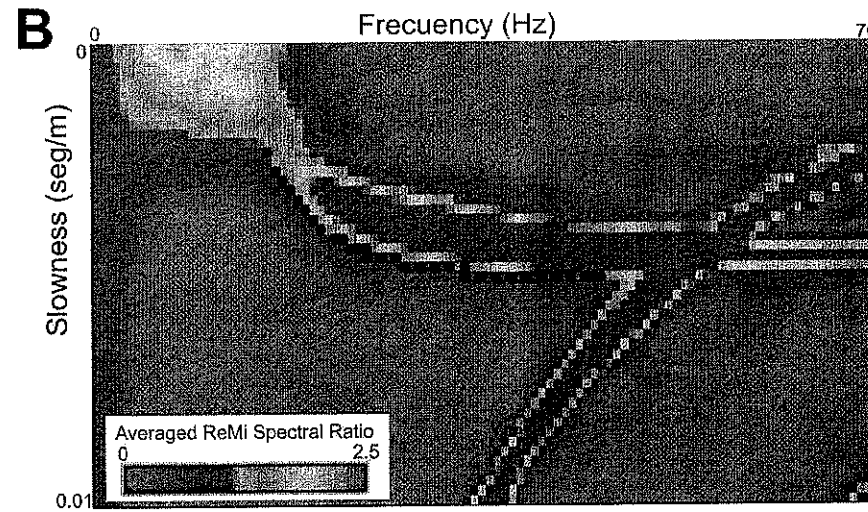
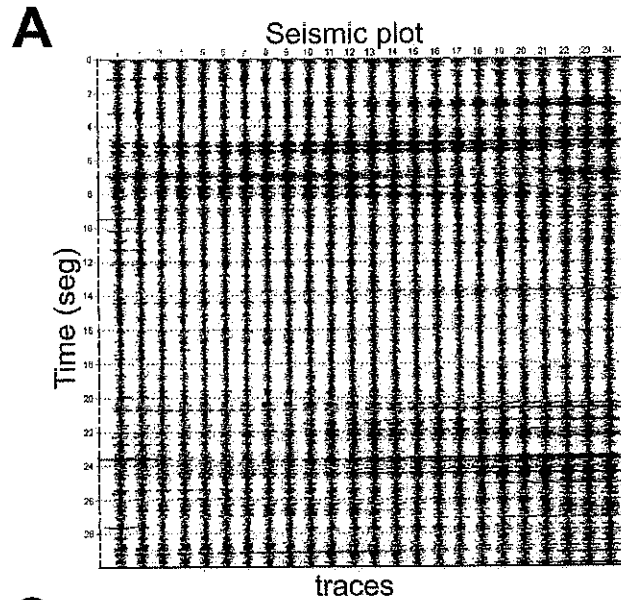
ADQUISICIÓN DE REGISTROS EN VENTANAS DE 30 SEG

INTERVALO DE MUESTREO, 2 mSEG

SEPARACIÓN ENTRE GEÓFONOS (2 O 5 m)



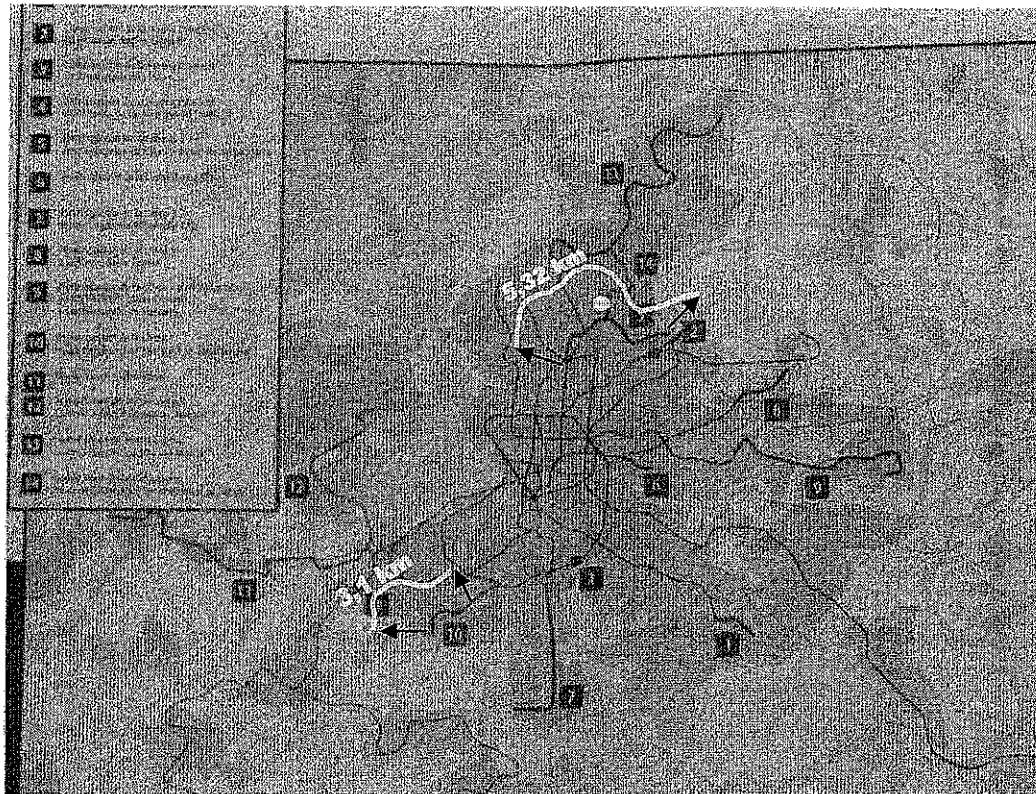
PROCESADO



IBC TABLE 15.1.1: Site Class Definitions

Site class	Soil profile name	Average properties in top 30m, per section 1615.1.5		
		Soils shear wave velocity V_s (m/s)	Standard penetration resistance, N	Soil undrained shear strength, S_u (psf)
A	Hard Rock	$V_s \geq 1524$	Not applicable	Not applicable
B	Rock	$762 < V_s < 1524$	Not applicable	Not applicable
C	Very dense soil & soft rock	$365.7 < V_s < 762$	$N > 50$	$S_u > 2000$
D	Stiff soil profile	$182.9 < V_s < 365.7$	$15 < N < 50$	$1000 < S_u < 2000$
E	Soft soil profile	$V_s < 182.9$	$N < 15$	$S_u < 1000$
E	-	Any profile with more than 10 feet of soil having the following characteristic: 1. Plasticity index $PI > 20$ 2. Moisture content $w > 40\%$ 3. Undrained shear strength < 1000		

APLICACION AL "METRO" DE MADRID



Km de red actual	226,9
Estaciones	190
Líneas	12+Ramal
Ampliación (2003/2007)	92,38

INVESTIGACIONES REALIZADAS POR EL GRUPO CON REMI

- Ampliación Líneas 1 y 4
- Ampliación Línea 11
- Cocheras

AMPLIACIÓN L1 Y 4

- 80 Implantaciones
- Entre 10 y 14 registros de 30 sg en cada una
- 28 Sondeos mecánicos

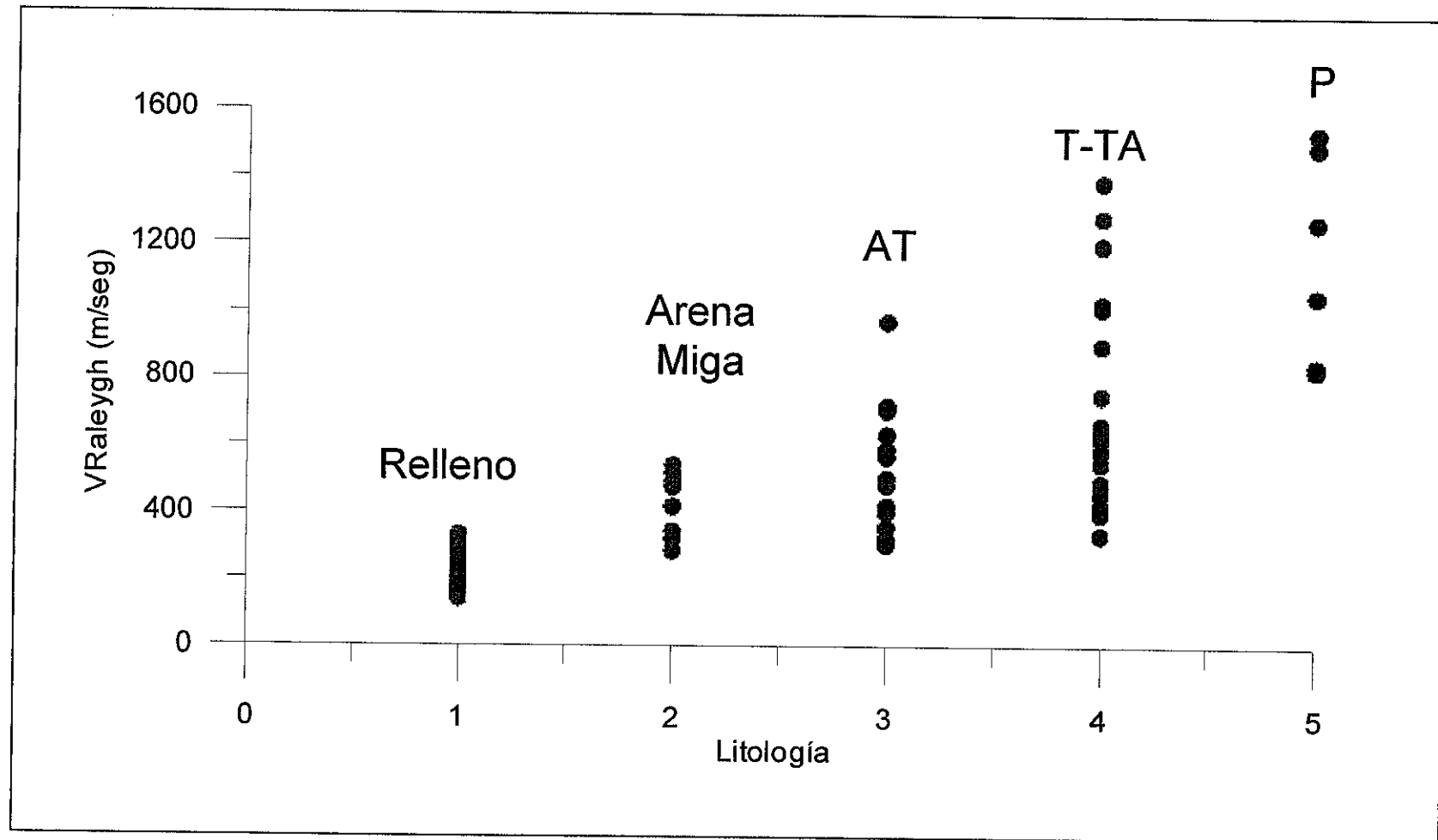
AMPLIACIÓN L11

- 40 Implantaciones
- 26 Sondeos mecánicos

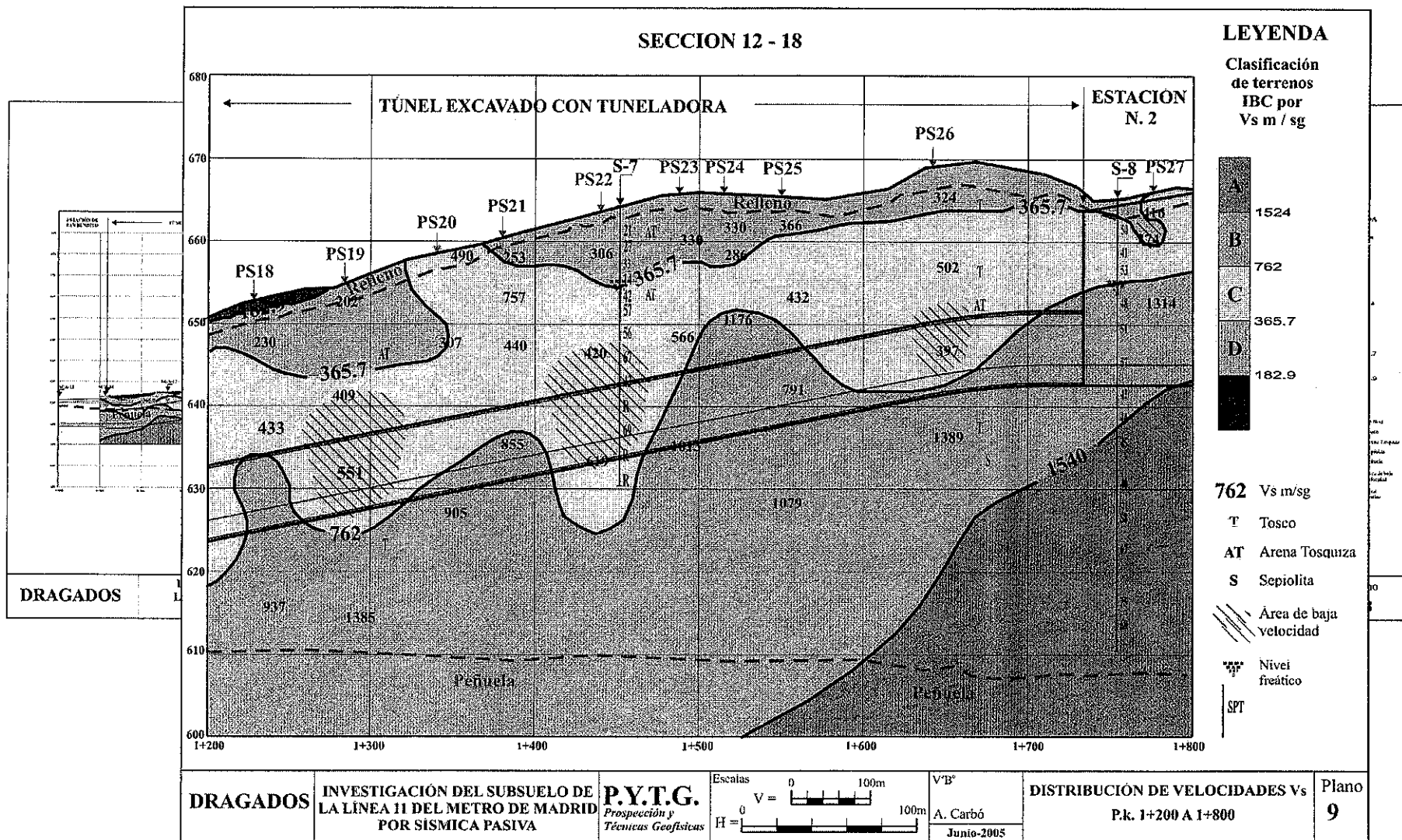
**Sondeos mecánicos con: SPT; Clasif.Casagrande; Dens.Seca;
Compres.Simple; Nivel freático**

Relación V_{Raleygh} versus Litología

(Línea 11 y cocheras)



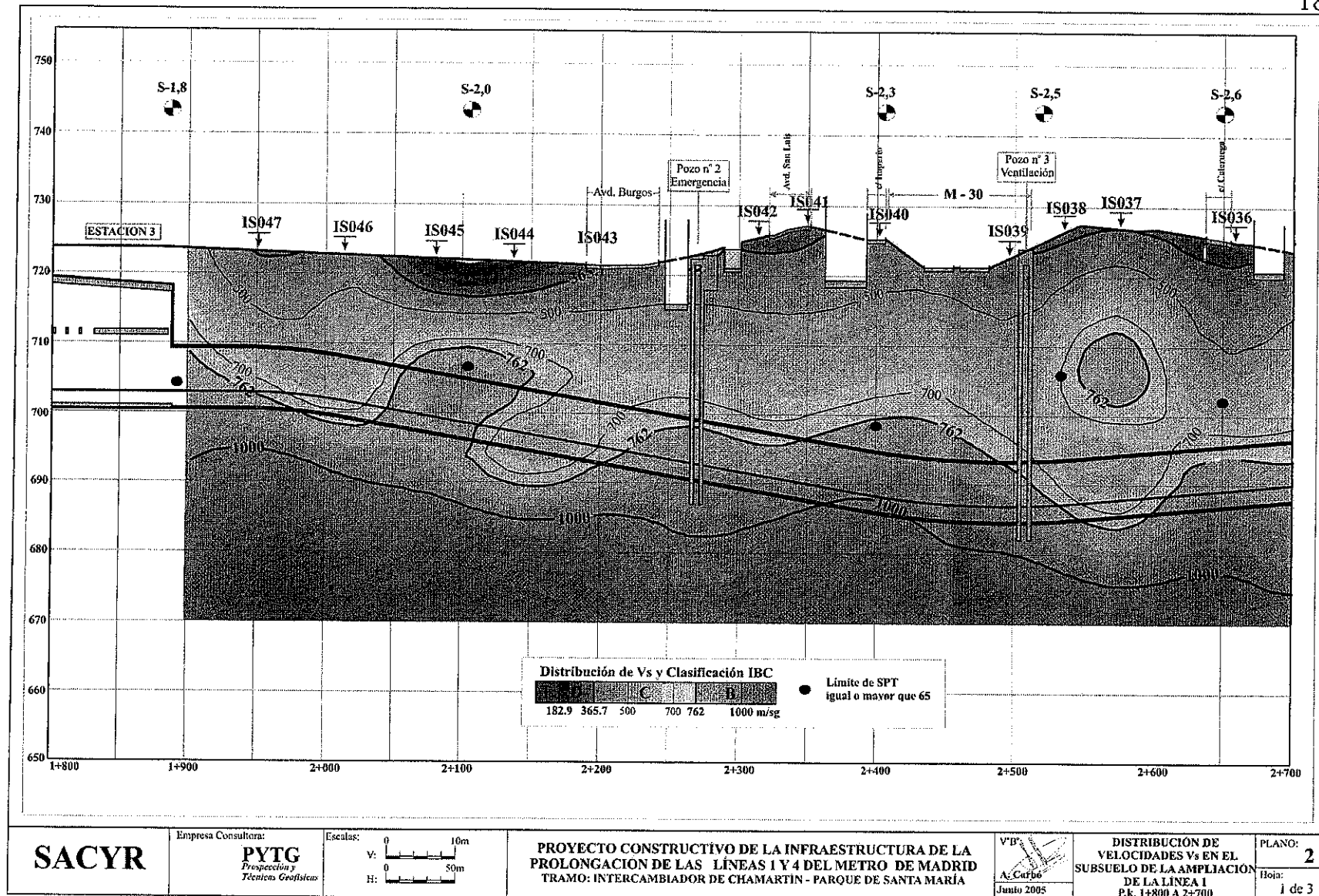
AMPLIACIÓN DE LA LÍNEA 11



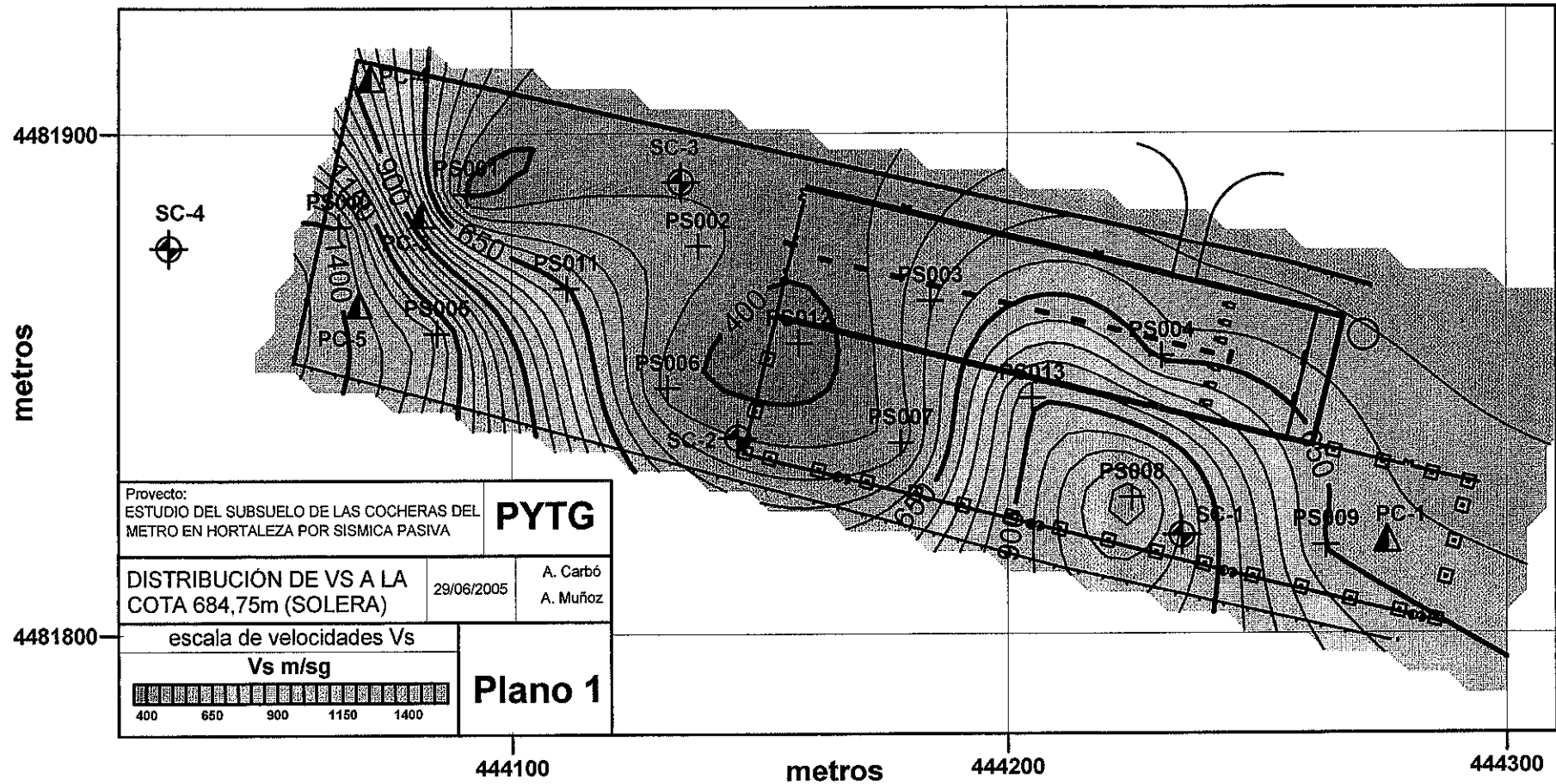


AMPLIACIÓN DE LA LÍNEA 1

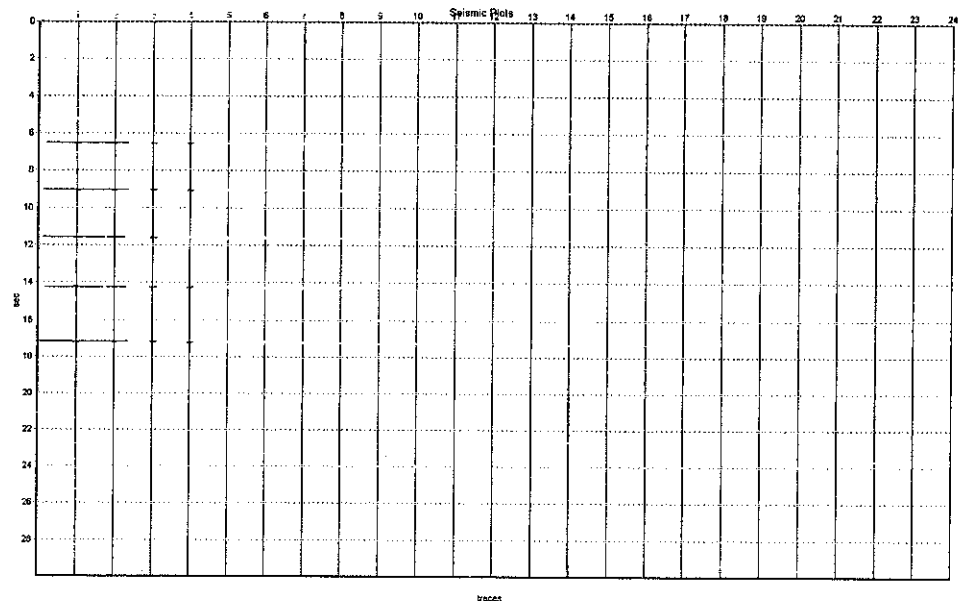
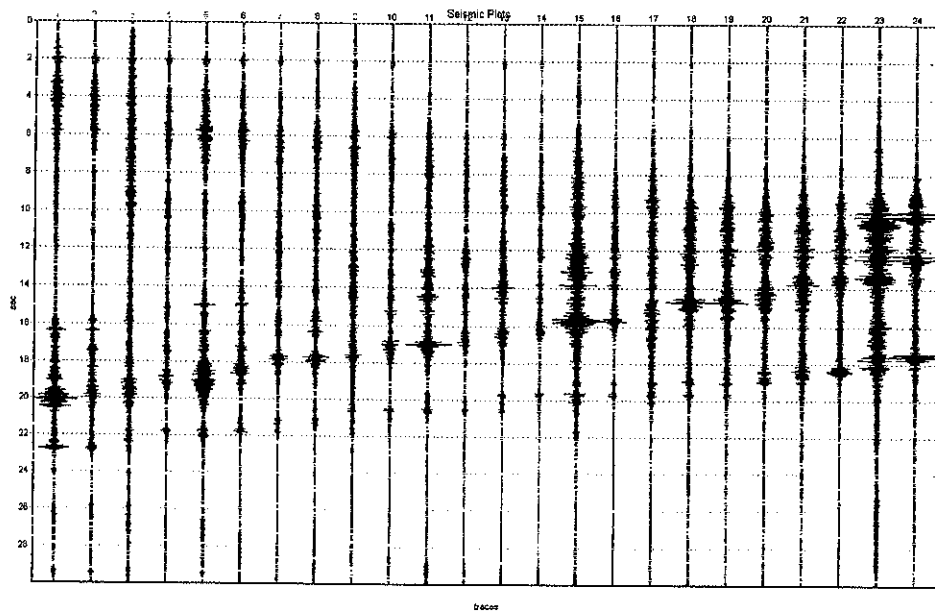
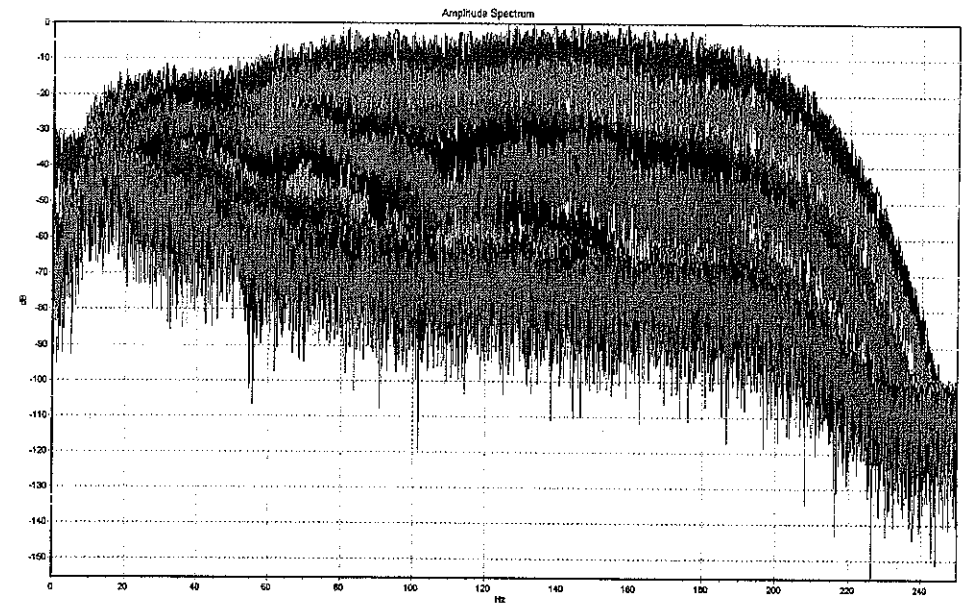
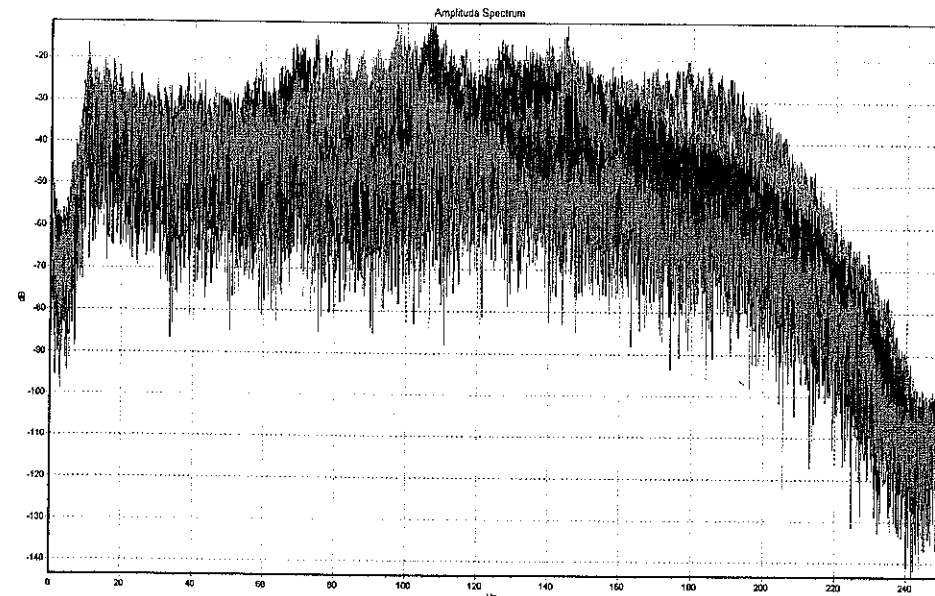
18



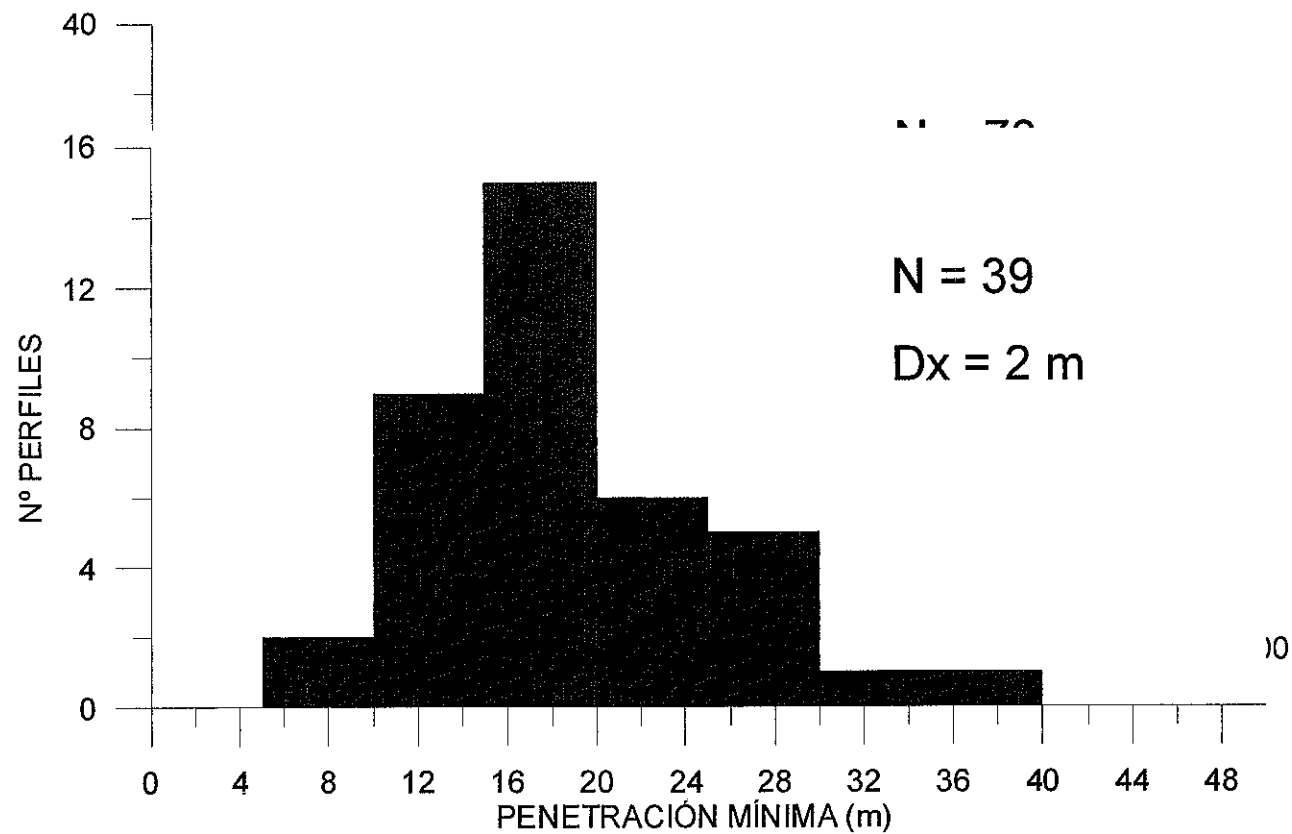
COCHERAS



ANÁLISIS: AUMENTAR LAS ALTAS FRECUENCIAS CON MARTILLAZOS



Profundidad de Penetración



CONCLUSIONES

- **Se correlaciona con medidas de SPT**
- **Detecta Inversiones de velocidad**
- **Ajusta con las Vs de los Logs**
- **Gran Profundidad de Penetración (100 m)**
- **Valores similares a las obtenidas desde Cross-Hole**
- **Se correlaciona con la resistencia al corte**
- **Aplicable en hormigón, mat. saturados, rellenos**
- **Aplicación a microzonación sísmica**
- **Resuelve las investigaciones en zona urbana**

ENSAYOS EN POZO



MÓDULOS DE ELASTICIDAD

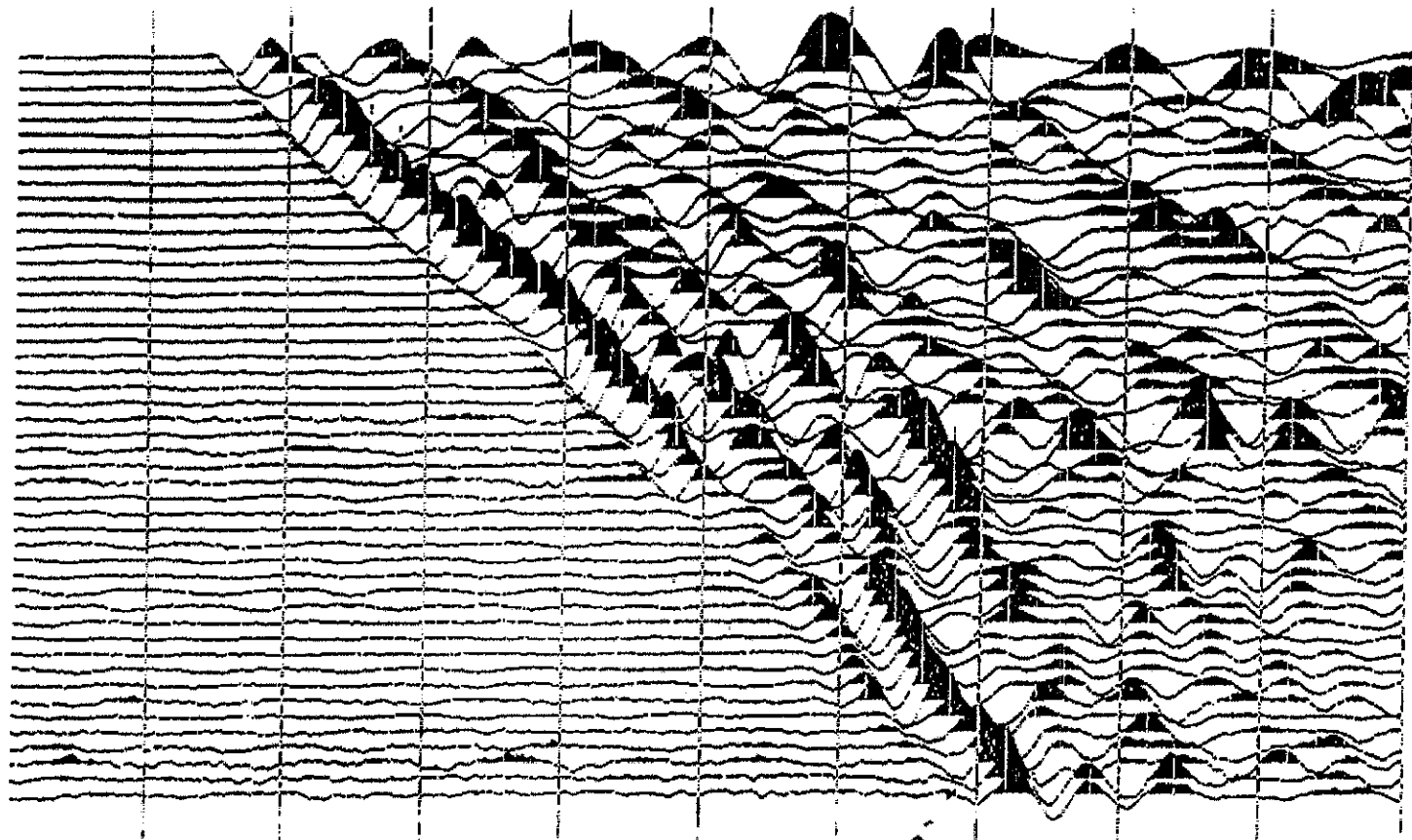
$$V_P = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\delta}} \quad V_S = \sqrt{\frac{E}{2\delta(1+\nu)}} \quad \begin{array}{l} E \dots \text{Módulo de Young} \\ \nu \dots \text{relación de Poisson} \\ \delta \dots \text{densidad} \end{array}$$

$$\nu = \frac{\left(\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2 \right)}{\left(2 \left(\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right) \right)} \quad \begin{array}{l} \nu \dots \text{max} \dots 0.5 \\ \nu \dots \text{roca muy dura} \dots 0.05 \\ \nu \dots 0.45 \dots \text{roca floja} \\ \nu \dots 0.25 \dots \text{media para materiales no consolidados} \\ \delta \dots \text{densidad} \end{array}$$

47 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290 300 310 320 330 340 350 360 370 380 390 400 410 420 430 440 450 460 470 480 490 500 510 520 530 540 550 560 570 580 590 600 610 620 630 640 650 660 670 680 690 700 710 720 730 740 750 760 770 780 790 800 810 820 830 840 850 860 870 880 890 900 910 920 930 940 950 960 970 980 990 1000

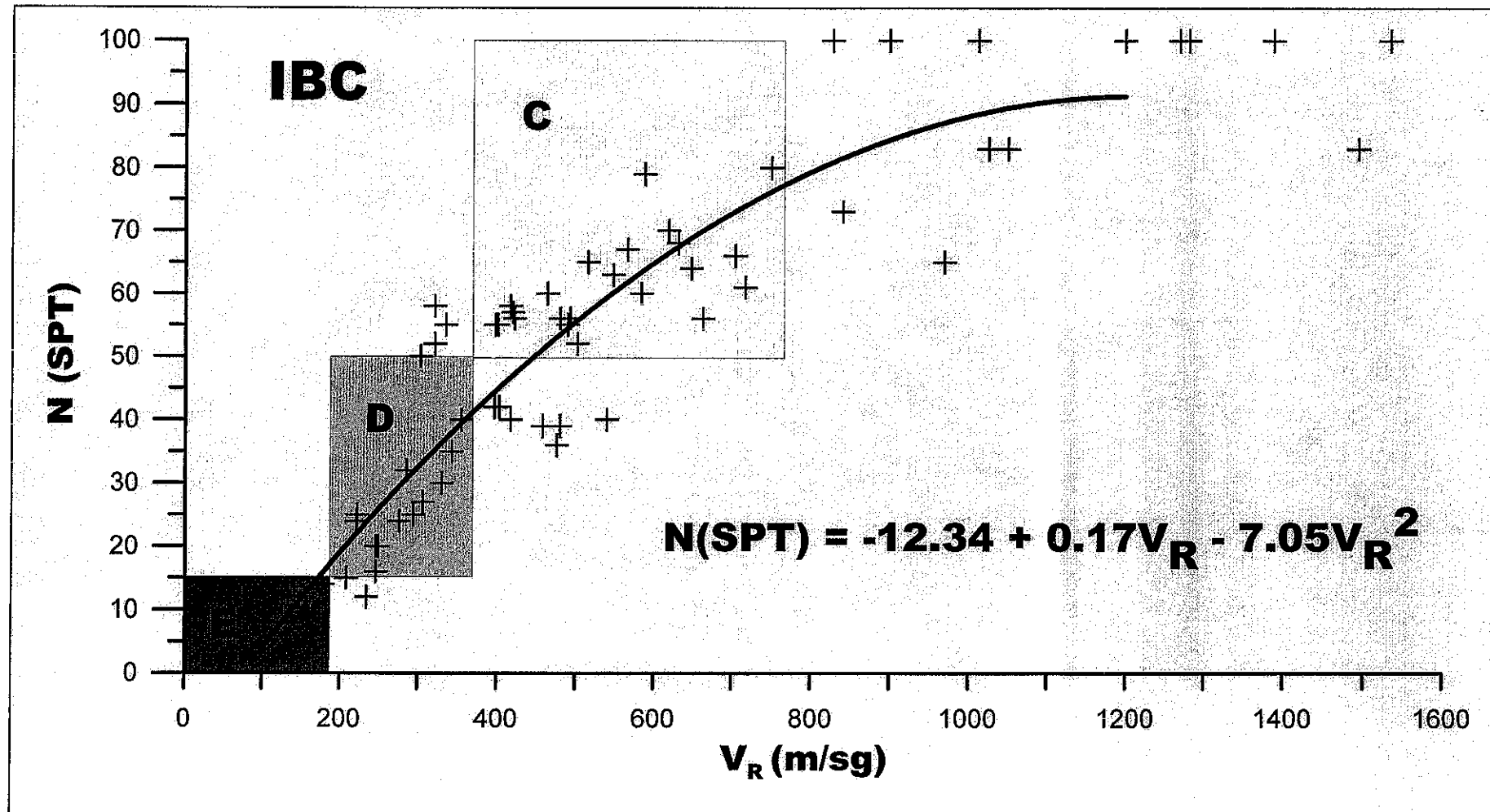
$\Delta G = 4 \text{ m}$

ρ
188 m

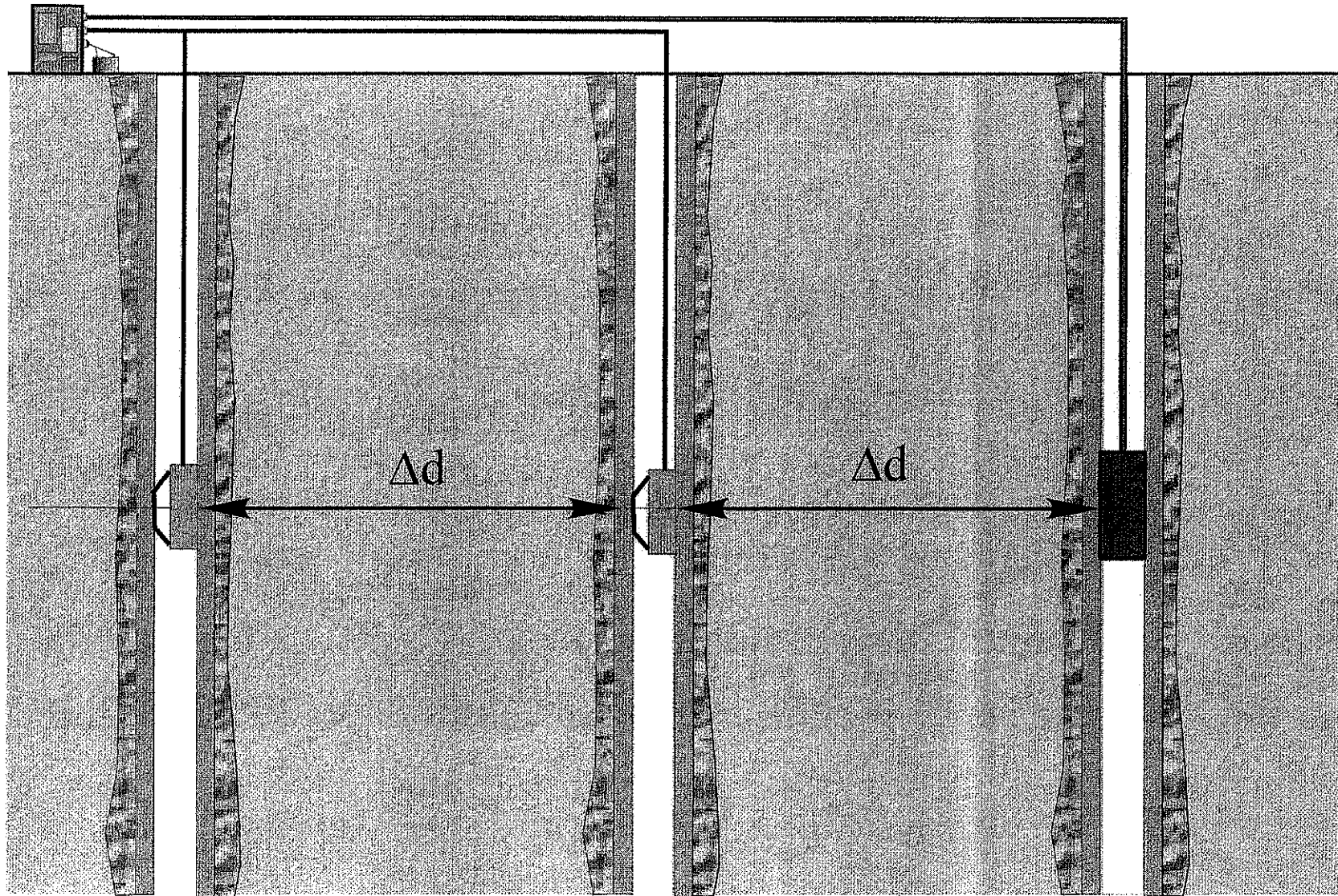


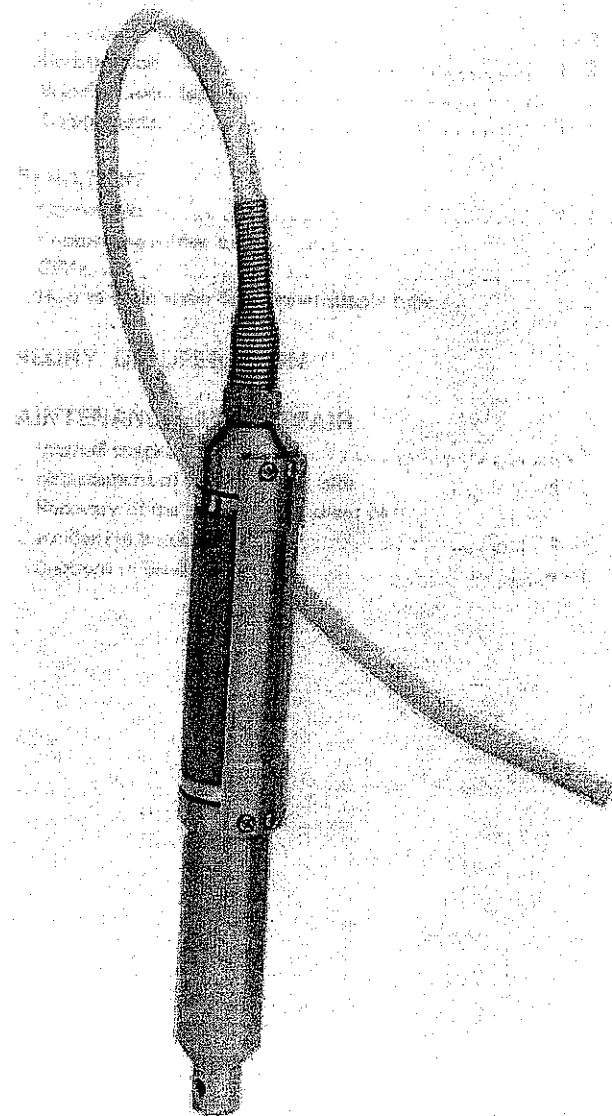
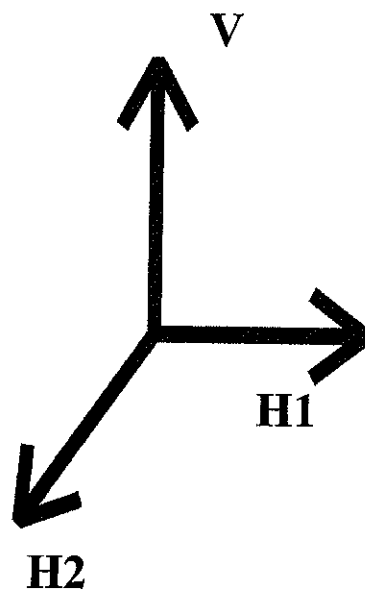
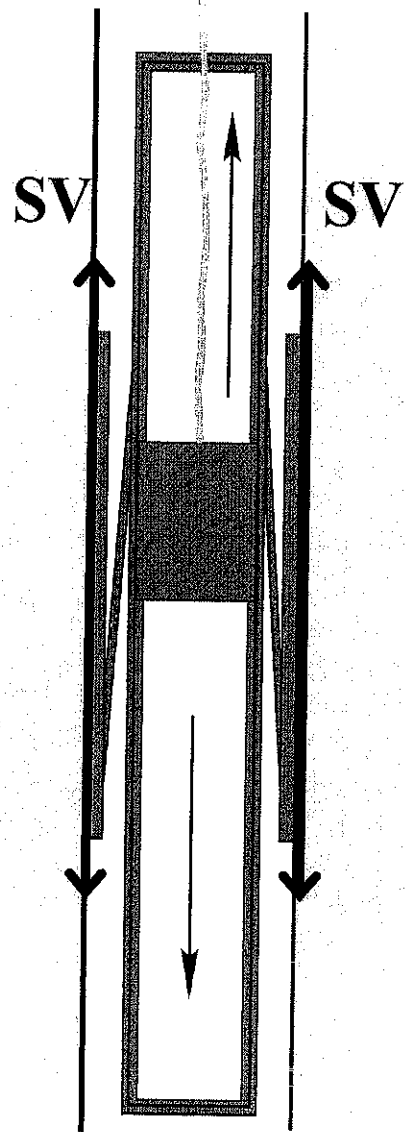
Relación V_{Raleygh} versus SPT

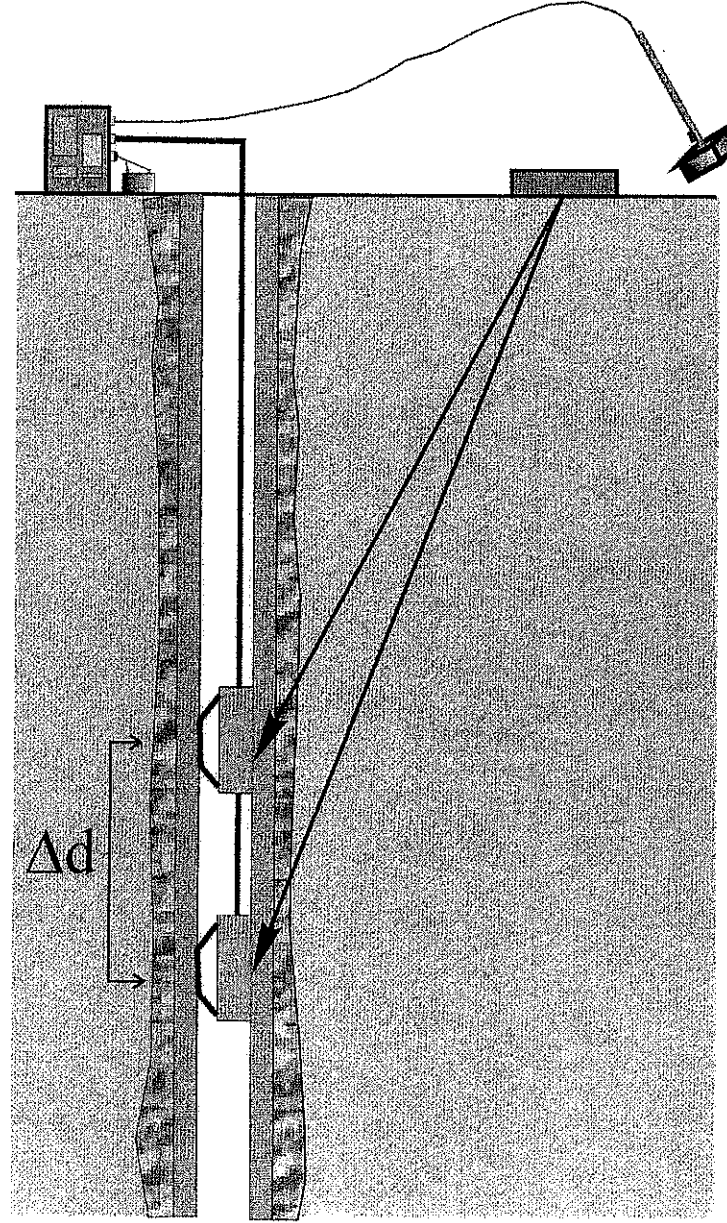
Linea 11

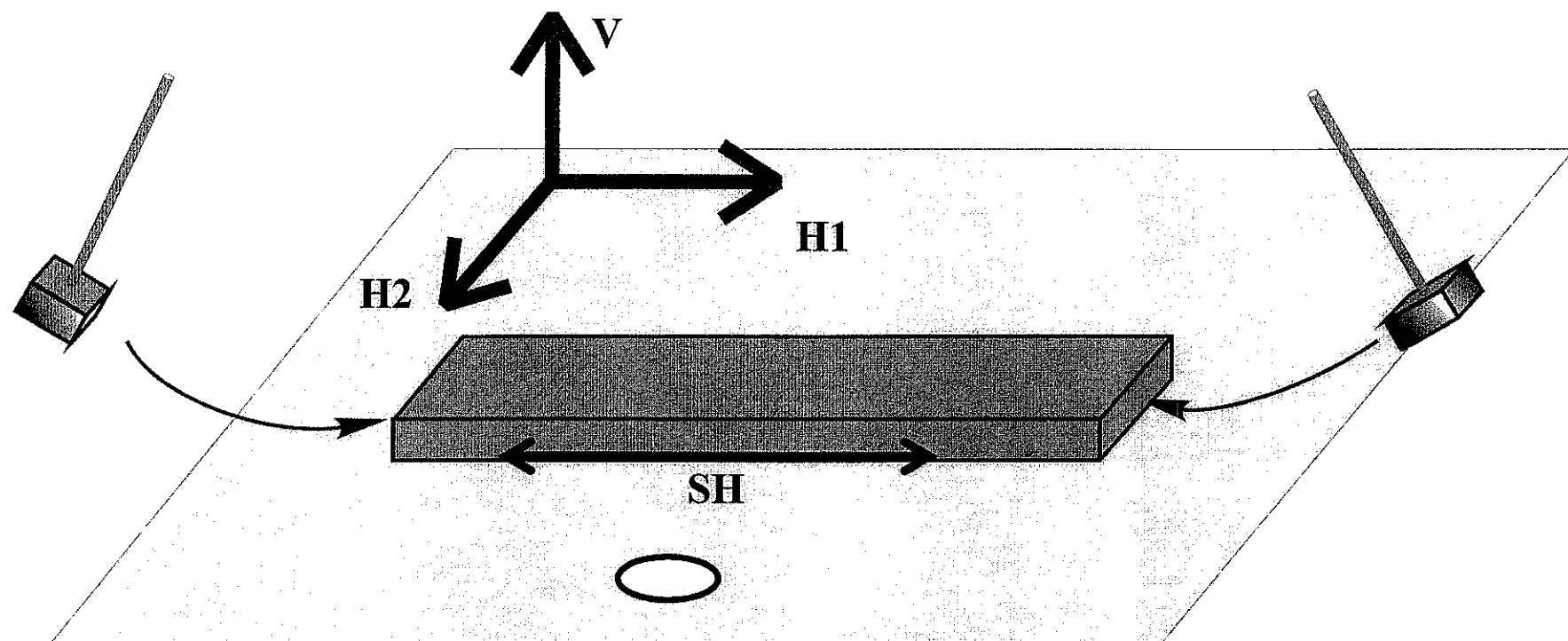


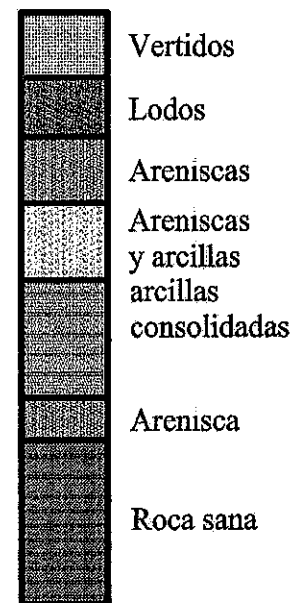
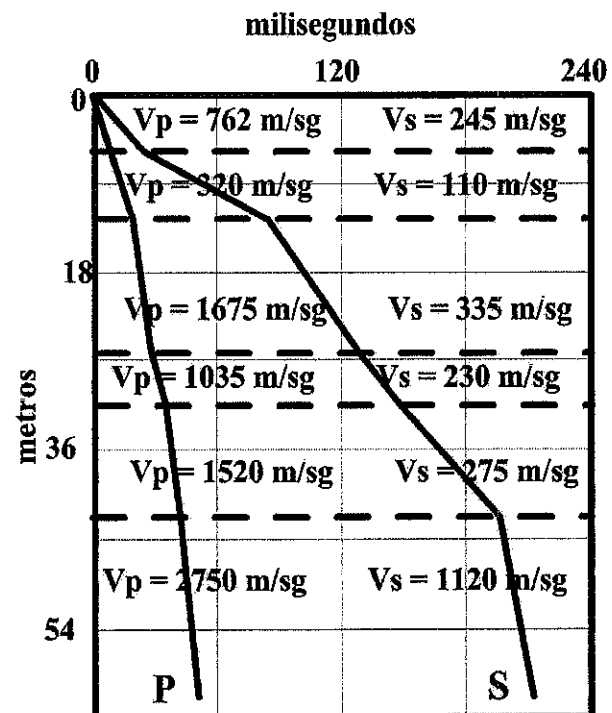
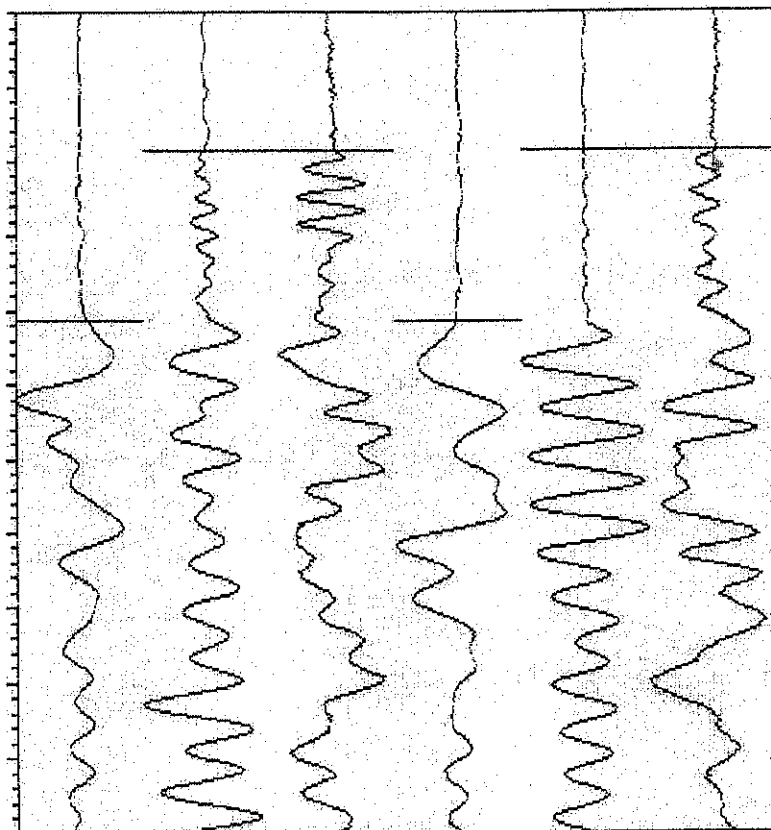
CROSS-HOLE (ASTM D 4428 / 4428M-00)

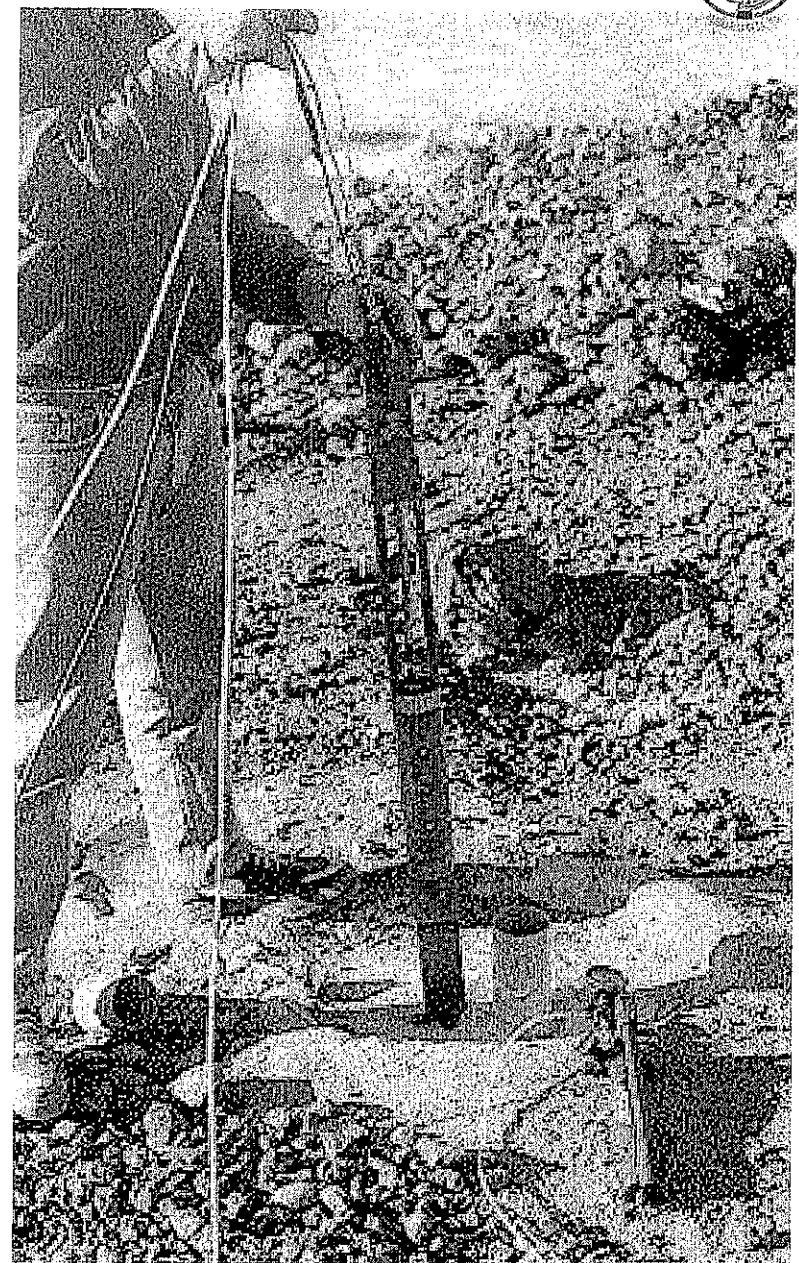
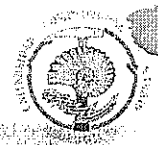
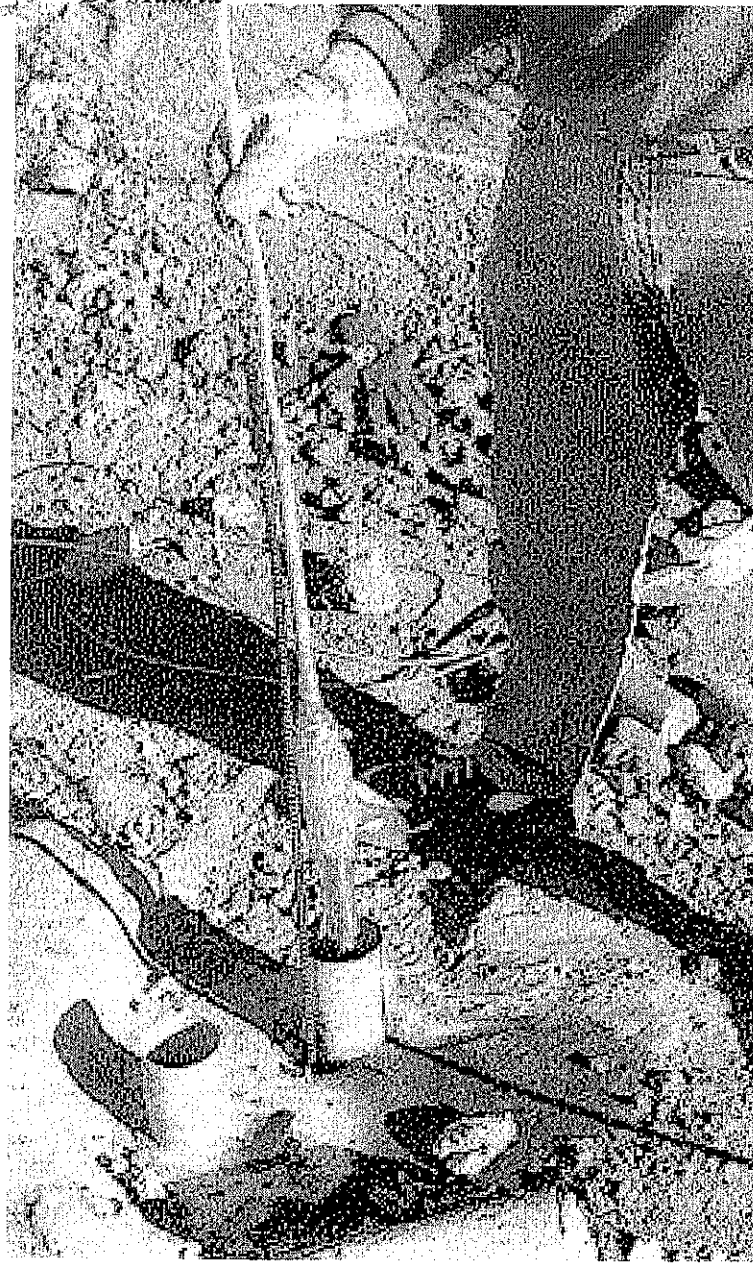




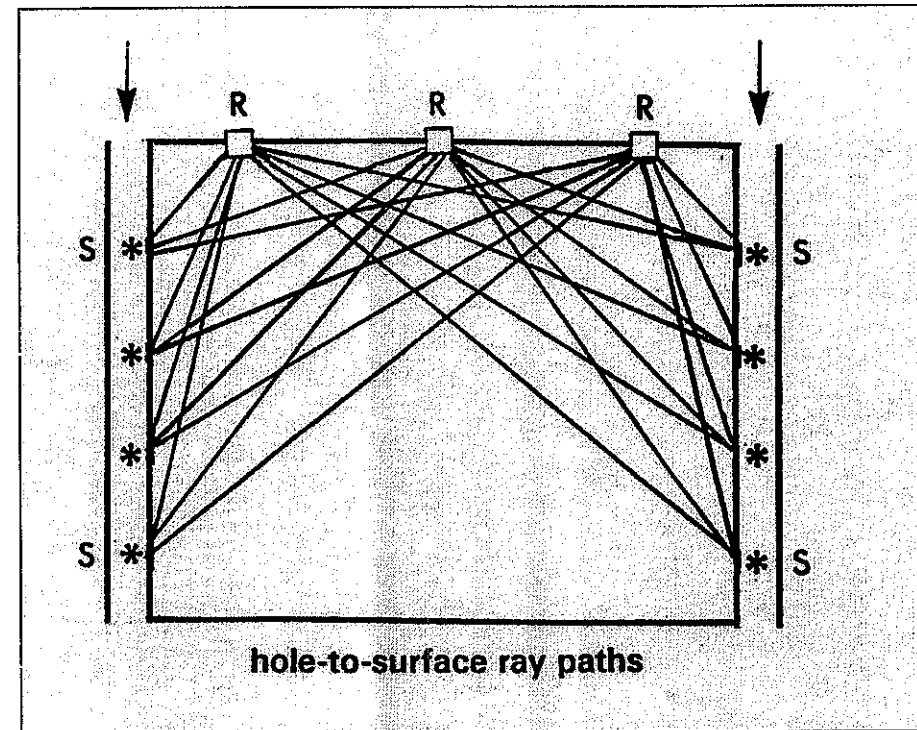
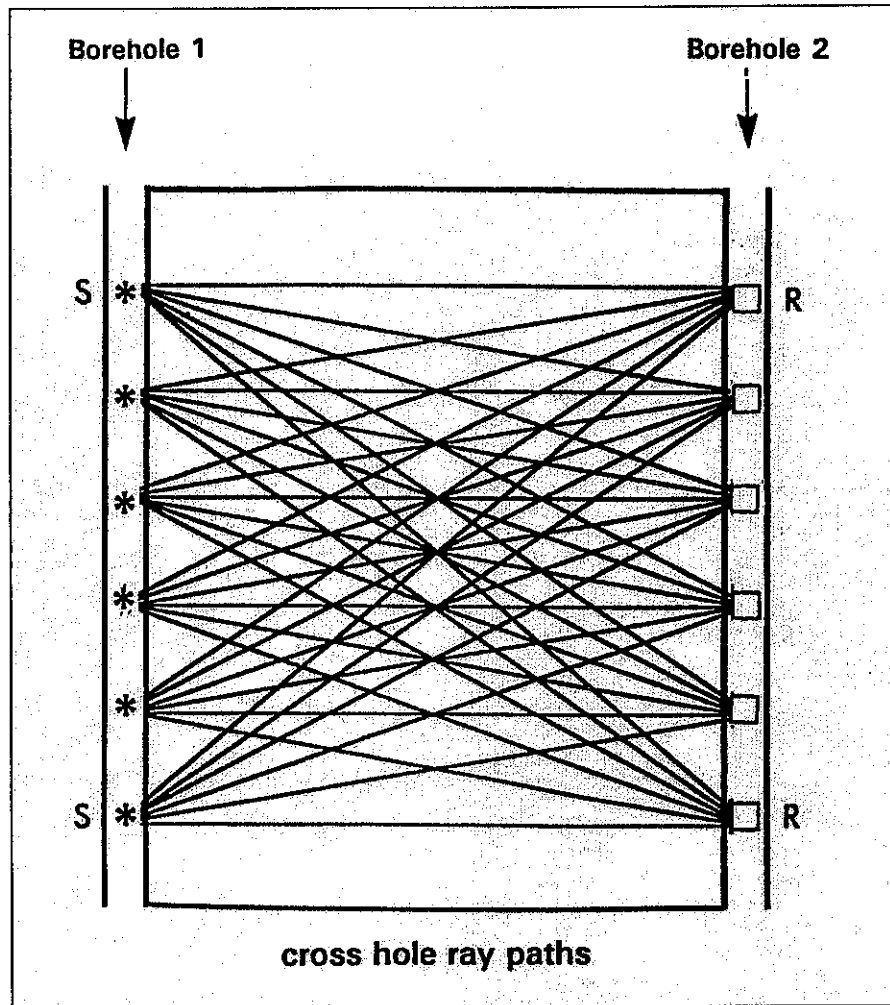






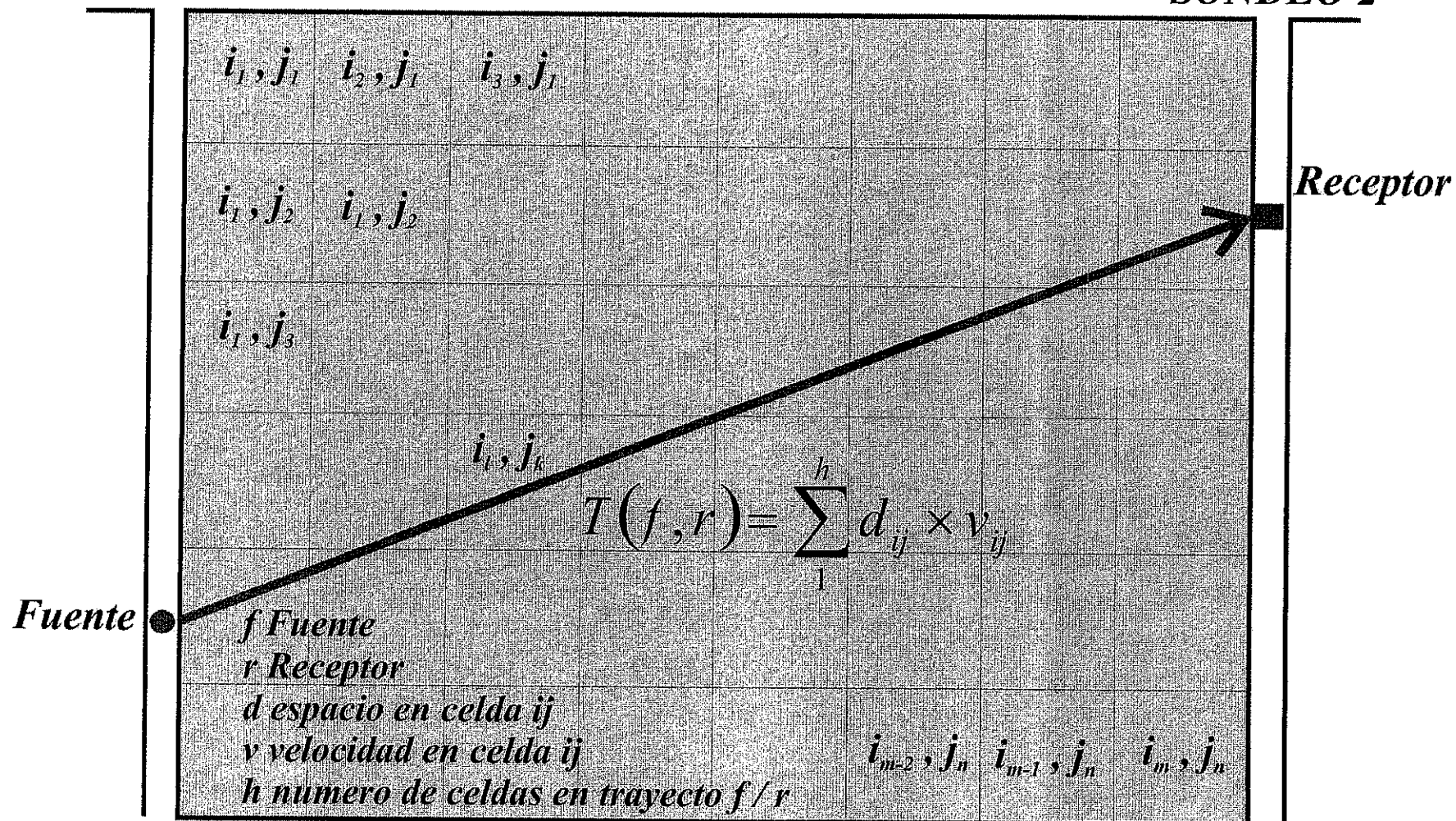


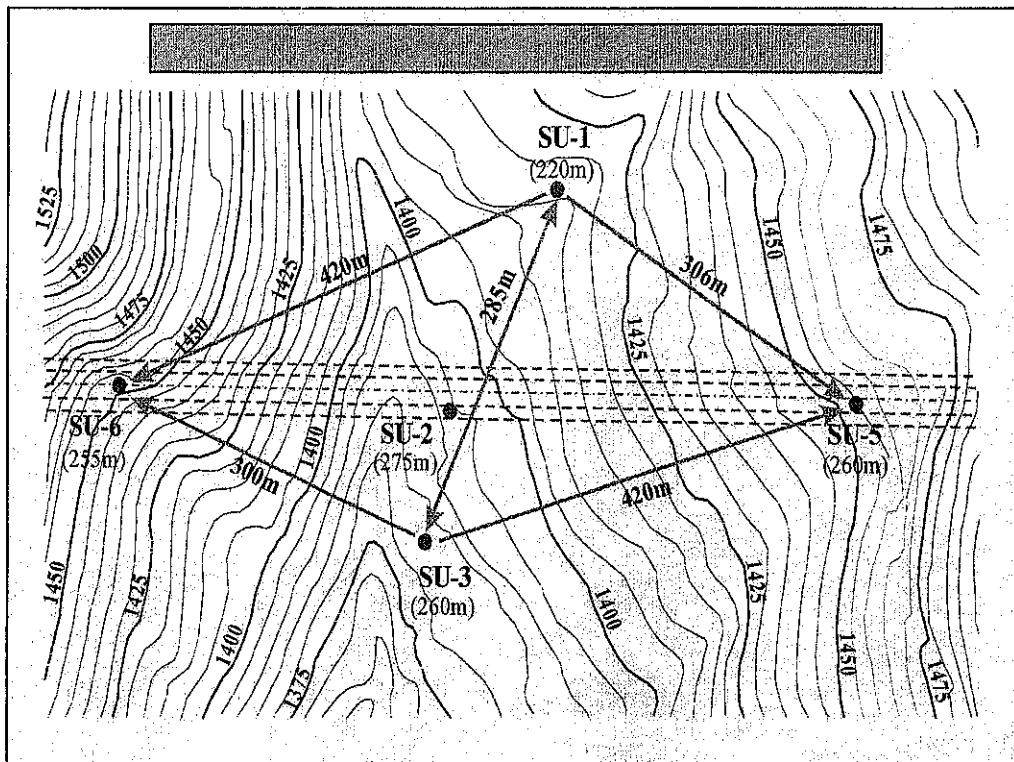
TOMOGRAFÍA



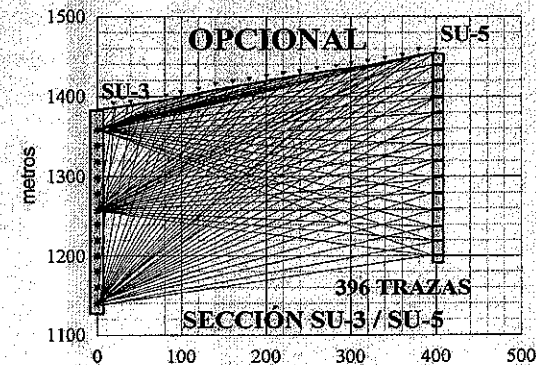
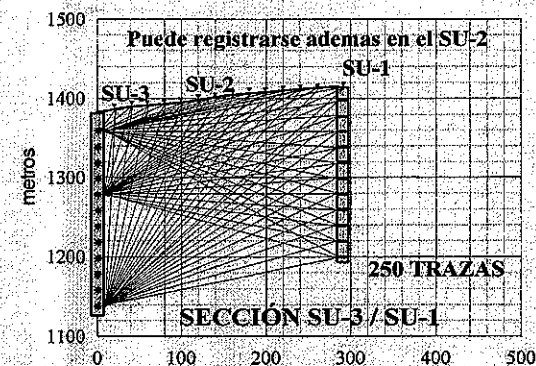
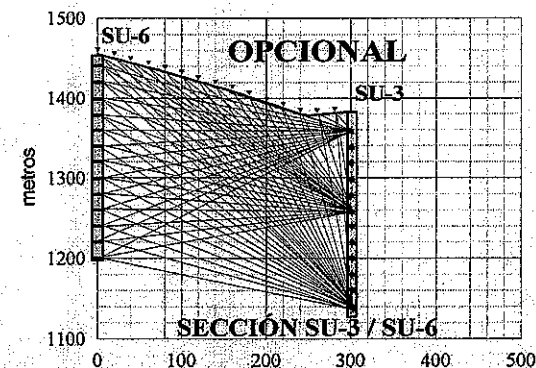
SONDEO 1

SONDEO 2

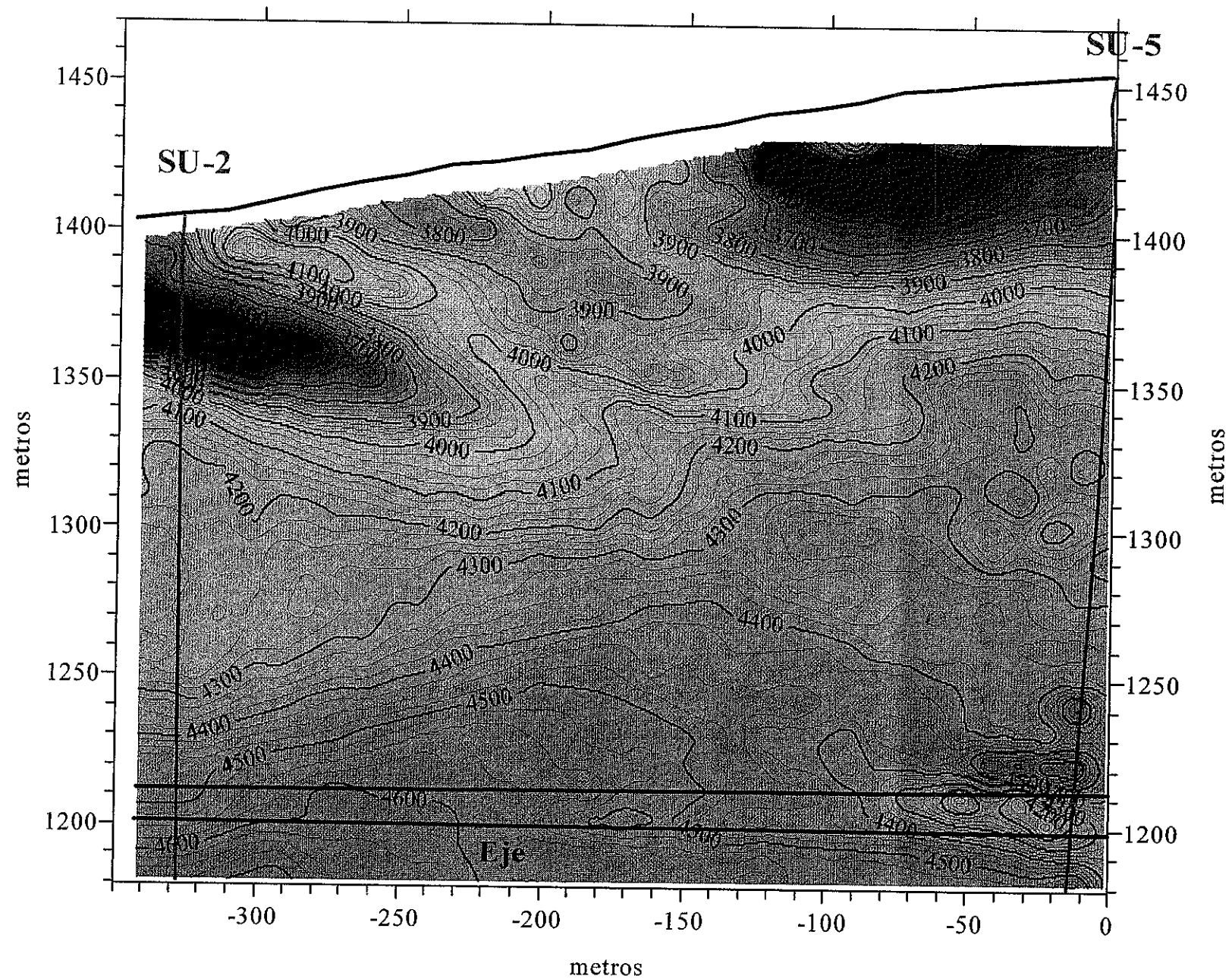




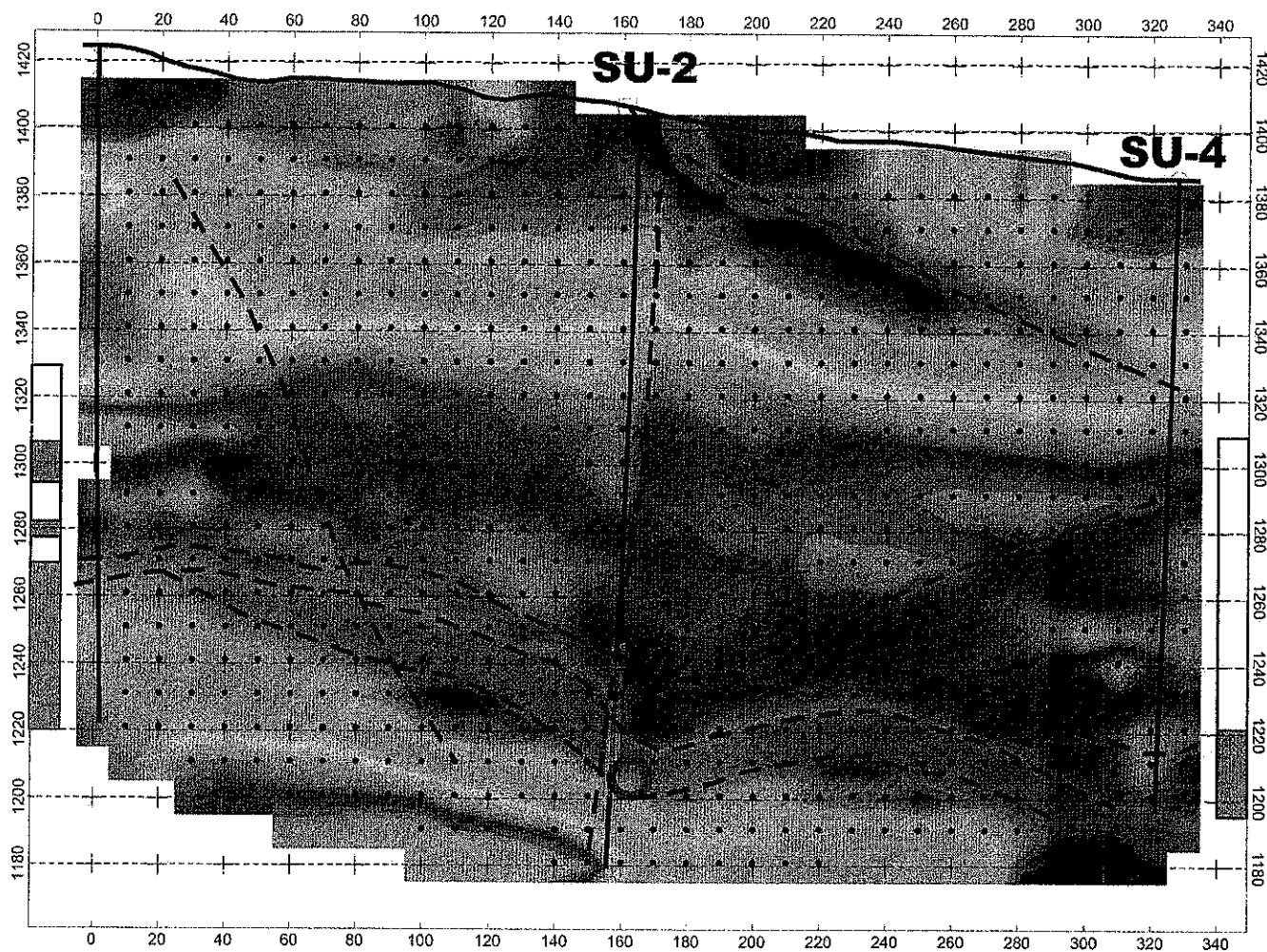
SECCIONES SIMULTANEAS CON TIROS EN SU-3



- ▼ GEÓFONO
- HIDRÓFONO
- * TIRO



SU-1



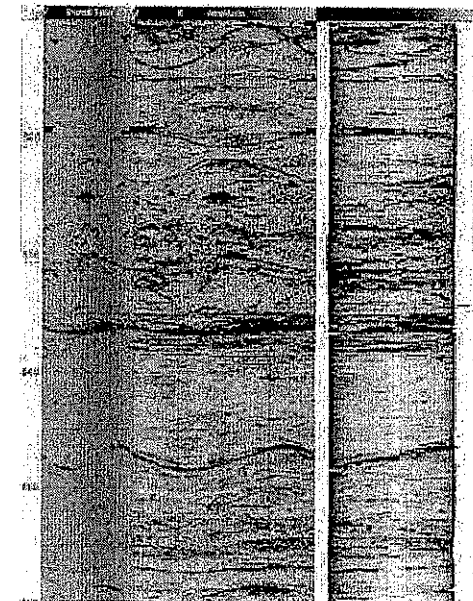
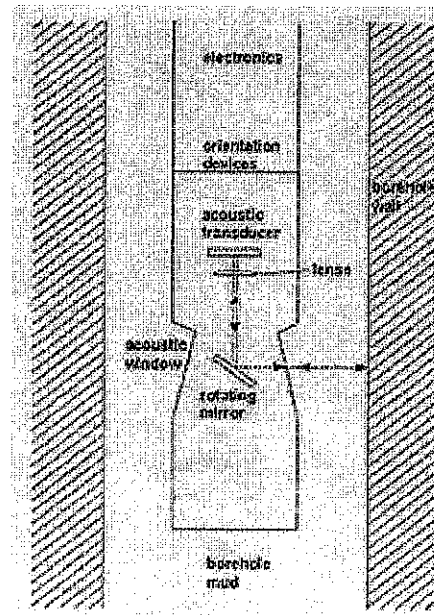
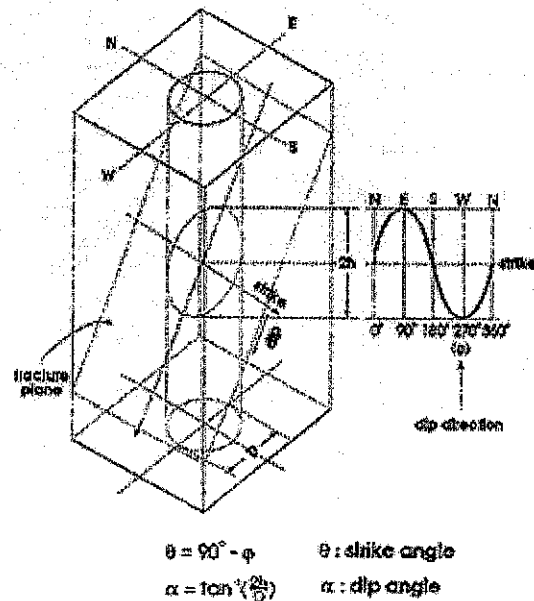
PLANO 1

TESTIFICACIÓN SÓNICA

TESTIFICACIÓN TELEACUSTICA (Televiewer)

Sonda Teleacústica (BHT BoreholeTeleviewer)

- Proporciona una imagen acústica, contraste de velocidades y densidades, en 360°
- Mide el tiempo de retorno y la amplitud del sonido ultrasónico emitido
- La orientación de la imagen se controla por acelerómetros y magnetómetro triaxial.
- Requiere que exista fluido rellenando el sondeo para un buen acoplamiento acústico.



Logs Sónicos

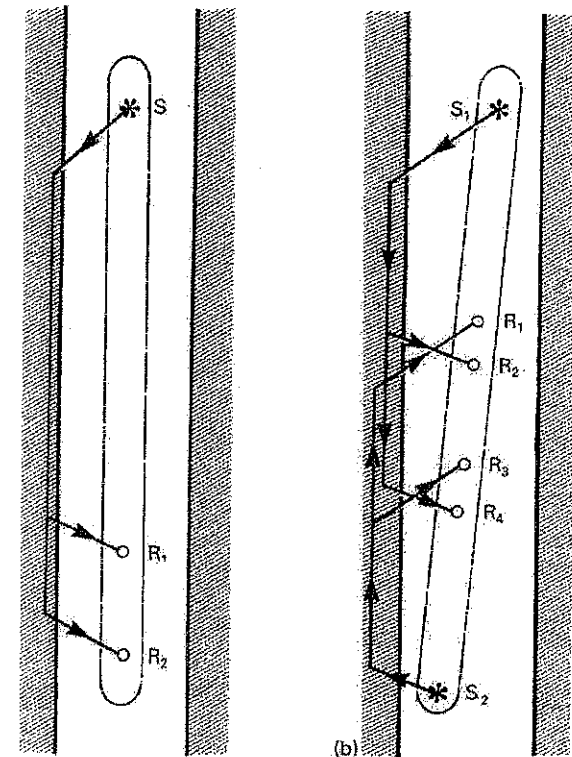
(continuous velocity o acoustic log)

Mide el tiempo que tarda, la onda sísmica emitida, entre el emisor y el receptor (Δt , tiempo de tránsito). Este tiempo se transforma en velocidades.

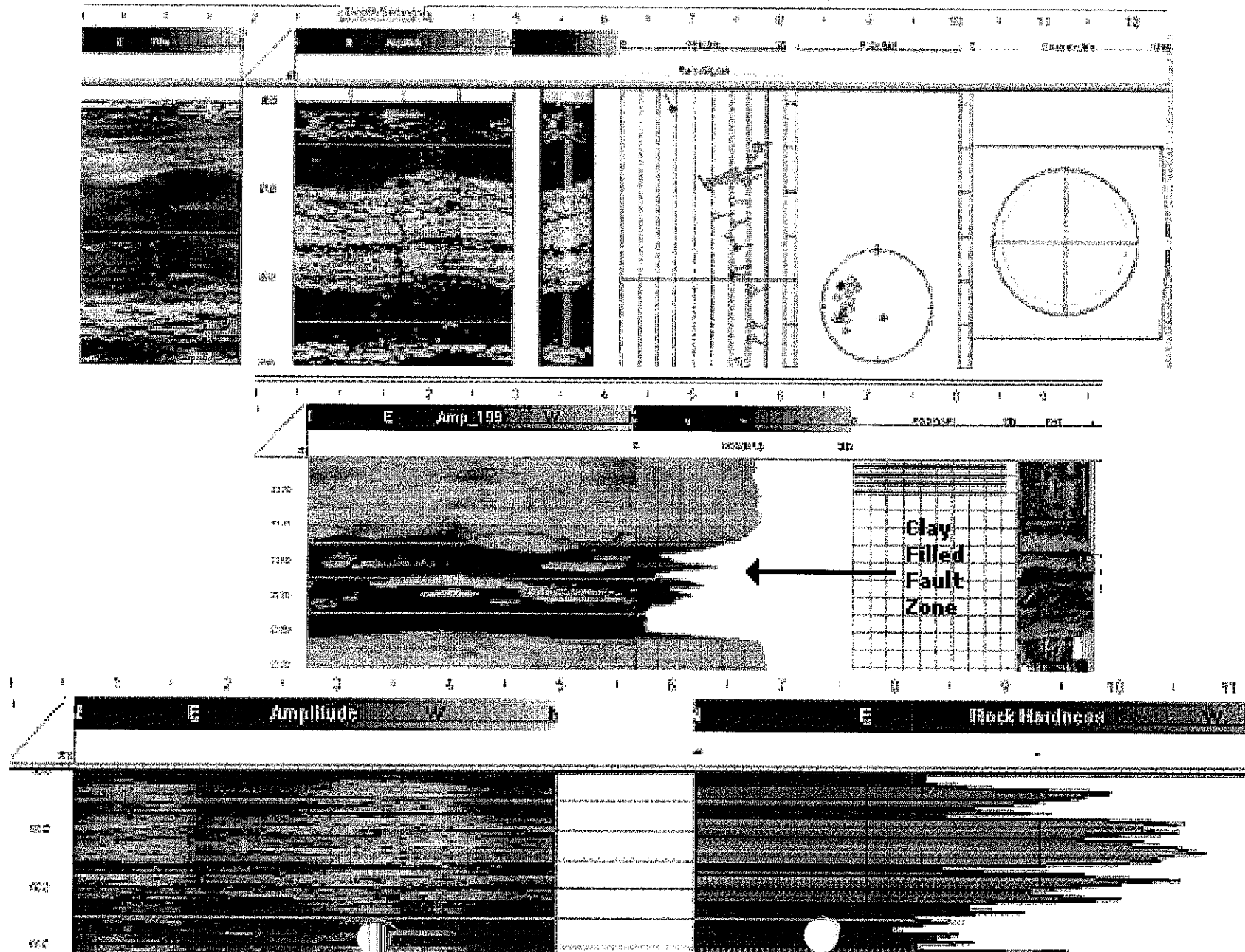
Aplicación:

- Litologías, correlaciones y porosidad
- Características geomecánicas

El instrumento es un transmisor piezo-eléctrico que emite pulsos ultra-sónicos de alta frecuencia (25-35 KHz) y dos receptores separados una distancia L .



Resistencia a compresión de la Roca, en función de la Amplitud del registro



Boquillas

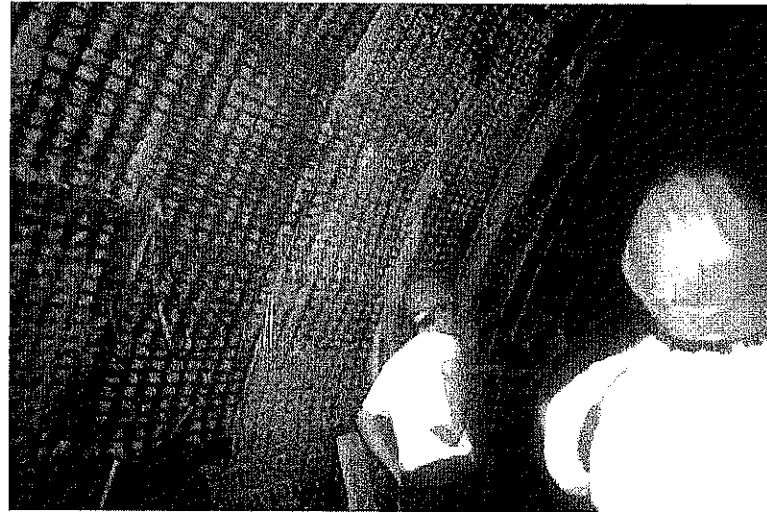


Cuestiones abordables desde Geofísica

1. **Espesor de formaciones superficiales**
2. **Estructura litología y morfología del recubrimiento**
3. **Propiedades geomecánicas**

TÚNEL (traza)

Cuestiones abordables desde Geofísica

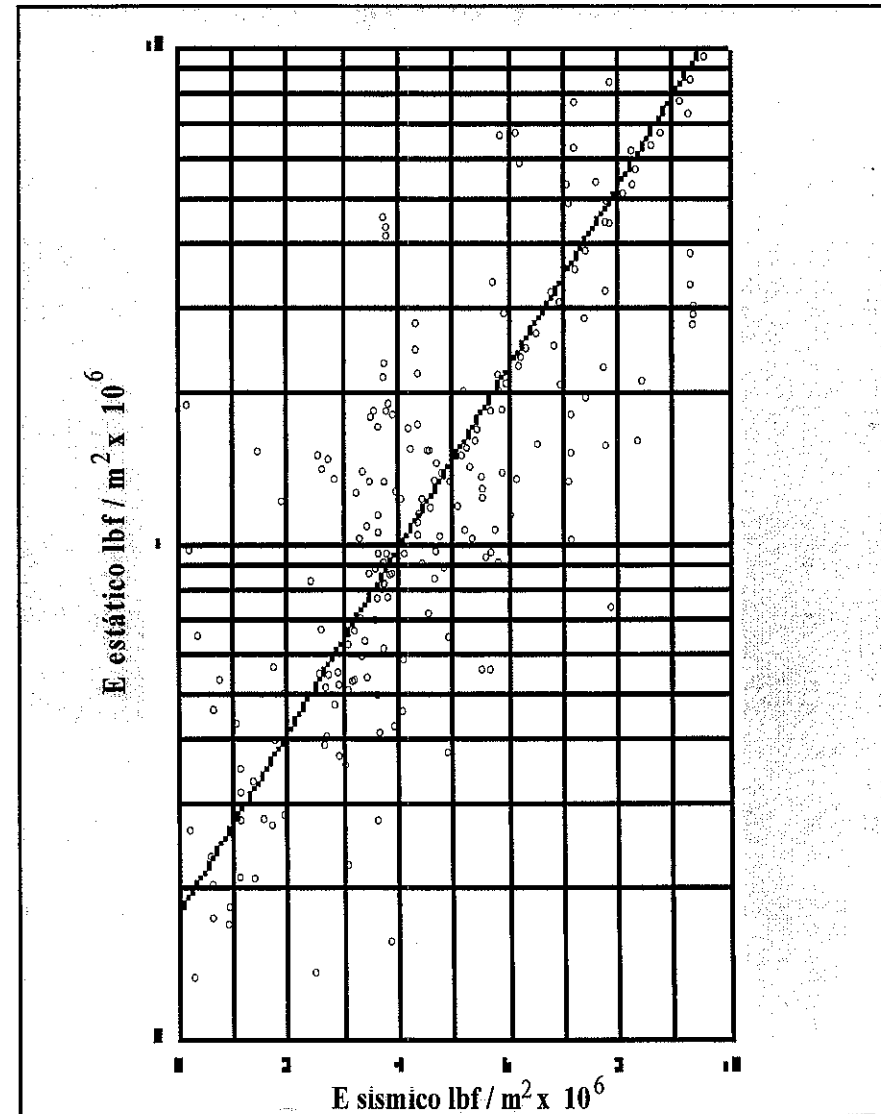
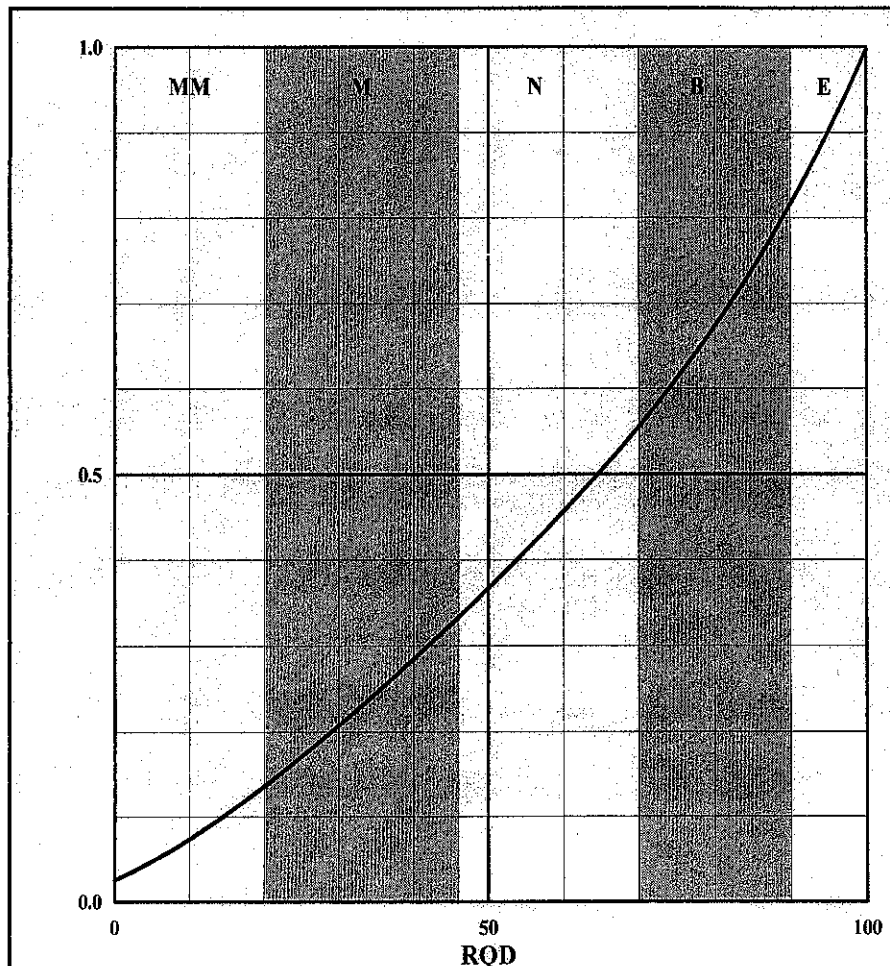


1. Herramienta necesaria para realizar el Corte geológico
2. Extender la información recogida en los sondeos
3. Información necesaria para las Clasificaciones Geomecánicas
4. Determinación de heterogeneidades delante del frente
5. Variación de características en hastiales, una vez efectuada la perforación
6. Heterogeneidades en el “trasdos” (generación de huecos)

Índices de fisuración / RQD y E_{sis} versus E_{est}

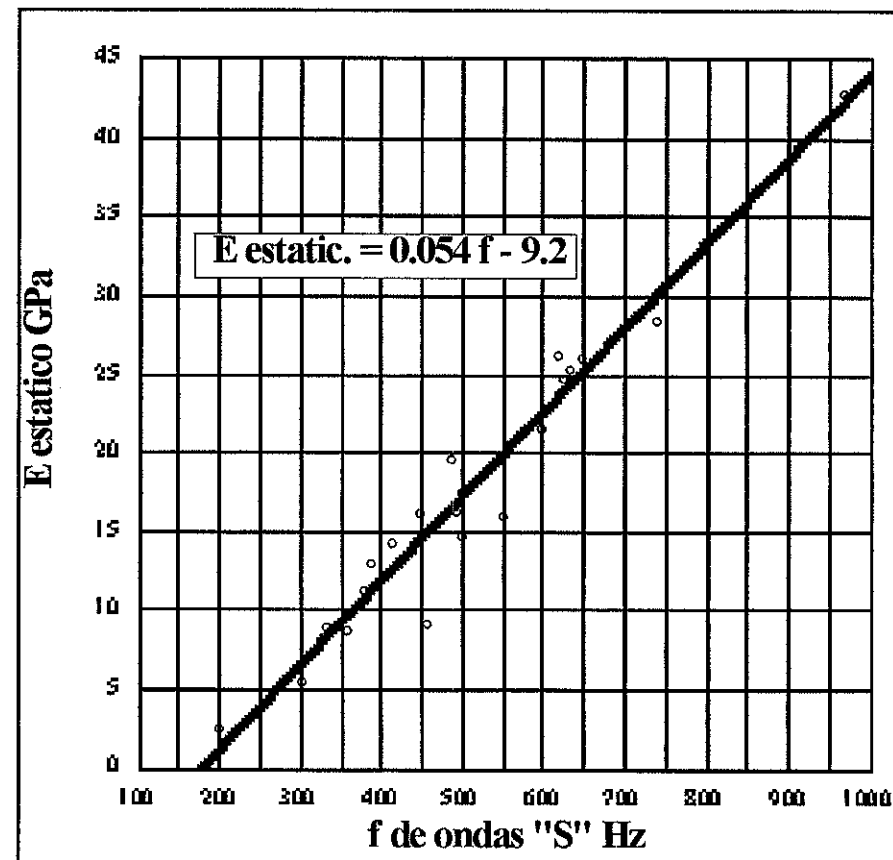
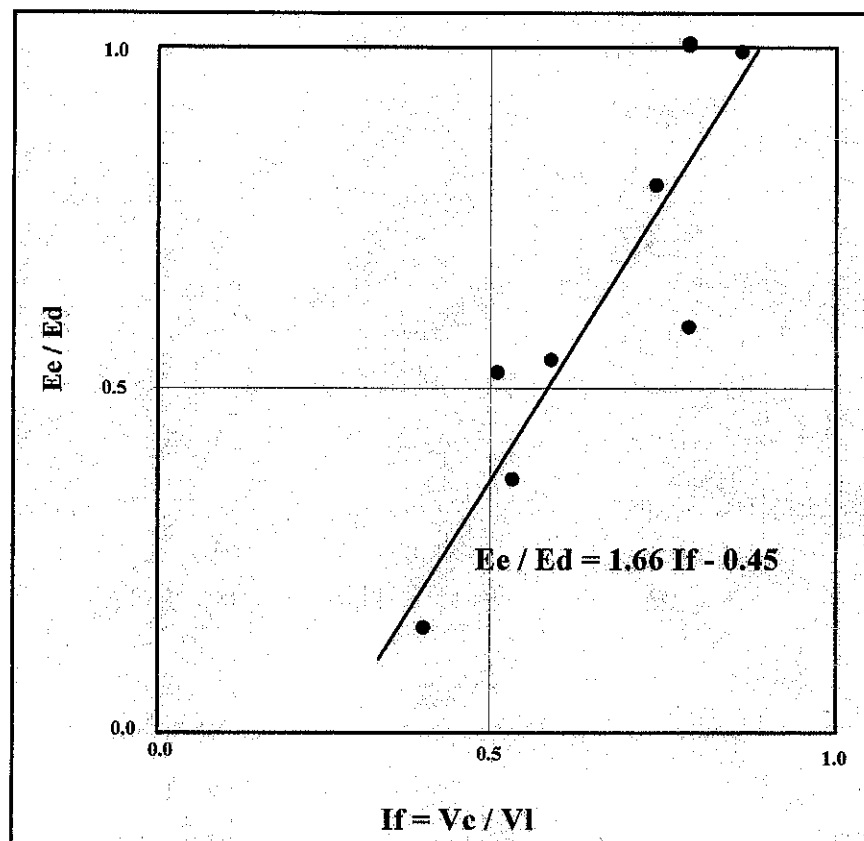
Coon 1968

Deere et al 1967

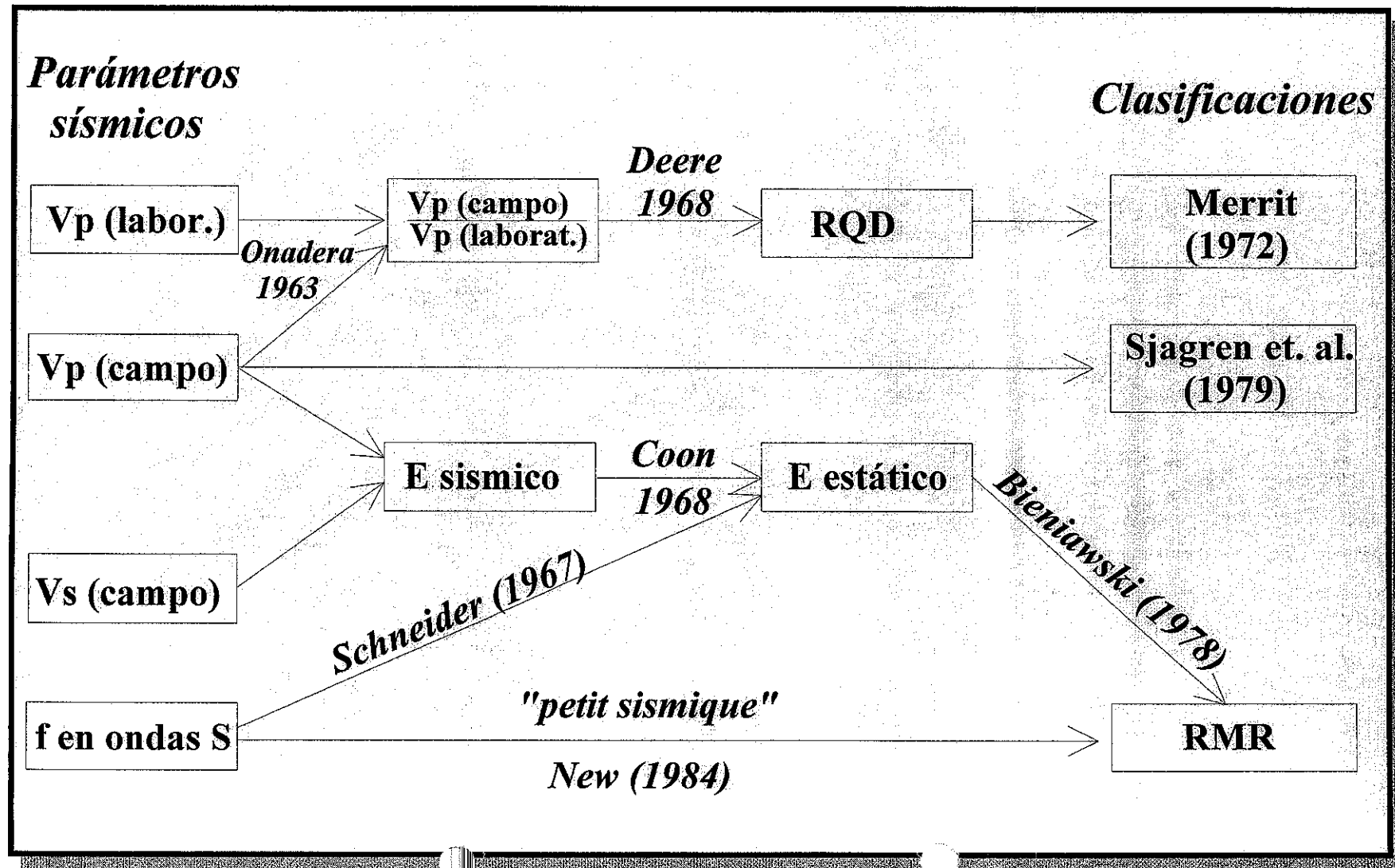


Filaho y Rodrigues

1986



Relación con las Clasificaciones Geomecánicas



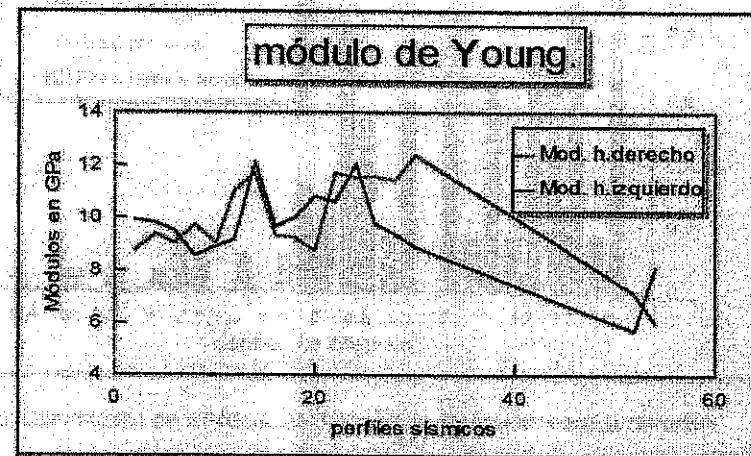
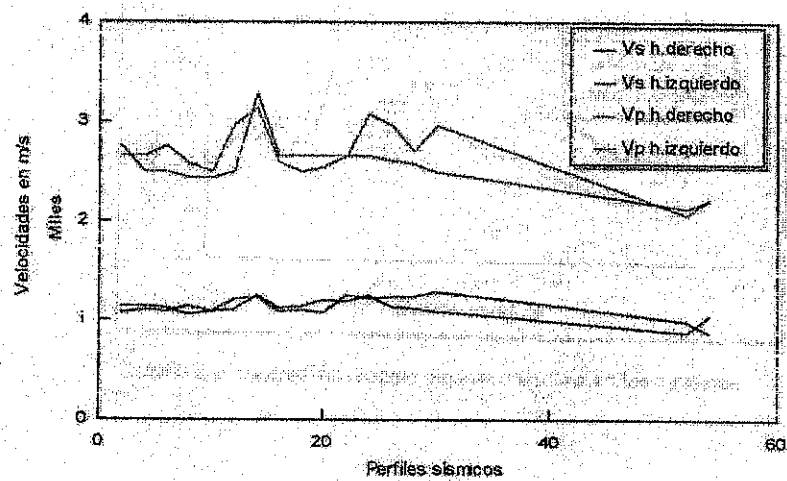
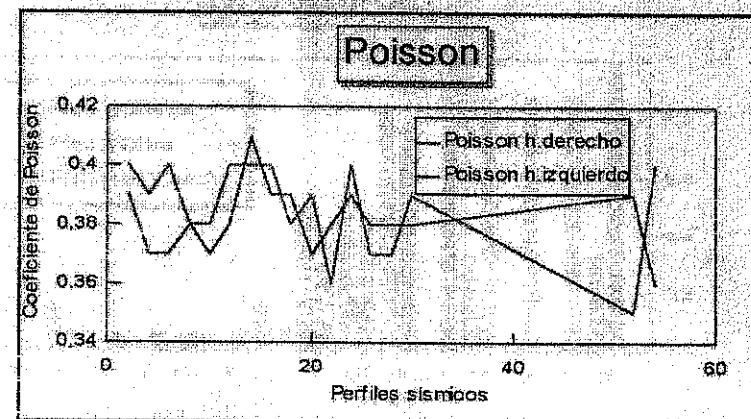


Gráfico 5.a: Valores del módulo dinámico en Gpa en los nastiales.





*Universidad
Complutense
De Madrid*

*Facultad de
C. Geológicas*



AETOS
Febrero 2006