

# *PERFILAJE GEOFÍSICO DE POZOS*

Apunte: 8

Conceptos básicos de Resistividad

1

## Definiciones básicas

### Porosidad

#### **Definición:**

Es la fracción del volumen de roca ocupado por el espacio poral.

$$\phi = V_p / V_R * 100 \%$$

### Saturación en agua

#### **Definición:**

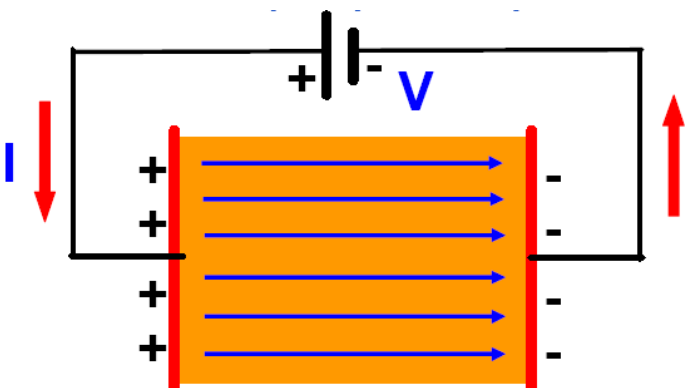
Es la fracción del espacio poral que contiene agua.

$$S_w = V_w / f$$

2

## Resistencia eléctrica vs. resistividad eléctrica

(conducción eléctrica en un medio homogéneo, a baja frecuencia)



$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A} = \text{Resistencia eléctrica}$$

$A$  = Área transversal de las placas  
 $L$  = Distancia entre placas  
 $\rho$  = Resistividad eléctrica (Ohm. m)

3

## Resistividad eléctrica de algunos constituyentes de las rocas

(Keller 1989, Olhoeft 1981, Berkold 1982, Dortman 1976)

Material	R (Ohm m)
quartz	$2 \times 10^{14}$
muscovite	$2.2 \times 10^{12}$
feldspar	$10^{11} \dots 10^{12}$
anhydrite	$1 \times 10^9$
dolomite	$4.3 \times 10^{13}$
calcite	$9 \times 10^{13}$

Material	R (Ohm m)
Oil	$10^9 \dots 10^{16}$
Water	
58.5 mg/l NaCl	89.4
585 mg/l NaCl	9.34
5850 mg/l NaCl	1.03

6

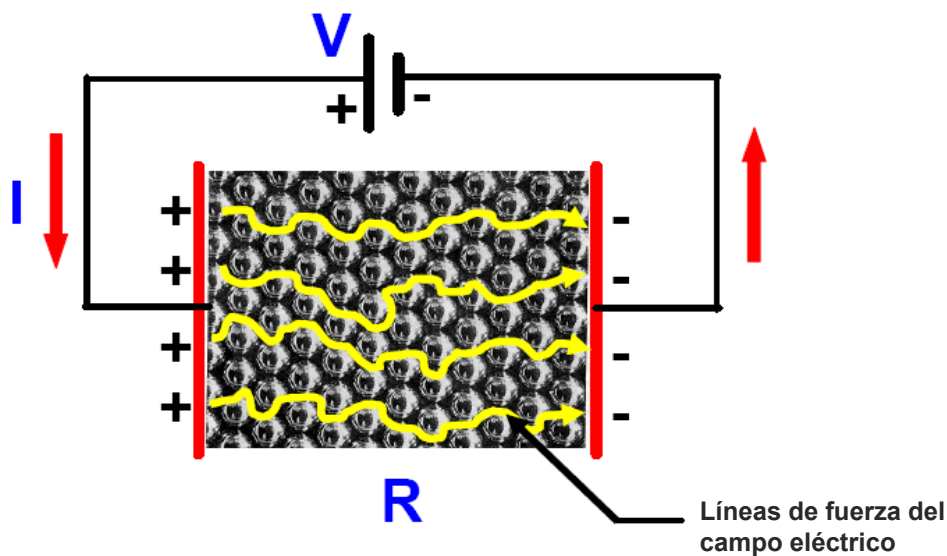
## Resistividad eléctrica de soluciones de NaCl y de KCl a 20°C

$C_{val}$ (val/l)	NaCl		KCl	
	C (mg/l)	$R_w$ (Ohm m)	C (mg/l)	$R_w$ (Ohm m)
0.0001	5.85	882	7.456	741
0.001	58.5	89.4	74.56	75.1
0.01	585	9.34	745.6	7.81
0.1	5850	1.03	7456	0.85
1.0	58440	0.13	74560	0.10

**NaCl & KCl** solution resistivity at 20°C as function of normal or equivalent concentration  $C_{val}$  (gram equivalents or val per liter of solution) & concentration  $C$  (mg/l) (Berk told, 1982)

5

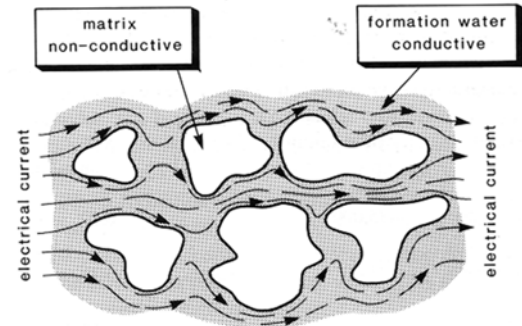
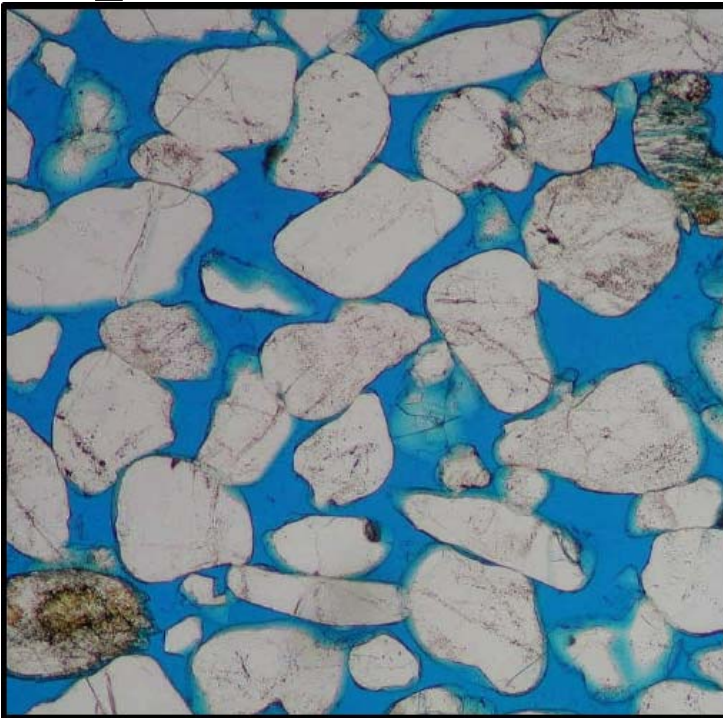
Un modelo más realista del funcionamiento de las líneas de un campo eléctrico.



$$R = \frac{V}{I}$$

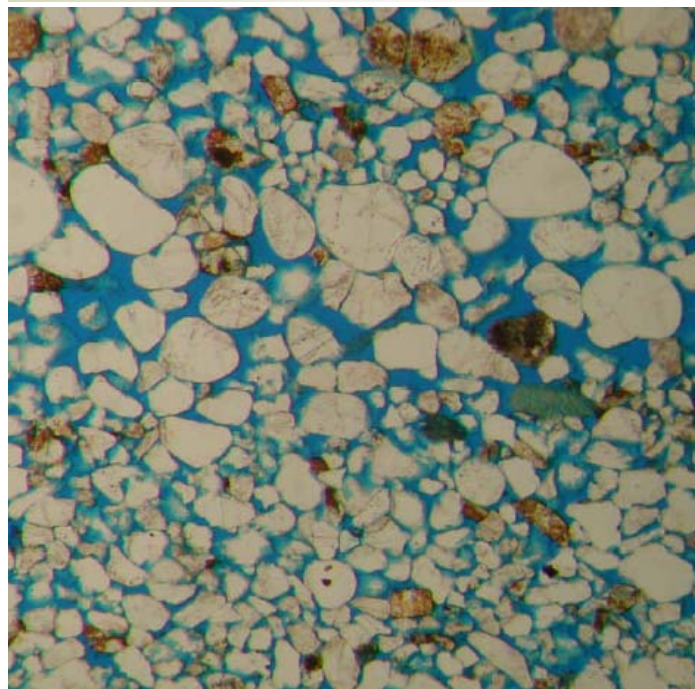
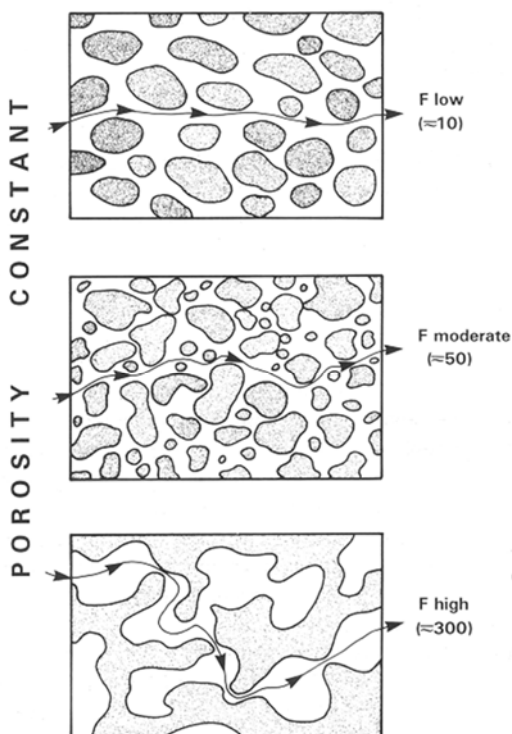
6

## El fenómeno de conducción eléctrica en un medio poroso: Resistividad del agua connata y la porosidad efectiva.



7

## El fenómeno de conducción eléctrica en un medio poroso: El camino de la conducción eléctrica y la tortuosidad.

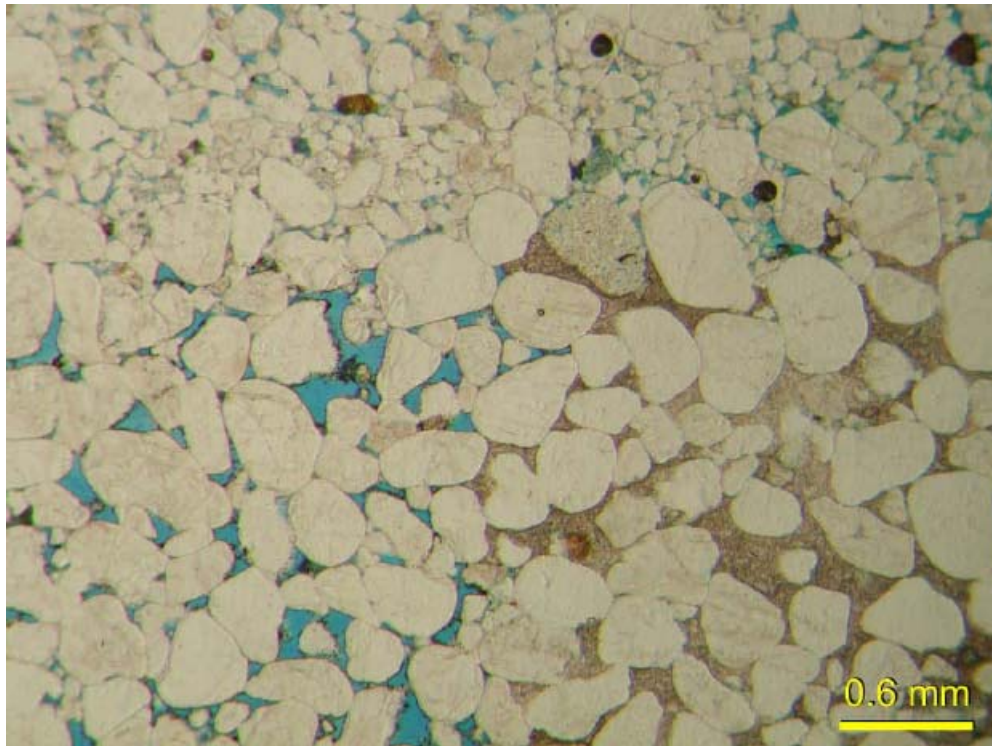


8

F = Factor de resistividad de la Formación

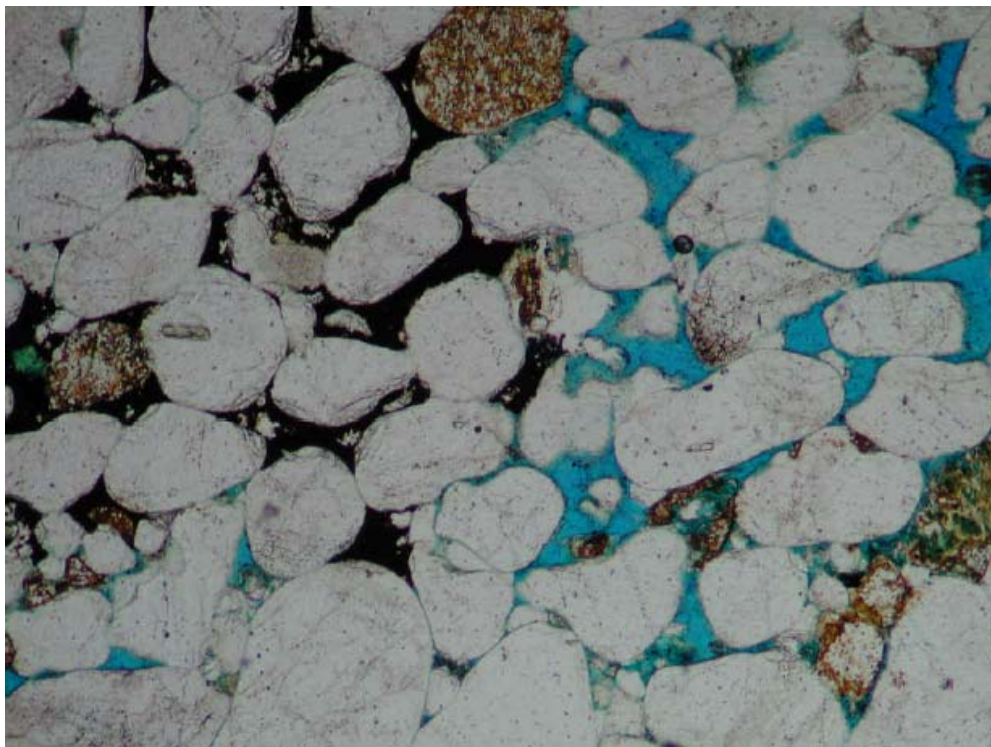


El fenómeno de conducción eléctrica en un medio poroso: El camino de la conducción eléctrica y la cementación.



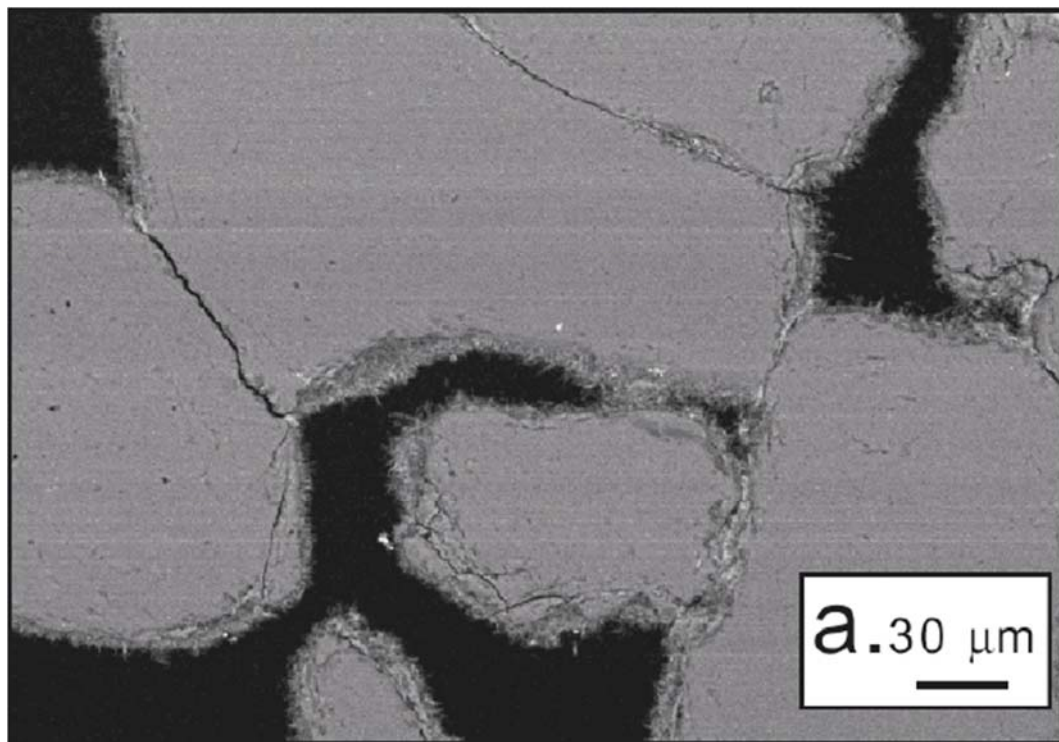
9

El fenómeno de conducción eléctrica en un medio poroso: El bloqueo de los canales de conducción por hidrocarburo.



10

## El fenómeno de conducción eléctrica en un medio poroso: La conducción eléctrica a través de doble capa de arcillas



11

## Resistividad eléctrica de las rocas: principales tendencias

**Rock resistivity decreases with**

- increasing porosity or fracturing
- increasing water saturation & water salinity
- increasing shale/clay content

**is influenced by geological processes (Ward, 1990):**

Clay alteration	↓	Weathering	↓
Dissolution	↓	Induration	↑
Faulting	↓	Carbonate precipitation	↑
Salt water intrusion	↓	Silification	↑
Shearing	↓	Metamorphism	↕
↓ decreases	↑ increases	↕ increases or decreases	

12

## GUS ARCHIE (Cerca de 1942)



"The most influential study of rock resistivity was Archie's 1942 examination of sandstone cores from the Gulf Coast region."

(Hearst , Nelson 1985)

13

## Conducción eléctrica en un medio poroso: el Factor de Formación

*Archie (1942)*

\* En una arenisca limpia con poros ocupados por agua salina, la resistividad de la roca es proporcional a la salinidad del agua saturante. El factor de proporcionalidad es llamado "factor de formación"

$$F = R_0 / R_w .$$

\* El factor de formación varía como:

$$F = 1 / \Phi^2 .$$

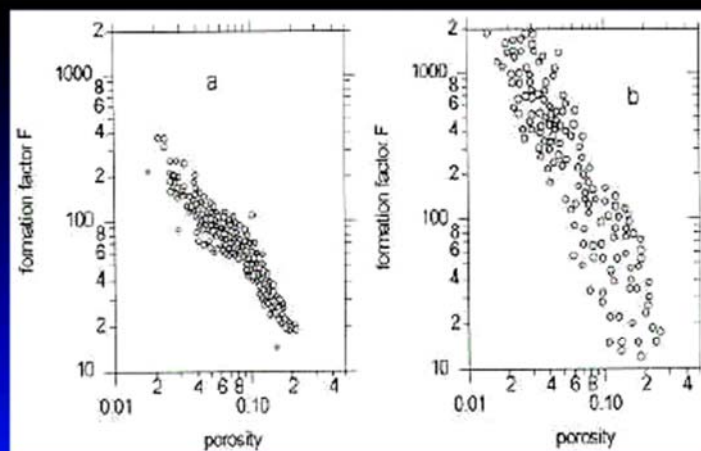
\* El índice de saturación en un reservorio ( $I_R = R_f / R_0$ ) varia como la inversa del cuadrado de la saturación.

$$I = 1 / S_w^2 .$$

14



## F vs. Porosidad



**Formation factor vs. porosity**

**a) sandstone**  
(Tunn, 1966)

**b) limestone**  
(Dachnov, 1975)

This can be described by equation

$$\log F = \log a - m \log \phi \quad \text{or}$$

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\phi^m}$$

**a, m** (cementation exponent) empirically

15

## Relaciones entre el factor de formación y la porosidad

**Humble equation**

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{0.62}{\phi^{2.15}}$$

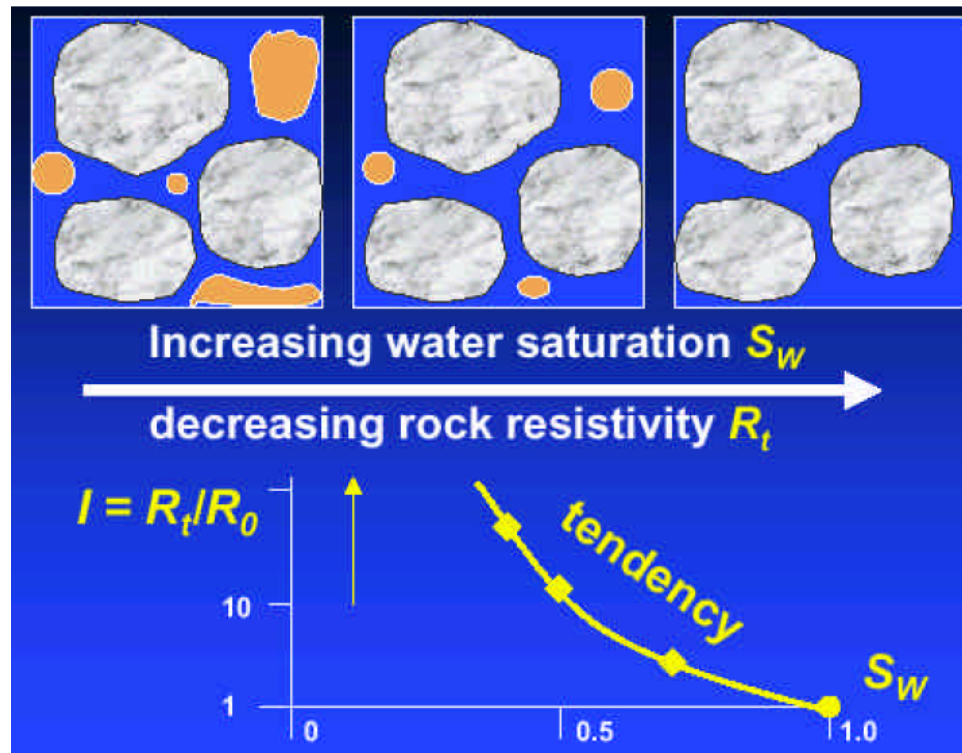
**The exponent *m*** (Doveton 1986)

Sediment type	<i>m</i>	Remarks
<b>Sandstone, sand</b>		
- unconsolidated	1.3	<b><i>m</i> correlates with cementation</b>
- very slightly cemented	1.4 ... 1.5	
- slightly cemented	1.5 ... 1.7	
- moderately cemented	1.8 ... 1.9	
- highly cemented	2.0 ... 2.2	
<b>Carbonates</b>		
- chalky limestones	1.7 ... 1.8	<b><i>m</i> correlates with porosity type</b>
- crystalline & granular carbonates	1.8 ... 2.0	
- carbonates with vugs	2.1 ... 2.6	

16

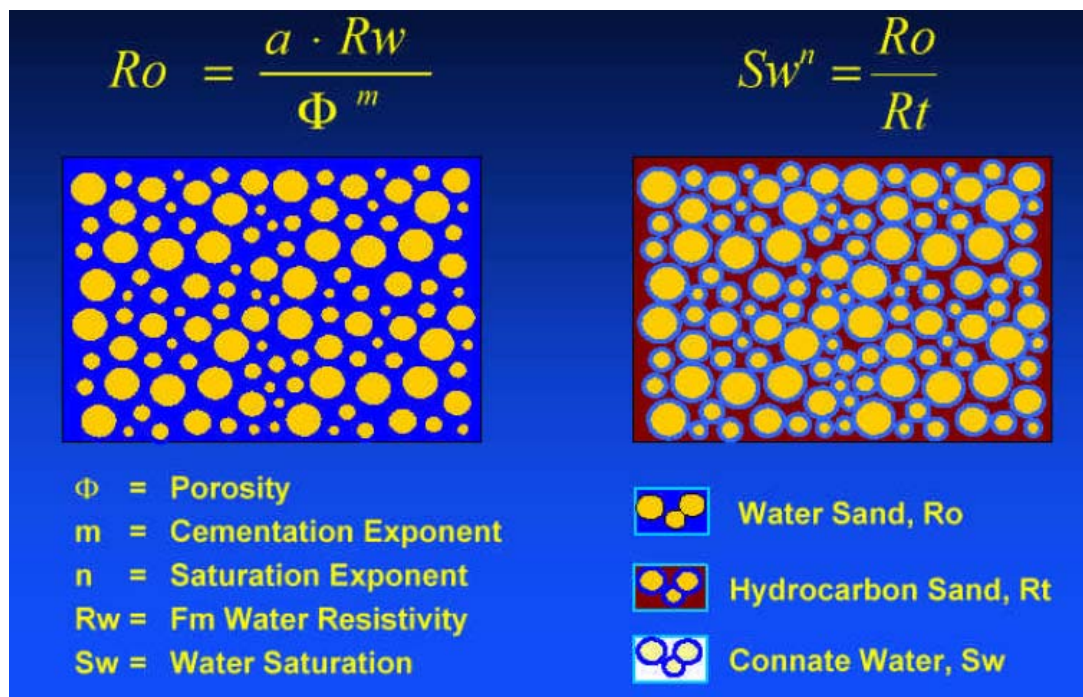


## RESISTIVIDAD: Influencia de la Saturación en Agua



17

## Resistividad y Saturación



18

# Valor medio del exponente de saturación

Saturation exponent is:

- controlled by conducting brine distribution in pore space
- depends on rock texture, wetting properties, saturation technique

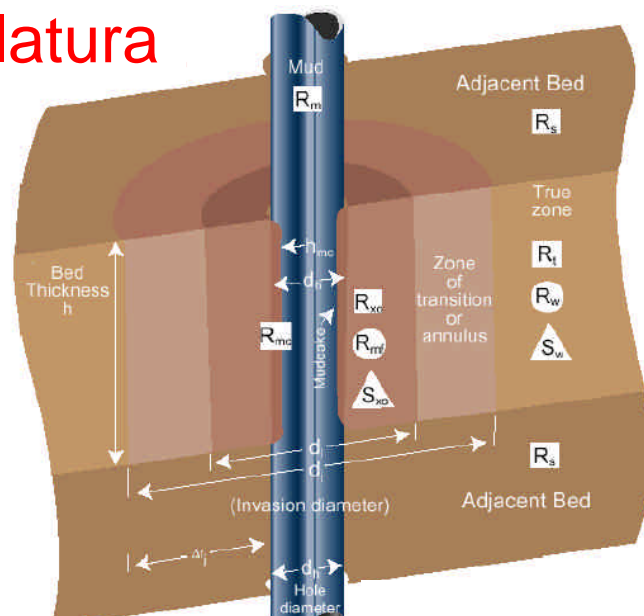
**Saturation exponent  $n$**  (Worthington et. al. 1989)

Rock type	$n$	Reference
Sandstones	1.42...2.55	Wyllie, Spangler 1952
	1.12...2.52	Pierce, Loewe 1958
	1.69...2.08	Walther, 1968
	1.65...2.44	Wilson, Hensel 1982
	1.42...2.24	Hunt et al. 1985
Limestones	2.30 ...2.38	Walther 1968
	1.10...1.90	Sharma et al. 1980
	1.65...2.22	Swanson 1980

19

## Nomenclatura

- Resistividad de la zona
- Resistividad del agua en la zona
- △ Saturación en agua en la zona



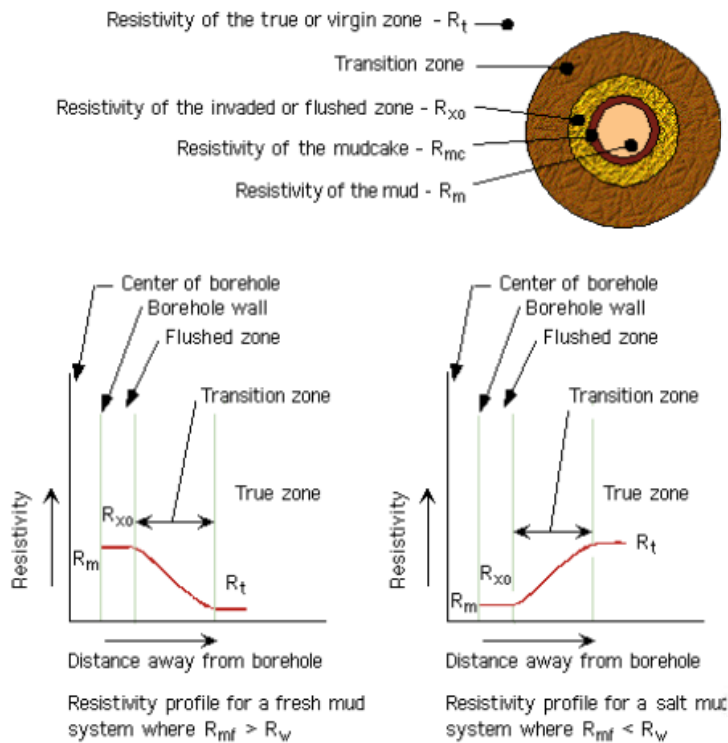
Zone	Formation resistivity (tool measured)	Fluid resistivity (laboratory measured and/ or log calculated)	Fluid saturation
Hole	$R_m$ ( $m$ = mud)	$R_m$	
Mud cake	$R_{mc}$ ( $mc$ = mud cake)	$R_{mc}$	
Flushed zone	$R_o$	$R_{mf}$ ( $mf$ = mud filtrate)	$S_{mf}$ (saturation in mud filtrate)
Invaded zone (transition)	$R_i$ ( $i$ = invaded)	$R_t$ ( $R_{mf}$ + $R_w$ mixed)	
Uninvaded zone	$R_t$ ( $t$ = true)	$R_w$ ( $w$ = formation water) $R_o$ ( $o$ = original)	$S_w$ (saturation in formation water)

\* $R_t$  = true, uninvaded formation resistivity of rock which may contain hydrocarbons – tool measured.  
 $R_o$  = Original, uninvaded formation resistivity of rock with 100% formation water saturation. Cannot be tool measured.  
It is an ideal figure for calculations. In clean 100% water-saturated zones  $R_t = R_o$  (or is very close).

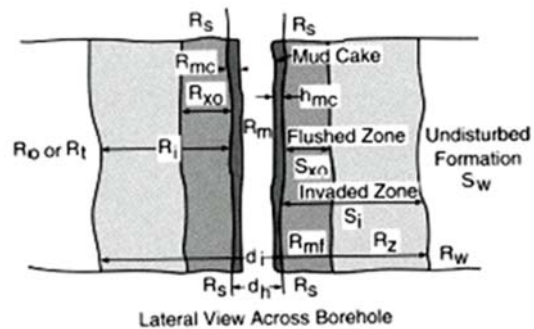
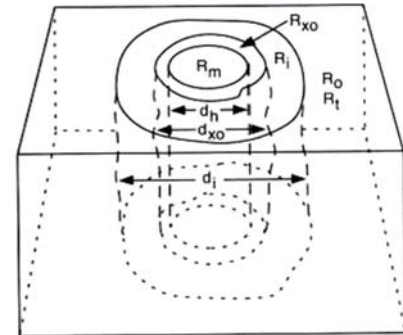
20



## Invasion Model - Resistivity Profiles



Perfiles de resistividad eléctrica del entorno del pozo



## Resumen:

### La resistividad:

#### Depende de:

- porosidad efectiva
- Salinidad del agua de formación
- Presencia de hidrocarburos

#### Aumenta con:

- Aumento en el contenido de hidrocarburos
- Disminución de la porosidad efectiva
- Aumento de la resistividad del agua de formación (por agua dulce)



# [ **PERFILAJE GEOFÍSICO DE POZOS** ]

## ■ Apunte: 9

- Perfiles de Resistividad
  - Perfiles por conducción
  - Perfiles por inducción

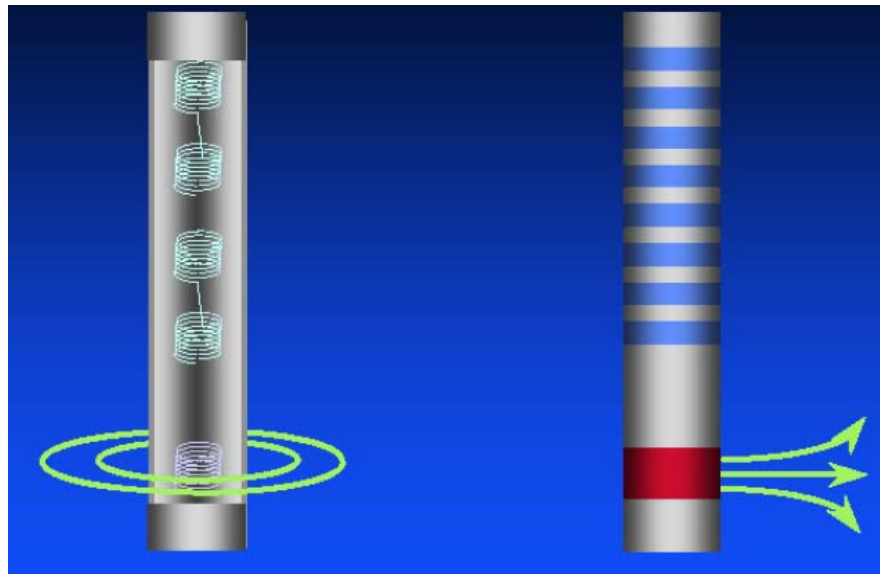
23

# [ **Métodos de medición de la resistividad** ]

- 1) **Método de conducción** (con lodo de perforación conductivo)
- 2) **Método de inducción** (con cualquier tipo de lodo de perforación)

24

## Dos tipos de herramientas eléctricas de perfilaje



Induction

Conduction (Laterolog)

25

## Clasificación de las herramientas de resistividad

### INDUCTION LOGS (measure conductivity)

### ELECTRODE LOGS (measure resistivity)

A. Normal logs

B. Lateral Log<sup>†</sup>

C. Laterologs\*

D. Spherically Focused Log (SFL)\*

E. Microlaterolog (MLL)\*

F. Microlog (ML)\*

G. Proximity Log (PL)\*

H. Microspherically Focused Log (MSFL)\*

### DEPTH OF RESISTIVITY LOG INVESTIGATION

#### Flushed Zone ( $R_{xo}$ )

Microlog\*

Microlaterolog\*

Proximity\* Log

Microspherically Focused Log\*

#### Invaded Zone ( $R_t$ )

Short Normal <sup>††</sup>

Laterolog -8\*<sup>††</sup>

Spherically Focused Log\*<sup>††</sup>

Medium Induction Log

Shallow Laterolog\*

#### Uninvaded Zone ( $R_f$ )

Long Normal

Lateral Log

Deep Induction Log

Deep Laterolog\*

Laterolog -3\*

Laterolog -7\*

Induction Log 6FF40

26

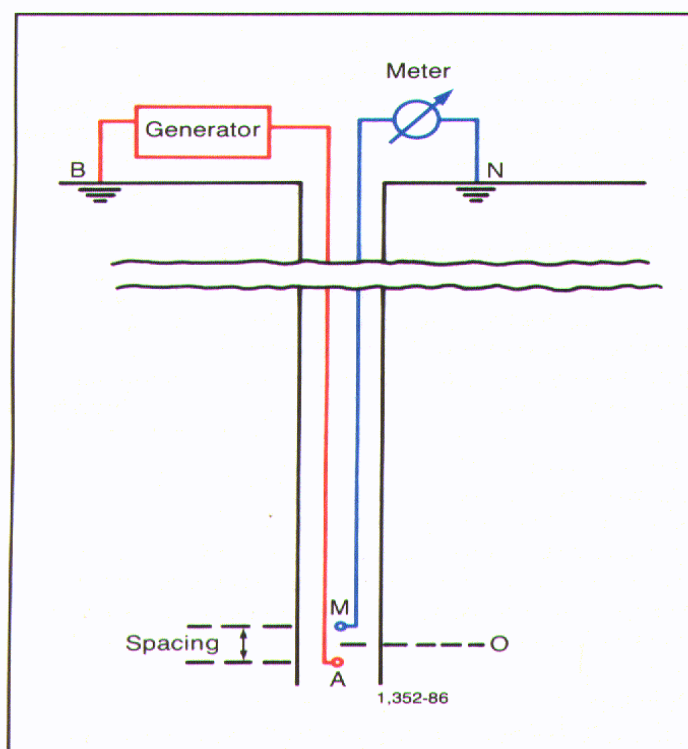
# Método de conducción

## Disposición de electrodos

- Disposición Lateral
- Disposición Normal
  - Normal Corta (espaciamiento de 16pulgadas (41cm))
  - Normal Larga (espaciamiento de 64 pulgadas (183 cm))

27

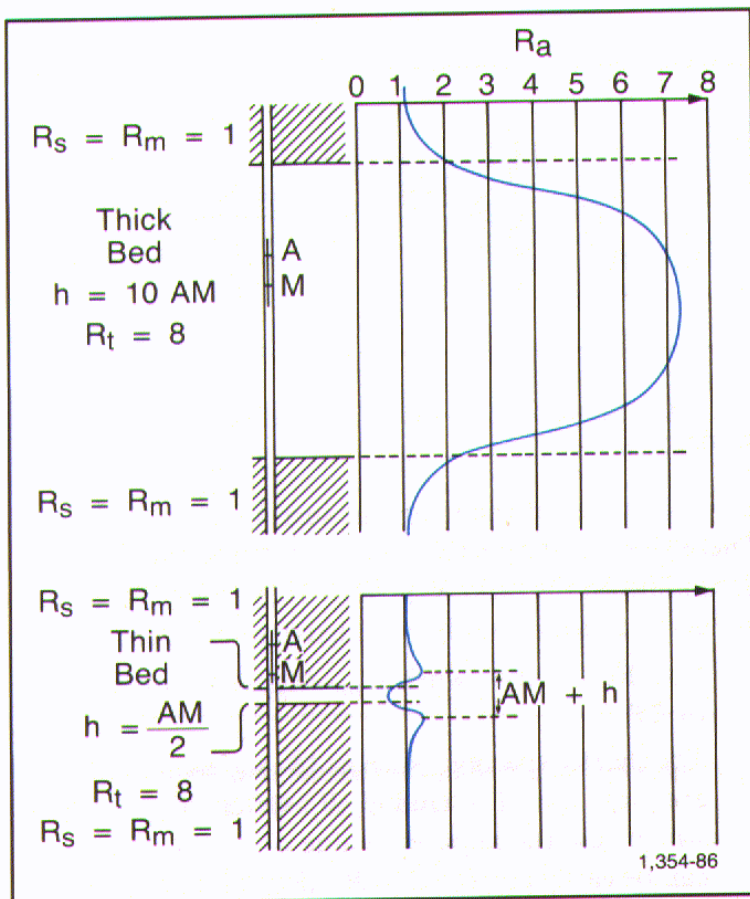
## Esquema del dispositivo normal



28

(Schlumberger; 1987)

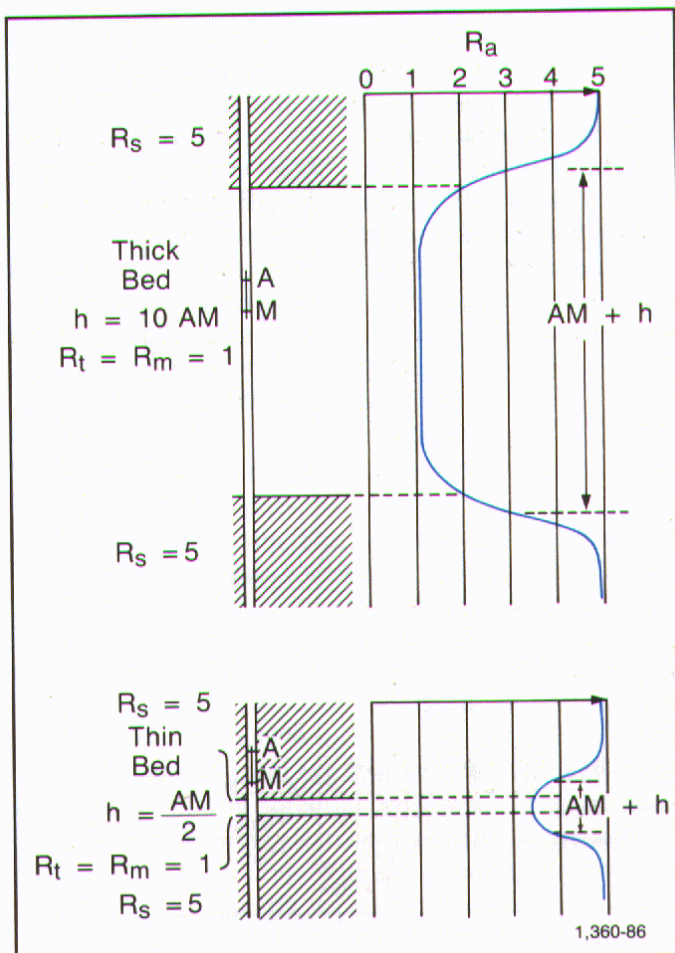




Ejemplos de curvas normales - la capa es más resistiva que las formaciones adyacentes

29

(Schlumberger; 1987)

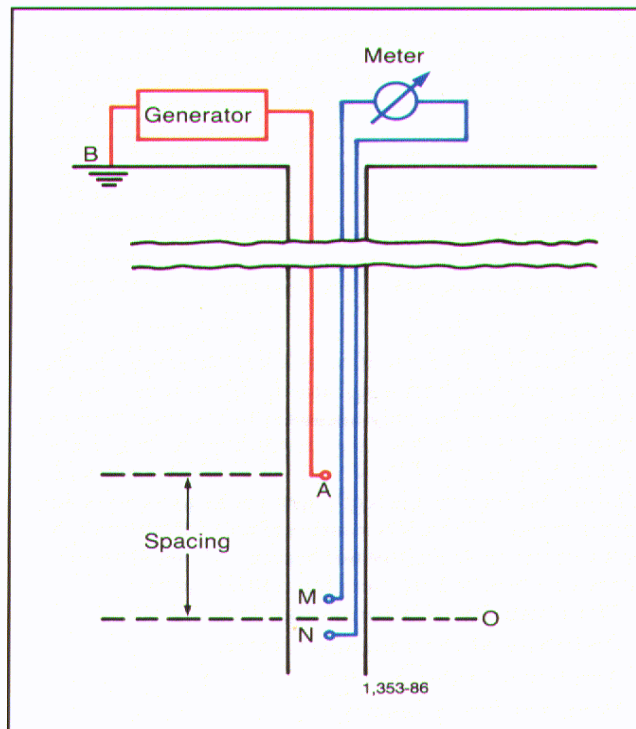


Ejemplos de curvas normales - la capa es menos resistiva que las formaciones adyacentes

30

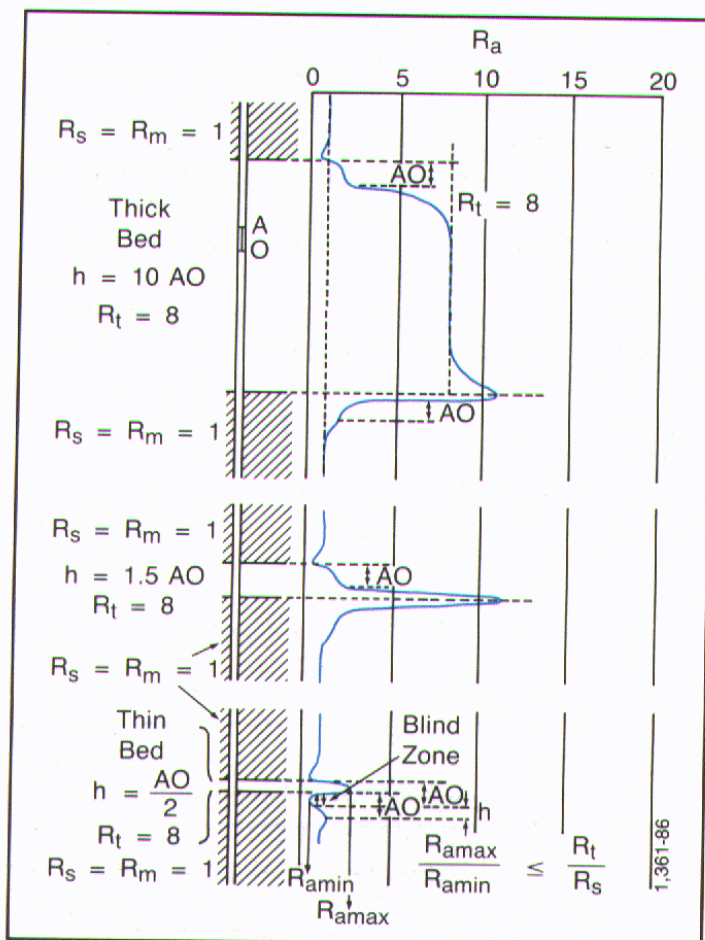
(Schlumberger; 1987)

## Esquema del dispositivo lateral



31

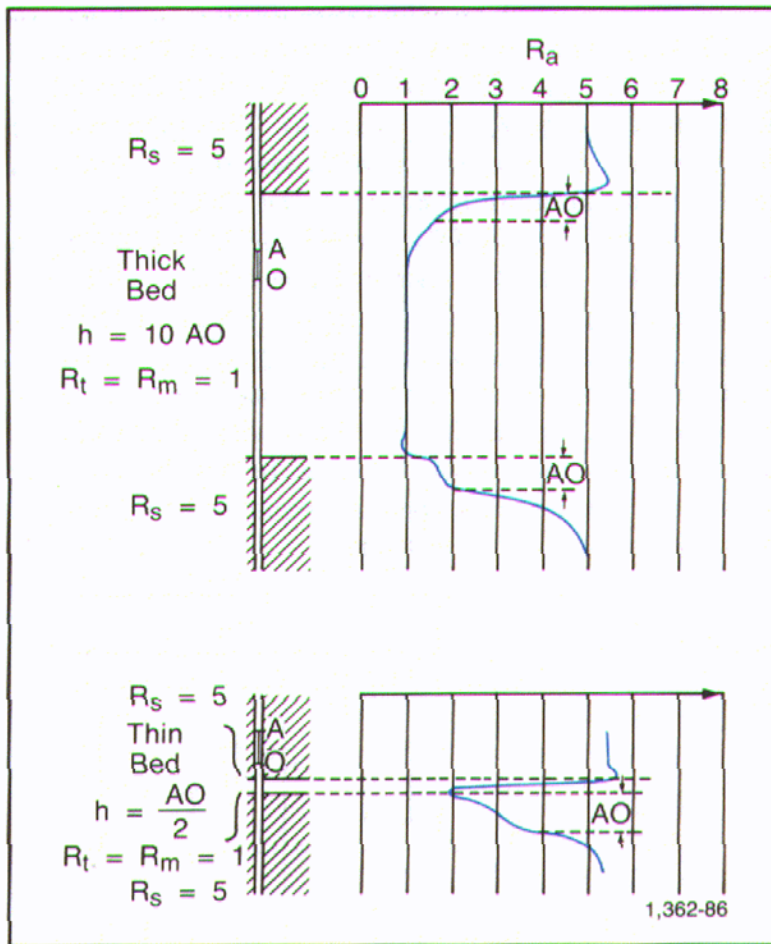
(Schlumberger; 1987)



32

(Schlumberger; 1987)

Ejemplos de curvas laterales - la capa es más resistiva que las formaciones adyacentes



Ejemplos de curvas laterales - la capa es menos resistiva que las formaciones adyacentes

33

(Schlumberger; 1987)

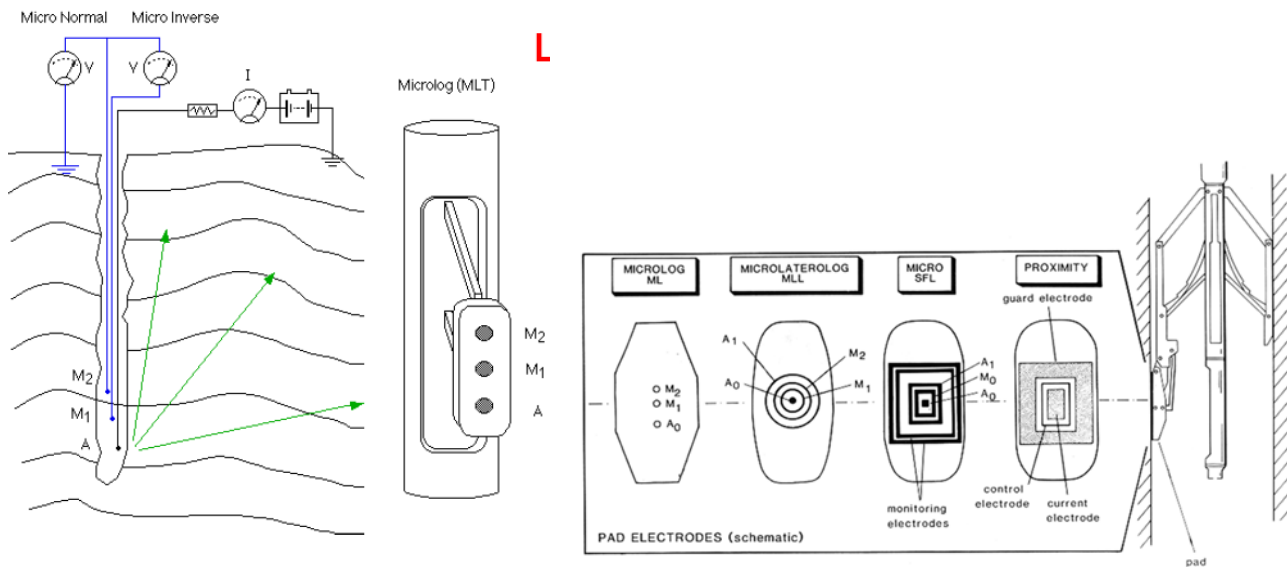
## Otros dispositivos de resistividad por conducción

- Minilog
  - Micronormal ( $R_{1x1}$ )
  - Micro-inversa ( $R_2$ )
- Micro-laterolog
- de proximidad
- MicroSFL

34



## LA HERRAMIENTA MICROLATEROLOG: una herramienta en Patín



35

## Microlog o Minilog

### ■ Util para:

- Detectar intervalos porosos y permeables
- Determinar el espesor útil efectivo
- Registrar variaciones en el diámetro del pozo
- Medir, in situ, la resistividad de la inyección (mientras la sonda baja, con los patines retraídos)

36

## Radio de investigación

Dependerá de:

- Espesor del revoque (\*)
- Porosidad de la formación
- Permeabilidad de la formación
- Profundidad de penetración, en la formación, de los fluidos de perforación

(\*) El espesor del revoque dependerá de:

- La cantidad de filtrado que pasa a la formación
- Las características de taponamiento que posee el revoque

La magnitud de estos parámetros influyen en las dos lecturas obtenidas (micronormal y micro-inversa), pues afectan la:

- Resistividad del revoque ( $R_{mc}$ )
- Resistividad de la zona lavada ( $R_{xo}$ )
- Resistividad de la zona invadida ( $R_i$ )
- En algunos casos, la resistividad de la formación no invadida ( $R_t$ )

37

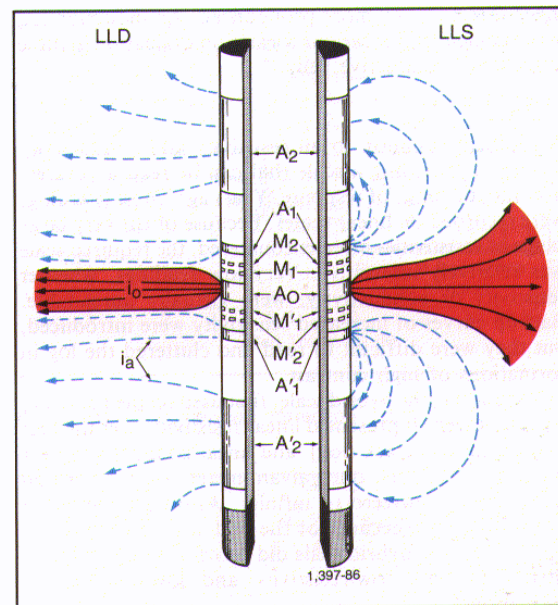
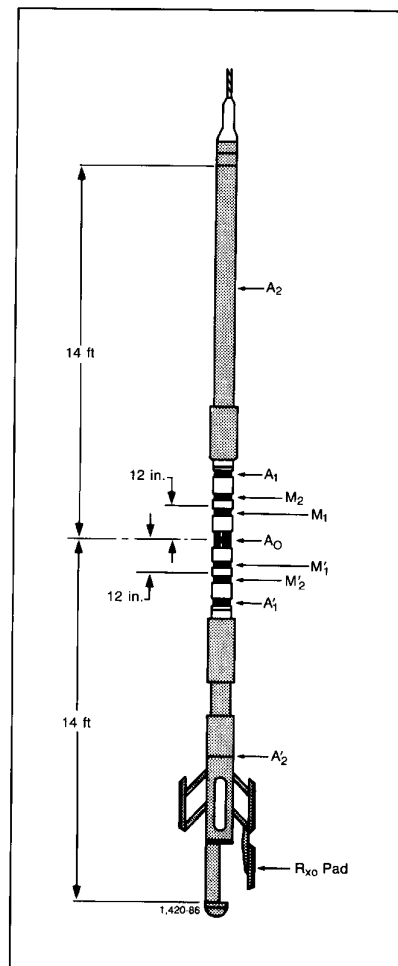
## Perfil lateral (laterolog)

De este sistema se usan dos tipos diferentes de configuraciones de electrodos

- **Sistemas de electrodos múltiples.** Emplea una serie de pequeños electrodos espaciados a lo largo del eje del instrumento de perfilaje
- **Sistema enfocado o "guard".** Consta de electrodos enfocadores alargados a ambos lados de un pequeño electrodo central.

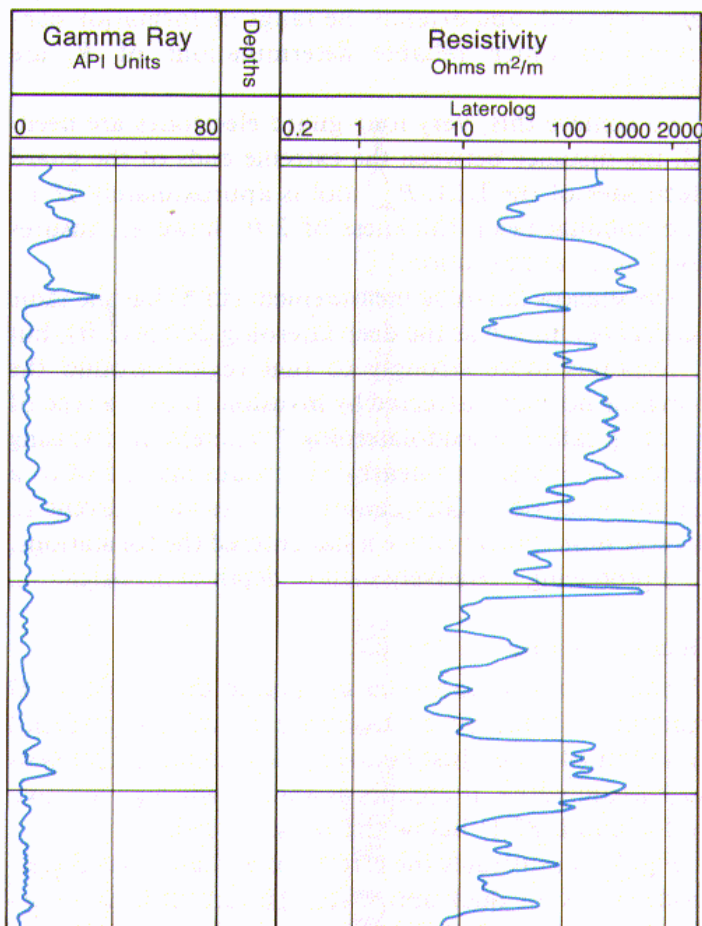
38

## Diagrama esquemático de la herramienta Doble Laterolog



39

(Schlumberger; 1987)



1,408-86

## Perfil Laterolog grabado en escala logarítmica

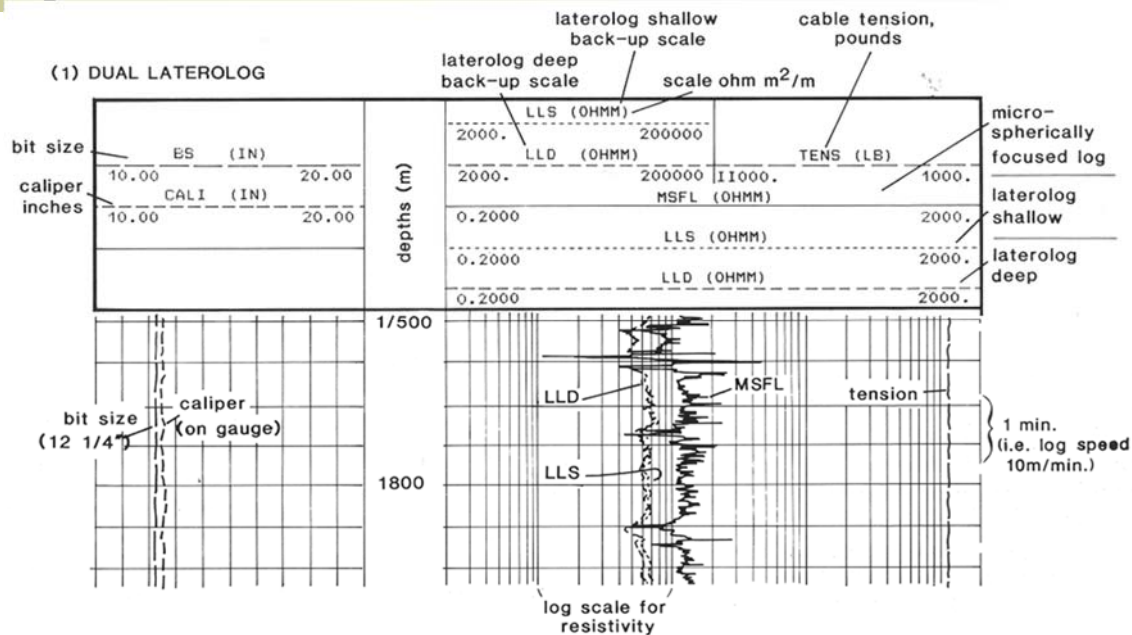
Bajo ciertas condiciones, la resistividad aparente ( $R_a$ ) registrada por el Laterolog, es igual a la resistividad real de la formación ( $R_t$ ), o si no puede corregirse para obtener un valor real de la resistividad.

40

(Schlumberger; 1987)

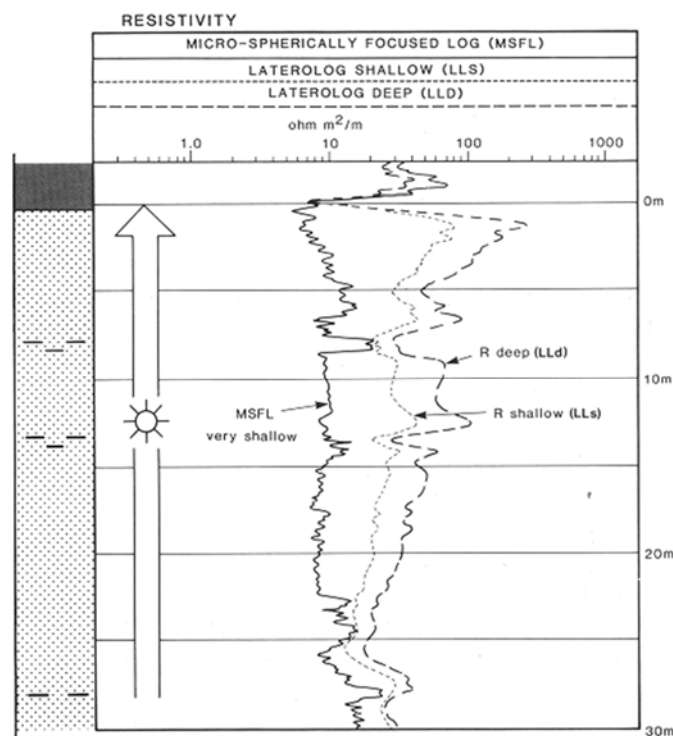


## Formato típico de una combinación de perfil laterolog dual con un perfil micro esféricamente focalizado (MSFL)



41

## Respuesta de los perfiles de resistividad por conducción a la presencia de gas.



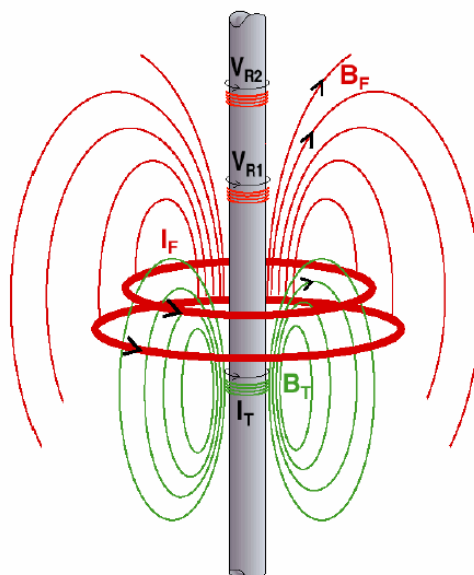
42

## Aplicaciones de los perfiles de resistividad por conducción

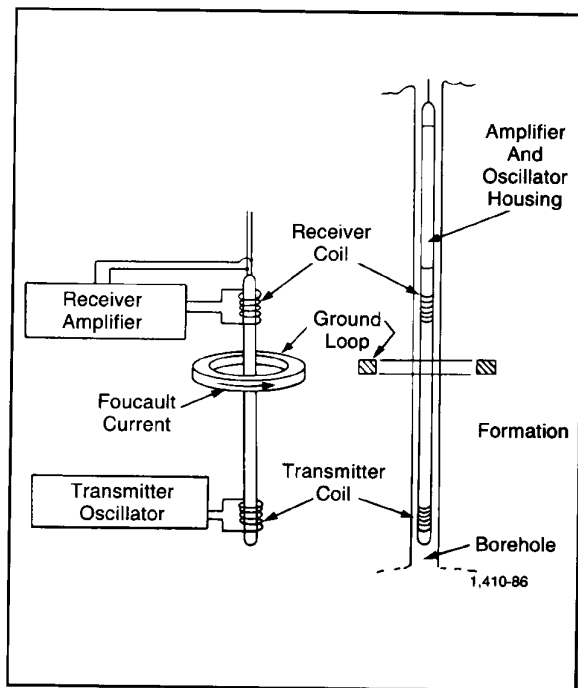
- Correlación y mapeo del subsuelo (SP, Normal Corta)
- Determinación de litologías
- Determinación de espesores de capas (SP y normal corta)
- Localización de capas petrolíferas y determinación del contenido de petróleo
- Determinación de salinidad del agua de formación
- Localización de acuíferos de agua dulce y estimación de la cualidad del agua

43

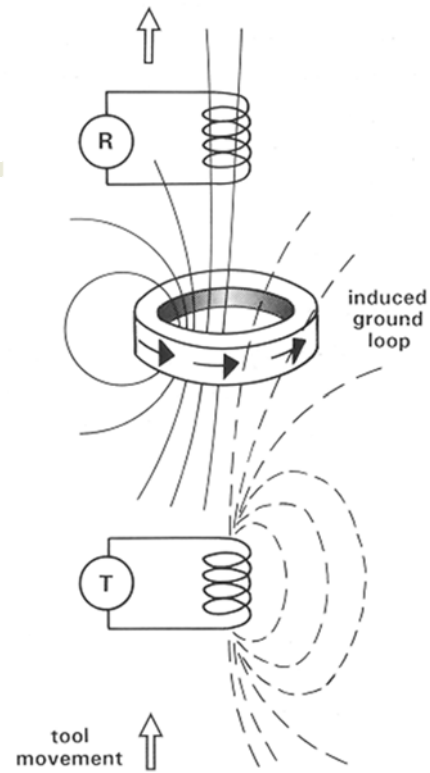
## Perfiles de conductividad por inducción



44



Esquema básico de dos bobinas para el registro de inducción.



Principios físicos de las herramientas de inducción

(Schlumberger; 1987)

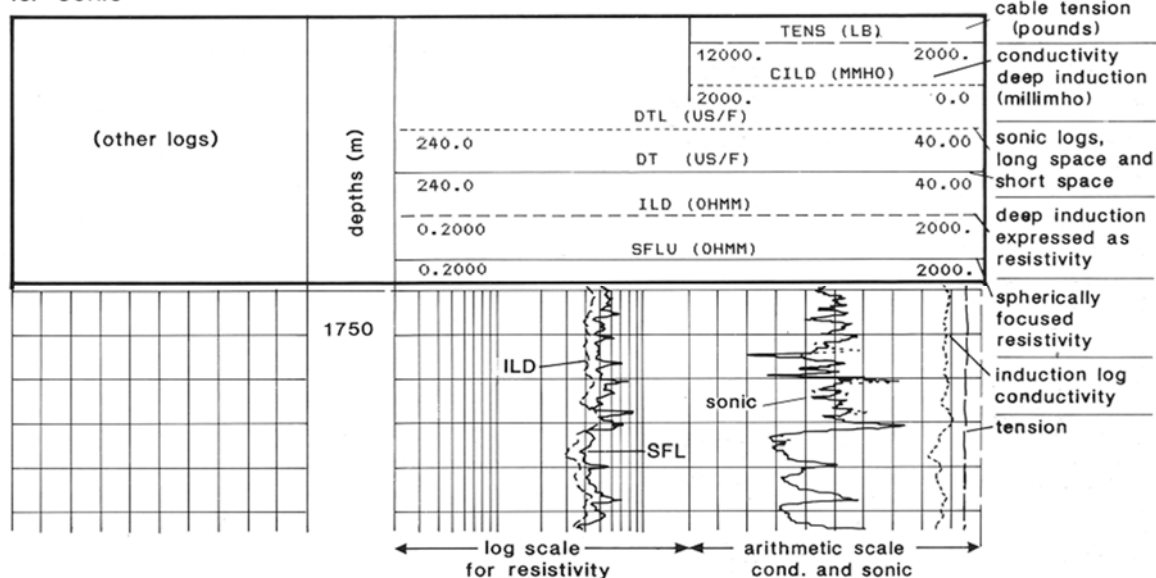
45

## Perfiles de Inducción

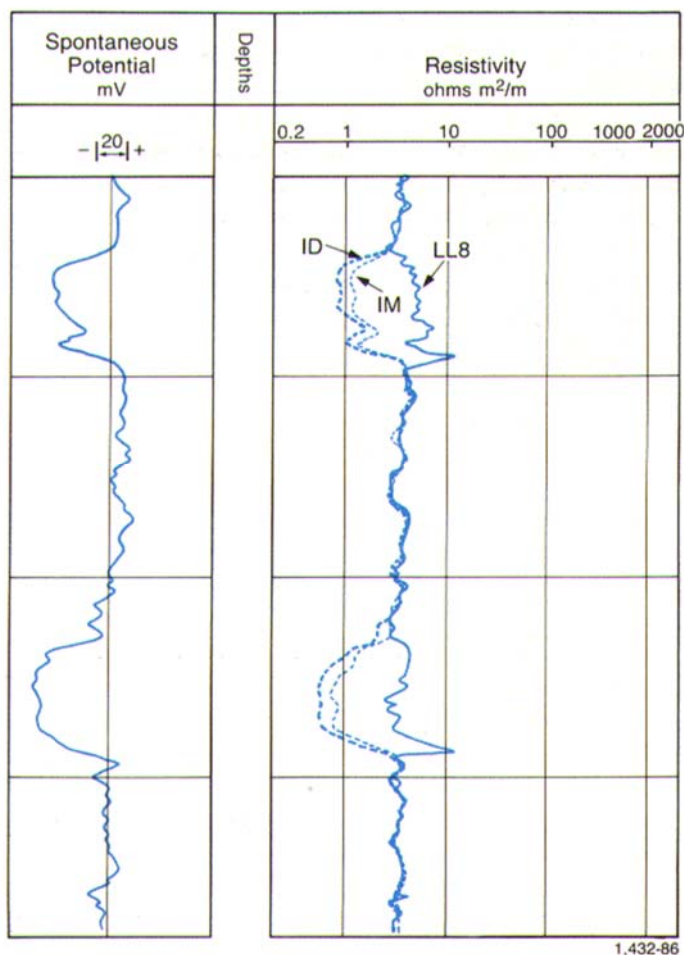
- Perfil de doble inducción
  - Sistema de investigación profunda
  - Sistema de investigación medianamente profunda)
- Perfil enfocado. Sistema enfocado por electrodos laterales ("guard system" de investigación poco profunda (FL)

## Formato típico de una combinación de perfil de inducción con perfil focalizado esféricamente (SFLV)

(2) ISF-SONIC



47



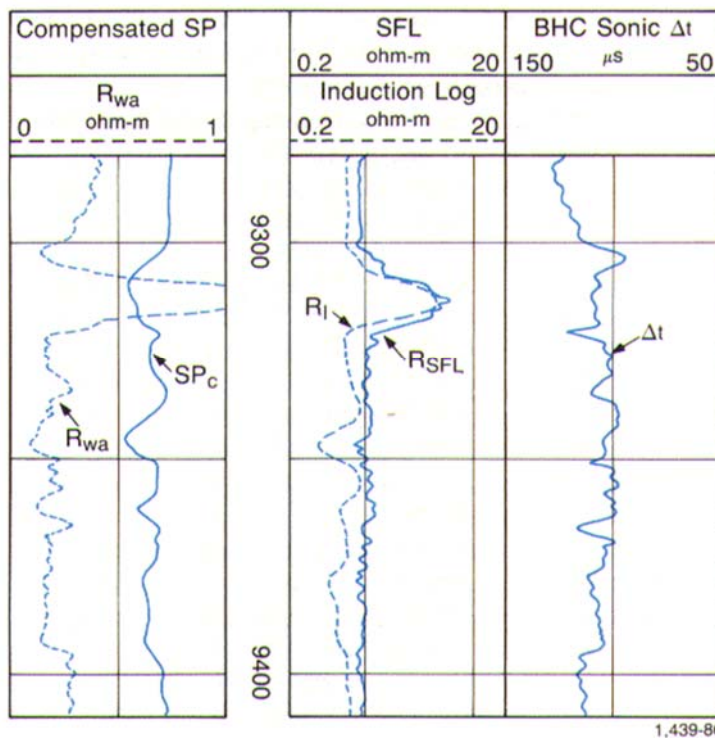
Presentación del perfil de Doble Inducción Laterolog 8.

48

(Schlumberger; 1987)



## Combinación de perfil de inducción y esféricamente focalizado

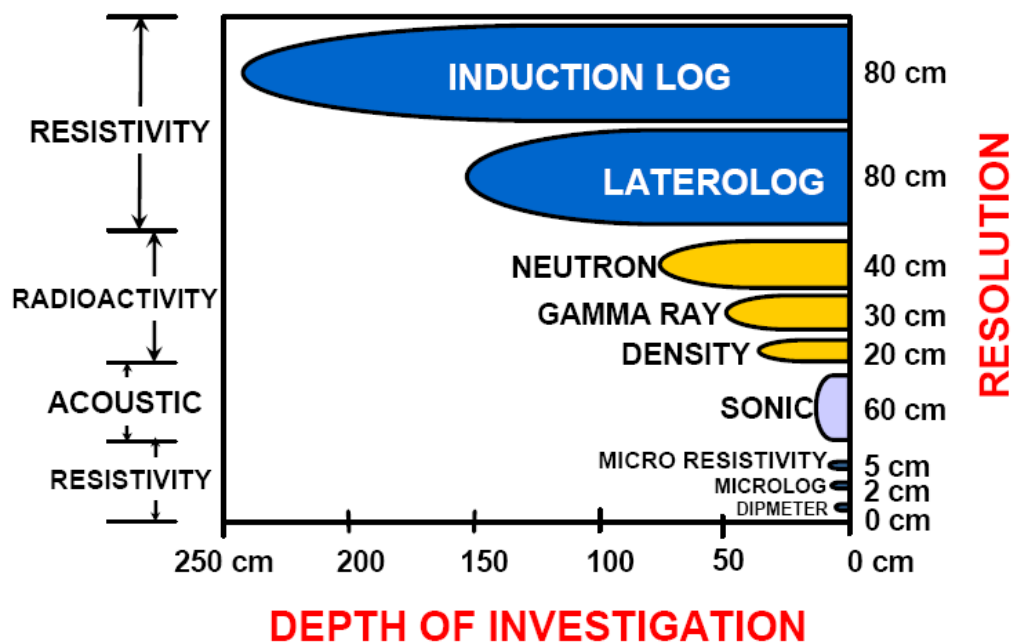


1,439-86

(Schlumberger; 1987)

## Resolución vertical y profundidad de investigación

### Logging Tools



## Principales usos de los perfiles de resistividad por conducción y por inducción

	Discipline	Used for	Knowing
Quantitative	Petrophysics	Fluid saturations: Formation ( $S_w$ ) Invaded zone ( $S_{xo}$ ) i.e. detect hydrocarbons	Formation water resistivity ( $R_w$ ) Mud-filtrate resistivity ( $R_{mf}$ ) Porosity ( $\phi$ ) (and F) Temperature ( $T_{fm}$ )
Semi-quantitative and Qualitative	Geology	Textures	Calibration with laboratory samples
		Lithology	Mineral resistivities
		Correlation	
	Sedimentology	Facies, Bedding characteristics	Gross lithologies
	Reservoir geology	Compaction, overpressure and shale porosity	Normal pressure trends
	Geochemistry	Source rock identification Source rock maturation	Sonic and density log values Formation temperature