

## DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE ESTRATOS SEDIMENTARIOS MEDIANTE DISPERSIÓN COMPTON DE RAYOS GAMMA.

JORGE ROJAS, Y LUIS D. BEAUPERTHUY

Centro de Sismología, Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela.

### RESUMEN

Se aplicó a dos bloques patrones de densidades conocidas la herramienta emisora de rayos gamma con dos detectores, que utiliza la industria petrolera para la evaluación de la porosidad de la roca matriz de un yacimiento; de esta manera se simuló la formación antecedida por los medios parásitos que se interponen entre ésta y la herramienta cuando se hace la medida desde el interior de la tubería en un pozo. De los espectros de energía para cada detector, se caracterizó el efecto de los medios parásitos en la medida de la densidad de poros. Los espectros del detector lejano en modelo homogéneo y en modelos heterogéneos, presentan una recta en una ventana del espectro, cuya pendiente se relacionó con la densidad del medio de interés. Finalmente, se efectuó por métodos gráficos la corrección de la densidad calculada con la pendiente.

PALABRAS CLAVES: Densidad, estratos sedimentarios, rayos gamma dispersados.

### ABSTRACT

In this study, we applied a gamma ray emitting device composed of two detectors, used by the oil industry to evaluate matrix rock porosity in oil wells, to two metal blocks of known densities, in order to simulate a sedimentary formation preceded by the parasite media which may appear between this formation and the emitting device, when the measurements are made from the inside of an oil well casing. From the energy spectra for each detector, we determined the characteristics of the effect of the parasite media on the measurement of pore density. The spectra in the most remote detector in a homogeneous model and in heterogeneous models show a straight line in a spectrum window, whose gradient we related with the density of the medium under study. Finally, by graphic methods, we corrected the density calculated with the gradient.

KEY WORDS: Density, sedimentary strata, scattered gamma rays.

### INTRODUCCIÓN

La porosidad del sustrato rocoso es una de las variables que permiten evaluar la cantidad de hidrocarburos presentes en un yacimiento (Asquith y Gibson, 1982). La porosidad tiene relación con la densidad electrónica de la formación sedimentaria (Davis, 1953), para calcular la densidad electrónica existen dispositivos que emiten rayos gamma en el medio de interés, los cuales sufren dispersión Compton con los electrones de la formación (Tittman y Wahl, 1964).

Una medida de los rayos gamma dispersados, suministra información sobre la densidad electrónica del medio dispersor (Attix y Roesch, 1968). El método de testificación radiactiva genera excelentes resultados en la cuantificación de la densidad electrónica aparente de los estratos sedimentarios, con fluidos inmersos en sus espacios porales. En éste método se implementa una herramienta conformada por dos detectores y una fuente colimada, con el objetivo de realizar la medida y efectuar cálculos automáticos de la corrección (Wahl et al. 1964).

Recibido: Enero 2000. Aprobado: Enero 2001.

Hasta ahora se ha logrado compensar la medida de los rayos gamma dispersados, cuando la formación sedimentaria está antecedida por otro medio de pequeño grosor (Wahl et al. 1964); sin embargo, no se ha logrado dicha compensación cuando entre los detectores y el medio de interés, se interponen varios medios parásitos con características físicas conocidas, y ese es el objetivo del presente trabajo.

### RELACIONES TEÓRICAS

La porosidad  $\phi$  (porcentaje de volumen ocupado por poros en una formación rocosa) se relaciona con la densidad volumétrica de la formación  $\rho_v$ , la densidad de la roca matriz  $\rho_{ma}$ , y la densidad del fluido que ocupa el espacio poral  $\rho_f$ , según la siguiente ecuación:

$$\phi = \left[ \frac{\rho_{ma} - \rho_v}{\rho_{ma} - \rho_f} \right] \times 100 \quad (1)$$

Puesto que la profundidad de la formación (más de 350 metros) la hace inaccesible para métodos mecánicos de testificación, se utiliza el método de testificación radiactiva (Cantos, 1974). En este método, se introduce en el pozo una herramienta "densidad" (véase figuras 1 y 2), la cual consta de una fuente emisora de rayos gamma, y de dos detectores: uno "cercano" y otro "lejano".

La intensidad de la radiación  $\phi_i$  que recibe cada detector, está relacionada con la intensidad de radiación  $\phi_0$  que emite la fuente colimada, y la distancia  $X_i$  entre detector y fuente, según la siguiente ecuación:

$$\phi_i = \phi_0 \exp(-\mu \rho_e X_i) \quad (2)$$

donde  $i = 1, \text{ ó } 2$  para el detector cercano y lejano respectivamente,  $\mu$  y  $\rho_e$ , son el coeficiente de absorción de masa y la densidad electrónica de la formación, respectivamente.

Manipulando algebraicamente la ec. (2), se puede llegar a este resultado:

$$\ln \phi_2 = \frac{X_2}{X_1} \ln \phi_1 + (1 - \frac{X_2}{X_1}) \ln \phi_0 \quad (3)$$

la cual relaciona las intensidades de radiación  $\phi_1$  y  $\phi_2$  para un determinado material dispersor. Si se grafican los valores de  $\ln \phi_2$  Vs.  $\ln \phi_1$ , obtenidos para distintos materiales dispersores (esto es, de distintas densidades electrónicas) obtendremos una recta, a cada punto de la cual se le asocia una densidad  $\rho_e$ . En la figura 3 se representa dicha recta (recta de densidad), en la cual se usó como referencia los puntos obtenidos con aluminio ( $\rho = 2,70 \text{ g/cc}$ ) y magnesio ( $\rho = 1,70 \text{ g/cc}$ ) como medios difusores (Wahl et al. 1964).

Fig. 1. Visualización esquemática de la utilización del método testificación geofísica.

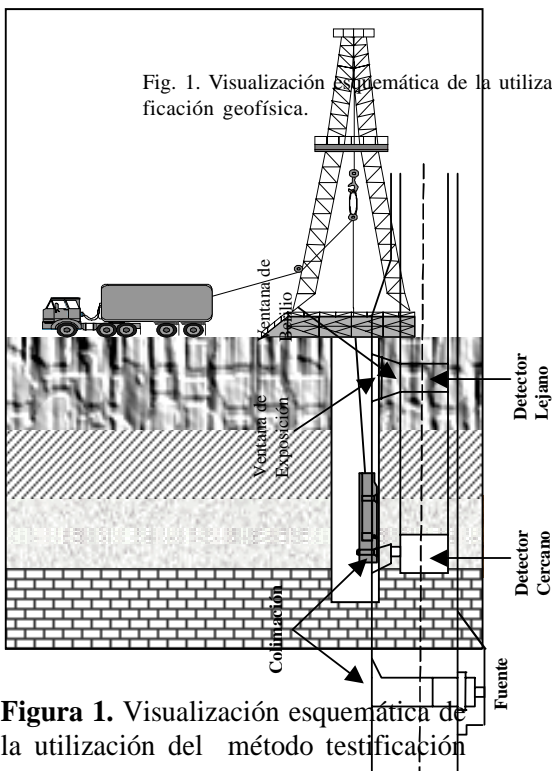


Fig. 2. Diagrama esquemático de la herramienta densidad.



Figura 2. Diagrama esquemático de la herramienta densidad.

En la situación real, el medio no es homogéneo, pues hay una capa de lodo de espesor variable entre la formación a testificar y la herramienta, el cual se agrega para estabilizar al hoyo. Por lo tanto, los puntos  $(\ln \phi_1, \ln \phi_2)$  salen fuera de la recta densidad correspondiente al caso

homogéneo; en la figura 4 mostramos este fenómeno. Se ha determinado experimentalmente que las dos rectas hacen un ángulo de 30° para lodos de distintas densidades, pero de igual espesor. Existe un software que determina la corrección  $\Delta \rho$  (Computalog, 1995) reflejada en la figura 4.

Fig. 4. Geometría de la compensación de los puntos ubicados fuera de la recta densidad.

Los puntos son compensados haciendo una proyección sobre la recta densidad. La densidad aparente correspondiente al medio de interés que computa la herramienta es:

$$\rho_v = \rho_1 \pm \Delta \rho \quad (4)$$

si los puntos se encuentran a la derecha de la recta,  $\Delta \rho$  es positiva, si no, es negativa.

#### EL SISTEMA DE REGISTRO DE RAYOS GAMMA Y LA FORMACIÓN DEL ESPECTRO

Luego que la señal llega a la computadora, los rayos gamma son seleccionados en 128 canales por cada detector, de acuerdo al nivel energético registrado por los detectores. Graficando el logaritmo en base 10 el número de rayos gamma que se acumulan en un segundo por cada uno de los 128 canales de energía, se obtiene un espectro (Bertozzi et al. 1981; Voskoboinikov, 1957) como se observa en la figura 5.

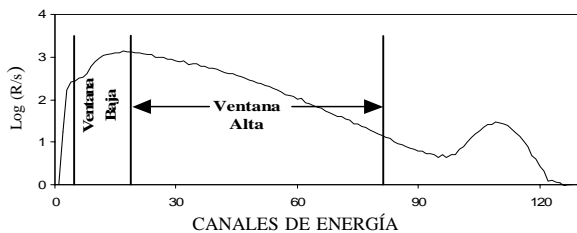


Fig. 5. Espectro típico del logaritmo de los rayos gamma pr segundo con respecto a los canales de energía.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo del sistema donde se requiere realizar las mediciones de densidad, se muestra en la figura 6. Por medio de la caracterización y construcción de los medios 1 (el tubo) y 2 (el cemento), además de simular la formación con dos bloques (aluminio y magnesio), de densidades conocidas ( $\rho_{Al} = 2,70 \text{ g/cm}^3$  y  $\rho_{Mg} = 1,70 \text{ g/cm}^3$ ), que se adecúan a las características de la herramienta, se construyen espectros de energía, para los detectores lejano y cercano, además de registrar los valores de  $\rho$  y  $\Delta \rho$ , para cada uno de los modelos que a continuación se mencionan:

1. Magnesio sólo
2. Aluminio sólo
3. Magnesio con el medio 1 (espesor 15,4 mm.)
4. Aluminio con el medio 1
5. Magnesio con los medio 1 y 2 (espesor 5mm.)
6. Aluminio con los medios 1 y 2
7. Aluminio con los medios 1 y 2.1 (espesor 10mm.)

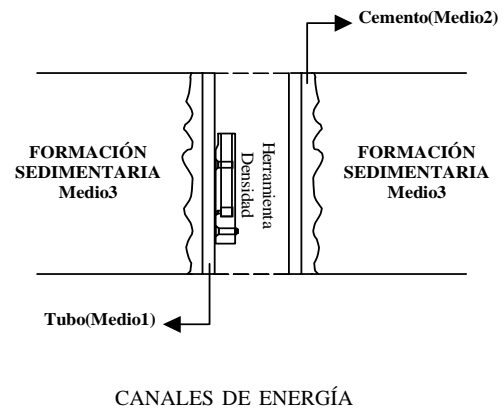


Fig. 6. Diagrama esquemático lateral del modelo presente en la medición.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se tabularon los datos correspondientes a los 128 canales de energía para cada uno de los detectores (lejano y cercano), de cada uno de los modelos de simulación nombrados en el aparte anterior. Los casos (1) y (2) modelan modelos homogéneos, los restantes corresponden a medios no homogéneos. Como referencia, mostramos en las tablas 1 y 2 los resultados correspondientes al caso (1) para los detectores lejano y cercano, respectivamente.

TABLA 1. Fotones registrados por el detector lejano en un tiempo t y seleccionados en algunos canales de energía.

CANALES DE ENERGÍA	RAYOS GAMMA (R)	TIEMPO DE REGISTRO(s)	RAYOS GAMMA/ TIEMPO DE REGISTRO(R/s)	LOG(R/s)
1	0	76,86	0,00	
9	38309	76,86	498,43	2,70
17	95435	76,86	1241,67	3,09
25	71576	76,86	931,25	2,97
33	47827	76,86	622,26	2,79
41	34987	76,86	455,20	2,66
49	21063	76,86	274,04	2,44
58	9768	76,86	127,09	2,10
67	4270	76,86	55,56	1,74
76	1872	76,86	24,36	1,39
85	704	76,86	9,16	0,96
94	391	76,86	5,09	0,71
101	453	76,86	5,89	0,77
106	1475	76,86	19,19	1,28
114	1592	76,86	20,71	1,32
119	303	76,86	3,94	0,60
122	104	76,86	1,35	0,13
126	61	76,86	0,79	-0,10
128	62	76,86	0,81	-0,09

TABLA 2. Fotones registrados por el detector cercano en un tiempo t y seleccionados en algunos canales de energía.

CANALES DE ENERGÍA	RAYOS GAMMA (R)	TIEMPO DE REGISTRO (s)	RAYOS GAMMA/ TIEMPO DE REGISTRO (R/s)	LOG(R/s)
1	0	76,86	0,00	
9	16852	76,86	219,26	2,34
17	38889	76,86	505,97	2,70
25	35781	76,86	465,53	2,67
33	31117	76,86	404,85	2,61
41	29933	76,86	389,45	2,59
49	23858	76,86	310,41	2,49
58	119	76,86	151,17	2,18
67	4264	76,86	55,48	1,74
76	1872	76,86	24,36	1,39
85	704	76,86	9,16	0,96
94	391	76,86	5,09	0,71
101	453	76,86	5,89	0,77
106	1475	76,86	19,19	1,28
114	1219	76,86	15,86	1,20
119	206	76,86	2,68	0,43
122	47	76,86	0,61	0,08
126	33	76,86	0,43	0,63
128	29	76,86	0,38	0,58

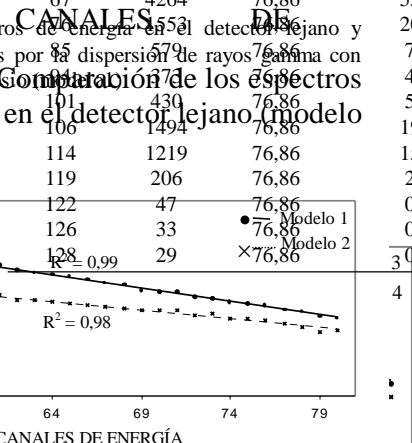


Figura 7. Espectros de energía en el detector lejano y cercano, formados por la dispersión de rayos gamma con el bloque de magnesio.

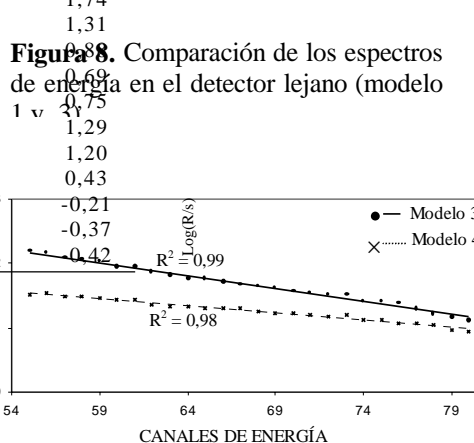


Figura 8. Comparación de los espectros de energía en el detector lejano (modelo 1 y 3).

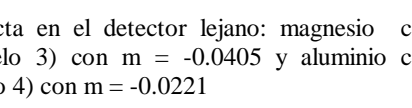


Figura 9. Recta en el detector lejano: magnesio sólo (modelo 1) con m = -0.0264 y aluminio sólo (modelo 2) con m = -0.0264.



Figura 10. Recta en el detector lejano: magnesio con medio 1 (modelo 3) con m = -0.0405 y aluminio con medio 1 (modelo 4) con m = -0.0221.

En la tabla 3 se representan los valores de las densidades medidas por la herramienta y sus correspondientes correcciones, para los casos (1) al (7). Como ejemplo de la construcción de espectros de energía para todos los modelos referidos, se muestra la figura 7 correspondiente al modelo (1).

TABLA 3. Valores de la densidad medida por la herramienta y la corrección aplicada a la medida

MODELO DE SIMULACIÓN	Densidad medida por la Herramienta ( $\rho_v$ ) en g/cm <sup>3</sup>	Corrección aplicada a la medida de Densidad ( $\Delta\rho$ ) en g/cm <sup>3</sup>
1) Magnesio sólo.	1,69	0,00
2) Aluminio sólo.	2,59	-0,04
3) Magnesio con Medio 1.	2,02	-6,41
4) Aluminio con Medio 1.	2,86	-3,15
5) Magnesio con Medios 1 y 2.	2,06	-1,98
6) Aluminio con Medios 1 y 2.	2,90	-1,81
7) Aluminio con Medios 1 y 2.1.	2,85	-3,08

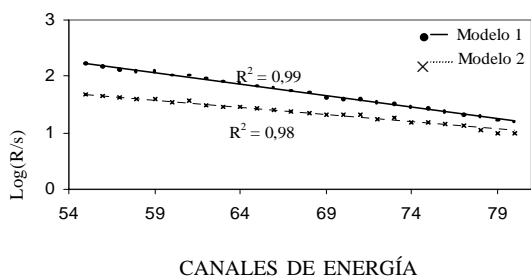


Fig. 9. Recta en el detector lejano: magnesio sólo (modelo 1) con  $m = 0.0411$  y aluminio sólo (modelo 2) con  $m = 0.0264$

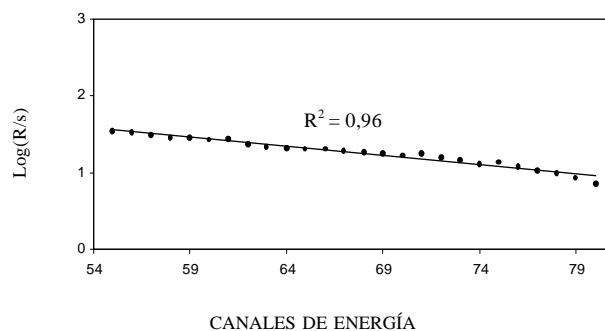


Fig. 12. Recta en el detector lejano aluminio con medios 1 y 2.1 (modelo 7) con  $m = -0,0236$



Fig. 10. Recta en el detector lejano: magnesio con medio 1 (modelo 3) con  $m = 0.0405$  y aluminio con medio (modelo) con  $m = 0.0221$ .



Fig. 11. Recta en el detector lejano: magnesio con medios 1 y 2 (modelo 5) con  $m = 0.0368$  y aluminio con medios 1 y 2 (modelo 6) con  $m = 0.0214$ .

El objetivo principal de la digitalización y construcción de espectros es compararlos para identificar la zona donde los mismos son similares. La figura 9 muestra un ejemplo de comparación de espectros para los distintos modelos referidos anteriormente. Colocando atención en la comparación de los espectros para el detector lejano (el que registra más fotones dispersados por el bloque de simulación) (Robert, 1995), se puede visualizar que en la zona comprendida desde el canal 55 hasta el canal 80, las gráficas correspondientes al medio homogéneo y al medio con parásitos, se aproximan a rectas de pendientes muy similares, como se puede visualizar en las figuras 9 a la 12; donde se observan los valores de las pendientes ( $m$ ) y del factor de calidad en el trazado de la recta a través de los puntos ( $R^2$ ), para cada uno de los modelos nombrados.

### CORRECCIÓN DE LA DENSIDAD CALCULADA POR PENDIENTE

Como se mencionó anteriormente, las pendientes de las rectas para los diferentes modelos de simulación son similares, pero no iguales. Es necesario realizar la corrección de la densidad cuando se calcula por pendientes con medios parásitos, como se puede observar en las figuras 13 y 14. En la figura 15, mostramos la gráfica de dos rectas correspondientes a medios homogéneos y heterogéneos, se puede apreciar que proyecciones de puntos ubicados en la recta para medios heterogéneos sobre la recta para medios homogéneos, el resultado es una densidad sobrestimada.

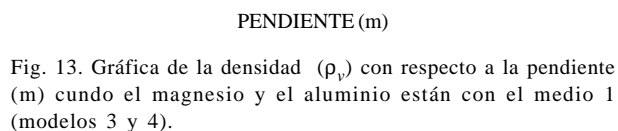


Fig. 13. Gráfica de la densidad ( $\rho_v$ ) con respecto a la pendiente ( $m$ ) cuando el magnesio y el aluminio están con el medio 1 (modelos 3 y 4).

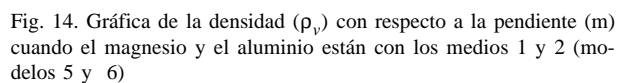


Fig. 14. Gráfica de la densidad ( $\rho_v$ ) con respecto a la pendiente ( $m$ ) cuando el magnesio y el aluminio están con los medios 1 y 2 (modelos 5 y 6)

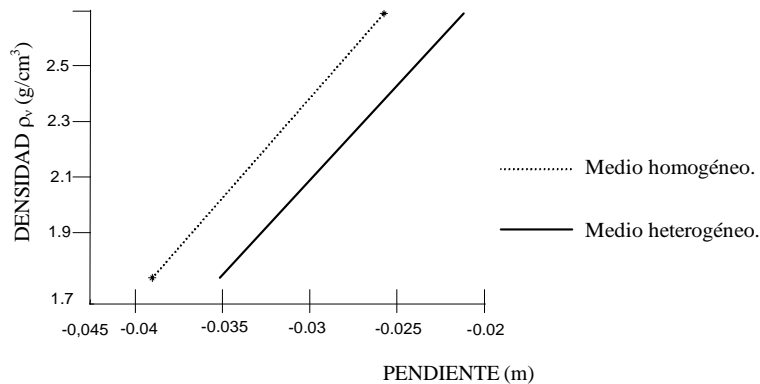


Fig. 15. Comparación de las rectas para medio homogéneo (magnesio sólo y aluminio sólo) y heterogéneo (magnesio y aluminio con los medios 1 y 2).

### CONCLUSIONES

Se logró relacionar la densidad del medio de interés con la pendiente de la recta formada en el detector lejano, de los espectros típicos, en la zona desde el canal 55 hasta el canal 80. Utilizando los valores de las pendientes, es posible determinar la densidad del estrato sedimentario en hueco entubado. Por medio de la construcción de una gráfica pendiente- densidad, es posible efectuar correcciones para diferentes características de los medios parásitos.

### AGRADECIMIENTO

Expresamos agradecimiento a Computalog de Venezuela por el apoyo en el desarrollo del método experimental. En Computalog de Venezuela, al Ing. Igor Hernández por su guía y ayuda técnica en el desarrollo de la fase experimental; a los señores Luis Sárraga, Antonio Valerio y Antonio Sánchez, por la organización de la logística en la fase toma de datos.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASQUITH, G. y GIBSON Ch. 1982. *Basic Well Log Analysis For Geologists*. Pioneer Production Corporation, Texas, pp. 1-5; 91-140.

ATTIX, F. y ROESCH, W. 1968. *Radiation Dosimetry I*. Academy Press, New York, pp. 97.

BERTOZZI, W., ELLIS, D. AND WAHL, J. 1981. *The physical Foundation of Formation Lithology Logging with Gamma Rays*. Geophysics. 48 ( 10): 1439-1455.

CANTOS, J. 1974. *Tratado de Geofísica Aplicada*. Litoprint, España, pp. 447-493.

COMPUTALOG GEARHART. LTD. 1995 *OPEN HOLE TRAINING*, VOLUMEN: 3, 4 Y 5.

DAVIS, D. H. 1953. *Estimating Porosity of Sedimentary Rocks from Bulk Density*. Journal of Geology. 65: 102-107.

ROBERT, D. W. 1995. *Bulk Density Logging with High-Energy Gammas Produced by Fast Neutron Reactions with Formation Oxygen Atoms*. IEEE Nuclear Science Symposium 1995.

TITTMAN, J. & WAHL, J. 1964. *The Physical Foundation of Formation Density Logging (Gamma-Gamma)*. Geophysics. 30: 284-294.

VOSKOBOINIKOV, G. M. 1957. *Theoretical Basis of Selective Gamma-Gamma Core Sampling*. Bulletin. Academy. Of Society. U.S.S.R., Geophysics. 3: 94 – 107.

WAHL, J., TITTMAN, J. AND JOHNSTONE C. 1964. *The Dual Spacing Formation Density Log*. Journal of Petroleum Technology. 16: 1411-1416.