

RELEVAMIENTO GRAVIMETRICO PILOTO DE ALTA RESOLUCION: APLICACION A LA DETERMINACION DEL WEATHERING.

*M. Patricia Martínez¹, Mario E. Giménez¹, Francisco Ruiz Cobos²,
Antonio Introcaso³ y Juan La Vecchia⁴*

¹CONICET. Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de San Juan. Av. Ignacio de la Roza y Meglioli. Rivadavia. San Juan. CP: 5400. mpm@unsj-cuim.edu.ar

² Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de San Juan. Av. Ignacio de la Roza y Meglioli. Rivadavia. San Juan. CP: 5400.

³ CONICET. Instituto de Física de Rosario. Universidad Nacional de Rosario.

⁴ Chevron San Jorge S.A.

RESUMEN

Se presenta un nuevo trabajo que demuestra las bondades de la microgravedad, a partir de la era de gravímetros digitales. Se determinan los parámetros físicos de la zona del weathering, empleados para el cálculo de las correcciones estáticas en exploración de hidrocarburos. A través de una aplicación concreta de ésta técnica, se demuestra además que no sólo es más ágil y económica, sino que el método es más eficiente en cuanto a la determinación de cuerpos anómalos que son inadvertidos por las clásicas técnicas empleadas en la prospección.

Palabras claves: microgravedad - weathering - corrección estática

ABSTRACT

The present investigation demonstrates the advantages of microgravity results obtained with a digital gravimeter. This method was used for the determination of the physical parameters of the weathering zone which are used for the calculation of static corrections in hydrocarbon exploration. Through a concrete application of this technique, it is furthermore shown that it is not only time saving and economical, but also more efficient for the determination of anomalous bodies which are unnoticed by the conventional techniques in current use for prospecting.

Keyword: microgravity - weathering - static corrections

INTRODUCCION

Es bien conocido en el ambiente de la prospección sísmica, que uno de los factores que introduce error en la interpretación de los horizontes sísmicos es la determinación de la zona de weathering. Una evaluación incorrecta de los parámetros de velocidad y espesor de esta capa, conducirían fácilmente a obtención de estructuras ficticias (Dobrin, 1961). Esta zona de baja velocidad, produce un retardo de

la onda sísmica que se propaga a través de ella y por consiguiente un aumento de tiempo de tránsito. La importancia de la determinación de esta capa de baja velocidad se puede resumir según Telford *et al.* (1990) en: 1) La absorción de la energía sísmica es alta en ésta zona. 2) la baja velocidad y los rápidos cambios en las velocidades producen un efecto desproporcionado sobre los tiempos de tránsito de la onda sísmica. 3) los marcados cambios de velocidad en la base de la capa de baja ve-

locidad exageran las curvaturas de los rayos sísmicos tal que su tránsito a través ésta capa sea casi vertical sin tener en cuenta su dirección de tránsito bajo la capa de baja velocidad y 4) un muy alto contraste de impedancia acústico en la interface weathering - subweathering, crean un excelente reflector, que acentúa las reflexiones múltiples.

A través del tiempo, se han practicado numerosas metodologías que intentan mejorar ésta técnica. Una de ellas consiste en la eliminación total de la capa meteorizada colocando todos los detectores en su base. En otra, se sustituye la capa meteorizada por otra de material de alta velocidad del subwethering. También, se hace uso de los tiempos de los primeros arribos de los registros de reflexión. En otros casos, se efectúan dromocronas horizontales, como son las conocidas técnicas de refracción y últimamente upholes que llegan hasta la zona del subweathering, interpolándose las velocidades y espesores obtenidos en cada uno de ellos. Mediante éste último método, se obtienen muy buenos resultados en las cercanías del uphole, pero es un método muy costoso para realizarlo en forma continua sobre una región a investigar.

En el presente trabajo se propone una metodología que si bien ha sido probada anteriormente con resultados aceptables (Profeta *et al.*, 1995), creemos que con los modernos gravímetros digitales, se mejora sensiblemente. Por otro lado la reciente incorporación de la microgravimetría, en trabajos de prospección está dando resultados asombrosos ej., Yule *et al.*, 1998; Hare *et al.*, 1999.

El método consiste en la obtención de las ondulaciones de la interface weathering - subweathering y la determinación de los parámetros físicos (velocidad - espesor), necesarios para el cálculo de las correcciones estáticas, mediante el empleo de una técnica más expeditiva y menos costosa como lo es la microgravedad. Asimismo, se pueden aprovechar las bondades de los métodos potenciales

para la detección de cuerpos anómalos, que producen alteraciones en las velocidades de tránsito de las ondas compresionales, que a veces son inadvertidas por las metodologías usualmente empleadas.

UBICACION DEL AREA DE TRABAJO

El relevamiento de microgravedad se realizó sobre la línea sísmica R238 del área de prospección de Chevron San Jorge S. A., en Puesto Galdame - Provincia de Río Negro. La línea se ubica aproximadamente a 35 km de la ciudad de General Roca (Pcia. Río Negro) y a 9 km de la Ruta N° 6, a la altura del Yacimiento Loma Negra de la misma compañía, como se indica en la Figura 1.

Del relevamiento geológico surge que los suelos de la zona son depósitos superficiales de gravas, arenas, frecuentemente con contenidos de yeso, generalmente en las formaciones de los afloramientos pre cuaternarios. En algunas expresiones cerradas de barreales se encuentran depósitos sedimentarios limoarcillosos. En general son suelos inmaduros, que no han sufrido alteraciones importantes.

DATOS

La información planialtimétrica de la línea R238 fue elaborada por la Compañía Veritas DGC LAND, con estaciones equiespaciadas cada 60 metros y con una precisión promedio en altitud de 0.10 metros. Se contó con la información de cuatro upholes realizados sobre la misma línea R238, ubicados en las estaciones: E.228, E.255, E.291 y E.315 respectivamente.

Sobre la línea R238 y entre las estaciones E.238217 y E.238341 se realizaron 124 determinaciones gravimétricas de precisión, con un espaciamiento aproximado de 50 metros (Figura 1). Se utilizó un gravímetro de

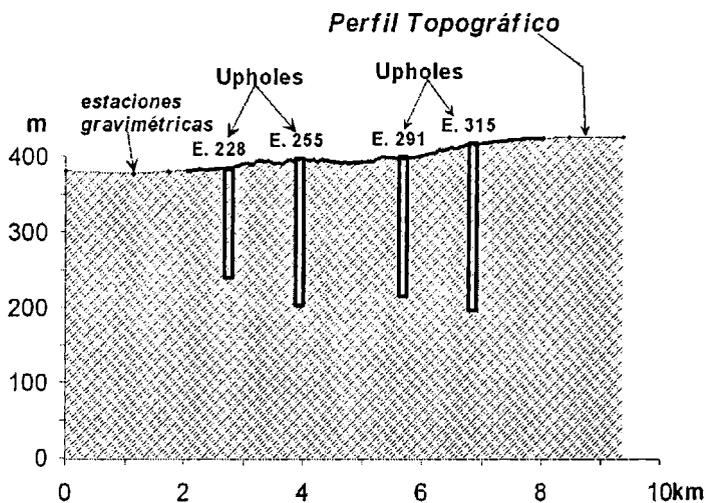
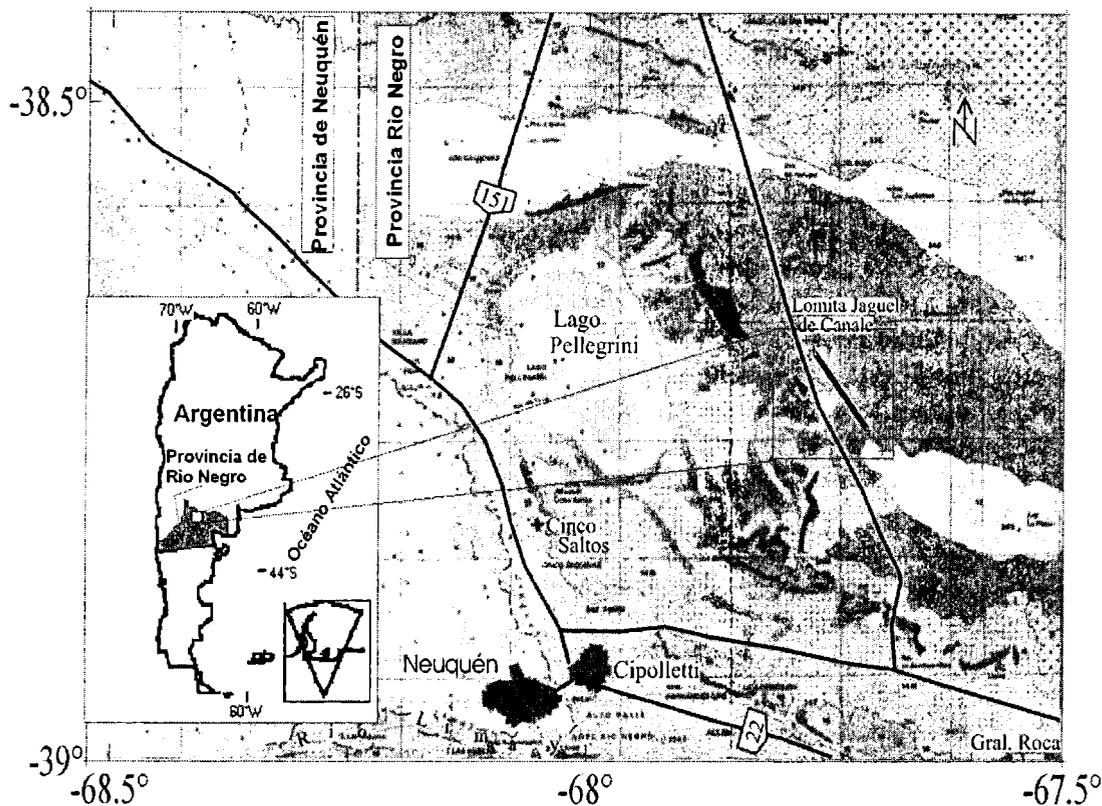


Figura 1. Arriba: Ubicación geográfica de la zona en donde se relevó el perfil de microgravedad. Comprende la zona Norte de Río Negro, en el puesto Galdame. Abajo: Perfil topográfico. Ubicación de los upholes y estaciones gravimétricas.

última generación marca Scintrex Autograv CG3, con resolución de 0.005 mGal. Este gravímetro realiza lecturas automáticamente corregidas por: marea lunisolar, temperatura, desvío de la vertical y deriva instrumental, mediante el software interno.

Se efectuaron lecturas de precisión con 3 ciclos de observación de 30 segundos de duración (en cada ciclo se promedian 30 lecturas tomadas cada segundo), con estaciones base de control y cierres dentro de la hora (1 hs), para controlar la estabilidad del aparato. El error obtenido es del orden de ± 0.01 mGal. En este sentido, se utilizaron tres puntos de control de deriva del instrumental en la misma línea, enumerados como: Grav1, Grav2 y Grav3. Con el fin de evitar errores de borde, esta línea gravimétrica fue extendida con seis puntos ubicados: tres en el extremo sur (Grav4, Grav5 y Grav6) y los restantes (Grav7, Grav8 y Grav9) en el extremo norte (con espaciamiento progresivamente en aumento entre 300 metros y 1500 metros).

Los valores de gravedad fueron referidos al Nodal N62 de la Plaza de la ciudad de Neuquen (Pcia. Neuquen) y vinculados a la estación gravimétrica fundamental de Miguelete (Bs. As.), con $g = 979690.03$ mGal.

Es importante aclarar que una vez obtenidas las observaciones gravimétricas se le practicaron las reducciones convencionales: Aire Libre, Bouguer y Topográficas (esta última resultó ser prácticamente constante a lo largo del perfil y no supera los 8 μ Gal).

METODOLOGIA

Las velocidades medias ponderadas de los diferentes estratos atravesados por los upholes, son transformadas a densidades y estas utilizadas luego para calcular el efecto gravimétrico de estos estratos.

De esta forma, a partir de la ubicación de los upholes sobre la línea sísmica, se procedió al cálculo de la velocidad media pesada para

cada uno de ellos, mediante la ec. 1, (utilizada entre otros por Chistensen and Money, 1995):

$$VM_{uh} = \frac{\sum V_i * e_i}{\sum e_i} \quad (1)$$

donde:

i: es la cantidad de horizontes

V_i : velocidad para cada horizonte atravesado por el uphole

e_i : espesores promediados de cada horizonte

VM_{uh} : velocidad media ponderada para cada uphole

Resultando:

$$VM_{uh228} = 3331.51 \text{ m/s}$$

$$VM_{uh255} = 2809.72 \text{ m/s}$$

$$VM_{uh291} = 2822.70 \text{ m/s}$$

$$VM_{uh315} = 2289.28 \text{ m/s}$$

Las VM_{uh} así obtenidas fueron usadas para calcular las densidades utilizando relaciones estadísticas como las de: Nafe y Drake (1958), Gardner *et al.* (1974) y Barton (1986). Para la zona analizada resultaron más apropiadas las calculadas con la expresión de Gardner *et al.* (1974) (ec. 2), debido a que los valores obtenidos se asemejan a los de densidades obtenidas del muestreo de campo.

$$\sigma_{uhj} = 0.23 * (VM_{uhj})^{0.25} \quad (2)$$

siendo:

σ_{uhj} : densidad media para cada uphole

VM_{uhj} : velocidad media ponderada para cada uphole

Aplicando (2), obtenemos:

$$\sigma_{uh228} = 2.35 \text{ g/cm}^3$$

$$\sigma_{uh255} = 2.25 \text{ g/cm}^3$$

$$\sigma_{uh291} = 2.25 \text{ g/cm}^3$$

$$\sigma_{uh315} = 2.14 \text{ g/cm}^3$$

Luego a partir de la clásica expresión:

$$AB = g_{obs} - (0.04193 \sigma_B - 0.3086) * h \quad (3)$$

donde:

AB: Anomalía de Bouguer

g_{obs} , gravedad observada y corregida por latitud con el IGSM (1967);

$0.04193 \sigma_B * h$: Corrección de Bouguer, asumiendo una losa plana indefinida con altura h y densidad media de las rocas por encima del nivel de referencia ($\sigma_B = 2.67 \text{ g/cm}^3$).

h : altura de la estación desde el nivel de referencia en metros.

$0.3086 * h$: corrección de aire libre, tomado como gradiente vertical normal en mGal/m (Introcaso, 1997).

Se tomaron las densidades medias de cada uphole y se evaluó el efecto gravimétrico de una placa horizontal ($G_{placa j}$) con centro en el uphole, mediante la siguiente expresión:

$$G_{placaj} = 0.04193 (\sigma_{wij} [\text{g/cm}^3] - 2.67 [\text{g/cm}^3]) * \Sigma e_i \quad (4)$$

Los valores de gravedad obtenidos mediante la ec. (4) fueron interpolados utilizando una expresión matemática (recta) que ajusta por mínimos cuadrados. Esta última, representa a la Anomalía Regional de Bouguer y responde a efectos más profundos que los del weathering.

Si a la Anomalía de Bouguer Observada, le sustraemos la Anomalía Regional, obtendremos una Anomalía Residual de Bouguer (Mironov, 1977) que estará relacionada con la zona del weathering (de nuestro interés). Esto es:

$$AB_{residual} = AB_{observada} - AB_{regional}$$

En términos prácticos y considerando que $AB_{residual}$ es la que le corresponde solo al weathering:

$$AB_{residual(j)} = 0.04193 \times (\sigma_{wj} - \sigma_B) * \Sigma e_i \quad (5)$$

donde:

$AB_{residual(j)}$: Anomalía residual de Bouguer para cada estación

σ_{wj} : densidad del weathering en cada estaca

σ_B : densidad de Bouguer, para una corteza normal (asumida de 2.67 g/cm^3)

Σe_i : espesor del weathering en cada estación

Los espesores de weathering, se calculan mediante un ajuste por mínimos cuadrados, de los datos de los upholes, obteniéndose una expresión matemática (ecuación de una recta).

La incógnita ahora es la densidad del weathering (σ_{wj}), que la encontramos despejando de la ec. (5):

$$\sigma_{wj} = \frac{AB_{residual(j)}}{0.04193 * (\Sigma e_i)} + \sigma_B \quad (6)$$

Con la aplicación de esta ec. (6), encontramos las densidades de weathering para cada estación de la línea relevada. Y nuevamente aplicando la relación estadística de (Gardner *et al.*, 1974) (ec. 2), volvemos a transformar las densidades de weathering de cada estación en velocidades medias de weathering, esto es VM_{gj} . Con éstos valores de velocidad y con los espesores interpolados del weathering, determinamos los tiempos de tránsito de la onda compresional en la zona de baja velocidad.

RESULTADOS

Con la intención de comparar la precisión de los resultados en función del número de upholes utilizados y el espaciamiento entre ellos, se obtuvieron mediante el empleo de la metodología descrita anteriormente, 11 modelos para la línea sísmica R238.

Estos modelos difieren en la cantidad y en la posición de los upholes tomados como información de inicial para la interpolación gravimétrica. Para simplificar la escritura

llamamos a los upholes desde el W al E como 1-2-3 y 4 en correspondencia con: Sta. 228, Sta. 255, Sta. 291, Sta. 315.

a) Modelo A, que contempla los cuatro upholes (1-2-3 y 4), asumido como el modelo de mayor precisión (figura 2).

b) Modelo B, contempla tres upholes (1-2 y 3). Figura 3.

c) Modelo C, contempla tres upholes (2-3 y 4).

d) Modelo D, contempla tres upholes (1-2 y 4).

e) Modelo E, contempla tres upholes (1-3 y 4).

f) Modelo F, contempla dos upholes (1 y 2).

g) Modelo G, contempla dos upholes (1 y 3).

h) Modelo H, contempla dos upholes (1 y 4).

Figura 4.

i) Modelo I, contempla dos upholes (2 y 3).

j) Modelo J, contempla dos upholes (2 y 4).

k) Modelo K, contempla dos upholes (3 y 4).

A modo de ejemplo se muestra en las Figuras 2, 3 y 4 los modelos A, B y H. En estas figuras se observan los valores de: espesor de weathering, señal gravimétrica (gravedad Observada y residual), densidades, velocidades medias y tiempo de tránsito de las ondas compresionales, para cada estación en la zona de baja velocidad.

En las Figuras 5a y 5b, se comparan los valores de velocidades medias (VM_g) obtenidas entre el Modelo A (asumido como el de mayor precisión) y cada uno de los Modelos restantes.

Se evaluó la magnitud del error que se comete en los cálculos de los tiempos de tránsito de la zona de baja velocidad, al variarse la cantidad de upholes intervinientes en los cálculos de interpolación microgravimétrica (Tabla 1). En la quinta columna de esta tabla se realiza una comparación entre los resultados obtenidos y la estabilidad de la señal gravimétrica.

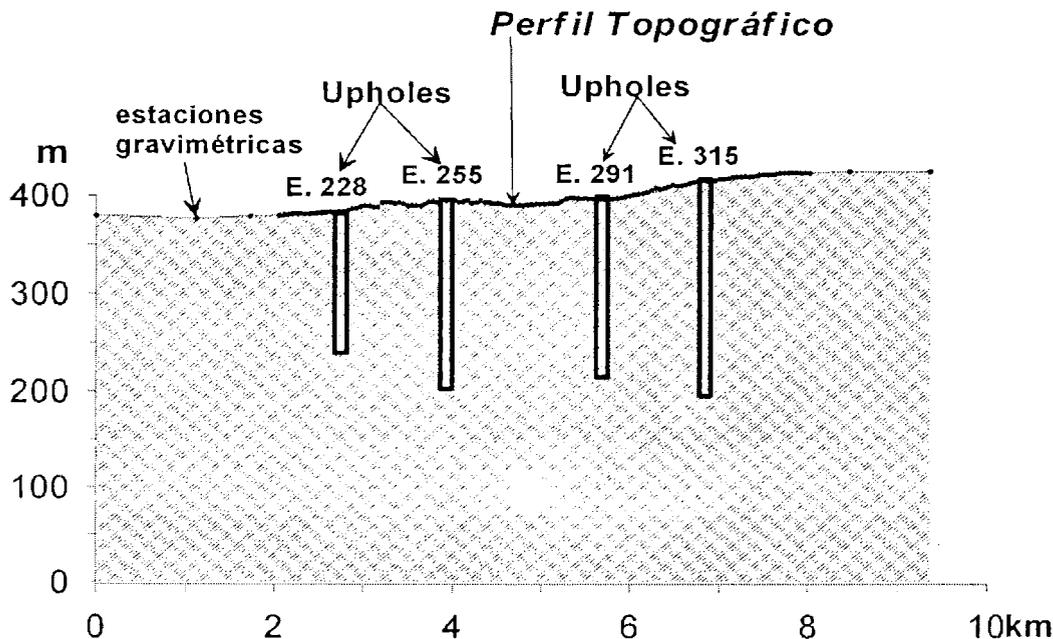


Figura 2. Modelo A. De arriba abajo se observa: modelo de weathering (que contempla cuatro upholes en su determinación), gravedad Observada y gravedad Residual, modelo de densidad en g/cm^3 , comparación entre los modelos de velocidades en m/s y por último el modelo de tiempo en ms, obtenido a través del procesamiento microgravimétrico.

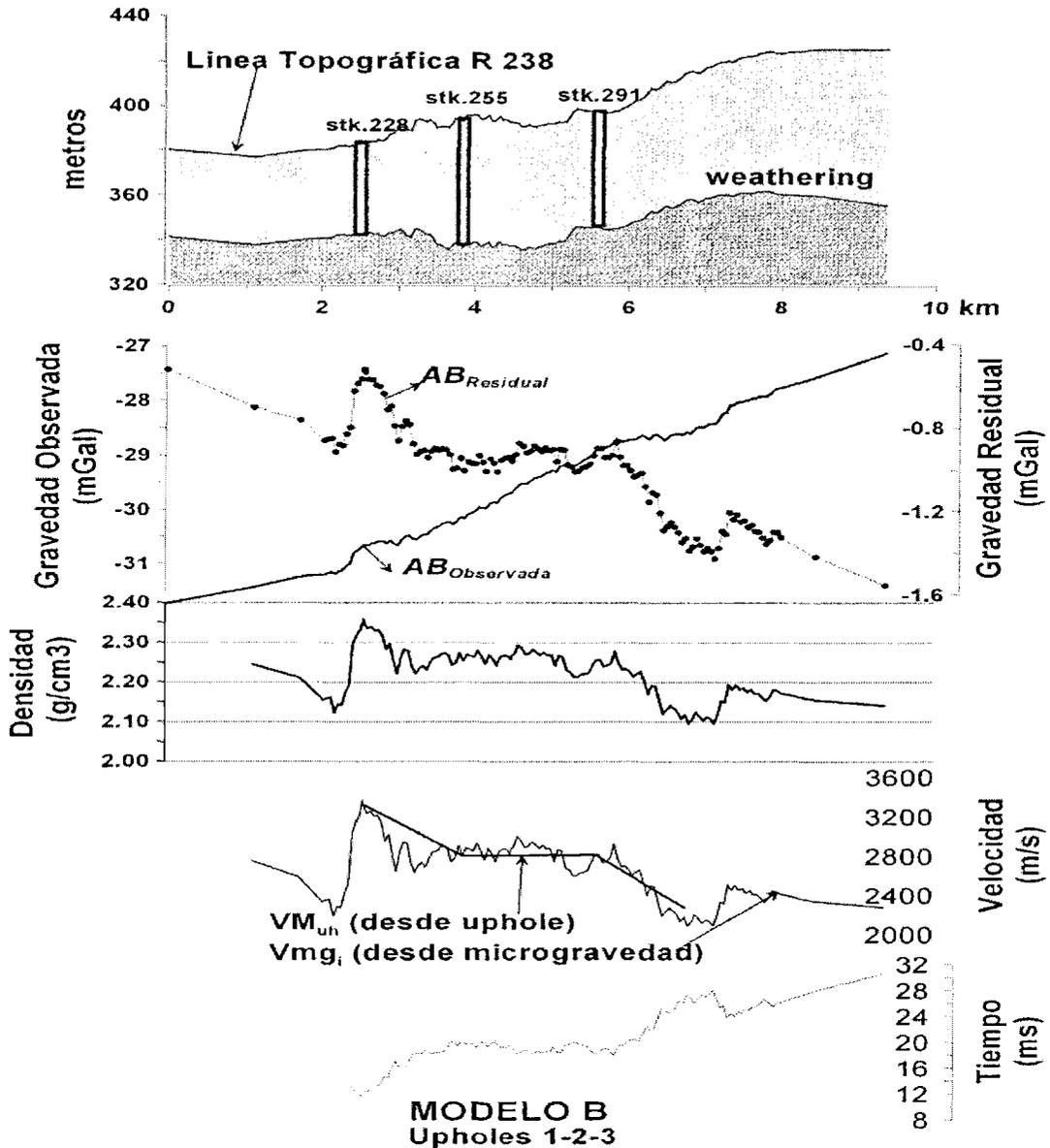


Figura 3. Modelo B. igual al Modelo A. En este caso intervienen las velocidades de tres upholes en el procesamiento microgravimétrico para la determinación del weathering.

Como era de esperar los errores en la determinación de los tiempos de tránsito del weathering, aumentan a medida que disminuyen la cantidad de upholes involucrados en el procesamiento de la señal gravimétrica. Estos errores están directamente relacionados con: 1- su posición espacial (distancia entre

los upholes involucrados en el procesamiento gravimétrico), y 2- con la correspondencia entre la ubicación de los upholes y la variabilidad de la señal gravimétrica.

Para la determinación de tiempos del weathering utilizando esta metodología, lo conveniente sería 1) realizar, en la futura línea

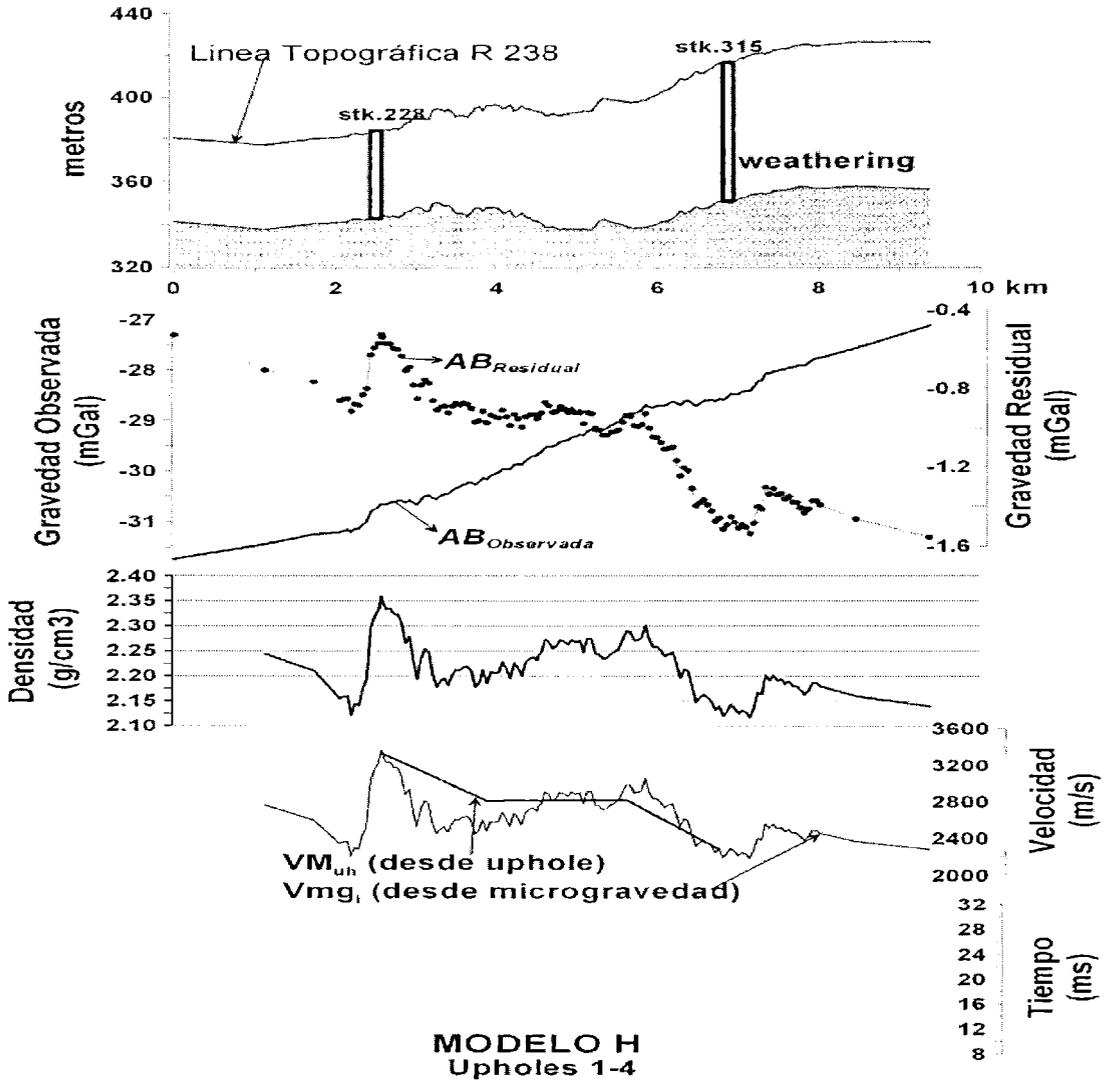


Figura 4. Modelo H. igual al Modelo A. En este caso intervienen las velocidades de dos upholes en el procesamiento microgravimétrico para la determinación del weathering.

sísmica, primero microgravedad; 2) hacer upholes suficientemente distanciados, en donde existan un mínimo y un máximo en la señal gravimétrica y de ser posible, se recomendaría ubicar un uphole en una región con una anomalía de “g estable” (sin perturbación).

Finalmente, se comparó el tiempo de tránsito obtenido a partir de la clásica metodología

(o sea, interpolación de los tiempos de los upholes), con la propuesta de los tiempos obtenidos mediante combinación de gravimetría de alta resolución y upholes (Fig. 5c). Del análisis de las mismas, resulta claramente que las respuestas obtenidas con la combinación de gravimetría de alta resolución y upholes, presenta un mayor detalle, observando en

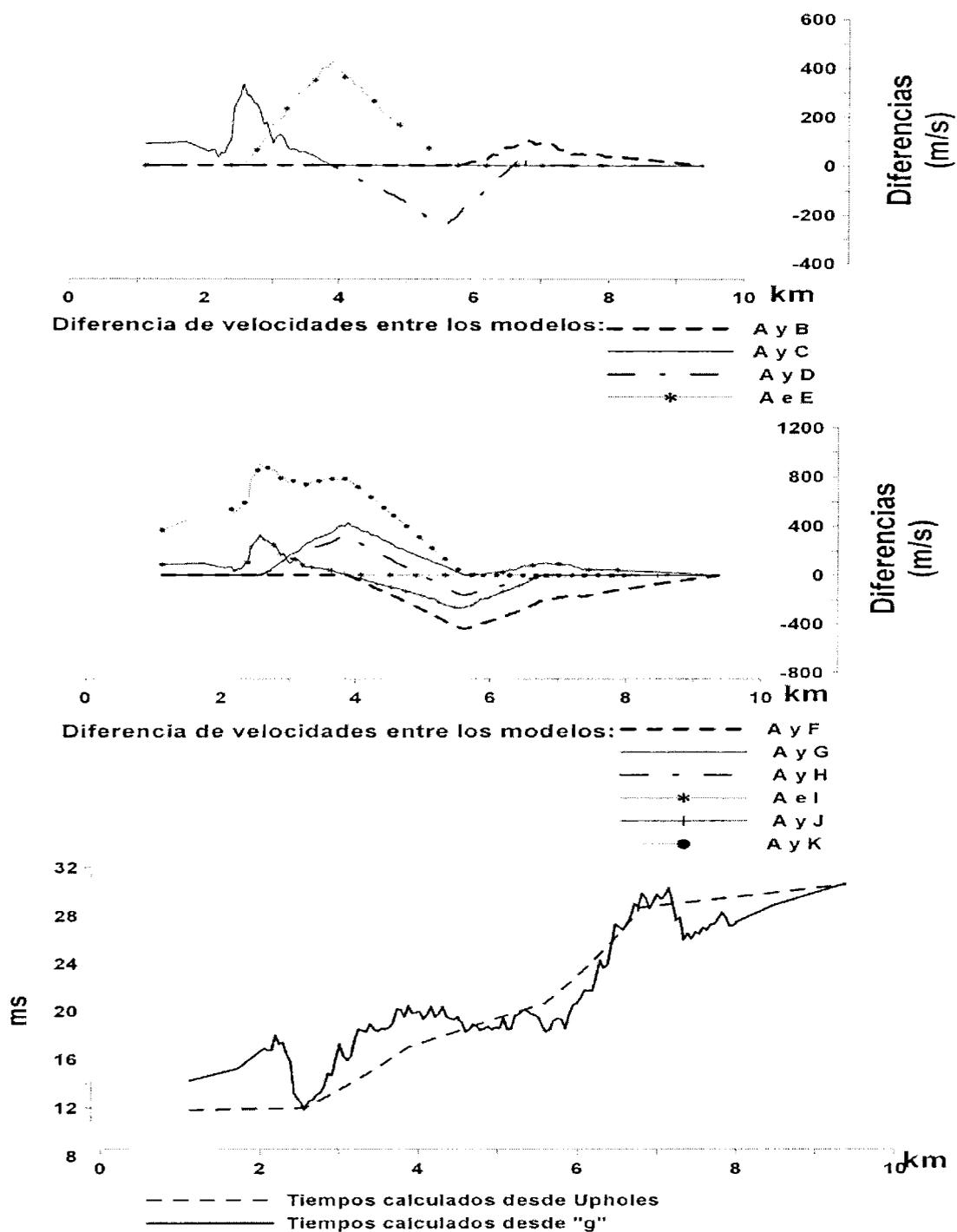


Figura 5. a: Arriba. Diferencias de velocidades en m/s, entre las VM_g calculadas con cuatro pozos y las VM_g calculadas con tres pozos. b: Centro. Diferencias de velocidades en m/s, entre las VM_g calculadas con cuatro pozos y las VM_g calculadas con dos pozos. c: Abajo. Comparación de modelos de tiempos de tránsito en la zona de weathering, obtenidos a partir del modelo clásico (VM_{uh}) y a partir de la combinación entre microgravidad y upholes (VM_g).

Tabla 1. Comparación de los tiempos obtenidos para la zona de weathering, calculados mediante gravimetría de alta resolución y upholes. Se han variado la cantidad de upholes sobre la misma línea para comparar la magnitud del error en tiempo que se cometería. Columna A: Comparación entre la Curva de tiempo que considera el Modelo A versus el resto de los Modelos (1-2-3, 2-3-4, etc). Columna B: Relación entre la ubicación de los upholes y “g” (señal gravimétrica): Zonas inestables: mínimo o máximo, Zonas estables: normales.

A	Desviación Estandar	Mínimo valor en ms	Máximo valor en ms	tt
1-2-3	0,91	-0,0011	2,5	Máximo-normal-normal
2-3-4	1,77	-5,08	0	Normal-normal-mínimo
1-2-4	0,54	-1,79	0	Máximo-normal-mínimo
1-3-4	0,56	-0,0009	1,71	Máximo-normal-mínimo
1-2	1,1	-0,54	3,05	Máximo y normal
1-3	0,75	-0,0011	2,51	Máximo y normal
1-4	0,58	-1,27	1,27	Máximo y mínimo
2-3	2,31	-5	2,51	Arriba zonas normales
2-4	1,61	-5,07	0	Normal y mínimo
3-4	2,59	-7,87	0	Normal y mínimo

particular sobre la línea estudiada las anomalías de velocidad atravesadas, hecho que resulta inadvertido por la metodología clásica.

CONCLUSIONES

Se presentan las bondades de la microgravimetría de precisión para determinar la geometría del weathering y poder calcular el tiempo de tránsito de la onda sísmica con mayor detalle, que con la clásica metodología de interpolación de tiempos de upholes.

Los errores en la determinación de los tiempos de tránsito del weathering, aumentan a medida que disminuyen la cantidad de upholes involucrados en el procesamiento de la señal gravimétrica. Estos errores están directamente relacionados con la separación entre los

upholes y con su correspondencia con las perturbaciones en la señal gravimétrica.

La determinación de tiempos del weathering en una posible línea sísmica utilizando esta metodología, recomendamos: 1) realizar primero microgravedad; 2) hacer upholes suficientemente distanciados, en donde existan un mínimo y un máximo en la señal gravimétrica y de ser posible, un uphole en una región con una anomalía de “gestable” (sin perturbación).

Agradecimientos: Los autores agradecen a la empresa Chevron-San Jorge S.A. por permitirnos efectuar esta prueba piloto y brindarnos la información de los upholes y topográfica. Este trabajo fue realizado con el apoyo del proyecto PIP N°03056 de CONICET y por el proyecto CICITCA (2003) N°21/E 351.

REFERENCIAS

Barton, P.J., 1986. The relationship between seismic velocity and density in the continental crust - a useful constraint?. *Geophys J.R. Astron. Soc.*, 87:195-208.

Dobrin, M., 1961. *Introducción a la Prospección Geofísica*. Edit. Omega. pp.483

Gardner, G. H. F., L. W. Gardner, and R. Gregory, 1974. Formation velocity and Density - The Diagnostic Basis for Stratigraphic Traps. *Geophysics*, 39:770-780.

Introcaso, A., 1997. *Gravimetría*. Ed. UNR, pp. 350.

Christensen N. and W. Mooney 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *J. Geophys. Res.*, 100:9761-9788.

Hare, J.L., J.F. Ferguson, C.L. Aiken and J.L. Brady, 1999. The 4-D microgravity method for waterflood surveillance: A model study for the Prudhoe Bay reservoir, Alaska. *Geophysics*, 64 (1): 78-87.

Mironov, V.S., 1977. *Curso de prospección gravimétrica*. Ed. Reverté S.A., pp. 525.

Nafe and Dake, 1958. In GRANT-WEST. 1965. “Interpretation Theory of Applied Geophysics”. Mc Graw Hill Book Company. pp. 200.

Profeta, M., M. Korembli, L. Pianelli y L. Cabanillas, 1995. *Gravimetría para Correcciones Estáticas*.

Boletín de Informaciones Petroleras -YPF,
42:70- 77.

Telford, W.M., L. P. Geldart and R. E. Sheriff, 1990.
Applied Geophysics, Second Edition. Cambridge
University Press.

Yule, D.E., M.K. Sharp and D.K. Buther, 1998.
Microgravity investigations of foundations.
Geophysics, 63(1):95-103.