

ELABORACIÓN Y EMPLEO DE TRAZAS SINTÉTICAS EN EL ESTUDIO DE LA CUENCA DEL CAUTO

Ing. Guillermo Miró Pagés
Ing. Emilio Escartín Sauleda

Departamento de Geofísica. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría". Ciudad de La Habana

Nuestro tesoro natural
puede llegar a ti

RESUMEN:

Se expone una metodología para la obtención de trazas sintéticas a partir de registros de carotaje acústico, así como las experiencias en el uso de esta técnica en las condiciones de la cuenca del Cauto, con el fin de hacer la referencia litoestratigráfica de las reflexiones sísmicas registradas en las proximidades del pozo Rabihorcado.

Como resultado de las consultas bibliográficas realizadas fueron concebidas la metodología, los algoritmos y el paquete de programas MECCA, destinados al cálculo de tales sismogramas. Finalmente, se muestran algunos resultados obtenidos con la metodología y los programas expuestos con datos de carotaje acústico, correspondientes al pozo Rabihorcado de la cuenca del Cauto.

Este trabajo expone una metodología y el aseguramiento de programas correspondientes, con el fin de facilitar la obtención de trazas sintéticas a partir de registros de carotaje acústico, así como las experiencias en el uso de esta técnica en las condiciones de la cuenca del Cauto, para de esta forma hacer la referencia litoestratigráfica de las reflexiones sísmicas registradas en las proximidades del pozo Rabihorcado, aspectos estos de gran interés práctico.

La obtención de trazas sintéticas es esencialmente un método de modelaje unidimensional. El mismo comenzó a utilizarse en la década de los años 50 y en la actualidad encuentra una gran aplicación en el mundo para la solución mediante métodos sísmicos de tareas tanto estructurales como estratigráficas, aunque en Cuba apenas ha sido empleado.

ABSTRACT:

This paper is intended to show a methodology and the corresponding computer programs, to obtain synthetic traces from acoustic well-logs, as well as some experiences in these techniques in geological studies of Cauto basin, eastern Cuba. As a result of the bibliographical consults done, a methodology, the algorithm and the microcomputer system MECCA to process such seismograms were all developed. Finally some results are shown, obtained by using the methodology and the microcomputer programs developed, with acoustic well log data from Rabihorcado well in Guacanayabo Gulf in order to do the lithostratigraphic reference of seismic reflections registered next to above mentioned well.

Según A.T. Dennison (1960) los sismogramas sintéticos "constituyen básicamente un método para estudiar la correlación existente entre los datos de pozo y los registros de reflexión obtenidos en las cercanías de éste".

La Figura 1 representa la esencia del concepto de traza sintética. Como aparecen representadas, las reflexiones sísmicas surgen asociadas a las variaciones de impedancia acústica que tienen lugar en el medio. Si se conocen detalladamente estas variaciones con la profundidad, resulta posible calcular la amplitud de las reflexiones surgidas en cada frontera de cambio, empleando fórmulas convencionales. Combinando estos acontecimientos de reflexión en forma correcta con sus relaciones temporales, es posible sintetizar una traza de reflexión.

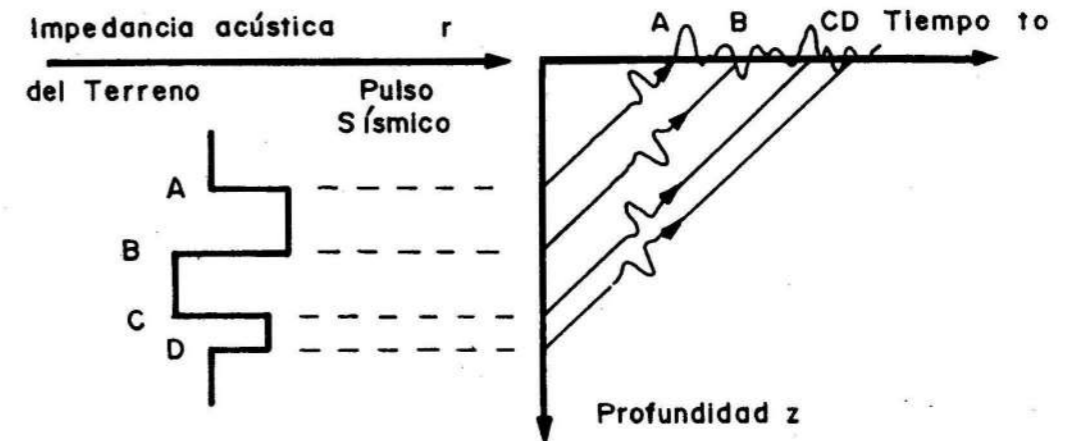
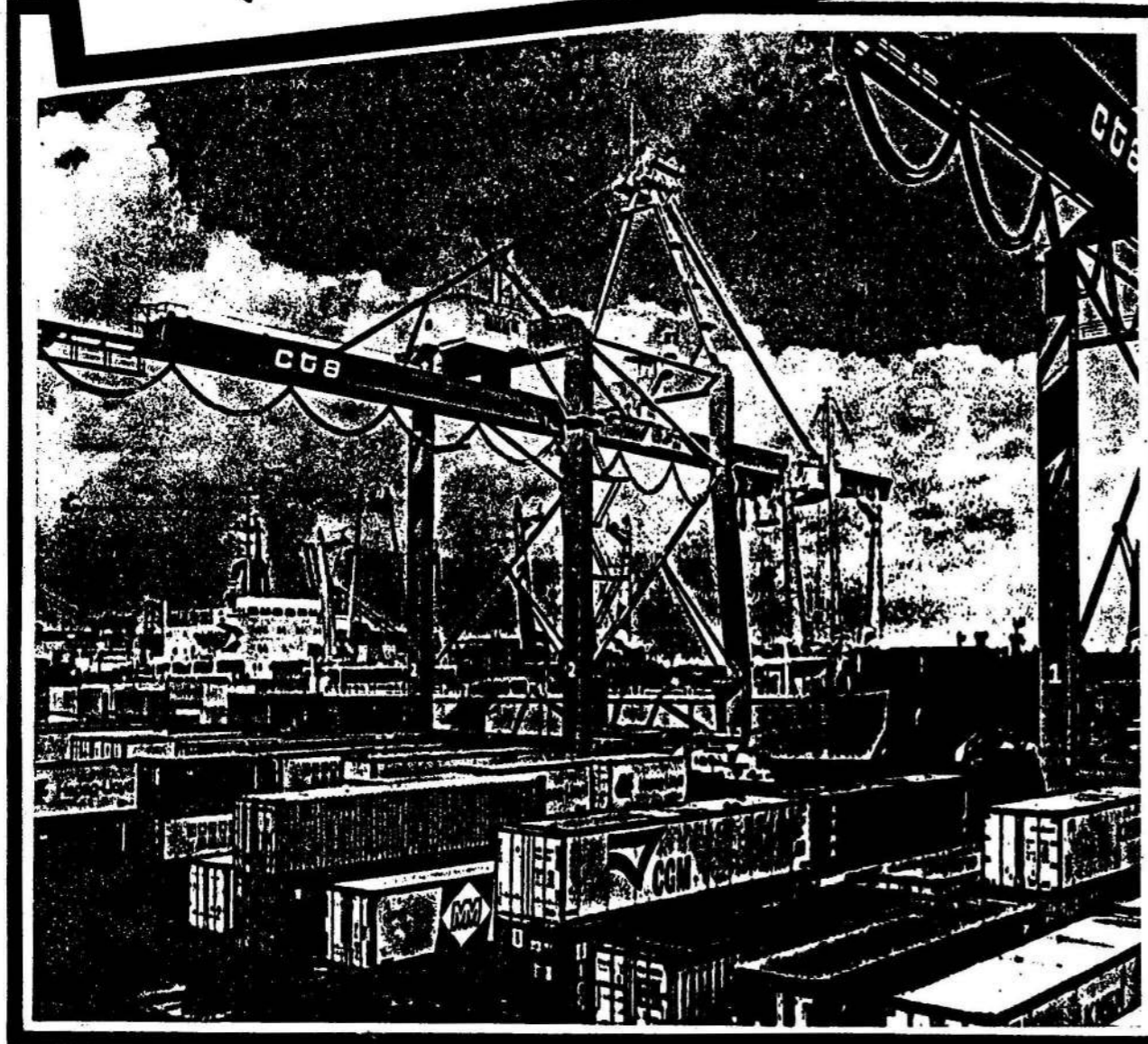


FIGURA 1. Síntesis de una traza de reflexión.



CUBANÍQUEL



La evolución de estas técnicas hasta nuestros días ha sido grande. Entre los autores cuyos resultados han servido para el desarrollo de este trabajo están G.N. Gogonienkov y E.I. Galperin.

Usos de los sismogramas sintéticos

Los sismogramas sintéticos constituyen un valioso material de consulta en diferentes etapas de las investigaciones geológicas. Según G.N. Gogonienkov, en la etapa del proyecto de los trabajos en regiones poco investigadas, los sismogramas sintéticos permiten valorar de antemano las posibilidades de la sísmica para cartografiar unas u otras fronteras geológicas. Contar con varios sismogramas sintéticos, obtenidos incluso en pozos alejados entre sí, permite en esta etapa, valorar el grado de estabilidad de las reflexiones de apoyo, la posible intensidad y distribución en tiempo de las ondas reflejadas múltiples, para de este modo valorar más acertadamente el área de investigación. De forma que los sismogramas sintéticos en la etapa de proyecto de los trabajos, permitan disminuir el volumen de las observaciones sísmicas.

En el proceso de ejecución de los trabajos de campo, los sismogramas sintéticos que constituyen un modelo idealizado permiten seleccionar con mayor rapidez la metodología más racional de recopilación de datos, indicando la composición frecuencial de registro más acertada para la solución de la tarea planteada, así como los parámetros más adecuados de regulación de las ampliaciones.

En la etapa de interpretación los sismogramas sintéticos ayudan a descifrar los registros de campo, ubicar las reflexiones de apoyo y darles un amarre estratigráfico fundamentado. Una gran ventaja del método de síntesis de sismogramas consiste, en que para su obtención no es necesario realizar trabajos especiales, sino que sólo se requiere de las curvas de carotaje acústico medido en los pozos. Este método forma parte del complejo de los trabajos geofísicos de pozo que se realizan con otros fines.

Por último Gogonienkov señala que es útil y perspectiva el empleo conjunto de los sismogramas sintéticos y los datos de perfilaje sísmico vertical (PSV). La ventaja principal del empleo combinado está en que los errores propios de ambas metodologías son sustancialmente diferentes y no se correlacionan entre sí. Las insuficiencias del PSV en este sentido están relacionadas con el apreciable fondo de ruidos coherentes e incoherentes que son registrados, así como con su poder resolutivo comparativamente menor. Por su parte, las limitaciones del cálculo de las trazas sintéticas están condicionadas por los errores en las curvas de partida de carotaje acústico y por la falta de correspondencia entre el modelo supuesto y el medio real. De modo que el análisis conjunto de los resultados del PSV y del cálculo de los sismogramas sintéticos, incide en una mayor confiabilidad de los resultados del análisis del campo de ondas.

Es importante señalar que pueden existir diferencias entre las trazas sintéticas y las reales registradas en el campo, ya que en estas últimas se

manifiestan fenómenos cuyos mecanismos de formación no se incluyen en el modelo, tales como:

- Presencia de ondas de diversos tipos (P, S, etc).
- Presencia de ruidos coherentes e incoherentes.
- Atenuación gradual de las amplitudes de la traza con el aumento del tiempo o la profundidad, debido a la divergencia geométrica de los rayos y a la absorción selectiva de los componentes espectrales de alta frecuencia.
- Aumento gradual del período de las señales con el incremento del tiempo.

Asimismo, a veces se observa poca coincidencia entre los tiempos de ocurrencia de los mismos eventos sísmicos en las trazas experimentales y las trazas sintéticas. Esto ha sido explicado atendiendo a diferentes causas, tales como: la presencia de la zona de bajas velocidades que influye en el sismograma experimental y no en el sintético; la divergencia entre los tiempos integrales obtenidos a partir del carotaje acústico y el perfilaje sísmico vertical, debido a la diferente naturaleza de ambas metodologías.

Es necesario tener en cuenta al comparar los sismogramas sintéticos con los experimentales el diferente grado de resolución (espacial y temporal) implícito en ambos.

Adicionalmente, resulta interesante destacar que en algunas publicaciones se señala que en el orden informativo, al emplear la técnica menos costosa propuesta (carotaje acústico), los resultados que se derivan de las velocidades obtenidas pueden ser superiores a los obtenidos con las técnicas de carotaje sísmico integral convencional.

Como resultado de varias consultas bibliográficas realizadas fueron concebidas la metodología, el algoritmo y el paquete de programas destinado al cálculo de tales sismogramas que ha sido identificado con el nombre MECCA.

Metodología de elaboración de las trazas sintéticas

Los sismogramas sintéticos constituyen un resultado del modelaje sísmico unidimensional, calculándose los mismos a partir de los datos de carotaje acústico.

A pesar de que las ventajas del empleo de esta técnica para elevar la efectividad de las interpretaciones sísmicas han sido plenamente demostradas por la experiencia internacional, en Cuba son poco empleadas hasta el presente, lo que se explica por la carencia de un aseguramiento de programas de computación destinados a estos fines, reportándose sólo algunos casos en que fueron calculados los sismogramas sintéticos por compañías norteamericanas con tecnologías analógicas.

Frecuentemente para el cálculo de los sismogramas sintéticos se consideran modelos geológicos constituidos por capas homogéneas horizontales, con velocidades constantes y excitadas elásticamente bajo el efecto de ondas planas, aunque a veces también se consideran situaciones más complejas.

La Figura 2 ilustra el procedimiento general de obtención de los sismogramas sintéticos.

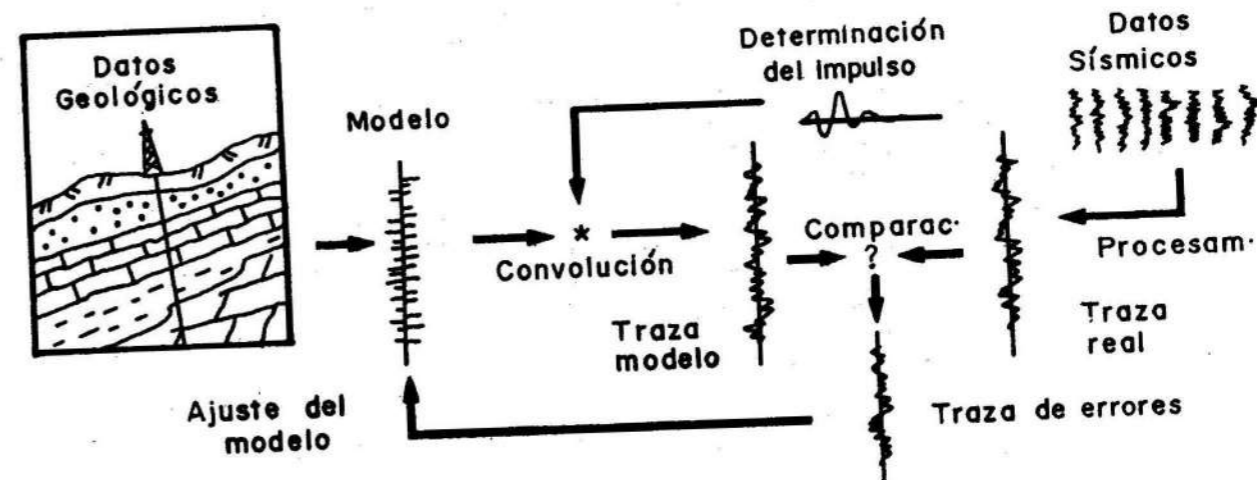


FIGURA 2. Procedimiento general de obtención de los sismogramas sintéticos.

El carotaje acústico proporciona como resultados, los tiempos de propagación de las ondas elásticas en el medio que rodea al pozo, en función de la profundidad z . Estas curvas se deben transformar en curvas de velocidad del medio $V(z)$, a través de la expresión:

$$V(z) = \frac{L}{\delta t(z)} \quad (1)$$

donde:

L es la longitud de la sonda de pozo y $\delta t(z)$ es el tiempo de propagación de las ondas elásticas en el medio, en función de la profundidad.

La curva de los coeficientes de reflexión en función de la profundidad se obtiene a partir de la información del carotaje acústico y del carotaje de densidades del pozo dado, ya que:

$$K(z) = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_2 + \tau_1} \quad (2)$$

donde:

K es el coeficiente de reflexión calculado de forma estricta; τ es la impedancia acústica y los índices 1 y 2 se refieren a las propiedades por encima y por debajo respectivamente de una frontera.

La impedancia acústica de un medio se define como el producto de la velocidad de las ondas elásticas V por su densidad σ ($\tau = V \cdot \sigma$). A veces no se cuenta con datos de carotaje de densidades, por lo que se emplea con buen grado de aproximación la expresión:

$$K(z) \approx \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \quad (3)$$

en la que se considera que todo el medio está caracterizado por su único valor de densidad.

Uno de los pasos más importantes en la elaboración de los sismogramas sintéticos es el cambio de coordenadas de profundidad z a tiempos to de la curva $K(z)$, ya que la curva $K(to)$, que recibe el nombre de reflectividad del medio, constituye la respuesta del mismo al impulso unitario o función Delta de Dirac.

Para obtener $K(to)$ es necesario calcular previamente:

$$Tl(z) = T_{ini} + \int_{Z_{ini}}^z \delta t(u) du \quad (4)$$

que constituye el tiempo integral de propagación de las ondas desde la profundidad inicial Z_{ini} con el tiempo T_{ini} hasta la profundidad z . Generalmente estas curvas de $Tl(z)$ necesitan ser "calibradas", es decir, corregidas para que puedan ser perfectamente comparables con las curvas equivalentes obtenidas por carotaje sísmico. Luego debe obtenerse:

$$to(z) = 2 \cdot Tl(z) \quad (5)$$

que es el tiempo de propagación de las ondas en el medio comparable con las observaciones de sísmica superficial. Finalmente, se obtiene $K(to)$ como solución de un sistema de ecuaciones:

$$K(to) = \left[\frac{K(z)}{to(z)} \right] \quad (6)$$

Estos valores generalmente tienen que ser regularizados en el eje to . Una vez regularizada esta curva $K(to)$, en el caso más general, puede ser modificada mediante algún procedimiento adecuado, tal como el algoritmo de Kuznet-Varanov, con el propósito de modelar algunos fenómenos sísmicos específicos, tales como la formación de ondas múltiples en diferentes fronteras. Por último, estas curvas regularizadas y modeladas $K(to)$ se someten a la operación de convolución digital con un operador que representa la forma de onda de la fuente sísmica.

Este operador se puede determinar teóricamente (pulsos de Ricker o de Berlage) o extraerse de los datos de la sísmica superficial.

El resultado de la convolución es la traza sintética $A(to)$ que se expresa como:

$$A(to) = k'(to) * I(to) \quad (7)$$

donde $K'(to)$ es la reflectividad del medio, $I(to)$ es la forma de la onda de la fuente y el símbolo (*) denota la convolución digital. Esta traza sintética puede ser utilizada directamente para comparaciones con registros sísmicos de superficie o de pozo, expresados en términos de tiempo, puede ser modulada en el tiempo o puede sufrir un cambio de coordenadas para ser formu-

Alada en función de la profundidad z , eliminando la variable to .

$$A(z) = \frac{A(to)}{to(z)} \quad (8)$$

En este último caso la traza $A(z)$ se puede utilizar para compararla con los datos originales de

pozo y con otros datos geológicos expresados en términos de profundidad.

La Figura 3 muestra el grafo de elaboración de los datos de carotaje acústico para la obtención de trazas sintéticas.

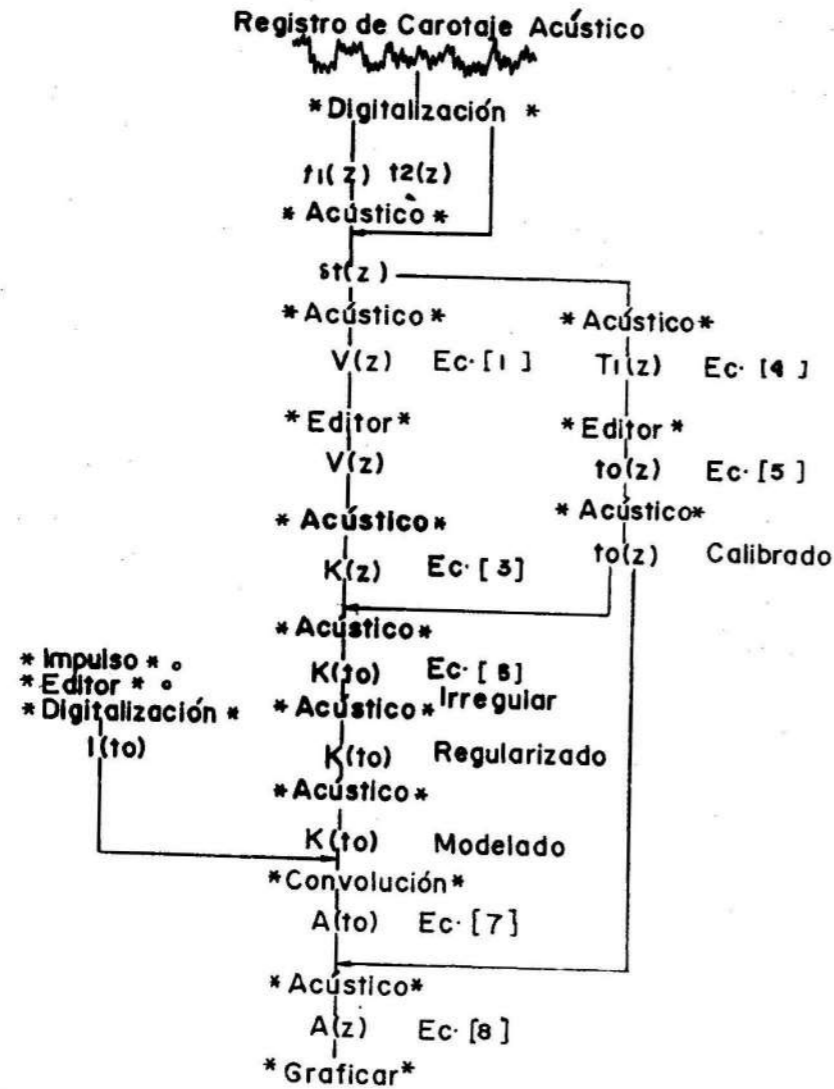


FIGURA 3. Grafo de elaboración de los datos de carotaje acústico para la obtención de trazas sintéticas.

El sistema MECCA

El sistema MECCA, para la manipulación y elaboración de curvas de carotaje acústico, está integrado por 7 programas escritos en lenguaje N88-BASIC para computadoras NEC. Las exigencias del sistema son las siguientes:

Equipamiento

- Microcomputadora NEC PC-9801 o superior, con un mínimo de 384 Kb de memoria mínima instalada.
- Digitalizador Graphtec o compatible.
- Impresora Epson o compatible.

Aseguramiento de programas

- Sistema operativo MS-DOS versión 2.11 o superior.
- Intérprete N88-BASIC (para la versión MECCA no compilada).

A continuación se describen brevemente cada uno de los programas integrantes de MECCA:

- MECCA : programa líder del sistema. Desde él se pueden llamar los restantes programas del sistema, aunque cada uno de ellos puede ejecutarse de manera independiente.
- MECCA 1 : programa para la digitalización de registros. Concebido para la utilización de digitalizadores de la firma Graphtec (Japón) o compatibles.
- MECCA 2 : programa para la edición manual y realización de las transformaciones matemáticas generales de los ficheros del sistema.

- MECCA 3 : programa para hacer transformaciones especiales (sísmicas) a los registros de carotaje acústico.
- MECCA 4 : programa para la generación de las formas de impulsos teóricos clásicos.
- MECCA 5 : programa para efectuar la operación de convolución digital entre dos series temporales. Es el encargado de obtener la traza sintética resultante.
- MECCA 6 : programa para la impresión de los gráficos por una impresora Epson.

Experiencias en la aplicación de las técnicas propuestas en la cuenca del Cauto

Durante los trabajos sísmicos precedentes realizados en esta región fue registrado un fondo intenso de ruidos en el área del golfo de Guacanayabo lo que complicó considerablemente la interpretación geológica de los sismogramas en esta área. Esta circunstancia sugirió la conveniencia de utilizar aquí los sismogramas sintéticos, ya que como es conocido, estos pueden ayudar considerablemente en la referencia geológica de las reflexiones útiles. En varios pozos de la cuenca del Cauto se cuenta con las curvas de carotaje acústico, obtenidos por compañías norteamericanas a finales de la década del 50. Los mismos presentan la calidad requerida para ser utilizados en el cálculo de trazas sintéticas, así como con mediciones sísmicas de superficie realizadas a lo largo de varios perfiles. El pozo seleccionado para efectuar los cálculos de las trazas sintéticas fue el Rabihorcado, con una profundidad de 1 205 m, ubicado en el Golfo de Guacanayabo.

Aunque lamentablemente este pozo no rebasó la cobertura terciaria, por lo que el amarre estratigráfico de los horizontes sísmicos evidenciados en él es probablemente de poca trascendencia desde el punto de vista gasopetrolífero, el mismo presenta un gran interés desde el punto de vista metodológico.

Los datos del pozo Rabihorcado fueron seleccionados también atendiendo a que en sus proximidades fueron realizadas mediciones sísmicas de superficie que pueden servir de apoyo para la comparación de los resultados.

El proceso de cálculo se inició con la digitalización de la curva acústica $\delta f(z)$ del pozo Rabihorcado, utilizando un intervalo de discretización de 1 m, según las recomendaciones expuestas en la literatura especializada.

El proceso de discretización fue realizado con ayuda del programa MECCA 1 que integra el sistema MECCA, y contando con un digitalizador acoplado a una microcomputadora NEC.

Posteriormente, a través de los programas MECCA 2 y MECCA 3 se obtuvo la curva $V(z)$ al calcular para cada valor de z el valor $1/\delta f(z)$, ya que la distancia existente entre los dos receptores en la sonda de medición era de 1 m. También se calculó la integral según (4) de los valores $\delta f(z)$ determinados hasta cada profundidad a lo largo del pozo y atribuido cada uno de estos valores totales a la profundidad respectiva, ob-

teniéndose como resultado un Hodógrafo Integral Acústico (HIA) en función de z .

El proceso de cálculo continuó posteriormente con el establecimiento de una conciliación entre los datos de velocidades y de tiempos integrales, partiendo de que ya se contaba para cada z con los valores correspondientes de estas variables.

A partir de la curva $V(f)$, y por medio de los programas MECCA 2 y MECCA 3, fueron calculados los coeficientes de reflexión $K(to)$ a partir de las expresiones (3) a la (6), con lo cual se obtuvo un sismograma sintético de impulsos (reflectividad del terreno).

A continuación, con el MECCA 4 fueron creados varios impulsos de Ricker con frecuencia predominantes de 30, 40, 50, 60 y 80 Hz, con un intervalo de discretización de 0,001 s.

Finalmente, utilizando el programa MECCA 5, a partir de los ficheros de los datos de los sismogramas sintéticos de impulsos y de los pulsos creados, fueron obtenidos los valores de las trazas sintéticas correspondientes, mediante el cálculo de la expresión (7). Estos resultados fueron graficados empleando el programa MECCA 6.

En la Figura 4 aparecen representados el Hodógrafo Integral Sísmico (HIS) obtenido en el pozo Rabihorcado mediante el carotaje sísmico integral, es decir, sobre la base de la técnica tradicional de realizar explosiones en las proximidades del pozo y registrar a lo largo de éste y el HIA referido anteriormente.

| Fichero: TI-RAB | Fichero: TI (K)RAB |
|-----------------------|-----------------------|
| Xmín = 61,96 | Xmín = 61,96 |
| Xmáx = 1193,6 | Xmáx = 1194 |
| Ymín = 0,0294536 | Ymín = 0,0290706 |
| Ymáx = 0,777803 | Ymáx = 0,449512 |
| Escala X: 1 cm = 100 | Escala X: 1 cm = 100 |
| Escala X: Lineal | Escala X: Lineal |
| Escala Y: 1 cm = 0,06 | Escala Y: 1 cm = 0,06 |
| Escala Y: Lineal | Escala Y: Lineal |
| Marca Xo: 0 | Marca Xo: 0 |
| Paso: 100 | Paso: 100 |

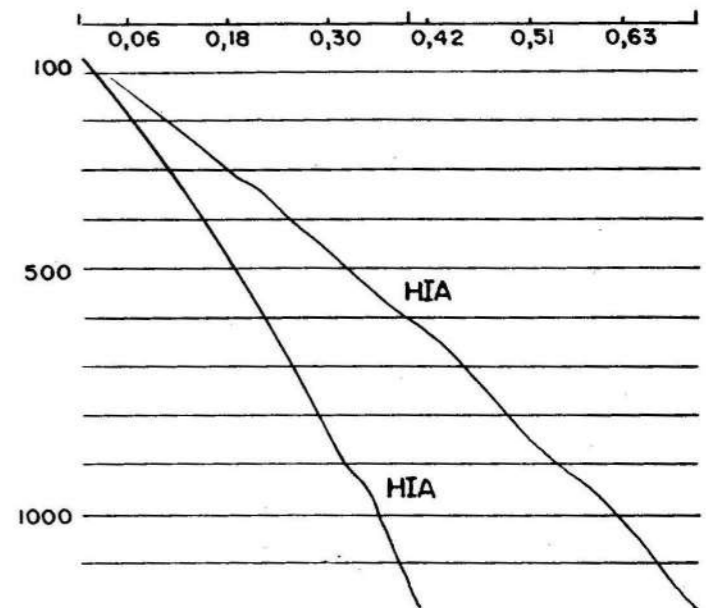


FIGURA 4. Hodógrafos en el pozo Rabihorcado. HIS: Hodógrafo Integral Sísmico. HIA: Hodógrafo Integral Acústico.

Como se ve en la Figura 4, se manifiesta un desplazamiento sistemático entre ambos hodógrafos en este pozo, alcanzándose en la profundidad máxima investigada un $\delta T = 0,328$ s.

La falta de coincidencia entre los tiempos del HIA y el HIS ha sido observada por varios investigadores. Por ejemplo, Stewart et. al (1984) expone que las causas de las principales diferencias entre estos tiempos son:

- La diferencia en el volumen de rocas, investigado por el carotaje diferencial e integral, a causa de las diferencias geométricas de sus dispositivos de medición y de las frecuencias de las señales excitadas.
- Los errores instrumentales diferentes asociados a cada metodología.
- Las características diferentes de la propagación de las ondas en los dos tipos de investigación.

Por lo anterior, el registro sísmico frecuentemente proporciona tiempos integrales mayores que los medidos por un procedimiento de sismocarotaje integral. Esta situación se expresa negativamente al calcular los sismogramas sintéticos, ya que los tiempos correspondientes a los eventos sísmicos, resultan incrementados en éstos con respecto a los tiempos en que aparecen esos mismos eventos registrados en los sismogramas de superficie.

En la Figura 5 se aprecia, a la izquierda, el sismograma sintético obtenido en el pozo Rabihorcado en base a los datos de tiempos dobles del carotaje sísmico integral, coincidentes aproximadamente con los tiempos de los eventos sísmicos en los sismogramas de superficie, mientras que a la derecha aparece la misma traza sintética alcanzada sobre la base del cálculo de los tiempos integrales derivados del carotaje acústico. Como se ve, el corrimiento de tiempo en los últimos eventos sísmicos es aproximadamente igual a la diferencia entre los tiempos dobles para los puntos extremos de los hodógrafos de la Figura 4, es decir, $\delta t = 0,652$ s, magnitud que es bastante elevada.

Esta situación motivó la búsqueda de algún procedimiento que permitiera corregir este efecto, ya que en presencia del mismo se dificulta notablemente la comparación entre las trazas sintéticas derivadas del carotaje acústico y las trazas de los sismogramas de campo. En la literatura técnica hay referencias a la necesidad de realizar una calibración a los HIA antes de emplear sus valores de tiempo para calcular los sismogramas sintéticos. Está planteado que para realizar esta calibración es necesario contar con los HIA y con sólo algunos puntos de los HIS. Sin embargo, las fuentes bibliográficas consultadas no exponen claramente cómo realizar la calibración. Por esta razón fue concebido un procedimiento simple para ejecutar la misma. Una vez realizada la calibración del HIA se estableció una nueva dependencia $T(z)$ y sobre la base de ésta fueron calculados de nuevo los sismogramas sintéticos.

En la Figura 6 se muestran la columna litoestratigráfica del pozo, el gráfico $V(z)$ y la traza sintética calculada para un pulso de Ricker con frecuencia predominante de 80 Hz. Es de significar que la traza sintética aparece representada en escala de profundidades, lo que permite comparar las tres informaciones.

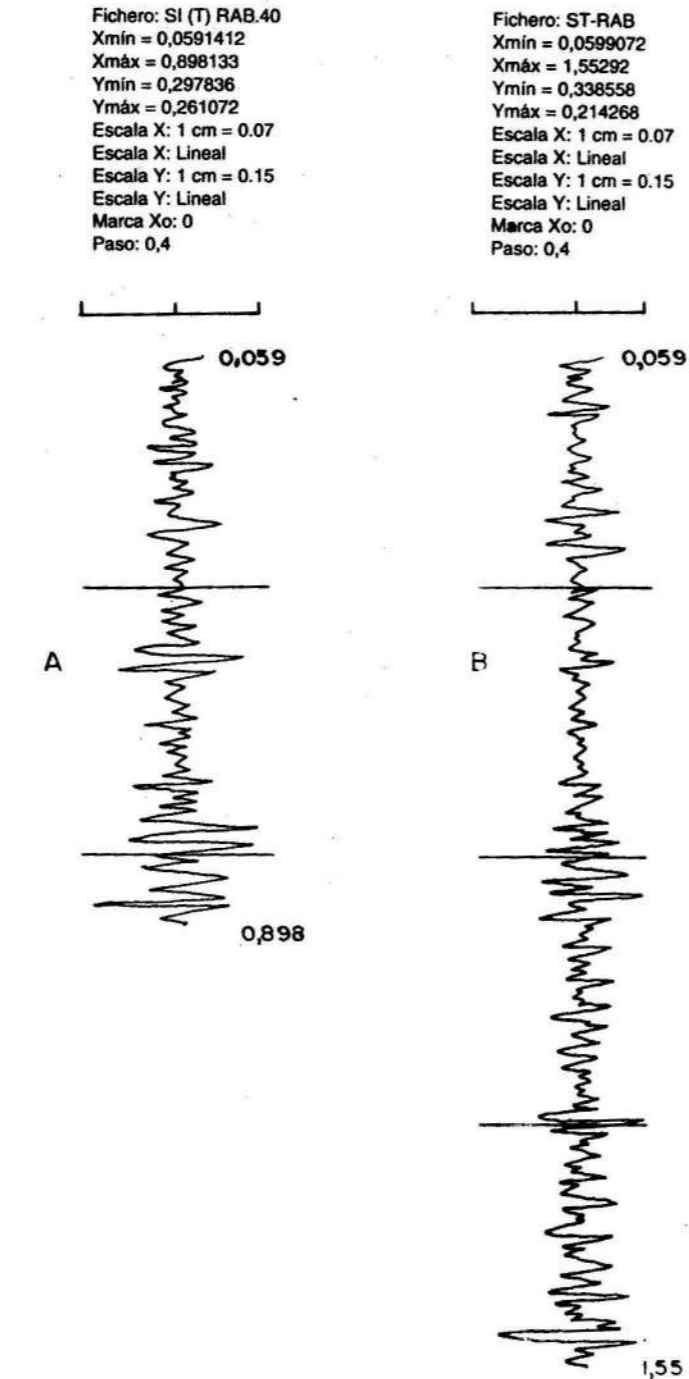


FIGURA 5. Trazas sintéticas.
A: La escala de tiempo se corresponde con los datos de carotaje sísmico.
B: La escala de tiempo se corresponde con los datos de carotaje acústico.

Fichero: V (Z) RAG
Xmín = 60,96
Xmáx = 1 193,76
Ymín = 1 838,12
Ymáx = 4 827,64
Escala X: 1 cm = 60
Escala X: Lineal
Escala Y: 1 cm = 600
Escala Y: Lineal
Marca Xo: 0
Paso: 100

Fichero: SI (ZK6) RA
Xmín = 67,6418
Xmáx = 1 171,64
Ymín = 0,315515
Ymáx = 0,215536
Escala X: 1 cm = 60
Escala X: Lineal
Escala Y: 1 cm = 0,15
Escala Y: Lineal
Marca Xo: 0
Paso: 100

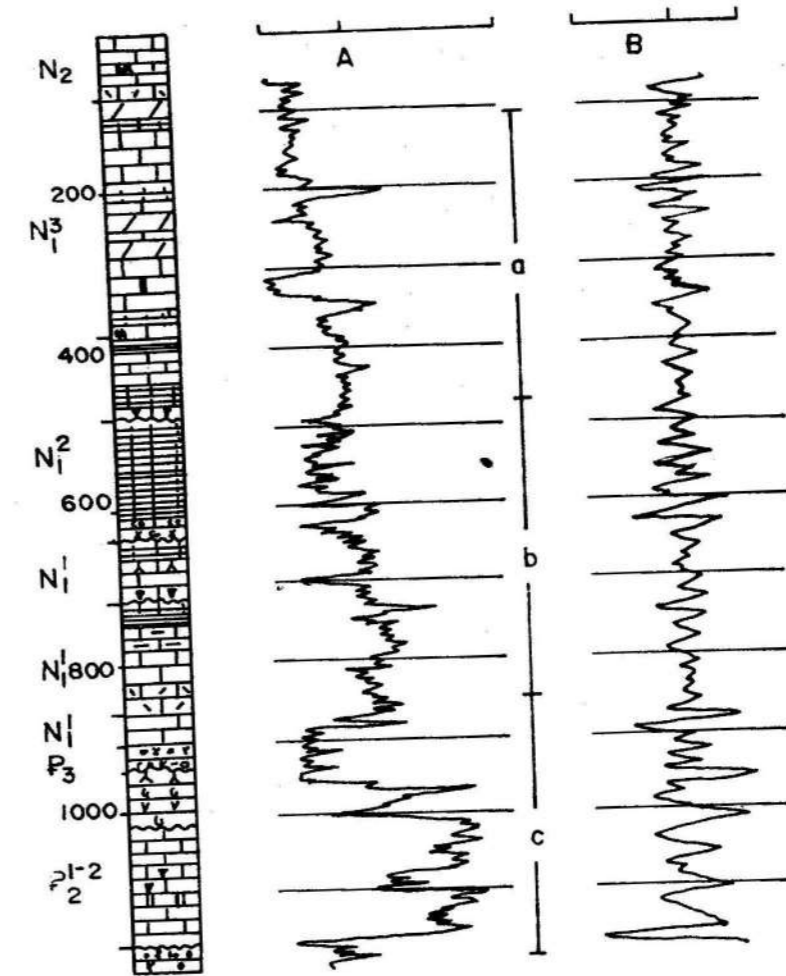


FIGURA 6. Columna litológica, curva acústica (A) y traza sintética (B) correspondientes al pozo Rabihorcado.

Referencia geológica de las reflexiones sísmicas reconocidas

En primer lugar llama la atención que el corte acústico del pozo Rabihorcado, según se ve en la curva $V(z)$ es bastante diferenciado, lo que sin dudas propicia la formación de reflexiones.

Al analizar la curva de velocidades y la columna del pozo mostradas en la Figura 6 se aprecian tres intervalos principales.

Intervalo a: abarca desde la superficie hasta una profundidad aproximada de 490 m. Este intervalo se caracteriza porque la curva de velocidades aparece relativamente menos diferenciada, es decir parece representar una frecuencia espacial predominante, relativamente más baja. En el mismo impera desde el punto de vista litológico la componente carbonatada.

Intervalo b: a la profundidad aproximada de 490 m se aprecia una discordancia, y a partir de este

nivel, hasta una profundidad de 900 m, la curva de velocidad se torna de muy alta frecuencia. Según se ve en la columna litológica, aquí predomina la componente arcillosa-calcárea, apreciándose que el mismo resulta más heterogéneo y más diferenciado que el anterior.

Intervalo c: a la profundidad aproximada de 900 m se manifiesta una discordancia, y a partir de este nivel, el aspecto de la curva vuelve a variar apreciablemente hasta la profundidad final del pozo, en que parecen predominar las componentes carbonatadas y efusivo-sedimentarias.

Según la curva de velocidad, se ponen de manifiesto diferentes intervalos acústicos gruesos; una capa de relativamente baja velocidad ubicada aproximadamente a los 300 m de profundidad y otra capa igualmente de disminución de velocidad ubicada a unos 900 m de profundidad. Ésta última parece estar asociada a una secuencia de conglomerados de cantos calcáreos y volcánicos, según se ve en el corte del

pozo. Se localiza nuevamente a la profundidad máxima del mismo con igual característica de disminución de la velocidad. Es interesante analizar el comportamiento de la curva de velocidad, ya que la misma parece expresar una cierta tendencia general de desplazamiento hacia la derecha, es decir, el aumento total de sus valores, por lo que aparentemente aquí se manifiesta un determinado gradiente de incremento de la velocidad con la profundidad, lo que como es conocido es típico de los medios terrígeno-carbonatados.

Al estudiar el comportamiento de la traza sintética parecen destacarse de arriba hacia abajo los siguientes eventos sísmicos. En primer lugar se destaca el asociado a una profundidad aproximada de 200 m. El mismo se expresa claramente en la curva de velocidad y parece estar relacionado con un cambio litológico ubicado a la profundidad referida, en la que se observa un contacto entre calizas y argilitas calcáreas. En segundo lugar se observa un claro evento sísmico ubicado a una profundidad aproximada de 300 m que se corresponde bastante bien con una capa de baja velocidad en la curva acústica. Es de significar que éste no tiene una clara interpretación geológica.

A la profundidad de 490 m y coincidente con una discordancia angular, se aprecia en la traza sintética un aumento local de su diferenciación y su frecuencia predominante, lo que se corresponde adecuadamente con una alata diferenciación de la curva de velocidades y un intervalo donde predominan las argilitas calcáreas.

A una profundidad aproximada de 600 m se observa un significativo evento sísmico aparentemente vinculado a un cambio litoestratigráfico y a una discordancia estratigráfica entre el Mioceno Inferior y Medio.

A una profundidad aproximada de unos 720 m se aprecia otro evento sísmico supuestamente vinculado con una discordancia litoestratigráfica ubicada en el complejo estratigráfico del Mioceno Inferior.

Por último, se destaca a una profundidad aproximada de 900 m un claro evento sísmico asociado al contacto estratigráfico entre el Mioceno Inferior y el Oligoceno.

A partir de esa profundidad en la traza sintética se aprecia un determinado paquete ondulatorio que culmina con un evento fuerte ubicado a una profundidad aproximada de 960 m. Este intervalo de la traza sísmica se corresponde muy bien con una capa acústica en la curva de velocidad que tiene un espesor aproximado de unos 60 m, de modo que por lo visto, para una frecuencia predominante de 80 Hz, en la traza sintética es posible identificar por separado el piso y el techo de una capa con un espesor de 60 m.

Para completar este análisis se elaboró la Figura 7, en la que aparecen al extremo izquierdo la versión en tiempo de la curva de velocidad, al centro la traza sintética obtenida para un pulso de Ricker y frecuencia predominante 30 Hz en función de 2T (el doble del tiempo calibrado), y a la extrema derecha aparece la copia de una de las dos trazas centrales de un sismograma obtenido en la superficie, en las proximidades del pozo Rabihorcado.

En la traza de campo se aprecian los eventos sísmicos indicados como "b", "c", "d" y "f". Se observa en la figura que estos eventos se expresan también en

la traza sintética. Al utilizar esta última como recurso de referencia con los datos de pozo, podemos concluir que las reflexiones más destacadas están asociadas principalmente a la Formación Sismoestratigráfica 1 (Figura 7) y se corresponde en orden de incremento de tiempo a:

0,340 s: asociado a una capa de baja velocidad como fue anteriormente referido, ubicada a unos 300 m.

0,412 s: vinculada a una discordancia angular, ubicada a unos 490 m.

0,548 s: asociada a una discordancia ubicada a la profundidad de 600 m entre el Mioceno Inferior y Medio.

0,752 s: correspondiente al contacto estratigráfico entre el Mioceno Inferior y el Oligoceno.

En este punto es de significar que se observó un pequeño corrimiento de tiempo de unos 0,048 segundos entre los eventos sísmicos que se aprecian en la traza sintética y en la traza de campo, además, provoca gran atención el hecho de que los eventos en la traza de campo son los que aparecen incrementados en tiempo. Esto pudiera ser provocado por efecto de la Zona de Bajas Velocidades, un cierto buzamiento de las capas reflectoras o un determinado alejamiento de la zona donde se obtuvo el sismograma de campo con respecto al pozo objeto de estudio.

LLama la atención al observar la traza sintética obtenida para una frecuencia de 30 Hz, que no se logra una buena resolución del techo y el piso de la capa de espesor aproximado a 60 m, ubicada en el intervalo de 900 a 960 m, a diferencia de lo ocurrido con la frecuencia de 80 Hz, de lo cual se desprende la conclusión de que en los registros sísmicos de campo, cuya frecuencia predominante sea más baja (30 Hz) no será posible investigar adecuadamente aquellas capas acústicas cuyos espesores sean iguales o menores que 60 m. Por último, sobre la base de los resultados alcanzados, se concluyó que no sólo fue concebida la metodología de obtención de los sismogramas sintéticos, sino que se probó la utilidad de éstos mediante la elaboración de los registros acústicos disponibles en el pozo Rabihorcado ubicado en la región de interés.

Durante estos últimos años los autores han dirigido trabajos en los que se han explorado las posibilidades de los carotajes sísmico, convencional y acústico, así como la aplicación de la metodología de construcción de las trazas sintéticas y el sistema MECCA en otros pozos como Macaca (Cuenca del Cauto), Las Mangas 1 (Cuenca Los Palacios) y Marbella-Mar 1 (Bahía de Cárdenas). Al compararse los resultados del carotaje acústico con los del PSV realizado en esos pozos se llegó a resultados similares. También quedó demostrada en estos trabajos la posibilidad de utilización exitosa de los datos del carotaje eléctrico, que suele medirse en todos los pozos, para la construcción de curvas pseudo-acústicas, sobre las que se puede aplicar la metodología propuesta.

Los resultados alcanzados en todos los casos son altamente satisfactorios, además, evidencian la efectividad de utilización del carotaje acústico y la construcción de las trazas sintéticas con independencia de las condiciones geológicas.

Fichero: V (Z) RAG
Xmín = 0,0581412
Xmáx = 0,898133
Ymín = 1 850,62
Ymáx = 4 767,72
Escala X: 1 cm = 0,04
Escala X: Lineal
Escala Y: 1 cm = 500
Escala Y: Lineal
Marca Xo: 0
Paso: 0,1

Fichero: SI (ZK6) RA
Xmín = 0,0591412
Xmáx = 0,898133
Ymín = 0,265684
Ymáx = 0,282661
Escala X: 1 cm = 0,04
Escala X: Lineal
Escala Y: 1 cm = 0,125
Escala Y: Lineal
Marca Xo: 0
Paso: 0,1

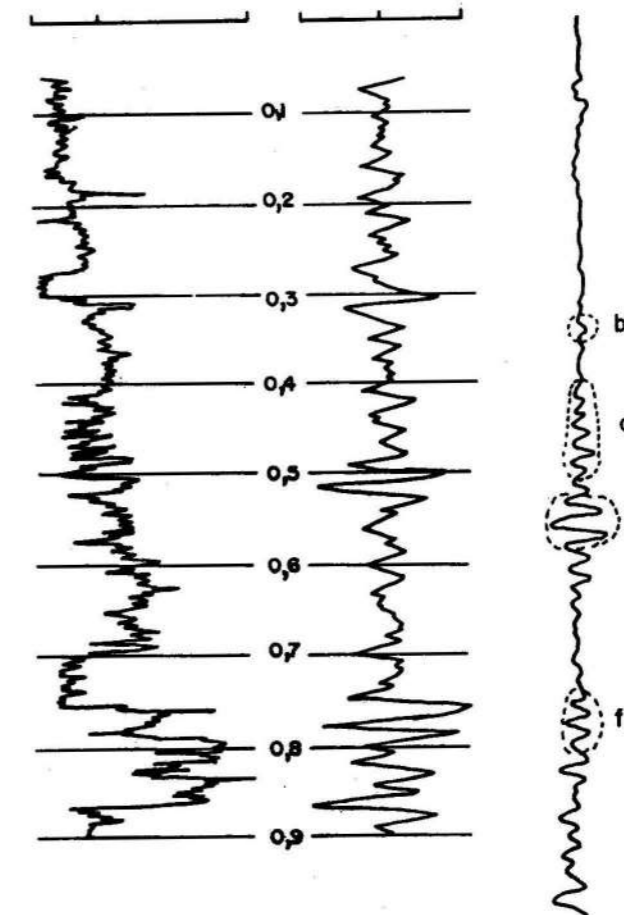


FIGURA 7. Comparación de la curva V(t) (izquierda) con una traza sintética (centro) y la traza central de un sismograma (derecha).

CONCLUSIONES

1. El valor de este trabajo es esencialmente metodológico.
2. Se presenta una tecnología de elaboración probada en condiciones cubanas y explorada en muchos de sus detalles.
3. Se presenta el sistema MECCA para microcomputadoras que brinda todas las herramientas necesarias para la aplicación de la tecnología propuesta.
4. Se muestra la posibilidad de utilizar los registros de carotaje acústico (diferencial) en el cálculo de las curvas de velocidad media, lo que permite reducir el volumen de los trabajos de sismocarotaje en una región dada.
5. Se muestra la posibilidad de utilizar los registros de carotaje eléctrico de resistividad convencionales para inferir el comportamiento de las curvas pseudo-acústicas en aquellos pozos o intervalos de profundi-

dades donde no se haya corrido el registro acústico (con menor grado de confiabilidad y precisión). Este aspecto es totalmente novedoso en las condiciones de Cuba.

6. Se demuestra la posibilidad de utilizar los registros de carotaje acústico con el fin de apoyar las investigaciones sísmicas en pozos y en superficies.

Los autores de este trabajo consideran que la tecnología propuesta no debe excluir la realización de los trabajos de carotaje sísmico convencional, ya que en muchos aspectos proporcionan una valiosa información complementaria.

BIBLIOGRAFÍA

- BULATOV, B.: *Carotaje acústico*, Ed. Nedra, Moscú, 1970 (en ruso).
DENNISON, A.T.: "Introducción a la técnica de los sismogramas sintéticos", *Geophysical prospecting*, vol. 8, no. 2, junio, 1960 (en inglés).

DOMÍNGUEZ, L.: *Posibilidades del carotaje sísmico en la Cuenca del Cauto*, Trabajo de diploma, ISPJAE, 1989.
 GALPERIN, E.I.: *El perfilaje sísmico vertical*, Moscú, 1980 (en ruso).
 GARCÍA, M.R. y E. DELFINO: *Posibilidades del carotaje sísmico en el área de la Bahía de Cárdenas*, Trabajo de diploma, ISPJAE, 1991.
 GOGONIENKOV, G.N.: *Cálculo y empleo de los sismogramas sintéticos*, Ed. Nedra, Moscú, 1972 (en ruso).

RAPOPORT, M.B.: *Técnica computacional en geofísica de campo*, Ed. Mir, Moscú, 1984.
 ROJAS, M. y D. NUÑEZ: *Posibilidades del carotaje sísmico en el área de la cuenca Los Palacios*, Trabajo de diploma, ISPJAE, 1987.
 STEWART, R. y otros: "Perfilaje sísmico vertical", *Geophysics*, 49 (8), 1984 (en inglés).
 YILMAZ, O.: *Procesamiento de datos sísmicos*, Tulsa, Society of Exploration Geophysicist, 1989 (en inglés).

Vol. XIII, No. 2, 1996

MORFOTECTÓNICA Y SISMOTECTÓNICA DE LA REGIÓN DE MOA

Ing. Alina Rodríguez Infante
 Ing. Miraida Mundi Bout
 Ing. José Luis Castillo González

Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

ACERO PARA EL DESARROLLO



Entre en contacto con nosotros

RESUMEN:

Se exponen los principales rasgos que caracterizan la geomorfología, morfometría y neotectónica de la región de Moa. En el esquema geomorfológico se muestran las principales características del paisaje determinándose dos tipos principales de relieve: montañoso y de llanura. En el esquema tectónico se representan diez bloques neotectónicos concebidos para la región, así como las estructuras tectónicas de mayor interés y dentro de éstas las sismogeneradoras.

Este trabajo se realizó en coordinación con el Instituto de Sismología de la Academia de Ciencias de Cuba, el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas y el Instituto Superior Minero Metalúrgico, con el objetivo de establecer las principales direcciones de los movimientos neotectónicos de la región, así como las estructuras sismogeneradoras que en ella se encuentran. Esto hace posible el establecimiento de medidas que garanticen la seguridad constructiva, industrial y social.

El área investigada está comprendida entre los ríos Cananova, al oeste y Santa María, al este, extendiéndose de norte a sur desde el océano Atlántico hasta la coordenada 206 000 según el sistema de coordenadas Lambert, con una extensión de 217 km.

Se utilizaron diferentes metodologías de investigación, teniendo mayor peso los trabajos de fotointerpretación geólogo-tectónica y los métodos morfométricos. En las áreas más complejas se realizaron comprobaciones de campo, se utilizaron las informaciones obtenidas en trabajos geológicos anteriores desarrollados en la región, y como material complementario se emplearon las informaciones sísmicas y geodésicas.

La escala de presentación de los trabajos es 1:50 000. Como escala primaria de los trabajos morfométricos y mapas topográficos se utilizó 1:25 000. En la fotointerpretación se aplicaron las escalas 1:36 000 del proyecto K-10 de 1972, las fotografías aéreas 1:60 000 del levantamiento W AS M 21 AMS de 1956 y las fotografías a escala aproximada 1:100 000 de 1977.

Características geológicas

En la región existe una gran variedad litológica, donde están representadas seis de las ocho asociaciones estructuro-formacionales (AEF) propuestas por el doctor F. Quintas, las cuales se basan en las teorías que explican el origen y evolución de los arcos insulares y las características de sus conjuntos litológicos.

ABSTRACT:

The main features which characterize Moa geomorphology, morphometry and neotectonic region are shown in this article. The most important characteristics of the landscape with two types of relieves determined the mountainous and the plain. Besides, ten neotectonic blocks for the region and the most important tectonic structures are also represented. Among the tectonic structures, the generating-seism structure are included.

Las AEF representadas en la región son las siguientes:

- *AEF del basamento del Arco Insular Cretácico y de la antigua corteza oceánica.* Esta es la más importante, pues ocupa la mayor parte del área representada por la Asociación Ofiolítica en la cual aparecen rocas como harzburgitas, dunitas, lherzolitas, gabros normales y olivínicos.
- *AEF del Paleoarco Volcánico del Cretácico.* Compuesta por formaciones volcánicas y metavolcánicas que corresponden a las series toleítica y calcoalcalina, representadas por la formación Quibiján (KQ) y Santo Domingo (KSD). Afloran al sureste y suroeste.
- *AEF de las cuencas marginales del Cretácico Superior al Paleoceno Inferior.* Se compone de formaciones del tipo molásico y flyschoides, acumuladas en algunos casos en zonas de intensa actividad tectónica. Representada por las formaciones La Picota (KP) y Mícara (KM), aflorando en la parte oeste-suroeste.
- *AEF del Neoarco Volcánico del Paleógeno.* Compuesta por formaciones de composición predominante andesítico riodacítica y representada en la región por la formación Sabaneta (Psb), la cual se encuentra muy zeolitizada, aflorando en un gran área de la parte oeste.
- *AEF de las cuencas superpuestas de la etapa platformica.* Las formaciones que la componen se caracterizan por presentar una estructura simple y estar compuestas por secuencias terrígeno-carbonatadas, acumuladas en ambientes de diferentes tipos, y en ocasiones pueden ser molásicas y flyschoides. En la región está representada por la formación Capiro (Pcp). Aflora al este.
- *AEF terrígeno-carbonatada de la etapa de desarrollo platformico.* Está compuesta por formaciones carbonatadas y terrígenas que se caracterizan por presentar yacencia monoclinas, suave y horizontal. En la región está representada por las formaciones Majimiana (Nmj), Júcaro (Nju) y los depósitos cuaternarios (Qpy, Qf, Qpp). Afloran por todo el litoral.