

# Mejora de la imagen sísmica con técnicas avanzadas de procesamiento

**Mericy Lastra Cunill**

Correo electrónico:mericy@digicupet.cu

Artículo Original

**José Gemel Luis Prol Betancourt**

Correo electrónico:prol@cupet.cu

**María Caridad Rifá Hernández**

Correo electrónico:rifa@digicupet.cu

Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

## Resumen

Dada la necesidad de mejorar la imagen sísmica en la zona central de Cuba, específicamente en el área del sector Venegas, ubicada dentro del Cinturón Plegado Cubano, se reprocesó el dato sísmico adquirido por Cuba Petróleo (Cupet), en el año 2007, según la experiencia acumulada durante el procesamiento anterior, realizado en el propio año, y los nuevos conocimientos geológicos sobre el área. Con el objetivo de mejorar los resultados, se analizaron los procedimientos aplicados anteriormente, reprocesándose este dato primario con nuevos enfoques y procedimientos entre los que se destacan: la atenuación de la onda superficial con un filtro en el dominio Radon en su variante lineal, el cambio de las correcciones estáticas primarias de elevación por las de refracción, el estudio de velocidades con la selección automática biespectral de alta densidad, estudio de la anisotropía, la atenuación del ruido aleatorio, y la migración presuma en tiempo y en profundidad. Como resultado de este reprocesamiento se localizó una estructura que no se identificaba en las secciones sísmicas del procesamiento anterior, asociada al tope de los sedimentos de cuenca del margen continental, ubicada al norte del sector, que aumenta las potencialidades de encontrar hidrocarburos en cantidades de importancia económica, disminuyendo el riesgo de la perforación en el sector Venegas.

Palabras clave: procesamiento sísmico, estáticas, velocidades, anisotropía

Recibido: 3 de marzo del 2012

Aprobado: 24 de abril del 2012

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo refiere un ejemplo de los esfuerzos que son realizados por los procesadores sísmicos para lograr extraer la mayor cantidad posible de información geológica con fines petroleros en áreas de gran complejidad geológica del Cinturón Plegado Cubano.

Para identificar la frontera posiblemente relacionada con el tope de los sedimentos de margen continental que yace bajo las rocas asociadas al Arco Volcánico Cretácico y las ofiolitas, se realizó un reprocesamiento del dato sísmico mediante nuevos enfoques y técnicas avanzadas de procesamiento, que permitió mejorar la imagen final.

Después de una etapa de procesamiento e interpretación previa, realizada a los datos de la campaña del año 2007, [1]

se tomó la decisión de reprocesar este dato desde el inicio, partiendo de la experiencia acumulada durante la operación anterior, los nuevos conocimientos geológicos sobre el área y la aplicación de nuevas técnicas.

El trabajo se sustentó en la comparación de los resultados interpretativos de cada procesamiento. En el primero, el campo de ondas después de la migración antes de la suma, fue en general caótico, con elementos de reflexión dislocados y mayormente cortos, con poca expresividad dinámica que no presentaba la nitidez adecuada para identificar la disposición de los diferentes complejos estructurales que intervienen en el corte geológico. Sin embargo, en el segundo procesamiento realizado, se observa una mejora considerable del cuadro de ondas, en el cual se identificaron reflectores continuos, extensos y bien definidos que permitieron realizar

una mejor interpretación y definir con mayor claridad fronteras sísmicas asociadas a sedimentos de cuencas del margen continental.

Con el objetivo de mejorar los resultados, se analizaron los procedimientos aplicados anteriormente que habían degradado la relación señal / ruido y distorsionado la imagen, reprocesándose este dato primario con nuevos enfoques y procedimientos entre los que se destacan:

- Atenuación de la onda superficial con un filtro en el dominio Radon en su variante lineal.
- Cambio de las estáticas primarias de elevación por las de refracción.
- Estudio de velocidades con selección automática biespectral de alta densidad.
- Estudio de la anisotropía.
- Atenuación del ruido aleatorio.
- Migración presuma en tiempo y en profundidad.

Como se puede apreciar, la intención de este trabajo es mostrar paso por paso la mejora de la imagen sísmica, analizándose cómo influyeron en cada proceso las nuevas herramientas y enfoques de procesamiento.

La imagen obtenida permitió la localización de una estructura posiblemente asociada al tope de los sedimentos del margen continental, ubicada al norte del sector. Tal hallazgo aumenta las potencialidades de encontrar hidrocarburos en cantidades de importancia económica y disminuye el riesgo de la perforación en el sector Venegas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos sísmicos utilizados en este estudio fueron adquiridos por Cuba Petróleo (Cupet), en el año 2007 en el sector norte de la provincia Sancti Spiritus (figura 1). Como fuente de excitación se utilizaron vibradores, con un intervalo entre fuentes y entre receptores de 25 m. La configuración del tendido fue de tiro central, con alejamiento mínimo de 37,5 m, alejamiento máximo de 4 012,5 m, con un total de 320 canales, para un recubrimiento de 16 000 %.

Para el procesamiento sísmico la secuencia se dividió en tres etapas:

1. Etapa de preprocesamiento del dato.
2. Etapa de migración presuma (en tiempo y en profundidad).
3. Etapa de posprocesamiento.



Fig. 1. Mapa de ubicación.

### Etapa de preprocesamiento del dato

1. Se asignó la geometría, y se realizó la edición de las trazas malas, debido al acople defectuoso de los receptores y problemas en los cables.

2. Se convirtió la señal a fase mínima, debido a que es la entrada teóricamente más apropiada para la deconvolución.

3. Se evaluaron y atenuaron los ruidos del dato primario.

4. Se aplicó una corrección por divergencia esférica del tipo  $(t/250)^T$ , donde  $T$  es el coeficiente de multiplicación. ( $T=1,5$ ).

5. Se realizó el cálculo y la aplicación de las correcciones estáticas primarias por refracción.

6. Se aplicó una deconvolución consistente en superficie en su variante predictiva.

7. Se realizó un primer estudio de velocidades y se aplicó la corrección dinámica *Normal Move Out* (NMO) con su respectivo *muting* o silenciamiento, para eliminar los estiramientos de las trazas provocados por la aplicación del NMO.

8. Se aplicó una primera corrección estática residual para corregir las pequeñas anomalías de la longitud de onda, y mejorar la continuidad de los eventos sísmicos.

9. Se realizó un segundo estudio de velocidades para precisarlas mejor y realizar el estudio de la anisotropía, mediante la selección automática biespectral de alta densidad.

10. Se aplicó una segunda corrección de estáticas residuales.

11. Se aplicó una atenuación de ruido aleatorio con el mismo módulo usado para la atenuación de ruidos coherentes, basado en la transformación *tau-pi*, pero modelándolo solo para este objetivo.

### Etapa de migración presuma en tiempo y en profundidad

1. Se transformó la velocidad de suma ( $V_{suma}$ ) en velocidad raíz medio cuadrática ( $V_{rms}$ ). Las velocidades que fueron usadas como  $V_{suma}$  fueron las calculadas en la etapa del preprocesamiento del dato.

2. Se realizó la primera migración presuma en tiempo. Una vez obtenida esta primera migración se determinaron las zonas de interés, y se configuraron los horizontes modelos. Estos horizontes se trazaron teniendo en cuenta los posibles límites entre las rocas del terreno Zaza y los sedimentos de las unidades Tectono estratigráficas Placetas y Camajuaní.

3. Se actualizó el modelo de  $V_{rms}$  en el dominio de tiempo migrado mediante la semblanza por horizontes. Para la actualización del modelo de  $V_{rms}$  se tuvieron en cuenta los horizontes modelos, la sección migrada, el sismograma migrado y la corrección residual por NMO.

4. Se realizaron como promedio cinco iteraciones de migración presuma en tiempo en cada línea procesada para obtener un buen modelo de  $V_{rms}$  antes de pasar a la creación del modelo de velocidad de intervalo ( $V_{int}$ ).

5. Se ajustó el modelo inicial de  $V_{int}$ , por sucesivos pasos de la corrección residual por NMO y tomografía.

6. Se realizó la migración final con el algoritmo de Kirchhoff.

## Etapa de posprocesamiento

En el posprocesamiento de los datos se aplicó:

1. Un filtro pasabanda (4 - 8, 36 - 42 Hz).
2. Una ecualización dinámica.
3. Una filtración coherente.

## DISCUSIÓN

Para la evaluación de los ruidos del dato primario e incrementar la relación señal / ruido, se decidió eliminar la frecuencia de 60 Hz y los ruidos coherentes caracterizados fundamentalmente por la onda superficial, que son los ruidos primarios más característicos de los datos terrestres. Se procedió al análisis del procedimiento aplicado anteriormente en el que se aplicó un filtrado en el dominio FK, y se probó en el procesamiento actual un procedimiento basado en el dominio Radon, que atenúa el ruido basado en una transformación *tau-pi* en su variante lineal, el que aportó mejores resultados.

A continuación se utilizó una deconvolución consistente en superficie en su variante predictiva, para evitar la afectación lateral de la ondícula, donde cada traza se expresó como una combinación de un filtro común a todas, con cuatro filtros caracterizados por las posiciones respectivas del punto de excitación, del punto de recepción, del punto común de profundidad y la distancia fuente receptor.

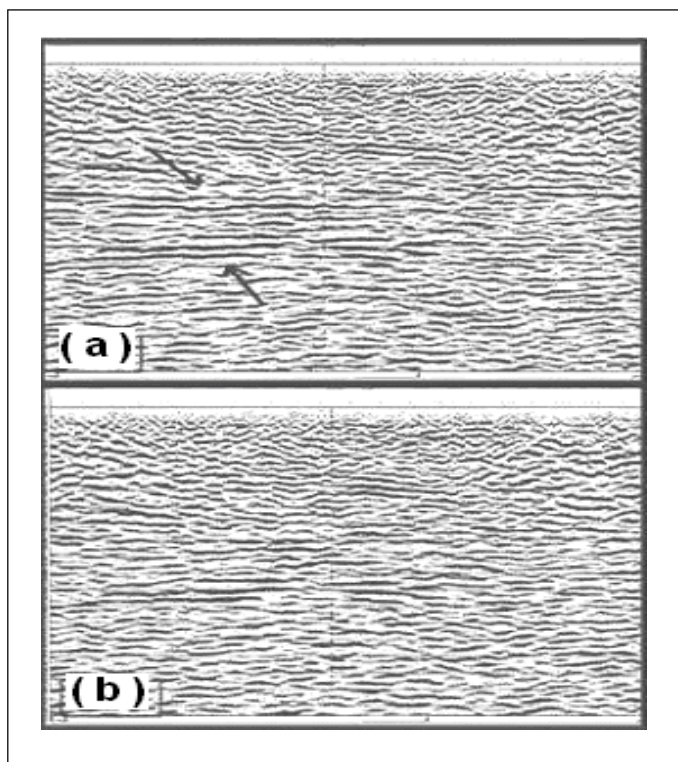
En cuanto a la aplicación de las correcciones estáticas primarias, se hizo un estudio según el resultado obtenido en el procesamiento del 2007, donde se aplicaron las correcciones estáticas primarias por elevación, las que fueron obtenidas a partir de las alturas de los puntos de recepción y de excitación, valores suministrados desde las observaciones topográficas directamente desde la adquisición y la velocidad de reemplazamiento, calculada previamente por sumas de velocidades constantes de la parte superior del corte.

En el procesamiento actual se probaron las correcciones estáticas primarias por refracción mediante los métodos de Gardner [2] y el de tomografía de una sola capa. [3] El primero calcula las correcciones estáticas desde el tiempo de los primeros arribos, y construye las curvas de interceptos, que son manejadas para refractores de alejamiento constante; mientras que el de tomografía de una sola capa, usa una simplificación tomográfica referida a la descomposición de los tiempos de recorrido. El método de Gardner reportó mejores resultados y fue el seleccionado para la aplicación de las correcciones estáticas primarias. [4]

En la figura 2 se presenta una suma preliminar en tiempo, con la aplicación de las correcciones estáticas primarias por refracción y por elevación. Se observa mayor deterioro en la suma preliminar con correcciones estáticas por elevación, no así en la suma preliminar obtenida con correcciones estáticas por refracción, donde se alinean mejor los elementos de reflexión, lo que aparece señalado con flechas en la figura.

Este resultado se corresponde con el hecho de que las correcciones estáticas por elevación, aunque se calculan

de forma rápida, a partir de los datos topográficos (que hoy en día son bastante precisos), no resultan un método tomográfico, mientras que las estáticas primarias por refracción, aún constituyendo un proceso caro por el tiempo que se invierte en la interacción hombre - máquina en la selección de los primeros arribos de las trazas elementales, aportan mejores resultados, en sectores de alta complejidad tectónica, como es el caso del área de estudio.



**Fig. 2. Suma preliminar en tiempo con aplicación de correcciones estáticas primarias: a) de refracción y b) de elevación. La flecha señala la mejoría obtenida.**

Para realizar el primer análisis de las velocidades se partió de las obtenidas en el procesamiento realizado en el área, en el año 2007. También se tuvieron en cuenta los criterios acerca de las estructuras esperadas, que habían sido sugeridas en el informe de interpretación del propio año. Este estudio de velocidades se realizó mediante el método convencional, calculándose una función de semblanza de las trazas a lo largo de trayectorias hiperbólicas, aplicándose después la corrección dinámica *Normal Move Out* (NMO) con su respectivo *muting* o silenciamiento, para eliminar los estiramientos de las trazas provocados por la aplicación del NMO.

Con el objetivo de precisar mejor las velocidades, se realizó el segundo estudio de velocidades, donde se tuvo en cuenta que, en el área de trabajo, es evidente la presencia de un medio totalmente anisotrópico, debido a sus buzamientos muy abruptos, que por lógica generan un comportamiento no elíptico del modelo de velocidad, con eje de simetría inclinado, denominado *Isotropía transversalmente inclinada* (TTI), que se muestra en la tabla 3. [5,6].

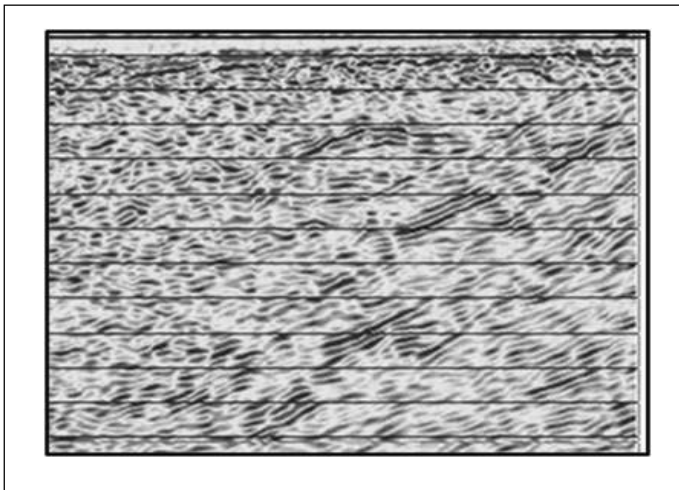


Fig. 3. Presencia de medio anisotrópico con eje de simetría inclinado.

Para corregir los efectos de la anisotropía fue utilizado el método de la hipérbola desplazada, basado en la selección automática biespectral de alta densidad, el cual hace un análisis de las hipérbolas y calcula los tiempos de retardo entre los alejamientos cercanos y lejanos, y el intercepto de la hipérbola desplazada, los cuales son filtrados y convertidos en campos de velocidad y anelipticidad.

Debido a que este método está basado en un algoritmo de reconocimiento de patrones que es muy sensible a la presencia de ruidos, [7] se hizo necesario realizar un acondicionamiento del dato para seguir las reflexiones sísmicas. El acondicionamiento del dato consistió en:

- Una atenuación de ruido aleatorio.
- La aplicación de un algoritmo de mejoramiento de la coherencia entre trazas sucesivas de la sección.
- Atenuación del efecto de la absorción selectiva de las ondas sísmicas a través del subsuelo mediante un filtrado Q de amplitud y fase, con el fin de ganar energía y lograr seleccionar elementos de reflexión débiles.
- Mezcla de trazas para mejorar la geoestadística entre un evento y otro de la línea sumada.
- Filtrado de banda estrecha (de 5 a 40 Hz), para trabajar con el rango de frecuencias útiles.
- Una ecualización de ventana corta, para aumentar el nivel de las señales débiles.

La secuencia descrita anteriormente, permitió incrementar la continuidad de los eventos, produciendo una coherencia lateral organizada en un patrón horizontal de vectores, lo que se observa en la figura 4.

La figura 5 muestra un sismograma con la aplicación de los métodos *moveout hiperbólico estándar* y el de la *hipérbola desplazada* respectivamente. Se observa cómo la corrección estándar, al suponer que las capas son homogéneas e isotrópicas, los eventos correspondientes a las capas anisotrópicas son sobrecorregidos; sin embargo, después de aplicarse el método de la hipérbola desplazada, se mejoró

considerablemente la horizontalidad de los ejes cofásicos del sismograma, fundamentalmente en las partes someras de los alejamientos mayores, lo cual permitió extender el *mute* externo, que significó un aumento de la cobertura. En la figura 6, se presenta la diferencia entre un sismograma con la corrección NMO estándar con un silenciamiento externo aplicado para corregir el estiramiento propio de esta corrección, el sismograma con la aplicación de la corrección NMO no hiperbólica y la diferencia entre ambos, donde se muestra toda la información que se hubiera deseado si no se hubiese aplicado la corrección anisotrópica. [8]

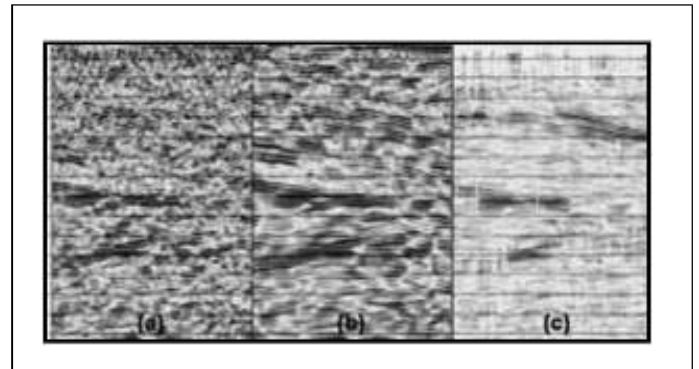


Fig. 4. Suma: a) sin acondicionamiento b) con acondicionamiento y c) su coherencia lateral organizada en un patrón horizontal de vectores.

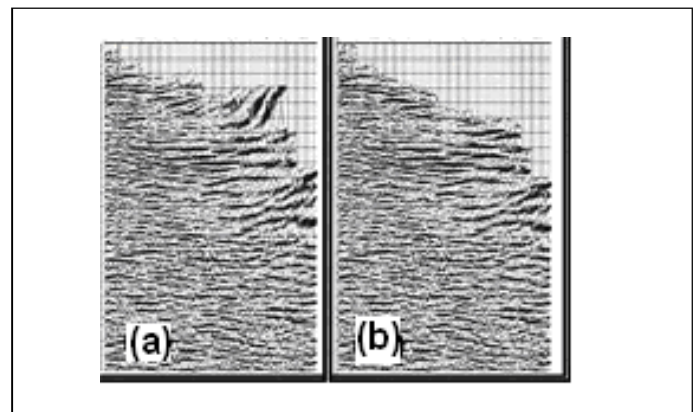


Fig. 5. Sismograma: a) con corrección NMO estándar y b) con corrección NMO no hiperbólica.

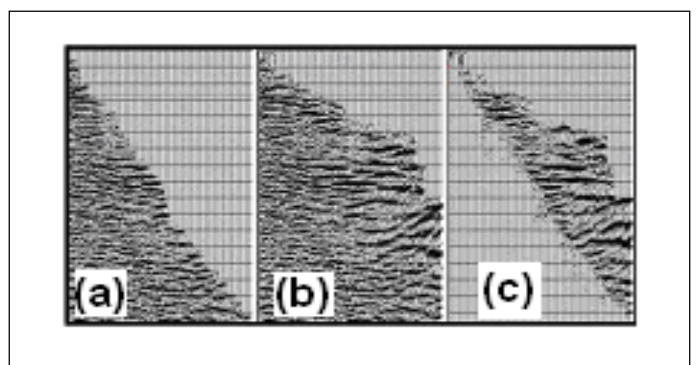
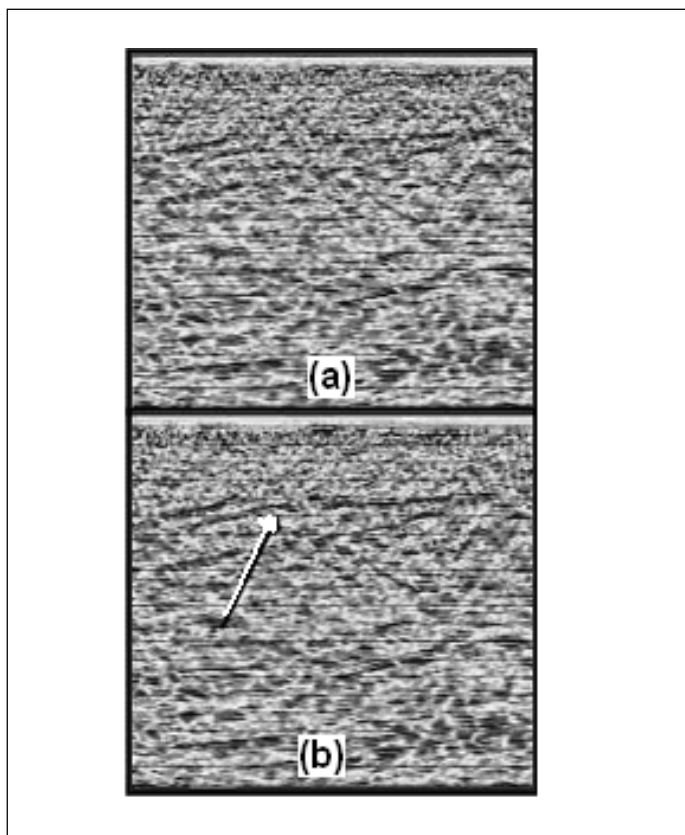


Fig. 6. Sismograma: a) con corrección NMO estándar y Mute externo aplicado: b) con corrección NMO no hiperbólica y c) la diferencia entre ambas.

En la figura 7 se presenta la suma con la aplicación del NMO estándar y con el NMO no hiperbólico, donde se hace evidente el incremento de la resolución lateral al compensarse los efectos de la anisotropía.

Este procedimiento se aplicó en la etapa anterior a la migración, con el fin de obtener un mejor modelo de velocidad de suma para la entrada de esta.

Por último, se aplicó una atenuación del ruido aleatorio tomándose en consideración el análisis desarrollado por Lastra en el 2008, [4] donde se demostró que solo debería ser aplicado posterior a una buena corrección NMO y de estáticas residuales. También fue novedoso en este procesamiento el uso de un filtro en el dominio Radon, solo diseñado con este objetivo.



**Fig. 7.** Suma en tiempo con aplicación: a) del NMO estándar y b) con la corrección anisotrópica. La flecha señala la continuidad de los horizontes alcanzada con la segunda corrección.

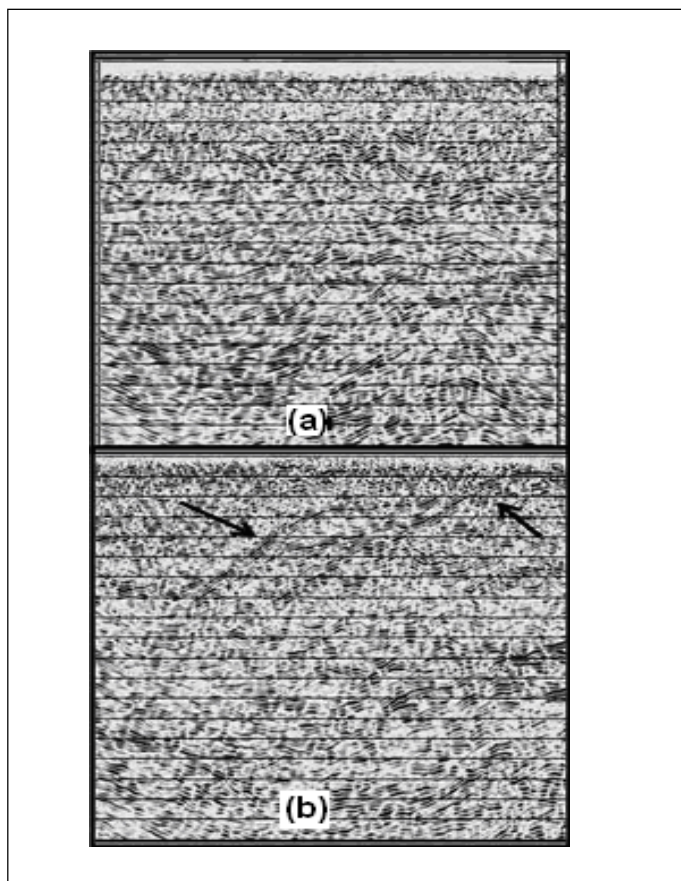
Una vez mejorado el dato en la etapa de preprocesamiento descrita anteriormente, se procedió a ejecutar la migración presuma. Primero se realizó una migración presuma en tiempo que permitió mediante sucesivas iteraciones obtener un buen modelo de  $V_{rms}$  y por consiguiente una mejor focalización de la energía reflejada. A partir de este resultado se continuó el procesamiento y se convirtió la  $V_{rms}$  en  $V_{int}$  y se ejecutó la migración presuma en profundidad, procedimiento que no había sido aplicado en el procesamiento anterior y que reportó la imagen sísmica más exacta dadas las estructuras complejas que caracterizan el área de estudio, observándose una mejora considerable del cuadro de ondas,

que permitieron identificar los diferentes complejos estructurales que componen el corte geológico.

En la figura 8 se muestra el resultado final de ambos procesamientos: la migración presuma en tiempo correspondiente al procesamiento del 2007, y la migración presuma en profundidad del procesamiento actual, convertida a tiempo para una mejor comparación. En la figura se señalan con flechas los reflectores continuos y extensos, a los cuales se hizo referencia.

Este resultado demostró que el éxito de la migración presuma en profundidad depende de los procedimientos que se apliquen en la etapa del preprocesamiento.

La metodología aplicada en esta investigación, en la que se implementó la selección automática de velocidad bispectral y la migración presuma en profundidad, está acorde con las tendencias más actuales de procesamiento a nivel mundial, y fue aplicada en esta área por primera vez.



**Fig. 8.** Resultado final de ambos procesamientos: a) migración presuma en tiempo correspondiente al procesamiento del 2007 y b) migración presuma en profundidad del procesamiento actual, convertida a tiempo para una mejor comparación.

## RESULTADOS

El procesamiento descrito en el presente artículo, permitió identificar una frontera posiblemente asociada a los sedimentos de cuenca del margen continental, considerándose como la de mayor interés desde el punto de vista petrolero, aquella que se encuentra localizada al norte del sector de estudio. [9] La correlación de dicha frontera permitió

la ubicación de una estructura donde disminuye el espesor del denominado terreno Zaza integrado por las rocas del arco volcánico y de la asociación ofiolítica y a la vez ascienden los pliegues del margen continental.

En la figura 9 se señala en color verde claro el tope de la estructura, cuya cúpula, señalada por la flecha, se halla a una profundidad aproximada de 950 m, siendo la más perspectiva para la futura proyección de un pozo exploratorio.

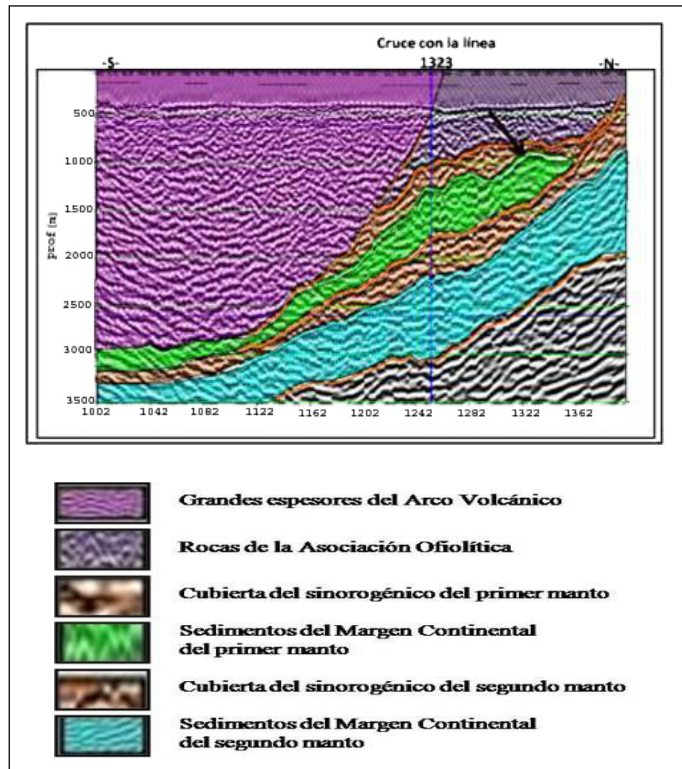


Fig. 9. Correlación de una línea orientada en dirección S - N, siguiendo la agrupación de los elementos de reflexión en la sección final presuma en profundidad.

## CONCLUSIONES

1. En la calidad del resultado final influyeron notablemente la atenuación de la onda superficial con un filtro en el dominio Radon en su variante lineal, la aplicación de las correcciones estáticas primarias por refracción, la corrección anisotrópica y la cantidad de iteraciones realizadas de migración presuma en tiempo y en profundidad.

2. Con el reprocesamiento realizado se logró una mejoría de las imágenes sísmicas, que permitió identificar una estructura con posible interés petrolero en la región investigada.

3. La nueva secuencia de procesamiento de datos sísmicos 2D aplicada en este estudio, puede emplearse en otras zonas de ambientes estructuralmente complejos como los encontrados en esta área, ubicadas en el Cinturón Plegado Cubano terrestre.

## REFERENCIAS

1. **PROL, José Luis; ABALLÍ, Pilar; RIFÁ, María et al.** "Proyecto 2810 (Etapa 8.9). Informe sobre la

interpretación de la sísmica 2D del Bloque 13 (Adquisición del 2007)". La Habana, CEINPET, 2007. 31 pp.

2. **PALMER, Derecke.** "An Introduction to the Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation". *Geophysics*. 1981, vol. 46, núm 11, pp. 1508-1518.

3. **CHON, Y. T and DILLON, T. J.** "Tomographic Mapping of the Weathered Layer". Annual SEG Meeting, Houston. 1986, Expanded Abstracts, pp. 593-595.

4. **LASTRA, Mericy; DÍAZ, Héctor; TRISTÁ, Anibal et al.** "Proyecto 2723 (Quinta Etapa). Desarrollo y aplicación de nuevos enfoques teóricos y prácticos de procesamiento sísmico 2D y 3D". La Habana, CEINPET, 2008. 42 pp.

5. **LAWTON, Don.C.; ISAAC, J. Helen; VESTRUM, Robert W. et al.** "Slip-Sliding' Away-Some Practical Implications of Seismic Velocity Anisotropy on depth Imaging". *The Leading Edge*. 2001, vol. 20, núm. 1, pp. 70-73.

6. **NARANJO, José; NÚÑEZ, Gerardo y ACURERO, Karina.** "Análisis del efecto de la anisotropía de Thomsen en la determinación de velocidades sísmicas a partir de registros de pozos en el lago de Maracaibo". En: *Memorias de la 4ta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*. La Habana, 2011, pp. 473-486.

7. **CURIA, David.** *Correccion Dinamica Automatica* [en línea]. 2010 [visitado: 15 de diciembre 2011]. Disponible en: <http://davidcuria.blogspot.com/del jueves 14 de enero del 2010>.

8. **LASTRA, Mericy; CAMEJO, Edenia y AMEIJERAS, Grisel.** "Análisis de velocidad biespectral en etapas tempranas del procesamiento sísmico". En: *Memorias de la 4ta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*, La Habana, 2011, pp.370-374.

9. **PROL, José Luis; ABALLÍ, Pilar; RIFÁ, María et al.** "Proyecto 6005, Exploración en Cuba Central y Oriental, Informe sobre los resultados de la interpretación geólogo - geofísica de las líneas migradas en profundidad antes de la suma (campana del 2007), correspondientes al Sector Venegas del Bloque 13". La Habana, CEINPET, 2008. 19 pp.

## AUTORES

### Mericy Lastra Cunill

Ingeniera Geofísica, Procesadora de Datos Sísmicos, Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba

### José Gemen Luis Prol Betancourt

Ingeniero Geofísico, Doctor en Ciencias, Investigador Auxiliar, Especialista Principal de Campos Potenciales, Interpretador de Datos Geofísicos, Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba

### María Caridad Rifá Hernández

Ingeniera Geofísica, Especialista en Investigación, Interpretadora de Datos Geofísicos, Exploración Geofísica, Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba

# Improving Seismic Image with Advanced Processing Techniques

## **Abstract**

Taking Taking into account the need to improve the seismic image in the central area of Cuba, specifically in the area of the Venegas sector, located in the Cuban Folded Belt, the seismic data acquired by Cuba Petróleo (CUPET) in the year 2007 was reprocessed according to the experience accumulated during the previous processing carried out in the same year, and the new geologic knowledge on the area. This was done with the objective of improving the results. The processing applied previously was analyzed by reprocessing the primary data with new focuses and procedures, among them are the following: the attenuation of the superficial wave with a filter in the Radon domain in its lineal variant, the change of the primary statics corrections of elevation by those of refraction, the study of velocity with the selection automatic biaspectral of high density, the study of the anisotropy, the attenuation of the random noise, and the pre stack time and depth migration. As a result of this reprocessing, a structure that was not identified in the seismic sections of the previous processing was located at the top of a Continental Margin sediment located to the north of the sector that increased the potentialities of finding hydrocarbons in quantities of economic importance thus diminishing the risk of drilling in the sector Venegas.

Key words: seismic processing, statics, velocity, anisotropy