

# Tomografía guiada por la imagen: inversión de acuerdo con la estructura para una sobrecapa compleja

Guy Hilburn<sup>1\*</sup>, Yang He<sup>1</sup>, Francis Sherrill<sup>1</sup>, Taejong Kim<sup>1</sup> y Zengjia Yan<sup>1</sup> presentan un método de tomografía de alta resolución que aplanar colecciones de trazas de forma rápida y fiable, produciendo modelos de velocidad geológicamente plausibles.

Los métodos tradicionales de actualización de los modelos de velocidad mediante la tomografía sísmica se basan en varias suposiciones y simplificaciones. En muchas situaciones, éstas pueden tanto aumentar la cantidad del tiempo como el número de iteraciones tomográficas necesarias para aplanar los eventos en las colecciones de trazas de la migración, o incluso empeorar las colecciones de trazas. En otros casos, los modelos de velocidad obtenidos con esas técnicas pueden pasar a ser físicamente improbables, ya que no se basan en el conocimiento geológico previo. Hemos desarrollado un método tomográfico de alta resolución denominado tomografía guiada por la imagen (IGT, por sus siglas en inglés), que se compone de dos ingredientes clave: la inversión preconditionada por la interpolación guiada por la imagen (IGI) y una técnica de selección de moveout residual (RMO) dependiente del offset. La IGT aplanar las colecciones de una forma más fiable y rápida que los métodos tradicionales, a la vez que produce modelos de velocidad más plausibles geológicamente.

La inversión tomográfica tradicional puede producir normalmente actualizaciones de velocidad razonables que pueden aplanar colecciones de trazas dentro de un rango aceptable, pero los resultados pueden no seguir ningún patrón geológicamente coherente. Sin restricciones, las velocidades a menudo incumplen la estratificación y las fallas de un modo inverosímil. Además, anteriormente la mejor opción para obtener los resultados de inversión de mayor resolución era utilizar una retícula de actualización lo más fina posible. Esto era poco práctico informáticamente y todavía tendía a producir actualizaciones que necesitaban un allanado para eliminar las fuertes variaciones y los valores alejados. Hale (2009a) propone utilizar la IGI para describir una imagen con un conjunto de valores escasos que se interpolen a lo largo de estructuras y sugiere posibilidades para restringir los procesos de obtener imágenes sísmicas. Nuestra tomografía guiada por las imágenes, que conserva los bordes, aplica el preconditionamiento IGI dentro de la inversión para promover automáticamente actualizaciones

de la velocidad que cumplan con la estratificación y las fallas, dando lugar a modelos del subsuelo más creíbles.

Los principales métodos de selección RMO se encuentran en dos categorías principales (Woodward et al., 2008). En la primera, las técnicas polinómicas aproximan el moveout ajustando los eventos a una parábola, hipérbola o curva polinómica de mayor orden. Como alternativa más reciente, los métodos dependientes del offset seleccionan el moveout de manera independiente a través de numerosos offsets. Cuando se aplica, la selección dependiente del offset puede aplanar las colecciones de trazas de manera más precisa y con menos iteraciones tomográficas que los métodos basados en polinomios.

Cualquiera de esos métodos permite crear modelos de velocidad de mayor resolución que las técnicas tradicionales y combinándolos se pueden favorecer sus capacidades. Cuando las actualizaciones de las inversiones están restringidas para que obedezcan a las estructuras relacionadas con la imagen, los resultados se pueden lograr de manera más rápida y no necesitan el mismo post procesamiento que podría crear actualizaciones de baja resolución incluso a partir de las inversiones más densas. Rastrear y considerar un moveout complejo con la selección dependiente del offset conduce directamente a actualizaciones más complejas y adecuadamente variables de la velocidad e incluso puede acelerar el proceso tomográfico.

## Inversión guiada por la imagen

El método IGT orientado por la estructura se basa en calcular varios parámetros a partir de la imagen apilada más reciente, que a continuación se utilizan para condicionar los resultados de la inversión para reforzar su conformidad con la geología infrayacente (Hale, 2009a).

Agrupando todos los puntos de la retícula en un pequeño número de zonas, podemos limitar el número de incógnitas dentro del proceso de inversión, estabilizando eficazmente la inversión en base a nuestra información previa. Por tanto, nuestra técnica comienza seleccionando una retícula de escasos puntos de control utilizada para definir una serie

<sup>1</sup> TGS.

\* Correo electrónico del autor de contacto: [Guy.Hilburn@tgs.com](mailto:Guy.Hilburn@tgs.com)

## Experimente la energía

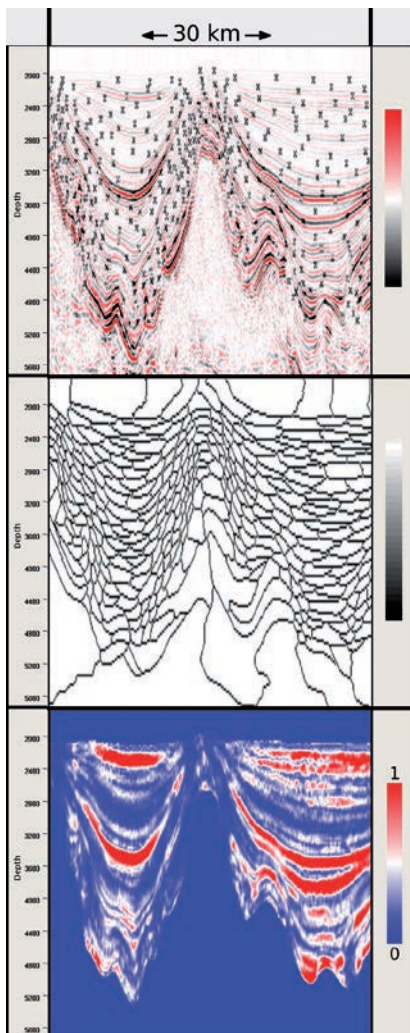
de zonas que cubren la región a actualizar. Para reforzar la restricción de que esas zonas obedezcan a la imagen sísmica base utilizada para guiar este proceso, definimos sus límites de manera automática en base al tiempo de propagación relacionado con la estructura dentro de esa imagen. Se calcula una serie de tensores a partir de gradientes localizados de la imagen para describir la direccionalidad y la continuidad de los reflectores. A continuación, se determina el tiempo de propagación relacionado con la estructura resolviendo la ecuación Eikonal conforme nos alejamos de cada punto de control en base a los tensores de la estructura. El tiempo de propagación es menor a lo largo de estructuras coherentes, como capas claramente definidas, y el tiempo de propagación es mayor a través o contra estructuras coherentes o en interrupciones de la imagen, como las fallas. Cada punto de control se asigna después a la zona de las ubicaciones de la retícula más cercana a él en tiempo de propagación. Por tanto, esas zonas serán anisótropas y extensas a lo largo de estructuras coherentes y tenderán a ser más isotrópicas en

áreas incoherentes o cuando estén interrumpidas por fallas. Este método creará automáticamente zonas de conservación de bordes que tenderán a detenerse en las fallas, aunque serán capaces de resolver capas delgadas y pequeñas anomalías de velocidad cuando se reflejen en la imagen apilada.

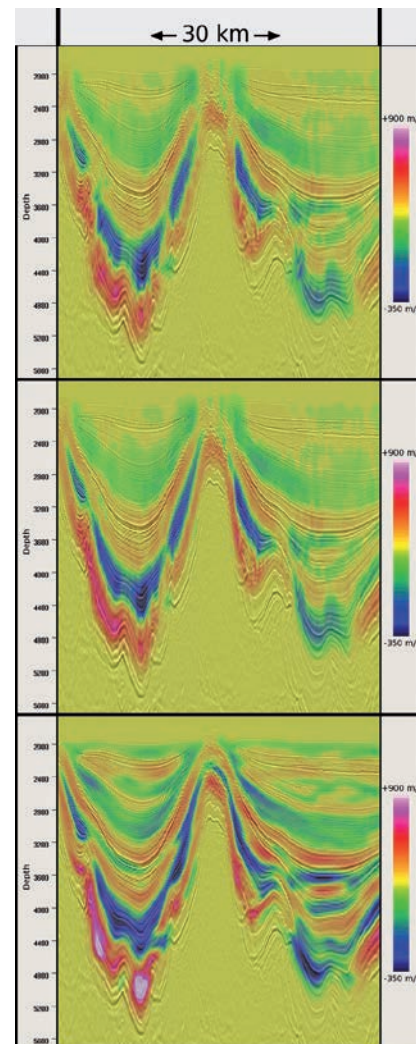
Durante la inversión tomográfica, se resuelve una matriz de ecuaciones para encontrar una actualización de la velocidad que converja con una solución para minimizar el RMO. Las relaciones básicas que gobiernan esto son

$$Am = d \text{ y } Lm = 0, \quad (1)$$

donde  $m$  representa parámetros del modelo, como la velocidad,  $d$  es el término de datos dado por el RMO,  $A$  es la matriz de sensibilidad que determina la relación entre el modelo actual y los datos, normalmente obtenido a partir del trazado de rayos, y  $L$  es el operador de regularización utilizado para estabilizar la inversión. El objetivo es actualizar iterativamente nuestro modelo dado el RMO, que representa

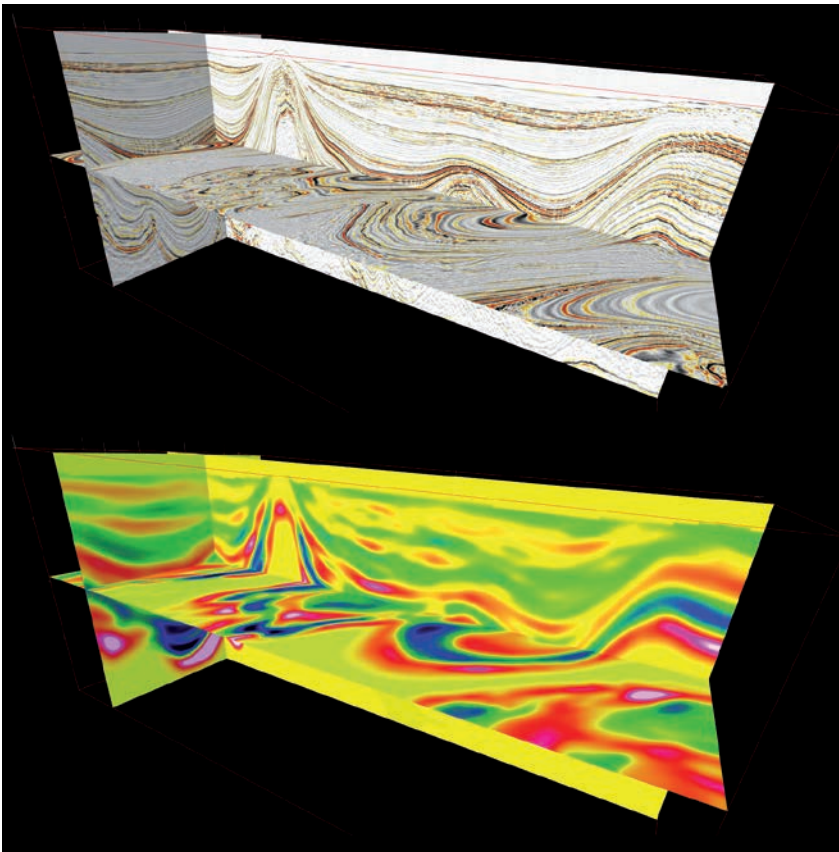


**Figura 1** Ejemplo de Angola. (Panel superior) Puntos de control seleccionados adaptativamente superpuestos a la imagen utilizada para dirigir la interpolación en la actualización; (panel central) los límites de las zonas seleccionadas para la actualización; (panel inferior) mapa de prioridad utilizado para seleccionar puntos de control.



**Figura 2** Ejemplo de Angola. Actualización de la velocidad después de la inversión superpuesta sobre una imagen migrada para: (panel superior) la tomografía hiperbólica tradicional con una regularización laplaciana normal, (panel central) la tomografía hiperbólica con una regularización laplaciana orientada por el buzamiento y (panel inferior) una tomografía guiada por la imagen.

# Experimente la energía



**Figura 3** Ejemplo de Angola. (Panel superior) Imagen apilada utilizada para guiar las actualizaciones tomográficas de la velocidad; (panel inferior) actualización de la velocidad derivada utilizando la IGT que muestra la gran correspondencia con las estructuras infrayacentes en las tres direcciones, particularmente para capas fuertemente inclinadas.

la inexactitud del modelo actual. Este proceso continúa hasta que el desajuste residual de los datos se encuentre por debajo de un umbral determinado.

En la IGT, la primera de las dos relaciones de la ecuación (1) se modifica a

$$Apx = d, \tag{2}$$

reemplazando  $m$  por  $px$ . Aquí,  $p$  representa la matriz de preconditionamiento IGI. Ésta se aplica durante cada iteración de la inversión promediando todos los valores dentro de cada zona y realizando después el allanado orientado por la estructura (Hale, 2009b) utilizando los tensores de la estructura calculados anteriormente. Esto refuerza el parecido de la actualización a la imagen base allanando los elementos preferentemente en la dirección indicada por los tensores.

Para garantizar que nuestro método sea lo más coherente posible, hemos adaptado un proceso de selección basado en la prioridad para elegir automáticamente el lugar del punto de control óptimo, en lugar de estar basado en espaciado constante o variable según el allanado. Este método fue descrito por Cullison (2011) como una técnica eficaz para seleccionar puntos imagen común de alta prioridad para comprobar el control de calidad, pero es útil en diversas aplicaciones que requieran elegir importantes puntos dentro

de una imagen. En general, las estructuras coherentes necesitan menos puntos de control que estén espaciados a más distancia, ya que sus propiedades serán más uniformes a lo largo de su longitud, mientras que en zonas no coherentes los puntos de control deberían tener un espaciado más estrecho. Nuestro método adaptativo clasifica las ubicaciones en base a su importancia construyendo un mapa de prioridad de la imagen multiplicando su envolvente de la amplitud, su semejanza orientada por la estructura y su planitud local, lo cual está representado por el nivel de anisotropía de los tensores de la estructura. A continuación, se seleccionan puntos de control por orden de prioridad, mientras se construyen zonas de exclusión alrededor de cada uno para evitar que los puntos estén demasiado cerca en regiones coherentes.

### Ejemplo de inversión guiada por la imagen

Para demostrar mejor las capacidades del proceso IGT, el método se aplicó sobre un área de un conjunto de datos de Angola que mostraban estratificación ordenada, zonas de señal incoherente y sedimentos con un fuerte buzamiento, con los resultados que se muestran en las Figuras 1, 2 y 3.

Nuestro proceso adaptativo de selección de puntos de control se demuestra en la Figura 1. Cada “x” del panel superior representa un punto de control elegido seleccionando las ubicaciones de valor elevado en el mapa de prioridad que



## Experimente la energía

se muestra en el panel inferior. Las zonas de alta prioridad normalmente se encuentran alrededor de fuertes reflectores continuos en los que la imagen tiene un elevado grado de coherencia. Los puntos de control tienden a estar espaciados lejos unos de otros a lo largo de las capas, pero cerca unos de otros en la dirección normal a la estratificación. Esto crea zonas, representadas en el panel central de la Figura 1, que son muy anisótropas en ubicaciones con fuerte estratificación y que se extienden a lo largo de los reflectores. Los puntos de las zonas menos coherentes tienden a tener zonas que son más pequeñas y casi isotrópicas, por lo que están más agrupados y con menos patrón.

En la Figura 2 se demuestra una comparación entre los métodos de inversión tradicionales y el método IGT presentado. El panel superior muestra una imagen apilada superpuesta por una actualización de la velocidad a partir de un proceso de inversión con la regularización laplaciana tradicional, sin métodos de orientación por el buzamiento y otros limitados por la estructura. El panel central es similar, pero con la regularización laplaciana simple guiada por el buzamiento. Esta actualización obedece más de cerca a la estructura observada en ubicaciones con mucho buzamiento, pero nuestra poca mejora de resolución o de calidad general. El panel inferior muestra la actualización de la velocidad para los mismos datos de entrada con la inversión condicionada por la restricción IGI. Esta actualización IGT tiende a estar mucho más fuertemente restringida a las capas observadas en la imagen apilada y muestra una notable mayor resolución. Las capas están más claramente separadas de sus vecinas, en particular en las regiones someras que tienen una actualización de resolución muy baja con los métodos más tradicionales, y las zonas más profundas obedecen a los fuertes buzamientos observados en la imagen apilada de forma mucho más estrecha.

La Figura 3 muestra una representación tridimensional de la imagen apilada utilizada para guiar los resultados de la inversión y la correspondiente actualización de la velocidad IGT. La actualización está vinculada muy estrechamente en cada dirección a la estructura observada en la imagen.

### Selección dependiente del offset

Los métodos de selección RMO polinómicos son eficaces cuando los eventos muestran una curvatura allanada que coincida con términos polinómicos de bajo orden y en los institutos industriales se han hecho importantes mejoras para mejorar esta técnica en el procesamiento de datos reales (He y Cai, 2011; Bartana et al., 2011; Siliqi et al., 2007; Koren et al., 2008). Sin embargo, surgen problemas cuando la curvatura real muestra una mayor complejidad y la suposición polinómica puede ser inexacta (Liu et al., 2010). Pueden surgir eventos con múltiples puntos de cambio en diversas situaciones, particularmente cerca de fallas, en zonas de elevada anisotropía y en regiones muy heterogéneas. Para esos eventos, el aplanado

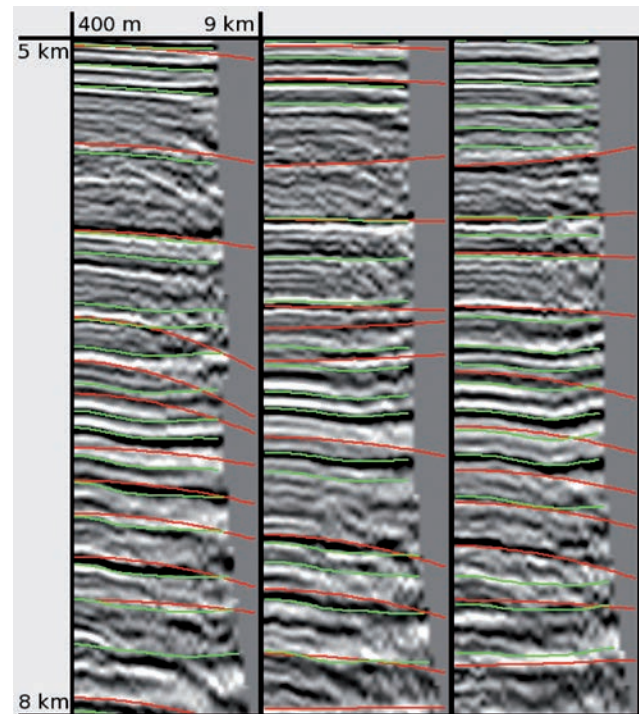


Figura 4 Ejemplo de la Formación Cotton Valley. Colecciones de trazas de la migración en profundidad preapilado con las selecciones RMO elegidas mediante la selección dependiente del offset (verde) y la selección hiperbólica (rojo).

de los offsets cercanos puede conducir a peores ajustes en los offsets lejanos, o viceversa, y determinar la mejor selección implicará sacrificar la precisión en algunos rangos de offset. Como alternativa a los métodos polinómicos, y debido a la creciente demanda de imágenes de alta resolución, las técnicas dependientes del offset, como el método de destrucción de las ondas planas descrito por Formel (2002; Liu et al., 2010), han ganado atención en la última época. Seleccionando el RMO a todos los offsets disponibles podemos garantizar que se está considerando adecuadamente el moveout complejo en las actualizaciones tomográficas, que a su vez harán que las actualizaciones converjan más rápidamente en un modelo que aplane eficazmente los eventos.

En nuestro método de selección dependiente del offset, el RMO se representa como un campo de desplazamiento continuo en lugar de una serie de eventos discretos. Se utiliza un solucionador multiescala limitado para estimar el campo de desplazamiento de cada colección de imagen común. La restricción principal aplicada es que el gradiente del campo de desplazamiento  $g$  sea menor que determinada tolerancia  $T$ , donde  $T$  es menor que 1 (Hale, 2013), o

$$|\nabla_g(h, z)| < T, \quad (3)$$

donde  $h$  y  $z$  representan el offset y la profundidad de cada punto en una colección de offset, respectivamente. Esta

restricción evita la distorsión de la forma de onda causada por el excesivo estiramiento y compresión, así como las selecciones que se cruzan una con otra. A continuación, se calculan los eventos con la máxima coherencia a partir del campo de desplazamiento derivado. La ventaja de este método es que los eventos calculados serán más coherentes que si cada evento se estimara de manera independiente. Esto es importante conforme la exploración pasa a objetivos cada vez más complejos en regiones subsal, sub basalto y otros prospectos profundos, en las que es probable que las colecciones de trazas sean muy complicadas y estén contaminadas por ruido.

Este nuevo método de selección es muy eficaz para zonas que muestren una buena relación señal/ruido. Sin embargo, para regiones con una relación señal/ruido pobre, es necesario un cuidadoso control de calidad para evitar seleccionar los eventos erróneos, como los múltiples. Una vez se han calculado las selecciones, el proceso tomográfico continúa con la típica tarea del trazado de rayos y la inversión, haciendo que esta actualización se acomode fácilmente dentro del flujo de trabajo existente.

**Ejemplo de selección dependiente del offset**

Las Figuras 4 a 8 siguen un estudio de un caso que se ha realizado en una región que muestra un complicado comportamiento de apilado y de colección de trazas, ofreciendo una demostración ideal de las capacidades de la selección dependiente del offset.

La región de interés de este caso es la capa de la Formación Cotton Valley (CVF) dentro del área de la dorsal de Lloyd del golfo de México. La CVF es una capa de lutita con lentejones de carbonato que muestra muy poca reflectividad coherente para vincularla a eventos. Las colecciones muestran un complejo moveout por debajo de la capa CVF que se corresponde con ondulaciones en las imágenes apiladas que la selección hiperbólica convencional fue incapaz de resolver. La Figura 4 compara las selecciones hiperbólicas, en rojo, con las selecciones dependientes del offset, en verde. Claramente, la actualización de la velocidad basada en las selecciones hiperbólicas resolverá, en el mejor de los casos, los problemas sobre un pequeño rango de offset y, en el peor de los casos, hará que los eventos sean significativamente menos planos. Sin embargo, después de una iteración de

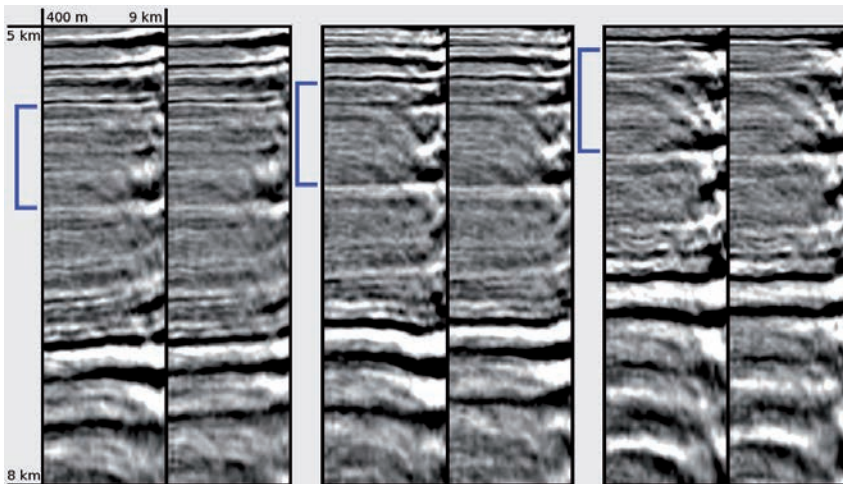


Figura 5 Ejemplo de la Formación Cotton Valley. Tres pares de colecciones antes (coleción izquierda de cada par) y después (derecha) de una iteración de tomografía dependiente del offset. La posición aproximada de la capa CVF en cada par de colecciones está indicada por el corchete azul.

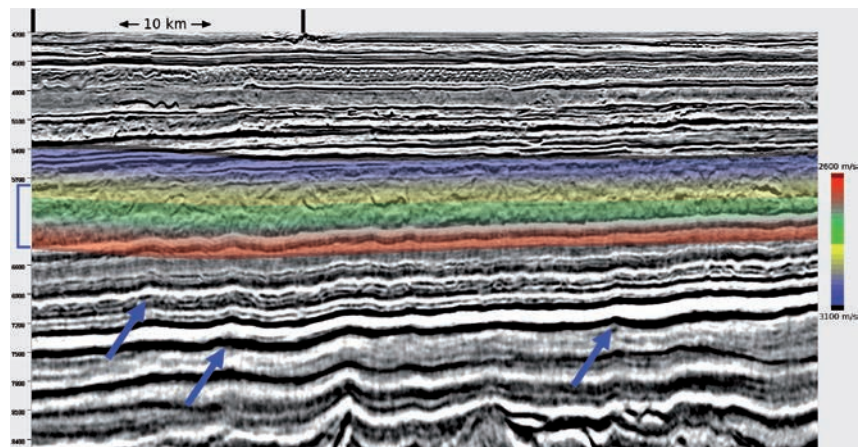
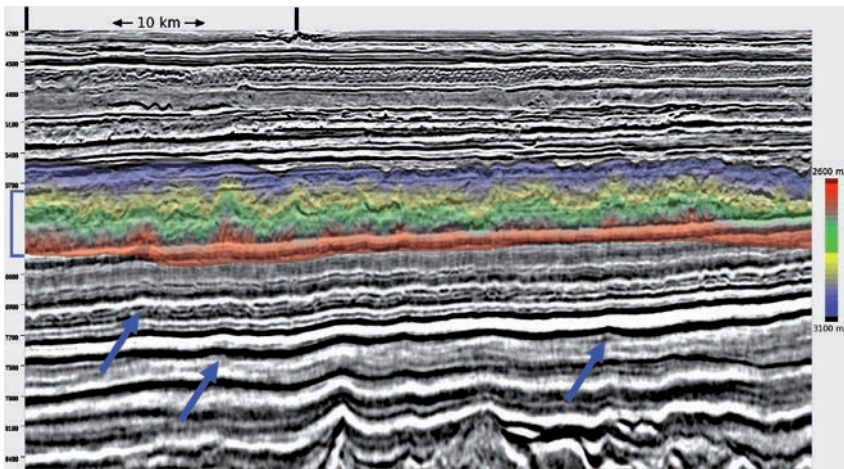


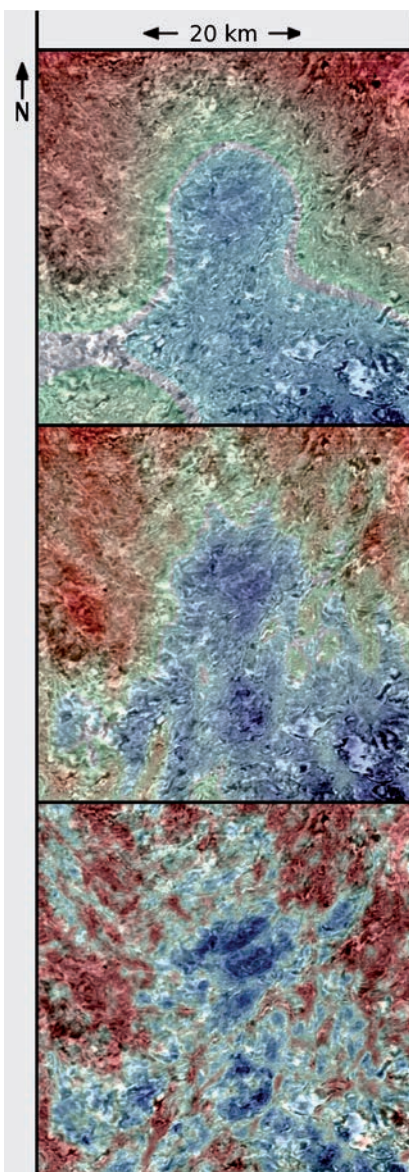
Figura 6 Ejemplo de la Formación Cotton Valley. Imagen apilada antes de la tomografía dependiente del offset superpuesta con el modelo de velocidad llano actual, destacando la capa CVF de interés que también está señalada mediante el corchete azul. Las flechas azules indican ondulaciones que en la Figura 7 están significativamente aplanadas.



## Experimente la energía



**Figura 7** Ejemplo de la Formación Cotton Valley. Imagen apilada después de una iteración de tomografía dependiente del offset superpuesta por el modelo de velocidad actualizado, que claramente cuadra con los complicados eventos observados en la capa CVF, mostrada con el corchete azul. Las flechas azules apuntan a las ondulaciones, que han mejorado mucho desde la Figura 6.



**Figura 8** Ejemplo de la Formación Cotton Valley. Modelo de velocidad superpuesto en una sección en profundidad a 6 km de la imagen apilada (panel superior) antes de la actualización, (panel central) después de una iteración tomográfica utilizando la selección hiperbólica y, alternativamente, (panel inferior) después de una iteración utilizando la selección dependiente del offset. Los tres paneles se muestran con la misma barra de color.

tomografía utilizando la selección dependiente del offset, el aplanamiento de la colección aumenta incluso para los eventos complejos, como se muestra en la Figura 5. Los cambios más dramáticos, como cabía esperar, se observan bajo la CVF, representados por el corchete azul en cada par de colecciones de trazas.

Como se puede observar en la Figura 6, la imagen apilada antes de la actualización dependiente del offset parece geológicamente plausible por encima de la CVF, lo cual se extiende desde unos 5,7 hasta unos 6,4 km, como se muestra con el corchete azul. Por debajo de esta capa incoherente, los reflectores muestran ondulaciones y ángulos no sísmicos, señalados por las flechas azules. El modelo de velocidad superpuesto, que sólo se muestra a lo largo de la CVF, es claramente demasiado llano en este momento para reflejar los cambios de velocidad fuertemente heterogéneos que deben estar presentes para solucionar este problema. A continuación, la Figura 7 muestra una imagen apilada después de una actualización dependiente del offset, también superpuesta con este nuevo modelo de velocidad. Las ondulaciones observadas en la imagen previa por debajo de la capa CVG están muy reducidas, dando lugar a una estratificación más coherente y plausible que coincide con el aumento del aplanamiento en los eventos de la colección. Asimismo, es interesante destacar que los detalles del modelo de velocidad ahora se corresponden bien con pequeños elementos de la imagen apilada, que se espera que sean lentejones de carbonato incrustados, lo cual sugiere que este método nos está permitiendo resolver pequeñas inhomogeneidades en la construcción física de la capa CVF.

Las secciones en profundidad a través de la CVF, mostradas en la Figura 8, ayudan a enfatizar que las actualizaciones generadas utilizando la selección dependiente del offset tienden a reflejar la complicada geología de la región mejor que los métodos de selección más simplistas. Antes de esta iteración de la tomografía, el modelo de velocidad está muy allanado y no sigue las tendencias de la imagen, como se

## Experimente la energía

muestra en el panel superior. En el panel central se muestra un nuevo modelo de velocidad obtenido mediante la actualización con la selección hiperbólica. Aunque con este proceso aumenta la resolución, la actualización no parece impulsar que el modelo cuadre más estrechamente con la geología de la zona. Sin embargo, el nuevo modelo obtenido con una actualización dependiente del offset, mostrada en el panel inferior, muestra elementos que reflejan con mucha más precisión las complicadas estructuras heterogéneas observadas en la imagen. Surgen fuertes reflexiones en la interfase entre la lutita y los lentejones de carbonatos, lo cual también debe separar zonas de alta y baja velocidad, y el nuevo método de selección satisface claramente esta distinción de manera más eficaz.

En general, las actualizaciones de velocidad obtenidas utilizando la selección dependiente del offset condujeron a modelos, colecciones y, lo que es más importante, imágenes que reflejan con mucha más precisión la geología de la complicada región de la CVF.

### Conclusiones

Aunque los métodos tomográficos convencionales a menudo pueden aplanar adecuadamente las colecciones de trazas, los métodos avanzados para mejorar la precisión y la probabilidad pueden tanto acelerar la convergencia de los modelos de velocidad como generar modelos más plausibles geológicamente.

El adecuado condicionamiento del esquema de inversión conduce a mejores resultados que los métodos más simplistas. Con los esquemas de inversión tradicionales, la actualización tomográfica de la velocidad es un proceso puramente matemático y, por tanto, no tiende a proporcionar actualizaciones que respeten la estructura observada en el subsuelo. La tomografía guiada por la imagen utiliza un preconditionador orientado por la estructura de conservación de bordes que impulsa que las actualizaciones obedezcan a la estructura, dando lugar a modelos de velocidad de mayor resolución y más plausibles geológicamente que respetan la estratificación y las fallas automáticamente. El ejemplo de Angola demuestra claramente que la tomografía guiada por la imagen puede producir resultados que muestran una resolución mucho mayor, una fuerte adherencia a la estratificación y a las fallas y menos artefactos que los métodos tomográficos convencionales.

La mejora desde una selección de moveout residual basada en la curvatura hasta un esquema dependiente del offset puede permitir una descripción más precisa de eventos complejos para dar lugar a actualizaciones de la velocidad más precisas sin tener que basarse en suposiciones ineficaces sobre su naturaleza. Los eventos de las colecciones de trazas que muestran múltiples puntos de cambio o no abarcan

todo el rango de offset, que anteriormente se habrían seleccionado de forma incorrecta, se ajustan bien y se aplanan adecuadamente. En el conjunto de datos del golfo de México presentado, una única iteración de tomografía con selección dependiente del offset es capaz de resolver complicadas inhomogeneidades en la desorganizada capa de la Formación Cotton Valley, mejorando el aplanado de las colecciones y la estratificación de la imagen apilada.

Nuestra suite de tomografía de alta resolución combina esos métodos en un nuevo flujo tomográfico que se combina fácilmente con las técnicas anteriores. Los nuevos resultados son una enorme mejora sobre aquéllos obtenidos con métodos convencionales, produciendo modelos de velocidad más precisos y, con frecuencia, ahorrando tiempo y esfuerzo de computación.

### Agradecimientos

Los autores desean agradecer a TGS por el permiso para utilizar los ejemplos aquí contenidos. Asimismo, agradecemos a Alex Yeh, Bin Wang, Jean Ji, Cristina Reta-Tang y Gary Rodriguez por las valiosas contribuciones, debates y apoyo a este trabajo. Debemos una especial gratitud a Zhiming Li, Connie VanSchuyver, Chris Egger y Jeff Sposato por revisar y corregir las pruebas de este artículo.

### Referencias

- Bartana, A., Kosloff, D. and Hollander, Y. [2011] Automatic picking of delays on 3D angle gathers. *SEG Annual Meeting*, Expanded Abstracts, 3903-3907.
- Cullison, A. [2011] An image-guided method for automatically picking common-image-point gather locations from seismic images. *CWP Thesis* 702.
- Fomel, S. [2002] Applications of plane-wave destruction filters. *Geophysics*, 67(6), 1946-1960.
- Hale, D. [2009a] Image-guided blended neighbour interpolation. *CWP Report* 634.
- Hale, D. [2009b] Structure-oriented smoothing and semblance. *CWP Report* 635.
- Hale, D. [2013] Dynamic warping of seismic images. *Geophysics*, 78 (2).
- He, Y. and Cai, J. [2011] Anisotropic tomography for TTI and VTI media. *SEG Annual Meeting*, Expanded Abstracts, 3923-3927.
- Koren, Z., Ravve, I., Gonzalez, G. and Kosloff, D. [2008]. Anisotropic local tomography. *Geophysics*, 73(5), VE75-VE92.
- Liu, J. and Han, W. [2010] Automatic event picking and tomography on 3D RTM angle gathers. *SEG Annual Meeting*, Expanded Abstracts, 4263-4268.
- Siliqi, R., Herrmann, P., Prescott, A. and Capar, L. [2007] High-order RMO picking using uncorrelated parameters. *SEG Annual Meeting*, Expanded Abstracts, 2772-2776.
- Woodward, M., Nichols, D., Zdraveva, O., Whitfield, P. and Johns, T. [2008] A decade of tomography. *Geophysics*, 73, 5-11.