

Matriz de coocurrencia de niveles de gris y su aplicación a los datos sísmicos

Christoph Georg Eichkitz^{1*}, John Davies², Johannes Amtmann¹, Marcellus Gregor Schreilechner¹ y Paul de Groot³ demuestran cómo se puede adaptar la matriz de coocurrencia de niveles de gris para trabajar sobre imágenes 3D de datos sísmicos.

El análisis de la textura es la extracción de rasgos texturales de las imágenes (Tuceryan y Jain, 1998). El significado de textura varía dependiendo del área científica en la que se utilice. En general, la textura se refiere al carácter físico de un objeto o a la apariencia de una imagen. En el análisis de imágenes, la textura se define como una función de la variación espacial de las intensidades de los píxeles (Tuceryan y Jain, 1998). La textura sísmica se refiere a la magnitud y la variabilidad de las amplitudes vecinas en las ubicaciones de las muestras y está físicamente relacionada con la distribución de objetos dispersos (textura geológica) dentro de un pequeño volumen en la correspondiente ubicación en el subsuelo (Gao, 2008). Se han desarrollado cuatro métodos principales para analizar la textura sísmica (Figura 1). Estos son la clasificación, la segmentación, la síntesis y la forma de la textura.

El objetivo de la clasificación de la textura es categorizar los elementos de una imagen reconociendo clases texturales conocidas. Este método es fácil de calcular y es el método más

utilizado para el análisis de la textura. La segmentación de la textura divide una imagen en diferentes regiones que tienen propiedades homogéneas. La segmentación se puede utilizar en base a regiones o en base a límites entre regiones. En la síntesis de la textura, se utilizan pequeñas imágenes de muestra como base para la construcción o reconstrucción de imágenes más grandes. Esta metodología se aplica ampliamente en la reconstrucción de imágenes digitales y en la postproducción de películas. La forma de la textura es el método menos utilizado del análisis de la textura. Utiliza información de la textura para construir geometrías de superficies 3D.

Según Tuceryan y Jain (1998), la clasificación de la textura se puede dividir en cuatro categorías de cálculo: métodos de cálculo estadístico, geométrico, basado en modelos y de procesamiento de la señal. Hay disponibles numerosas aplicaciones que utilizan cada uno de esos métodos.

El análisis estadístico de la textura, como la matriz de coocurrencia de niveles de gris (GLCM, por sus siglas en inglés), las diferencias de los niveles de gris o la extracción de

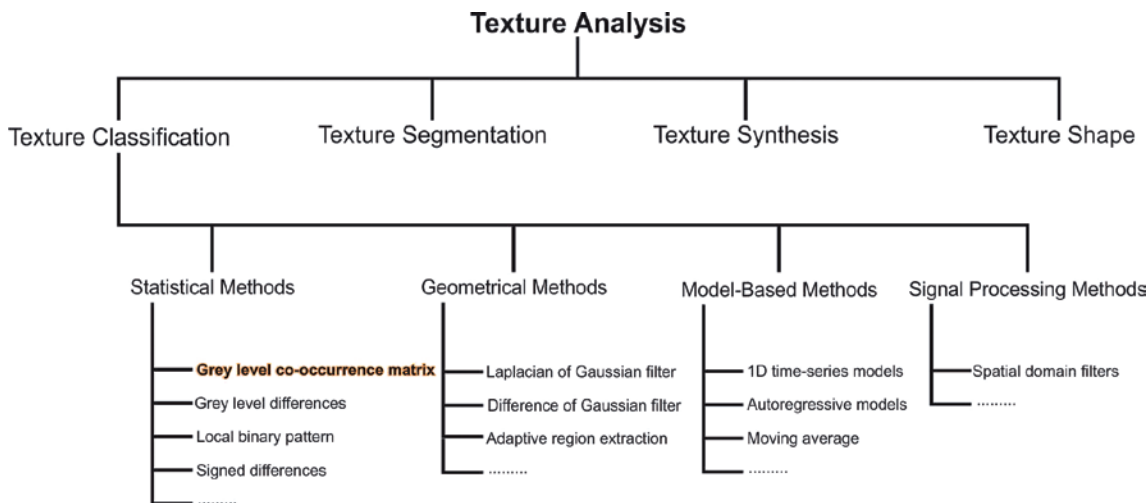


Figura 1 El análisis de la textura incluye la clasificación de la textura, la segmentación de la textura, la síntesis de la textura y la forma de la textura. La clasificación de la textura se puede dividir en cuatro categorías de cálculo: métodos estadísticos, métodos geométricos, métodos basados en modelos y métodos de procesamiento de la señal.

¹ Instituto de investigación sobre agua, energía y sostenibilidad Joanneum, Grupo de geofísica y geotermia, Leoben, Austria.

² Heinemann Oil GmbH, Leoben, Austria.

³ dGB Earth Sciences BV, Nijverheidstraat 11-2, 7511 JM Enschede, Países Bajos.

* Correo electrónico del autor de contacto: christoph.eichkitz@joanneum.at

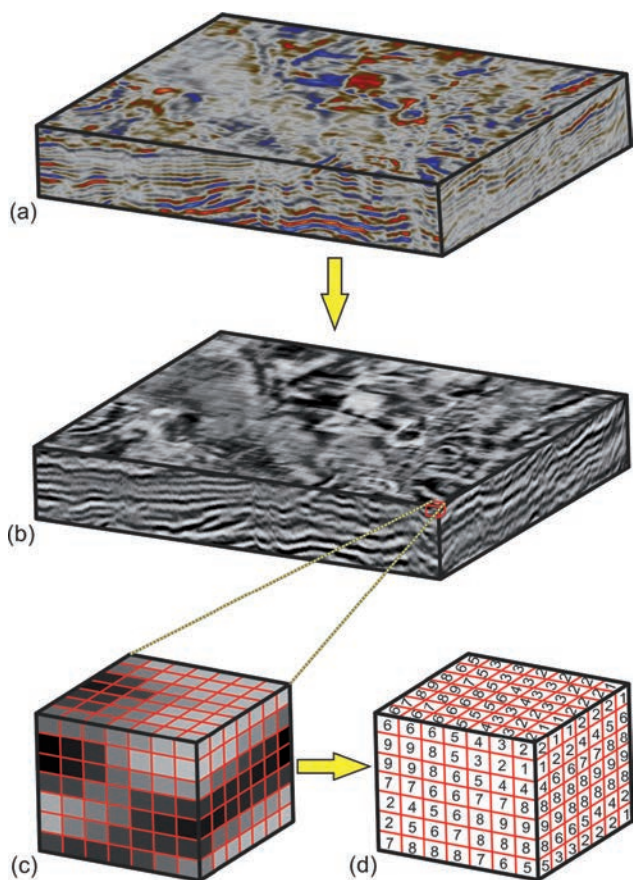


Figura 2 Conversión del cubo de amplitud sísmica (a) a un cubo de niveles de gris (b). Los niveles de gris (c) están representados por números discretos (d).

patrones binarios locales, trata de definir la configuración de diferentes regiones de una imagen a través de la estadística. Los métodos estadísticos no tratan de entender la naturaleza jerárquica de una textura, sino que representan indirectamente la textura por propiedades no deterministas que gobiernan

las distribuciones y relaciones entre muestras de una imagen (Materka y Strzelecki, 1998). Los métodos geométricos de análisis de la textura definen la textura como compuesta de elementos o formas primitivas texturales bien definidas (microtextura) y la configuración espacial (macrotextura) de esas formas primitivas (Materka y Strzelecki, 1998).

El análisis geométrico de la textura puede ser útil para la descripción simbólica de las imágenes, pero es más útil para la síntesis que para el análisis. El análisis de la textura basado en modelos trata de describir la textura reconstruyendo modelos de imágenes. Los parámetros de los modelos son especialmente importantes, ya que deben capturar las cualidades esenciales de las imágenes. Los métodos de procesamiento de la señal aplican una transformación a los datos. Esta transformación a menudo se basa en una transformada de Fourier (Rosenfeld y Weszka, 1976), una transformada de Gabor (Dougman, 1985; Bovik et al., 1990) o una transformada de ondículas (Mallat, 1989; Laine y Fan, 1993; Lu et al., 1997).

Nivel de coocurrencia de niveles de gris

La matriz de coocurrencia de niveles de gris (GLCM) y los atributos derivados de ella son herramientas para la clasificación de imágenes que describieron inicialmente Haralick et al. (1973). La GLCM es una medida de con qué frecuencia tienen lugar diferentes combinaciones de valor de brillo de los píxeles en una imagen. Debido a que normalmente se comparan dos muestras, denominamos a la GLCM como un método de clasificación de la textura de segundo orden. Se utiliza ampliamente para clasificar imágenes de satélite (p.ej., Franklin et al., 2001; Tsai et al., 2007), imágenes de hielo marino (p.ej., Soh y Tsatsoulis, 1999; Maillard et al., 2005), imágenes de resonancia magnética y tomografía calculada (p.ej., Kovalev et al., 2001; Zizzari et al., 2011) y en muchas otras aplicaciones. La mayoría de esas aplicaciones GLCM implican la clasificación de imágenes 2D.

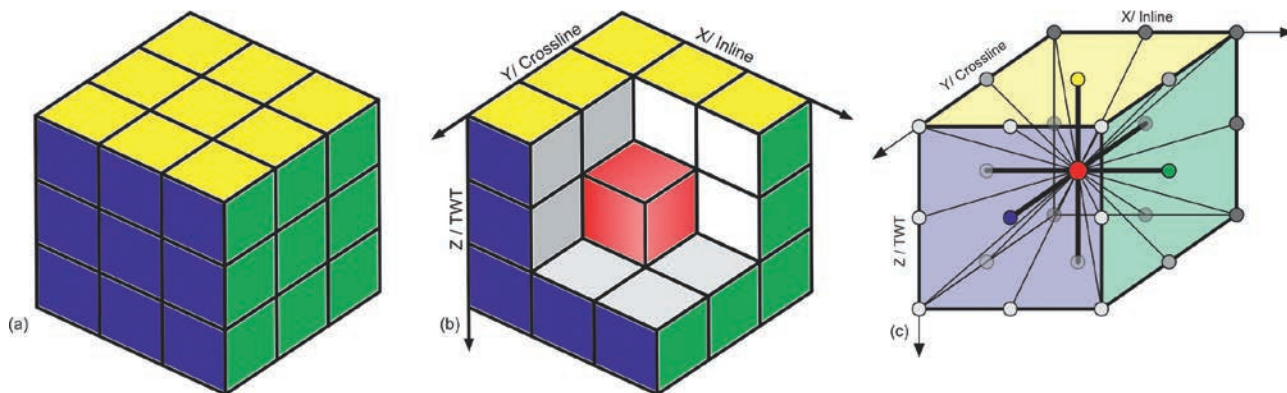
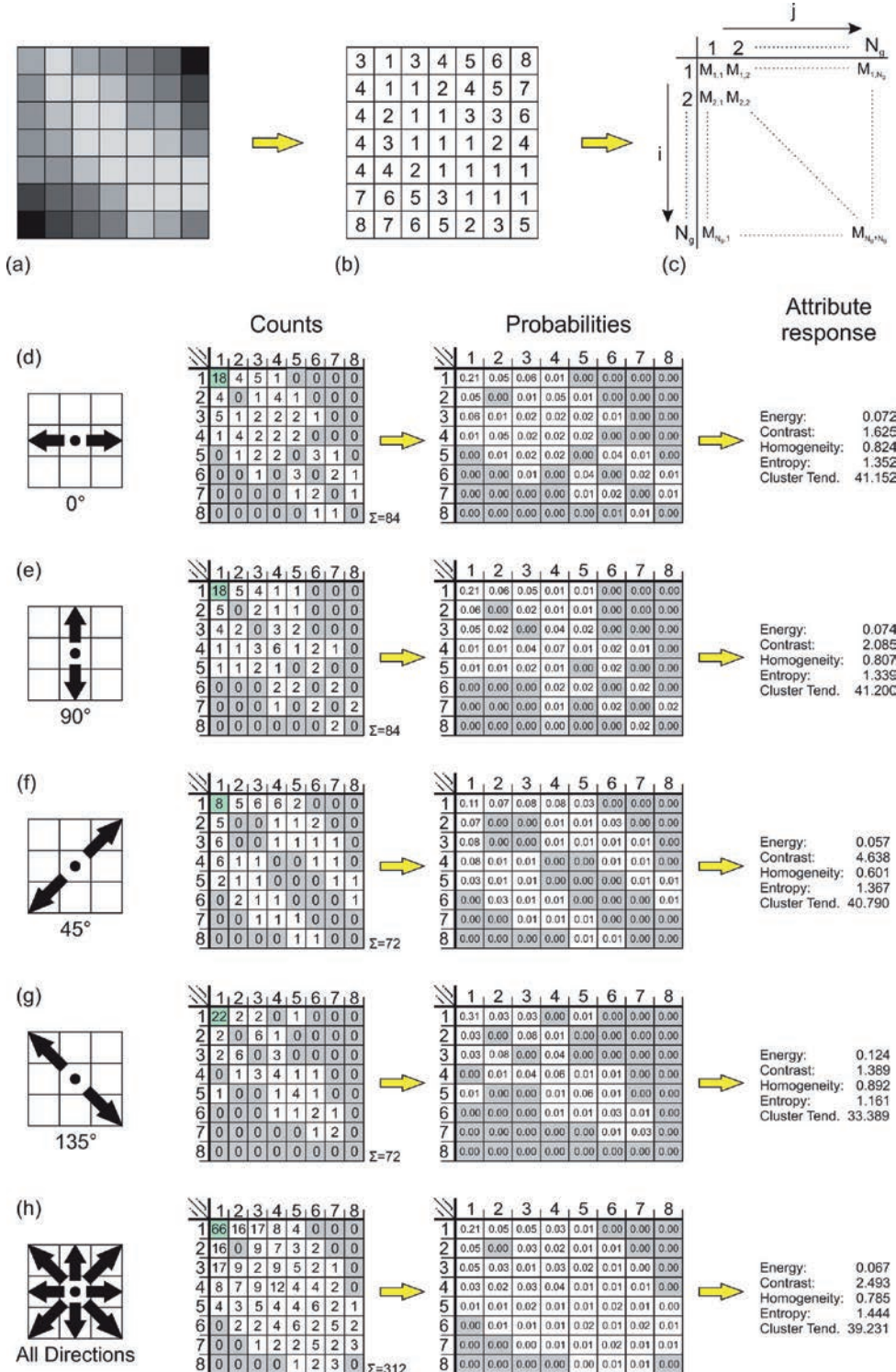


Figura 3 En un caso 3D, el número de vecinos para un punto de muestra se puede explicar mejor examinando un cubo de Rubik (a). El centro del cubo de Rubik (caja roja en (b)) tiene un total de 26 cajas vecinas. Las cajas están alineadas en 13 direcciones. De forma análoga, un punto de muestra de un volumen sísmico tiene 26 vecinos alineados en 13 direcciones (c).

Modelización/Interpretación



Modelización/Interpretación

Para aplicar la GLCM a los datos sísmicos, los métodos se deben adaptar para trabajar sobre datos 3D. Numerosos investigadores han ideado soluciones para este problema (p.ej., Vinther et al., 1996; Gao, 1999, 2003, 2007, 2008a, 2008b, 2009, 2011; West et al., 2002; Chopra y Alexeev, 2005, 2006a, 2006b; Yenugu et al., 2010; de Matos et al., 2011). Los métodos de West et al. (2002) y Gao (2003, 2007, 2011) utilizan cubos sísmicos allanados y el cálculo de la GLCM se realiza sobre planos 2D a lo largo de los tres ejes de coordenadas. En un reciente artículo sobre GLCM aplicada a datos sísmicos, de Matos et al. (2011) utilizan un método diferente. Calculan la GLCM 2D a lo largo del buzamiento y el azimut estructural del cubo sísmico y de esta manera generan un cubo GLCM pseudo 3D. En base al trabajo de Tsai et al. (2007) y Lai et al. (2008) para cálculos de GLCM 3D sobre datos de satélite hiperespectrales, se ha desarrollado un algoritmo GLCM totalmente 3D para datos sísmicos (Eichkitz y Amtmann et al., 2012b, 2012c, 2013, 2014a, 2014b; Eichkitz y de Groot et al., 2014; Eichkitz et al., 2015).

Flujo de trabajo para cálculos de GLCM totalmente 3D

El primer paso en el cálculo de la GLCM es transformar el cubo sísmico de entrada en un cubo de niveles de gris en el cual a cada punto de muestra se le asigna un número discre-

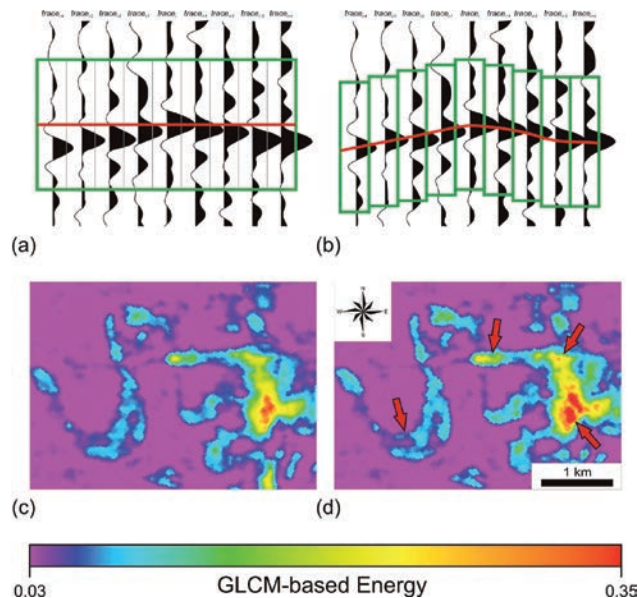


Figura 5 El buzamiento estructural se calcula mediante un método de análisis de traza compleja, de escaneo discreto o de tensor gradiente de la estructura. Aquí, un escaneo discreto produjo los mejores resultados. Las imágenes (a y c) representan el cálculo sin utilizar el buzamiento estructural. Las posiciones verticales de las amplitudes pico no están alineadas horizontalmente en (a y b). Si se desatiende el buzamiento estructural, el centro de la ventana de análisis cae en la línea roja (a) y la ventana de análisis es un cubo perfecto. (c) Energía basada en la GLCM en una dirección de 0° sin guía del buzamiento. (d) Energía basada en la GLCM en una dirección de 0° con guía del buzamiento. En el cálculo guiado por el buzamiento la relación señal/ruido es mayor y determinados elementos se pueden captar mejor (flechas rojas).

to. Se genera un histograma de valores de amplitud del cubo sísmico y se seleccionan los umbrales positivo y negativo. El rango de amplitud resultante se divide en segmentos iguales; el número de segmentos es igual al número deseado de niveles de gris (Figura 2). Para los datos sísmicos, este valor normalmente está entre 4 bits (16 niveles de gris) y 8 bits (256 niveles de gris).

El cálculo de la GLCM se realiza utilizando una ventana de ejecución. Se extrae un subconjunto para cada muestra de los datos y dentro de este subconjunto todas las combinaciones de muestras se miden y escriben dentro de una matriz 2D. El conjunto extraído está definido por una ventana de análisis (para datos 2D) o por un cubo de análisis (para datos 3D). En ambos casos, el punto de la muestra de interés está en el centro del subconjunto y la ventana o cubo de análisis consiste en los números impares de puntos de muestra en todas las direcciones. La medición de las coocurrencias se puede hacer en varias direcciones. Para datos 2D son posibles cuatro direcciones en el espacio y para datos 3D son posibles 13 direcciones en el espacio con un offset de 1 (Figura 3). Es

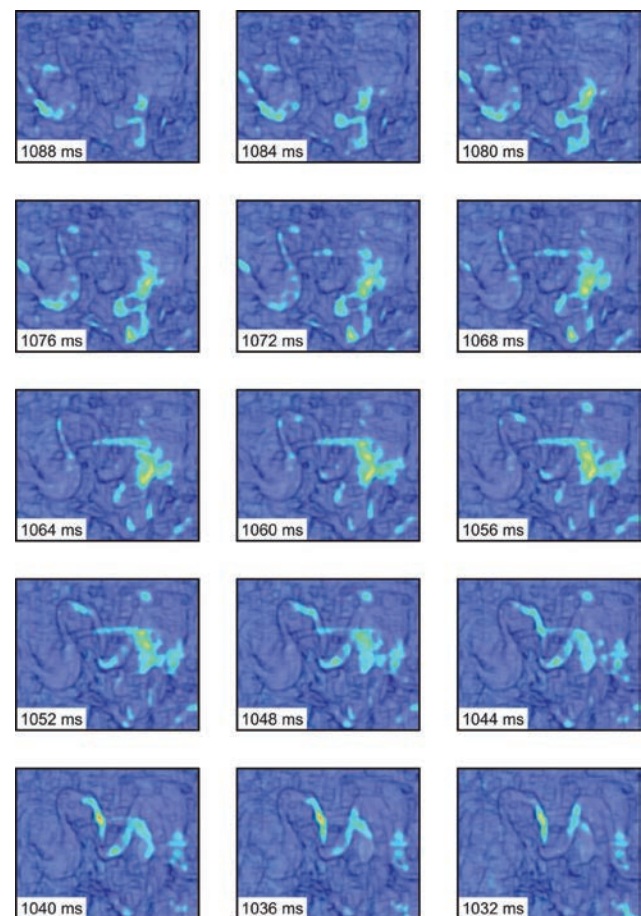


Figura 6 Sección temporal de la energía basada en la GLCM con el atributo de coherencia superpuesto. La energía basada en la GLCM muestra áreas dentro del sistema de canales, mientras que el atributo de coherencia muestra los límites de los canales.

Modelización/Interpretación

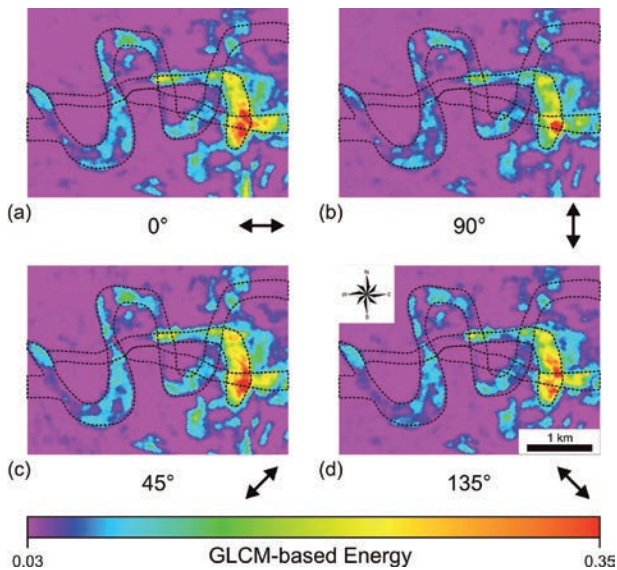


Figura 7 Atributo de energía basado en la GLCM calculado en cuatro direcciones espaciales diferentes. (a) Dirección a 0° (este-oeste), (b) dirección a 90° (norte-sur), (c) dirección a 45° (noroeste-sureste), (d) dirección a 135° (noreste-suroeste).

posible medir coocurrencias en una única dirección y obtener información textural en esa dirección específica. El proceso se puede aplicar repetidamente para determinar medidas texturales para todas las demás direcciones. De forma alternativa, las coocurrencias se pueden calcular simultáneamente en múltiples direcciones, produciendo una medición generalizada de la textura para toda la estructura. Los análisis que utilizan este método dan resultados más suaves, pero se puede perder información sutil. El número de coocurrencias entre todos los pares de muestras se introduce en una matriz 2D simétrica del mismo tamaño que el número de niveles de gris de la imagen. Para seguir calculando los atributos basados en la GLCM, es necesaria la normalización de la matriz. Todas las entradas de la matriz se dividen por el número total de coocurrencias, produciendo una matriz de proporciones que se puede considerar como una especie de matriz de probabilidad. Haralick et al. (1973) propusieron 14 atributos basados en esta matriz de probabilidad. Soh y Tsatsoulis (1999) y Wang et al. (2010) desarrollaron diez atributos adicionales basados en la GLCM. Los atributos basados en la GLCM calculados se asignan al punto central de la ventana de análisis. Este procedimiento se repite para todos los puntos de muestra dentro del cubo de datos sísmicos (Figura 4). La Figura 2 muestra una imagen sintética bidimensional para ilustrar los pasos de los cálculos de atributos basados en la GLCM.

Para los cálculos de otros atributos, la integración de la guía del buzamiento es muy importante. Integrando el buzamiento volumétrico, el volumen de entrada se alabea a lo largo de la estratigrafía sísmica (Figura 5a y 5b), por lo que la ventana de análisis ya no es un cubo rectangular. La integración de la guía del buzamiento produce imágenes

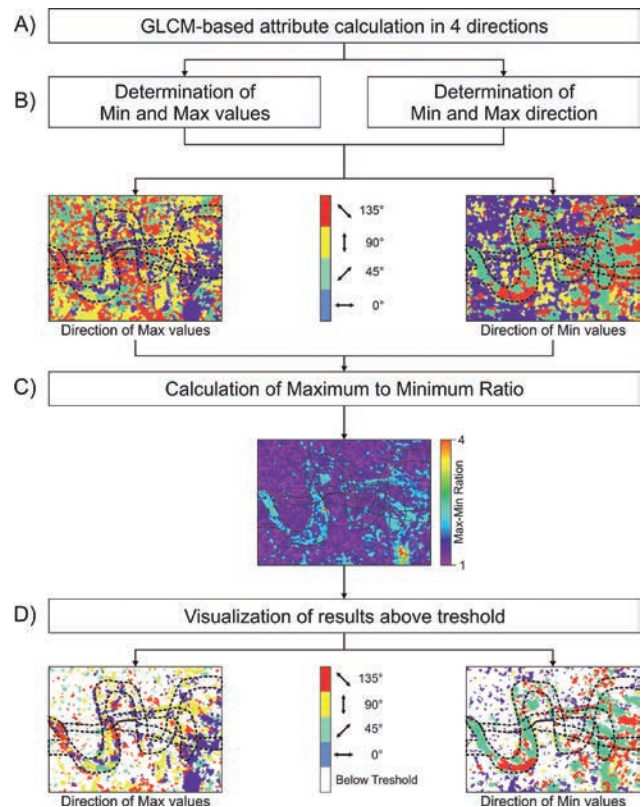


Figura 8 Flujo de trabajo para detectar la variabilidad de la amplitud sísmica utilizando atributos basados en la GLCM: (A) Cálculo de cada atributo basado en la GLCM en cuatro direcciones espaciales (sólo se muestran cuatro direcciones horizontales). (B) Determinación de los valores mínimo y máximo y su dirección para cada atributo basado en la GLCM. (C) Cálculo de la relación entre el máximo y el mínimo, utilizada para determinar un valor umbral. (D) Aplicación del valor umbral para identificar áreas con mayor variabilidad direccional y visualizar únicamente las direcciones del mínimo y el máximo.

mucho más nítidas que son más fáciles de interpretar, ya que las señales de los diferentes reflectores sísmicos no se mezclan. La integración de la guía del buzamiento también afecta al rango de valores de los atributos resultantes. Los atributos de la GLCM guiados por el buzamiento tienden a tener un mayor rango que los atributos que no están guiados por el buzamiento (Figura 5c y 5d).

Campos de aplicación

La principal aplicación de la GLCM es para la descripción de facies sísmicas. West et al. (2002) utilizaron atributos basados en la GLCM en combinación con redes neurales para describir detalles de facies de canal. Esta información se utilizó después para estimar relaciones de neto a bruto dentro de las estructuras de canal interpretadas. Gao (2007) y Angelo et al. (2011) también utilizaron la GLCM para describir estructuras de canal y la distribución de facies dentro de esos canales. Nosotros aplicamos el método GLCM a una prospección sísmica de la cuenca de Viena para describir un sistema de canales del Mioceno Medio a Superior (edad sarmatiense o pannoniense)

Modelización/Interpretación

que tiene una anchura promedio de 130-300 m (426-948 pies) y un espesor promedio de 70 ms. Los límites de los canales se pueden interpretar fácilmente utilizando atributos de coherencia, pero estos no aportan información acerca del interior del canal. Utilizando atributos de la GLCM, el canal aparece como un cuerpo de colores más o menos uniformes que contrastan fuertemente con las facies circundantes (Figura 6).

Detección de la variabilidad direccional

La anisotropía describe las dependencias direccionales de cualquier propiedad. La anisotropía sísmica es la dependencia de la velocidad a la dirección o sobre el ángulo (p.ej., Crampin 1981, 1985; Lynn y Thomsen, 1990; Willis et al., 1986, Martin y Davis, 1987; Thomsen, 1986; Alkhalifah y Tsvankin, 1995). La anisotropía sísmica puede estar causada por variaciones espaciales en los sedimentos, la presencia de fracturas y zonas de falla y por diferencias en el relleno de los poros. La descripción de zonas fracturadas es especialmente importante para la exploración de hidrocarburos. En la Figura 5 se muestra el atributo de energía basado en la GLCM calculado en cuatro direcciones horizontales. En las cuatro imágenes hay pequeñas variaciones de los valores de amplitud, pero todas las imágenes parecen más o menos la misma y es casi imposible percibir ninguna anisotropía. Hemos desarrollado un flujo de trabajo automático (Figura 6) para distinguir las áreas con un elevado grado de anisotropía de las áreas con baja anisotropía (Eichkitz et al., 2015). En este flujo de trabajo se comparan las respuestas de los atributos de atributos direccionales basados en la GLCM. Se calcula un conjunto de atributos en base a esas comparaciones, dando información acerca del comportamiento direccional. Raramente se obtiene exactamente la misma respuesta del atributo para todas las direcciones. En algunas zonas, los valores mínimo y máximo pueden ser muy similares y dar lugar a una sobreestimación de la anisotropía. Para solventar este problema, es necesario condicionar el resultado desde el paso (B) para distinguir entre las áreas que tienen una elevada variabilidad direccional y las áreas con una baja variabilidad direccional. En el paso (C) del flujo de trabajo se calcula un cubo de relación entre los valores máximo y mínimo para cada atributo basado en la GLCM y se determina manualmente un valor umbral. El valor umbral se utiliza a continuación en el paso (D) para establecer todas las áreas que tengan una relación por debajo del umbral hasta una ausencia de variabilidad direccional. En otras palabras, a las áreas con valores de la relación por debajo del umbral se les asigna un valor de anisotropía indefinido, mientras que a las demás áreas se les asigna los valores correspondientes de mínimo, máximo, dirección del mínimo y dirección del máximo.

Un único atributo basado en la GLCM no es suficiente para realizar interpretaciones detalladas de la anisotropía sísmica. Es necesario calcular varios atributos basados en la GLCM y combinarlos para formar una interpretación completa. A con-

tinuación, es posible determinar áreas que tengan una mayor variabilidad direccional, causada posiblemente por fracturación o relacionada con cambios litológicos o de relleno de los poros. La información direccional de este análisis puede ayudar a determinar la dirección y el buzamiento de las fracturas.

Conclusión

Aunque los atributos de textura no se han utilizado ampliamente en la interpretación sísmica, la GLCM puede ofrecer importante información sobre el subsuelo a través del análisis de atributos. Diferentes autores han mostrado que la GLCM es una herramienta útil para describir facies sísmicas. Debido a que los atributos basados en la GLCM se pueden calcular en diferentes direcciones, se pueden utilizar para determinar variaciones direccionales en los datos sísmicos. Esto abre la puerta a diferenciar entre facies sedimentarias y patrones de fracturación, incluida la delineación de zonas fracturadas y su dirección y buzamiento.

Agradecimientos

Deseamos dar las gracias a OMV por proporcionar los conjuntos de datos, financiar este proyecto de investigación y conceder el permiso para publicar este artículo.

Referencias

- Alkhalifah, T. and Tsvankin, I. [1995] Velocity analysis for transversely isotropic media. *Geophysics*, 60 (5), 1550-1566.
- Angelo, S.M., de Matos, M. and Marfurt, K.J. [2009] Integrated seismic texture segmentation and clustering analysis to improved delineation of reservoir geometry. *79th SEG meeting*, Expanded Abstracts.
- Bovik, A.C., Clark, M. and Geisler, W.S. [1990] Multichannel texture analysis using localized spatial filters. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12 (1), 55-73.
- Chopra, S., and Alexeev, V. [2005] Application of texture attribute analysis to 3D seismic data. *75th SEG meeting*, Expanded Abstracts, 767-770.
- Chopra, S. and Alexeev, V. [2006a] Application of texture attribute analysis to 3D seismic data. *The Leading Edge*, 25 (8), 934-940.
- Chopra S. and Alexeev, V. [2006b] Texture attribute application to 3D seismic data. *6th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics*, Expanded Abstracts, 874-879.
- Crampin, S. [1981] A review of wave motion in anisotropic and raked elastic-media. *Wave Motion*, 3 (4), 343-391.
- Crampin, S. [1985] Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting. *Geophysics*, 50 (1), 142-152.
- Daugman, J.G. [1985] Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters. *Journal of the Optical Society of America*, 2 (7), 1160-1169.
- De Matos, M.C., Yenugu, M., Angelo, S.M. and Marfurt, K.J. [2011] Integrated seismic texture segmentation and cluster analysis applied to channel delineation and chart reservoir characterization. *Geophysics*, 76 (5), P11-P21.

Modelización/Interpretación

- Eichkitz, C.G., Amtmann, J. and Schreilechner, M.G. [2012a] Enhanced coherence attribute imaging by structural oriented filtering. *First Break*, 30 (3), 75-81.
- Eichkitz, C.G., Amtmann, J. and Schreilechner, M.G. [2012b] Facies Characterization by Seismic Texture Analysis Using Grey Level Co-occurrence Matrix Based Attributes. *74th EAGE Conference & Exhibition*, Extended Abstracts.
- Eichkitz, C.G., Amtmann, J. and Schreilechner, M.G. [2013] Calculation of grey level co-occurrence matrix-based seismic attributes in three dimensions. *Computers and Geosciences*, 60, 176-183.
- Eichkitz, C.G., Amtmann, J. and Schreilechner, M.G. [2014a] Application of GLCM-based seismic attributes for anisotropy detection. *76th EAGE Conference & Exhibition*, Extended Abstracts.
- Eichkitz, C.G., de Groot, P. and Brouwer, F. [2014] Visualizing anisotropy in seismic facies using stratigraphically constrained, multi-directional texture attribute analysis. *AAPG Hedberg Research Conference "Interpretation Visualization in the Petroleum Industry"*, Houston, USA.
- Eichkitz, C.G., Schreilechner, M.G., de Groot, P. and Amtmann, J. [2015] Mapping directional variations in seismic character using GLCM-based attributes. *Interpretation*, 3 (1), T13-T23.
- Franklin, S.E., Maudie, A.J. and Lavigne, M.B. [2001] Using spatial co-occurrence texture to increase forest structure and species composition classification accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67 (7), 849-855.
- Gao, D. [2011] Latest developments in seismic texture analysis for subsurface structure, facies, and reservoir characterization: A review. *Geophysics*, 76 (2), W1-W13.
- Gao, D. [2009] 3D seismic volume visualization and interpretation: An integrated workflow with case studies. *Geophysics*, 74 (1), W1-W24.
- Gao, D. [2008a] Adaptive seismic texture model regression for subsurface characterization. *Oil & Gas Review*, 6 (11), 83-86.
- Gao, D. [2008b] Application of seismic texture model regression to seismic facies characterization and interpretation. *The Leading Edge*, 27 (3), 394-397.
- Gao, D. [2007] Application of three-dimensional seismic texture analysis with special reference to deep-marine facies discrimination and interpretation: Offshore Angola, West Africa. *AAPG Bulletin*, 91 (12), 1665-1683.
- Gao, D. [2003] Volume texture extraction for 3D seismic visualization and interpretation. *Geophysics*, 68 (4), 1294-1302.
- Gao, D. [1999] 3D VCM seismic textures: A new technology to quantify seismic interpretation. *69th SEG meeting*, Expanded Abstracts, 1037-1039.
- Haralick, R.M., Shanmugam, K. and Dinstein, I. [1973] Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 3 (6), 610-621.
- Kovalev, V.A., Kruggel, F., Gertz, H.-J. and von Cramon, D.Y. [2001] Three-dimensional texture analysis of MRI brain datasets. *IEEE Transactions on medical imaging*, 20 (5), 424-433.
- Lai, J.-S. and Tsai, F. [2008] Three dimensional texture computation of gray level co-occurrence tensor in hyperspectral image cubes. *Proc. 29th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS2008)*, Colombo, Sri Lanka.
- Laine, A. and Fan, J. [1993] Texture classification by wavelet packet signatures. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15 (11), 1186-1191.
- Lu, C.S., Chung, P.C. and Chen, C.F. [1997] Unsupervised texture segmentation via wavelet transform. *Pattern Recognition*, 30 (5), 729-742.
- Lynn, H.B. and Thomsen, L.A. [1990] Reflection shear-wave data collected near the principal axes of azimuthal anisotropy. *Geophysics*, 55 (2), 147-156.
- Maillard, P., Clausi, D.A. and Deng, H. [2005] Operational map-guided classification of SAR sea ice imagery. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 43 (12), 2940-2951.
- Mallat, S.G. [1989] A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11 (7), 674-693.
- Martin, M.A. and Davis, T.L. [1987] Shear-wave birefringence: A new tool for evaluating fractured reservoirs. *The Leading Edge*, 6 (10), 22-28.
- Materka, A. and Strzelecki, M. [1998] *Texture analysis methods – a review*. Technical University of Lodz, Institute of Electronics, 33.
- Rosenfeld, A. and Weszka, J.S. [1976] Picture recognition and scene analysis. *Computer*, 9 (5), 28-38.
- Soh, L.-K. and C. Tsatsoulis [1999] Texture analysis of SAR sea ice imagery using gray level co-occurrence matrices. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (2), 780-795.
- Thomsen, L. [1986] Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 51 (10), 1654-1966.
- Tsai, F., Chang, C.-T., Rau, J.-Y., Lin, T.-H. and Liu, G.-R. [2007], 3D computation of gray level co-occurrence in hyperspectral image cubes. *LNCS 4679*, 429-440.
- Tuceryan, M. and Jain, A.K. [1998] *Texture analysis. The handbook of pattern recognition and computer vision*.
- Vinther, R., Mosegaard, K., Kierkegaard, K., Abatzi, I., Andersen, C., Vejbaek, O.V., If, F. and Nielsen, P.H. [1996] Seismic texture classification: A computer-aided approach to stratigraphic analysis. *65th SEG meeting*, Houston, Texas, USA, 153-155.
- Wang, H., Guo, X.-H., Jia, Z.-W., Li, H.-K., Liang, Z.-G., Li, K.-C. and He, Q. [2010] Multilevel binomial logistic prediction model for malignant pulmonary nodules based on texture features of CT image. *European Journal of Radiology*, 74, 124-129.
- West, B.P., May, S.R., Eastwood, J.E. and Rossen, C. [2002] Interactive seismic facies classification using textural attributes and neural networks. *The Leading Edge*, 21 (10), 1042-1049.
- Willis, H., Rethford, G. and Bielanski, E. [1986] Azimuthal anisotropy: Occurrence and effect on shear wave data quality. *56th SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts.
- Yenugu, M., Marfurt, K.J. and Matson, S. [2010] Seismic texture analysis for reservoir prediction and characterization. *The Leading Edge*, 29 (9), 1116-11.
- Zizzari, A., Seiffert, U., Michaelis, B., Gademann, G. and Swiderski, S. [2001] Detection of tumor in digital images of the brain. *Proc. of the IASTED international conference Signal Processing, Pattern Recognition & Applications*, Rhodes, Greece, 132-137.