

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 629 629**

51 Int. Cl.:

G01V 1/30 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **09.12.2009 PCT/FR2009/052465**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.06.2010 WO10067020**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.12.2009 E 09801752 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.04.2017 EP 2356493**

54 Título: **Procedimiento de modelización geológica de datos sísmicos por correlación de trazas**

30 Prioridad:

10.12.2008 FR 0858439

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

11.08.2017

73 Titular/es:

**ELIIS (100.0%)
187 Rue Hélène Boucher, Parc Mermoz
34170 Castelnau-le-Lez, FR**

72 Inventor/es:

**PAUGET, FABIEN;
LACAZE, SÉBASTIEN y
VALDING, THOMAS**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 629 629 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de modelización geológica de datos sísmicos por correlación de trazas

Campo técnico

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para elaborar automáticamente un modelo geológico a partir de datos sísmicos. Encuentra aplicaciones particularmente relevantes en el campo del análisis de datos sísmicos, principalmente en la búsqueda de nuevos yacimientos petrolíferos.

Estado de la técnica anterior

10 En general, los datos sísmicos representan un subsuelo y permiten de este hecho comprender la estructura geológica de la zona cubierta. Una señal sísmica representa típicamente la derivada de la impedancia acústica de las capas atravesadas por impulsos sonoros emitidos durante la adquisición de dichos datos sísmicos. Por lo tanto, los datos sísmicos son una representación indirecta y degradada de la geología subyacente. Indirecta porque el valor del píxel no es representativo de la propia naturaleza del subsuelo en ese punto, y degradada debido a que el dato final es el resultado de una cadena de tratamientos (desconvolución, "*stacking process*") que introducen artefactos y aproximaciones. En consecuencia, la reconstrucción de la geología a partir de datos sísmicos
15 generalmente pasa por medio de análisis complejos que buscan identificar las capas geológicas una a una y de forma independiente unas de otras. Los métodos de análisis existentes utilizan como postulado que una misma capa geológica presenta firmas sísmicas similares. Por tanto, las superficies se extraen por el sesgo de propagadores que comienzan a partir de un germen o por clasificadores (*Kmean*) que reagrupan las firmas sísmicas del mismo calibre. La principal limitación de estas técnicas se deriva del propio postulado básico que nunca es realmente respetado.
20 Además, los algoritmos empleados presentan numerosos inconvenientes: influencia demasiado grande del germen, derivas de propagaciones, superficies inválidas que conectan diferentes etapas geológicas...

Muy recientemente han aparecido enfoques globales que tratan de calcular en el curso de un mismo proceso la totalidad del modelo geológico directamente a partir de los datos sísmicos. Entre estos métodos se distinguen dos grandes familias: las que utilizan la inclinación local de las capas y las que utilizan las primitivas.

25 En la familia de los métodos que utilizan la inclinación local de las capas, se conoce especialmente la patente de EE.UU. Nº 6.771.800 de Keskes et al., (2002) que se basa en la propagación de las líneas 2D siguiendo la dirección de la inclinación. Esta técnica sólo funciona en 2D y no genera rupturas de continuidades de la geología.

30 Se conoce igualmente el documento de Lomask et al., "*Flattening without picking*", *Geophysics*. Vol. 11 Nº 4, 2006, pp.13-20 que propone un método de compensación de las inclinaciones por un proceso iterativo de minimización. Durante este proceso, las inclinaciones, obtenidas por cálculo de gradiente 3D en cada punto sísmico se anulan poco a poco hasta obtener un bloque sísmico plano, sin deformaciones globales, que permite poner de manifiesto los índices de sedimentación por análisis estratigráfico. Esta técnica funciona en 3D, pero la gestión de las rupturas del modelo requiere el conocimiento previo de las discontinuidades.

35 En la familia de los métodos que utilizan las primitivas como elementos básicos del modelo geológico, estos elementos son, en un primer momento, extraídos de la imagen sísmica y, a continuación dispuestos unos con respecto a los otros para construir el modelo.

40 En el método descrito por Monsen et al., en la solicitud de patente de EE.UU. 2008/0140319 en particular, las primitivas son superficies geológicas de tamaños variables obtenidas automáticamente por propagación en los extremos de la operación sísmica. Estas primitivas se clasifican luego por orden topológico basándose en un gráfico acíclico ("*Directed Acyclic Graph*" DAG) que representa las relaciones de superposición entre las primitivas. El orden topológico asignado a cada superficie permite construir el modelo geológico. Este método funciona en 3D, genera las discontinuidades de tipo erosión, pero no permite la gestión automática de las fallas.

45 Una variante de este enfoque fue propuesta por Verney et al., en el documento "*An Approach of Seismic Interpretation Based on Cognitive Vision*" *70th EAGE Conference & Exhibition* - Roma, Italia, 9 - 12 de junio de 2008. En este documento, las relaciones entre minisuperficies se jerarquizan en función de su distancia vertical media y los criterios la fusión entre primitivas se basan en principios que provienen de la ciencia cognitiva. Los documentos de patentes US5056066 y WO03/009002 también describen procedimientos de elaboración de modelos geológicos.

50 En el contexto actual de un mercado petrolífero cada vez más competitivo y costoso, la búsqueda de nuevos yacimientos requiere el uso de herramientas de análisis automáticos más precisos y rápidos. La presente invención tiene por objeto un procedimiento que trabaja a escala del punto sísmico para elaborar automáticamente un modelo geológico a partir de datos sísmicos, que puede generar automáticamente las discontinuidades geológicas, tales como las fallas y que permite la implementación de estrategias multiescalas.

Descripción de la invención

Este objeto se consigue con un proceso de elaboración de un modelo geológico a partir de datos sísmicos recogidos

previamente de acuerdo con la reivindicación 1.

5 El procedimiento según la invención permite por tanto elaborar un modelo geológico a partir de una rejilla de muestreo arbitraria de los datos sísmicos, explotando las similitudes locales de los datos. En particular, no se basa en la detección de los extremos y la propagación de las superficies a partir de estos extremos como los procedimientos de la técnica anterior, sino que permite una modelización más fina del conjunto de datos.

El procedimiento comprende una etapa de relleno del modelo geológico por propagación de una minisuperficie por similitud en la proximidad de cada punto de muestreo que comprende un enlace, teniendo por germen dicho punto.

Sin embargo, estas mini-superficies no deben confundirse con las superficies propagadas como primitivas en los procedimientos de la técnica anterior. En efecto:

- 10
- no se utilizan más que para completar el modelo geológico, y en particular no son explotadas las relaciones topológicas que existen entre ellas,
 - la forma de su contorno y su tamaño se determinan esencialmente por la rejilla de muestreo,
 - debido a su superficie muy reducida son despreciables los problemas de derivas relacionados con los algoritmos de propagación.

15 Los datos de un volumen sísmico se pueden muestrear en un plano sensiblemente horizontal según una malla sensiblemente con una cualquiera de las siguientes formas: rectangular, hexagonal, y las trazas pueden ser de orientación sensiblemente vertical y comprender puntos de muestreo sensiblemente equidistantes.

La determinación de enlaces entre los puntos de muestreo que pertenecen a trazas diferentes comprende una etapa de cálculo de imágenes de correlación,

- 20
- correspondiendo cada imagen de correlación a un par de trazas,
 - estando representada cada traza según una dimensión de la imagen de correlación, y
 - representando el valor de cada punto de la imagen la correlación local de los datos sísmicos próximos a dos puntos respectivos de cada traza.

El procedimiento de acuerdo con la invención puede comprender además las etapas de:

- 25
- construcción de segmentos en la imagen de correlación por propagación entre los puntos correspondientes a valores de correlación superiores a al menos un umbral predeterminado, cuyos segmentos corresponden a los conjuntos de enlaces o peines de correlaciones entre puntos de muestreo de las trazas;
 - selección de los segmentos de la imagen de correlación, cuya selección no deja como máximo más que un segmento por línea y por columna de la imagen de correlación, correspondiente a un solo enlace por punto

30

 - de muestreo, y siendo seleccionados los segmentos basándose en el valor de los puntos constituyentes y en su longitud;
 - validación de los enlaces por análisis de los caminos constituidos por las sucesiones de puntos unidos por dichos enlaces, siendo una condición para que los enlaces sean validados en un volumen sísmico, que los caminos estén formando bucles.

35 Las etapas de selección de segmentos en la imagen de correlación y de validación de los enlaces se repiten de manera iterativa en los segmentos restantes en la imagen de correlación, utilizando como restricción los enlaces validados en iteraciones anteriores hasta que no haya más segmentos explotables.

La atribución de una edad geológica relativa a los puntos de muestreo es un proceso iterativo realizado hasta que queden puntos de muestreo no datados que comprendan al menos un enlace, que comprende las etapas de:

- 40
- selección de un punto de muestreo no datado que comprende al menos un enlace,
 - atribución de una edad relativa a este punto, teniendo en cuenta los puntos ya datados de su traza, de tal modo que la edad a lo largo de una traza varía siempre en el mismo sentido, y
 - atribución de la misma edad relativa a todos los puntos asociados a este punto mediante enlaces.

45 El procedimiento según la invención puede comprender además una etapa de normalización de las edades relativas, fijándose el incremento de edad entre puntos de edad relativa consecutivos en un valor predefinido.

Según otro aspecto del procedimiento según la invención, se puede elaborar un modelo geológico multiescala

fusionando conjuntos de enlaces entre puntos de muestreo, obteniéndose dicho conjunto de enlaces con diferentes rejillas de muestreo.

Ventajosamente, el procedimiento según la invención se puede aplicar de manera automatizada, especialmente:

- a la extracción directa de las superficies de depósito basándose en iso-valores,
- 5 – a la horizontalización de la operación sísmica cartografiando sobre una línea o un plano la señal sísmica correspondiente a una etapa geológica,
- al análisis de fallas y
- al análisis de canales.

10 De acuerdo con otro aspecto de la invención, se propone un programa de ordenador según la reivindicación 13 para implementar el procedimiento según la invención.

Descripción de las figuras y los modos de realización

Otras ventajas y particularidades de la invención aparecerán en la lectura de la descripción detallada de las implementaciones y modos de realización en absoluto limitativos, y los dibujos adjuntos siguientes:

- 15 – La Figura 1 ilustra la construcción de la imagen de correlación correspondiente a dos trazas del conjunto de datos sísmicos. La Figura 1a ilustra el muestreo vertical de los datos en trazas sísmicas, mientras que la Figura 1b ilustra la construcción de la imagen de correlación;
- La Figura 2b ilustra el peine de correlación correspondiente a una geología denominada *isopack* con variaciones de inclinación, tal como se ilustra en la Figura 2a;
- 20 – La Figura 3b ilustra el peine de correlación correspondiente a una geología que presenta a la vez variaciones de inclinación y de espesor, tal como se ilustra en la Figura 3a;
- La Figura 4 ilustra el establecimiento de peines de correlación entre los puntos de parte y de otros de una falla que presenta un desplazamiento normal (Figura 4a) o inverso (Figura 4b);
- La Figura 5 ilustra un proceso de extracción de segmentos de recta de alta intensidad en la imagen de correlación;
- 25 – La figura 6 ilustra ejemplos de estrategias de muestreo del cubo sísmico;
- La figura 7 ilustra la validación de los peines de correlación por análisis de los caminos;
- La figura 8 ilustra el principio de inserción iterativa de los peines de correlación para llenar el espacio de los datos;
- La Figura 9 ilustra un ejemplo de aplicación del algoritmo de cálculo de las posiciones de referencia;
- 30 – La Figura 10 ilustra un ejemplo de minisuperficies obtenidas en una rejilla de muestreo cuadrada;
- La Figura 11 ilustra el relleno del modelo geológico,

El procedimiento según la invención utiliza un conjunto de datos sísmicos para deducir de ellos un modelo geológico, trabajando en la escala de los puntos sísmicos.

35 Los datos tales como los descritos en la forma de realización preferida hacen referencia a un cubo o volumen 3D de datos sísmicos. Sin embargo el procedimiento según la invención puede ser implementado igualmente en un conjunto bidimensional de datos sísmicos, tales como cortes.

El volumen de datos sísmicos puede ser caracterizado por 3 ejes, denominados respectivamente ejes **Inline** y **Xline** sensiblemente paralelos a la superficie del suelo y un eje denominado **TWT** orientado en el sentido de las profundidades crecientes.

40 El procedimiento según la invención se puede aplicar a la totalidad de datos del volumen sísmico, pero en el caso general, es suficiente que sea limitado a un subconjunto de puntos de muestreo para limitar principalmente el tiempo de cálculo. Con referencia a la Figura 1, una traza sísmica o traza 3, 4 comprende un conjunto de puntos 5 sensiblemente alineados y equidistantes, muestreados en las profundidades **t1, t2, t3, ...** en la dirección del eje **TWT**. La totalidad del volumen sísmico puede ser muestreada por un conjunto de trazas dispuestas en el plano **Inline-Xline** según una malla, por ejemplo cuadrada, hexagonal, incluso arbitraria, como se ilustra en la Figura 6.

Con referencia a la Figura 1, una primera etapa del procedimiento según la invención consiste en calcular para un conjunto de pares de trazas (3, 4) de interés, extraído de datos sísmicos 1 una imagen de correlación $I(\mathbf{X1}, \mathbf{X2})$, siendo $\mathbf{X1}$ y $\mathbf{X2}$ las posiciones respectivas de las trazas sísmicas 3, 4. Esta imagen de correlación 2 representa el conjunto de coeficientes de correlaciones calculados entre los $\mathbf{N1}$ puntos que proceden de $\mathbf{X1}$ y los $\mathbf{N2}$ puntos que proceden de $\mathbf{X2}$. En esta imagen de dimensiones ($\mathbf{N1} \times \mathbf{N2}$) píxeles, si $\mathbf{X1}$ está en ordenadas y $\mathbf{X2}$ en abscisas, el valor del punto $\mathbf{P}(i, j)$ situado en la columna i y en la línea j es el coeficiente de correlación $\mathbf{Cf}(i, j)$ calculado entre el i ésimo punto de la traza $\mathbf{X2}$ y el j ésimo punto de la traza $\mathbf{X1}$.

Los coeficientes de correlación $\mathbf{Cf}(i, j)$ se pueden calcular por ejemplo a partir de la correlación de una minitrazza \mathbf{Vi} de tamaño \mathbf{S} , centrada alrededor de un punto $\mathbf{X2}(i)$ y de un minitrazza sísmica \mathbf{Vj} de tamaño \mathbf{S} centrada alrededor de un punto $\mathbf{X1}(j)$. El modo de cálculo de los coeficientes $\mathbf{Cf}(i, j)$ puede comprender igualmente y de manera no limitativa cualquier tipo de cálculo de distancia o de diferencias entre los dos vectores \mathbf{Vi} y \mathbf{Vj} .

En la figura 1 por ejemplo, el valor del punto 8 de la imagen de correlación 2 es el resultado del cálculo de la correlación entre la minitrazza 6 alrededor del punto 5, de posición $\mathbf{t3}$ en la traza $\mathbf{X2}$ con la minitrazza alrededor del punto de posición $\mathbf{t1}$ de la traza $\mathbf{X1}$. Por una convención no limitativa, el modo de cálculo del valor de los puntos de la imagen de correlación 2, se define de tal manera que este valor aumenta con la similitud de los vectores \mathbf{Vi} y \mathbf{Vj} .

Cada punto de la imagen de correlación $I(\mathbf{X1}, \mathbf{X2})$ tal como 8 corresponde por tanto a un enlace, por ejemplo 7, entre un punto de la traza $\mathbf{X1}$ y un punto de la traza $\mathbf{X2}$. Un punto que presente un alto valor en $I(\mathbf{X1}, \mathbf{X2})$ representa un enlace de alta probabilidad entre $\mathbf{X1}$ y $\mathbf{X2}$. Por tanto, la imagen de correlación revela todos los enlaces de alta probabilidad entre dos trazas sísmicas. Con referencia a la Figura 2, cuando los puntos de alta probabilidad están contiguos en la imagen de correlación 2, aumenta su relevancia puesto que no están más aislados en el contexto geológico, sino que forman un conjunto consistente 10 que une dos etapas geológicas. Estos conjuntos contiguos corresponden a peines de correlación 11 en el espacio de datos 1, estando definidos dichos peines por los conjuntos \mathbf{E} de los puntos $\mathbf{P}(i, j)$ de la imagen $I(\mathbf{X1}, \mathbf{X2})$, tales que ningún punto $\mathbf{P}(i, j)$ de \mathbf{E} presenta la misma abscisa ni la misma ordenada que uno de los otros puntos de \mathbf{E} . Esta propiedad se traduce en el hecho de que en un peine dado, un punto sísmico no está conectado más que a un solo enlace.

En el caso de una geología completamente laminar con inclinación nula, las trazas $\mathbf{X1}$ y $\mathbf{X2}$ son similares y el segmento de correlación más alta se sitúa sobre la diagonal de la imagen 2, con un coeficiente director sensiblemente igual a 1. El peine resultante comprende entonces enlaces horizontales.

En el caso de una geología denominada *isopack* con variaciones de inclinación, tales como se ilustra en la Figura 2, las dos trazas $\mathbf{X1}$ y $\mathbf{X2}$ presentan firmas similares, pero están desfasadas. El segmento de correlación más alta 10, es entonces paralelo a la diagonal, con un coeficiente director sensiblemente igual a 1, y la distancia 12 entre la diagonal y el segmento representa el valor de desplazamiento, es decir, el desfase siguiendo el eje **TWT**, entre $\mathbf{X1}$ y $\mathbf{X2}$.

Incluso, en el caso más general donde la geología presenta a la vez variaciones de inclinación y de espesor, tal como se ilustra en la Figura 3, el segmento de correlación más alta 10 posee un coeficiente dirección diferente de 1 porque el desplazamiento varía a lo largo del peine 11.

Ventajosamente, el procedimiento según la invención no es sensible a la presencia de fallas, a diferencia de los métodos de propagación utilizados en la técnica anterior para obtener superficies sísmicas y primitivas. Utilizando el método de peines de correlación, las relaciones o enlaces 7 entre los puntos puede ser establecida a ambos lados de la falla 20, independientemente del valor y el sentido (normal o inverso) del desplazamiento, como se muestra en la Figura 4.

Los peines 11 pueden ser detectados automáticamente extrayendo los segmentos de recta 10 de alta intensidad de la imagen de correlación $I(\mathbf{X1}, \mathbf{X2})$. Esta detección puede ser realizada ventajosamente, por ejemplo, basándose en un algoritmo que comprende las etapas siguientes, ilustradas en las Figuras 5a a 5f, respectivamente:

- clasificación de los puntos de imagen $I(\mathbf{X1}, \mathbf{X2})$ en tres familias: **INVALID**, **VALID** e **INCERTAIN** en función de su valor de correlación (Figura 5a);
- uso de todos los puntos clasificados **VALID** como germen para propagar segmentos. Los puntos candidatos para las propagaciones son únicamente los puntos clasificados **VALID** e **INCERTAIN** (Figura 5b);
- búsqueda de todos los puntos de $I(\mathbf{X1}, \mathbf{X2})$ que presentan el valor máximo en una línea o en una columna. Estos puntos están marcados **MAXP** (Figura 5c);
- eliminación de los segmentos que no contienen ningún punto marcado **MAXP** (Figura 5d);
- eliminación de los segmentos cuya longitud es inferior a la longitud media de los segmentos obtenidos en la etapa anterior (Figura 5e); y

- presentación de cada segmento partiendo del más largo al más corto.

Cada segmento presentado elimina todos los segmentos que tienen un punto en la misma línea o en la misma columna de la imagen de correlación (Figura 5f). Se obtiene así el segmento más largo 10 correspondiente al peine más largo 11, garantizando que los puntos sísmicos del peine 11 no están asociados más que a solo enlace.

- 5 Para detectar los peines 11 en el conjunto de datos del bloque sísmico, es preciso elegir posiciones de pares de trazas **X1** y **X2** a partir de las cuales se calcula una imagen de correlación. Estas trazas pueden estar situadas en cualquier lugar en el bloque sísmico. Si las capacidades de las máquinas lo permiten, se pueden utilizar todas las trazas del cubo sísmico y por lo tanto todos los puntos. Sin embargo, por regla general, es necesario un muestreo del cubo sísmico.
- 10 Ventajosamente, se puede optar por una estrategia de muestreo regular en la cual se toma una traza de **N** trazas posibles y se calculan todas las imágenes $I(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j)$ de tal modo que las posiciones **Xi** y **Xj** estén distantes de **N**, siguiendo por ejemplo, una malla sensiblemente cuadrada o hexagonal (Figuras 6a y 6b). También se puede emplear una estrategia aleatoria en la que todos los pares (**Xi**, **Xj**) se extraen aleatoriamente (Figura 6c). Igualmente se pueden combinar ventajosamente varias estrategias, siendo la única finalidad obtener un número suficiente de
- 15 peines 11 para que esté caracterizado lo esencial del bloque sísmico.

Esta flexibilidad de uso confiere al procedimiento según la invención una ventaja considerable, porque permite implementar fácilmente estrategias multiescalas, o multi-resoluciones, combinando por ejemplo peines distantes de **N** muestras con peines distantes de $2 \cdot \mathbf{N}$ muestras. El uso de peines en varias escalas o niveles de resolución permite tratar mejor por ejemplo, los factores geológicos a gran escala, tales como zonas de fallas o de erosión.

- 20 Ventajosamente, el procedimiento según la invención puede comprender una etapa de validación de los enlaces, basándose en un análisis de los caminos constituidos por la sucesión de puntos sísmicos unidos entre sí por estos enlaces. En efecto, en la medida en la que un enlace une por definición puntos que están situados en una misma superficie geológica, recorriendo un camino de enlace en enlace se debe permanecer normalmente en la misma superficie. Si un camino no forma de nuevo un bucle sobre sí mismo es rechazado porque no hay ninguna certeza
- 25 en cuanto a su relevancia. Si un camino comprende dos puntos diferentes que pertenecen a una misma traza 31, tal como se muestra en la Figura 7b, tampoco es validado porque atraviesa diferentes etapas geológicas en su recorrido. Si, por el contrario, el camino vuelve exactamente al punto de partida 30 sin recuperación (Figura 7a) es validado porque es alta la probabilidad de que esté en la misma superficie. Cuando se valida un camino, también se validan todos los enlaces que lo componen. Del mismo modo, en un peine se valida cuando cierto número de
- 30 enlaces, se valida la totalidad del peine porque se considera que los peines son conjuntos indisociables y relevantes.

Aunque este criterio de validación de los enlaces sea exigente, permite llenar el espacio sísmico por peines que tienen una consistencia geológica. Con esta técnica un enlace válido puede recorrer superficies geológicas que presentan grandes variaciones en inclinación y atravesadas por fallas.

- 35 Se puede utilizar ventajosamente en el procedimiento según la invención un proceso iterativo para llenar al máximo el volumen sísmico estudiado, de modo que se construya un modelo final lo más completo posible con el máximo de enlaces. Cada iteración de este proceso comprende una detección y después una validación de un conjunto de peines, como se ha descrito anteriormente. Cada nueva iteración se ve limitada por las iteraciones anteriores. El espacio sísmico va llenándose poco a poco, y disminuye el número de posibilidades de inserción de nuevos peines.

- 40 Sea un par (**X1**, **X2**) de dos trazas. Si en el curso de la primera iteración, se validó un peine entre **X1** y **X2**, este último servirá de limitación para la siguiente iteración, porque limita el campo de soluciones disponibles para un segundo peine. Este principio se ilustra en la Figura 8. En esta figura están presentes en la imagen de correlación los segmentos correspondientes a tres peines pertinentes. El segmento 40 correspondiente al peine 43, el más evidente, es validado en la primera iteración. Para la segunda iteración, toda la parte sombreada de la imagen ya no está disponible conforme al principio según el cual no puede haber más que un enlace por par de puntos. En
- 45 consecuencia, el segmento 42, cuya parte demasiado grande de los enlaces se encuentra en la zona grisácea, es eliminada de la lista de candidatos. Sólo el segmento 41 correspondiente al peine 44 permanece disponible.

- Los primeros peines válidos están posicionados en la operación sísmica de buena calidad, que presenta las mejores correlaciones. Estos peines servirán entonces como una restricción para la segunda oleada de peines, durante la segunda iteración, que va a utilizar el espacio disponible con una sísmica inferior. Por lo tanto, la restricción geológica proporcionada por los enlaces existentes va a enriquecerse poco a poco para compensar la pérdida gradual de calidad de la operación sísmica que permanece sin tratamiento. Ventajosamente, el espacio se recubre poco a poco incluso en las zonas en las zonas que presentan una baja relación señal/ruido. Una condición de
- 50 parada del proceso iterativo puede ser por ejemplo la ausencia de nuevos peines detectados.

- 55 El procedimiento según la invención permite por lo tanto rellenar el espacio de los datos de peines de correlaciones que unen los puntos de los pares de trazas (**Xi**, **Xj**). Sea **Ep**, el conjunto de puntos sísmicos que están situados en todos los pares (**Xi**, **Yj**). Ventajosamente, es posible asignar a cada punto **P** de **Ep** una posición de referencia calculada con los enlaces validados y que traduce la posición de **P** en el contexto geológico. Esta posición de

referencia permite establecer una jerarquía de los puntos **P**, desde los más jóvenes a los más antiguos. Este cálculo puede realizarse, por ejemplo, sobre la base del siguiente algoritmo:

$\text{ValRef}(\mathbf{P})$ = Valor de referencia para un punto **P**

Step es el incremento de los valores de posición, por ejemplo **Step** = 1

5 **(Initialisation)**

Para todos los puntos **P** **hacer**

P = UNMARKED

Insertar **P** en **GlobalStack**

$\text{ValRef}(\mathbf{P})$ = 0

10 **Finalizar**

(Cálculo de las posiciones)

Depilar **GlobalStack** en **nextP**

Siempre que nextP exista **Hacer**

P = **nextP**

15 **nextP** = UNKNOWN

insertar **P** en **LocalStack1** y en **LocalStack2**

minValRef = UNDEFINED y **maxValRef** = UNDEFINED

Siempre que LocalStack1 no esté vacío **Hacer**

Pop **LocalStack1** en **K**

20 **Si nextP** = UNKNOWN entonces

Buscar en **PAbove** el primer punto UNMARKED situado encima de **K**

Buscar en **PBelow** el primer punto UNMARKED situado debajo de **K**

Si **PAbove** existe entonces **nextP** = **PAbove**

Si **PBelow** existe entonces **nextP** = **PBelow**

25 **Fin Si**

Buscar en **PAboveMark** el primer punto MARKED situado encima de **K**

Buscar en **PBelowMark** el primer punto MARKED situado debajo de **K**

Si existe **PAboveMark** y si $\text{ValRef}(\mathbf{PAbove}) > \text{minValRef}$ entonces **minValRef** = $\text{ValRef}(\mathbf{PAbove})$

Si existe **PBelowMark** y si $\text{ValRef}(\mathbf{PBelow}) < \text{maxValRef}$ entonces **maxValRef** = $\text{ValRef}(\mathbf{PBelow})$

30 **Para** todos los puntos **V** que están UNMARKED unidos a **K** por un enlace **Hacer**

V = MARKED

Insertar **V** en **LocalStack1** y en **LocalStack2**

Final Para

Final siempre que

35 **Si minValRef** = UNDEFINED y **maxValRef** = UNDEFINED entonces

minValRef = 0 y **maxValRef** = 0

Si minValRef = UNDEFINED y **maxValRef** diferente de UNDEFINED

entonces $\text{minValRef} = \text{maxValRef} - 2 * \text{step}$

Si $\text{maxValRef} = \text{UNDEFINED}$ y minValRef diferente de UNDEFINED

entonces $\text{maxValRef} = \text{minValRef} + 2 * \text{step}$

Siempre que LocalStack2 no esté vacío **Hacer**

5 Depilar LocalStack2 en K

$\text{ValRef}(K) = (\text{maxValRef} + \text{minValRef}) / 2$

Fin siempre que

Si $\text{nextP} = \text{UNKNOWN}$ hacer

Siempre que $\text{nextP} = \text{UNKNOWN}$ hacer

10 Depilar GlobalStack en P

Si $P = \text{UNMARKED}$ entonces $\text{nextP} = P$

Fin siempre que

Fin Si

Fin siempre que

15 Este algoritmo es rápido, puesto que cada punto P es visitado sólo una vez. La Figura 9 ilustra el proceso de cálculo de las posiciones de referencia en un caso donde el espesor varía de derecha a izquierda. En este ejemplo, el paso de incremento es igual a 10. La figura muestra, respectivamente, (a) el conjunto de enlaces en el caso de una variación de espesor, (b) la inicialización de las posiciones sobre la primera traza con un incremento de 10, (c, d, e y f), el cálculo de las posiciones relativas sobre cada uno de los enlaces en blanco, con respecto a los enlaces inferior y superior.

20 Las posiciones de referencias constituyen una escala de tiempo arbitraria en la que los puntos de la operación sísmica están posicionados unos respecto a otros. Ventajosamente, es posible recorrer esta escala de tiempo desde el más reciente al más antiguo, normalizar la edad relativa de los puntos de modo que sea constante la variación de las posiciones entre dos puntos consecutivos de la escala de tiempo.

25 En esta etapa, sólo una parte de los puntos de la operación sísmica posee una posición de referencia: es el conjunto E_p de los puntos que comprenden un enlace válido. El número de puntos depende del número de peines de correlación detectados que a su vez depende del muestreo efectuado para posicionar los pares de trazas (X_1 , X_2). Para llenar todo el espacio sísmico con las posiciones de referencia, se pueden construir ventajosamente pequeñas superficies cuya forma y topología dependen de la señal sísmica y del tipo de muestreo que se ha elegido. Cada punto referenciado en E_p puede servir de germen G para calcular un minisuperficie sobre la base de un algoritmo clásico de propagación por similitud de minitrazas sísmicas. La extensión espacial de esta minisuperficie se limita ventajosamente a la "celda de Voronoi" asociada al germen G . La definición de una celda de Voronoi es la siguiente: Sea E un conjunto de puntos y S un subconjunto de E (S es un muestreo de E). Si P es un punto de S , la celda de Voronoi asociada al punto P es el conjunto de puntos presentes en E que están más cerca de P que todos los demás puntos del subconjunto S .

En el caso del procedimiento según la invención, el conjunto E puede representar todos los puntos de la superficie del bloque sísmico y S las posiciones de las trazas X_i , utilizadas para calcular las imágenes de correlación.

40 Ventajosamente, todos los puntos de una minisuperficie propagada a partir de un germen G se asignan a la posición de referencia asociada a G . Esta técnica permite llenar todo el espacio respetando las variaciones de la inclinación local. Hay que tener en cuenta que, a diferencia de los procedimientos de la técnica anterior, el método no se limita a los extremos de la operación sísmica, sino que se crea una minisuperficie para cada punto que comprende un enlace válido. Del mismo modo, por comparación con los procedimientos de la técnica anterior que utilizan superficies propagadas como primitivas, las minisuperficies calculadas en el procedimiento según la invención presentan características muy particulares:

- 45 – la forma de su contorno y su tamaño están determinados esencialmente por la rejilla de muestreo,
- debido a su superficie muy reducida, los problemas de derivas relacionadas con la propagación son despreciables,
- sólo se utilizan para completar el modelo, y en particular las relaciones topológicas existentes entre ellas no son explotadas.

La Figura 10 muestra un ejemplo de minisuperficies obtenidas en una rejilla de muestreo cuadrada.

El relleno del modelo geológico se ilustra en la Figura 11, (a): imagen sísmica, (b): conjunto de enlaces validados, (c): minisuperficies propagadas a partir de puntos conectados a los enlaces validados, (d): posiciones de referencia obtenidas para cada punto de la imagen (a).

5 Según las características ventajosas del procedimiento según la invención,

– los modelos obtenidos son muy precisos porque las primitivas de referencia son los puntos sísmicos. En los procedimientos de la técnica anterior que utilizan superficies como primitivas, la modelización real no es posible más que en los extremos, obteniéndose el resto de la información por interpolación vertical entre los extremos. En el procedimiento según la invención no se requiere interpolación, lo que permite menos aproximación y por lo tanto mayor precisión;

10 – en los enfoques de la técnica anterior basados en las primitivas una superficie es indivisible, es un conjunto de puntos indisociables que tienen siempre el mismo valor en el modelo geológico. Esta rigidez impide cualquier posibilidad de control del modelo dentro de una misma superficie. La calidad del modelo depende por tanto de la calidad de extracción de las primitivas. En el procedimiento según la invención, el modelo puede ser ajustado en cualquier punto del espacio sísmico añadiendo simplemente un enlace. El modelo conserva toda su flexibilidad y el control se puede hacer sin limitación;

15 – puede ser interesante combinar varias escalas de análisis en la interpretación de los datos sísmicos. Por ejemplo, se puede mezclar un análisis local que se centra en las pequeñas variaciones de la señal sísmica con un análisis más global que considera los grandes eventos, tales como los grandes desplazamientos de fallas o las variaciones de espesor. Con los métodos de modelización de la técnica anterior, el uso de varias escalas en el seno de un solo cálculo es muy difícil de implementar, contrariamente al procedimiento de la invención en el que basta variar las distancias entre las trazas sobre las que se calculan las imágenes de correlación;

20 – los peines de correlación utilizados en el procedimiento según la invención pueden encontrar enlaces entre las capas geológicas situadas a cada lado de las fallas cualquiera que sea la amplitud y el sentido del desplazamiento. El procedimiento de la invención permite por tanto gestionar mejor las discontinuidades geológicas que los otros métodos de la técnica anterior dependientes de un análisis local, tal como la propagación o el cálculo local de la inclinación.

El procedimiento según la invención se puede aplicar ventajosamente a análisis automáticos de parámetros geológicos, tales como:

30 – la extracción directa de las superficies de depósitos sobre la base del iso-valor. El procedimiento según la invención permite un ahorro de tiempo importante, porque permite prescindir del proceso de extracción manual por punteado que es extremadamente largo y trabajoso. Las superficies obtenidas son una fuente de información muy rica, porque constituyen el elemento fundamental y primero para numerosos sistemas y métodos de análisis geológicos;

35 – la horizontalización de la operación sísmica que consiste en cartografiar sobre una línea o sobre un plano horizontal la señal sísmica correspondiente a una etapa geológica. Por lo tanto, tratando varias etapas sucesivas se llega a reconstruir una operación sísmica denominada rectificada en la que son aplanados todos los relieves de los depósitos geológicos. El procedimiento según la invención se implementa ventajosamente para este género de aplicaciones, particularmente muy utilizadas en la búsqueda de hidrocarburos, porque el relieve de cada superficie se conoce entonces además con una muy buena precisión y una gran fiabilidad;

40 – el análisis de las fallas que son deslizamientos de las capas geológicas a lo largo de una superficie de fractura. Esta fractura engendra una ruptura en la continuidad de los depósitos geológicos, que en las operaciones sísmicas, se traduce en una perturbación de la señal. Así, en la imagen de modelización geológica resultante la presencia de una falla se traducirá en variaciones bruscas de los valores topológicos que se debilitan a lo largo de las superficies. Estos dos criterios hacen posible la extracción de fallas en forma de superficies vectorizadas y por tanto la cartografía de la amplitud del desplazamiento a lo largo de las fallas;

45 – el análisis de los canales que son antiguos lechos de ríos terrestres o submarinos colmados de sedimentos. En la exploración petrolífera, estos canales constituyen los objetivos privilegiados porque presentan todas las características de trampas de hidrocarburos. Los fenómenos de creación y relleno de lechos de vertido son rápidos a escala geológica y se traducen, en la imagen de modelización geológica obtenida por aplicación del procedimiento según la invención, en variaciones bruscas del espesor de las etapas geológicas en forma de lentes. Estas características morfológicas son bastante discriminatorias para considerar una cartografía tridimensional automática de los canales.

50 Por supuesto, la invención no está limitada a los ejemplos que acaban de describirse y se pueden aportar numerosas modificaciones a estos ejemplos sin apartarse del alcance de la invención.

55

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de elaboración de un modelo geológico, realizado en ordenador, a partir de datos sísmicos recogidos previamente, caracterizado porque comprende las etapas de:

- 5 - muestreo de dichos datos sísmicos (1) según al menos un conjunto de trazas sísmicas (3, 4) constituidas cada una por puntos de muestreo (5) tomados según profundidades crecientes,
- análisis de las similitudes entre los datos sísmicos (6) alrededor de dichos puntos de muestreo (5) que pertenecen a trazas sísmicas diferentes (3, 4),
- 10 - determinación de los enlaces (7) entre los puntos de muestreo (5) que pertenecen a trazas diferentes a partir de dicho análisis de las similitudes, uniendo dichos enlaces los puntos que se sitúan sobre una misma superficie geológica, comprendiendo dicha determinación una etapa de cálculo de imágenes de correlación (2):
- correspondiendo cada imagen de correlación a un par de trazas (3, 4),
- estando representada cada traza según una dimensión de la imagen de correlación (2), y
- 15 - representando el valor de cada punto de la imagen (2) la correlación local de los datos sísmicos (6) en la proximidad de dos puntos (5) respectivos de cada traza (3, 4),

caracterizado porque comprende una etapa de:

- constitución de dicho modelo geológico atribuyendo a cada punto de muestreo (5) una edad geológica relativa que se calcula al menos a partir de:
- 20 (i) la edad geológica relativa de otros puntos de muestreo unidos a dicho punto de muestreo (5) por los enlaces (7), y
- (ii) la edad geológica relativa de otros puntos de muestreo próximos a la traza (4) que incluye dicho punto de muestreo (5),
- la atribución de una edad geológica relativa a los puntos de muestreo (5) es un proceso iterativo ejecutado siempre que permanezcan puntos de muestreo no datados (5) que comprendan al menos un enlace (7),
- 25 que comprende las etapas de:
- selección de un punto de muestreo no datado (5) que comprende al menos un enlace (7),
- atribución de una edad relativa a este punto (5) teniendo en cuenta puntos ya datados de su traza (4), de tal modo que la edad a lo largo de una traza varíe siempre en el mismo sentido, y
- 30 - atribución de la misma edad relativa a todos los puntos unidos a este punto por los enlaces (7) y que comprende además una etapa de relleno del modelo geológico por propagación de una minisuperficie por similitud en la proximidad de cada punto de muestreo (5) que comprende un enlace (7), teniendo por germen dicho punto (5).

2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque:

- 35 - los datos de un volumen sísmico (1) son muestreados en un plano sensiblemente horizontal, a saber según un plano que comprende los ejes (**Inline** y **Xline**) paralelos a la superficie del suelo; según una malla de una cualquiera de las formas siguientes: cuadrada, hexagonal, incluso arbitraria; y
- 40 - las trazas (3, 4) son de orientación sensiblemente vertical, a saber según la dirección de un eje (TWT) orientado en el sentido de las profundidades crecientes, y que comprende puntos de muestreo (5) sensiblemente alineados y equidistantes, a saber que son muestreados a las profundidades (t1, t2, t3, ...) en la dirección de dicho eje (TWT).

3. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque comprende una etapa de construcción de segmentos (10) en la imagen de correlación (2) por propagación entre los puntos (8) correspondiente a los valores de correlación superiores a al menos un umbral predeterminado, correspondiendo dichos segmentos (10) a conjuntos de enlaces o peines de correlaciones (11) entre puntos de muestreo (5) de las trazas (3, 4).

- 45 4. Procedimiento según la reivindicación 3, caracterizado porque comprende una etapa de selección de los segmentos (10) de la imagen de correlación (2),
- no dejando dicha selección como máximo más que un segmento (10) por línea y por columna de la imagen de correlación (2), correspondiente a un solo enlace (7) por punto de muestreo (5), y

- seleccionándose los segmentos (10) sobre la base del valor de los puntos (8) que los constituyen, y de su longitud.

5. Procedimiento según la reivindicación 4, caracterizado porque comprende una etapa de validación de los enlaces (7) por análisis de los caminos (30, 31) constituidos por las sucesiones de puntos (5) unidos por dichos enlaces (7), siendo una condición para que los enlaces (7) sean validados, en un volumen sísmico, que los caminos estén formando bucles (30).
6. Procedimiento según la reivindicación 5, caracterizado porque las etapas de selección de los segmentos (10) en la imagen de correlación (2) y de validación de los enlaces (7) se repiten de manera iterativa sobre los segmentos restantes (41, 42) en la imagen de correlación (2), utilizando como restricción los enlaces validados (40) en la iteraciones precedentes, hasta que no haya más segmentos explotables.
7. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque comprende una etapa de normalización de las edades relativas, fijándose el incremento de edad entre los puntos (5) de edades relativas consecutivas en un valor predefinido.
8. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque se elabora un modelo geológico multiescalas fusionando conjuntos de enlaces entre puntos de muestreo, obteniéndose dichos conjuntos de enlaces con rejillas de muestreo diferentes.
9. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque se aplica a la extracción directa de las superficies de depósito sobre la base de isovalores.
10. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque se aplica a la horizontalización de la operación sísmica cartografiando sobre una línea o un plano la señal sísmica correspondiente a una etapa geológica.
11. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque se aplica al análisis de fallas.
12. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque se aplica al análisis de canales.
13. Programa de ordenador que utiliza todas las etapas del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes.

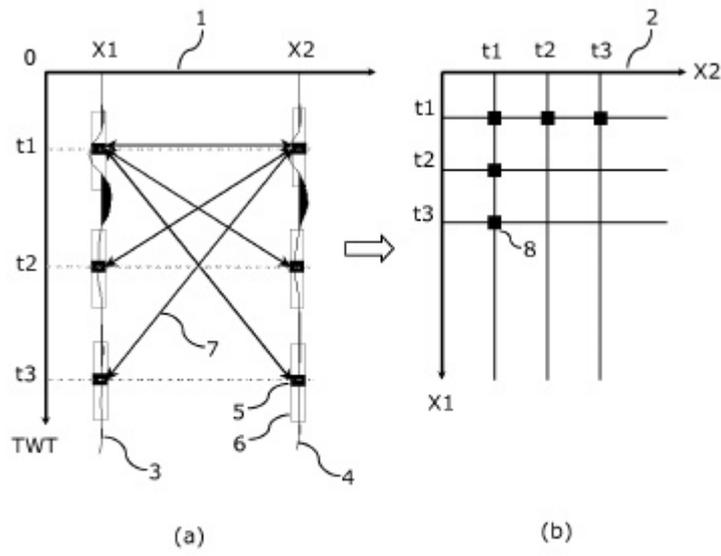


Figura 1

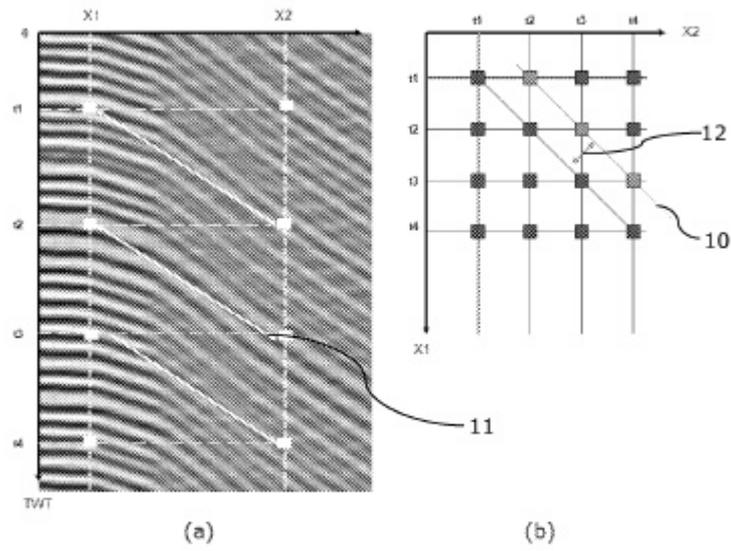


Figura 2

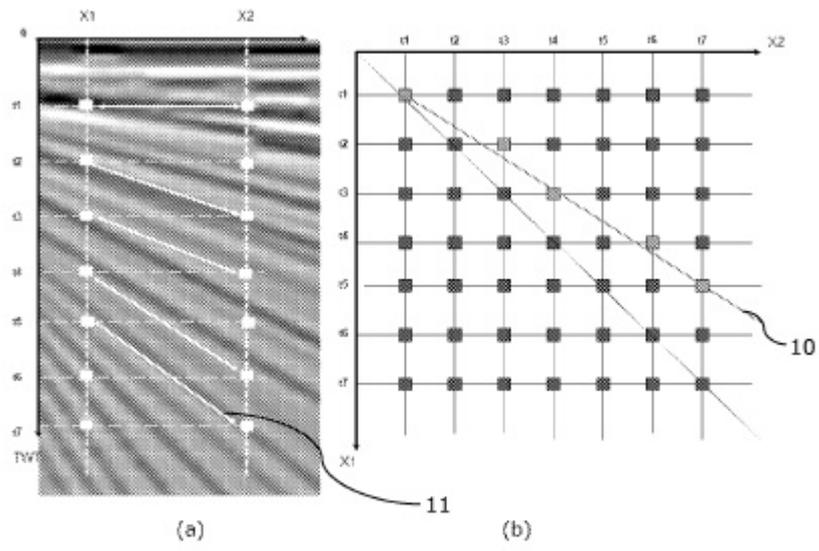


Figura 3

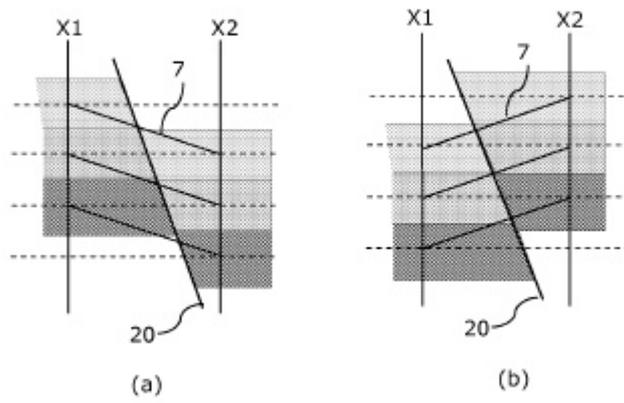


Figura 4

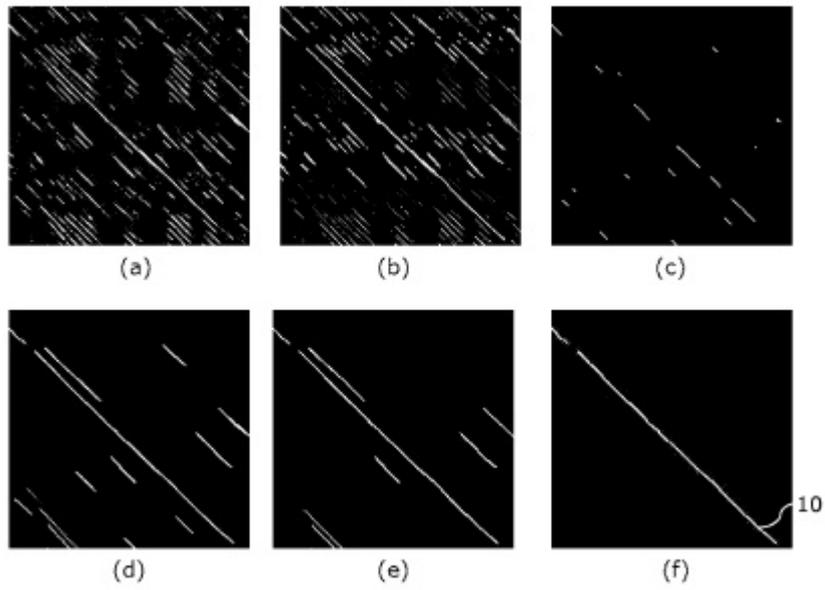


Figura 5

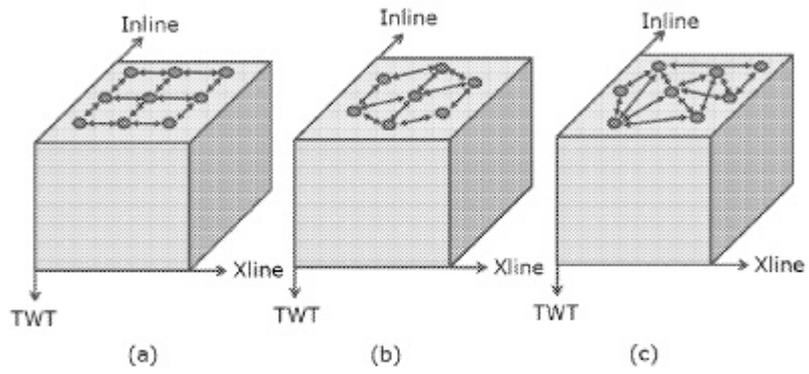


Figura 6

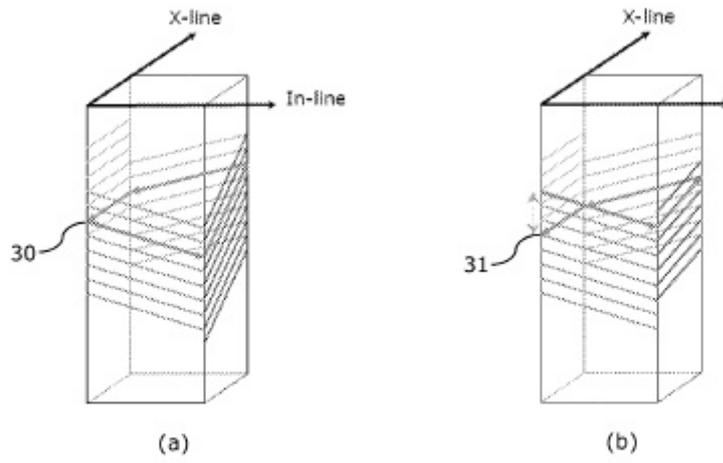


Figura 7

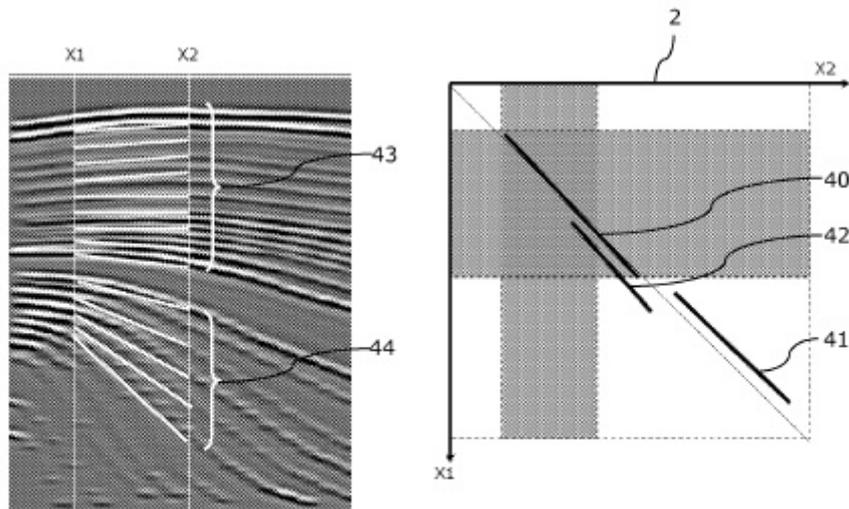


Figura 8

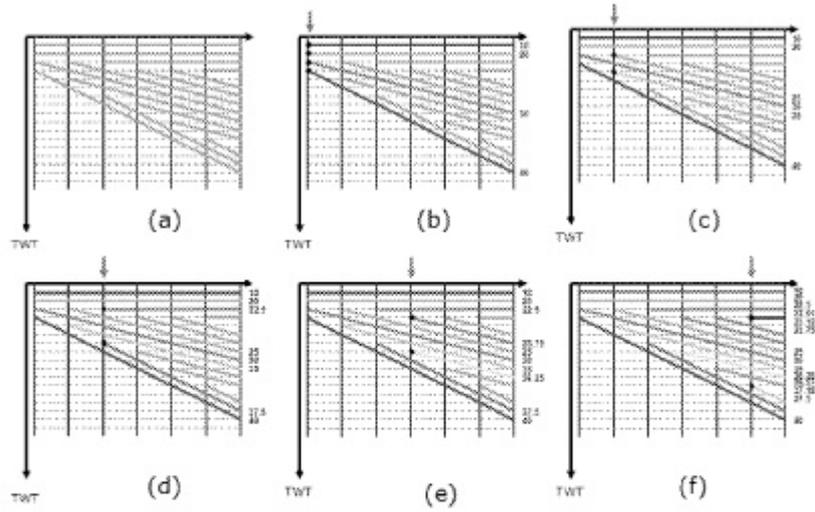


Figura 9

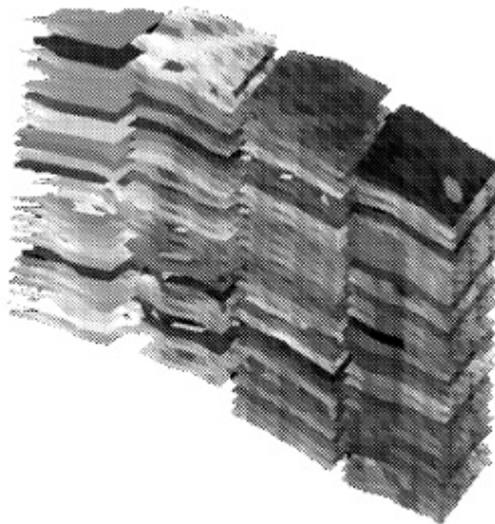
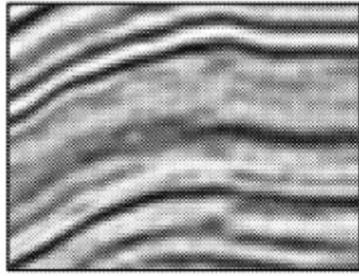
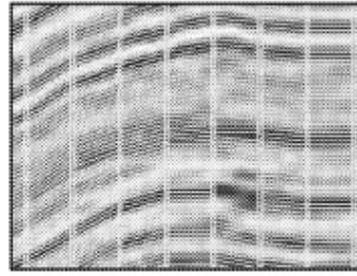


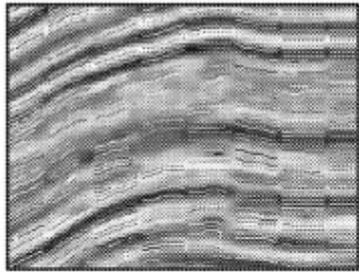
Figura 10



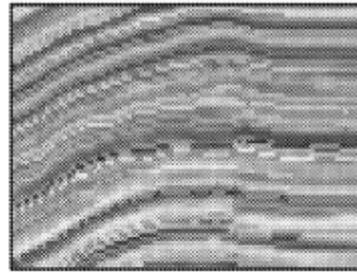
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11