

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 994 699**

51 Int. Cl.:

**G01N 33/24** (2006.01)

**G06F 18/2413** (2013.01)

**G06T 7/11** (2007.01)

**G06T 7/194** (2007.01)

**G06V 10/20** (2012.01)

**G06V 10/26** (2012.01)

**G06N 3/045** (2013.01)

**G06N 20/10** (2009.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **31.03.2021** **PCT/EP2021/058411**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.11.2021** **WO21219317**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.03.2021** **E 21716173 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.05.2024** **EP 4143567**

54 Título: **Método para detectar al menos un constituyente geológico de una muestra de roca**

30 Prioridad:

**27.04.2020 FR 2004169**

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

**30.01.2025**

73 Titular/es:

**IFP ENERGIES NOUVELLES (100.00%)**  
**1 et 4 avenue du Bois-Préau**  
**92500 Rueil-Malmaison, FR**

72 Inventor/es:

**DESROZIER, SYLVAIN;**  
**FERAILLE, MATHIEU;**  
**CLOCHARD, VINCENT;**  
**BOUZAT, ANTOINE;**  
**HAMON, YOURI y**  
**MOREAUD, MAXIME**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

ES 2 994 699 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

Método para detectar al menos un constituyente geológico de una muestra de roca

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere al campo de la detección de constituyentes geológicos de una muestra de roca.

10 La caracterización de una muestra rocosa a menudo requiere identificar y contar ciertos constituyentes específicos presentes dentro de la muestra, como por ejemplo microfósiles, nanofósiles, restos de plantas, minerales, esporas de polen o análogos. Para un especialista, este trabajo puede llevarse a cabo observando directamente la muestra rocosa a simple vista, o recortando una fina rodaja, denominada "lámina delgada", para observarla bajo un microscopio óptico. Esto permite categorizar con mayor precisión la roca y estimar sus propiedades físicas, para aplicaciones en ingeniería civil, para la descontaminación de sitios, para la investigación de recursos minerales o energéticos subterráneos, etc.

15 Además, en el caso de que estos constituyentes geológicos sean microfósiles (micropaleontología) o elementos vegetales (palinología) en rocas sedimentarias, este tipo de análisis permite estimar al mismo tiempo la edad, el medioambiente (marino, costero, continental, etc.) y el contexto climático en el momento del depósito de sedimento. Aplicado a varias muestras de una misma sucesión sedimentaria, constituye entonces un medio para reconstruir la evolución del clima en una zona geográfica a lo largo de edades geológicas (paleoclimatología).

**Técnica anterior**

25 La detección y el recuento de determinados constituyentes geológicos se lleva a cabo tradicionalmente de forma manual por un experto humano, lo que requiere una formación adecuada y, a menudo, resulta muy tedioso.

En cuanto a los microfósiles, se puede consultar, en particular, el Manual de micropaleontología publicado en 2011 por Mathieu, Bellier y Granier (ISBN 978-2-916733-04-3), así como la base de datos de foraminíferos en la página <http://www.marinespecies.org/foraminifera/index.php>. Tal base de datos comprende un gran número de datos. Por lo tanto, esta base sólo puede ser usada por un experto y no en un procedimiento automatizado.

En cuanto a los minerales, un trabajo comparable es el atlas de petrografía publicado en 2001 por McKenzie y Guilford en Dunod (ISBN 978-2-100054-59-6).

35 En lo que se refiere a los pólenes se puede consultar el trabajo de Paleopalinología de Alfred Traverse publicado en 2007 (ISBN 978-1-4020-5610-9).

Para que estos análisis sean al mismo tiempo más accesibles y rápidos, se consideró la automatización de la detección y del conteo mediante métodos digitales. Esto se puede lograr mediante sistemas expertos, técnicas de umbralización más o menos avanzadas, diversos métodos de análisis y procesamiento de imágenes y, sobre todo, mediante métodos de aprendizaje automático, en particular basados en redes neuronales artificiales. Para los microfósiles, se puede referirse en particular a: Beaufort, L. y Dollfus, D. (2004). Automatic recognition of coccoliths by dynamical neural networks. Marine Micropaleontology, 51(1-2), 57-73. Este método también se describe en la solicitud de patente WO2015132531A1. Sin embargo, tal método requiere un gran número de imágenes de aprendizaje para el método de aprendizaje automático. La solicitud de patente cita en particular el uso de 10.000 imágenes obtenidas mediante microscopía y 100 imágenes por grupo morfológico. Este gran número de imágenes de aprendizaje requiere un tiempo de preparación muy importante y un número muy importante de operaciones preparatorias: es necesario preparar las láminas delgadas (en particular mediante corte de la roca, impregnación y rodaje) y realizar las observaciones mediante el microscopio para cada lámina delgada. Después, para cada imagen, es necesario identificar manualmente los constituyentes considerados, lo que requiere un trabajo importante por parte de un experto.

Con respecto a un método de aprendizaje automático aplicado a los minerales, se puede referirse al documento: Thompson, S., Fueten, F., & Bockus, D. [2001] Mineral identification using artificial neural networks and the rotating polarizer stage. Computers & Geosciences, 27(9), 1081-1089. Asimismo, este método requiere un gran número de imágenes de aprendizaje (al menos varios cientos, o incluso varios miles), lo que plantea los mismos inconvenientes que los citados anteriormente.

El documento: «Cheng Su et al: «Rock Classification in pétrographie thin section images based on concatenated convolutional neural networks», Arxiv.org, XP081627653, 23 de marzo de 2020» describe una clasificación de rocas en base a imágenes y una red neuronal.

**Sumario de la invención**

65 La presente invención tiene como objetivo detectar constituyentes geológicos de una muestra de roca, de forma automática, con un tiempo de preparación limitado y un número limitado de operaciones. Para ello, la presente invención se refiere a un método para detectar un constituyente geológico de una muestra de roca, mediante un

método de aprendizaje automático entrenado con un número limitado de imágenes de aprendizaje, gracias a la segmentación y a una división de las imágenes de aprendizaje en una pluralidad de viñetas.

La presente invención se refiere a un método para detectar al menos un constituyente geológico de una muestra de roca, a partir de imágenes de aprendizaje. Para este procedimiento, se implementan las siguientes etapas:

a) Se segmentan dichas imágenes de aprendizaje en al menos dos colores: un primer color para cada zona de dichas imágenes de aprendizaje que no comprende ningún constituyente geológico, y al menos un segundo color para cada zona de dichas imágenes de aprendizaje que comprende un constituyente geológico;

b) Se dividen dichas imágenes de aprendizaje y dichas imágenes segmentadas en una pluralidad de viñetas;

c) Se entrena un algoritmo de aprendizaje automático de clasificación mediante dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje y mediante dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje segmentadas para clasificar dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje en función de dicho color de dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje segmentadas correspondientes;

d) Se adquiere una imagen de dicha muestra de roca;

e) Se divide dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca en una pluralidad de viñetas; y

f) Se detecta dicho al menos un constituyente geológico en cada una de dichas viñetas de dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca aplicando un modelo formado por dicho algoritmo de aprendizaje automático a dichas viñetas de dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca.

Ventajosamente, dicho constituyente geológico se escoge entre los microfósiles, los nanofósiles, los restos vegetales, los minerales y las esporas de polen.

Según una realización, cada uno de dichos al menos segundos colores corresponde a un tipo de constituyente geológico.

Según un aspecto, el número de imágenes de aprendizaje está comprendido entre 3 y 20, preferiblemente entre 3 y 10.

Según una implementación, dicho algoritmo de aprendizaje automático utiliza una red neuronal artificial, preferiblemente una red neuronal convolucional o una red neuronal totalmente convolucional.

Ventajosamente, dicha imagen de dicha muestra de roca se adquiere a partir de una lámina delgada de dicha muestra de roca.

Según una característica, dicha imagen de dicha muestra de roca se adquiere mediante un microscopio óptico o electrónico, con luz polarizada o no, de una fotografía, de un escáner de tomografía con sincrotrón, o de una toma de imágenes por rayos X. Según una realización, dicho algoritmo de aprendizaje automático está entrenado para clasificar dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje, analizando el color del píxel central de dichas viñetas de dichas imágenes segmentadas. Ventajosamente, dicha imagen adquirida se divide en una pluralidad de viñetas implementando, para cada píxel de dicha imagen adquirida, una división de una viñeta que rodea dicho píxel, y dicho aprendizaje automático entrenado se utiliza para determinar si dicho píxel pertenece a dicho constituyente geológico.

Según una implementación, dicho algoritmo de aprendizaje automático está entrenado para segmentar toda la superficie de dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje para delimitar dichos constituyentes geológicos.

Ventajosamente, dichos constituyentes geológicos se detectan delimitando dichos constituyentes geológicos para cada viñeta de dicha imagen adquirida.

Según una implementación, dicho método de detección comprende al menos una etapa adicional escogida de entre:

- Se calcula el número de constituyentes geológicos de dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca a partir de la detección de dicho constituyente geológico, o

- Se determina la proporción del volumen de la muestra de roca ocupada por los constituyentes geológicos a partir de la detección de dicho constituyente geológico, o

- Se estiman las características morfológicas y/o texturales de dichos constituyentes geológicos, o

- Se aplica un método de clasificación supervisada para categorizar dichos constituyentes geológicos desde la detección de dicho constituyente geológico.

Además, la invención se refiere a un método de explotación del suelo o subsuelo, en el que se implementan las siguientes etapas:

a) Se detecta al menos un constituyente geológico de una muestra de roca mediante el método de detección según una de las características anteriores; y

b) Se explota dicho suelo o dicho subsuelo en función de dicha detección de dicho constituyente geológico de dicha al menos una roca.

Según una realización, dicha explotación del suelo o del subsuelo se refiere a la construcción de una obra en dicho suelo o en el subsuelo, al almacenamiento de gas en el subsuelo, o a la explotación de materias primas de dicho suelo o de dicho subsuelo, siendo preferentemente dichas materias primas la roca en sí, o un material o fluido contenido en dicho suelo o en dicho subsuelo.

Además, la invención se refiere a un método para determinar el clima de una zona geográfica a través de edades geológicas, en el que se implementan las siguientes etapas:

a) Se toman al menos dos muestras de roca a diferentes profundidades de una formación subterránea;

b) Se detecta al menos un constituyente geológico para cada muestra de roca mediante el método de detección según una de las características anteriores; y

c) Se determina dicho clima así como la edad geológica en dicha zona geográfica en función de dicho al menos un constituyente geológico detectado.

Otras características y ventajas del método de acuerdo con la invención se pondrán de manifiesto con la lectura de la siguiente descripción de ejemplos no restrictivos de formas de realización, con referencia a las figuras adjuntas y descritas a continuación.

#### Lista de las figuras

La Figura 1 ilustra las etapas del método de detección según una realización de la invención.

La Figura 2 ilustra una primera variante del método de aprendizaje automático utilizado por el método de detección según la invención.

La Figura 3 ilustra una segunda variante del método de aprendizaje automático utilizado por el método según la invención.

La Figura 4 ilustra una imagen adquirida de una muestra de roca así como las zonas en las que se detectaron constituyentes geológicos usando el método según una realización de la invención.

#### Descripción de realizaciones

La presente invención se refiere a un método para detectar constituyentes geológicos de una muestra de roca. Se denomina muestra de roca un trozo de roca, por ejemplo (no limitativo) tomado mediante extracción de testigos. Se entiende por constituyentes geológicos a al menos un constituyente incluido dentro de la roca. Tal constituyente geológico de rocas se puede escoger entre microfósiles, nanofósiles, restos de plantas, minerales, esporas de polen, o cualquier elemento similar. Se denomina detección de constituyentes geológicos la detección de los constituyentes geológicos dentro de la muestra de roca.

El método de detección según la invención se basa en el uso de una imagen de la muestra de roca y en la implementación de un algoritmo de aprendizaje automático (del inglés «machine learning») para automatizar esta detección.

Según una realización de la invención, la imagen adquirida de la muestra de roca, y el conjunto de las imágenes de aprendizaje implementadas para entrenar el algoritmo de aprendizaje pueden ser de todos los tipos.

Según una implementación de la invención, la imagen puede ser la de una muestra de roca completa. Alternativamente, la imagen puede ser de una lámina delgada de la muestra de roca. Las muestras observadas pueden ser, en particular, láminas denominadas «láminas delgadas» de tres tipos: láminas de materiales de muy poco grosor del orden de 30  $\mu\text{m}$ , láminas más gruesas del orden de 100  $\mu\text{m}$ , o secciones pulidas cuyo grosor puede alcanzar hasta

10 mm. Para poder observar correctamente estos diferentes tipos de muestras bajo el microscopio, es importante disponer de una superficie plana y con una rugosidad muy baja (casi lisa).

Además, la imagen se puede obtener de diferentes formas, por ejemplo mediante un microscopio con o sin luz polarizada, mediante un escáner, mediante una fotografía, o cualquier sistema similar.

Según una realización preferida de la invención, la imagen puede obtenerse mediante un microscopio a partir de una lámina delgada de la muestra de roca.

Según la invención, el método de detección comprende las siguientes etapas:

- 1 Entrenar el algoritmo de aprendizaje automático
- 2 - Adquirir la imagen de la muestra de roca
- 3 - Detectar de los constituyentes geológicos de la muestra de roca

De manera un poco más detallada, el método según la invención comprende las siguientes etapas:

- 1 Entrenar el algoritmo de aprendizaje automático
  - 1.1 Segmentar imágenes de aprendizaje
  - 1.2 Dividir imágenes de aprendizaje e imágenes segmentadas
  - 1.3 Clasificar
- 2 Adquirir la imagen de la muestra de roca
- 3 - Detectar los constituyentes geológicos de la muestra de roca
  - 3.1 - Dividir la imagen adquirida
  - 3.2 - Detectar los constituyentes

La etapa 1 y las subetapas asociadas 1.1 a 1.3 se pueden realizar fuera de línea, una sola vez y por adelantado. Las etapas 2 y 3, y las subetapas asociadas 3.1 y 3.2, se pueden realizar en línea, para cada muestra de roca considerada. En otras palabras, si se desea detectar los componentes geológicos de varias muestras de roca, se repiten las etapas 2 y 3 para cada muestra de roca, necesitando el algoritmo de aprendizaje automático sólo ser entrenado una vez. Las etapas se detallarán más adelante en la descripción.

El método según la invención se puede implementar mediante un sistema informático, en particular un ordenador, en particular las etapas 1.3, 2 y 3 (3.1 y 3.2).

La Figura 1 ilustra, esquemáticamente y de forma no limitativa, las etapas del método de detección según una realización de la invención. En un primer momento, se llevan a cabo las etapas fuera de línea Off a partir de las imágenes de aprendizaje de IAP. Cada imagen de aprendizaje IAP está segmentada SEG en al menos dos colores: estando un color asociado con zonas sin constituyentes geológicos y estando al menos otro color asociado con zonas con constituyentes geológicos. Después, se divide DEC en cada imagen de aprendizaje IAP y cada imagen segmentada en una pluralidad de viñetas. Se entrena después el algoritmo de aprendizaje automático ALG mediante la clasificación de las viñetas. En línea Onl, se adquiere una imagen de la muestra de roca IER. Se divide DEC después la imagen de muestra de roca IER en na pluralidad de viñetas. Aplicando el modelo MOD que resulta del algoritmo de aprendizaje automático ALG a las viñetas de la imagen adquirida de muestra de roca IER, se detectan los constituyentes geológicos cge de la muestra de roca.

### **1- Entrenamiento del algoritmo de aprendizaje automático**

Se trata durante esta etapa entrenar el algoritmo de aprendizaje automático a fin de poder automatizar la detección de constituyentes geológicos a partir de las imágenes de aprendizaje. Al final de esta etapa, el algoritmo de aprendizaje automático forma un modelo, que tiene como entrada una imagen de una muestra de roca y en salida de la detección de constituyentes geológicos.

El método según la invención requiere pocas imágenes de aprendizaje debido a la segmentación y división de las imágenes de aprendizaje en viñetas, etapas que se describirán a continuación. Así, se reduce el tiempo y las operaciones necesarias para entrenar el algoritmo. Ventajosamente, el número de imágenes de aprendizaje puede estar comprendido entre 3 y 20, preferiblemente entre 3 y 10, y puede ser 5. Por ejemplo, es evidente que la adquisición

de 5 imágenes de láminas finas bajo el microscopio es 60 veces más rápida que la adquisición de 300 imágenes de láminas finas bajo el microscopio, que son útiles para los métodos según la técnica anterior que usan varios cientos de imágenes de aprendizaje. Si se estima que cada adquisición de una imagen de lámina delgada bajo el microscopio toma alrededor de diez minutos, la ganancia en este caso es de 2950 min, es decir más de 49 horas. Así, el procedimiento según la invención es menos tedioso y más rápido.

Además, el método según la invención puede comprender una etapa previa de adquisición de las imágenes de aprendizaje, pudiendo implementarse esta etapa de la misma manera que la etapa 2 de adquisición de la imagen de la muestra de roca. Por ejemplo, esta etapa preliminar puede consistir en preparar láminas finas y realizar microscopía de estas láminas finas para formar las imágenes de aprendizaje.

Según una realización de la invención, el algoritmo de aprendizaje automático puede ser un algoritmo de aprendizaje automático de clasificación supervisada, por ejemplo una red neuronal artificial, preferiblemente una red neuronal convolucional (CNN del inglés «Convolutional Neural Network») o una red neuronal totalmente convolucional (FCNN del inglés «Fully Convolutional Neural Network»). Las redes neuronales convolucionales y las redes neuronales totalmente convolucionales son particularmente adecuadas para el procesamiento de la imagen.

Alternativamente, el algoritmo de aprendizaje automático puede ser de cualquier tipo, en particular una red neuronal no convolucional, un método de bosque aleatorio, un método de máquina de vectores de soporte (del inglés «Support Vector Machine» o SVM) y un método de proceso gaussiano.

### **1.1 - Segmentación de imágenes de aprendizaje**

Durante esta etapa, se segmentan dichas imágenes de aprendizaje en al menos dos colores:

- Un primer color para las zonas de las imágenes de aprendizaje sin constituyente geológico,
- Al menos un segundo color para las zonas de las imágenes de aprendizaje con constituyente geológico.

Según una realización de la invención, las imágenes de aprendizaje sólo pueden segmentarse en dos colores: todos los constituyentes geológicos tienen entonces el mismo color. El procedimiento de detección permite entonces detectar todos los constituyentes geológicos. Para esta realización, el primer color puede ser negro y el segundo color puede ser blanco (o viceversa); así se mejora el contraste.

Alternativamente, se pueden segmentar las imágenes de aprendizaje en un número de colores superior a dos. En este caso, se puede asignar un color por tipo de constituyentes geológicos. Según un primer ejemplo, se puede asignar un color a los microfósiles, y un color a los restos vegetales, etc. Según un segundo ejemplo, se puede asignar un color por distintos tipos de microfósiles, o por distintos tipos de restos vegetales, etc. Además, es posible combinar estos ejemplos: se puede asignar un color a distintos tipos de microfósiles, y un color a distintos tipos de restos vegetales, etc.

### **1.2 - División de las imágenes de aprendizaje y de las imágenes segmentadas**

Durante esta etapa, se dividen las imágenes de aprendizaje y las imágenes segmentadas obtenidas en la etapa anterior en una pluralidad de viñetas. Una parte de la imagen de aprendizaje o de la imagen segmentada se denomina viñeta (o en inglés «patch»), así como las viñetas se forman a partir de un conjunto de píxeles adyacentes de la imagen de aprendizaje o de la imagen segmentada. Se obtiene entonces dos conjuntos de viñetas: un primer conjunto de viñetas de las imágenes de aprendizaje y un segundo conjunto de viñetas de las imágenes segmentadas. Así, el método según la invención no entrena directamente el algoritmo de aprendizaje automático para identificar los constituyentes geológicos en imágenes completas, sino simplemente para trabajar en pequeños fragmentos de imagen (viñetas). De cierta manera, se reemplaza una tarea compleja para la que se tiene pocos datos de entrenamiento, por una serie de tareas más simples y para las que se puede generar más datos, lo que permite reducir el número de imágenes de aprendizaje.

Según una realización de la invención, las viñetas pueden tener una forma sustancialmente rectangular o incluso cuadrada. Sin embargo, las viñetas pueden tener cualquier otra forma.

Preferiblemente, el tamaño de las viñetas puede corresponder sustancialmente a las dimensiones de los constituyentes geológicos. Por ejemplo, el tamaño mínimo de las viñetas puede corresponder sustancialmente al tamaño de un rectángulo que abarca el constituyente geológico más grande.

Según un aspecto de la invención, todas las viñetas pueden tener el mismo número de píxeles para facilitar el aprendizaje automático. Así, no es necesario prever un cambio de dimensión del tamaño de las viñetas para el aprendizaje automático. En una variante, las viñetas tienen diferentes números de píxeles.

Para mejorar el aprendizaje del algoritmo de aprendizaje automático y, en consecuencia, la precisión del método de detección según la invención, las imágenes de aprendizaje pueden dividirse de manera que se formen, para todas las imágenes de aprendizaje, al menos cien viñetas, preferiblemente al menos varios cientos de viñetas.

- 5 Durante esta etapa, se puede, preferiblemente, dividir las imágenes de aprendizaje iniciales y las imágenes de aprendizaje segmentadas de manera idéntica. Así, se mejora la calidad del aprendizaje. En efecto, se desea entrenar el aprendizaje automático para reproducir la correspondencia entre la imagen de aprendizaje y la imagen segmentada.

### 1.3 - Clasificación

- 10 Durante esta etapa, se entrena el algoritmo de aprendizaje automático de clasificación supervisada mediante las viñetas divididas de las imágenes de aprendizaje y las imágenes segmentadas para clasificar las viñetas de las imágenes de aprendizaje, en función del color (o, llegado el caso, los colores) de las viñetas de las imágenes segmentadas correspondientes. En otras palabras, cada zona de las imágenes de aprendizaje, para la cual la viñeta de la imagen segmentada correspondiente es del primer color, se define como una zona sin constituyente geológico, y cada zona de las imágenes de aprendizaje, para la cual la viñeta de la imagen segmentada correspondiente es al menos parcialmente del al menos un segundo color, se define como una zona con constituyente geológico.

20 El aprendizaje del algoritmo de aprendizaje automático puede implementarse en particular mediante uno de los métodos siguientes:

- El método descrito en el documento Ciresan, D., Giusti, A., Gambardella, LM, & Schmidhuber, J. [2012]. Deep neural networks segment neuronal membranes in electron microscopy images. In Advances in neural information processing systems, 2843-2851. Para este método, se enseña a una red neuronal, si es posible convolucional (CNN del inglés «Convolutional Neural Network»), a clasificar viñetas buscando si su píxel central pertenece a un constituyente deseado o no. Después, esta capacidad se aplica píxel a píxel sobre la imagen adquirida para delimitar los constituyentes buscados. En el resto de la descripción, este método se denomina método «basado en píxeles».
- El método descrito en el documento Ronneberger O., Fischer P., Brox T. [2015] U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. En: Navab N., Hornegger J., Wells W., Frangi A. (eds) Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI 2015. MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9351. Springer, Cham. Para este método, se enseña a una red neuronal, si es posible totalmente convolucional (FCNN del inglés «Fully Convolutional Neural Network»), a segmentar toda la superficie de las viñetas para delimitar los constituyentes buscados. Después, esta capacidad se aplica a nuevas imágenes dividiéndolas en viñetas de tamaño similar y trabajando viñeta por viñeta. En el resto de la descripción, este método se denomina método «basado en viñetas».

40 Así, para la realización en la que se usa el método «basado en píxeles», esta etapa se puede implementar analizando el color del píxel central de las viñetas de las imágenes segmentadas. De esta manera, se entrena una red neuronal artificial para clasificar automáticamente las viñetas no segmentadas (imágenes de aprendizaje) según al menos dos categorías: o el píxel central es de al menos el segundo color (es decir, no es del primer color) en la imagen segmentada (es decir, pertenece a uno de los constituyentes geológicos que se desea identificar), o bien el píxel central es del primer color en la imagen segmentada (es decir, no pertenece a uno de los constituyentes geológicos que se desea identificar). Preferiblemente, se puede usar un método de aprendizaje automático profundo con una red neuronal convolucional (CNN). En términos generales, el método de aprendizaje automático también se puede escoger alternativamente entre una variedad de métodos de clasificación supervisada que funcionan sobre las imágenes. La Figura 2 ilustra, de forma esquemática y de manera no limitativa, dos viñetas de una misma zona. La viñeta 5 en la figura de la izquierda es la viñeta de la imagen de aprendizaje. Esta viñeta 5 comprende un constituyente geológico 6. La viñeta 7 en la figura de la derecha es la viñeta de la imagen segmentada, esta viñeta 7 es del segundo color (aquí negro) debido a la presencia del constituyente geológico 6 en la zona correspondiente.

55 Así, para la realización en la que se aplica el método "basado en viñetas", esta etapa se puede implementar segmentando toda la superficie de las viñetas para delimitar los constituyentes geológicos. De esta manera, se entrena un aprendizaje automático para segmentar automáticamente las viñetas no segmentadas de las imágenes de aprendizaje según las categorías ya definidas, es decir al menos dos: primer color (es decir no pertenece a uno de los constituyentes geológicos que se desea identificar) o al menos un segundo color (es decir pertenece a uno de los constituyentes geológicos que se desea identificar). Preferiblemente, se puede usar un método de aprendizaje profundo con una red neuronal totalmente convolucional (FCNN). La Figura 3 ilustra, de forma esquemática y no limitativa, dos viñetas de una misma zona. La viñeta 5 en la figura de la izquierda es la viñeta de la imagen de aprendizaje. Esta viñeta 5 comprende un constituyente geológico 6. La viñeta 7 en la figura de la derecha es la viñeta de la imagen segmentada, esta viñeta 7 comprende una zona 8 del segundo color (negro) que corresponde al constituyente geológico 6 de la viñeta de aprendizaje 5. Esta viñeta 7 incluye una zona 9 del primer color (blanco) que corresponde a una zona sin constituyente geológico de la imagen de aprendizaje.

### 2 - Adquisición la imagen de la muestra de roca

Se trata durante esta etapa de adquirir una imagen de la muestra de roca a analizar. Para ello, se puede implementar uno de los métodos de adquisición de imágenes adaptada al método según la invención: microscopio óptico o electrónico, fotografía, escáner, tomografía con sincrotrón, obtención de imágenes por rayos X, etc. Además, se puede adquirir una imagen directamente de la muestra de roca o a partir de una lámina delgada de la muestra de roca.

Según una realización de la invención, cuando el método de detección según la invención usa imágenes de una lámina delgada, esta etapa puede incluir una subetapa de preparación de una lámina delgada a partir de la muestra de roca a analizar.

Según un aspecto de la invención, se adquiere una imagen de la muestra de roca mayor que la zona de la muestra de roca a estudiar, a fin de evitar los efectos de borde del método de detección.

### **3 - Detección de los constituyentes geológicos de la muestra de roca**

Durante esta etapa, se detectan los constituyentes geológicos de la muestra de roca, mediante la imagen adquirida de la muestra de roca, y mediante el modelo formado por el algoritmo de aprendizaje automático. Así, se aplica el modelo formado por el algoritmo de aprendizaje automático a la imagen adquirida de la muestra de roca.

#### **3.1 - División la imagen adquirida**

Durante esta etapa, la imagen adquirida de la muestra de roca se divide en una pluralidad de viñetas para aplicar el modelo formado por el algoritmo de aprendizaje automático obtenido en la etapa 1 a cada viñeta de la imagen adquirida de la muestra de roca (obtenida en la etapa 2).

Para la realización para la que se usa el método "basado en píxeles", esta etapa se puede implementar mediante la división de la imagen adquirida de la muestra de roca en una pluralidad de viñetas implementando, para cada píxel de la imagen adquirida, una división de una viñeta que rodea el píxel. Según una opción de esta realización, las viñetas de la imagen adquirida pueden tener sustancialmente el mismo tamaño que las viñetas de las imágenes de aprendizaje y las imágenes segmentadas utilizadas para entrenar el algoritmo de aprendizaje automático (en la etapa 1). Esta opción de producción proporciona mejores resultados.

Para la realización para la que se utiliza el método "basado en viñetas", esta etapa se puede implementar dividiendo la imagen adquirida en viñetas que cubren la totalidad de la imagen adquirida. Según una opción de esta realización, las viñetas de la imagen adquirida pueden tener sustancialmente el mismo tamaño que las viñetas de las imágenes de aprendizaje y las imágenes segmentadas utilizadas para entrenar el algoritmo de aprendizaje automático (en la etapa 1). Esta opción de producción proporciona mejores resultados.

#### **3.2 - Detección de los constituyentes geológicos**

Durante esta etapa, los constituyentes geológicos de la muestra de roca se detectan mediante el modelo obtenido por el algoritmo de aprendizaje automático (etapa 1) aplicado a las viñetas de la imagen adquirida (etapa 3.1). Al final de esta etapa, se obtiene la segmentación completa de la imagen adquirida, con los colores utilizados en la etapa 1.1. Se detectan entonces los constituyentes geológicos de la imagen adquirida en los píxeles que tienen al menos el segundo color (en otras palabras, que no tienen el primer color).

Para la realización en la que se usa el método "basado en píxeles", esta etapa se puede implementar identificando para cada viñeta de la imagen adquirida si el píxel central forma parte de un constituyente geológico o no, mediante el modelo formado por el algoritmo de aprendizaje automático. Se puede entonces colorear este píxel con el primer color (si este píxel no forma parte de un constituyente geológico) o con otro color, por ejemplo, el segundo color (si este píxel forma parte de un constituyente geológico). Al final de esta etapa, después de haber aplicado este método a cada píxel de la imagen adquirida, se obtiene la segmentación de color de la imagen adquirida, correspondiendo las zonas del al menos el segundo color a los constituyentes geológicos que se detectan.

Para la realización en la que se usa el método "basado en viñetas", esta etapa se puede implementar delimitando para cada viñeta de dicha imagen adquirida dichos constituyentes geológicos mediante el modelo formado por el algoritmo de aprendizaje automático. En otras palabras, para cada viñeta de la imagen adquirida, se delimita, llegado el caso, un constituyente geológico dentro de la viñeta, y se asigna al menos un segundo color al posible constituyente geológico. Al final de esta etapa, después de aplicar este método a cada viñeta de la imagen adquirida, se obtiene la segmentación de colores de la imagen adquirida, con zonas del al menos el segundo color que corresponden a los constituyentes geológicos que se detectan.

La Figura 4 ilustra, de forma esquemática y no limitativa, en su parte izquierda, una imagen 1 adquirida de una muestra de roca, y en su parte derecha la imagen 2 segmentada de la imagen 1. Esta imagen adquirida 1 se obtuvo mediante microscopía de una lámina delgada de la muestra de roca. La imagen segmentada 2 se obtuvo mediante el método de detección según la invención. Para el método de detección según la invención, el algoritmo de aprendizaje



automático se entrenó con cinco imágenes de aprendizaje. Además, se ha implementado una red neuronal convolucional y el método «basado en píxeles». En la imagen segmentada 2, el negro corresponde al primer color, es decir, zonas sin constituyentes geológicos, y el blanco corresponde al segundo color, es decir, zonas con constituyentes geológicos 3. En esta figura, se han ilustrado también mediante los rectángulos 4 los constituyentes geológicos que no se habían identificado por un operador durante el estudio de esta lámina delgada. Así, se observa que el método según la invención puede ser más preciso que un operador, identificando automáticamente todos los constituyentes geológicos.

Además, el método según la invención puede comprender al menos una de las siguientes etapas adicionales:

- Se cuenta el número de constituyentes geológicos de la imagen adquirida de la muestra de roca a partir de la detección de dicho constituyente geológico, en otras palabras, a partir de la imagen adquirida segmentada, y/o
- Se determina la proporción del volumen de la muestra de roca ocupada por los constituyentes geológicos a partir de la detección de dichos constituyentes geológicos, en otras palabras a partir de la imagen adquirida segmentada, y/o
- Se estiman las características morfológicas y/o texturales (por ejemplo, forma, dimensiones, presencia de estrías, etc.) de los constituyentes geológicos, por ejemplo mediante un procesamiento de imágenes, y/o
- Se aplica un método de clasificación supervisada para categorizar los constituyentes geológicos a partir de la detección del constituyente geológico. Por ejemplo, se puede determinar la especie a la que pertenece cada microfósil detectado. Esta etapa puede requerir haber entrenado previamente una red neuronal artificial para realizar esta categorización, a partir de una base de imágenes dedicada, y de manera independiente del algoritmo de aprendizaje del método de detección según la invención.

Estas etapas se pueden llevar a cabo de forma automática, preferentemente utilizando medios informáticos, tal como un ordenador.

Además, la invención se refiere a un método para explotar el suelo o el subsuelo. Para este procedimiento, se implementan las siguientes etapas:

- a) Se detecta al menos un constituyente geológico de una muestra de roca mediante el método de detección según una cualquiera de las variantes o combinaciones de variantes descritas anteriormente; y
- b) Se explota el suelo y/o subsuelo en función de los constituyentes geológicos de la muestra de roca detectados en la etapa anterior.

Para este método de explotación del suelo o subsuelo, el procedimiento puede comprender una etapa preliminar de tomar una muestra de roca del suelo o subsuelo.

La explotación puede referirse, en particular, al campo de la construcción de edificios u obras de arte, o al campo de la explotación de materias primas, o al campo del almacenamiento de gas, el campo de la determinación de riesgos, etc.

En el campo de la construcción, se determina la constitución de los afloramientos rocosos y/o del subsuelo mediante la categorización de la roca, y se lleva a cabo la construcción adaptando en particular las bases, la estructura de la construcción en función de la categorización de la roca. Para estas aplicaciones, la roca a categorizar se puede tomar del suelo o del subsuelo a poca profundidad.

En el campo de la explotación de materias primas (por ejemplo para canteras, minas, recuperación de hidrocarburos, etc.), se determina la constitución de los afloramientos rocosos y/o del subsuelo mediante la detección de los constituyentes geológicos de la roca, y se lleva a cabo la explotación de materias primas (las materias primas pueden ser la propia roca, un material, por ejemplo un metal, o un fluido, por ejemplo hidrocarburos, presentes en el subsuelo), permitiendo en particular determinar las zonas adecuadas (es decir, zonas de perforación, zonas que se excavarán para minas o canteras, etc. con el objetivo de recuperar materias primas), para determinar los métodos y las herramientas a utilizar (por ejemplo, recuperación asistida de hidrocarburos, herramientas de perforación, naturaleza de los artefactos explosivos para minas o canteras, etc.). Para estas aplicaciones, la roca a categorizar puede ser extraída de las profundidades del subsuelo, puede resultar de restos de perforación, o puede provenir de un afloramiento, etc.

En el campo del almacenamiento de gas, por ejemplo CO<sub>2</sub>, se determina la constitución del subsuelo por la categorización de la roca, y se lleva a cabo el almacenamiento de gas en el subsuelo en una zona adecuada, es decir, en una zona subterránea capaz de almacenar gas sin fuga.

En el campo de la determinación de los riesgos, se determina la constitución de un afloramiento rocoso (acantilado) categorizando la roca, y se lleva a cabo una operación de consolidación si existe un riesgo de hundimiento o deslizamiento del afloramiento rocoso.

5 Así, este procedimiento permite implementar la explotación del suelo y/o subsuelo, de forma sencilla y rápida, sin recurrir a un geólogo experto. El procedimiento también permite procesar más rápidamente cantidades muy grandes de roca.

10 La invención también se refiere a un método para determinar el clima en una zona geográfica a través de edades geológicas, en el que se implementan las siguientes etapas:

a) Se toman al menos dos muestras de roca a diferentes profundidades de una formación subterránea, proviniendo posiblemente las muestras de roca de la misma sucesión de depósitos rocosos;

15 b) Se detecta al menos un constituyente geológico para cada muestra de roca mediante el método de detección según una cualquiera de las variantes o combinaciones de variantes descritas anteriormente; y

20 c) Se determina dicho clima así como la edad geológica en la zona geográfica en función de dicho al menos un constituyente geológico detectado.

Como es evidente, la invención no se limita únicamente a las realizaciones descritas anteriormente a modo de ejemplo, sino que por el contrario abarca todas las variantes de realización.

## REIVINDICACIONES

1. Método para detectar al menos un constituyente geológico (cge) de una muestra de roca, a partir de imágenes de aprendizaje, caracterizado por que mediante un sistema informático se implementan las siguientes etapas:

- a) Se segmentan (SEG) dichas imágenes de aprendizaje (IAP) en al menos dos colores: un primer color para cada zona de dichas imágenes de aprendizaje (IAP) que no comprende ningún constituyente geológico, y al menos un segundo color para cada zona de dichas imágenes de aprendizaje (IAP) que comprende un constituyente geológico (3);
- b) Se dividen (DEC) dichas imágenes de aprendizaje (IAP) y dichas imágenes segmentadas en una pluralidad de viñetas;
- c) Se entrena un algoritmo de aprendizaje automático (ALG) de clasificación mediante dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje (IAP) y mediante dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje segmentadas para clasificar dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje (IAP) en función de dicho color de dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje segmentadas correspondientes;
- d) Se adquiere una imagen de dicha muestra de roca (IER);
- e) Se divide (DEC) dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca (IER) en una pluralidad de viñetas; y
- f) Se detecta dicho al menos un constituyente geológico (cge) en cada una de dichas viñetas de dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca (IER) aplicando un modelo (MED) formado por dicho algoritmo de aprendizaje automático (ALG) a dichas viñetas de dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca (IER).

2. Método de detección según la reivindicación 1, en el que dicho constituyente geológico (cge) se escoge de microfósiles, nanofósiles, restos vegetales, minerales y esporas de polen.

3. Método de detección según una de las reivindicaciones anteriores, en el que cada uno de dichos al menos segundos colores corresponde a un tipo de constituyente geológico (cge).

4. Método de detección según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el número de imágenes de aprendizaje (IAP) está comprendido entre 3 y 20, preferentemente entre 3 y 10.

5. Método de detección según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho algoritmo de aprendizaje automático (ALG) utiliza una red neuronal artificial, preferiblemente una red neuronal convolucional o una red neuronal totalmente convolucional.

6. Método de detección según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha imagen de dicha muestra de roca (IER) se adquiere a partir de una lámina delgada de dicha muestra de roca.

7. Método de detección según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha imagen de dicha muestra de roca (IER) se adquiere mediante un microscopio óptico o electrónico, con luz polarizada o no, una fotografía, un escáner de tomografía con sincrotrón, o imágenes de rayos X.

8. Método de detección según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho algoritmo de aprendizaje automático (ALG) se entrena para clasificar dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje (IAP), mediante análisis del color del píxel central de dichas viñetas de dichas imágenes segmentadas.

9. Método de detección según la reivindicación 8, en el que dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca (IER) se divide en una pluralidad de viñetas implementando, para cada píxel de dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca (IER), una división de una viñeta que rodea dicho píxel, y dicho modelo (MOD) formado por dicho aprendizaje automático (ALG) se utiliza para determinar si dicho píxel pertenece a dicho constituyente geológico (cge).

10. Método de detección según una de las reivindicaciones 1 a 7, en el que dicho algoritmo de aprendizaje automático (ALG) está entrenado para segmentar toda la superficie de dichas viñetas de dichas imágenes de aprendizaje para delimitar dichos constituyentes geológicos.

11. Método de detección según la reivindicación 10, en el que dichos constituyentes geológicos (cge) se detectan delimitando para cada viñeta de dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca (IER) dichos constituyentes geológicos.

12. Método de detección según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho método de detección comprende al menos una etapa adicional escogida de:

- Se calcula el número de constituyentes geológicos (cge) de dicha imagen adquirida de dicha muestra de roca (IER) a partir de la detección de dicho constituyente geológico, o
- Se determina la proporción del volumen de la muestra de roca ocupada por los constituyentes geológicos (cge) a partir de la detección de dicho constituyente geológico, o
- Se estiman las características morfológicas y/o texturales de dichos constituyentes geológicos (cge), o

- Se aplica un método de clasificación supervisada para categorizar dichos constituyentes geológicos (cge) desde la detección de dicho constituyente geológico.

13. Método de explotación de un suelo o subsuelo, en el que se implementan las siguientes etapas:

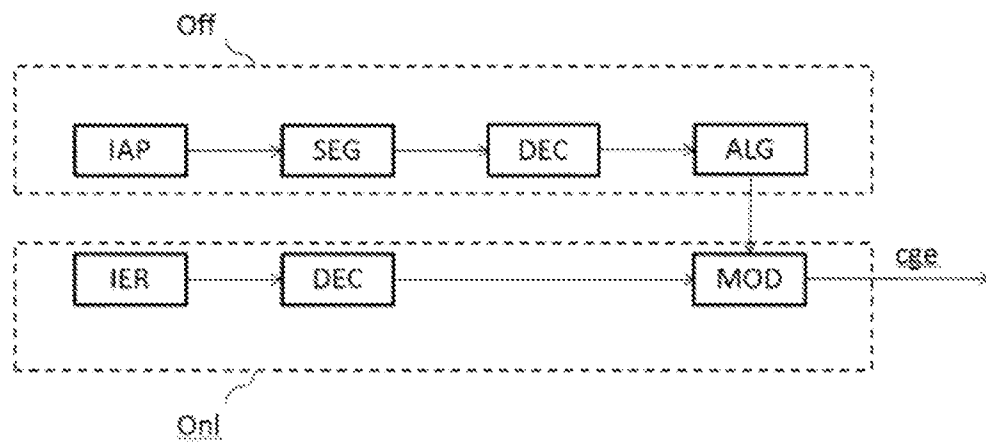
- a) Se detecta al menos un constituyente geológico (cge) de una muestra de roca mediante el método de detección según una de las reivindicaciones anteriores; y
- b) Se explota dicho suelo o dicho subsuelo en función de dicha detección de dicho constituyente geológico (cge) de dicha al menos una roca.

14. Método de explotación de un suelo o subsuelo según la reivindicación 13, en el que dicha explotación del suelo o del subsuelo se refiere a la construcción de una obra en dicho suelo o en el subsuelo, al almacenamiento de gas en el subsuelo, o a la explotación de materias primas de dicho suelo o de dicho subsuelo, siendo preferentemente dichas materias primas la roca en sí, o un material o fluido contenido en dicho suelo o en dicho subsuelo.

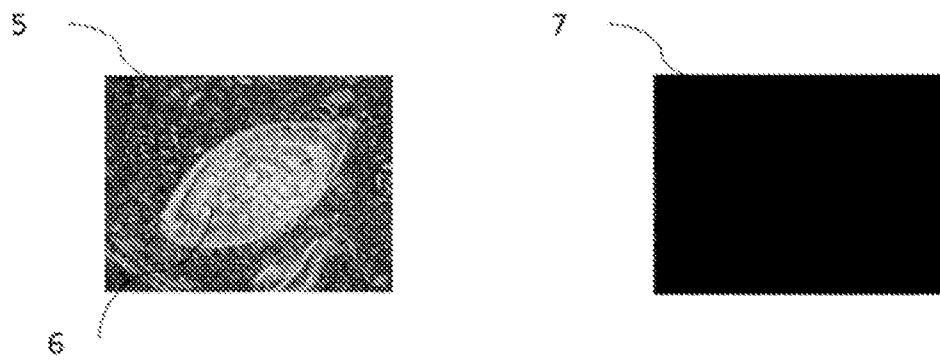
15. Método para determinar el clima en una zona geográfica a través de edades geológicas, en el que se implementan las siguientes etapas:

- a) Se toman al menos dos muestras de roca a diferentes profundidades de una formación subterránea;
- b) Se detecta al menos un constituyente geológico (cge) para cada muestra de roca mediante el método de detección según una de las reivindicaciones 1 a 12; y
- c) Se determina dicho clima así como la edad geológica en dicha zona geográfica en función de dicho al menos un constituyente geológico (cge) detectado.

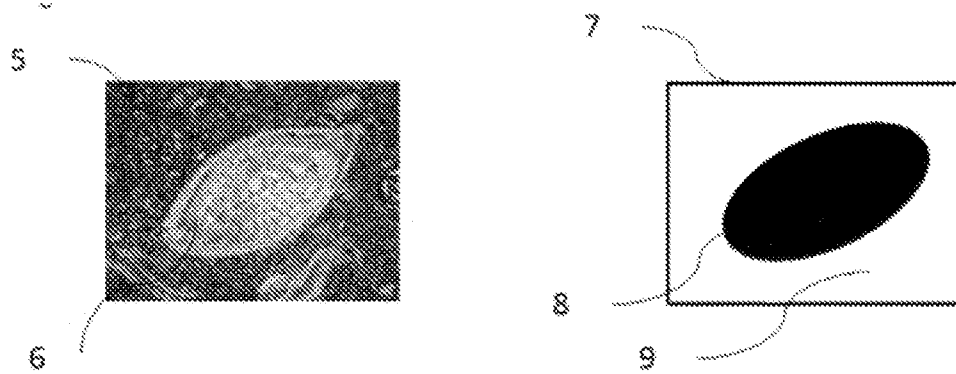
[Fig 1]



[Fig 2]



[Fig 3]



[Fig 4]

