

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 804 470**

51 Int. Cl.:

G01N 21/00 (2006.01)

G01V 99/00 (2009.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.11.2009 PCT/US2009/064513**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.06.2010 WO10071722**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.11.2009 E 09833793 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.04.2020 EP 2376893**

54 Título: **Modelo de flujo promediado por profundidad de múltiples capas superpuestas de una corriente de turbidez**

30 Prioridad:

18.12.2008 US 138889 P

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

08.02.2021

73 Titular/es:

**EXXONMOBIL UPSTREAM RESEARCH
COMPANY (100.0%)
22777 Springwoods Village Parkway
Spring, TX 77389, US**

72 Inventor/es:

**SUN, TAO;
LI, DACHANG;
WAGONER, JOHN, VAN y
WU, XIAO-HUI**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 804 470 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

Modelo de flujo promediado por profundidad de múltiples capas superpuestas de una corriente de turbidez

5 **Campo de la invención**

Esta invención se refiere, en general, al cálculo y modelado de corrientes de turbidez y, más específicamente, al cálculo y modelado eficaces de corrientes de turbidez con mezclas de sedimentos de distribuciones bimodales o multimodales que contienen una cantidad significativa de materiales finos.

10

Antecedentes de la invención

Esta sección pretende introducir diversos aspectos de la técnica, que pueden estar asociados a formas de realización de la invención. Al final de esta sección se proporciona una lista de referencias, a la que se podrá hacer referencia en lo sucesivo. Se considera que este análisis, incluidas las referencias, ayuda a proporcionar un marco para facilitar un mejor entendimiento de aspectos particulares de la invención. Por consiguiente, esta sección debe leerse con este propósito y no necesariamente como admisiones de la técnica anterior.

15

En las industrias del petróleo y el gas, los datos y la información acerca de depósitos subterráneos se introducen en modelos basados en la física y los procesos, que posteriormente se utilizan para generar modelos geológicos, ayudar a la interpretación y caracterización de los depósitos y realizar la generación de múltiples escenarios y la cuantificación de incertidumbre. La técnica adquiere especial importancia en las industrias del petróleo y el gas cuando se forman depósitos de interés en un entorno confinado o en entornos cerrados similares a cuencas.

20

Una característica del flujo de fluido se conoce como corriente de turbidez, que se puede definir como una corriente de flujo de fondo resultante de un fluido que tiene mayor densidad debido a que contiene sedimento en suspensión. Las corrientes de turbidez (también denominadas en el presente documento flujos de turbidez) son típicamente intermitentes, pero poseen una considerable potencia erosiva y transportan volúmenes apreciables de sedimento. Una corriente de turbidez es intrínsecamente tridimensional. En las corrientes de turbidez naturales, los sedimentos con grandes tamaños de partícula, tales como arena, se transportan principalmente en la capa inferior del flujo, mientras que los sedimentos con tamaños de partícula más pequeños, tales como arcilla y esquisto, se transportan de manera más uniforme a través de toda la capa de flujo. Esto se muestra en la Figura 1, que es una vista en alzado lateral de una corriente de turbidez 10 sobre una superficie sólida, tal como un lecho fluvial 11. El límite entre el agua turbia y el agua clara, que ocupa una posición más alta en el flujo de fluido, se muestra en 12. La región inferior 13 de la corriente de turbidez se puede denominar porción arenosa porque la mayor parte del sedimento transportado por la misma tiene un gran tamaño de partícula. La región superior 14 de la corriente de turbidez se puede denominar porción fangosa porque la mayor parte del sedimento transportado por la misma tiene un tamaño de partícula más pequeño. La cantidad de sedimento transportada por las regiones inferior y superior de la corriente de turbidez se ilustra mediante los perfiles de concentración de sedimento superpuestos 15, 16, que representan la concentración relativa de fango y arena, respectivamente, en función de la profundidad de flujo. Los perfiles de concentración de sedimentos 15, 16 se utilizan para definir el límite 17 entre las regiones superior e inferior 12, 13 de la corriente de turbidez y sirven como una división entre las mismas. Esta división o estratificación de los tipos de transporte de sedimentos puede verse fácilmente en la Figura 1. La estratificación tiene efectos significativos en las características del flujo, en las interacciones entre el flujo y la topografía subyacente, así como en la forma y las distribuciones espaciales de los depósitos de las formas de flujo. Los efectos son especialmente notables cuando las corrientes de turbidez se producen en un entorno confinado. La Figura 2 representa una sección transversal de una corriente de turbidez estratificada 20 en un canal de aguas profundas 21. La dirección de flujo principal es perpendicular a y fluye hacia afuera del dibujo. A medida que el agua clara por encima del límite de agua clara/turbia 22 es arrastrada hacia o incorporada en la corriente de turbidez por debajo del límite 22, el espesor de flujo global es a menudo mayor que la profundidad Z del canal de aguas profundas 21. En consecuencia, la corriente de turbidez 20 se esparce fuera del canal, como lo indican las flechas 23. Debido a la estratificación de la porción fangosa 24 y la porción arenosa 25 de la corriente de turbidez (como lo demuestran nuevamente los respectivos perfiles de concentración de sedimentos 26 y 27), solo los materiales de tamaño de grano fino asociados a la porción fangosa 24 de la corriente de turbidez son transportados fuera del canal, mientras que los materiales relativamente más gruesos asociados a la porción arenosa 25 quedan retenidos en el canal. Este proceso se conoce como separación de flujos. Si no hubiera estratificación, o si los modelos de flujo no tuvieran o no pudieran tener en cuenta la estratificación, se predeciría que la corriente de turbidez que se esparce fuera del canal contendría sedimento tanto de la porción arenosa 25 como de la porción fangosa 24 de la corriente de turbidez.

25

30

35

40

45

50

55

60

65

Si bien el efecto de la estratificación en el transporte y la deposición de sedimentos en las corrientes de turbidez es más pronunciado en un entorno confinado donde las interacciones entre el flujo y los límites circundantes son más fuertes, el efecto no se limita únicamente a aquellos entornos en los que el flujo está confinado. La estratificación también puede causar divergencia de las direcciones de flujo entre la parte arenosa del flujo y el flujo global si hay una variación sustancial de la topografía subyacente a la corriente de turbidez. Como se muestra en las Figuras 1 y 2, la parte arenosa de la corriente de turbidez es a menudo mucho más delgada que la profundidad total de la corriente de turbidez. Por lo tanto, la dirección de flujo de la porción arenosa se verá afectada con más probabilidad

que toda la corriente de turbidez por los contornos o topografía del lecho fluvial o fondo marino sobre el que fluye. La Figura 3 es una vista desde arriba de una corriente de turbidez 30 que tiene un patrón de flujo representado por la curva 31. La parte arenosa de la corriente de turbidez tiene un patrón de flujo representado por la curva 32. Se puede observar que la porción arenosa 32 seguirá la topografía inferior, tal como se ilustra mediante una serie de líneas de contorno 34, mucho más cerca que la corriente de turbidez global 30. La divergencia de la porción arenosa de la corriente de turbidez con respecto a la corriente global significa que los materiales gruesos y arenosos y los materiales finos y fangosos de la corriente pueden transportarse en diferentes direcciones dentro de la misma corriente de turbidez y también pueden depositarse o posarse en diferentes lugares. Por lo tanto, los depósitos formados o influidos por dichas corrientes de turbidez divergentes pueden verse afectados significativamente con respecto a la compartimentación y/o conectividad.

Los modelos basados en procesos que se utilizan para ayudar a interpretar o construir modelos geológicos de depósitos en los entornos de deposición deberían ser capaces de captar las características del flujo de turbidez, tales como la separación de flujos y la divergencia de flujos descritas en el presente documento. Desafortunadamente, mientras que los modelos tridimensionales de flujo completo son capaces de calcular con precisión las estructuras tridimensionales completas del flujo, implican un enorme esfuerzo y coste computacional y no son prácticos para su uso en los modelos basados en procesos que están diseñados para simular la formación de depósitos con escalas espaciales que oscilan entre cientos de metros y cientos de kilómetros, y con escalas de tiempo que oscilan entre cientos y millones de años. Por otro lado, los modelos bidimensionales de flujo promediados por profundidad para turbidez utilizados actualmente en modelos conocidos basados en procesos no son capaces de modelar la separación de flujos ni la divergencia de las capas de flujo inferior con respecto al flujo global promediado por profundidad. Por lo tanto, se considera que ningún procedimiento existente puede captar el efecto de la separación de flujos ni la divergencia de las direcciones de flujo de capa inferior con respecto a la dirección de flujo global y que, al mismo tiempo, siga siendo lo suficientemente eficaz desde el punto de vista computacional como para ser utilizado en modelos basados en procesos diseñados para simulaciones a gran escala y a largo plazo.

Se pretende que el análisis anterior acerca de la necesidad en la técnica sea representativo en lugar de exhaustivo. Una tecnología que aborde una o más de dichas necesidades, o alguna otra deficiencia relacionada en el campo, beneficiaría la perforación y la planificación del desarrollo de depósitos, por ejemplo, proporcionando decisiones o planes para desarrollar un depósito de manera más eficaz y más rentable.

Otro material relacionado se puede encontrar en los siguientes documentos: Solicitud WO2006/036389 A2 de PCT; García y Parker, *Entrainment of bed sediment into suspension*, J. Hyd. Eng., 117(4), 414-435, 1991; y en el documento de Parker, G., Fukushima, Y., y Pantin, H. M., "*Self-Accelerating Turbidity Currents*", J. Fluid Mech., 171, 145-181, 1986. El documento WO2006/036389A2 divulga un procedimiento para simular la formación de depósitos sedimentarios. El procedimiento implica, (a) resolver un sistema de ecuaciones de vistas de mapas bidimensionales dependientes del tiempo para al menos un momento de flujo, una concentración de sedimento suspendido en altura de flujo y el arrastre de agua superpuesta, (b) calcular la deposición neta de sedimento en cada ubicación de vista de mapa usando las propiedades de flujo, (c) registrar la variabilidad en el tiempo de la deposición neta de sedimento.

Resumen de la invención

La invención proporciona un procedimiento para generar un modelo de una corriente de turbidez en un flujo de fluido dentro de un depósito de hidrocarburos de acuerdo con la reivindicación 1.

La invención también proporciona un procedimiento para generar un modelo de una corriente de turbidez en un flujo de fluido dentro de un depósito de hidrocarburos de acuerdo con la reivindicación 9.

Breve descripción de los dibujos

Las ventajas anteriores, y otras, de la invención pueden resultar evidentes tras revisar la siguiente descripción detallada y dibujos de ejemplos no limitativos de formas de realización, en los que:

la Figura 1 es una vista en alzado lateral de perfiles de concentración en una corriente de turbidez;

la Figura 2 es una sección transversal de una corriente de turbidez estratificada en un canal de aguas profundas;

la Figura 3 es un diagrama esquemático que muestra la divergencia de direcciones de flujo para la parte inferior de la capa arenosa del flujo con respecto a la dirección del flujo global;

la Figura 4 es una vista en alzado lateral de una corriente de turbidez que ilustra un modelo de flujo de dos capas de acuerdo con la invención;

la Figura 5 es una vista en alzado lateral que ilustra un modelo de flujo de tres capas de acuerdo con la invención;

la Figura 6 es un diagrama de flujo que muestra un procedimiento de acuerdo con la invención;

la Figura 7 es un diagrama de flujo que muestra otro procedimiento de acuerdo con la invención; y la Figura 8 es un diagrama de bloques que muestra un entorno informático de acuerdo con la invención.

5 La invención se describirá en relación con sus formas de realización preferidas. Sin embargo, en la medida en que la siguiente descripción detallada sea específica a una forma de realización particular o a un uso particular de la invención, su finalidad es únicamente ilustrativa y no debe interpretarse que limita el alcance de la invención. Por el contrario, se pretende cubrir todas las alternativas, modificaciones y equivalencias que puedan incluirse dentro del alcance de la invención, definido por las reivindicaciones adjuntas.

10 Descripción detallada de formas de realización preferidas

En la siguiente sección de descripción detallada, las formas de realización específicas de la invención se describen en relación con formas de realización preferidas. Sin embargo, en la medida en que la siguiente descripción es específica a una forma de realización particular o un uso particular de la invención, su finalidad es meramente ilustrativa y simplemente proporciona una descripción de las formas de realización proporcionadas en el presente documento como ejemplos representativos de la invención.

15 Algunas partes de la siguiente descripción detallada se presentan en lo que respecta a procedimientos, etapas, bloques lógicos, procesamiento y otras representaciones simbólicas de operaciones en bits de datos en una memoria informática. Estas descripciones y representaciones son los medios utilizados por los expertos en la técnica de procesamiento de datos para transmitir de la manera más eficaz el contenido de su trabajo a otros expertos en la técnica. En esta descripción detallada, un procedimiento, etapa, bloque lógico, proceso, o similares, se conciben como una secuencia autoconsistente de etapas o instrucciones que conducen a un resultado deseado. Las etapas son aquellas que requieren manipulaciones físicas de cantidades físicas. Por lo general, aunque no necesariamente, estas cantidades adoptan la forma de señales eléctricas o magnéticas capaces de ser almacenadas, transferidas, combinadas, comparadas y manipuladas de otro modo en un sistema informático.

20 Algunas partes de la siguiente descripción detallada se presentan en lo que respecta a procedimientos, etapas, bloques lógicos, procesamiento y otras representaciones simbólicas de operaciones en bits de datos en una memoria informática. Estas descripciones y representaciones son los medios utilizados por los expertos en la técnica de procesamiento de datos para transmitir de la manera más eficaz el contenido de su trabajo a otros expertos en la técnica. En esta descripción detallada, un procedimiento, etapa, bloque lógico, proceso, o similares, se conciben como una secuencia autoconsistente de etapas o instrucciones que conducen a un resultado deseado. Las etapas son aquellas que requieren manipulaciones físicas de cantidades físicas. Por lo general, aunque no necesariamente, estas cantidades adoptan la forma de señales eléctricas o magnéticas capaces de ser almacenadas, transferidas, combinadas, comparadas y manipuladas de otro modo en un sistema informático.

25 A menos que se indique específicamente lo contrario como resulta evidente a partir del siguiente análisis, términos tales como "definir", "incluir", "desarrollar", "usar", "proporcionar", "predecir", "caracterizar", "localizar", "modelar" o similares, pueden hacer referencia a la acción y los procesos de un sistema informático, o dispositivo informático electrónico similar, que manipula y transforma los datos representados como cantidades físicas dentro de los registros y memorias del sistema informático en otros datos representados de manera similar como cantidades físicas dentro de las memorias o registros del sistema informático u otros dispositivos de almacenamiento, transmisión o visualización de información. Estos y otros términos similares deben asociarse a las cantidades físicas adecuadas y son simplemente etiquetas convenientes aplicadas a estas cantidades.

30 Las formas de realización de la invención también se refieren a un aparato para realizar las operaciones del presente documento. Este aparato puede fabricarse especialmente para los fines requeridos, o puede comprender un ordenador de propósito general activado selectivamente o reconfigurado por un programa informático almacenado en el ordenador. Dicho programa informático puede almacenarse en un medio legible por ordenador. Un medio legible por ordenador incluye cualquier mecanismo para almacenar o transmitir información en una forma legible por una máquina, tal como un ordenador ('máquina' y 'ordenador' se utilizan indistintamente en el presente documento). Como ejemplo no limitativo, un medio legible por ordenador puede incluir un medio de almacenamiento legible por ordenador (por ejemplo, una memoria de solo lectura ("ROM"), una memoria de acceso aleatorio ("RAM"), un medio de almacenamiento en disco magnético, un medio de almacenamiento óptico, dispositivos de memoria flash, etc.) y un medio de transmisión legible por ordenador (tal como señales eléctricas, ópticas, acústicas u otra forma de señales propagadas (por ejemplo, ondas portadoras, señales infrarrojas, señales digitales, etc.)).

35 Además, como será evidente para un experto en la técnica, los módulos, características, atributos, metodologías y otros aspectos de la invención se pueden implementar como software, hardware, firmware o cualquier combinación de los mismos. Cuando un componente de la invención se implemente como software, el componente se puede implementar como un programa autónomo, como parte de un programa más grande, como una pluralidad de programas individuales, como una biblioteca enlazada de forma estática o dinámica, como un módulo cargable en núcleo (*kernel*), como un controlador de dispositivo y/o de cualquier otra manera conocida en la actualidad o en el futuro por los expertos en la técnica de la programación informática. Además, la invención no se limita a la implementación en un sistema operativo o entorno específicos.

40 La invención es un procedimiento para representar y calcular corrientes de turbidez con múltiples capas superpuestas. El procedimiento captura estructuras de flujo vertical esenciales que se encuentran en corrientes de turbidez que son importantes para representar y modelar con precisión el transporte y la deposición de sedimentos y, posteriormente, la formación y evolución de cuerpos sedimentarios y arquitecturas de depósitos. La invención es computacionalmente eficiente y se puede utilizar en aplicaciones que implican el cálculo y modelado de corrientes de turbidez. Ejemplos de esas aplicaciones incluyen la ingeniería costera, la investigación y gestión medioambiental, la ingeniería naval, el diseño y la planificación de guerra submarina, la construcción y el mantenimiento de cables submarinos de telecomunicaciones y las industrias del petróleo y el gas.

De acuerdo con la invención, la corriente de turbidez se describe mediante múltiples conjuntos de variables de flujo promediadas por profundidad correspondientes a múltiples capas estratificadas en el flujo. Todas estas capas están superpuestas, en el sentido de que la (n+1)-ésima capa siempre incluye la n-ésima capa. Por ejemplo, la Figura 4 ilustra un modelo de una corriente o flujo de turbidez 40 usando una capa inferior 42 y una capa superior 44. Un modelo de dos capas supone que el flujo de turbidez en consideración puede ser descrito mediante dos capas estratificadas. Como se ilustra en la Figura 4, todo el flujo se caracteriza por dos conjuntos de variables de flujo promediadas por profundidad. El primer conjunto de variables de flujo representa la capa inferior 42 del flujo, donde se transporta toda la arena. El primer conjunto de variables de flujo incluye la profundidad h_s (medida en relación con un dato seleccionado 45), la componente x de la velocidad de flujo promediada por profundidad u_{xs} , la componente y de la velocidad de flujo promediada por profundidad u_{ys} , la concentración de arena C_i , con $i=1,2,\dots, n_s$, donde n_s es el número discreto de rangos seleccionados de acuerdo con diferentes tamaños de grano de la arena involucrada en el transporte, donde la concentración de arena total C_s viene dada por

$$C_s = \sum_{i=1}^{n_s} C_i \quad [1]$$

El segundo conjunto de variables de flujo utilizadas para caracterizar el flujo representa todo el flujo, que incluye todas las capas estratificadas, que en el ejemplo ilustrado en la Figura 4 incluiría la capa inferior 42 y la capa superior 44. El segundo conjunto de variables de flujo incluye la profundidad de flujo total h , la componente x de la velocidad de flujo promediada por profundidad u_x para todo el flujo, la componente y de la velocidad de flujo promediada por profundidad u_y para todo el flujo, la concentración de fango C_i , con $i = n_s + 1, n_s + 2, \dots, n$, donde n es el número total de rangos para diferentes tamaños de materiales arenosos y fangosos. La convención que se utilizará supone que los n_s primeros rangos son para tamaños de grano de arena discretos, y los $n - n_s$ rangos restantes son para tamaños de grano de fango discretos. La concentración total de fango C_m es entonces

$$C_m = \sum_{i=n_s+1}^n C_i \quad [2]$$

El modelo de la corriente de turbidez, que se caracteriza completamente por el primer y el segundo conjunto de variables de flujo como se define anteriormente, se obtiene entonces resolviendo el siguiente conjunto de ecuaciones.

La ecuación de equilibrio de momento para la componente x de todo el flujo puede escribirse como

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x h}{\partial t} + \frac{\partial u_x^2 h}{\partial x} + \frac{\partial u_x u_y h}{\partial y} = & -\frac{1}{2} Rg \frac{\partial C_m}{\partial x} h^2 - Rg C_m \frac{\partial h}{\partial x} h - Rg (C_m h + C_s h_s) \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & - \alpha_s Rg C_s \frac{\partial h_s}{\partial x} - \frac{1}{2} \alpha_s Rg h_s^2 \frac{\partial C_s}{\partial x} - u^{*2} \frac{u_{xb}}{\sqrt{u_{xb}^2 + u_{yb}^2}} + \Delta_x \end{aligned} \quad [3]$$

La ecuación de equilibrio de momento para la componente y de todo el flujo puede escribirse como

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_y h}{\partial t} + \frac{\partial u_x u_y h}{\partial x} + \frac{\partial u_y^2 h}{\partial y} = & -\frac{1}{2} Rg \frac{\partial C_m}{\partial y} h^2 - Rg C_m \frac{\partial h}{\partial y} h - Rg (C_m h + C_s h_s) \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & - \alpha_s Rg C_s \frac{\partial h_s}{\partial y} - \frac{1}{2} \alpha_s Rg h_s^2 \frac{\partial C_s}{\partial y} - u^{*2} \frac{u_{yb}}{\sqrt{u_{xb}^2 + u_{yb}^2}} + \Delta_y \end{aligned} \quad [4]$$

La ecuación de conservación de masa para el fluido para todo el flujo puede escribirse como

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u_x h}{\partial x} + \frac{\partial u_y h}{\partial y} = \varepsilon_w - \delta_w \quad [5]$$

La ecuación de conservación de masa para los materiales fangosos para todo el flujo puede escribirse como

$$\frac{\partial h C_i}{\partial t} + \frac{\partial h u_x C_i}{\partial x} + \frac{\partial h u_y C_i}{\partial y} = E_i - D_i \quad \text{para } i = n_s + 1, n_s + 2, \dots, n \quad [6]$$

La ecuación de equilibrio de momento para la componente x para la capa arenosa del flujo puede escribirse como

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{xs} h_s}{\partial t} + \frac{\partial u_{xs}^2 h_s}{\partial x} + \frac{\partial u_{xs} u_{ys} h_s}{\partial y} = -\frac{1}{2} \alpha_s Rg \frac{\partial C_s}{\partial x} h_s^2 - \alpha_s Rg C_s \frac{\partial h_s}{\partial x} h_s - Rg(C_s + C_m) \frac{\partial \eta}{\partial x} h_s \\ - Rg C_m \frac{\partial h}{\partial x} h_s - Rgh_s \left(h - \frac{1}{2} h_s \right) \frac{\partial C_m}{\partial x} - u^{*2} \frac{u_{xb}}{\sqrt{u_{xb}^2 + u_{yb}^2}} + \Delta_{xs} \end{aligned} \quad [7]$$

La ecuación de equilibrio de momento para la componente y para la capa arenosa del flujo puede escribirse como

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{ys} h_s}{\partial t} + \frac{\partial u_{xs} u_{ys} h_s}{\partial x} + \frac{\partial u_{ys}^2 h_s}{\partial y} = -\frac{1}{2} \alpha_s Rg \frac{\partial C_s}{\partial y} h_s^2 - \alpha_s Rg C_s \frac{\partial h_s}{\partial y} h_s - Rg(C_s + C_m) \frac{\partial \eta}{\partial y} h_s \\ - Rg C_m \frac{\partial h}{\partial y} h_s - Rgh_s \left(h - \frac{1}{2} h_s \right) \frac{\partial C_m}{\partial y} - u^{*2} \frac{u_{yb}}{\sqrt{u_{xb}^2 + u_{yb}^2}} + \Delta_{ys} \end{aligned} \quad [8]$$

5

La ecuación de conservación de masa para el fluido (incluyendo partículas de arena y partículas de fango) para la capa arenosa del flujo puede escribirse como

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial u_{xs} h_s}{\partial x} + \frac{\partial u_{ys} h_s}{\partial y} = \varepsilon_{ws} - \delta_{ws} \quad [9]$$

10

La ecuación de conservación de masa para los materiales arenosos puede escribirse como

$$\frac{\partial h_s C_i}{\partial t} + \frac{\partial h_s u_{xs} C_i}{\partial x} + \frac{\partial h_s u_{ys} C_i}{\partial y} = E_i - D_i \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n_s \quad [10]$$

15

En las ecuaciones anteriores, g es la constante gravitacional, η es la elevación del lecho fluvial o fondo marino con

$$R = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

respecto al dato 45, y R es el peso específico sumergido de los sedimentos, donde ρ_w y ρ_s y ρ_w son la densidad de sedimentos y la densidad del agua, respectivamente. En las ecuaciones [3], [4], [7] y [8], α_s es el parámetro de estratificación que caracteriza la variación vertical de la concentración de arena dentro de la capa arenosa del flujo.

20

En las mismas ecuaciones, u^* es la velocidad de fricción para el flujo de lecho cercano, que es la velocidad del flujo de fluido adyacente al suelo no arrastrado o no erosionado de un depósito, y u_{xb} y u_{yb} son las componentes x e y de la velocidad de flujo de lecho cercano, respectivamente, donde

25

$$u_{xb} = \begin{cases} u_{xs} & \text{si } h_s > 0 \\ u_x & \text{si } h_s = 0 \end{cases} \quad [11]$$

Asimismo,

$$u_{yb} = \begin{cases} u_{ys} & \text{si } h_s > 0 \\ u_y & \text{si } h_s = 0 \end{cases} \quad [12]$$

30

En la ecuación [5], ε_w es la función de arrastre y δ_w es la función de expulsión. La función de arrastre caracteriza la tasa a la que el agua clara estacionaria, por encima del agua turbia que fluye, es arrastrada hacia el agua turbia, convirtiéndose así en parte del flujo. La función de arrastre adopta muchas formas diferentes. Una función de arrastre preferida, utilizada por Parker et al. (1986), es

35

$$\varepsilon_w = \frac{0.00153}{0.0204 + R_i}, \quad [13]$$

donde R_i es el número de Richardson y es igual a la inversa de la raíz cuadrada del conocido número de Froude F_r , a saber:

40

$$R_i = \frac{1}{F_r^2}, \quad [14]$$

y

$$F_r = \sqrt{\frac{u_x^2 + u_y^2}{RghC}} \quad [15]$$

5 La función de expulsión caracteriza la sedimentación del sedimento desde la parte más superior del flujo, que expulsa el agua clara desde la corriente de turbidez y la devuelve al entorno circundante. La función de expulsión también está relacionada con la reducción de la altura de flujo total debido a la sedimentación del sedimento desde la parte más superior del flujo de turbidez. Una función de expulsión aceptable, aplicable a las corrientes de turbidez
10 que transportan sedimentos de múltiples tamaños de grano, es

$$\delta_{w^*} = v_s (D^*), \quad [16]$$

15 donde D^* es el tamaño de grano efectivo que caracteriza la interfase de sedimentación general del flujo de turbidez y v_s es la velocidad de sedimentación correspondiente a D_s^* . El valor real de D^* podría variar desde el tamaño de grano mínimo hasta el tamaño de grano medio geométrico del sedimento presente en el flujo. Un ejemplo de las posibles opciones para D^* es

$$D^* = D_{10} \quad [17]$$

20 donde D_{10} es el diámetro del percentil 10 en la distribución de arena. También se pueden utilizar otras funciones de expulsión con la invención.

25 Similares, pero no idénticas a ϵ_w y δ_w , las funciones ϵ_{ws} y δ_{ws} en la ecuación [9] son la función de arrastre entre capas y de expulsión entre capas, que caracterizan la tasa a la que la capa fangosa del agua situada por encima es arrastra hacia la capa arenosa móvil del flujo inferior, y la tasa de la reducción de la altura de flujo arenoso debido a la sedimentación de los materiales arenosos desde la parte superior de la capa de flujo arenoso, respectivamente. Se puede utilizar el siguiente procedimiento para estimar el coeficiente de arrastre entre capas ϵ_{ws} :

$$e_{ws} = \frac{0.00153}{0.0204 + R_{is}}, \quad [18]$$

30 donde R_{is} el número de Richardson efectivo para la capa arenosa del flujo, que puede evaluarse a partir de

$$R_{is} = \left[\frac{(u_{xs} - u_x)^2 + (u_{ys} - u_y)^2 + u_{xs}^2 + u_{ys}^2 + u_x^2 + u_y^2}{2RghC_s} \right]^{-1} \quad [19]$$

35 La tasa de arrastre entre capas puede entonces evaluarse utilizando la siguiente fórmula:

$$\epsilon_{ws} = \sqrt{(u_{xs}^2 + u_{ys}^2)} e_{ws} \quad [20]$$

40 Se considera que la ecuación [14] representa una mejora con respecto a la definición original para el número de Richardson usando la velocidad de flujo promediada por profundidad simple U :

$$R_i = \left[\frac{U^2}{RghC_s} \right]^{-1} \quad [21]$$

45 Por lo tanto, la velocidad de flujo promediada por profundidad U se reemplaza por la velocidad de fricción efectiva en el límite entre capas de la capa estratificada.

El modelo de arrastre entre capas descrito anteriormente de la presente invención tiene en cuenta las propiedades turbulentas del flujo cuando se estima la velocidad de fricción entre capas efectiva. La formulación para la velocidad de fricción entre capas efectiva que se muestra en la ecuación [19] puede obtenerse de la siguiente manera. Denoten \tilde{u}_{xs} y \tilde{u}_{ys} las fluctuaciones turbulentas de la velocidad de flujo en la capa de arena (capa 2 en la Fig. 4), y denoten \tilde{u}_x y \tilde{u}_y las fluctuaciones turbulentas de la velocidad de flujo en toda la capa, es decir, la capa de fondo (capas 1 y 2 combinadas). De la definición del flujo turbulento se deduce que:

$$\langle u_{xs} + \tilde{u}_{xs} \rangle = u_{xs} \quad [22]$$

$$\langle u_{ys} + \tilde{u}_{ys} \rangle = u_{ys} \quad [23]$$

$$\langle u_x + \tilde{u}_x \rangle = u_x \quad [24]$$

$$\langle u_y + \tilde{u}_y \rangle = u_y \quad [25]$$

5 aquí $\langle \rangle$ denota un promedio de tiempo sobre escalas de tiempo de remolinos turbulentos característicos.

El cuadrado de la magnitud promedio de la velocidad de fricción en el límite de la capa de arena puede estimarse mediante:

$$\begin{aligned} U^2 &= \Psi \langle (u_x + \tilde{u}_x - u_{xs} - \tilde{u}_{xs})^2 + (u_y + \tilde{u}_y - u_{ys} - \tilde{u}_{ys})^2 \rangle \\ &= \Psi \left[\langle u_x - u_{xs} \rangle^2 + \langle u_y - u_{ys} \rangle^2 + \langle \tilde{u}_x^2 \rangle + \langle \tilde{u}_{xs}^2 \rangle + \langle \tilde{u}_y^2 \rangle + \langle \tilde{u}_{ys}^2 \rangle \right] \quad [26] \\ &= \Psi \left[\langle u_x - u_{xs} \rangle^2 + \langle u_y - u_{ys} \rangle^2 + u_x^2 + u_{xs}^2 + u_y^2 + u_{ys}^2 \right] \end{aligned}$$

donde Ψ es un factor constante a determinar. En las etapas mostradas en la ecuación [26] se ha usado el siguiente orden de aproximaciones de magnitud

$$\langle \tilde{u}_x^2 \rangle \approx \langle u_x^2 \rangle = u_x^2 \quad [27]$$

$$\langle \tilde{u}_y^2 \rangle \approx \langle u_y^2 \rangle = u_y^2 \quad [28]$$

$$\langle \tilde{u}_{xs}^2 \rangle \approx \langle u_{xs}^2 \rangle = u_{xs}^2 \quad [29]$$

$$\langle \tilde{u}_{ys}^2 \rangle \approx \langle u_{ys}^2 \rangle = u_{ys}^2 \quad [30]$$

20 En cuanto al flujo de una sola capa, donde $u_x = u_y = 0$, el cuadrado de la magnitud promediada de la velocidad de fricción dada por la ecuación [26] es $2\Psi(u_{xs}^2 + u_{ys}^2)$ y debe ser igual a $(u_{xs}^2 + u_{ys}^2)$ según la definición clásica del número de Richardson. Por lo tanto, resulta evidente que

$$\Psi = \frac{1}{2} \quad [31]$$

y

$$U^2 = \frac{1}{2} \left[\langle u_x - u_{xs} \rangle^2 + \langle u_y - u_{ys} \rangle^2 + u_x^2 + u_{xs}^2 + u_y^2 + u_{ys}^2 \right] \quad [32]$$

30 que da lugar a la estimación de R_{is} dada en la ecuación [19].

En las ecuaciones [6] y [10], E_i y D_i son las funciones de erosión y deposición que caracterizan la tasa de erosión de sedimento en el i -ésimo rango de tamaño de grano desde el fondo hacia el flujo y la tasa de deposición de sedimento en el i -ésimo rango de tamaño de grano hasta el fondo desde el flujo, respectivamente. Una función de erosión E_i comúnmente utilizada que expresa la tasa de arrastre (o erosión) de sedimento de rango i de tamaño de grano en el flujo desde el lecho es

$$E_i = \frac{a_z Z_i^5}{1 + \frac{a_z Z_i^5}{e_m}} v_{si} G_i \quad [33]$$

40 donde Z_i es una función definida como

$$Z_i = \lambda \frac{u^*}{v_{si}} f(R_{pi}) \left(\frac{D_i}{D_{50}} \right)^{0.2} \quad [34]$$

en la que

45

$$f(R_{pi}) = \begin{cases} R_{pi}^{0.6} & \text{si } R_{pi} > 2.36 \\ 0.586R_{pi}^{1.23} & \text{si } R_{pi} \leq 2.36 \end{cases} \quad [35]$$

y

$$5 \quad \lambda = 1 - 0.288\sigma. \quad [36]$$

En la ecuación [33], G_i es el porcentaje volumétrico de los sedimentos del rango i de tamaño de grano en la capa de superficie, a_z es una constante y tiene típicamente un valor de $1,3 \times 10^{-7}$, e_m es el valor máximo de la tasa de erosión

10 $\frac{E_i}{v_{si}G_i}$ adimensional y establece el límite superior de la función de erosión. En la ecuación [34], D_{50} es el diámetro del grano de sedimento en el percentil 50 en la distribución. En la ecuación [36], σ es la desviación típica de la distribución de tamaño de grano en las unidades logarítmicas "phi" familiares para los geólogos. Otras funciones de erosión se pueden utilizar con la invención, según se desee.

15 Una función de deposición D_i que se puede utilizar con la invención es la función de deposición para sedimento en agua estancada, expresada como

$$D_i = r_0 C_i v_{si} \quad [37]$$

20 donde r_0 es un coeficiente de modelo que relaciona la concentración de sedimento a granel con la concentración de lecho cercano, y v_{si} es la velocidad de sedimentación de los sedimentos en el rango i de tamaño de grano. La función de velocidad de sedimentación $v_s(D)$ para un grano de sedimento con diámetro D se puede especificar de varias maneras diferentes como se conoce en la técnica.

25 En las ecuaciones [3] y [4], Δ_x y Δ_y son la tasa de cambio (disminución) de las componentes x e y del momento de flujo debido a la expulsión neta del agua. Pueden evaluarse como

$$\Delta_x = (\varepsilon_w - \delta_w)u_x \quad \text{si } \varepsilon_w - \delta_w < 0.0 \quad [38]$$

o

$$30 \quad \Delta_x = 0 \quad \text{si } \varepsilon_w - \delta_w > 0.0 \quad [39]$$

Asimismo,

$$35 \quad \Delta_y = (\varepsilon_w - \delta_w)u_y \quad \text{si } \varepsilon_w - \delta_w < 0.0 \quad [40]$$

o

$$\Delta_y = 0 \quad \text{si } \varepsilon_w - \delta_w > 0.0 \quad [41]$$

40 En correspondencia con Δ_x y Δ_y en las ecuaciones [3] y [4], Δ_{xs} y Δ_{ys} en las ecuaciones [7] y [8] son la tasa de cambio de las componentes x e y de la capa arenosa del momento de flujo debido al arrastre neto entre capas o la expulsión del flujo entre capas. Pueden calcularse a partir de:

$$45 \quad \Delta_{xs} = (\varepsilon_{ws} - \delta_{ws})u_{xs} \quad \text{si } \varepsilon_{ws} - \delta_{ws} < 0.0 \quad [42]$$

o

$$50 \quad \Delta_{xs} = (\varepsilon_{ws} - \delta_{ws})u_x \quad \text{si } \varepsilon_{ws} - \delta_{ws} > 0.0. \quad [43]$$

Asimismo,

$$\Delta_{ys} = (\varepsilon_{ws} - \delta_{ws})u_{ys} \quad \text{si } \varepsilon_{ws} - \delta_{ws} < 0.0 \quad [44]$$

o

$$55 \quad \Delta_{ys} = (\varepsilon_{ws} - \delta_{ws})u_y \quad \text{si } \varepsilon_{ws} - \delta_{ws} > 0.0 \quad [45]$$

En el presente procedimiento inventivo, no es necesario que todas las capas estén presentes en todos los puntos a lo largo de una trayectoria de flujo durante el transcurso de una simulación. Sin pérdida de generalidad, la configuración de dos capas se utiliza a continuación como ejemplo de esto. Una corriente de turbidez con mezcla de arena y fango se representa en el modelo mediante una capa de arena en la parte inferior de toda la capa de flujo. A medida que la corriente de turbidez fluye desde el extremo proximal de la cuenca hasta el extremo distal de la cuenca, se deposita arena. En un extremo muy distal de la cuenca, podría haber un punto más allá del cual no se transporta más arena en el flujo. A partir de ese momento, la capa de arena tendrá grosor cero, y el modelo no necesita incluir una segunda capa en esas ubicaciones. Por lo tanto, el modelo solo tendrá una capa en esas ubicaciones. Por otro lado, cuando un fluido, tal como una corriente de turbidez fangosa, pasa sobre un lecho arenoso, la corriente de turbidez puede comenzar a arrastrar arena. Si la corriente de turbidez fangosa no contenía previamente arena y no tenía una capa de arena, el modelo tendrá que iniciar la capa de arena para representar la arena recién arrastrada en el flujo.

El inicio de una capa de arena puede realizarse en el presente procedimiento inventivo de la siguiente manera. Cuando hay arrastre de arena desde un lecho arenoso a un flujo que no contiene previamente arena, se crea una capa arenosa en el flujo para representar la porción de arena recién añadida en el flujo. La profundidad inicial Δh , la velocidad de flujo inicial u_{xs} , u_{ys} de la capa de arena recién creada, y la concentración de arena asociada en la nueva capa de arena C_i , para $i = 1, 2, 3, \dots, n_s$ puede venir dada por

$$\Delta h = \begin{cases} 0, & \text{si } e_{\max} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - \delta_{ws} < 0 & [46] \\ \Delta t(e_{\max} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - \delta_{ws}), & \text{si } \Delta t(e_{\max} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - \delta_{ws}) \leq h_m \text{ y } e_{\max} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - \delta_{ws} \geq 0 & [47] \\ h_m, & \text{si } \Delta t(e_{\max} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - \delta_{ws}) > h_m \text{ y } e_{\max} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - \delta_{ws} \geq 0 & [48] \end{cases}$$

$$u_{xs} = u_x, \quad [49]$$

$$u_{ys} = u_y, \quad [50]$$

$$C_i = \begin{cases} \frac{E_i}{e_{\max} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - \delta_{ws}} & \text{si } \frac{E_i}{e_{\max} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - \delta_{ws}} \leq C_{iM} & \text{para } i = 1, 2, \dots, n_s & [51] \\ C_{iM} & \text{si } \frac{E_i}{e_{\max} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - \delta_{ws}} > C_{iM} & \text{para } i = 1, 2, \dots, n_s & [52] \end{cases}$$

$$C_s = \sum_{i=1}^{n_s} C_i \quad [53]$$

donde los parámetros h_m , C_{iM} y e_{\max} pueden definirse mediante

$$h_m = \frac{1}{RgC_{sM}} \left[0.00153 \frac{u_x^2 + u_y^2}{\delta_{ws}} - 0.0204 \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \right]^2 \quad [54]$$

$$C_{iM} = \frac{E_i}{r_0 v_{si}} \text{ para } i = 1, 2, \dots, n_s \quad [55]$$

$$e_{\max} = \frac{0.00153}{0.0204 + R_i} \Big|_{R_i=0} = \frac{0.00153}{0.0204} \quad [56]$$

En la ecuación [54],

$$C_{sM} = \sum_{i=1}^{n_s} C_{iM} \quad [57]$$

En la ecuación [54], h_m se obtiene en función de la consideración de que

$$\frac{0.00153}{0.0204 + R_i(h = h_m, C = C_{sM})} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \geq \delta_{ws} \quad [58]$$

5 para la capa arenosa recién formada.

Como se explicó anteriormente, se pueden utilizar diferentes modelos de erosión y resuspensión con la invención. La velocidad de fricción de lecho cercano u^* utilizada en los modelos de erosión y resuspensión se puede evaluar utilizando la velocidad promediada por capas correspondiente a la capa más inferior existente en esa ubicación. Por ejemplo, en la configuración de dos capas, si hay una capa de arena en la ubicación, la velocidad de fricción u^* se puede calcular como

$$10 \quad u^* = C_f^{1/2} \sqrt{u_{sx}^2 + u_{sy}^2} . \quad [59]$$

15 Si no hay capa de arena en la ubicación, la velocidad de fricción u^* puede evaluarse entonces como

$$u^* = C_f^{1/2} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} . \quad [60]$$

Una forma alternativa de calcular u^* es vincularla a la energía cinética turbulenta promediada por capas en cada capa de flujo diferente, es decir K y K_s en la configuración de dos capas. En ese caso, K es la energía cinética turbulenta promediada en relación con toda la capa de flujo y K_s es la promediada en relación con la capa de arena. Si no hay ninguna capa de arena en la ubicación, la velocidad de fricción u^* se calculará entonces como

$$20 \quad u^* = \alpha K_s , \quad [61]$$

o si no hay ninguna capa de arena en la ubicación, la velocidad de fricción u^* se evaluará entonces como

$$u^* = \alpha K . \quad [62]$$

30 En las ecuaciones anteriores, la energía cinética turbulenta K y K_s puede obtenerse resolviendo simultáneamente las ecuaciones de conservación de energía cinética turbulenta promediada por capas que se muestran a continuación con las otras ecuaciones de control entre las ecuaciones [3] a [10]. La conservación de la energía cinética turbulenta de la capa de arena puede expresarse como

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_s h_s}{\partial t} + \frac{\partial u_{xs} K_s h_s}{\partial x} + \frac{\partial u_{ys} K_s h_s}{\partial y} = & u^{*2} \frac{u_{xb}}{\sqrt{u_{xb}^2 + u_{yb}^2}} u_{xs} + u^{*2} \frac{u_{yb}}{\sqrt{u_{xb}^2 + u_{yb}^2}} u_{ys} - \Delta_{xs} u_{xs} - \Delta_{ys} u_{ys} + \Delta_{Es} \\ & + \frac{1}{2} (u_{xs}^2 + u_{ys}^2) (\epsilon_{ws} - \delta_{ws}) - \beta_K K_s^{3/2} \\ & - 2\alpha_s Rgh_s \sum_{i=1}^{n_s} v_{si} C_{si} - \alpha_s RgC_s h_s \sqrt{u_{xs}^2 + u_{ys}^2} (\epsilon_{ws} - \delta_{ws}) \\ & - \alpha_s Rgh_s \sum_{i=1}^{n_s} v_{si} (E_i - r_0 C_{si}) \end{aligned}$$

$$35 \quad [63]$$

y para toda la capa viene dada por

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial Kh}{\partial t} + \frac{\partial u_x Kh}{\partial x} + \frac{\partial u_y Kh}{\partial y} = & u_x^* \frac{u_{xb}}{\sqrt{u_{xb}^2 + u_{yb}^2}} u_x + u_y^* \frac{u_{yb}}{\sqrt{u_{xb}^2 + u_{yb}^2}} u_y - \Delta_x u_x - \Delta_y u_y + \frac{1}{2} (u_x^2 + u_y^2) (\epsilon_w - \delta) \\
 & - \Delta_{xs} u_{xs} - \Delta_{ys} u_{ys} + \Delta_{Es} + \frac{1}{2} (u_{xs}^2 + u_{ys}^2) (\epsilon_{ws} - \delta_{ws}) - \beta_K K^{3/2} \\
 & - Rgh \sum_{i=n_s+1}^n v_{si} C_{Mi} - \frac{1}{2} RgC_M h \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \epsilon_w - \frac{1}{2} Rgh \sum_{i=n_s-1}^n v_{si} (E_i - r_0 C_{Mi}) \\
 & - 2\alpha_s Rgh_s \sum_{i=1}^{n_s} v_{si} C_{si} - \alpha_s RgC_s h_s \sqrt{u_{xs}^2 + u_{ys}^2} (\epsilon_{ws} - \delta_{ws}) - \alpha_s Rgh_s \sum_{i=1}^{n_s} v_{si} (E_i - r_0 C_{si})
 \end{aligned}$$

[64]

En la ecuación [63],

$$\Delta_{Es} = \frac{1}{2} (\epsilon_{ws} - \delta_{ws}) (u_x^2 + u_y^2) \quad \text{si } \epsilon_{ws} \geq \delta_{ws} \quad [65]$$

$$\Delta_{Es} = \frac{1}{2} (\epsilon_{ws} - \delta_{ws}) (u_{xs}^2 + u_{ys}^2) \quad \text{si } \epsilon_{ws} < \delta_{ws} . \quad [66]$$

Las ecuaciones y relaciones divulgadas en el presente documento se han utilizado para crear un modelo de dos capas para el flujo de turbidez. Modelos que emplean más de dos capas están dentro del alcance de la invención. Por ejemplo, la Figura 5 ilustra esquemáticamente una corriente de turbidez que se subdivide en tres capas estratificadas 52, 54 y 56. La capa inferior 52 representa la parte de la corriente que transporta sedimentos gruesos que tienen un diámetro relativamente grande, y la capa central 54 representa la porción de la corriente que transporta sedimentos que tienen un diámetro algo menor. La capa superior 56 representa la porción de la corriente que transporta sedimentos que tienen un diámetro aún menor. La corriente de turbidez puede entonces analizarse resolviendo las variables de flujo para la capa inferior 52. A continuación, se calculan las variables de flujo para la capa inferior 52, en combinación con la capa central 54. Por último, se analizan las variables de flujo para la capa inferior 52, la capa central 54 y la capa superior 56 combinadas. Utilizando los conceptos incluidos en el presente documento, se considera que la obtención de las ecuaciones de flujo para tres o más capas es conocida por los expertos en la técnica.

Se ha divulgado que el cálculo de variables de flujo para varias capas estratificadas comienza desde la capa más inferior y progresa hacia arriba. La invención también puede calcular las variables de flujo comenzando en la capa más alta de la corriente de turbidez. Por ejemplo, el modelo de flujo de turbidez de tres capas que se muestra en la Figura 5 se puede analizar primero calculando las variables de flujo relacionadas con la capa superior 56. A continuación, se analizan las variables de flujo relacionadas con las capas superior y central 56, 54 combinadas. Por último, se analizan las variables de flujo relacionadas con las capas superior, central e inferior 56, 54 y 52 combinadas.

Los procedimientos de ejemplo se pueden apreciar mejor con referencia a diagramas de flujo. Si bien a efectos de simplicidad de la explicación, las metodologías ilustradas se muestran y describen como una serie de bloques, debe apreciarse que las metodologías no están limitadas por el orden de los bloques, ya que algunos bloques pueden disponerse en diferentes órdenes y/o simultáneamente con otros bloques, con respecto a lo que se ha mostrado y descrito. Además, para implementar una metodología de ejemplo es posible que no se requieran todos los bloques. Los bloques se pueden combinar o separar en múltiples componentes. Además, metodologías adicionales y/o alternativas pueden emplear bloques adicionales no mostrados en el presente documento. Si bien las figuras ilustran diversas acciones que se realizan en serie, debe apreciarse que diversas acciones podrían realizarse en serie, sustancialmente en paralelo y/o en momentos sustancialmente diferentes.

La Figura 6 es un diagrama de flujo que muestra un procedimiento 60 para generar un modelo de una corriente de turbidez de acuerdo con la invención. La corriente de turbidez puede definirse como parte de una corriente o pasado un flujo de fluido en un depósito de hidrocarburos para el cual se desea obtener parámetros óptimos de extracción de hidrocarburos. En el bloque 61 se define una primera capa de flujo en la corriente de turbidez. La primera capa de flujo puede definirse como la capa de flujo en la que se arrastra sustancialmente todo el sedimento de gran tamaño, tal como arena. En el bloque 62 se define una capa de flujo adicional. La capa de flujo adicional puede definirse como mayor que la primera capa de flujo e incluye la primera capa de flujo. En el bloque 63 se determina si se deben definir más capas de flujo. En caso afirmativo, el procedimiento repite los bloques 62 y 63 hasta que se hayan definido todas las capas de flujo. La última capa de flujo a definir es toda la corriente de turbidez. En el bloque 64 se define un conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad para cada capa de flujo. De acuerdo con la invención, las variables de flujo promediadas por profundidad pueden incluir la profundidad de cada capa de flujo,

componentes horizontales ortogonales (es decir, las direcciones x e y de flujo tal como se define en las Figuras 4 y 5) de la velocidad de flujo promediada por profundidad para cada capa de flujo, la distribución por tamaño de sedimentos de gran tamaño (tal como arena) en la primera capa de flujo y la distribución por tamaño de sedimentos más pequeños (tal como fango) en las otras capas de flujo. En el bloque 65 se desarrolla un modelo que describe la corriente de turbidez utilizando el conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad para cada capa de flujo, así como ecuaciones de flujo de fluido. Las ecuaciones de flujo de fluido pueden incluir, pero sin limitarse a, lo siguiente: una ecuación de conservación de masa para el flujo de fluido en la primera capa de flujo, una ecuación de conservación de masa para el flujo de fluido en todas las capas de flujo, una ecuación de conservación de masa para el sedimento transportado por la primera capa de flujo, una ecuación de conservación de masa para el sedimento transportado por todas las capas de flujo, ecuaciones de equilibrio de momento para las componentes horizontales ortogonales del flujo de fluido combinado en todas las capas de flujo, ecuaciones de equilibrio de momento para las componentes horizontales ortogonales de flujo de fluido en la primera capa, la conservación de la energía cinética turbulenta para la primera capa y la conservación de la energía cinética turbulenta para la primera y segunda capas de flujo combinadas. En el presente documento se proporcionan ejemplos de estas ecuaciones de flujo de fluido. En el bloque 66 se proporciona el modelo que describe la corriente de turbidez. El modelo puede proporcionarse a otros modelos geológicos que predicen el comportamiento de un flujo al que pertenece la corriente de turbidez. El modelo también puede iterar para predecir efectos de turbidez a lo largo de cientos, miles o incluso millones de años. Dichos modelos y predicciones se pueden utilizar para predecir la estructura y/o el rendimiento de un depósito de hidrocarburos subterráneo para optimizar la extracción de hidrocarburos del mismo.

La Figura 7 es un diagrama de flujo que muestra otro procedimiento 70 para generar un modelo de una corriente de turbidez de acuerdo con la invención. En el bloque 71 se define una pluralidad de capas de flujo no superpuestas en la corriente de turbidez. Con el fin de explicar el diagrama de flujo, la pluralidad será igual a dos. Las capas de flujo pueden definirse en función de la concentración de sedimentos de diferente tamaño arrastrados en las capas de flujo. Por ejemplo, la primera capa de flujo puede definirse como la capa de flujo en la que se arrastra sustancialmente todo el sedimento de gran tamaño, tal como arena. En el bloque 72 se define un primer conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad en función de las características de la primera capa de flujo. En el bloque 73 se define un segundo conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad en función de las características de la primera y segunda capas de flujo combinadas, que definen conjuntamente toda la corriente de turbidez. En el bloque 74 se desarrolla un modelo que describe la corriente de turbidez, donde el modelo usa ecuaciones de flujo de fluido y el primer y segundo conjuntos de variables de flujo promediadas por profundidad para predecir el flujo de fluido en cada capa de flujo. En el bloque 75 se proporciona el modelo que describe la corriente de turbidez como se describe previamente.

La Figura 8 ilustra un diagrama de bloques de un entorno informático 80 que puede implementar uno o más de los procedimientos divulgados de acuerdo con la invención. El entorno informático 80 incluye un ordenador de sistema 82, que puede implementarse como cualquier ordenador personal o estación de trabajo convencionales, tal como una estación de trabajo basada en UNIX. El ordenador de sistema 82 se comunica con dispositivos de almacenamiento en disco 84, 86 y 88, cada uno de los cuales puede ser cualquier tipo conocido de medio de almacenamiento legible por ordenador, tales como dispositivos de almacenamiento en disco duro externos que están conectados directamente al ordenador de sistema o a los que se accede usando una red de área local o mediante acceso remoto. Aunque los dispositivos de almacenamiento en disco 84, 86 y 88 se ilustran como dispositivos separados, se puede utilizar un único dispositivo de almacenamiento en disco para almacenar todas y cada una de las instrucciones de programa, datos de medición y resultados, según se desee.

En una forma de realización, los datos de entrada se almacenan en el dispositivo de almacenamiento en disco 86. El ordenador de sistema 82 puede recuperar los datos adecuados desde el dispositivo de almacenamiento en disco 86 para realizar el desarrollo del modelo y la predicción de rendimiento de depósito de acuerdo con instrucciones de programa que corresponden a los procedimientos descritos en el presente documento. Las instrucciones de programa se pueden escribir en un lenguaje de programación informático, tal como C++, Java y similares. Las instrucciones de programa pueden almacenarse en una memoria legible por ordenador, tal como un dispositivo de almacenamiento en disco de programas 88. El ordenador de sistema 82 presenta la salida principalmente en un dispositivo de visualización de texto/gráficos 90 o, como alternativa, en una impresora 92. El ordenador de sistema 82 puede almacenar los resultados de los procedimientos descritos anteriormente en el almacenamiento en disco 84, para su uso posterior y análisis adicional. Un teclado 94 y un dispositivo de puntero (por ejemplo, un ratón, bola de seguimiento o similares) 96 pueden proporcionarse con el ordenador de sistema 82 para permitir un funcionamiento interactivo. El ordenador de sistema 82 puede estar ubicado en un centro de datos alejado del depósito. De manera adicional, si bien la descripción anterior se encuentra en el contexto de instrucciones ejecutables por ordenador que se pueden ejecutar en uno o más ordenadores, los expertos en la técnica reconocerán que la materia objeto reivindicada también se puede implementar en combinación con otros módulos de programa y/o como una combinación de hardware y software.

La experiencia indica que el presente procedimiento inventivo para calcular el flujo en una corriente de turbidez usando múltiples capas solo requiere aproximadamente el doble de esfuerzo computacional que el modelo simple convencional promediado por profundidad. En contraste con el modelo convencional promediado por profundidad de una capa, el procedimiento inventivo puede captar las características tridimensionales importantes de las corrientes

de turbidez que son esenciales para simulaciones de la formación y evolución de cuerpos sedimentarios, especialmente en entornos confinados. Específicamente, modelar el movimiento completo y el comportamiento de una corriente de turbidez permite que un modelo incorpore los efectos de la separación de flujos y de la divergencia de flujos causadas por la compleja naturaleza de la corriente de turbidez.

5 Si bien la invención puede ser susceptible de diversas modificaciones y formas alternativas, las formas de realización analizadas anteriormente se han mostrado solo a modo de ejemplo. La invención no pretende limitarse a las formas de realización particulares divulgadas en el presente documento. La invención incluye todas las alternativas, modificaciones y equivalencias que se encuentren dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

10

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un procedimiento implementado por ordenador para generar un modelo de flujo de fluido de una corriente de turbidez para predecir la estructura y/o el rendimiento de un depósito de hidrocarburos subterráneo para optimizar la extracción de hidrocarburos del mismo, que comprende:
- 10 definir una primera capa de flujo (42, 52, 61) en la corriente de turbidez (40, 50) que comprende sedimento; caracterizado por
- 10 definir sucesivamente al menos una capa de flujo más (44, 54, 56) en la corriente de turbidez (40, 50), donde cada capa de flujo sucesiva incluye la capa de flujo definida previamente, donde las capas de flujo se definen en función del tamaño del sedimento;
- 15 definir un conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad (64) para cada capa de flujo; desarrollar un modelo (65) que describe la corriente de turbidez (40, 50), donde el modelo utiliza ecuaciones de flujo de fluido y el conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad (64) para cada capa de flujo para predecir el flujo de fluido en cada capa de flujo;
- 15 proporcionar el modelo (66); modelar el depósito de hidrocarburos usando el modelo de la corriente de turbidez; y predecir la producción de hidrocarburos en función del modelo del depósito de hidrocarburos.
- 20 2. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que la corriente de turbidez (40, 50) transporta sedimento que tiene un primer y un segundo intervalo de tamaño no contiguos, y donde la primera capa de flujo (42, 52) es una capa inferior que contiene sustancialmente todo el sedimento del primer intervalo de tamaño, y en el que además la al menos una capa de flujo más es una segunda capa definida como la corriente de turbidez completa.
- 25 3. El procedimiento según la reivindicación 2, en el que las variables de flujo promediadas por profundidad (64) incluyen al menos una de entre una profundidad de cada capa de flujo, componentes ortogonales de velocidad de flujo promediada por profundidad para cada capa de flujo, una distribución por tamaño de los sedimentos del primer intervalo de tamaño en la primera capa de flujo (42, 52) y una distribución por tamaño de los sedimentos del segundo intervalo de tamaño en la segunda capa de flujo.
- 30 4. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que las ecuaciones de flujo de fluido incluyen al menos una de una ecuación de conservación de masa para el flujo de fluido en la primera capa de flujo,
- 35 una ecuación de conservación de masa para el flujo de fluido en todas las capas de flujo, una ecuación de conservación de masa para el sedimento transportado por la primera capa de flujo, y una ecuación de conservación de masa para el sedimento transportado por todas las capas de flujo.
- 40 5. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que las ecuaciones de flujo de fluido incluyen al menos una de
- 40 una ecuación de equilibrio de momento para una primera componente direccional de flujo de fluido combinado en todas las capas de flujo,
- 45 una ecuación de equilibrio de momento para una segunda componente direccional de flujo de fluido combinado en todas las capas de flujo, donde la segunda componente direccional es sustancialmente ortogonal a la primera componente direccional,
- 45 una ecuación de equilibrio de momento para la primera componente direccional de flujo de fluido en la primera capa, y una ecuación de equilibrio de momento para la segunda componente direccional para el flujo de fluido en la primera capa.
- 50 6. El procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además:
- 55 definir una primera ubicación y una segunda ubicación a lo largo de la corriente de turbidez (40, 50); y desarrollar el modelo que describe la corriente de turbidez en cada una de la primera y segunda ubicaciones usando ecuaciones de flujo de fluido y las variables de flujo promediadas por profundidad para cada capa de flujo.
- 60 7. El procedimiento según la reivindicación 6, en el que la profundidad de la primera capa de flujo (42, 52) es cero en una de la primera y segunda ubicaciones, y en el que la profundidad de la primera capa de flujo es mayor que cero en la otra de la primera y segunda ubicaciones.
- 65 8. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que el modelo incluye una función de tasa de arrastre entre capas para cada interfase entre capas de flujo, en el que la función de arrastre entre capas caracteriza una tasa en la que el fluido en una de las capas de flujo es arrastrado hacia una capa de flujo adyacente, donde el modelo incluye además una función de expulsión entre capas para cada interfase entre capas de flujo, en el que la función

de expulsión entre capas caracteriza una tasa en la que el fluido en la primera capa de flujo se expulsa de una de las capas de flujo hacia una capa de flujo adyacente.

5 9. Un procedimiento implementado por ordenador para generar un modelo de flujo de fluido de una corriente de turbidez para predecir la estructura y/o el rendimiento de un depósito de hidrocarburos subterráneo para optimizar la extracción de hidrocarburos del mismo, que comprende:

10 definir una primera capa de flujo (42, 52, 71) en la corriente de turbidez que comprende sedimento y caracterizado por
 10 definir una segunda capa de flujo (44, 54, 71) en la corriente de turbidez (40, 50), donde la primera y segunda capas de flujo no se superponen y se definen en función de la concentración de sedimentos de diferente tamaño arrastrados en las mismas;
 15 definir un primer conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad (72) en función de las características de la primera capa de flujo;
 15 definir un segundo conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad (73) en función de las características de la primera y segunda capas de flujo combinadas;
 20 desarrollar un modelo (74) que describe la corriente de turbidez, donde el modelo usa ecuaciones de flujo de fluido y el primer y segundo conjuntos de variables de flujo promediadas por profundidad para predecir el flujo de fluido en cada capa de flujo; y
 20 proporcionar el modelo (75);
 modelar el depósito de hidrocarburos usando el modelo de la corriente de turbidez; y
 predecir la producción de hidrocarburos en función del modelo del depósito de hidrocarburos.

25 10. El procedimiento según la reivindicación 9, que comprende además:

25 definir una tercera capa de flujo (56) en la corriente de turbidez (50) en función de la concentración de sedimentos de diferente tamaño, donde la tercera capa de flujo no se superpone con la primera y segunda capas de flujo;
 30 definir un tercer conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad en función de las características de la primera, segunda y tercera capas de flujo combinadas; y
 30 caracterizar la corriente de turbidez (50) usando el primer, segundo y tercer conjuntos de variables de flujo promediadas por profundidad;
 en el que el modelo utiliza ecuaciones de flujo de fluido y el primer, segundo y tercer conjuntos de variables de flujo promediadas por profundidad para predecir el flujo de fluido en cada capa de flujo.

35 11. El procedimiento según la reivindicación 9, en el que el modelo incluye una función de tasa de arrastre entre capas que caracteriza una tasa en la que el fluido por encima de la primera capa de flujo es arrastrado hacia la primera capa de flujo (42, 52), donde el modelo incluye además una función de expulsión entre capas que caracteriza una tasa en la que el fluido en la primera capa de flujo se expulsa de la primera capa de flujo.

40 12. El procedimiento según la reivindicación 9, en el que la primera capa de flujo (42, 52) se define como la porción de la corriente de turbidez que transporta sustancialmente todo el sedimento que tiene un tamaño que es mayor que otro sedimento en la corriente de turbidez.

45 13. El procedimiento según la reivindicación 9, en el que las variables de flujo promediadas por profundidad (72, 73) incluyen al menos una de entre una profundidad de cada capa de flujo, componentes ortogonales de una velocidad de flujo promediada por profundidad para cada capa de flujo, una distribución por tamaño de los sedimentos de un primer intervalo de tamaño en la primera capa de flujo y una distribución por tamaño de los sedimentos de un segundo intervalo de tamaño en la segunda capa de flujo.

50 14. El procedimiento según la reivindicación 9, en el que las ecuaciones de flujo de fluido incluyen al menos una de
 una ecuación de conservación de masa para el flujo de fluido en la primera capa de flujo,
 55 una ecuación de conservación de masa para el flujo de fluido en la primera capa de flujo combinada con la segunda capa de flujo,
 una ecuación de conservación de masa para el sedimento transportado por la primera capa de flujo, y
 una ecuación de conservación de masa para el sedimento transportado por la capa de flujo combinada con la segunda capa de flujo.

60 15. El procedimiento según la reivindicación 9, en el que las ecuaciones de flujo de fluido incluyen al menos una de
 una ecuación de equilibrio de momento para una primera componente direccional de flujo de fluido en la primera capa de flujo combinada con la segunda capa de flujo,
 65 una ecuación de equilibrio de momento para una segunda componente direccional de flujo de fluido en la primera capa de flujo combinada con la segunda capa de flujo, donde la segunda componente direccional es sustancialmente ortogonal a la primera componente direccional,

una ecuación de equilibrio de momento para la primera componente direccional de flujo de fluido en la primera capa de flujo, y
una ecuación de equilibrio de momento para la segunda componente direccional de flujo de fluido en la primera capa de flujo.

5
16. El procedimiento según la reivindicación 9, en el que las ecuaciones de flujo de fluido incluyen al menos una de
conservación de energía cinética turbulenta para la primera capa de flujo, y
conservación de energía cinética turbulenta para la primera y segunda capas de flujo combinadas.

10
17. El procedimiento según la reivindicación 9, que comprende además:
definir una primera ubicación y una segunda ubicación a lo largo de la corriente de turbidez (40, 50); y
desarrollar el modelo que describe la corriente de turbidez en cada una de la primera y segunda ubicaciones
usando ecuaciones de flujo de fluido y las variables de flujo promediadas por profundidad para cada capa de
15 flujo.

18. El procedimiento según la reivindicación 17, en el que la profundidad de la primera capa de flujo (42, 52) es cero
en una de la primera y segunda ubicaciones, y en el que la profundidad de la primera capa de flujo es mayor que
20 cero en la otra de la primera y segunda ubicaciones.

19. Un producto de programa informático que tiene una lógica ejecutable por ordenador grabada en un medio
tangibles legible por ordenador, donde el producto de programa informático comprende: código para generar un
modelo de flujo de fluido de una corriente de turbidez para predecir la estructura y/o el rendimiento de un depósito de
25 hidrocarburos subterráneo para optimizar la extracción de hidrocarburos del mismo;

código para definir una primera capa de flujo (42, 52) en la corriente de turbidez (40, 50) que comprende
sedimento;
caracterizado por
30 código para definir sucesivamente al menos una capa de flujo más (44, 54, 56) en la corriente de turbidez (40,
50), donde cada capa de flujo sucesiva incluye la capa de flujo definida previamente, donde las capas de flujo
se definen en función del tamaño del sedimento;
código para definir un conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad (64) para cada capa de
35 flujo;
código para desarrollar un modelo (65) que describe la corriente de turbidez (40, 50), donde el modelo utiliza
ecuaciones de flujo de fluido y el conjunto de variables de flujo promediadas por profundidad (64) para cada
capa de flujo para predecir el flujo de fluido en cada capa de flujo;
código para modelar un depósito de hidrocarburos usando el modelo de la corriente de turbidez; y
40 código para predecir la producción de hidrocarburos en función del modelo del depósito de hidrocarburos.

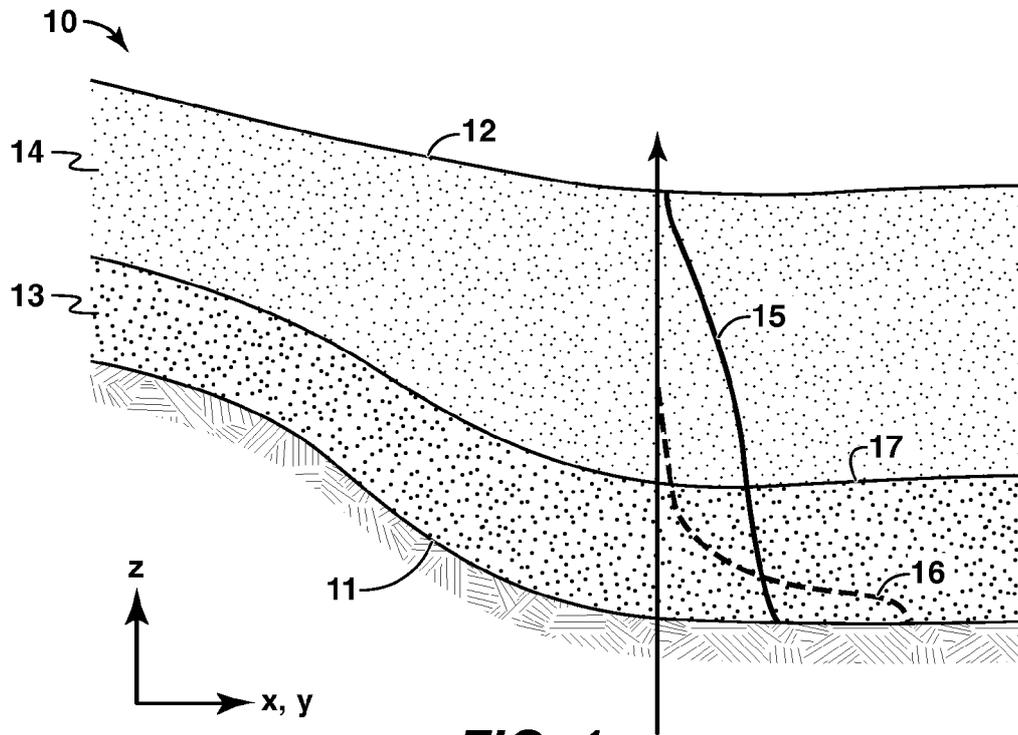


FIG. 1
(Técnica anterior)

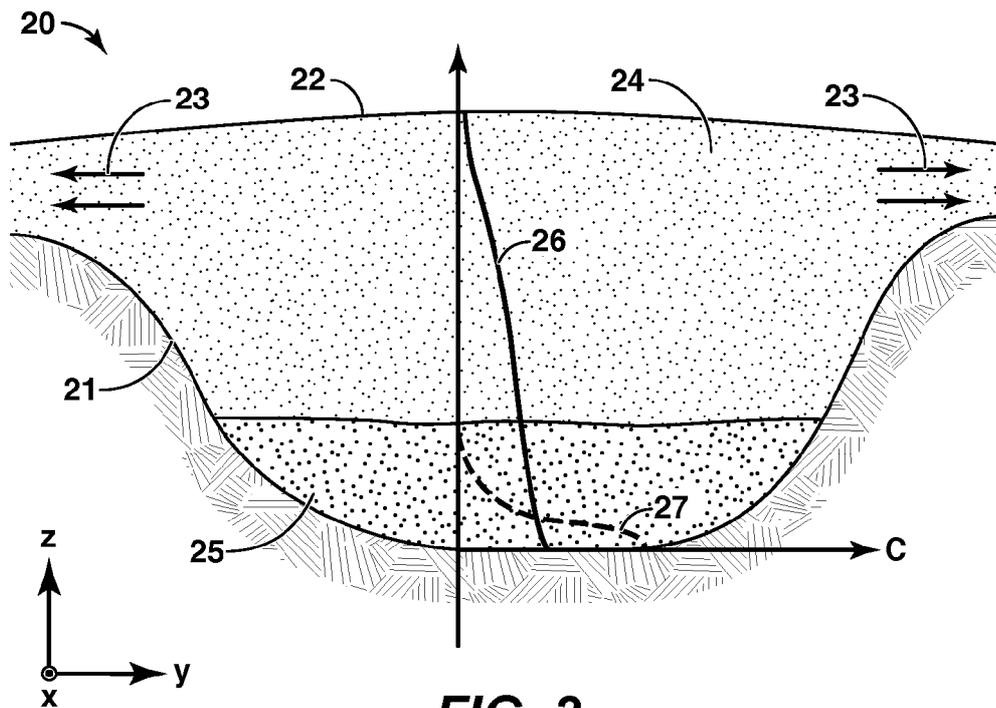


FIG. 2
(Técnica anterior)

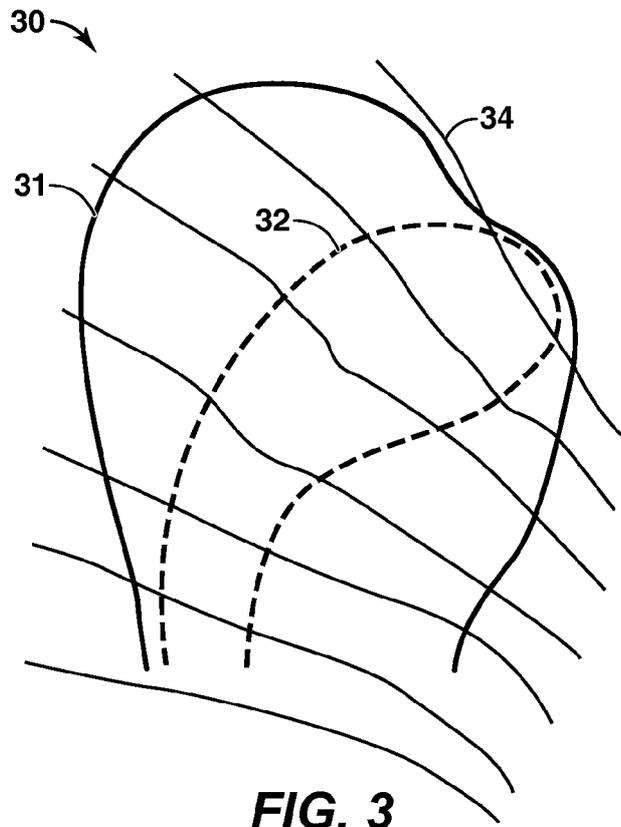


FIG. 3
(Técnica anterior)

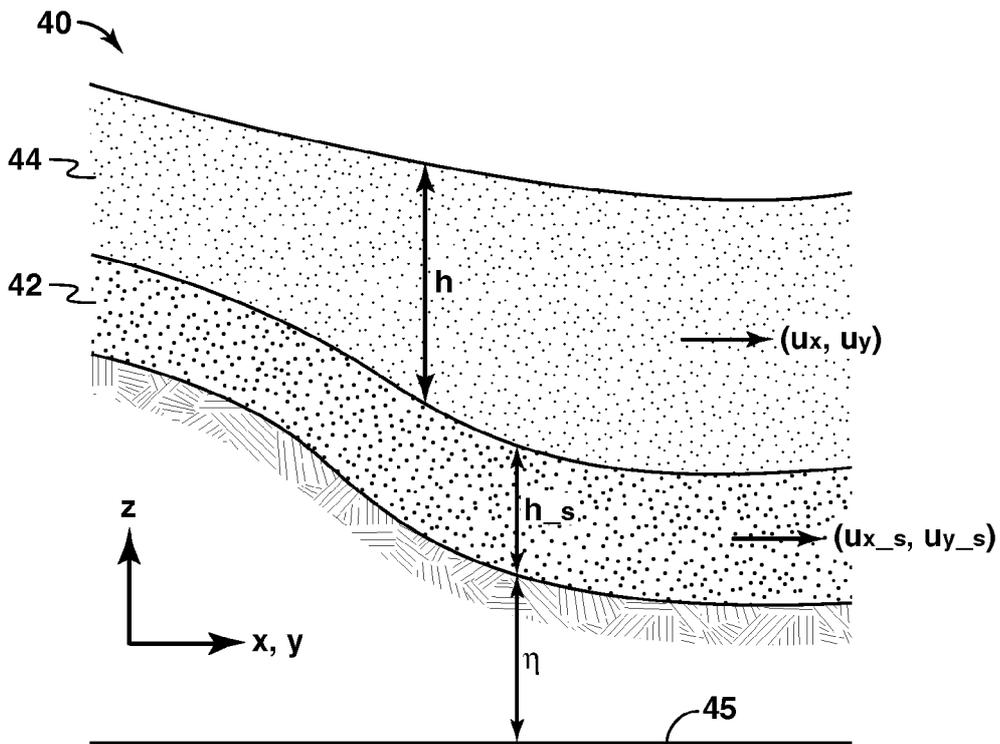


FIG. 4

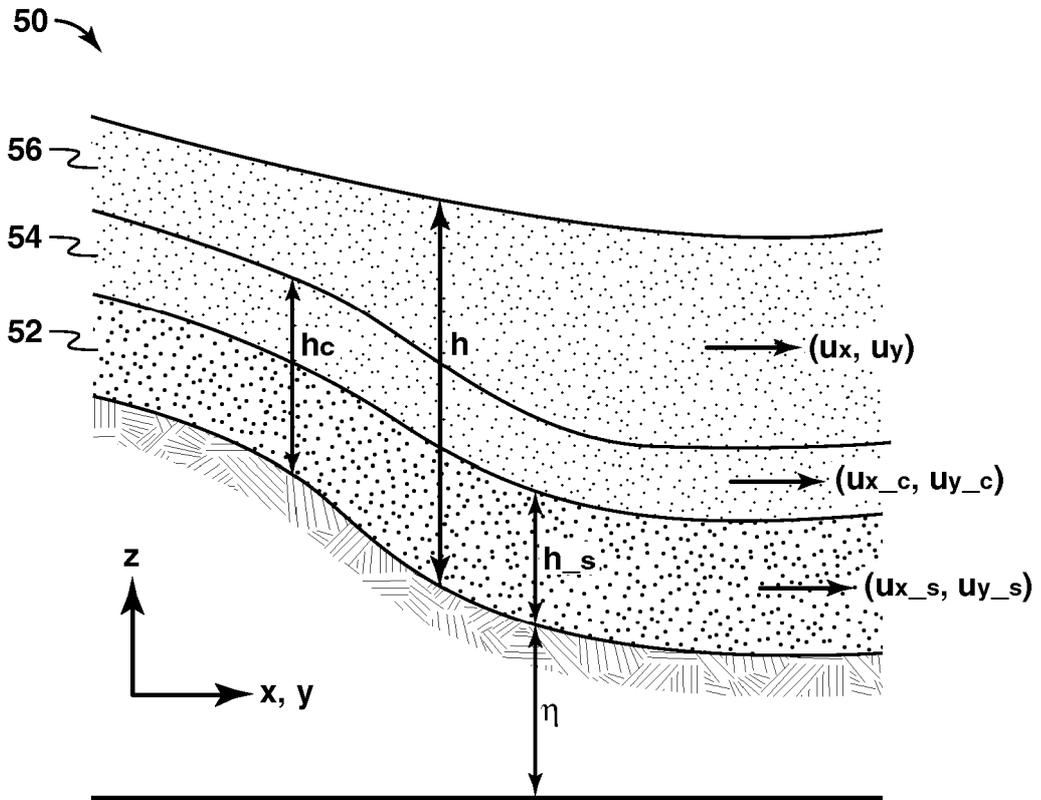


FIG. 5

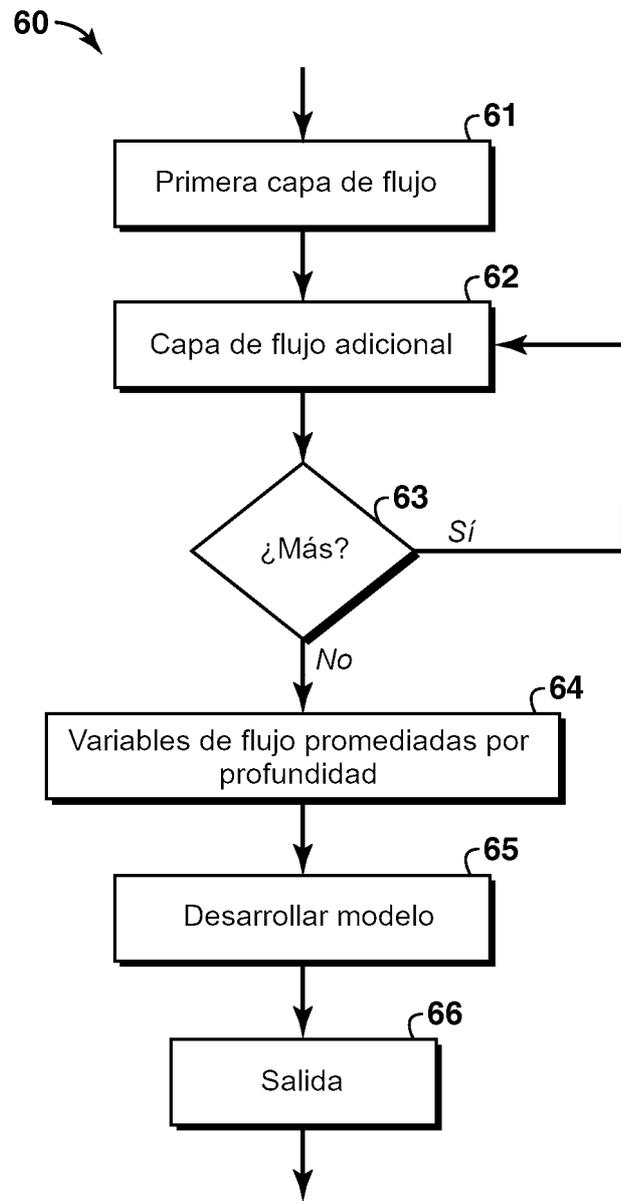


FIG. 6

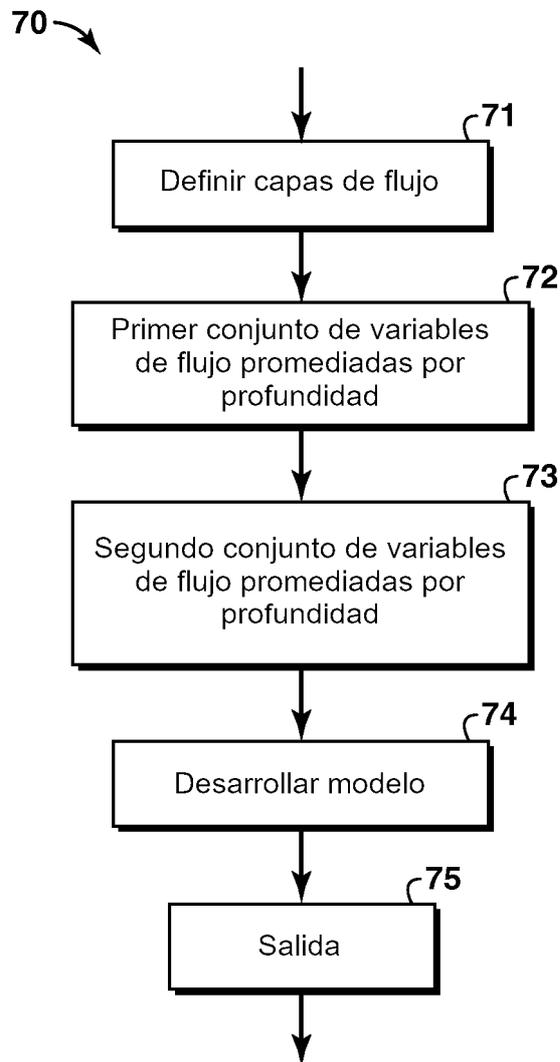


FIG. 7

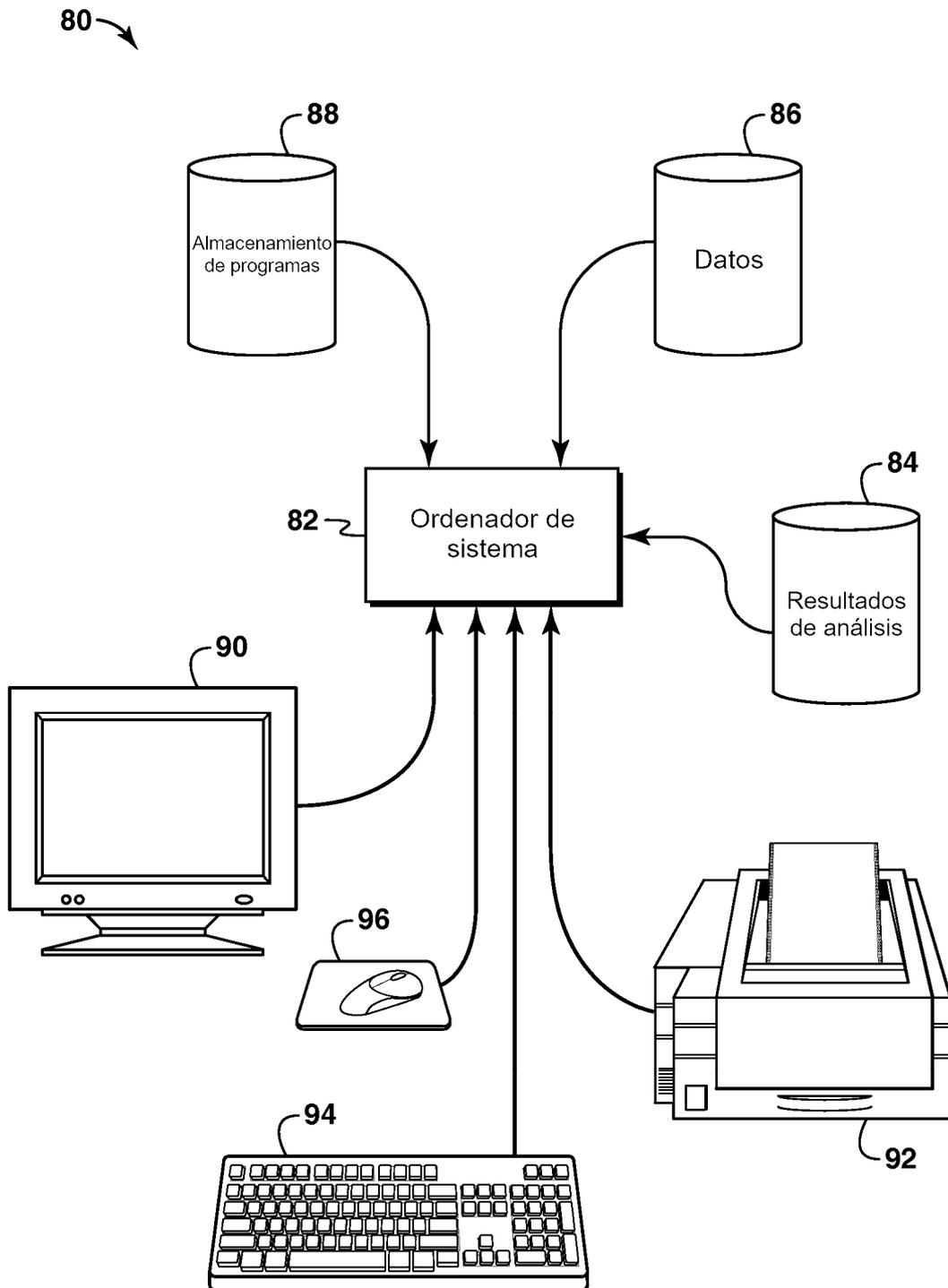


FIG. 8