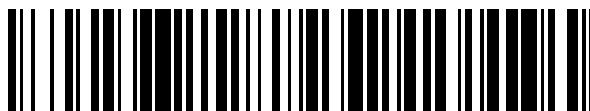


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 708 453**

51 Int. Cl.:

<b>C02F 3/32</b>	(2006.01)
<b>C02F 1/32</b>	(2006.01)
<b>C02F 1/66</b>	(2006.01)
<b>C02F 1/30</b>	(2006.01)
<b>C02F 1/44</b>	(2006.01)
<b>C12M 1/00</b>	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.06.2011 PCT/US2011/001113**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.12.2011 WO11162811**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.06.2011 E 11798507 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.11.2018 EP 2585407**

54 Título: **Tratamiento avanzado biológico de aguas usando algas**

30 Prioridad:

**23.06.2010 US 398350 P**

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

**09.04.2019**

73 Titular/es:

**CLEARAS WATER RECOVERY INC. (100.0%)  
1500 Clark Fork Lane  
Missoula, MT 59808, US**

72 Inventor/es:

**ROBINSON, TERRY, S.;  
MCGRAW, KEVIN, S.;  
SYLVESTER, JARED, W. y  
WEIDOW, JESSE, D.**

74 Agente/Representante:

**PONS ARIÑO, Ángel**

ES 2 708 453 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

Tratamiento avanzado biológico de aguas usando algas

### 5 CAMPO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere en general a métodos y sistemas para el tratamiento de aguas. Más concretamente, se refiere al tratamiento avanzado de aguas utilizando algas u otros organismos biológicos.

### 10 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Los sistemas de tratamiento de aguas municipales e industriales desempeñan un papel crucial en una sociedad ambientalmente sostenible. El tratamiento de aguas en tales sistemas se divide convencionalmente en tres etapas: tratamiento de aguas primario, secundario y avanzado. El tratamiento de aguas avanzado se define aquí como el tratamiento terciario del agua, el tratamiento fisicoquímico, el tratamiento biológico-físico combinado, y generalmente cualquier proceso diseñado para producir un efluente de una calidad más alta que alcanzado normalmente por procesos de tratamiento secundario. El tratamiento avanzado de aguas mejora la calidad del agua antes de su reutilización o descarga en el medio ambiente a fin de limitar el impacto ambiental adverso y/o cumplir con las regulaciones gubernamentales u otras restricciones. El tratamiento avanzado normalmente incluye, por ejemplo, la reducción de los niveles excesivos de nutrientes (como el nitrógeno y el fósforo), así como la reducción de los metales en trazas (como el selenio y el magnesio) y otros contaminantes y compuestos regulados (como bifenilos policlorados, la demanda biológica de oxígeno y la demanda de oxígeno carbonáceo). La cantidad de agua de descarga, y en un número creciente de casos de reutilización, está limitada por la calidad del agua. En consecuencia, se necesitan sistemas de tratamiento de aguas capaces de producir agua que cumpla con los requisitos de descarga o reutilización regulados.

Un enfoque para el tratamiento de aguas implica el uso de algas u otros agentes biológicos como las cianobacterias para eliminar o reducir las cantidades de nutrientes y metales en trazas. Los sistemas existentes de este tipo, sin embargo, tienen una o más desventajas que incluyen:

- a) caudales bajos que requieren una huella física significativa para tratar grandes volúmenes de agua,
- b) niveles inaceptablemente elevados de nutrientes, metales u otros contaminantes en el agua tratada,
- c) disponibilidad/penetración lumínica limitada para optimizar los procesos biológicos,
- d) falta de velocidad que resulta en la acumulación de biopelícula,
- e) entornos no controlados (estanques/canales abiertos) que presentan oportunidades para una fácil contaminación o cambio en la química del agua,
- f) acumulación de sólidos suspendidos debido a la falta de prefiltración, e
- g) incapacidad para manejar la biodisponibilidad de los constituyentes en el agua para su extracción por el agente biológico. El documento WO0034189 revela un fotobiorreactor (65) seguido de una separación (12) que produce permeado y biomasa, que se devuelve.

Por consiguiente, sigue existiendo la necesidad de mejorar las técnicas de tratamiento avanzado del agua utilizando algas u otros organismos biológicos.

### RESUMEN DE LA INVENCION

La invención se define por las reivindicaciones anexas. Se proporcionan un sistema y un método para el tratamiento avanzado de aguas. Un flujo continuo de agua es prefiltrado, acondicionado, mezclado con un cultivo denso de microalgas y pasado una sola vez a través de un fotobiorreactor cerrado, controlado (PBR). Estos procesos interconectados están diseñados para dar como resultado el consumo de nutrientes, la extracción de metales en trazas y la reducción de otros contaminantes y compuestos regulados del agua. El flujo del PBR se separa en un flujo de agua tratada, también mencionado como el permeado, y un flujo denso de microalgas, también mencionado como las algas activadas retornadas (RAA). Luego el permeado se descarga o se vuelve a utilizar. En algunos casos, y dependiendo de los requisitos reglamentarios, antes de la descarga o reutilización el permeado puede pasar a través de procesos de pulido y desinfección adicionales como la desinfección ultravioleta. El 50% o más en volumen del flujo RAA se devuelve a la fase de mezcla para tratar el flujo acondicionado corriente arriba. Mientras que las algas se reciclan en el sistema de tratamiento, el agua es tratada por un flujo continuo secuencialmente a través de las etapas del sistema, sin ningún reciclaje o repetición de etapas de tratamiento. El sistema trata el flujo a medida que pasa continuamente a través de la secuencia de etapas del proceso, una vez. El sistema recicla la cantidad requerida de algas apropiadas para tratar el flujo continuo que pasa a través de las etapas. Para compensar el crecimiento excesivo de las algas, se recolecta o se extrae un porcentaje del flujo de RAA de la PBR como algas activadas por residuos (WAA) para mantener la densidad de algas adecuada en el sistema. La cantidad de extracción de WAA controla el

equilibrio de los alimentos (nutrientes en el agua) a la biomasa (algas) en el sistema de tratamiento. Dependiendo de la composición de nutrientes y/o metales en trazas del agua, pueden añadirse nutrientes adicionales o metales en trazas justo antes de la fase de mezcla del proceso de tratamiento para asegurar el crecimiento adecuado del cultivo de algas.

5

En otro aspecto, se proporciona un método para el tratamiento avanzado de agua que incluye las siguientes etapas: a) recibir un flujo continuo de agua; b) prefiltrar el flujo de agua recibido para reducir los sólidos suspendidos; c) acondicionar el flujo prefiltrado de agua añadiendo CO<sub>2</sub> para ajustar el pH del flujo prefiltrado, para aumentar la biodisponibilidad de los constituyentes de nutrientes en el agua, así como para proporcionar una fuente de carbono para la posterior fotosíntesis de algas en el flujo prefiltrado; d) mezclar en un recipiente de mezcla el caudal acondicionado con un flujo denso de microalgas vivas (RAA) para producir un flujo de mezcla; e) pasar el flujo de la mezcla una vez a través de un fotobiorreactor de tubo cerrado (PBR) expuesto a luz natural y/o suplementaria de manera que las microalgas en el flujo de mezcla se reproduzcan y tomen los nutrientes y los metales en trazas en el flujo de la mezcla; f) separar continuamente las microalgas del flujo de mezcla que sale del fotobiorreactor para producir un flujo tratado (permeado) y el flujo denso de microalgas vivas (RAA); y g) devolver continuamente el flujo denso de microalgas vivas (RAA) al recipiente de mezcla para mezclar con el efluente acondicionado entrante y repetir el proceso antes mencionado.

Las realizaciones preferidas del método pueden incluir adicionalmente uno o más de los siguientes aspectos. Se pueden utilizar polímeros, coagulantes o floculantes para eliminar del flujo prefiltrado total de sólidos suspendidos o taninos (color) para asegurar una mezcla adecuada de nutrientes y la disponibilidad de luz para los procesos de tratamiento posteriores. El flujo prefiltrado también puede ser esterilizado con irradiación UV.

Las realizaciones preferidas también pueden incluir la medición de los niveles de nutrientes del flujo acondicionado y la adición de nutrientes antes de entrar en el recipiente de mezcla en base a los niveles de nutrientes medidos para producir los niveles de nutrientes deseados del flujo acondicionado. En forma similar, las realizaciones pueden incluir medir los niveles de metales en trazas del flujo acondicionado y agregar metales en trazas antes de entrar en el recipiente de mezcla basándose en los niveles medidos de metales en trazas para producir los niveles deseados de metales en trazas del flujo acondicionado.

30

Las realizaciones pueden incluir medir el pH del flujo de la mezcla en el fotobiorreactor y agregar CO<sub>2</sub> al fotobiorreactor en base al pH medido. Las realizaciones también pueden incluir la medición de un nivel de luz ambiental cerca del fotobiorreactor y la exposición del fotobiorreactor a luz suplementaria, donde la cantidad de luz suplementaria se basa en el nivel de luz ambiente medido. Preferiblemente, la luz suplementaria tiene una longitud de onda de entre 550 y 700 nanómetros o, más preferiblemente, de entre 650 y 675 nanómetros. Preferiblemente, la duración del tiempo en que una porción determinada del flujo de la mezcla se expone directamente a la luz mientras que pasa a través de la etapa de mezcla, la etapa de PBR, y la etapa de separación, es del 40% al 60% del tiempo total en que la porción dada del flujo de la mezcla está en la mezcla, PBR y etapas de separación. En realizaciones preferidas, el flujo denso de microalgas (RAA) contiene algas fototróficas tales como, por ejemplo, *Spirulina*, *Nannochloropsis*, *Scenedesmus*, y/o *Chlamydomonas*.

El método incluye la medición de la turbidez del flujo de la mezcla que sale del fotobiorreactor y eliminación de una fracción del caudal (WAA) del flujo de la mezcla, donde el tamaño de la fracción se basa en la turbidez medida y el nivel de densidad de RAA deseado. En una realización preferida, la fracción eliminada puede ser inferior al 5% del flujo que sale del fotobiorreactor o, más preferiblemente, al 3%.

En realizaciones preferidas, la separación de las microalgas se realiza por filtración del flujo de mezcla que sale del fotobiorreactor utilizando un sistema de filtración de flujo cruzado. Preferiblemente, el sistema de filtración de flujo cruzado se realiza bajo un caudal que genera una presión de entre 20 y 80 libras por pulgada cuadrada (PSI) dentro del filtro de membrana. En algunas realizaciones, el flujo tratado (permeado) se puede pulir filtrando o desinfectando por irradiación ultravioleta. El método puede incluir el uso de un sistema de control sensorial y adquisición de datos (SCADA) para controlar las etapas cerradas del entorno de tratamiento para lograr un crecimiento productivo de las algas.

Se proporciona el sistema para el tratamiento avanzado de aguas que implementa el proceso del tratamiento. El sistema incluye un prefiltro para reducir los sólidos suspendidos de un flujo de agua recibido para producir un flujo prefiltrado; un recipiente de acondicionamiento acoplado al prefiltro para aumentar la biodisponibilidad de los constituyentes de nutrientes en un flujo prefiltrado para producir un flujo acondicionado; un recipiente de mezcla acoplado al recipiente de acondicionamiento para mezclar el flujo acondicionado con un flujo denso de microalgas vivas (RAA) para producir un flujo de mezcla; un fotobiorreactor de tubo cerrado (PBR) acoplado al recipiente de

60

mezcla para recibir el flujo de la mezcla y permitir que las microalgas en el flujo de la mezcla se reproduzcan y tomen nutrientes y metales en trazas en el flujo de la mezcla para producir un flujo de mezcla tratada; un filtro de separación (p. ej., un filtro de flujo cruzado) acoplado al fotobiorreactor de tubo adjunto para separar continuamente las microalgas del flujo de la mezcla tratada que sale del fotobiorreactor para producir un flujo de agua limpia (permeado) y el flujo denso de microalgas vivas (RAA); y un flujo denso de microalgas vivas (RAA), acoplado al filtro de separación para devolver continuamente el flujo denso de microalgas vivas (RAA) al recipiente de mezcla.

Preferiblemente, el sistema incluye una bomba dosificadora de CO<sub>2</sub> acoplada a una línea de tránsito que conecta el prefiltro al recipiente de acondicionamiento para inyectar CO<sub>2</sub> en el flujo prefiltrado para lograr un nivel de pH deseado, una bomba dosificadora unida a una línea de tránsito que conecta el recipiente de acondicionamiento al recipiente de mezcla para inyectar nutrientes en el flujo acondicionado para lograr un nivel de nutrientes deseado, una bomba dosificadora acoplada a una línea de tránsito que conecta el recipiente de acondicionamiento al recipiente de mezcla para inyectar metales en trazas en el flujo acondicionado para lograr un nivel de metales en trazas deseado, y una bomba dosificadora de CO<sub>2</sub> acoplada al fotobiorreactor de tubo adjunto para inyectar CO<sub>2</sub> en el flujo de mezcla para lograr un nivel de pH deseado.

### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La fig. 1 es un boceto de las etapas principales de un método para el tratamiento avanzado del agua, de acuerdo con una realización de la invención.  
 La fig. 2A es un esquema de flujo de proceso que ilustra un sistema para el tratamiento avanzado del agua, según una realización de la invención.  
 La fig. 2B es un esquema de flujo de proceso que ilustra una realización alterna de una etapa de separación y recuperación de sólidos del proceso mostrado en la fig. 2A, según una realización de la invención.  
 La fig. 3 es un diagrama esquemático que ilustra los detalles de un filtro de flujo cruzado utilizado en el sistema de la fig. 3, según una realización de la invención.  
 Las figs. 4A-B son detalles esquemáticos asociados a la fase de filtración de flujo cruzado y separación utilizada en el sistema de la fig. 3, según una realización de la invención.

### 30 DESCRIPCIÓN DETALLADA

Las realizaciones de la invención proporcionan tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas a base de algas para eliminar nutrientes, metales en trazas y otros contaminantes del agua. A menos que se cualifiquen de otra manera, el término "agua" en el presente documento se define como aguas residuales, aguas residuales, así como efluentes naturales e industriales. En las realizaciones ejemplares descritas a continuación, las tecnologías y los procesos únicos trabajan juntos de manera continua, controlada y automatizada, lo que resulta en agua limpia para descarga o reutilización. Una realización preferida del sistema apunta específicamente a la reducción o eliminación de nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos totales (TSS), demanda biológica de oxígeno (BOD), demanda biológica de oxígeno carbonáceo (CBOD), bifenilo policlorado (PCB) y extracción de metales en trazas, como hierro, magnesio y selenio, y otros contaminantes y compuestos regulados. El sistema puede modificarse para apuntar a otros constituyentes. También puede proporcionar a los socios de plantas industriales la oportunidad de capturar carbono. El sistema de tratamiento puede gestionarse y controlarse mediante un sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA).

En el diagrama de flujo de la fig. 1, se muestra un esbozo de las etapas principales del proceso. Aunque se presentan aquí como etapas distintas, estas etapas del proceso de tratamiento se llevan a cabo simultáneamente a medida que el flujo pasa continuamente a través de las etapas secuenciales del sistema. En la etapa 100, un flujo de agua avanzado es recibido por el sistema, por ejemplo, desde una etapa secundaria de una instalación de tratamiento de aguas. El flujo recibido se prefiltra en la etapa 102 para reducir los sólidos suspendidos. En algunas realizaciones, esta etapa también puede incluir el uso de polímeros, coagulantes o floculantes para eliminar aún más sólidos suspendidos totales (TSS) y/o taninos (color) para asegurar una mezcla adecuada de nutrientes y disponibilidad de luz para las etapas posteriores de tratamiento. En la etapa 104, el flujo prefiltrado se acondiciona usando la inyección de CO<sub>2</sub> para aumentar la biodisponibilidad de los constituyentes de nutrientes en el agua y también para proporcionar el carbón para la fotosíntesis subsiguiente de las algas. El flujo acondicionado se mezcla en la etapa 106 con un flujo denso de microalgas vivas que se recicla de una etapa posterior en el proceso. En la etapa 108, el flujo resultante de la mezcla se pasa una vez a través de un fotobiorreactor donde las microalgas de la mezcla se reproducen, se someten a fotosíntesis y metabolizan o se unen con nutrientes y/o metales en trazas a las algas en el flujo de la mezcla. En la etapa 110, el flujo que sale del fotobiorreactor sufre una separación para producir un flujo de agua tratada (es decir, permeado) y el flujo denso de microalgas vivas, también conocido como flujo de algas activadas por retorno (RAA). En la etapa 112, el flujo RAA se devuelve continuamente a la fase de mezcla. Los componentes interconectados del

proceso de tratamiento, después de la prefiltración, operan en un entorno cerrado y controlado por el medio ambiente para eliminar los contaminantes transmitidos por el aire y la posible infiltración de compuestos orgánicos no deseados. El entorno cerrado puede gestionarse electrónicamente mediante un sistema de control sensorial y adquisición de datos (SCADA). Los controles ambientales permiten al sistema optimizar el entorno cerrado para el crecimiento productivo de las algas.

Una realización preferida del método para el tratamiento avanzado del agua ahora se describirá con más detalle en relación con el esquema de flujo del proceso del sistema mostrado en la Fig. 2A.

## 10 ETAPA 1: PREFILTRACIÓN

Un efluente de agua entrante que se tratará típicamente puede tener algunos sólidos suspendidos totales (TSS). En consecuencia, en realizaciones preferidas, el agua entrante es recibida inicialmente por el sistema en un mecanismo de filtración 200 que reduce el TSS en el flujo recibido. El mecanismo de filtración 200 puede ser implementado, por ejemplo, como un filtro de lecho de arena para eliminar los sólidos de entre 5 y 75 micrones de tamaño. Opcionalmente, según la naturaleza del flujo de agua recibido, el pretratamiento adicional se puede implementar usando un polímero, un coagulante o un agente floculante para reducir aún más el TSS y/o los taninos (color) para mejorar el funcionamiento de etapas posteriores del tratamiento. La adición de estos agentes, que pueden ser inyectados en línea o en un tanque que contenga el efluente de agua, facilitan la vinculación entre las partículas sólidas suspendidas. El agua se mezcla lentamente y el movimiento del agua induce a las partículas a colisionarse y coagularse. El hardware típico utilizado con estos agentes de pretratamiento puede incluir, por ejemplo, tanques, sistemas de dosificación automáticos, una prensa de filtro de correa y filtración o tamices para eliminar los coágulos (sólidos) formados en el proceso. Los sólidos capturados en el mecanismo de filtración 200 se separan del flujo principal y se cosechan.

Además, en algunas realizaciones, el pretratamiento puede incluir pasar el flujo a través de un proceso de luz ultravioleta para esterilizar cualquier sustancia biológica o viral en el agua. En circunstancias en las que el agua entrante ha limitado o no hay TSS (por ejemplo, menos de 15 mg/L) y/o taninos (por ejemplo, menos de 250 utilizando el método de platino y cobalto), es posible que no sea necesario el pretratamiento.

## 30 ETAPA 2: ACONDICIONAMIENTO DE EFLUENTES

El flujo prefiltrado del mecanismo de filtración 200 se bombea a través de una tubería de tránsito a un recipiente de acondicionamiento 202. En tránsito, el pH del flujo prefiltrado es monitoreado y el CO<sub>2</sub> se inyecta automáticamente usando una bomba dosificadora peristáltica (u otro dispositivo de inyección) 204 para alcanzar el nivel de pH deseado, normalmente entre 5,5 y 6,4. El volumen de CO<sub>2</sub> inyectado en la tubería se calcula en base a la temperatura, el pH, la alcalinidad y la presión del flujo. El nivel de pH, antes y después del puerto de inyección, se supervisa continuamente y los niveles de pH se modifican en consecuencia. Normalmente, el flujo ajustado por pH permanece en el recipiente de acondicionamiento 202 durante de entre 30 a 60 minutos. La inyección de CO<sub>2</sub> sirve para dos propósitos primarios: primero, sirve para saturar el efluente con carbono inorgánico disuelto que las algas requieren para realizar la fotosíntesis en etapas posteriores del proceso de tratamiento, como se describirá a continuación. En segundo lugar, el CO<sub>2</sub> disminuye el pH del flujo y, por lo tanto, disuelve las sales que pueden existir en altos niveles de pH. La reducción del pH y la disolución de estas sales dan como resultado mayor disponibilidad de nutrientes para las algas. Por ejemplo, si los niveles de pH son demasiado altos, el calcio se une con el fósforo, haciendo que el fósforo esté menos disponible para el consumo de las algas. Al salir del recipiente de acondicionamiento 202, el flujo condicionado tiene una suficiente biodisponibilidad de nutrientes y es rico en carbono.

Preferiblemente, el flujo acondicionado que sale del recipiente de acondicionamiento 202 se supervisa continuamente para los niveles de nutrientes y metales en trazas. En caso de que exista una deficiencia de nutrientes o metales en el flujo acondicionado, el flujo condicionado se dosifica automáticamente con cantidades apropiadas de nutrientes utilizando la bomba peristáltica 206 y/o los metales en trazas utilizando una bomba peristáltica 208.

## ETAPA 3: MEZCLA

El flujo acondicionado (que puede ser dosificado como se describió anteriormente) se bombea a través de una línea de tránsito desde el recipiente de acondicionamiento 202 hasta un tanque de mezcla 210. Además de recibir el flujo acondicionado del recipiente de acondicionamiento 202, el tanque de mezcla 210 también recibe continuamente un flujo de algas activadas por retorno (RAA) de más abajo en el sistema, como se describirá a continuación. Estos flujos combinados se denominan flujo de mezcla. La relación entre el flujo acondicionado y el flujo RAA es un valor predeterminado seleccionado en base a diversos factores como el diseño del sistema, la disponibilidad de nutrientes, los caudales de efluentes y el tiempo de retención. Un cociente típico de RAA al flujo acondicionado es 1 parte de RAA

a 1 parte de efluente acondicionada, o 50/50. Esta relación se puede mantener en el sistema, por ejemplo, mediante el uso de medidores de flujo electrónicos, accionamientos de frecuencia variable, bombas y tanques de equalización. Las algas en el flujo RAA pueden seleccionarse de entre varias algas fototróficas incluyendo, por ejemplo, *Spirulina*, *Nannochloropsis*, *Scenedesmus* o *Chlamydomonas*. El tanque de mezcla 210 preferiblemente incluye un mecanismo para crear un ambiente turbulento suficiente como para mantener las células de algas en suspensión. Se puede mantener la turbulencia, por ejemplo, usando un tanque de fondo cónico, caudales de entrada y ajustando el ángulo del flujo RAA acondicionado en el tanque. El tamaño del tanque de mezcla 210 se predetermina basándose en los parámetros de diseño del sistema, como el volumen de flujo entrante y el tiempo de retención necesario para iniciar los requisitos de eliminación de nutrientes y/o metales en trazas. El tiempo de retención en el tanque de mezcla 210 se calcula como del 50% al 100% del tiempo de retención requerido en el PBR. Un tiempo de retención normal, por ejemplo, es un valor de entre 30 y 60 minutos. Los sistemas de control electrónico controlan el pH, la temperatura y el caudal en el tanque de mezcla 210 y estos valores se utilizan para ajustar automáticamente el tiempo de retención utilizando medidores de flujo electrónicos, unidades de frecuencia variables, válvulas de control y bombas del flujo de mezcla en el tanque de mezcla.

En una realización alternativa, las etapas de acondicionamiento y mezcla descritas anteriormente se pueden realizar en una sola etapa integrada utilizando un solo recipiente, tanque o recipiente equivalente. Por ejemplo, el recipiente de acondicionamiento 202 puede eliminarse y el proceso de acondicionamiento descrito anteriormente se realiza en el tanque de mezcla 210, que sirve como tanque único. De acuerdo con este enfoque alternativo, CO<sub>2</sub>, nutrientes y/o metales en trazas se inyectan directamente en el tanque integrado único, por ejemplo, las bombas 206 y 208 se configuran para inyectar directamente en el tanque 210. La RAA se recibiría en el recipiente único como se describió anteriormente y el agua que sale del tanque único se denominaría el flujo de la mezcla.

#### ETAPA 4: EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES

El flujo de mezcla del tanque de mezcla 210 se bombea a un colector central conectado a una matriz de fotobiorreactor (PBR) 212 preferiblemente compuesto de múltiples PBR conectados en paralelo. El colector distribuye el flujo de la mezcla entrante por igual entre el número total de PBR, por ejemplo, 10. (Para simplificar la ilustración, se muestra un solo PBR en la figura). Cada PBR incluye una colección de tubos de PVC claros (es decir, ópticamente transparentes), cada uno preferiblemente con un diámetro de entre 2 a 6 pulgadas y una longitud de 20 a 80 pies. El diámetro de cada tubo es preferiblemente de 3 pulgadas y la longitud es preferiblemente de 80 pies. La longitud de cada tubo se puede seleccionar de acuerdo con el espacio disponible para el sistema. Las tuberías del PBR se instalan preferentemente con sus orientaciones horizontales al suelo y se apilan verticalmente sobre bastidores. El espaciado vertical entre las tuberías del PBR de 3 pulgadas de diámetro es preferiblemente de 6 pulgadas en el centro y el número de tuberías en un bastidor se determina por el tiempo de residencia necesario para reducir los nutrientes y/o metales en trazas al nivel deseado. En el extremo de cada tubo del PBR está una articulación del codo de 180 grados que conecta verticalmente los tubos adyacentes de PBR en el estante de modo que los tubos estén conectados en serie para formar una sola trayectoria en serpentina. Una porción del flujo de la mezcla del colector entra preferiblemente en cada PBR en el tubo superior del bastidor y fluye secuencialmente a través de todos los tubos de PBR. Cuando el flujo de la mezcla sale del tubo inferior del PBR, se logra el nivel de tratamiento deseado. Por lo tanto, el tratamiento se lleva a cabo en un solo paso a través del PBR y no es necesario reciclar el flujo de la mezcla a través del PBR.

Mientras que el flujo de la mezcla está recorriendo el PBR, el pH del flujo de la mezcla es monitoreado y el CO<sub>2</sub> se inyecta automáticamente usando una bomba dosificadora peristáltica 204 (o equivalente) para alcanzar un nivel de pH apropiado en el PBR, normalmente un pH neutro en el rango de 6,9 a 7,1. El PBR es iluminado por la luz de la longitud de onda apropiada y con la suficiente intensidad para facilitar niveles apropiados de fotosíntesis de las algas en el flujo de la mezcla en el PBR. La luz puede ser proporcionada por una fuente de luz natural 216 y/o fuente de luz artificial 214. En una realización preferida, la luz preferiblemente incluye longitudes de onda de entre 550 y 700 nanómetros o, más preferiblemente, de entre 650 y 675 nanómetros. La intensidad ambiente de la fuente de luz natural puede ser monitoreada y la intensidad de la fuente de luz artificial puede ajustarse automáticamente para compensar los niveles de intensidad cambiantes de la fuente de luz natural. Además del nivel de pH y la luz, también se realiza monitorización continua en línea de la densidad de algas y el caudal.

En algunas implementaciones, el flujo de la mezcla se expone a la luz directa en el PBR para una duración que es aproximadamente 40% al 60% del tiempo total en que el flujo de la mezcla está viajando a través de la mezcla, eliminación de nutrientes, y las etapas de separación y recuperación de sólidos. Durante el 50% del tiempo en el que el flujo de la mezcla no se expone a luz directa se encuentra en la etapa de separación o en la etapa de mezcla.

El tiempo de retención y, por lo tanto, la longitud y la altura de cada PBR, se define como la duración aproximada que una partícula determinada tarda en atravesar el PBR desde la entrada en la parte superior para salir en la parte inferior.

Así, el tiempo de retención está directamente relacionado con el diámetro de la tubería, la longitud total del PBR y el caudal volumétrico. Por lo tanto, el diseño del sistema y el tiempo de retención para el sistema se calculan utilizando los valores conocidos para los nutrientes disponibles estimados, la biomasa total del sistema, la tasa de crecimiento esperado promedio del organismo de algas seleccionado y los niveles de nutrientes deseados cuando sale del sistema, y se personaliza para cada sistema a base de la química específica del agua recibida tratada y los componentes dirigidos que se eliminarán.

Al salir de la parte inferior de la PBR, la porción de flujo de mezcla tratada se combina con otras porciones de flujo de mezcla tratada que han pasado de manera similar en paralelo a través de otros PBR en la matriz 212, formando un único flujo de mezcla tratada.

#### **ETAPA 5: SEPARACIÓN, RECUPERACIÓN DE SÓLIDOS Y RETORNO DEL FLUJO DE ALGAS**

El flujo de la mezcla tratada de PBR entra en el desviador (normalmente una compuerta automática o válvula de aguja) 218 que desvía una fracción excesiva del caudal de la mezcla como algas activadas por residuos (WAA). La cantidad de WAA que se ha desviado es, por ejemplo, de entre el 2% y el 10% del caudal total del sistema. La cantidad de WAA equivale a la cantidad de algas cultivadas en exceso de la densidad óptima identificada. Preferiblemente, el sistema se personaliza para un efluente de agua dado calculando la densidad deseada del cultivo de algas y la cantidad de WAA que debe eliminarse en forma continua para lograr los resultados deseados. La cantidad de WAA puede calcularse utilizando los siguientes factores primarios: la tasa de crecimiento de las algas, el tiempo total de retención del sistema y el caudal. Los factores secundarios adicionales que pueden ser contabilizados en la determinación de la WAA incluyen, pero sin limitarse, los nutrientes en el efluente de agua, la disponibilidad de luz, el diámetro del tamaño de la tubería y la temperatura del agua. Por ejemplo, para una tasa de crecimiento de algas de 1 duplicación por 24 horas, el crecimiento correspondiente de las algas es del  $100\%/24 \text{ horas} = 4,16\%$  por hora. Para un tiempo de retención del sistema de 1 hora, la tasa de cosecha continua del volumen del sistema es de  $1 \text{ hora} \times 4,16\%/hora = 4,16\%$ .

La porción del flujo de la mezcla que no se desvíe como WAA continúa a un tanque de igualación del filtro 220 donde los medidores de flujo y las bombas asociados se diseñan para monitorear y para mantener un flujo constante en la etapa de separación y de recuperación de los sólidos del proceso de tratamiento.

Después de salir del tanque de equalización del filtro 220, el flujo de mezcla entra en un proceso de separación y recuperación de sólidos que elimina los sólidos (algas) del líquido (agua). Al término de esta etapa, los sólidos en forma de un flujo denso de las microalgas (RAA) se bombean al tanque de mezcla 210 donde se mezclan con flujo acondicionado corriente arriba y comienzan el proceso de extracción de nutrientes y/o metales en trazas. Mantener un suministro continuo de algas sanas a la densidad óptima que circula consistentemente a través de la mezcla, PBR, y las etapas de separación proporciona la capacidad de tratar un flujo continuo de agua. Las realizaciones preferidas de la invención normalmente regresan al tanque de mezcla 210 el 100% del flujo denso de microalgas vivas (RAA) que salen de la etapa de separación, aunque es posible devolver menos, por ejemplo, el 50%.

En una realización preferida, el proceso de separación y recuperación de sólidos se implementa bombeando la mezcla del tanque de equalización del filtro 220 a través de un filtro de flujo cruzado 222. Dentro del filtro de flujo cruzado 222, el flujo de la mezcla viaja a través de la superficie de una membrana filtrante a una presión de entre 20 y 80 psi para mantener un flujo turbulento. El mantenimiento de esta presión, con medidores de caudal y bombas, en el filtro de flujo transversal 222, obliga a una porción del agua en el flujo de la mezcla a través de poros de diámetro submicrónico de la membrana del filtro mientras que las partículas suspendidas (es decir, las algas) permanecen en una corriente de retenido, o RAA. El flujo de RAA que sale del filtro normalmente tiene al menos el doble de densidad de algas en volumen que el flujo de mezcla que ingresa en el filtro. El agua que se ve forzada a través de los poros del filtro de membrana forma un flujo de agua totalmente tratada y se conoce como el permeado. Las realizaciones logran fácilmente flujos de permeado con menos de 50 mg/l de microalgas. En una realización preferida, el flujo de permeado tiene menos de 2 mg/l de microalgas. El permeado puede descargarse en el ambiente de acuerdo con las regulaciones apropiadas o puede ser reutilizado en procesos contracorriente. En algunas realizaciones, el permeado se puede pulir adicionalmente antes de la descarga o de la reutilización por el aparato de pulido opcional 226 que realiza la filtración y la desinfección, por ejemplo, por la irradiación ultravioleta.

El retentado se bombea desde el filtro de flujo cruzado 222 hasta el tanque de equalización de RAA opcional 224, que está diseñado para recibir y sostener la RAA con el fin de garantizar un caudal constante de RAA en el tanque de mezcla 210. Un mínimo del 50% en volumen del flujo denso de microalgas vivas (RAA) se devuelve a través de una línea de retorno al recipiente de mezcla. Más preferiblemente, del 99% al 100% en volumen del flujo denso de microalgas vivas (RAA) se devuelve al recipiente de mezcla.

En la fig. 2B, se muestra una realización alternativa de la etapa de separación y recuperación de sólidos. En esta realización, el flujo de mezcla tratada se bombea desde el tanque de ecuilización de filtración 219 a un tanque de condensación de filtro 221. La mezcla en el tanque de condensación del filtro 221 se bombea luego en el filtro de flujo cruzado 223. En el filtro de flujo cruzado 223, una membrana filtrante separa la mezcla en una corriente de permeado y una corriente de retenido, al igual que en la realización descrita anteriormente. En este caso, sin embargo, el retenido del filtro de flujo cruzado 223 se distribuye de nuevo en el tanque de condensación del filtro 221, aumentando la densidad de algas en el tanque. Un flujo denso de algas (RAA) se bombea desde el tanque de condensación del filtro 221 hasta el tanque de ecuilización opcional 225 antes de ser devuelto al tanque de mezcla corriente arriba. De lo contrario, esta realización alterna es idéntica a la de la realización mostrada en la fig. 2A.

La fig. 3 ilustra los detalles de un filtro de flujo cruzado según las realizaciones descritas anteriormente en relación con las figs. 2A y 2B. El flujo de mezcla entra en el filtro en un puerto superior 300 y fluye hacia abajo a través de un tubo de 1,5 mm de diámetro 302 encerrado en una carcasa cilíndrica 304. Las paredes del tubo 302 están hechas de una membrana (compuesta, por ejemplo, de polisulfona o polímero de acrilonitrilo) con poros de 0,5 micrómetros de diámetro. La mezcla experimenta un flujo turbulento a medida que viaja hacia abajo a través del tubo 302 a una presión de operación típica de entre 20 y 80 psi. Como resultado, una porción del agua en la mezcla pasa a través de las paredes de la membrana del tubo 302 y en el espacio entre el tubo 302 y la cubierta exterior 304. Este permeado de agua limpia luego sale del dispositivo a través de los puertos 306 y 308 cerca de la parte superior e inferior de la carcasa cilíndrica 304, respectivamente. Mientras tanto, el flujo concentrado de algas (retenido) sale del filtro en un puerto inferior 310. En las realizaciones preferidas, la concentración de algas en el retenido que sale del filtro es al menos un factor de dos mayor que la concentración de algas en la mezcla que ingresa en el filtro.

Las figs. 4A-B son ilustraciones esquemáticas de los detalles asociados a la filtración de flujo cruzado y la etapa de separación en una realización preferida que prevé un proceso de limpieza del filtro de retro lavado, es decir, un proceso de limpieza in situ (CIP). Durante el funcionamiento normal, mostrado en la fig. 4A, el caudal de la mezcla tratada se bombea desde el tanque de ecuilización del filtro 400 por la bomba 402 a través de la válvula 404 y en el filtro de flujo cruzado 408. La bomba 402 es controlada por una unidad de frecuencia variable (VFD) para proporcionar un caudal constante que equivale a una presión de 20 a 80 psi en el filtro 408. El retenido del filtro 408 pasa a través de la válvula 414 y vuelve al tanque de ecuilización 400. La RAA fluye desde el tanque de ecuilización del filtro 400 hasta el tanque de ecuilización de RAA 418 y luego se bombea corriente arriba. Mientras tanto, el permeado del filtro de flujo cruzado 408 fluye a través de la válvula 410 y en el tanque de retención de permeado 412 (opcional) y luego sale de la etapa de filtración y separación.

Durante la operación de retro lavado, mostrada en la fig. 4A, se abren las válvulas 406, 416, 420, 422, que se cerraron durante el funcionamiento normal; y las válvulas 404, 410, 414, que estaban abiertas durante el funcionamiento normal, se cierran. Además, la bomba 402, que estaba encendida durante el funcionamiento normal, se apaga; y la bomba 424, que estaba apagada durante el funcionamiento normal, se enciende. Consecuentemente, el permeado del tanque 412 fluye a través de la válvula 422, la bomba 424, la válvula 420, y en el filtro de flujo cruzado 408 en un flujo inverso. Alternativamente, se puede utilizar una fuente de agua limpia externa para la fuente de retro lavado en lugar de agua del tanque de permeado 412. Los limpiadores 426 pueden inyectarse y mezclarse con el flujo de retrolavado antes de entrar en el filtro de flujo cruzado 408. Por ejemplo, los limpiadores pueden incluir disolventes como lejía, hipoclorito de sodio o ácido cítrico que ayudan a mantener el rendimiento del filtro. El flujo de retrolavado sale del filtro 408 tanto a través de la entrada de mezcla como de la salida de retenido. Este último fluye a través de la válvula 416 y se combina con el primero, y el flujo de retrolavado combinado pasa a través de la válvula 406 y fuera de una línea de desecho donde se maneja de acuerdo con los requisitos reglamentarios y/o cualquier hoja de datos de seguridad de materiales (MSDS). Durante la operación de retrolavado, la RAA puede continuar fluyendo desde el tanque 418 y el permeado puede continuar fluyendo desde el tanque 412. Cuando se completa el modo de retrolavado, las válvulas y las bombas se devuelven a sus estados de funcionamiento normales, como se describe con referencia a la fig. 4A.

El subsistema de filtración de flujo cruzado mostrado en las figs. 4A-B puede estar compuesto por una serie de tubos interconectados que generalmente utilizan tuberías de PVC de programación 80, bombas, equipos de control (es decir, rotómetro, restrictor, etc.) e instrumentación para controles y retroalimentación del rendimiento de la filtración. Se pueden utilizar una serie de controles manuales y automáticos que incluyen medidores de presión, temperatura y flujo para monitorear, controlar y optimizar el rendimiento del sistema. Los datos pueden adquirirse constantemente a través de telemetría digital y almacenarse y grabarse en un controlador lógico programable (PLC). Este sistema de monitorización y control se puede utilizar para activar periódica y automáticamente el modo de operación de retrolavado y volver al funcionamiento normal. En una realización preferida, el modo de retrolavado puede activarse durante 1 minuto de cada 60 minutos.

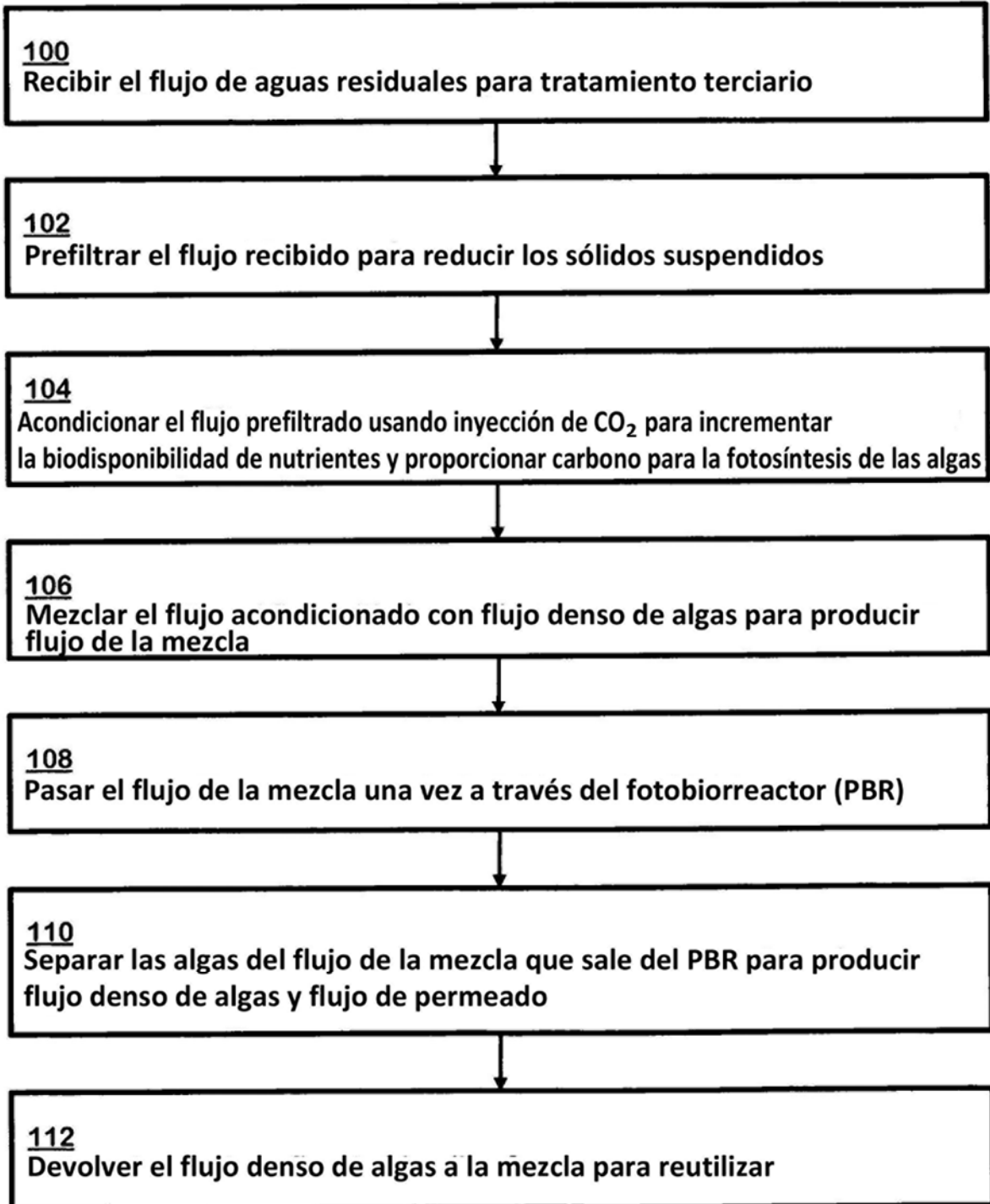


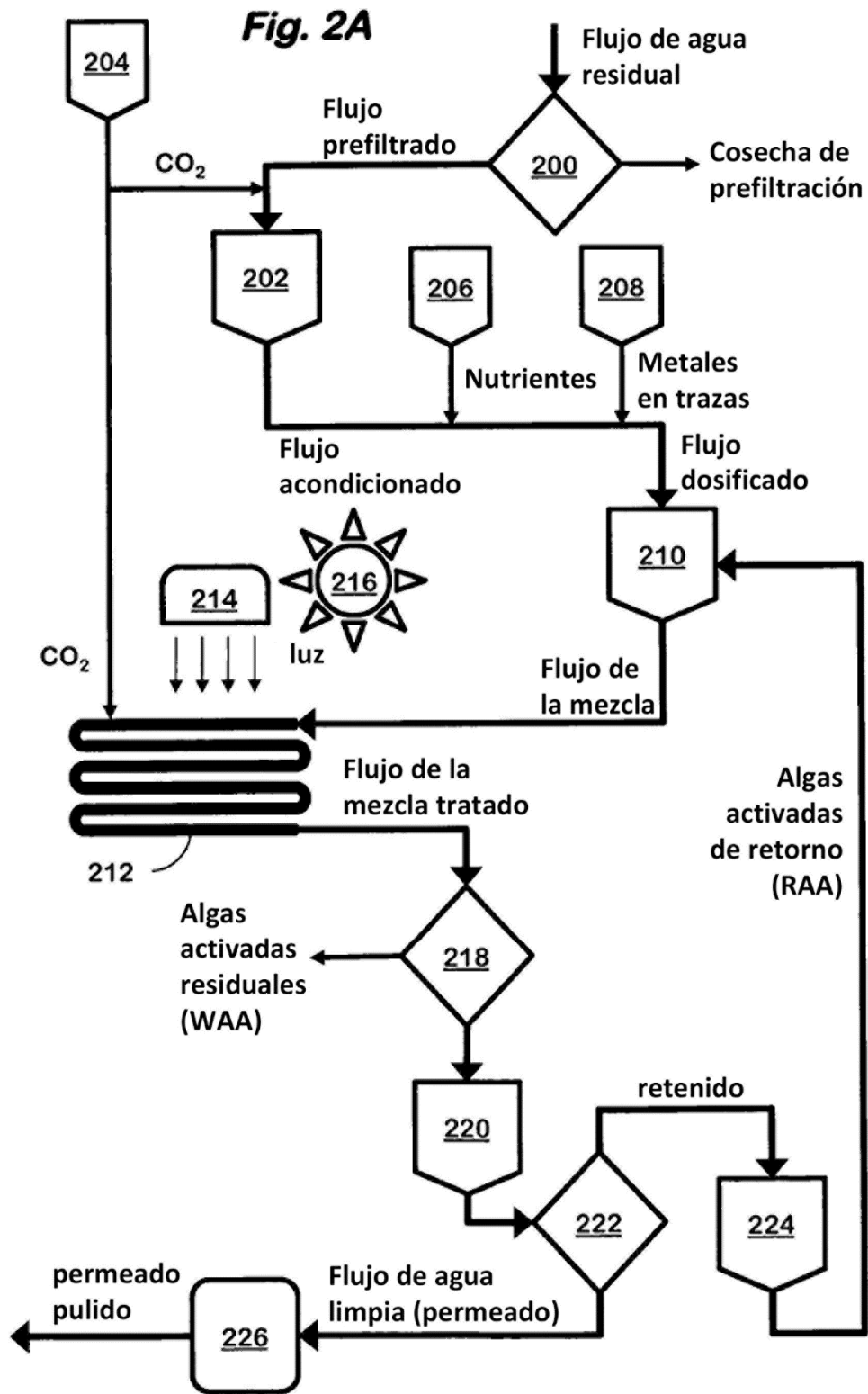
**REIVINDICACIONES**

1. Un método para el tratamiento avanzado de agua, que comprende:
- 5 a) recibir (100) un flujo continuo de agua;  
b) prefiltrar (102) el caudal de agua recibido para reducir los sólidos suspendidos;  
c) añadir CO<sub>2</sub> (104) al flujo prefiltrado de agua para aumentar la biodisponibilidad de los constituyentes de nutrientes en el flujo prefiltrado, acondicionando así el flujo prefiltrado;  
10 d) mezclar (106) en un recipiente de mezcla (210) el flujo acondicionado con un flujo de microalgas vivas (RAA) para producir un flujo de mezcla;  
e) pasar (108) el flujo de la mezcla una vez a través de un fotobiorreactor de tubo cerrado (PBR) para que las microalgas en el flujo de la mezcla se reproduzcan y tomen los nutrientes y los metales en trazas en el flujo de la mezcla;  
15 f) separar continuamente (110) microalgas del caudal de la mezcla que sale del fotobiorreactor para producir un flujo tratado (permeado) y el flujo de microalgas vivas (RAA), y además comprende la medición de la turbidez del caudal de la mezcla que sale del fotobiorreactor y eliminar una fracción del caudal de la mezcla (denominada flujo de WAA) del caudal de la mezcla, donde el tamaño de la fracción se basa en la turbidez medida; Y  
g) el retorno continuo (112) del flujo de microalgas vivas (RAA) al recipiente de mezcla (210), en donde el 50% o más en volumen del flujo de microalgas vivas (RAA) separado del flujo de mezcla que sale del  
20 fotobiorreactor se devuelve al recipiente de mezcla (210).
2. El método según con la reivindicación 1 que comprende, además, la eliminación del flujo prefiltrado el total de sólidos suspendidos y taninos (color).
- 25 3. El método según la reivindicación 1 que comprende, además, la esterilización del flujo prefiltrado con irradiación UV.
4. El método según la reivindicación 1 que comprende, además, la medición de los niveles de pH del flujo prefiltrado y la adición de CO<sub>2</sub> al flujo prefiltrado en base a los niveles de pH medidos para alcanzar el nivel de pH  
30 deseado.
5. El método según la reivindicación 1, en el que el acondicionamiento se realiza en un tanque de acondicionamiento distinto del recipiente de mezcla (210).
- 35 6. El método según la reivindicación 1, en el que el acondicionamiento se realiza en el recipiente de mezcla (210).
7. El método según la reivindicación 1 que comprende, además, la medición de los niveles de nutrientes del flujo acondicionado y la adición de nutrientes al flujo acondicionado en base a los niveles de nutrientes medidos  
40 para lograr un nivel deseado de nutrientes.
8. El método según la reivindicación 1 que comprende, además, la medición de los niveles de metales en trazas del flujo acondicionado y la adición de metales en trazas al flujo acondicionado en base a los niveles de metales en trazas medidos para lograr un nivel deseado de metales en trazas.  
45
9. El método según la reivindicación 1 que comprende, además, la medición del pH del flujo de la mezcla en el fotobiorreactor y la adición de CO<sub>2</sub> al fotobiorreactor en base al pH medido para alcanzar el nivel de pH deseado.
10. El método según la reivindicación 1 que comprende, además, la medición de un nivel de luz ambiente  
50 cerca del fotobiorreactor y la exposición del fotobiorreactor a luz suplementaria, donde la cantidad de luz suplementaria se basa en el nivel de luz ambiente medido para lograr un nivel de luz ambiente deseado.
11. El método según la reivindicación 1, en donde el flujo de microalgas (RAA) contiene algas fototróficas seleccionadas del grupo que consiste en *Spirulina*, *Nannochloropsis*, *Scenedesmus* y *Chlamydomonas*.  
55
12. El método según la reivindicación 1, en el que la separación de las microalgas comprende la filtración del flujo de la mezcla que sale del fotobiorreactor mediante filtración de flujo cruzado.
13. El método según reivindicación 1 que comprende, además, el pulido del flujo tratado (permeado) por  
60 filtración.

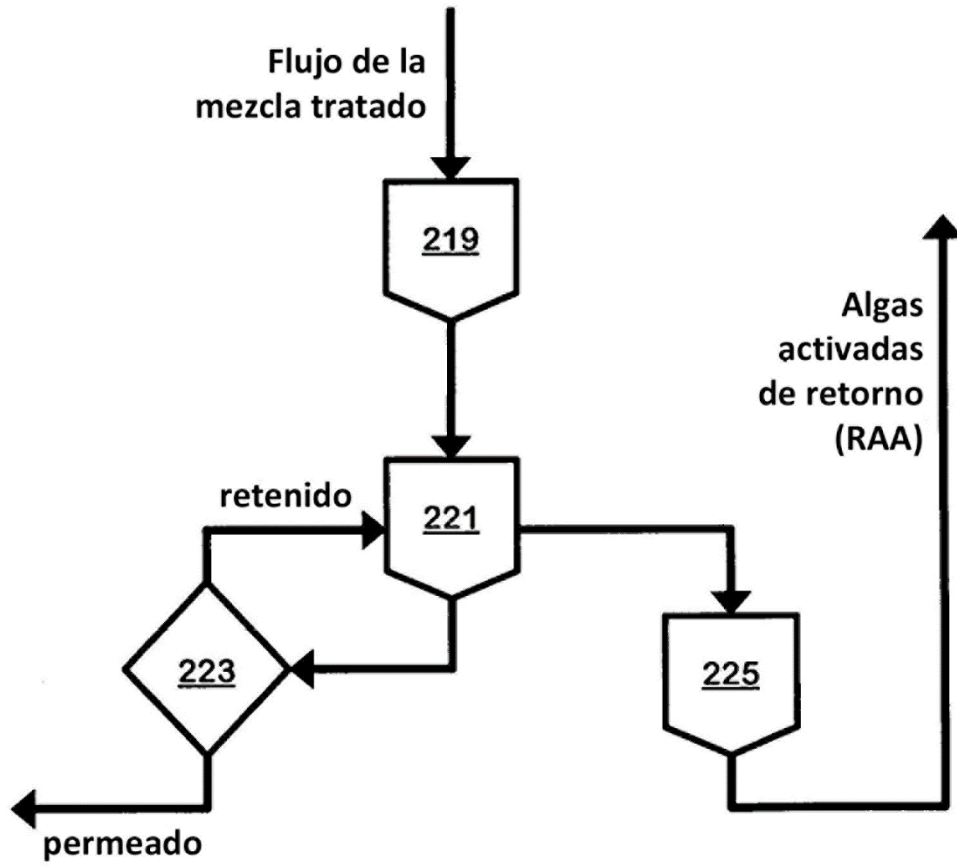
14. Un sistema para el tratamiento avanzado de agua, que comprende:  
 un prefiltro (200) para la reducción de sólidos suspendidos de un flujo de agua recibido para producir un flujo prefiltrado;
- 5 un recipiente de acondicionamiento (202) acoplado al prefiltro para aumentar la biodisponibilidad de los constituyentes de nutrientes en un flujo prefiltrado para producir un flujo acondicionado;
- un recipiente de mezcla (210) acoplado al recipiente de acondicionamiento (202) para mezclar el flujo acondicionado con un flujo de microalgas vivas (RAA) para producir un flujo de mezcla;
- 10 un fotobiorreactor de tubo cerrado (PBR) (212) acoplado al recipiente de mezcla (210) para recibir el flujo de la mezcla y permitir que las microalgas en el flujo de la mezcla se reproduzcan y tomen nutrientes y metales en trazas en el flujo de la mezcla para producir un flujo de mezcla tratada;
- un filtro de separación (222) acoplado al fotobiorreactor de tubo cerrado para separar continuamente las microalgas del flujo de la mezcla tratada que sale del fotobiorreactor (212) para producir un flujo de agua limpia (permeado) y el flujo de microalgas vivas (RAA), donde el sistema comprende, además, los medios
- 15 para medir la turbidez del flujo de la mezcla que sale del fotobiorreactor y un desviador (218) para eliminar una fracción del flujo de la mezcla (denominada flujo de WAA), donde el tamaño de la fracción se basa en la turbidez medida; y
- un retorno de flujo de microalgas vivas (RAA) acoplado al filtro de separación para devolver continuamente el flujo de microalgas vivas (RAA) al recipiente de mezcla (210), y que está configurado para devolver el 50%
- 20 o más del flujo de microalgas vivas (RAA) separados del flujo de mezcla de la salida del fotobiorreactor (212) al recipiente de mezcla (210).
15. El sistema según la reivindicación 14 que comprende, además, un dispositivo dosificador de CO<sub>2</sub> acoplado a una línea de tránsito que conecta el prefiltro al recipiente de acondicionamiento (202) para inyectar CO<sub>2</sub>
- 25 en el flujo prefiltrado para lograr un nivel de pH deseado.
16. El sistema según la reivindicación 14 que comprende, además, un dispositivo dosificador acoplado a una línea de tránsito que conecta el recipiente de acondicionamiento (202) al recipiente de mezcla (210) para inyectar nutrientes en el flujo condicionado para lograr un nivel de nutrientes deseado.
- 30 17. El sistema según la reivindicación 14 que comprende, además, un dispositivo dosificador acoplado a una línea de tránsito que conecta el recipiente de acondicionamiento (202) al recipiente de mezcla (210) para inyectar metales en trazas en el flujo acondicionado para lograr un nivel de metales en trazas deseado.
- 35 18. El sistema de la reivindicación 15 que comprende, además, un dispositivo de dosificación de CO<sub>2</sub> acoplado al fotobiorreactor de tubo adjunto (212) para inyectar CO<sub>2</sub> en el flujo de mezcla para lograr un nivel de pH deseado.
19. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones 14 a 18, en el que el recipiente de
- 40 acondicionamiento (202) y el recipiente de mezcla (210) forman un recipiente de acondicionamiento y mezcla integrado para recibir un flujo de agua recibido para aumentar la biodisponibilidad de los constituyentes de los nutrientes en el flujo recibido y para mezclar el flujo recibido con un flujo de microalgas vivas (RAA) para producir un flujo de la mezcla.

**Fig. 1**

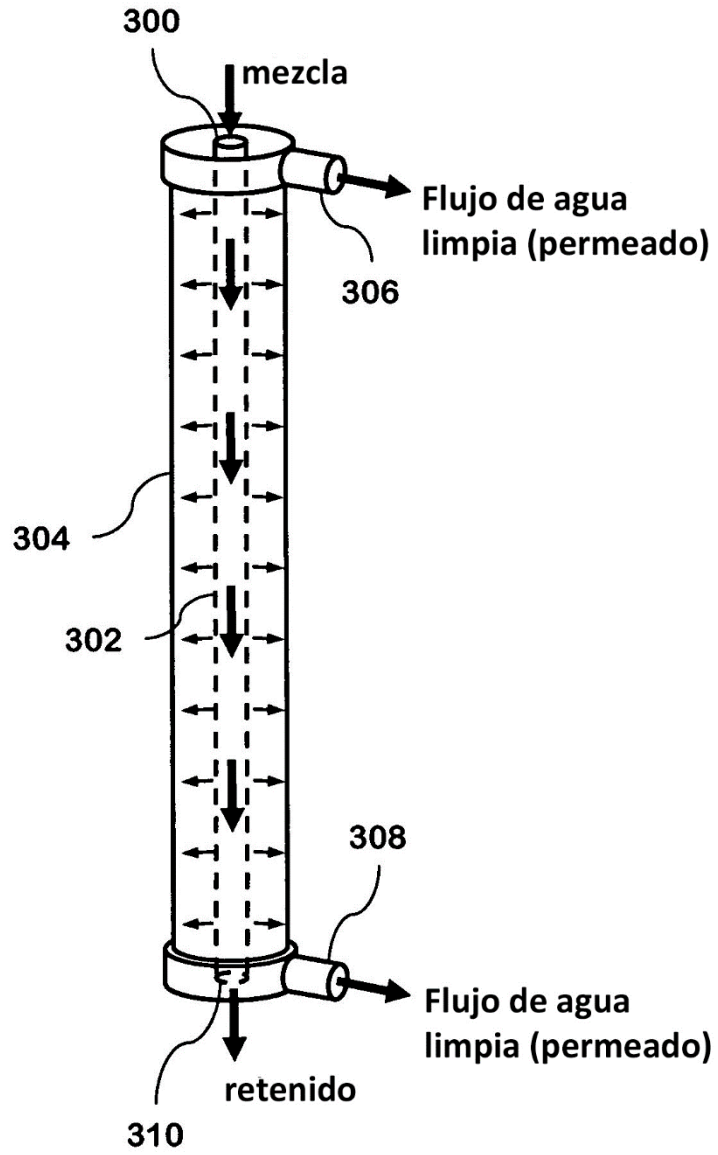




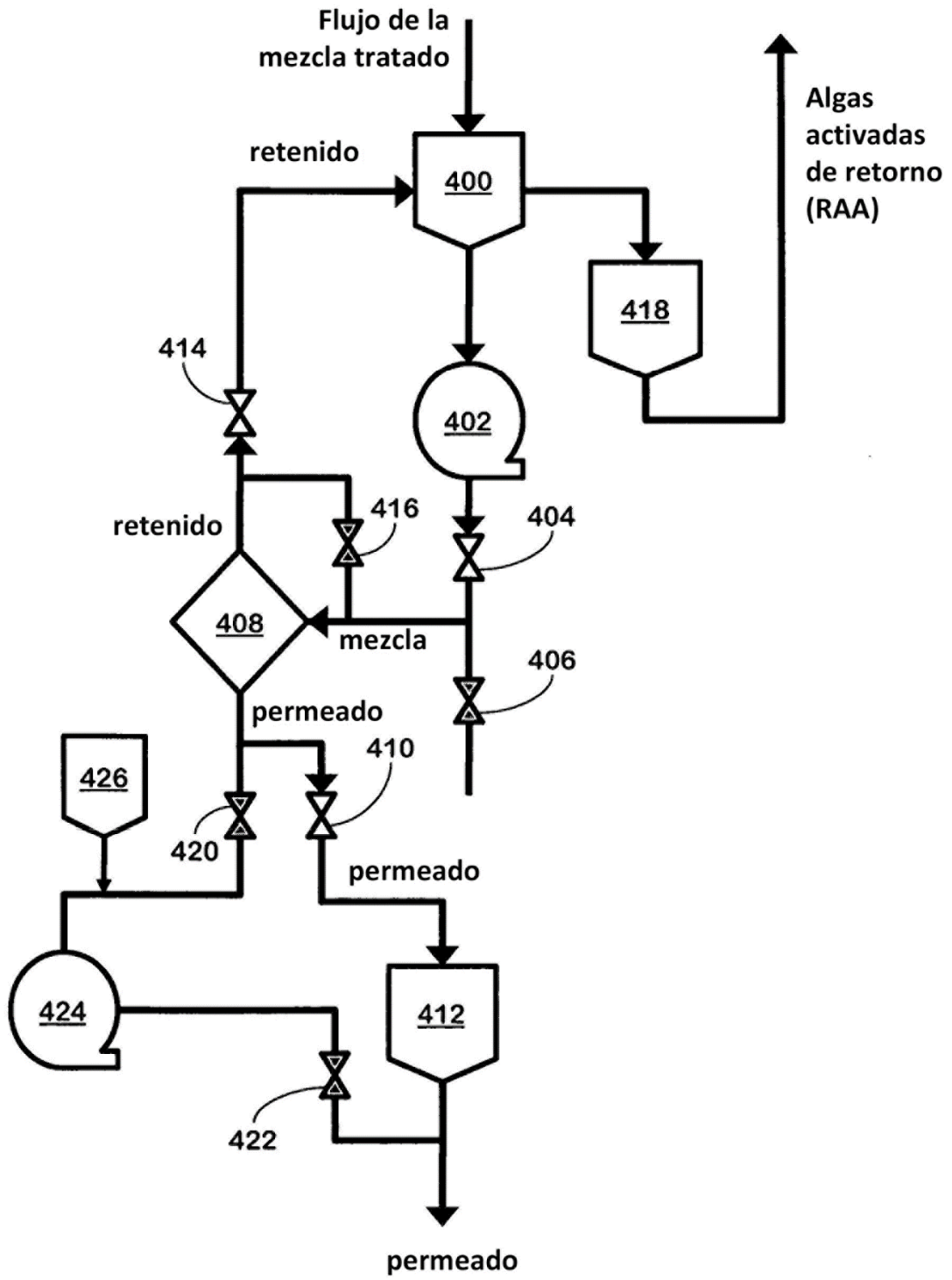
**Fig. 2B**



**Fig. 3**



**Fig. 4A**



**Fig. 4B**

