

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 681 273**

51 Int. Cl.:

C02F 1/52 (2006.01)

C02F 1/66 (2006.01)

C02F 1/00 (2006.01)

B01D 9/00 (2006.01)

C02F 101/16 (2006.01)

C02F 101/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.02.2004** **PCT/CA2004/000208**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.08.2005** **WO05077834**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.02.2004** **E 04710763 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.06.2018** **EP 1713732**

54 Título: **Tratamiento de aguas residuales en lecho fluidificado**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
12.09.2018

73 Titular/es:

**THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA
(100.0%)
UNIVERSITY-INDUSTRY LIAISON OFFICE, NO.
103-6190 AGRONOMY ROAD
VANCOUVER, BRITISH COLUMBIA V6, CA**

72 Inventor/es:

**KOCH, FRED;
MAVINIC, DONALD;
YONEMITSU, NOBORU y
BRITTON, AHREN THOMAS**

74 Agente/Representante:

SALVÀ FERRER, Joan

ES 2 681 273 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 de aguas residuales en lecho fluidificado

5 CAMPO TÉCNICO

[0001] La invención se refiere en general a la eliminación de fósforo, nitrógeno y solutos similares de las aguas residuales. La invención se refiere más específicamente a la eliminación de solutos de las aguas residuales en reactores de lecho fluidificado. En algunas realizaciones de la invención, el fósforo y el nitrógeno son eliminados de las aguas residuales y recuperados en forma de estruvita, análogos de la estruvita, u otros compuestos de fosfato. En algunas realizaciones, la invención se aplica para recuperar un producto que puede usarse como fertilizante.

ANTECEDENTES

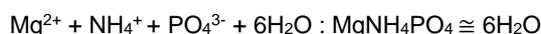
15 [0002] Las soluciones acuosas que contienen concentraciones significativas de fósforo y/o nitrógeno pueden causar problemas significativos si son liberadas al medio ambiente. Existen diversas fuentes para tales soluciones. Estas incluyen fuente tales como lixiviación procedente de vertederos, escorrentía procedente de terreno agrícola, efluente procedente de diversos procesos industriales, aguas residuales municipales, residuos animales tales como 20 aguas residuales procedentes de cebaderos u otras instalaciones de cría de animales y similares.

[0003] En tales soluciones, normalmente el nitrógeno está presente fundamentalmente en forma de amoníaco y el fósforo normalmente está presente fundamentalmente en forma de fosfato. Muchas jurisdicciones tienen leyes que limitan la concentración permisible de fósforo y/o amoníaco en las aguas residuales tratadas descargadas al 25 medio ambiente.

[0004] Existen diversas tecnologías de eliminación y recuperación de fósforo. Algunas de estas tecnologías proporcionan reactores de cristalización. Se mantienen condiciones en los reactores de cristalización que promueven la cristalización de compuestos de fosfato. Estas incluyen:

- 30
- S. Regy y col. Phosphate recovery by struvite precipitation in a stirred reactor, LAGEP (marzo a diciembre de 2001) incluye un estudio de diversos intentos de eliminar fósforo y nitrógeno de las aguas residuales por precipitación de estruvita.
 - Trentelman, patente de EE. UU. 4.389.317 y Piekema y col., Phosphate Recovery by Crystallization Process: 35 Experience and Developments, documento presentado en la 2nd International conference on Phosphate Recovery for Recycling from Sewage and animal Wastes, Noordwijkerhout, Países Bajos, 12-13 de marzo de 2001, describe un reactor y un procedimiento para precipitar fosfato en forma de fosfato de calcio, fosfato de magnesio, fosfato de amonio y magnesio o fosfato de magnesio y potasio.
 - Ueno y col., Three years experience on operating and selling recovered struvite from full scale plant (2001) 40 Environmental Technology v. 22 p. 1373 describen el uso de reactores de cristalización de corriente lateral para eliminar fosfato en forma de fosfato de amonio y magnesio (también conocido como estruvita).
 - E.V. Munch y col., Making a business from struvite crystallization for wastewater treatment: turning waste into gold, documento presentado en la 2nd International conference on Phosphate Recovery for Recycling from Sewage and animal Wastes, Noordwijkerhout, Países Bajos, 12-13 de marzo de 2001, describe el uso de un proceso de 45 cristalización de estruvita para eliminar nitrógeno y fósforo de las aguas residuales en forma de estruvita.
 - S.A. Parsons y col., Assessing the potential for struvite recovery at sewage treatment works, (2001) Environmental Technology v. 22 p. 1279 examinan diversos intentos de eliminar nitrógeno y fósforo de las aguas residuales en forma de estruvita.
 - Tsunekawa y col., resúmenes de patentes de Japón N.º 11-267665, describe una torre de reacción para eliminar 50 fósforo del agua.

[0005] La estruvita puede formarse por la reacción:



55 [0006] Un beneficio de la eliminación del fósforo y el nitrógeno produciendo estruvita es que la estruvita puede ser recuperada y tiene valor como fertilizante de liberación lenta.

[0007] Algunos de los procesos anteriores que han producido estruvita a partir de fosfatos y amoníaco en

aguas residuales producen, de manera no deseable, pequeñas partículas de estruvita. Tales pequeñas partículas tienen un valor más limitado como fertilizante.

5 **[0008]** El documento JP 11/267665 A describe un reactor que trata el agua que incluye partículas de MAP (fosfato de magnesio y amonio). El reactor comprende una sección de almacenamiento que tiene un diámetro más pequeño y una sección superior que tiene un diámetro más grande. La sección de almacenamiento y la sección superior están conectadas por una parte cónica, cuyo diámetro se dispensa desde la sección de almacenamiento hasta la sección superior. El agua cruda se introduce dentro del reactor por una tubería de introducción dentro de la parte cónica. Cuando la concentración de MAP disminuye, se introduce $MgCl_2$.

10 **[0009]** El documento JP 2000/334474 A muestra un reactor para tratar aguas residuales. El agua cruda se introduce dentro del reactor por una tubería de introducción. Un valor de pH del agua del interior del reactor se controla mediante un medidor de pH. Si es necesario, puede introducirse NaOH o $MgCl_2$ dentro del reactor por tuberías de introducción

15 **[0010]** El documento DE 38 19 965 A describe un aparato para tratar agua que usa microorganismos. Los microorganismos son transportados por partículas que forman un lecho fluidificado. Las partículas están hechas de arcilla porosa que permite que las partículas tengan una densidad relativa deseada.

20 **[0011]** Sigue existiendo una necesidad de procedimientos y aparatos económicos para eliminar fósforo, nitrógeno y solutos similares de las aguas residuales y otras soluciones acuosas.

RESUMEN DE LA INVENCION

25 **[0012]** Esto se consigue mediante las características de las reivindicaciones independientes.

[0013] Esta invención proporciona procedimientos y sistemas que pueden aplicarse para eliminar solutos tales como fósforo y/o nitrógeno de las aguas residuales. Como se indica más adelante, el término «aguas residuales» se usa en el presente documento para referirse en general a tales soluciones. En muchas realizaciones de la invención, el fósforo y/o el nitrógeno son recuperados en forma de pastillas de un producto sólido. En algunas realizaciones de la invención, las pastillas pueden usarse para fertilizante. Las pastillas pueden comprender estruvita, fosfato de magnesio y potasio, o un compuesto de fosfato, por ejemplo.

35 **[0014]** Un aspecto de la invención proporciona un reactor de lecho fluidificado para uso en la eliminación de solutos de las aguas residuales. El reactor comprende una columna que comprende un conducto orientado de manera sustancialmente vertical que tiene una sección de recolección y al menos dos secciones secuenciales verticalmente por encima de la sección de recolección. Un área de la sección transversal del conducto aumenta entre secciones adyacentes de las secciones. En algunas realizaciones, el área de la sección transversal aumenta gradualmente. El número de secciones de la columna puede variarse. Una entrada para aguas residuales está provista en la columna en o debajo de la sección de recolección. Un recorrido de reciclaje se extiende desde una salida en una porción superior del conducto hasta la entrada.

45 **[0015]** En algunas realizaciones, la entrada está orientada de manera sustancialmente vertical y está configurada para dirigir un chorro turbulento de las aguas residuales afluentes hacia arriba por el interior de la columna. En algunas realizaciones una relación de un área de la sección transversal de la sección más alta respecto a un área de la sección transversal de la sección de recolección es al menos 10:1 y, en algunos casos, excede de 20:1. En algunas realizaciones, el área de la sección transversal del conducto aumenta gradualmente por un factor de al menos $1\frac{1}{2}$ entre las secciones adyacentes de las secciones.

50 **[0016]** Otro aspecto de la invención proporciona un procedimiento para extraer fósforo y/o nitrógeno de las aguas residuales. El procedimiento comprende introducir las aguas residuales dentro de una columna que comprende un conducto orientado de manera sustancialmente vertical que tiene una sección de recolección y al menos dos secciones secuenciales verticalmente por encima de la sección de recolección. En la columna, un área de la sección transversal del conducto aumenta entre secciones adyacentes de las secciones. En algunas realizaciones de la invención, el área de la sección transversal aumenta gradualmente entre las secciones. El procedimiento mantiene condiciones de sobresaturación para la estruvita en la sección de recolección e implica reciclar las aguas residuales que han pasado a través de la columna mientras se controla una proporción de sobresaturación de estruvita en la sección de recolección, al menos en parte controlando una relación de reciclaje de una tasa a la que las aguas residuales son recicladas dentro de la columna respecto a una tasa total a la que las

aguas residuales están siendo introducidas dentro de la columna. En algunas realizaciones, una relación de sobresaturación para la estruvita, el fosfato de magnesio y potasio, o un compuesto de fosfato se mantiene en el intervalo de 2 a 5 dentro de la sección de recolección. En algunas realizaciones de la invención, la relación de sobresaturación está en el intervalo de 3 a 4. Se forman pastillas dentro de la columna. Las pastillas pueden estar compuestas fundamentalmente de estruvita. Las pastillas son recolectadas de la sección de recolección.

[0017] En algunas realizaciones, extraer las pastillas de la sección de recolección comprende extraer las pastillas a una tasa tal que un tiempo de retención de cristal de las pastillas en la columna es al menos una semana. En algunas realizaciones, el tiempo de retención de cristal está en el intervalo de 8 a 12 días. El tiempo de retención de cristal se define más adelante.

[0018] El procedimiento puede comprender controlar el pH, por ejemplo, añadiendo una solución alcalina dentro de la columna. El pH puede mantenerse para que tenga un valor en el intervalo de 7,4 a 8,5 dentro de la sección de recolección. En algunas realizaciones, el procedimiento implica mantener un pH que no exceda de 8 en la sección de recolección.

[0019] Pueden añadirse de manera controlable soluciones que contienen iones de magnesio y/o amoníaco para ayudar a mantener la relación de sobresaturación de estruvita en el intervalo deseado. El procedimiento controla el flujo de las aguas residuales en la columna. En algunas realizaciones el procedimiento mantiene una velocidad de flujo ascendente media de al menos 400 cm/min dentro de la zona de recolección y una velocidad de flujo ascendente media que no excede de 75 cm/min dentro de una sección más alta. En algunas realizaciones una relación de la velocidad de flujo ascendente media en la sección de recolección respecto a la velocidad de flujo ascendente media en la sección más alta es al menos 10:1 y en algunos casos al menos 20:1.

[0020] Otro aspecto de la invención proporciona un procedimiento para extraer fósforo o nitrógeno o ambos de las aguas residuales. El procedimiento comprende mantener las condiciones de sobresaturación para un producto de reacción sólido en una columna orientada de manera sustancialmente vertical, introducir las aguas residuales dentro de la columna, y permitir que se formen en la columna partículas del producto de reacción. El procedimiento mantiene las partículas del producto de reacción en un lecho fluidificado dentro de la columna. El lecho fluidificado se extiende por al menos tres zonas verticalmente secuenciales dentro de la columna. Las aguas residuales dentro de cada una de las zonas tienen una velocidad de fluido ascendente media diferente, de modo que la velocidad de fluido ascendente media es inferior en las zonas verticalmente más altas de las zonas que en las zonas verticalmente más bajas de las zonas. El procedimiento permite que las partículas crezcan hasta un tamaño suficiente para migrar hacia abajo hasta una zona de recolección que comprende al menos una porción de una zona más baja de las al menos tres zonas, y recolecta las partículas de la zona de recolección.

[0021] Más adelante se describen aspectos adicionales de la invención y características de realizaciones específicas de la invención.

40 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0022] En los dibujos que ilustran realizaciones no limitativas de la invención,

la figura 1 es un diagrama de bloques del reactor de lecho fluidificado según una realización de la invención, la figura 2 es un gráfico que ilustra la solubilidad de la estruvita como una función del pH; y la figura 3 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento para eliminar fósforo y nitrógeno de las aguas residuales en forma de estruvita.

DESCRIPCIÓN

[0023] A lo largo de la siguiente descripción se exponen detalles específicos con el fin de proporcionar una comprensión más exhaustiva de la invención. Sin embargo, la invención puede ponerse en práctica sin estas particularidades. En otros casos, elementos bien conocidos no se han mostrado o descrito en detalle para evitar enturbiar innecesariamente la invención.

[0024] Lo que viene a continuación describe realizaciones de la invención para eliminar fósforo y nitrógeno de las aguas residuales en forma de estruvita. Esta elección de ejemplo coincide con un aspecto de la invención que tiene utilidad comercial significativa. El alcance de la invención no está limitado a la producción de estruvita como se indica específicamente en las reivindicaciones adjuntas. En algunas realizaciones de la invención, el fósforo y el

nitrógeno se eliminan de las aguas residuales en forma de análogo de la estruvita. Los análogos de la estruvita que pueden producirse según la invención incluyen: fosfato de magnesio y potasio. En algunas realizaciones de la invención, el fósforo se elimina de las aguas residuales en forma de un compuesto de fosfato tal como fosfato de calcio o fosfato de magnesio.

5

[0025] Por comodidad, el término aguas residuales se usa en la siguiente descripción y las reivindicaciones para describir tales soluciones acuosas en general. A menos que se especifique otra cosa, las «aguas residuales» no están limitadas al efluente procedente de aguas negras municipales, residuos animales, o cualquier otra fuente específica.

10

[0026] La figura 1 muestra un sistema de reactor de lecho fluidificado 12. El sistema 12 tiene una entrada 13 que recibe las aguas residuales procedentes, por ejemplo, de una instalación de tratamiento de las aguas residuales municipales, industriales o agrícolas. Las aguas residuales contienen fósforo y/o nitrógeno que se desea eliminar. El siguiente ejemplo describe una aplicación de la invención para eliminar fósforo de las aguas residuales.

15

[0027] Cuando se desea tener como objetivo el fósforo para la eliminación, las concentraciones de especies dentro de la columna 14 pueden mantenerse en niveles tales que es la concentración de fósforo la que limita la reacción que se producirá y el producto final, tal como estruvita. Los expertos en la materia se darán cuenta de que también se podría tener como objetivo el amoníaco para la eliminación ajustando la concentración de especies dentro de la columna 14, de modo que la concentración de amoníaco limita la formación del producto final.

20

[0028] En este ejemplo, el fósforo está en forma de fosfato (PO_4^{3-}) y especies relacionadas, tales como HPO_4^{2-} . La concentración de fosfato en las aguas residuales puede estar en el intervalo de 50 mg/L a 200 mg/L, por ejemplo.

25

[0029] El sistema 12 comprende una columna sustancialmente vertical 14. La columna 14 tiene varias secciones secuenciales verticalmente. El reactor ilustrado tiene cuatro secciones 15A, 15B, 15C y 15D (colectivamente secciones 15). La sección 15A puede denominarse una «sección de recolección» porque las pastillas formadas dentro de la columna 14 pueden extraerse desde la sección 15A después de haber crecido hasta un tamaño adecuado, como se describe más adelante. En la realización ilustrada, la columna 14 tiene una discontinuidad en escalón 17 en el límite entre cada par de secciones adyacentes 15. El área de la sección transversal de la columna 14 cambia gradualmente en cada discontinuidad en escalón 17.

30

[0030] El término «transición a modo de escalón» se usa en el presente documento para referirse a transiciones entre secciones 15 en las que el ángulo θ (véase la figura 1) entre la pared de una sección por debajo de una transición a modo de escalón y la transición es de 80 grados o mayor. Actualmente se cree que proporcionar transiciones gradualmente, o al menos transiciones a modo de escalón, entre las secciones 15 mejora la clasificación por tamaño de las partículas dentro de la columna 14, particularmente cuando las transiciones están situadas cerca de la parte superior de la columna 14.

40

[0031] Las dimensiones de la columna 14 y el número de secciones 15 pueden variarse dependiendo del volumen de las aguas residuales que ha de ser tratado, como se analiza con más detalle más adelante. En algunas realizaciones prototipo a pequeña escala de la invención, cada uno de los segmentos es cilíndrico. La Tabla 1 proporciona diámetros de segmentos como se usan en varias realizaciones prototipo de la invención.

45

TABLA I – DIÁMETROS DE SEGMENTOS EN ALGUNOS PROTOTIPOS				
PROTOTIPO	DIÁMETRO DEL SEGMENTO (cm)			
	15A	15B	15C	15D
1	4	5,2	7,7	20
2	4	5,2	7,7	20
3	7,7	10,2	15,2	40
4	7,7	10,2	15,2	40

[0032] La relación del área de la sección transversal de la sección más alta 15 respecto a la sección más baja 15 es normalmente 10:1 o más, y puede ser 20:1 o aún mayor. Por ejemplo, en el prototipo 1 de la Tabla 1, la relación del área de la sección transversal de la sección 15D respecto a la sección 15A es aproximadamente 25:1. La relación de las áreas de las secciones transversales de secciones adyacentes 15 está normalmente en el intervalo de 1,5:1 a 10:1 con la sección transversal aumentando hacia la parte superior de la columna 14.

50

[0033] En algunas realizaciones, el área de la sección transversal de segmentos adyacentes aumenta por un factor de al menos 1½. El área de la sección transversal puede aumentar por un factor más grande entre una de las secciones a continuación de la más alta y una sección más alta. Por ejemplo, en algunas realizaciones, la sección 5 más alta tiene un área de la sección transversal más de 5 veces superior a un área de la sección transversal de la sección a continuación de la más alta.

[0034] Las longitudes de los segmentos en los reactores prototipo se dan en la Tabla II.

TABLA II – LONGITUDES DE SEGMENTOS EN ALGUNOS PROTOTIPOS				
PROTOTIPO	LONGITUD DEL SEGMENTO (cm)			
	15A	15B	15C	15D
1	101	108	250	46
2	106	275	93	46
3	76	155	127	46
4	93	127	128	46

10

Como la cantidad de energía requerida para hacer circular fluido a través de una columna aumenta con la altura de la columna, generalmente es deseable limitar la altura de la columna 14 a 5 metros aproximadamente. Podrían usarse columnas más altas, pero se verían perjudicadas por los mayores costes de bombeo, a menos que las aguas residuales se reciban a presión.

15

[0035] Un puerto de inyección 20 está provisto en el fondo de la columna 14. Un puerto de eliminación de fluido 22 está provisto en el extremo superior de la columna 14. Está provisto un recorrido de reciclaje 23 para permitir el reciclaje de fluido desde en o cerca de la parte superior de la columna 14 hasta en o cerca del fondo de la columna 14. Más adelante se describen detalles adicionales de la construcción del reactor 14.

20

[0036] En funcionamiento, se mantienen condiciones de sobresaturación para la estruvita (o un análogo de la estruvita, u otro producto de reacción sólido deseado) dentro de la columna 14. El producto de solubilidad de la estruvita K_{sp} está dado por:

25

$$K_{sp} = [Mg^{2+}]_{eq} [NH_4^+]_{eq} [PO_4^{3-}]_{eq}$$

donde las actividades de las diferentes especies (es decir, $[Mg^{2+}]_{eq}$, $[NH_4^+]_{eq}$, y $[PO_4^{3-}]_{eq}$) se miden respectivamente como magnesio soluble, amoníaco y ortofosfato en equilibrio. La relación de sobresaturación (SSR) está dada por:

30

$$SSR = [Mg^{2+}][NH_4^+][PO_4^{3-}]/K_{sp}$$

[0037] Los aumentos en la SSR impulsan la cristalización. Es deseable mantener la SSR en el intervalo de aproximadamente 2 a 5 en las inmediaciones del puerto de inyección 20. En algunas realizaciones de la invención preferidas, actualmente la SSR se mantiene en el intervalo de aproximadamente 3 a 4. A medida que la SSR dentro 35 de la columna 14 se incrementa más allá de una SSR de aproximadamente 4 o 5, los cristales de producto que se forman tras la introducción de las aguas residuales dentro de la columna 14 tienden a disminuir de tamaño. Si demasiados de los cristales que se forman inicialmente son demasiado pequeños, entonces puede reducirse la eficiencia con la que se forman grandes pastillas de producto dentro del reactor.

40 **[0038]** Medir la SSR directamente puede ser complicado porque el amoníaco y el fosfato tienen diferentes formas dependiendo del pH. Los coeficientes de actividad para el amoníaco y el fosfato dependen del pH y son difíciles de estimar. Por lo tanto, cuando las estimaciones de K_{sp} están basadas en concentraciones medidas de especies iónicas, las estimaciones de K_{sp} pueden depender del pH. Normalmente es más sencillo medir la solubilidad condicional del producto final (por ejemplo, estruvita) bajo diversas condiciones de funcionamiento 45 directamente y controlar el funcionamiento del reactor 12 basándose en las concentraciones medidas de una o más especies.

[0039] Normalmente se da el caso de que la composición de las aguas residuales procedentes de una fuente dada será relativamente constante a lo largo del tiempo o solo cambiará lentamente. Cuando se dé este caso, puede 50 ser suficiente controlar el pH de las aguas residuales dentro de la columna 14 para que tenga un valor establecido y ajustar el valor de pH establecido u otros parámetros del funcionamiento de la columna 14 periódicamente para

mantener la SSR dentro del intervalo deseado.

[0040] En la realización ilustrada en la figura 1, la SSR se controla ajustando el pH del líquido dentro de la columna 14, añadiendo iones de magnesio, o ambas cosas. La figura 2 muestra que la solubilidad de la estruvita disminuye de manera pronunciada con el aumento del pH. Aumentar el pH añadiendo una base, tal como NaOH, puede usarse, por lo tanto, para aumentar la SSR dentro de la columna 14. Para las aguas residuales procedentes de algunas fuentes típicas, la SSR puede aumentarse a niveles suficientes para conseguir la eliminación de fosfato aceptable subiendo el pH en 0,5 – 1,5 unidades. Las realizaciones de la invención se han hecho funcionar satisfactoriamente con el intervalo de pH en la sección 15A de la columna 14 de aproximadamente 7,4 a 7,5. Para proporciones de eliminación de fosfato que excedan el 90 % se consideró necesario aumentar el pH a 8,3.

[0041] Para la cristalización de estruvita generalmente es deseable añadir iones de magnesio para proporcionar una mezcla estequiométrica que tiene una relación de Mg:N:P de aproximadamente 1:1:1. Las aguas residuales procedentes de muchas fuentes tienen menos magnesio del deseable para la cristalización más eficiente de la estruvita. En general, para una relación fija de N:P, se ha constatado que aumentar la concentración de Mg tiende a aumentar la cantidad de fosfato que puede eliminarse. Se ha constatado que la relación media de eliminación de P aumenta casi linealmente con un aumento en la relación molar de Mg:P en los casos en los que la relación de Mg:P es inferior a la unidad y, por lo tanto, el sistema está por debajo del óptimo para la eliminación de fosfato.

[0042] La mejor manera de controlar la SSR depende de la calidad de las aguas residuales que entran en el sistema 12. Dependiendo de factores tales como el pH de las aguas residuales entrantes, la cantidad de gases disueltos en las aguas residuales, la temperatura, la presencia en las aguas residuales de especies que pueden inhibir la cristalización, lo cerca que las aguas residuales están de la saturación, etc. pueden ser más económicos para controlar la SSR en la columna 14 ajustando el pH, ajustando la concentración de cationes, o mediante alguna combinación de ajuste de pH y ajuste de la concentración de cationes en la columna 14.

[0043] En la realización de la figura 1, la SSR se controla mediante un controlador de sobresaturación 30. El controlador de sobresaturación puede comprender cualquier controlador de procesos adecuado. Existe una amplia disponibilidad de controladores de procesos programables. Por ejemplo, pueden usarse controladores de realimentación proporcional para implementar el controlador de sobresaturación 30. Los expertos en el campo de esta invención están familiarizados con la selección y programación de tales controladores.

[0044] El controlador de sobresaturación 30 recibe como entrada una señal procedente de una sonda de pH 32. La sonda de pH 32 está situada en la columna 14 justo aguas arriba de una zona de mezcla inicial 33. Por encima de la zona de mezcla 33, las aguas residuales afluentes (incluyendo cualquier agua residual reciclada) y cualquier sustancia química añadida para controlar el pH dentro de la columna 14 se mezclan de manera sustancialmente completa.

[0045] El controlador de sobresaturación 30 controla la adición dentro de la columna 14 de una base, tal como hidróxido de sodio (NaOH), una fuente de cationes, tal como magnesio, que puede proporcionarse en forma de una solución de cloruro de magnesio, o ambas. En la realización ilustrada, el controlador de sobresaturación 30 controla un mecanismo medidor 34 que mide una solución de hidróxido de sodio procedente del tanque 35 dentro de la columna 14 y un mecanismo medidor 36 que mide una solución de cloruro de magnesio procedente del tanque 37 dentro de la columna 14. Puede usarse cualquier mecanismo medidor adecuado para controlar la introducción de las sustancias químicas usadas para controlar la SSR dentro de la columna 14. Tales mecanismos medidores pueden incluir bombas, válvulas variables, o similares. Una amplia gama de mecanismos medidores adecuados están disponibles comercialmente.

[0046] El controlador de sobresaturación 30 también controla un mecanismo de control de flujo 38 que determina cuánto fluido que ya ha pasado a través de la columna 14 es reciclado en el recorrido de reciclaje 23. El mecanismo de control de flujo 38 incluye normalmente una bomba de alimentación que puede ser una bomba de bajo esfuerzo cortante. La relación de reciclaje proporciona una medida de la proporción de flujo introducido en la tobera 20 que es reciclado a través del recorrido 23. La relación de reciclaje RR se proporciona por:

$$RR = \frac{Q_r}{Q_{r-\text{inf}}} \quad (1)$$

donde Q_r es el flujo de reciclaje y Q_{t-inf} es el flujo de afluente total por el interior de la columna 14.

[0047] En una realización de la invención, el controlador de sobresaturación 30 comprende un componente controlador de pH 30A que mide una solución básica (es decir, alcalina) procedente del tanque 35 para mantener el pH en el sensor de pH 32 en un valor deseado. El controlador de sobresaturación 30 también incluye un componente controlador de SSR 30B que controla la proporción de las aguas residuales recicladas que entran en la columna 14 a través del bucle de reciclaje 23 respecto a las aguas residuales frescas que entran en la columna 14 procedentes de la entrada 13 para ajustar la SSR y, si es necesario, añade iones de magnesio procedentes del tanque 37 para mantener la SSR dentro de un intervalo deseado. En la realización ilustrada, el controlador de sobresaturación 30 también incluye un componente de control de flujo 30C que controla un flujo total de fluido a través de la columna 14.

[0048] El componente controlador de SSR 30B puede obtener realimentación en tiempo real procedente de uno o más sensores que monitorizan la temperatura, las concentraciones iónicas, el pH y otros factores que afectan a la SSR. En algunas aplicaciones típicas, la composición de las aguas residuales que entran en el reactor 12 solo cambia muy lentamente, la temperatura solo cambia muy lentamente y el pH se mantiene dentro de un intervalo deseado mediante el componente controlador de pH 30A. En tales aplicaciones, el componente controlador de SSR 30B solo necesita ser ajustado periódicamente basándose en mediciones indicativas de la SSR. Tales mediciones y ajustes periódicos pueden realizarse manualmente o bajo control automático.

[0049] La tobera 20 inyecta las aguas residuales dentro de la columna 14 en un flujo turbulento. En funcionamiento, se mantiene un flujo ascendente de fluido dentro de la columna 14. La velocidad del fluido fluyente disminuye a medida que el fluido entra en cada sección sucesiva 15. Se forman cristales de estruvita a medida que las aguas residuales entran en la columna 14. Los cristales son impelidos hacia arriba en el fluido fluyente y forman un lecho fluidificado. El lecho fluidificado se extiende a través de varias secciones 15. Los cristales crecen por una combinación de crecimiento cristalino y agregación. A medida que los cristales crecen, se vuelven más pesados y tienden a bajar por el interior de la columna 14.

[0050] Como la velocidad de fluido ascendente media es diferente en cada una de las secciones 15, las partículas de estruvita tienden a clasificarse por tamaño en diferentes secciones 15. Inicialmente todas las partículas son pequeñas. Las partículas de la columna 14 crecen a través de procesos de crecimiento cristalino y por aglomeración. A medida que los cristales crecen, algunos de los cristales se hacen lo suficientemente grandes como para caer dentro de las secciones inferiores dentro de la columna 14.

[0051] Con el tiempo, las partículas más grandes tienden a acumularse en la sección 15A. Las partículas más pequeñas tienden a acumularse en la sección 15D. Las partículas de tamaño intermedio tienden a situarse dentro de las secciones intermedias 15B y 15C. La columna 14 puede incluir más secciones intermedias para proporcionar una clasificación a escala más fina de las partículas por tamaño en el lecho fluidificado dentro de la columna 14.

[0052] El fluido fluye hacia arriba a través de la columna 14 a una velocidad suficiente como para mantener velocidades de fluido ascendentes medias deseadas en las diferentes secciones. Las velocidades de flujo de fluido ascendentes medias en cada sección 15 pueden determinarse dividiendo el caudal por el área de la sección transversal de la sección.

[0053] La velocidad de flujo de fluido media en la sección más baja es suficiente como para mantener las pastillas de estruvita en suspensión. Esta velocidad de flujo es normalmente superior a 100 cm/min. En algunas realizaciones de la invención el caudal de fluido ascendente medio es aproximadamente 500 cm/minuto en la sección 15A. En general, es deseable mantener una velocidad de fluido relativamente alta en la sección de la cual se recolectan las pastillas de estruvita. Esta velocidad es ventajosamente superior a 400 cm/minuto y, en algunas realizaciones, puede ser significativamente más alta, por ejemplo, 800 a 1000 cm/minuto.

[0054] La velocidad de flujo ascendente en la sección más alta de la columna 14 es preferentemente mucho más baja que en la sección más baja. Por ejemplo, en algunas realizaciones de la invención la velocidad de flujo ascendente en la sección más alta 15 es por término medio 75 cm/minuto o menos, preferentemente 55 cm/min o menos. En una realización de la invención la velocidad de flujo ascendente media en la sección 15D es aproximadamente 50 cm/minuto.

[0055] La tasa a la que las aguas residuales fluyen a través de la columna 14 puede controlarse ajustando la bomba de alimentación de entrada 39 y el mecanismo de control de flujo de reciclaje 38 para proporcionar un flujo

combinado deseado. En la realización ilustrada, el caudal se controla mediante un componente controlador de caudal 30C incorporado en el controlador de sobresaturación 30.

[0056] El recorrido de reciclaje 23 incluye un clarificador 50 para eliminar las partículas ultrafinas del efluente del reactor 12. Una salida de efluente 52 permite que el efluente sea retirado del reactor 12.

[0057] El reactor 12 incluye opcionalmente una columna separadora de aire 54. La columna separadora de aire 54 elimina el dióxido de carbono disuelto de las aguas residuales recicladas que pasan a través de la misma y, en consecuencia, aumenta el pH de las aguas residuales recicladas. Aumentar el pH por medio de un separador de aire reduce la necesidad de añadir una base, tal como NaOH para mantener la SSR dentro de un intervalo deseado. La columna separadora de aire 54 puede estar situada en el recorrido de reciclaje 23, tal como se muestra, o puede estar en un recorrido de fluido separado del recorrido de reciclaje 23. Cuando el separador de aire 54 está en un recorrido de flujo separado del recorrido de reciclaje 23, la tasa a la que el fluido procedente de la columna 14 se hace circular a través de la columna separadora de aire puede controlarse, por ejemplo, mediante un componente controlador de pH 30A. Este proporciona control adicional sobre el pH del fluido dentro de la columna 14 y puede reducir o, en algunos casos eliminar, la necesidad de añadir solución alcalina procedente del tanque 35.

[0058] Después de que el reactor 12 haya estado funcionando durante un tiempo suficiente, la primera sección 15A contendrá pastillas de estruvita que son lo suficientemente grandes como para ser recolectadas. En los reactores prototipo manejados por el inventor, las primeras pastillas de estruvita han estado listas para recolectar en aproximadamente 8 a 20 días.

[0059] Una válvula de aislamiento 40 está situada en una porción inferior de la columna 14 y aísla al menos una porción principal de la sección 15A de las partes superiores de la columna 14. La válvula de aislamiento 40 está situada preferentemente en o por debajo del límite entre la sección 15A y la sección 15B. Las pastillas que se han acumulado dentro de la sección 15A pueden ser recolectadas abriendo la válvula de aislamiento 40 y cerrando las válvulas 42 y 44 para aislar temporalmente la sección 15A. Cuando la sección 15A está aislada, el fluido puede seguir fluyendo por el interior de la parte superior de la columna 14 por medio de un conducto de derivación 41 que se extiende desde la entrada 20 hasta un lugar en la columna 14 por encima de la válvula de aislamiento 40. El contenido de la sección 15A, incluyendo las pastillas de estruvita que se han acumulado en la sección 15A, puede ser recolectado abriendo la válvula 46.

[0060] Después de haber sido extraídas de la columna 14 las pastillas pueden secarse. Puede usarse cualquier sistema de secado adecuado. En la realización ilustrada, las pastillas caen sobre el tamiz 48 desde donde son depositadas sobre un transportador secador 49. El fluido procedente de la sección 15A cae a través del tamiz 48. El fluido puede ser capturado y reintroducido dentro del sistema 12 o, de lo contrario, desechado.

[0061] La calidad y el tamaño de las pastillas de estruvita desarrolladas en el reactor 12 depende de una amplia variedad de factores incluyendo la SSR, el caudal en la columna 14, y la edad del cristal. SSR más bajas, mayor edad del cristal, y mayores velocidades de flujo ascendente en la columna 14, todas ellas tienden a producir pastillas de estruvita más duras y, en algunos casos, más grandes.

[0062] El tiempo de retención del cristal, CRT, para un grupo de pastillas acumuladas dentro de la columna 14 puede definirse como el número de días que han transcurrido desde que ese volumen de pastillas se han extraído del reactor. Por ejemplo, si se constata que el volumen asentado de todas las pastillas en la columna 14 es 7,8 L y se recolectan 1,3 L de pastillas de la sección 15A del reactor cada 2 días entonces el CRT para las pastillas acumuladas sería 12 días. Se ha constatado en algunos experimentos que el CRT de 8-12 días ha generado pastillas de buen tamaño que tienen suficiente resistencia estructural como para soportar la recolección y el secado. En algunas realizaciones de la invención el proceso se utiliza para proporcionar un CRT de 4 días o más, en algunos casos 1 semana o más.

[0063] En un reactor prototipo construido según una realización de la invención, se constató que hasta el 90 % de los fosfatos de las aguas residuales podría extraerse en forma de pastillas de estruvita. Las pastillas de estruvita tenían diámetros comprendidos entre aproximadamente 0,5 mm y aproximadamente 10 mm. Se constató que el efluente del proceso tenía concentraciones de fosfato tan bajas como 5 mg/L.

[0064] La figura 3 ilustra un procedimiento 100 según una realización de ejemplo de la invención. El procedimiento 100 toma aguas residuales frescas 101 y aguas residuales recicladas 102 y pasa las aguas residuales por el interior de la columna en el bloque 104. Un proceso de control 106 controla continuamente el pH en

el bloque 106A, la concentración de iones de magnesio en el bloque 106B, la relación de reciclaje en el bloque 106C y el caudal en el bloque 106D.

[0065] El efluente procedente de la columna es clarificado en el bloque 108. Algo del efluente es reciclado como se indica por la línea 110 para proporcionar aguas residuales recicladas 102. El efluente restante se saca en el bloque 112.

[0066] Periódicamente, las pastillas de estruvita son extraídas de la columna en el bloque 120. Las pastillas son secadas en el bloque 122 para proporcionar pastillas secas en el bloque 124. Las pastillas secas pueden usarse en diversas aplicaciones, por ejemplo, como fertilizante.

[0067] Donde anteriormente se hace referencia a un componente (por ejemplo, un reactor, controlador, conducto, bomba, mecanismo medidor, etc.), a menos que se indique otra cosa, la referencia a ese componente (incluyendo una referencia a un «medio») debería interpretarse como que incluye como equivalentes de ese componente cualquier componente que realice la función del componente descrito (es decir, que sea funcionalmente equivalente), incluyendo componentes que no son estructuralmente equivalentes a la estructura descrita que realiza la función en las realizaciones ejemplares ilustradas de la invención.

[0068] Como resultará evidente para los expertos en la materia a la luz de la descripción precedente, son posibles muchas alteraciones y modificaciones en la práctica de esta invención. Por ejemplo:

- La capacidad del reactor 12 puede aumentarse haciendo funcionar múltiples columnas 14, unas en paralelo a otras.
- Para aguas residuales que tienen concentraciones de fosfato superiores a 200 mg/L puede ser deseable proporcionar una fase de tratamiento preliminar inicial que reduzca la concentración de fosfato aguas arriba del reactor 12. Por ejemplo, la fase de tratamiento preliminar podría reducir la concentración de fosfato a un valor de menos de aproximadamente 200 mg/L.
- El reactor podría incluir una instalación para añadir amoníaco como mecanismo adicional, o alternativo, para controlar la SSR.
- Las secciones del reactor 14 no tienen que ser de sección transversal redonda. También son posibles otras formas; por ejemplo, las secciones podrían ser poligonales.
- El número de secciones podría variarse.
- El reactor puede hacerse funcionar para maximizar la eliminación de amonio creando condiciones bajo las cuales los iones de amonio limitan la producción de estruvita.
- Aunque actualmente se considera preferible que las transiciones entre las secciones 15 de la columna 14 sean transiciones pronunciadas gradualmente, algunas o todas las transiciones podrían ser de sección decreciente. Por ejemplo, las transiciones entre las pocas secciones más bajas 15 en la columna 14 podrían ser de sección decreciente. Cuando la columna 14 incluye transiciones de sección decreciente, se considera ventajoso que las transiciones de sección decreciente sean transiciones escalonadas. Sin embargo, en algunos casos, el ángulo de estrechamiento podría ser 45 grados o más o 60 grados o más.
- No se requiere que los componentes del controlador de sobresaturación 30 estén situados o alojados comúnmente, sino que podrían estar distribuidos de cualquier manera adecuada.
- El área de la sección transversal de cualquier sección 15 no es necesariamente constante a lo largo de la sección, sino que podría variar de una manera que no interfiera significativamente en la clasificación por tamaño de las partículas dentro de la columna 14.

Por consiguiente, el alcance de la invención ha de interpretarse según la materia definida por las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un reactor de lecho fluidificado para uso en la eliminación de solutos de las aguas residuales, comprendiendo el reactor,
- 5 una columna (14) que comprende un conducto orientado de manera sustancialmente vertical que tiene una sección de recolección (15A) y al menos dos secciones secuenciales verticalmente (15B, 15C, 15D) situadas por encima de la sección de recolección (15A), un área de la sección transversal del conducto aumentando entre secciones adyacentes de las secciones (15A, 15B, 15C, 15D);
- 10 una entrada (13) para aguas residuales en la columna;
- un recorrido de reciclaje (23) que se extiende desde una salida en una porción superior del conducto;

caracterizado por

- 15 un controlador de sobresaturación (30) que comprende un componente controlador de relación de sobresaturación (30B) configurado para controlar una relación de sobresaturación para estruvita, fosfato de magnesio y potasio, o un compuesto de fosfato dentro de la sección de recolección (15A), estando configurado dicho componente controlador de relación de sobresaturación (30B) para, al menos en parte, controlar una relación de reciclaje de una tasa a la que las aguas residuales están siendo introducidas dentro de la columna (14) por medio del recorrido de reciclaje (23) respecto a una tasa total a la que las aguas residuales están siendo introducidas dentro de la columna (14),
- 20 en el que el controlador de sobresaturación (30) está configurado para controlar la relación de sobresaturación para que tenga un valor entre 2 y 5;
- la entrada (13) está en o por debajo de la sección de recolección (15A); y
- el recorrido de reciclaje (23) se extiende hasta la entrada (13).

- 25 2. El reactor de lecho fluidificado según la reivindicación 1, en el que el área de la sección transversal del conducto aumenta gradualmente entre secciones adyacentes de las secciones (15A-15D), en el que la entrada (13) está orientada de manera sustancialmente vertical y está configurada para dirigir un chorro turbulento de las aguas residuales afluentes hacia arriba por el interior de la columna (14), comprendiendo además el reactor de lecho
- 30 fluidificado un sensor de pH (32) situado en la sección de recolección (15A) por encima de una zona de mezcla (33) y un sistema de control de pH (30A) conectado para recibir una señal procedente del sensor de pH (32), el controlador de pH (30A) conectado para controlar un mecanismo medidor (38) configurado para introducir una sustancia alcalina dentro de la columna (14) por debajo del sensor de pH (32) en respuesta a una entrada de control de pH procedente del controlador de pH (30A).

- 35 3. El reactor de lecho fluidificado según la reivindicación 2, en el que el controlador de pH (30A) está configurado para controlar el pH en la sección de recolección (15A) de la columna (14) en el intervalo de 7,4 a 7,5.

4. El reactor de lecho fluidificado según la reivindicación 2, en el que el controlador de pH (30A) está
- 40 configurado para controlar el pH para tasas de eliminación de fosfato superiores al 90 % para que aumente a 8,3.

5. El reactor de lecho fluidificado según la reivindicación 1, en el que el controlador de sobresaturación (30) está conectado para controlar un mecanismo medidor configurado para introducir una solución que contiene cationes dentro de la columna (14) en respuesta a una entrada de control de cationes procedente del controlador de
- 45 sobresaturación (30).

6. Un procedimiento para extraer fósforo o nitrógeno o ambos de las aguas residuales en un reactor de lecho fluidificado, comprendiendo el procedimiento:
- 50 introducir las aguas residuales dentro de una columna (14) del reactor de lecho fluidificado que comprende un conducto orientado de manera sustancialmente vertical que tiene una sección de recolección (15A) y al menos dos secciones secuenciales verticalmente (15B, 15C, 15D) por encima de la sección de recolección (15A), en el que un área de la sección transversal del conducto aumenta entre secciones adyacentes de las secciones (15A-15D);
- reciclar las aguas residuales que han pasado a través de la columna (14); y
- 55 extraer de la sección de recolección (15A) las pastillas formadas dentro de la columna (14),

caracterizado por

mantener las condiciones de sobresaturación para la estruvita, el fosfato de magnesio y potasio, o un compuesto de

fosfato en la sección de recolección (15A), en el que mantener las condiciones de sobresaturación comprende mantener una relación de sobresaturación en el intervalo de 2 a 5 dentro de la sección de recolección (15A); y controlar una relación de sobresaturación de la estruvita, el fosfato de magnesio y potasio, o un compuesto de fosfato en la sección de recolección (15A), al menos en parte controlando una relación de reciclaje de una tasa a la que las aguas residuales son recicladas dentro de la columna (14) respecto a una tasa total a la que las aguas residuales están siendo introducidas dentro de la columna (14).

7. El procedimiento según la reivindicación 6, en el que el área de la sección transversal del conducto aumenta gradualmente entre secciones adyacentes de las secciones (15A-15D), en el que la entrada (13) está orientada de manera sustancialmente vertical y dirige un chorro turbulento de las aguas residuales afluentes hacia arriba por el interior de la columna (14), comprendiendo además el reactor de lecho fluidificado un sensor de pH (32) situado en la sección de recolección (15A) por encima de una zona de mezcla (33) y un sistema de control de pH (30A) conectado para recibir una señal procedente del sensor de pH (32), el controlador de pH (30A) conectado para controlar un mecanismo medidor (38) que introduce una sustancia alcalina dentro de la columna (14) por debajo del sensor de pH (32) en respuesta a una entrada de control de pH procedente del controlador de pH (30A).

8. El procedimiento según la reivindicación 7, en el que mantener las condiciones de sobresaturación comprende mantener un pH en el intervalo de 7,4 a 7,5 dentro de la sección de recolección (15A).

9. El procedimiento según la reivindicación 7, en el que mantener las condiciones de sobresaturación comprende mantener un pH en la sección de recolección (15A) para tasas de eliminación de fosfato superiores al 90 % para que aumente a 8,3.

10. El procedimiento según la reivindicación 7, en el que las pastillas comprenden pastillas de estruvita o fosfato de magnesio y potasio.

11. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 7 u 8, en el que mantener las condiciones de sobresaturación comprende introducir de manera controlable una solución catiónica dentro de la columna (14).

30

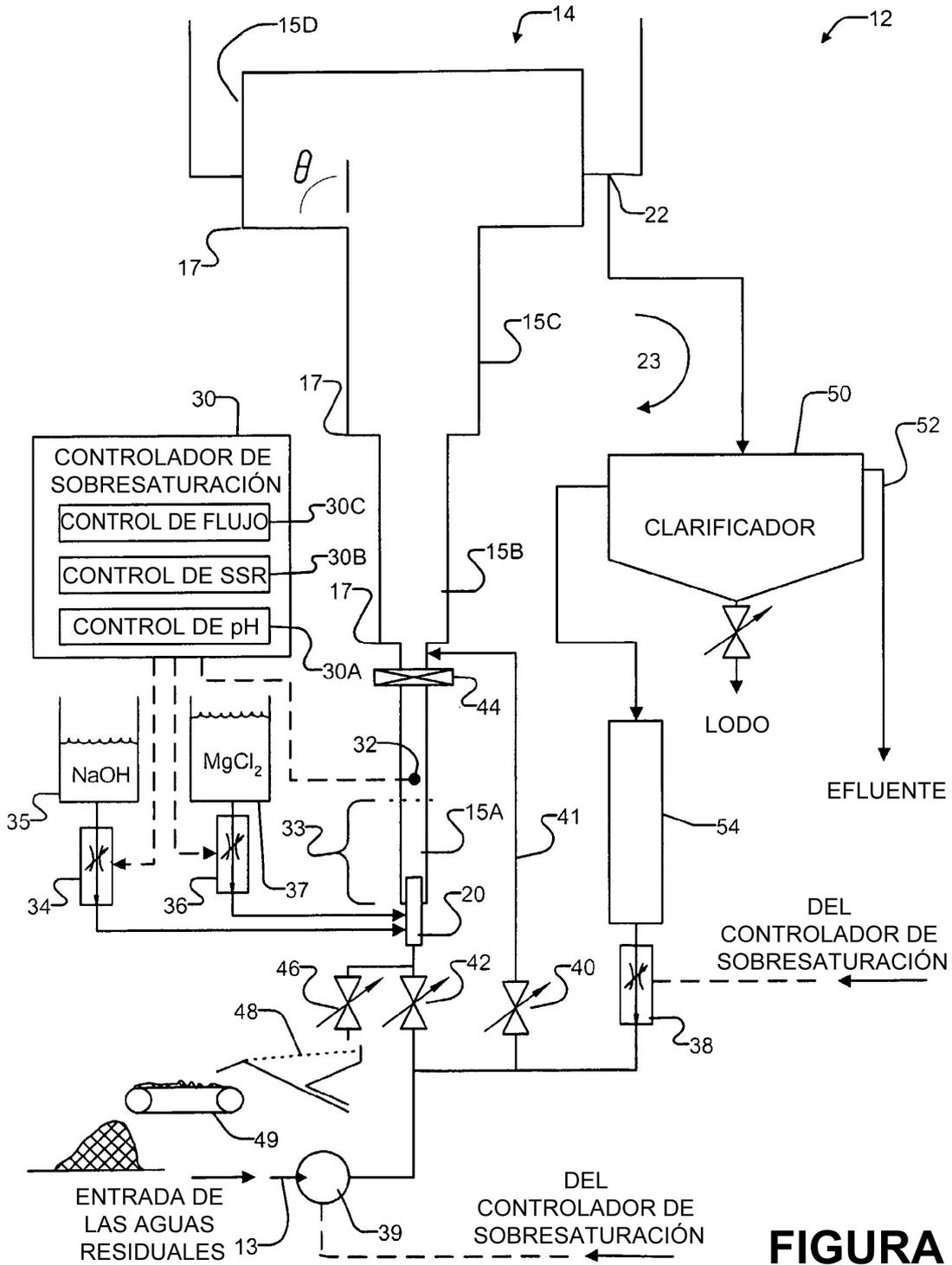


FIGURA 1

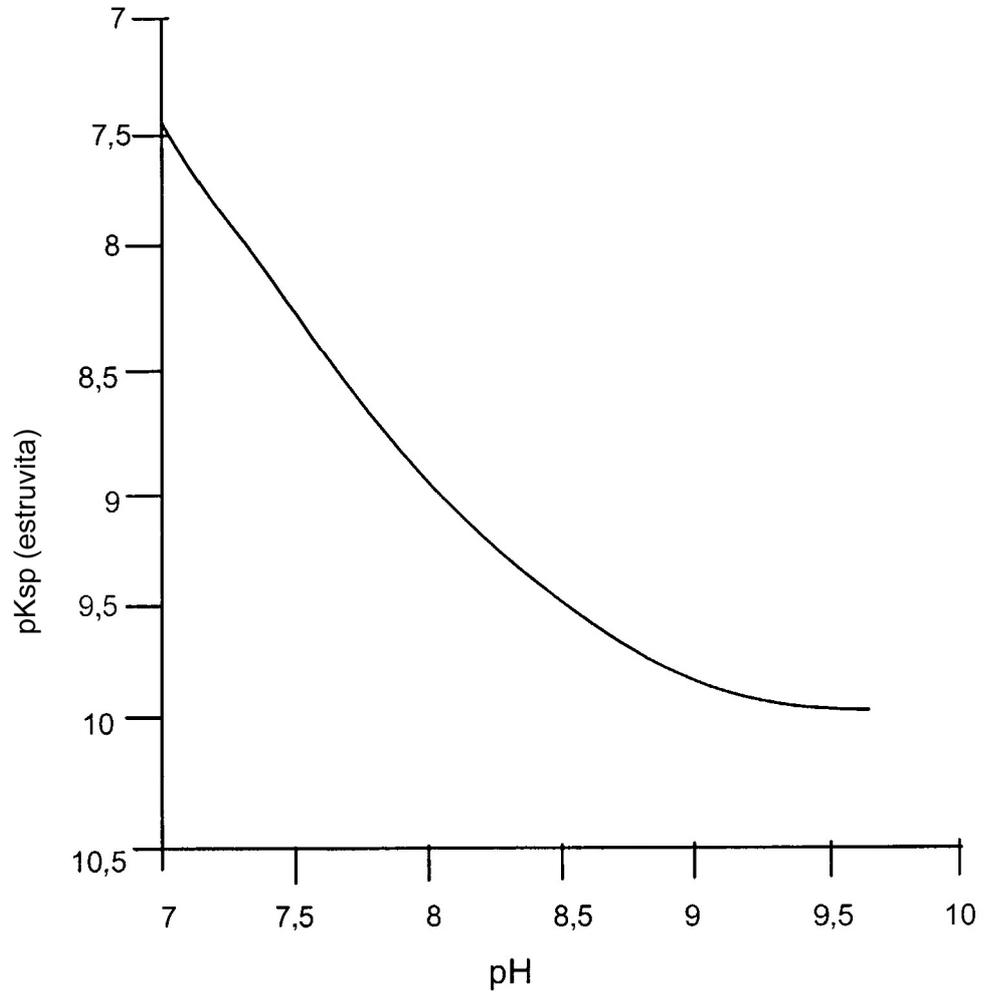


FIGURA 2

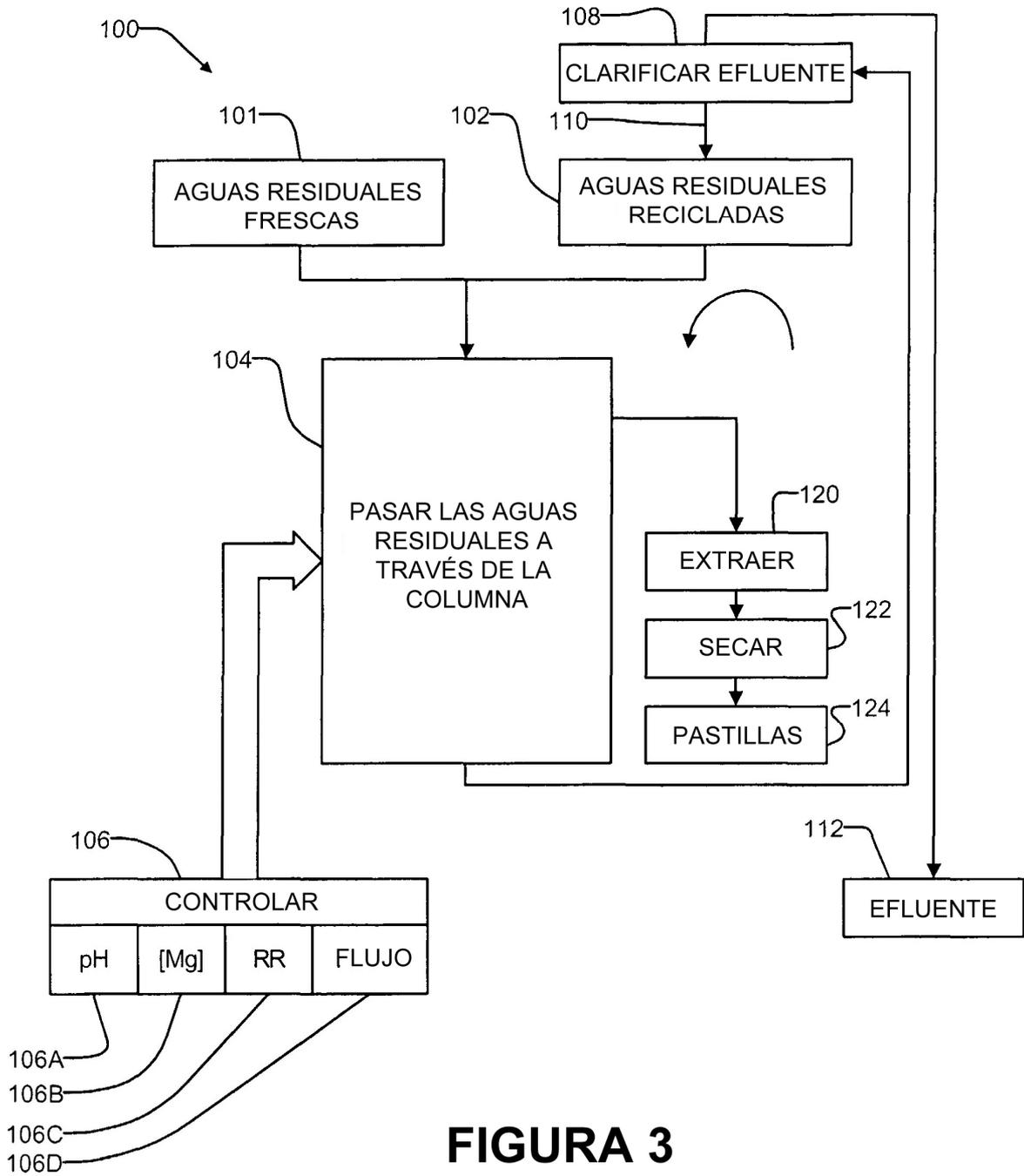


FIGURA 3