

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 982 353**

51 Int. Cl.:

B01D 21/24 (2006.01)

B01D 9/00 (2006.01)

C02F 1/52 (2013.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.02.2015 PCT/ES2015/070131**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.09.2015 WO15128528**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.02.2015 E 15754933 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.04.2024 EP 3112320**

54 Título: **Método y sistema de cristalización de estruvita para la recuperación de fosfatos en aguas residuales**

30 Prioridad:

26.02.2014 ES 201430265

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

15.10.2024

73 Titular/es:

**UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE
COMPOSTELA (50.0%)
Área de Valorización, Transferencia e
Emprendemento, Edificio Emprendia
15782 Campus Vida, ES y
FCC AQUALIA, S.A. (50.0%)**

72 Inventor/es:

**GARRIDO FERNÁNDEZ, JUAN MANUEL y
CRUTCHIK PEDEMONTE, DAFNE**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 982 353 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método y sistema de cristalización de estruvita para la recuperación de fosfatos en aguas residuales

5 Campo técnico de la invención

La invención se relaciona con un método y sistema de cristalización de fosfato amónico hexahidratado de magnesio, denominado estruvita, especialmente diseñado para la recuperación de fosfato en aguas residuales urbanas o industriales, y en el que se obtiene un efluente con una baja concentración de fosfato, y un producto, estruvita granular, con valor comercial como fertilizante de liberación lenta.

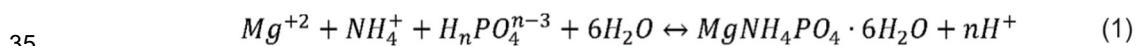
El sistema y el método permiten recuperar el fosfato de las aguas residuales al usar una suspensión de hidróxido de magnesio, preferiblemente de grado industrial con alta reactividad como fuente externa de iones de magnesio y alcalinidad. El sistema de cristalización es particularmente adecuado para la recuperación de fosfato en corrientes de aguas residuales urbanas o industriales con concentraciones mayores a 50 mg P/L de fosfato y preferiblemente mayores de 100 mg P/L, permitiendo la recuperación de fosfato entre 70 % y 90 % contenido e agua residual cruda, y la producción de gránulos de estruvita con un tamaño de gránulo preferiblemente entre 1,0 y 5,0 mm.

20 Antecedentes de la invención

Se hace una revisión de las técnicas anteriores en los procesos de cristalización de fosfatos en aguas residuales en general, y en particular el uso de fuentes de magnesio y alcalinidad para la cristalización de estruvita en aguas residuales.

25 Proceso de cristalización del fosfato en las aguas residuales en forma de estruvita

La cristalización de la estruvita se basa en un proceso de precipitación controlada en el que se obtiene una sal de fosfato de amonio y hexahidrato de magnesio ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) denominada estruvita. La cristalización de la estruvita se produce por una reacción reversible, produciendo un producto con una relación molar de 1:1:1 de Mg^{+2} , NH_4^+ y PO_4^{-3} (Doyle and Parsons, *Water Res* 36 (16), 3925-3940 (2002)). La estequiometría del proceso está definida por la reacción (1). La reacción de cristalización de la estruvita depende en gran medida del pH de operación, la temperatura, las concentraciones de fosfato, amonio y magnesio, así como de la presencia de otros iones, tales como calcio.



Se han realizado numerosos estudios en los últimos años en torno a la estruvita controlada en aguas residuales con altas concentraciones de fosfato, en los que se ha demostrado que las condiciones de operación afectan directamente a la efectividad de la cristalización de la estruvita, y en donde la efectividad de recuperación de los fosfatos está condicionada principalmente por el pH de operación, que preferiblemente debe estar en un rango de 8,0 a 9,0, la temperatura y las concentraciones de los iones involucrados en la reacción de cristalización (Andrade and Schuiling, *Mineral Journal (Ukraine) J. Ukr.* 23 (5/6), 37-46 (2001)).

El control del pH del cristizador se consigue al añadir un álcali para neutralizar los iones de hidrógeno que generan la reacción mostrada en (1), usualmente se usa NaOH. Para aquellas corrientes de agua con alto contenido en dióxido de carbono disuelto, tales como las procedentes de reactores anaerobios metanogénicos o digestores de fangos, se puede realizar una neutralización de los iones hidrógeno formados por la desorción gradual del dióxido de carbono disuelto en tales corrientes, usando para ello sistemas de desorción o decapado por aireación del agua residual a tratar, en la corriente de agua residual de entrada antes de su introducción en el cristizador o en el en el sistema de cristalización.

La reacción de cristalización de la estruvita requiere también la presencia de concentraciones adecuadas de iones amonio y magnesio, que deben estar en exceso con respecto a la concentración de iones fosfato. La mayoría de las corrientes de aguas residuales con altas concentraciones de ion fosfato presentan alto contenido de ion amonio, por lo que no es necesario tomar ninguna medida correctora, para aquellas corrientes con baja concentración de ion amonio, se puede modificar la situación al añadir una corriente de aguas residuales en la que este elemento esté en exceso o al añadir directamente amoniaco (NH_3), que además actúa como fuente externa de alcalinidad.

La estruvita se puede cristalizar por cristalización homogénea o heterogénea. La cristalización homogénea tiene lugar en una solución sobresaturada en la que no hay presencia de cristales u otros sólidos en suspensión, y durante la cual las moléculas/iones generan pequeños núcleos precipitados con un tamaño de nanómetros. Macroscópicamente no se observa ninguna variación en la concentración de los componentes en la fase acuosa hasta que transcurrido un tiempo, denominado tiempo de inducción, la agrupación de estos núcleos provoca la aparición de pequeños cristales, denominados finos, con un tamaño del orden de unos pocos micrómetros, debido a un subsecuente proceso de cristalización heterogénea. El tiempo de inducción, en el que no se observa la

formación de cristales en una solución homogénea, tiene una duración que depende, entre otros, del nivel de sobresaturación y de la temperatura, y que depende de las condiciones de operación, y está en el rango entre 6 y 120 minutos (Bouropoulos and Koutsoukos, *J. Cryst. Growth.* 213, 381-388 (2000)).

El proceso de cristalización heterogénea solamente se produce si existen cristales precipitados que promuevan la precipitación y cristalización de estruvita sobre ellos, promoviendo este proceso el crecimiento de los cristales hasta que se alcanza el equilibrio entre las fases líquida y sólida. Es importante señalar que la cinética del proceso de cristalización heterogénea se ve afectada por la concentración o superficie específica (superficie de cristales por unidad de volumen de fase líquida) de estruvita presente en el medio y por el nivel de sobresaturación y temperatura de la solución. El proceso de cristalización heterogénea, que promueve el crecimiento de los cristales, se produce mucho más rápidamente a bajos niveles de sobresaturación que el proceso de cristalización homogénea dando como producto cristales de muy pequeño tamaño, por lo que es de interés promover la cristalización heterogénea si se requieren precipitados de mayor tamaño.

Uno de los mayores problemas en el proceso de cristalización de la estruvita está asociado a la formación de pequeños cristales de estruvita (finos), que representan entre 10 % y 40 % del precipitado formado, comprometiendo la calidad final del efluente ya que debido a este hecho su baja velocidad de sedimentación, puede ser lavada con el efluente tratado, comprometiendo tanto la calidad del efluente tratado como la viabilidad económica del proceso. La separación de los cristales finos se realiza usualmente al usar sistemas de sedimentación o separadores hidrociclónicos, y es aconsejable promover siempre su recuperación y crecimiento dentro del cristizador, fomentando la formación de cristales de mayor tamaño, de aproximadamente 1 mm o mayor, lo que facilita el mercado potencial de salida y la comercialización de la estruvita como fertilizante. Los factores cinéticos e hidrodinámicos del sistema de cristalización usado afectan al producto obtenido en relación a su tamaño de partícula y composición y por lo tanto a la posible liberación comercial del producto.

Uso de fuentes externas de magnesio para la cristalización de estruvita en aguas residuales

En la mayoría de los casos de aguas residuales a tratar, el magnesio es el ion limitante en la reacción de cristalización de la estruvita, por lo que usualmente se añade óxido de magnesio, hidróxido de magnesio, cloruro de magnesio, carbonato de magnesio, sulfato de magnesio o agua de mar como fuentes externas de ion magnesio. El agua de mar usualmente se añade como fuente libre de ion magnesio en aquellas instalaciones ubicadas cerca de la costa, ya que tiene una concentración de aproximadamente 1285 mg/L de este catión.

Los costes de operación en el proceso de cristalización de la estruvita dependen principalmente de las fuentes de alcalinidad y magnesio usadas, que representan aproximadamente 75 % del coste total de la operación (Dockhorn, *International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams*, pp. 145-158 (2009)). Dockhorn (2009) documentó costes en el rango entre 2-3 € y 10 € por kg de P separado como estruvita, en sistemas de cristalización de estruvita. Señoráns *et al.* (Señoráns *et al.*, *Tecnología del Agua* 335, 26-35 (2011)) determinaron un coste precipitado de operación de 2,89 €/kg P en un proceso de cristalización de estruvita a escala industrial, usando agua de mar como fuente de magnesio, debido principalmente al consumo de álcali. Por lo tanto, para que esta tecnología sea más competitiva es necesario seleccionar adecuadamente las fuentes de magnesio y alcalinidad usadas. Las fuentes de magnesio comúnmente empleadas en la cristalización de la estruvita son $MgCl_2$, MgO , $Mg(OH)_2$ o agua de mar.

La patente US7622047 (B2) y el documento de Kazi P. Fattah *et al.* "Determining the feasibility of phosphorus recovery as struvite from filter press centrate in a secondary wastewater treatment plant", *Journal Of Environmental Science And Health. Part A: Toxic Hazarous Substances And Environmental Engineering*, vol. 43, no. 7, 29 April 2008, pp. 756-764, divulgan un reactor de lecho fluidizado que comprende cuatro cuerpos cilíndricos de diferentes diámetros, en donde el afluente entra en el reactor por la parte inferior fomentando que los gránulos de estruvita se mantuvieran y usaran para el crecimiento de los mismos resultantes de la reacción de cristalización heterogénea. Esta patente usa cloruro de magnesio, $MgCl_2$, como fuente de magnesio usando una solución de hidróxido de sodio como álcali para mantener el pH de la operación.

Un proceso similar se describe en CN102964970 (A) y en el documento de Y. Li *et al.* "Struvite pellet crystallization in a high-strength nitrogen and phosphorus stream", *Water Science And Technology*, vol. 68, no. 6, 1 September 2013, pp. 1300-1305. Ambos documentos divulgan el mismo sistema experimental para cristalizar la estruvita. El sistema de cristalización de estruvita para la recuperación de fosfatos en aguas residuales comprende un cristizador, un decantador y una unidad de adición de cloruro de magnesio. El cristizador está constituido por dos zonas tubulares de diferentes tamaños, siendo el diámetro de la zona de precipitación el doble del diámetro de la zona de crecimiento de los cristales de estruvita. Las aguas residuales tratadas y los cristales más pequeños y finos del cristizador entran por gravedad en el decantador secundario.

La patente ES2303436 (B1) divulga un reactor de lecho fluidizado en el que se suministra aire para que fluya junto con el caudal tratado con el fin de mantener el lecho, siendo una ayuda una agitación mecánica o hidráulica. Asimismo, esta patente divulga que el aporte de magnesio necesario para la cristalización de la estruvita se realiza al añadir un subproducto pulverulento con bajo contenido en MgO y elevada presencia de magnesita, procedente

de la fabricación de MgO de calidad industrial a partir de mineral de magnesita. Este producto se solubiliza por burbujeo con dióxido de carbono para acidificarlo y carbonatarlo, obteniendo por lo mismo una suspensión industrial de MgO y bicarbonato de magnesio disuelto. En la solicitud de patente WO20121 34255 (A1) se divulga un reactor de lecho fluidizado con cuatro cuerpos cilíndricos de diferentes diámetros en el que se inyecta aire comprimido en el fondo del reactor para mantener una agitación homogénea dentro del reactor y eliminar el dióxido de carbono descrito de la fase líquida, aumentando el pH de esta operación. En este sistema de cristalización se añaden NaOH y agua de mar como fuentes de alcalinidad y magnesio respectivamente.

Una fuente de magnesio comúnmente usada en la cristalización de estruvita es el MgO (industrial o puro), donde su principal ventaja es que no solamente aporta iones de magnesio sino que también es una fuente de alcalinidad para el sistema de cristalización (Wu *et al.*, *Water Sci Technol* 44, 161-166 (2001); Abma *et al.*, *Water Sci. Technol.* 61, 1715-1722 (2010)). Sería deseable, cuando se usa polvo de MgO de calidad industrial como fuente de magnesio y alcalinidad usar un producto con bajo contenido de magnesita ($MgCO_3$), que presente una alta ley o contenido de MgO, preferiblemente mayor a 80 %, y alta superficie específica para conseguir un uso eficiente de este producto. Uno de los problemas que presentan las partículas industriales de MgO en contacto con el agua fría, es su tendencia a compactarse, produciendo una disminución de su reactividad y aumentando su consumo en los sistemas de cristalización de estruvita, disminuyendo así la pureza de la estruvita generada al salir mezclada con MgO sin reaccionar. Para usar más eficientemente el MgO industrial es aconsejable aumentar su reactividad por hidratación en agua caliente (Matabola *et al.*, *J. Chem. Technol. Biot.* 85, 1569-1574 (2010)), obteniendo una suspensión de MgO con alto contenido en $Mg(OH)_2$, a la que nos referiremos en adelante como suspensión industrial de $Mg(OH)_2$ y disminuyendo que se torne compacta, mejorando drásticamente la eficiencia en el uso del MgO como fuente de magnesio y alcalinidad (baja relación de kg de MgO usado por kg de P recuperado).

Descripción de la invención

Mejoras con la presente invención

La invención presenta un método y sistema de cristalización de estruvita para la recuperación de fosfatos en aguas residuales, con el que se consigue una doble finalidad, por un lado, se previene de forma incontrolada la cristalización de estruvita que atascaría las tuberías de las estaciones depuradoras de aguas residuales y, por otro, aprovecha el potencial de cristalización de la estruvita en este tipo de aguas para producir estruvita de forma controlada por precipitación heterogénea de la misma en un sistema de cristalización, produciendo un producto con una granulometría y composición adecuadas que permiten su comercialización como fertilizante de liberación lenta. De esta forma se evitan los problemas derivados de la cristalización incontrolada de la estruvita usando un recurso, el fósforo en forma de fosfato, que se puede usar como fertilizante agrícola.

Con la presente invención es posible alcanzar dos objetivos positivos para el medio ambiente, por un lado recuperar los fosfatos de las aguas residuales al mitigar los efectos que estos fosfatos pueden causar en el medio acuático asociados a la eutrofización de las aguas y por otro lado, por la producción de un fertilizante con valor comercial que proporciona una importante oportunidad para reducir la dependencia de la producción de fertilizantes y la explotación de las rocas fosfáticas.

La presente invención mejora la técnica anteriores al proponer una recuperación económicamente viable de fosfato en aguas residuales, a través de un sistema de dos etapas y método de cristalización de estruvita, al añadir una suspensión de partículas de hidróxido de magnesio, preferiblemente de grado industrial de bajo coste, resultando en menores costes de operación en comparación con otras tecnologías de recuperación de fosfatos en aguas residuales.

Las mejoras de la presente invención se basan esencialmente en el uso de un proceso de cristalización que comprende principalmente dos etapas (Figura 1); la primera se basa en un lecho fluidizado cristizador de dos fases, en la que se obtienen gránulos de estruvita con un tamaño de partícula entre 1 y 5 mm, y la otra etapa se basa en el uso de un decantador diseñado para retener pequeños cristales de estruvita, con tamaños entre 0,1-1 mm y cristales de tamaño menor a 0,1 mm denominados finos, así se previene el lavado de estos cristales con el efluente final, favoreciendo por lo mismo una mayor recuperación de fosfatos de las aguas residuales. Cabe señalar que ambos elementos, cristizador y decantador, están conectados en serie y que la combinación de ambos elementos permite obtener un tamaño de gránulo de estruvita adecuado ya que se promueve el crecimiento de los cristales de estruvita, evitando los problemas asociados a la formación de cristales finos que comprometen la calidad del efluente final y la viabilidad económica del proceso.

Las aguas residuales se introducen en la primera etapa, específicamente en el cristizador, en donde se recupera una parte importante de las aguas residuales fosfatadas por el crecimiento de gránulos de estruvita mantenidos en suspensión en el cristizador. Los cristales más pequeños, con el agua que sale de esta etapa con una concentración de fosfatos reducida, llegan a la segunda etapa, en donde se promueve el crecimiento de tales cristales, en donde se recupera otra fracción de las aguas residuales fosfatadas. Una de las peculiaridades del decantador de la presente invención es que está proporcionado con un sistema de distribución central (Figura 2), en el que se favorece el crecimiento de pequeños cristales de estruvita, entre 0,1 y 1 mm y la decantación de las

partículas de hidróxido de magnesio que puedan salir del cristalizador de lecho fluidizado, mejorando por lo mismo la producción de cristales de mayor tamaño y el uso eficiente del hidróxido de magnesio industrial.

En la presente invención, la cristalización de la estruvita tiene lugar preferiblemente usando una suspensión con hidróxido de magnesio industrial de alto coste como fuente externa de alcalinidad y de iones de magnesio. Dicha suspensión se caracteriza por un alto contenido en MgO y $Mg(OH)_2$, preferiblemente mayor a 80 %, y una alta reactividad y solubilidad. Con el uso de este compuesto se reducen los costes de operación en comparación con el uso de otros productos químicos tales como $NaOH$, MgO o $Mg(OH)_2$ con purezas mayores a 95 %, que son compuestos con precios mucho más elevados.

Por lo tanto, la presente invención difiere de las tecnologías existentes para la recuperación de fosfatos en la configuración del sistema de cristalización y la fuente de alcalinidad e iones de magnesio usada.

A diferencia de otros sistemas de cristalización de estruvita, tales como los descritos en los documentos de patente ES2303436 y WO2012/134255, citados anteriormente, en donde se introduce aire para promover la agitación y fluidización del lecho de cristales en el reactor, en la presente invención, el lecho de gránulos ubicado en el cristalizador se mantiene fluidizado únicamente por la entrada del agua residual a tratar, por lo tanto, no es necesario aplicar otro mecanismo para agitar dicho lecho, consiguiendo las condiciones hidrodinámicas en las que los gránulos de estruvita pueden aumentar su tamaño, obteniendo por lo mismo una disminución en los costes de operación asociados a la fluidización requerida tales configuraciones.

Descripción detallada de la invención

La presente invención describe un método y un sistema de cristalización de estruvita para recuperar fosfato en aguas residuales urbanas o industriales, preferiblemente con concentraciones de fosfato mayores de 50 mg P/L, y más preferiblemente mayores de 100 mg P/L, y en donde los fosfatos se recuperan por cristalización de estruvita en forma de gránulos, que pueden alcanzar un diámetro de hasta 5 mm. La recuperación de las aguas residuales de fosfato se lleva a cabo mediante un proceso de dos etapas: una etapa de crecimiento de gránulos de estruvita y una etapa de crecimiento de cristales de estruvita pequeños y finos. El sistema puede operar a temperatura ambiente, y preferiblemente a temperaturas menores a 30 °C.

En un primer aspecto, la invención se refiere a un sistema de cristalización de recuperación de estruvita de fosfato en aguas residuales, ya sean urbanas, industriales o de otro tipo, en adelante, "el sistema de la invención", caracterizado por estar compuesto por tres elementos principales:

un cristalizador (1) comprende dos cuerpos cilíndricos (4A, 4B) que tienen diámetros diferentes, el cuerpo cilíndrico más pequeño (4A) está ubicado en la parte inferior del cristalizador (1), y el cuerpo cilíndrico más grande (4B) está ubicado en la parte superior del cristalizador (1), y están acoplados en serie, un vertedero (5) ubicado en la parte superior del cristalizador (1) y una bomba de alimentación (6);

un decantador (2) con un vertedero perimetral (10) en la parte superior del decantador (2) y un sistema de distribución (9) ubicado en el centro del decantador (2) y una bomba de recirculación (11) ubicada entre el decantador (2) y el cristalizador (1); y

una unidad de adición de hidróxido de magnesio (3);

caracterizada porque

- el cristalizador (1) comprende además una válvula de purga (7) ubicada en el fondo del cristalizador (1) para purgar los gránulos, y un tornillo sin fin (8) ubicado cadena abajo de la válvula de purga (7);

- la bomba de alimentación (6) alimenta las aguas residuales a través de una entrada en el cuerpo cilíndrico inferior (4A) del cristalizador (1) que fluye de manera ascendente, en donde tales aguas residuales antes de entrar en el cuerpo cilíndrico inferior (4A) se mezclan con la corriente de reciclado procedente del decantador (2);

- el sistema de distribución (9) está formado por dos cilindros concéntricos (9A, 9B) y una tolva (9C) con forma cónica y una inclinación entre 30° y 60 ° conectada al cilindro concéntrico interior (9A), y la tolva (9C) está proporcionada con un orificio (9D) en su parte inferior que tiene un diámetro entre 20 y 50 mm; y

- el vertedero (5) está conectado al cilindro concéntrico interior (9A) del sistema de distribución (9) de modo tal que las aguas residuales tratadas y los pequeños cristales y finos de estruvita pueden salir del cristalizador (1) mediante el vertedero (5) y entrar por gravedad en el decantador (2).

En la Figura 1 se presentan las características técnicas y los principales elementos del sistema de cristalización de estruvita, mientras que en la Figura 2 se señalan algunos atributos esenciales del diseño de la invención. En la

Figura 3 se muestran gránulos de estruvita obtenidos con la invención.

En la presente invención, el término gránulo se refiere a aquellos cristales de estruvita que tienen un tamaño de partícula entre 1 y 5 mm, cristales pequeños a aquellos que tienen un tamaño entre 0,1 y 1 mm y cristales finos a aquellos cristales de estruvita con un tamaño menor a 0,1 mm.

En una realización preferiblemente, la relación de diámetro interior entre los cuerpos cilíndricos (4A:4B) está entre 1,0:1,5 y 1,0:4,0 m/m, mientras que la relación de longitudes entre cuerpos cilíndricos (4A:4B) está entre 1,0:0,5 y 1,0:2,0 m/m. En una realización más preferida, la relación de diámetro interior entre los cuerpos cilíndricos (4A:4B) es 1,0:1,8, mientras que la relación en longitud entre los cuerpos cilíndricos (4A:4B) es 1,0:1,4 m/m.

En otra realización preferida, el cristalizador (1) está proporcionado con dos ensanchamientos que tienen un ángulo entre 30° y 60°, un ensanchamiento entre la entrada del cristalizador (1) y el cuerpo cilíndrico inferior (4A), y el otro ensanchamiento entre el cuerpo cilíndrico inferior (4A) y el cuerpo cilíndrico superior (4B). En una realización aún más preferida, el ángulo de los dos ensanchamientos es de 45°.

En el cristalizador (1) se promueve el crecimiento de gránulos de estruvita; para ello, el agua residual bruta se alimenta al cristalizador (1) mediante una bomba de alimentación (6), dicha agua se mezcla con la corriente de reciclado procedente del decantador (2) antes de entrar en el fondo del cristalizador (1) fluyendo de manera ascendente a través del lecho de gránulos. El flujo ascendente del agua residual promueve la fluidización de los gránulos en el cristalizador (1) y el crecimiento de dichos gránulos, debido a la reacción de cristalización de la estruvita, arrastrando cristales de estruvita de pequeño tamaño y finos hacia la salida del cristalizador (1). Los cristales de estruvita pequeños y finos con una velocidad de sedimentación menor a la velocidad media de flujo ascendente salen del cristalizador (1) junto con el agua tratada. La salida del agua tratada del cristalizador (1) se realiza mediante el vertedero (5), ubicado en la parte superior del cristalizador (1) a lo largo de la superficie del agua, y que fijará el nivel máximo de agua en el cristalizador (1). Preferiblemente, el surco de recolección de agua existente en el vertedero (5) está ligeramente inclinado en su base para favorecer el flujo de agua y cristales pequeños y finos hacia la salida. La función de dicho vertedero (5) es garantizar la ascensión uniforme del agua residual tratada en el cristalizador (1) para favorecer la salida de pequeños cristales, partículas finas y partículas de hidróxido de magnesio que no han reaccionado hacia el decantador (2). Las aguas residuales tratadas y los pequeños cristales y finos procedentes del cristalizador (1) entran en el decantador (2) por gravedad. El cristalizador (1) está proporcionado con una válvula de purga (7) en la parte inferior que se usa para purgar los gránulos y mantener estable el nivel del lecho de gránulos en el cristalizador (1). Los gránulos se recolectan en un tornillo sin fin (8), ubicado cadena abajo de la válvula de purga (7), para separar los gránulos purgados de las aguas residuales tratadas y favorecer su deshidratación parcial.

En el decantador (2) se fomenta el crecimiento de pequeños cristales de estruvita y finos. Para ello cuenta con una serie de elementos en la unidad: un sistema de distribución (9), un vertedero perimetral (10) y una bomba (11) para recircular los cristales hacia el cristalizador (1).

En una realización preferida, el sistema de distribución está formado por dos cilindros concéntricos (9A, 9B), el cilindro concéntrico interior (9A) y el cilindro concéntrico exterior (9B) ubicados en la parte central del decantador y una tolva (9C) unida al cilindro concéntrico interior (9A), donde la tolva (9C) está proporcionada con un orificio (9D) en su parte inferior. Preferiblemente, dichos elementos están sumergidos por debajo de la superficie del agua. El sistema de distribución (9) se detalla en la Figura 2. La finalidad del sistema de distribución (9) es tanto conseguir una entrada uniforme de las aguas residuales tratadas y de los pequeños cristales y finos procedentes del cristalizador (1), como retener y favorecer el crecimiento de los cristales en pequeños cilindros concéntricos (9A). El sistema de distribución (9) está diseñado para que los cristales finos de estruvita salgan de dicho sistema y entren en el exterior del decantador, en donde se favorecerá su crecimiento y sedimentación. En una realización preferida, el cilindro concéntrico interior (9A) está conectado a una tolva (9C), preferiblemente cónica, abierta desde abajo a través de un orificio (9D). En otra realización más preferida, la tolva (9C) del sistema de distribución (9) tiene una inclinación entre 30° y 60°, y el orificio (9D) tiene preferiblemente un diámetro entre 20 y 50 mm.

En otra realización preferida, el sistema de distribución (9) está ubicado en la parte central del decantador, el vertedero perimetral (10) está ubicado en la parte superior del decantador (2) y la bomba de recirculación (11) está ubicada entre el decantador (2) y el cristalizador (1). En una realización más preferida, la bomba de recirculación (11) está ubicada entre el fondo del decantador (2) y el cristalizador (1). En otra realización más preferida, el fondo del decantador (2) tiene una inclinación entre 30° y 60°.

La salida del agua residual tratada en el decantador (2) se realiza a través de un vertedero perimetral (10), preferiblemente ubicado en la parte superior del decantador (2) a lo largo de la superficie del agua, y que marcará el nivel máximo de agua en el decantador (2). La función de este vertedero perimetral (10) es favorecer la salida uniforme de las aguas residuales tratadas del decantador (2). Preferiblemente, el vertedero perimetral (10) está formado por dientes trapezoidales.

El sistema de la presente invención comprende una unidad de adición de suspensión de hidróxido de magnesio

(3) en agua, que se usa como fuente de magnesio y alcalinidad durante la cristalización de la estruvita. Para ello, la unidad cuenta con una bomba de dosificación (12) y un tanque de almacenamiento (13). En una realización preferida, la bomba de dosificación (12) está ubicada entre el tanque de almacenamiento (13) y el impulso que alimenta la bomba de recirculación (11). En una realización más preferida, la suspensión de hidróxido de magnesio es de calidad o de grado industrial y se mantiene homogeneizada por agitación mecánica en el tanque de almacenamiento (13). Por lo tanto, en esta realización preferida, el sistema de unidad de adición de hidróxido de magnesio de la invención está especialmente adaptado tanto en sus dimensiones como en su configuración para alojar una suspensión industrial de hidróxido de magnesio.

Por lo tanto, en una realización preferida, el sistema de la invención se caracteriza por estar compuesto de tres elementos principales, como se ha descrito anteriormente, pero la unidad de adición de hidróxido de magnesio (3) es una unidad de adición de hidróxido de magnesio industrial (3).

En dicha realización preferida, la cristalización de la estruvita se lleva a cabo al usar una suspensión con hidróxido de magnesio industrial de bajo coste y alto contenido como fuente externa de alcalinidad y de iones de magnesio. Dicha suspensión se caracteriza por un alto contenido en MgO y $Mg(OH)_2$, preferiblemente mayor a 80 %, y una alta reactividad y solubilidad. Con el uso de este compuesto se disminuyen los costes de operación en comparación con el uso de otros productos químicos tales como $NaOH$ o MgO o $Mg(OH)_2$ con purezas mayores a 95 % en estos compuestos, que tienen un coste mucho mayor. Dicho hidróxido de magnesio industrial procede de la hidratación de un producto en polvo con tamaño de partícula comprendido entre 20 y 200 μm , obtenido en el proceso de producción industrial de óxido de magnesio a partir de carbonato de magnesio, que ha sido tratado térmica y químicamente para mejorar su reactividad química.

En otro aspecto, la invención se relaciona con un método, en adelante “el método de la invención”, para la recuperación de fosfato en aguas residuales (ya sean urbanas, industriales o de otro tipo) por cristalización de estruvita a través del sistema de la invención, descrito anteriormente, que comprende dos etapas: a) etapa de crecimiento de gránulos de estruvita, y b) etapa de crecimiento de cristales de estruvita de pequeño tamaño y finos.

El método de la invención es particularmente adecuado para la recuperación de fosfato en aguas residuales con concentraciones de fosfato mayores a 50 mg P/L, y preferiblemente mayores de 100 mg P/L, en donde los fosfatos se recuperan por cristalización en forma de gránulos de estruvita, que pueden alcanzar un diámetro de 5 mm y donde se obtienen concentraciones de fosfato en el efluente en el rango de 10 a 30 mg P/L.

En la etapa a), de crecimiento de los gránulos de estruvita, se forman cristales de estruvita más grandes haciendo así que los gránulos de estruvita se conviertan en lecho. En una realización preferiblemente del método, el crecimiento cristalino que comprende el lecho de gránulos de estruvita, se produce en el cristalizador (1). En realización más preferida, en la etapa a), de crecimiento del gránulo, cristaliza más del 70 % del fosfato contenido en el agua residual bruta.

En otra realización preferida, en la etapa a), de crecimiento del gránulo, el agua residual bruta se introduce por la parte inferior del cuerpo cilíndrico inferior (4A) del cristalizador (1) usando una bomba de alimentación (6). El agua residual bruta, antes de entrar en el cuerpo cilíndrico inferior (4A) del cristalizador (1) se mezcla con la corriente de reciclado procedente del decantador (2) que fluye de manera ascendente a través del lecho de gránulos y el cristalizador (1). El flujo de entrada del cristalizador (1) se ajusta de modo que el lecho de gránulos de estruvita se fluidifique y por lo mismo se promueva el crecimiento de dichos gránulos cristalizando la estruvita. En una realización más preferida, una vez que los gránulos de estruvita aumentan de tamaño es necesario aumentar el flujo que entra en el cristalizador (1) con el objetivo de mantener dichos gránulos fluidizados dentro del cristalizador (1). Los cristales pequeños y los finos con una velocidad de sedimentación más lenta que el flujo ascendente promedio salen del cristalizador (1) junto con las aguas residuales tratadas. Preferiblemente, la velocidad promedio de flujo ascendente es de al menos 270 cm/min dentro del cuerpo cilíndrico inferior (4A) y es de al menos 83 cm/min dentro del cuerpo cilíndrico superior (4B) del cristalizador (1). En otra realización preferida, la masa total de gránulos contenida en el cristalizador (1) se controla al purgar los gránulos del lecho a través de la válvula de purga (7) por un control de presión en bucle usando un manómetro digital ubicado en el cuerpo cilíndrico inferior (4A), estableciendo una consigna de presión máxima que abre la válvula de purga (7). La purga licuada se recolecta en el tornillo sin fin (8), en donde se elimina el líquido, y los gránulos se disponen subsecuentemente en bolsas de filtración.

En otra realización preferiblemente, las aguas residuales tratadas en el cristalizador (1) y los pequeños cristales y finos de estruvita salen del mismo a través del vertedero (5) ubicado en la parte superior del cristalizador (1) entrando por gravedad en el decantador (2), en donde tiene lugar la etapa b) de crecimiento cristalino de los pequeños cristales y finos de estruvita. Por lo tanto, en otra realización preferiblemente, la etapa b) de crecimiento de cristales de estruvita y finos tiene lugar en el decantador (2). En el decantador (2) entran, por gravedad, las aguas residuales tratadas en el cristalizador (1) y los pequeños cristales y finos de estruvita a través del cilindro concéntrico interior (9A) del sistema de distribución (9), y subsecuentemente se distribuyen homogéneamente en el sistema de distribución (9) y en el decantador (2); el flujo de aguas residuales se produce de manera ascendente y posteriormente descendente a través de los cilindros concéntricos (9A, 9B) del sistema de distribución (9) y del

decantador (2); preferiblemente, dicho flujo se produce de manera ascendente dentro del cilindro concéntrico interior (9A) y posteriormente descendente a través del cilindro concéntrico exterior (9B) del sistema de distribución (9), fluyendo subsecuentemente de manera ascendente en el decantador (2). En otra realización preferida, los pequeños cristales se fluidifican dentro del sistema de distribución (9) y el decantador (2) por el flujo de agua producida. En otra realización preferida, los pequeños cristales permanecen fluidizados dentro del sistema de distribución (9) y del decantador (2) hasta que crecen, debido a la reacción de cristalización de la estruvita, y alcanzan una velocidad de sedimentación mayor que la velocidad promedio de decantación por gravedad del flujo ascendente. En una realización más preferida, una vez que estos pequeños cristales aumentan su tamaño, se decantan por gravedad sobre el fondo de la tolva (9C) y salen del sistema de distribución (9) a través del orificio (9D) del mismo, siendo removidos por el fondo del decantador (2) y recirculados hacia el cristizador (1), preferiblemente por la bomba de recirculación (11). Asimismo, preferiblemente, los cristales finos que aumentan su tamaño en el decantador (2) sedimentan, y son recirculados, junto con los cristales de pequeño tamaño decantados en el sistema de distribución (9), al cristizador (1). En una realización más preferida, el agua residual tratada abandona el decantador (2) a través del vertedero perimetral (10) que preferiblemente está ubicado en la parte superior del decantador (2).

En otra realización preferida, el método se caracteriza por la adición de una suspensión de hidróxido de magnesio como fuente de magnesio y alcalinidad durante la cristalización de la estruvita; dicha suspensión se añade mediante una bomba de dosificación (12) en el proceso de conducción que alimenta la bomba de recirculación (11). En una realización más preferida, la suspensión de hidróxido de magnesio es de calidad o de grado industrial. En otra realización más preferida, el método se caracteriza por la dosificación de hidróxido de magnesio por un control de pH en bucle usando un pHmetro ubicado en el cristizador (1) y una bomba de dosificación de suspensión (12) de hidróxido de magnesio (3). Se establece una consigna mínima de pH, preferiblemente un valor de pH mayor a 8,0, que activa la bomba de dosificación (12) y una consigna máxima de pH, preferiblemente un valor de pH mayor a 8,5, que detiene la adición de hidróxido de magnesio. En una realización más preferida, la suspensión de hidróxido de magnesio industrial se mantiene homogeneizada por agitación mecánica en el tanque de almacenamiento (13). En otra realización más preferiblemente, el hidróxido de magnesio que no reacciona en el cristizador (1) sale de dicha unidad junto con el agua residual tratada y los pequeños cristales de estruvita y finos de estruvita, entrando en el decantador (2) donde son retirados subsecuentemente a través de la línea que alimenta la bomba de recirculación (11). En otra realización preferida, el sistema de cristalización se opera preferiblemente a temperaturas menores a 30 °C.

En otro aspecto, la invención se relaciona con el uso del sistema y método de la invención como se ha descrito anteriormente, para recuperar fosfato en aguas residuales industriales y/o en donde dichas aguas residuales tienen concentraciones de fosfato mayores a 50 mg P/L, y preferiblemente mayores a 100 mg P/L, y en donde se alcanzan niveles de fosfato en el efluente en el rango de 10 a 30 mg P/L, dependiendo del pH y de la temperatura de operación, y la recuperación de fosfato en forma de gránulos de estruvita puede alcanzar un diámetro de hasta 5 mm. En una realización preferida, dicho uso se produce preferiblemente al operar el sistema a temperaturas menores a 30 °C.

Breve descripción de las figuras

Figura 1. Esquema de una realización preferida del sistema de cristalización de estruvita en el que se muestran los principales elementos del sistema: el cristizador (1), el decantador (2) y la unidad de adición de suspensión de hidróxido de magnesio industrial (3). El cristizador (1) comprende los siguientes elementos: dos cuerpos cilíndricos (4A, 4B) acoplados en serie, un vertedero (5) en la parte superior del cristizador (1), una bomba de alimentación (6), una válvula (7) para purgar los gránulos y un tornillo sin fin (8) para recolectar los cristales de estruvita. El decantador (2) tiene de un sistema de distribución (9), un vertedero perimetral (10) ubicado en la parte superior del decantador (2) y una bomba de recirculación (11). La unidad industrial de adición de suspensión de hidróxido de magnesio (3) consiste en una bomba de dosificación (12) y un tanque industrial de almacenamiento de suspensión de hidróxido de magnesio (13).

Figura 2. Detalle de la vista en alzado y en planta (sección AA') del sistema de distribución (9) del decantador (2) que comprende dos cilindros concéntricos interior y exterior (9A) y (9B) usados tanto para uniformizar la entrada de agua tratada en el decantador (2) como para favorecer el crecimiento de pequeños cristales. En la parte inferior del cilindro concéntrico interior (9A) se acopla una tolva (9C) proporcionada con un orificio (9D) en su parte inferior.

Figura 3. Fotografía de gránulos precipitados de estruvita obtenidos durante la cristalización de estruvita en una planta industrial, comparando su tamaño con una regla milimetrada.

Ejemplo de realización detallada

Se realizó una recuperación de fosfatos de un agua residual urbana por un sistema de cristalización de estruvita, especialmente diseñado con un cristizador (1) para promover el crecimiento de gránulos de estruvita y un decantador (2) para promover el crecimiento de cristales de finos de estruvita, como se detalla en la Figura 1. Para potenciar la cristalización de la estruvita se añadió una suspensión industrial de hidróxido de magnesio como fuente

externa de iones magnesio, ya que éste es el elemento limitante, y una base para elevar el pH y favorecer la cristalización de la estruvita. Se preparó una suspensión de hidróxido de magnesio de calidad industrial mezclando un producto en polvo, Magal TC de Magnesitas de Rubián Company, con un contenido de MgO entre 80 y 85 %, con agua caliente en un tanque con agitación. Dicha suspensión hidratada mostró una conversión de MgO a Mg(OH)₂ mayor a 60 %.

La recuperación de fosfatos se realizó en un tratamiento de aguas residuales urbanas de una población de 132.300 habitantes equivalentes. Específicamente se trató el efluente de lodos centrifugados procedentes de la etapa de deshidratación por digestión anaerobia del tratamiento de aguas industriales con una concentración de fosfatos de 70 mg P/L y de nitrógeno amoniacal de 1.000 mg N/L, y una alcalinidad elevada (850 mg C/L).

El sistema de cristalización de la estruvita consistió en un cristalizador (1) con un volumen de 0,12 m³ y un decantador (2) de 3,26 m³. El flujo del efluente centrífugo de deshidratación de lodos hacia el cristalizador (1) se fijó en 1,5 m³/h, y la tasa de flujo de la corriente de recirculación procedente del decantador (2) se fijó fue similar a la de las aguas residuales, de modo que la relación de recirculación se mantuvo en 1. La altura total del cristalizador (1) fue de 4300 mm y la del decantador (2) fue de 1200 mm. Con el sistema de cristalización de estruvita se recuperó 75 % del fosfato presente en las aguas residuales brutas. La producción de gránulos fue de 4,0 kg/d, y el efluente contenía una concentración de fosfatos entre 10,0 y 30,0 mg P/L.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de cristalización de estruvita para recuperar el fosfato de las aguas residuales, que comprende tres elementos principales:

un cristalizador (1) comprende dos cuerpos cilíndricos (4A, 4B) que tienen diámetros diferentes, el cuerpo cilíndrico más pequeño (4A) está ubicado en la parte inferior del cristalizador (1), y el cuerpo cilíndrico más grande (4B) está ubicado en la parte superior del cristalizador (1), y están acoplados en serie, un vertedero (5) ubicado en la parte superior del cristalizador (1) y una bomba de alimentación (6);

un decantador (2) con un vertedero perimetral (10) en la parte superior del decantador (2) y un sistema de distribución (9) ubicado en el centro del decantador (2) y una bomba de recirculación (11) ubicada entre el decantador (2) y el cristalizador (1); y

una unidad de adición de hidróxido de magnesio (3);

caracterizada porque

- el cristalizador (1) comprende además una válvula de purga (7) ubicada en el fondo del cristalizador (1) para purgar los gránulos y un tornillo sin fin (8) ubicado cadena abajo de la válvula de purga (7);

- la bomba de alimentación (6) alimenta las aguas residuales a través de una entrada en el cuerpo cilíndrico inferior (4A) del cristalizador (1) que fluye de manera ascendente, en donde tales aguas residuales antes de entrar en el cuerpo cilíndrico inferior (4A) se mezclan con la corriente de reciclado procedente del decantador (2);

- el sistema de distribución (9) está formado por dos cilindros concéntricos (9A, 9B) y una tolva (9C) con forma cónica y una inclinación entre 30° y 60 ° conectada al cilindro concéntrico interior (9A), y la tolva (9C) está proporcionada con un orificio (9D) en su parte inferior que tiene un diámetro entre 20 y 50 mm; y

- el vertedero (5) está conectado al cilindro concéntrico interior (9A) del sistema de distribución (9) de modo tal que las aguas residuales tratadas y los pequeños cristales y finos de estruvita pueden salir del cristalizador (1) mediante el vertedero (5) y entrar por gravedad en el decantador (2).

2. El sistema de cristalización de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la relación de diámetro interior entre los cuerpos cilíndricos (4A:4B) está entre 1,0:1,5 y 1,0:4,0 m/m mientras que la relación de longitudes entre los cuerpos cilíndricos (4A:4B) está entre 1,0:0,5 y 1,0:2,0 m/m.

3. El sistema de cristalización de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, en donde el cristalizador (1) está proporcionado con dos ensanchamientos que tienen un ángulo entre 30° y 60°, un ensanchamiento entre la entrada del cristalizador (1) y el cuerpo cilíndrico inferior (4A), y el otro ensanchamiento entre el cuerpo cilíndrico inferior (4A) y el cuerpo cilíndrico superior (4B).

4. El sistema de cristalización de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque el fondo del decantador (2) tiene una inclinación entre 30° y 60°.

5. El sistema de cristalización de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la unidad de adición de hidróxido de magnesio (3) comprende: una bomba de dosificación (12) y un tanque de almacenamiento (13) para el hidróxido de magnesio y en donde la bomba de dosificación (12) está ubicada entre el tanque de almacenamiento (13) y el tubo de entrada de la bomba de recirculación (11).

6. Un método para la recuperación de fosfato en aguas residuales por cristalización de estruvita por el sistema descrito de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque comprende dos etapas: a) etapa de crecimiento de gránulos de estruvita, y b) etapa de crecimiento de pequeños cristales y finos de estruvita.

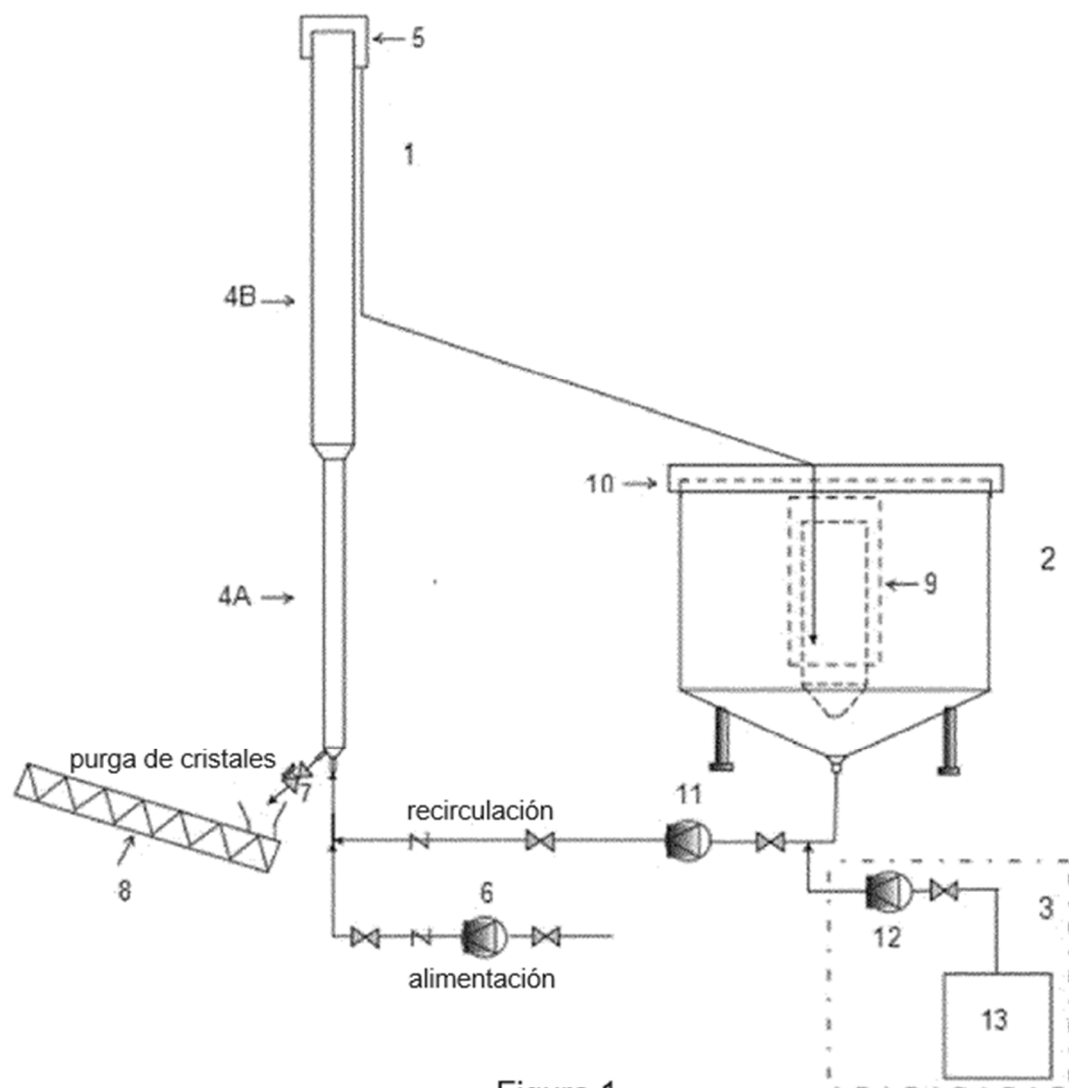
7. El método de acuerdo con la reivindicación 6, en donde la etapa a) de crecimiento de gránulos tiene lugar en el cristalizador (1), en donde se forman cristales de estruvita más grandes, produciendo un lecho de gránulos y en donde más de 70 % del fosfato alimentado cristaliza en la etapa a) de crecimiento de gránulos.

8. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 6 a 7, en donde en la etapa a), la velocidad promedio de flujo ascendente del agua residual es de al menos 270 cm/min dentro del cuerpo cilíndrico inferior (4A) y es de al menos 83 cm/min dentro del cuerpo cilíndrico superior (4B) del cristalizador (1).

9. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8, en donde la masa total de gránulos contenida en el cristalizador (1) se controla al purgar dicho lecho de gránulos a través de una válvula de purga (7) por un control de presión en bucle usando un manómetro digital ubicado en el cuerpo cilíndrico inferior (4A), estableciendo

una consigna de presión máxima que abre la válvula de purga (7), y en donde el licor de purga se recolecta en el tornillo sin fin (8), en donde se elimina el líquido, y los gránulos cosechados se disponen subsecuentemente en bolsas de filtración.

- 5 10. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 6 a 9, en donde las aguas residuales tratadas en el cristalizador (1) y los pequeños cristales y finos de estruvita abandonan el cristalizador mediante el vertedero (5) ubicado en la parte superior del cristalizador (1), entrando por gravedad en el decantador (2), en donde tiene lugar la etapa de crecimiento b) de pequeños cristales y finos de estruvita.
- 10 11. El método de acuerdo con la reivindicación 10, en donde en la etapa b), el agua residual tratada en el cristalizador (1) y los pequeños cristales y finos de estruvita entran en el decantador (2) a través del cilindro concéntrico interior (9A) del sistema de distribución (9), y subsecuentemente se distribuyen homogéneamente en el sistema de distribución (9) y en el decantador (2); y en donde el flujo de aguas residuales se produce de manera ascendente y posteriormente descendente a través de los cilindros concéntricos (9A, 9B) del sistema de distribución (9) y del decantador (2) y en donde las aguas residuales tratadas abandonan el decantador (2) por el
15 vertedero perimetral (10) del mismo.
- 20 12. El método de acuerdo con la reivindicación 11, en donde los pequeños cristales de estruvita que se fluidifican dentro del sistema de distribución (9) y el decantador (2) crecen y alcanzan una velocidad de sedimentación mayor a la velocidad promedio de flujo ascendente, decantándose por gravedad; y en donde los cristales decantados en el sistema de distribución (9) pasan a través del orificio (9D) ubicado en el fondo de la tolva (9C) siendo removidos por el fondo del decantador (2) y recirculados junto con los cristales finos, al cristalizador (1).
- 25 13. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 6 a 12, caracterizado por la adición de una suspensión de hidróxido de magnesio como fuente de magnesio y alcalinidad durante la cristalización de la estruvita usando una bomba de dosificación (12) que descarga tal suspensión en el tubo de entrada de la bomba de recirculación (11).
- 30 14. El método de acuerdo con la reivindicación 13, caracterizado por la dosificación de la suspensión de hidróxido de magnesio a través de un control de pH en bucle encendido/apagado, usando un medidor de pH instalado en el cristalizador (1), se establece una consigna mínima de pH a un valor de pH mayor a 8,0, que activa la bomba de dosificación (12) y una consigna máxima de pH a un valor de pH menor a 8,5, que detiene la adición de la suspensión de hidróxido de magnesio.
- 35 15. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 13 o 14, en donde la suspensión de hidróxido de magnesio se mantiene homogeneizada por agitación mecánica en el tanque de almacenamiento (13).
- 40 16. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 13 a 15, en donde el hidróxido de magnesio que no reacciona en el cristalizador (1) sale de dicha unidad junto con el agua residual tratada y pequeños cristales y finos de estruvita, entrando en el decantador (2), en donde son subsecuentemente retirados a través de tubo de entrada que alimenta la bomba de recirculación (11).
- 45 17. El método de acuerdo con las reivindicaciones 6 a 16, en donde el sistema de cristalización se opera a temperaturas menores a 30 °C.
- 50 18. Uso de un sistema de cristalización de estruvita de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 5, o de un método de acuerdo con las reivindicaciones 6 a 17, para la recuperación de fosfatos en aguas residuales con concentraciones de fosfatos mayores a 50 mg P/L, y preferiblemente mayores de 100 mg P/L, en donde los fosfatos se recuperan por cristalización en gránulos de estruvita, que pueden alcanzar un diámetro de hasta 5 mm, y en donde los niveles de fosfatos alcanzados en el efluente están en el rango entre 10 y 30 mg P/L.



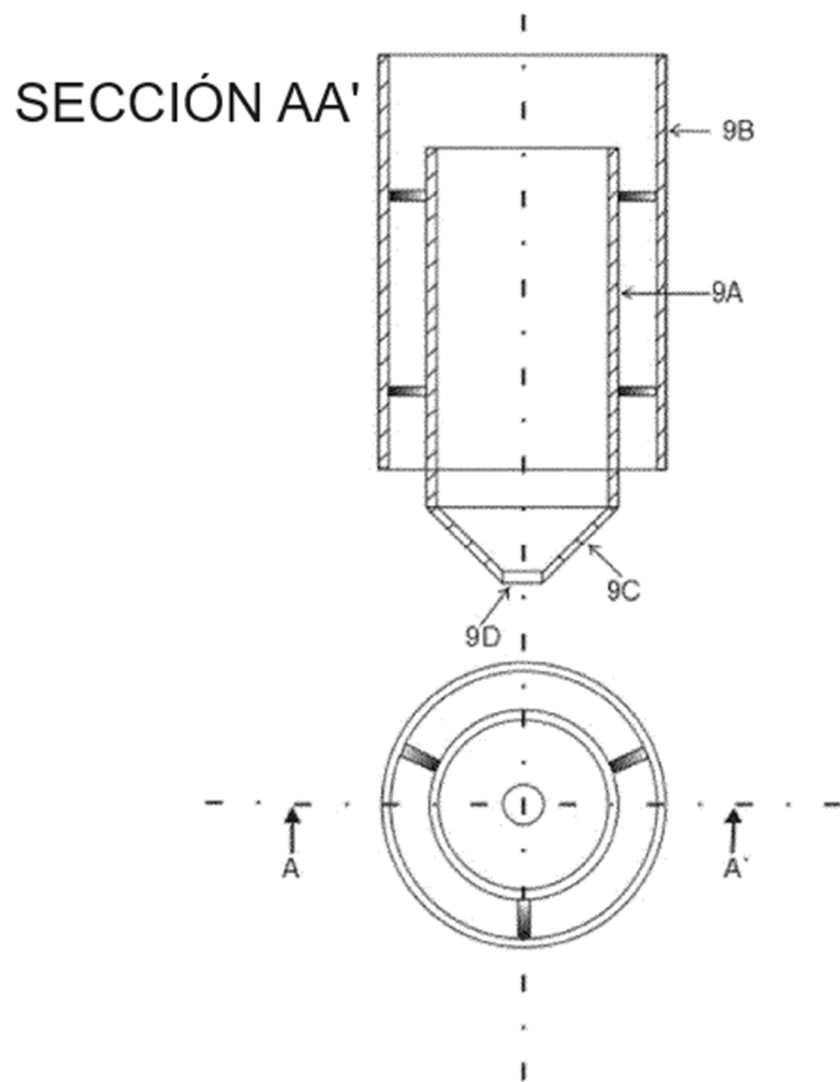


Figura 2

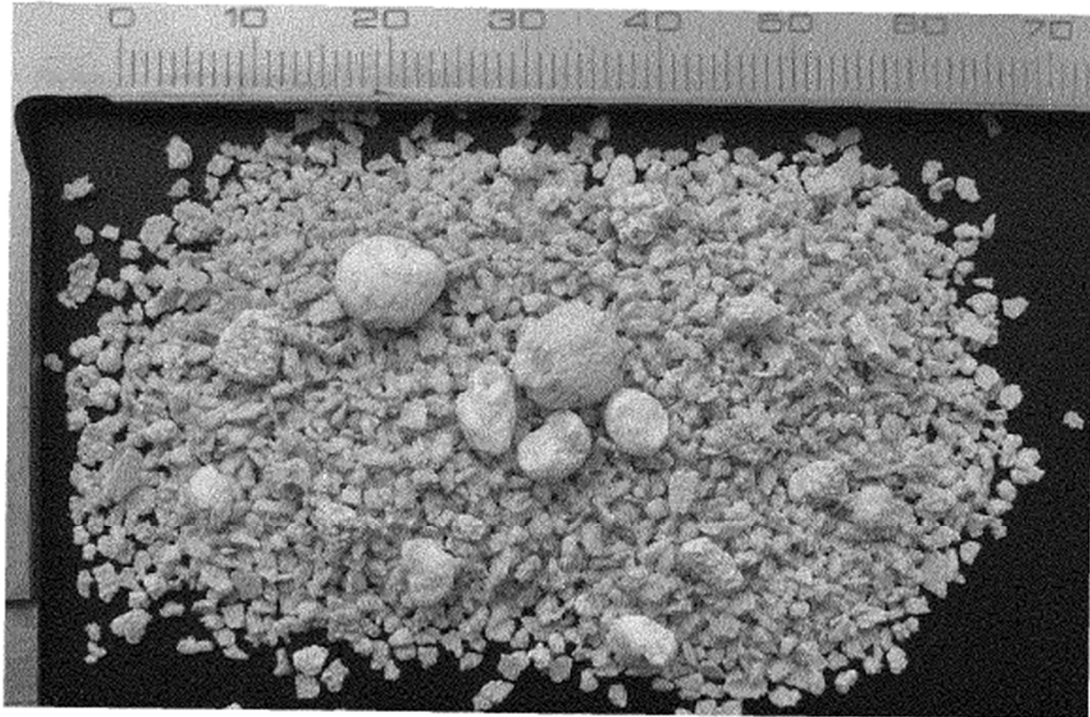


Figura 3