

MODELACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS NO RETENIDAS EN LA ETAPA DE SEDIMENTACIÓN EN CANALES: PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA

MODELING OF THE SEPARATION OF PARTICLES NOT RETAINED IN THE STAGE OF SEDIMENTATION ON CHANNELS: EXTRACTION PROCESS CASSAVA STARCH

MODELAGEM DA SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS NÃO RETIDAS NA FASE DE SEDIMENTAÇÃO EM CANAIS: PROCESSO DE EXTRAÇÃO DE AMIDO DE MANDIOCA

Patricia Torres-Lozada¹, Yelena Carolina Valencia², Teresita Canchala³

RESUMEN

En la etapa de sedimentación en canales del proceso de extracción de almidón de yuca se genera alrededor del 80% del total del agua residual del proceso. Este estudio tuvo como objetivo realizar la modelación teórica de la separación de las partículas no retenidas en los canales de sedimentación, basándose en el análisis de sedimentación de partículas discretas entre 2 y 8 μm y usando el principio de la Ley de Stokes. La modelación teórica mostró que la velocidad de sedimentación oscila entre 0,007 y 0,112 cm/min. Con este rango de velocidad y un caudal crítico de 1,5 L/s, para la remoción total de las partículas se requeriría una estructura con un área superficial de 1.288 m², altura de 1 m y TRH de 10 días aproximadamente. Este estudio demuestra que no es económica ni técnicamente

Recibido para evaluación: 11 de marzo de 2012. **Aprobado para publicación:** 16 de mayo de 2014

- 1 Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), Grupo Estudio y Control de la Contaminación Ambiental. Ingeniera Sanitaria, Ph.D. Cali, Colombia.
- 2 Universidad del Valle, Grupo Estudio y Control de la Contaminación Ambiental. Ingeniera Sanitaria. Cali, Colombia.
- 3 Universidad del Valle, Grupo Estudio y Control de la Contaminación Ambiental. Ingeniera Sanitaria. Cali, Colombia.

Correspondencia: patricia.torres@correounivalle.edu.co

viable la sedimentación convencional ni la de alta tasa para la retención de estas partículas, siendo recomendable evaluar mecanismos diferentes para mejorar la eficiencia de separación de las mismas que pueda potencializar su aprovechamiento y evitar contaminar los cuerpos receptores de estos efluentes.

ABSTRACT

On the settling stage in channels of the extraction process of the cassava starch, is generated around 80% of the total wastewater from the process. On this study, we analyze the theoretical modeling of the particles that are not retained in the channels basing on the analyses of settling of discrete particles with sizes between 2 and 8 microns, using the Stokes Law. The theoretical modeling showed that the sedimentation rate is between 0,007 and 0,112 cm/min. With this rate range and a critical flow rate of 1,5 L/s, for the total removal of the particles, it is required a structure with a surface area of 1288 m², height of 1 m and approximately 10 days. This study shows that is not economically or technically feasible the conventional nor high settling to retain this type of particles, being advisable to evaluate different mechanisms to improve the separation efficiency of particles that may potentiate their use and to avoid the contamination of the receiving bodies of these effluents.

RESUMO

Na fase de sedimentação em canais do processo de extração de amido de mandioca, é produzido perto de 80% do total das águas residuárias do processo. Neste estudo, foi realizada a modelagem teórica da separação das partículas não retidas nos canais de sedimentação de partículas discretas entre 2 e 8 µm; usando o princípio de Lei de Stokes. A modelagem teórica mostrou que a velocidade de sedimentação varia entre 0,007 y 0,112 cm/min. Nesta faixa de velocidade e uma vazão crítica de 1,5 L/s, para a remoção total das partículas seria requerida uma estrutura com uma área superficial de 1.288 m², altura de 1 m e TRH de 10 dias aproximadamente. Este estudo mostra que não é econômica nem tecnicamente viável a sedimentação convencional nem de alta taxa para a retenção destas partículas, sendo recomendável avaliar mecanismos diferentes para melhorar a eficiência de separação das partículas que possa potencializar o seu aproveitamento e evitar contaminar os corpos de água que recebem estas águas residuárias.

INTRODUCCIÓN

En el mundo se extraen aproximadamente 60 millones de toneladas anuales de almidón de una gran variedad de cultivos (cereales, raíces y tubérculos) para uso en una amplia gama de productos [1]. Según [2], el 43% del almidón que se produce en el mundo proviene del maíz y otro 46% procede de la yuca (23%) y de las dextrinas y almidones modificados (23%).

PALABRAS CLAVE:

Rallandería de Yuca, Sedimentación de Partículas Discretas, Separación de Mancha.

KEYWORDS:

Cassava Rallandería, Discretas Particles Settling, Stain Separation.

PALAVRAS CHAVE:

Rallandería de Mandioca, Sedimentação de Partículas Discretas, Separação da Mancha

El almidón que se produce con las raíces de la yuca, es competitivo por contener más almidón por peso seco que cualquier otro cultivo alimentario y porque su almidón es fácil de obtener con tecnologías simples. En América Latina y el Caribe casi la totalidad se produce en fábricas pequeñas y medianas, con mano de obra intensiva y técnicas tradicionales, destacándose la producción de Brasil y Colombia [1].

La producción de almidón de yuca (dulce o agrio) se realiza a través de un proceso de extracción por vía húmeda [3]; en Colombia, el 80% de la producción nacional de almidón agrio se concentra en 150 rallanderías ubicadas en la región norte del Departamento del Cauca, las cuales pueden procesar el almidón en forma manual, semi-mecanizada o mecanizada completamente [4], pero la más empleada es la semi-mecanizada que consta de las etapas que se esquematizan en la Figura 1.

En un estudio realizado por Sajeev *et al.* [5], sobre sedimentación de partículas de almidón en columnas se encontró que para suspensiones diluidas (concentraciones menores a 6% V/V) se presentan características similares a la sedimentación de partículas discretas y floculentas, mientras que para suspensiones más concentradas (superiores a 10% V/V) el comportamiento se asimila a la sedimentación de zona o interferida y de

compresión; por su parte, Torres *et al* [6] establecieron que las partículas que salen en el sobrenadante de los canales de sedimentación del almidón, presentan tamaños entre 2 y 8 μm y una concentración menor a 6%, por lo tanto, para este caso se espera que se presenten características de sedimentación de partículas discretas y floculentas.

Tradicionalmente, estas partículas que no se retienen en la etapa de sedimentación son comúnmente denominadas mancha [7], las cuales se caracterizan por presentar un elevado nivel proteico, lo que puede hacerlas potencialmente aprovechables como alimento para porcinos y bovinos y para la obtención de compost entre otras actividades [8].

Si estas partículas no son separadas de manera eficiente, entran a hacer parte de las aguas residuales efluentes de la etapa de sedimentación, la cual constituye alrededor del 80% del total del agua residual generada en el proceso de extracción de almidón de yuca [9]. Esta agua residual presenta una carga contaminante total promedio de 3.464,6 mg/L expresada en términos de DQO, según la evaluación ambiental del proceso de extracción de almidón de yuca, realizada por Colin *et al* [10], siendo el 28,23% atribuible a los sólidos suspendidos presentes en el flujo.

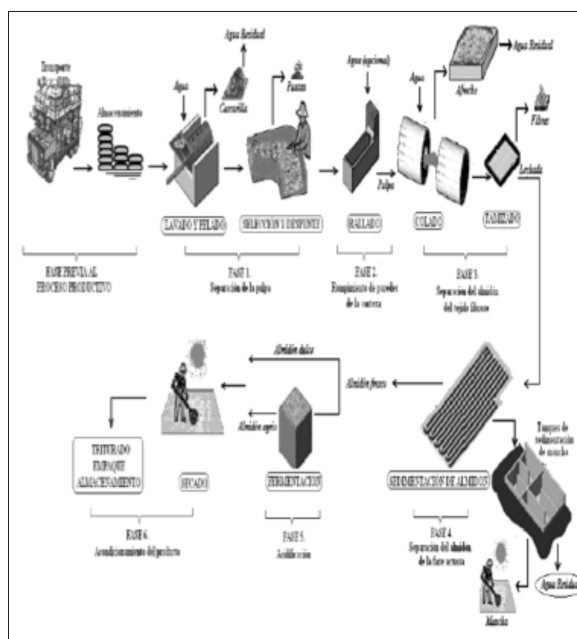
En este estudio se realizó la modelación teórica de la separación de las partículas no retenidas en los canales de sedimentación del proceso de extracción de almidón de yuca, asumiendo el comportamiento de la sedimentación de partículas discretas, las cuales de acuerdo con autores como Richter [11], Spellman [12] y Di Bernardo y Sabogal [13], sedimentan por gravedad sin alterar su forma, tamaño y densidad, no forman aglomerados y las concentraciones volumétricas son bajas.

MÉTODO

El estudio se basó en el análisis teórico de sedimentación de partículas discretas entre 2 y 8 μm , con variaciones de 0,2 μm de acuerdo con la clasificación reportada por Torres *et al.* [6] y Yang *et al.* [14], tomando como referencia una rallandería del norte del Departamento del Cauca.

La evaluación se realizó teniendo en cuenta que la rallandería opera con un caudal que oscila entre 0,82 y 1,44 L/s y realiza la sedimentación de las partículas de

Figura 1. Extracción de almidón de yuca.



Fuente: [4]

almidón en 11 canales (Figura 2), cuya sección transversal es de 0,3 m de altura por 0,4 m de ancho y una longitud total de 165 m [6].

Velocidades de sedimentación

Para establecer el comportamiento de las velocidades de sedimentación, se empleó una hoja de cálculo en Excel asumiendo partículas esféricas en un fluido Newtoniano [14] y empleando la Ecuación de velocidad de sedimentación teórica – V_s (Ecuación 1) propuesta por George Gabriel Stokes quien estableció que la sedimentación de las partículas discretas se gobierna por la acción de su propio peso [11, 12 y 13].

$$V_s = \frac{g}{18} \left(\frac{\rho_p}{\rho_a} - 1 \right) \frac{d_p^2}{\mu} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde,

V_s : Velocidad de sedimentación (m/s)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

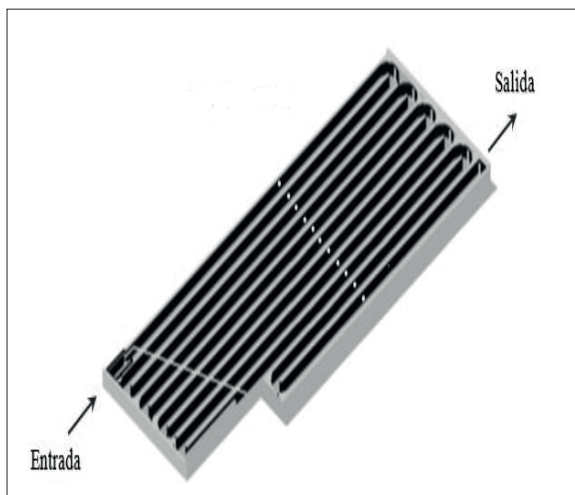
d_p : Diámetro de la partícula (m)

μ : Viscosidad cinemática del agua (m^2/s)

ρ_p : Densidad de la partícula (kg/m^3)

ρ_a : Densidad del fluido (kg/m^3)

Figura 2. Canales de sedimentación del almidón.



La V_s enunciada en la Ley de Stokes, depende de las características físicas de la partícula (densidad y tamaño), de la fuerza que ejerce la gravedad sobre la misma y densidad del fluido. Para el presente estudio se utilizaron como datos iniciales los obtenidos en el estudio realizado por Torres et al. [6]: densidad del almidón $1.500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, densidad del agua $998 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y viscosidad dinámica $9,41\text{E}-7 \text{ m}^2/\text{s}$ para una temperatura del agua de 23°C .

El número de Reynolds (Re) de la partícula se estimó de acuerdo con la Ecuación 2, en donde Re determina un factor de forma dentro de la ecuación de Stokes y debió chequearse para establecer el efecto del régimen de flujo originado en la caída de la partícula; éste debía ser menor a 1 para considerarse como flujo laminar.

$$\text{Re} = \frac{V_s \times d_p}{\mu} \quad (\text{Ec. 2})$$

Una vez obtenido el Re de la partícula, se determinó el coeficiente de arrastre de Newton C_D (Ecuación 3), definido como un factor que aumenta las fuerzas de oposición al descenso de la partícula. El C_D es una función del número de Reynolds (Re), adicionalmente si $d < 0,085 \text{ mm}$, $\text{Re} < 1$ entonces prevalece flujo laminar

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Finalmente, se calculó el valor de la velocidad de sedimentación real de las partículas mediante la Ecuación 4, utilizando el C_D para verificar que la velocidad de sedimentación teórica coincidiera con la velocidad de sedimentación real de Newton (V_s^*).

$$V_s^* = \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{g}{C_D} \times \frac{(\tilde{n}_p - \tilde{n}_a)}{\tilde{n}_a} \times d_p} \quad (\text{Ec. 4})$$

Área superficial

Las velocidades de sedimentación fueron determinadas para unidades de flujo horizontal en las cuales existe una relación teórica entre el área superficial de la unidad (A_s), el caudal de aplicación y la velocidad de sedimentación (V_s) de la partícula a remover, ya que la carga superficial de un sedimentador ideal es igual a la velocidad de sedimentación de la partícula [14].

Teniendo en cuenta la afirmación anterior y luego de encontrar las velocidades reales de sedimentación para las partículas entre 2 y 8 μm , se estableció una relación teórica entre el área de la unidad y la velocidad de sedimentación de la partícula a remover [6]. El A_s se calculó mediante la Ecuación 5 para un rango de caudales a la salida de los canales de sedimentación de 0,85 a 1,5 L/s y variaciones de 0,5 L/s, con ayuda de una hoja de cálculo en Excel.

$$C_s = V_s = \frac{Q}{A_s} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde,

C_s : Carga superficial (m/s)

Q: Caudal (m^3/d)

A_s : Área superficial (m^2)

Tiempo de retención hidráulico teórico en la unidad-TRH

La eficiencia de la sedimentación no depende únicamente de la tasa superficial o velocidad de sedimentación de la partícula sino también de la altura de sedimentación (h) y del tiempo de retención hidráulico teórico en la unidad-TRH (Ecuación 6), por ello se establecieron estos valores para unidades de sedimentación ideal para las condiciones de la rallandería.

$$\text{TRH} = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde,

TRH: Tiempo de retención hidráulico (d).

Q: Caudal de operación rallandería (m^3/d).

V: Volumen de sedimentación (m^3).

La altura de sedimentación (h) fue asumida teniendo en cuenta las recomendaciones del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000 [15] para el diseño de sedimentadores primarios, donde se sugieren profundidades para las unidades ideales entre 1,5 y 3,0 m aproximadamente, para facilitar los fenómenos de la sedimentación de partículas discretas. En esta parte del análisis, se seleccionaron: 1,0, 1,5 y 2,0 m, para evaluar el comportamiento de las partículas a diferentes alturas de sedimentación.

En el diseño de las unidades de sedimentación ideal se debe considerar flujo uniforme y régimen laminar del fluido, para la aplicación de la ley de Stockes, por ello, en la determinación del tipo de flujo se emplea el número adimensional de Reynolds del fluido (Re^*) (Ecuación 7), clasificando el flujo en régimen laminar ($Re < 2.000$) y turbulento ($Re > 2.000$) [11].

El Re depende del área superficial del sedimentador, así que para el cálculo se empleó el A_s que se denominó crítica (área superficial necesaria para garantizar la velocidad de sedimentación de la partícula de menor tamaño, evaluada con el máximo caudal 1,5 L/s en este caso).

$$Re^{(*)} = \frac{Q}{v \times a \times 2h} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde,

$Re^{(*)}$: número de Reynolds del fluido.

v: Viscosidad dinámica (m^2/s).

Q: Caudal de operación rallandería (m^3/s).

a: Ancho del sedimentador (m).

h: Altura del sedimentador (m).

Una vez establecido el tipo de régimen de flujo y con el área crítica superficial, se determinó el volumen del sedimentador (Ecuaciones 8) para las diferentes profundidades de sedimentación, que finalmente, permitieron calcular el TRH asociado a diferentes alturas y caudales de operación.

$$V = A \times h \quad (\text{Ec. 8})$$

RESULTADOS

Velocidades de sedimentación

El comportamiento de las velocidades de sedimentación de las partículas de almidón entre 2 y 8 μm estudiadas bajo el principio de Stockes, se presenta en el Cuadro 1.

Estos valores, mostraron una tendencia de crecimiento proporcional al tamaño de las partículas, las cuales, presentaron números de Reynolds (Re) menores a 1, indicando que todas poseen un régimen de flujo la-

Cuadro 1. Velocidad de sedimentación y Re partícula.

\emptyset (μm)	V_s (cm/min) teórica	Re	C_D	V_s^* (cm/min) Real
2	0,007	2,48E-06	9,70E+06	0,007
2,2	0,008	3,29E-06	7,28E+06	0,008
2,4	0,010	4,28E-06	5,61E+06	0,010
2,6	0,012	5,44E-06	4,41E+06	0,012
2,8	0,014	6,79E-06	3,53E+06	0,014
3	0,016	8,35E-06	2,87E+06	0,016
3,2	0,018	1,01E-05	2,37E+06	0,018
3,4	0,020	1,22E-05	1,97E+06	0,020
3,6	0,023	1,44E-05	1,66E+06	0,023
3,8	0,025	1,70E-05	1,41E+06	0,025
4	0,028	1,98E-05	1,21E+06	0,028
4,2	0,031	2,29E-05	1,05E+06	0,031
4,4	0,034	2,64E-05	9,11E+05	0,034
4,6	0,037	3,01E-05	7,97E+05	0,037
4,8	0,040	3,42E-05	7,01E+05	0,040
5	0,044	3,87E-05	6,21E+05	0,044
5,2	0,047	4,35E-05	5,52E+05	0,047
5,4	0,051	4,87E-05	4,93E+05	0,051
5,6	0,055	5,43E-05	4,42E+05	0,055
5,8	0,059	6,04E-05	3,98E+05	0,059
6	0,063	6,68E-05	3,59E+05	0,063
6,2	0,067	7,37E-05	3,25E+05	0,067
6,4	0,072	8,11E-05	2,96E+05	0,072
6,6	0,076	8,90E-05	2,70E+05	0,076
6,8	0,081	9,73E-05	2,47E+05	0,081
7	0,086	1,06E-04	2,26E+05	0,086
7,2	0,091	1,15E-04	2,08E+05	0,091
7,4	0,096	1,25E-04	1,91E+05	0,096
7,6	0,101	1,36E-04	1,77E+05	0,101
7,8	0,106	1,47E-04	1,63E+05	0,106
8	0,112	1,58E-04	1,51E+05	0,112

* Re < 1: Flujo laminar

minar; con esto se garantizó exactitud en el valor del coeficiente de arrastre y un cálculo adecuado de la velocidad de sedimentación para las mismas.

Las velocidades de sedimentación variaron entre 0,007 y 0,112 cm/min, valores acordes al estudio de [6] para tamaños entre 4 y 27 μm , quienes reportaron que en los primeros 112 m de canales de sedimentación, la concentración de partículas y las velocidades de sedimentación son mayores, mientras en los últi-

mos 53 m las partículas encontradas variaban entre 2 y 8 μm y su concentración era menor, siendo los fenómenos más comunes la sedimentación de partículas discretas y floculentas.

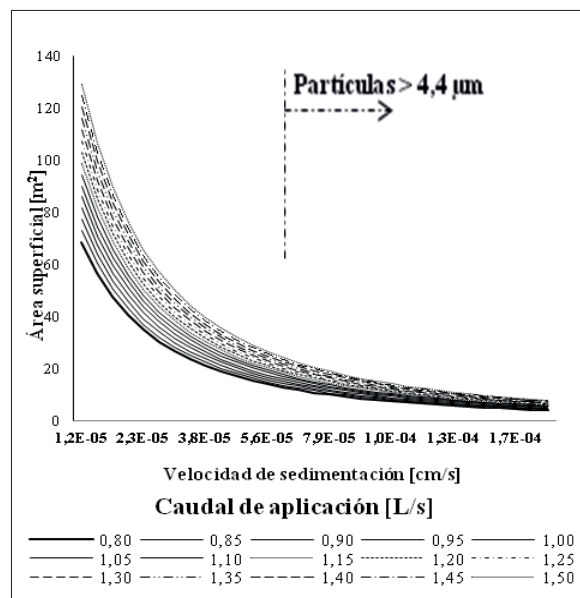
Se espera que a medida que el tamaño de las partículas de almidón disminuye, las fuerzas gravitacionales se hacen menos importantes mientras que las fuerzas hidrodinámicas adquieren mayor relevancia para su sedimentación; es así como las partículas que no son retenidas en los canales (2 a 8 μm), catalogadas como micro-partículas, por efecto de su disminución de tamaño, aumentan la superficie en contacto con el fluido, lo que implicaría una aglomeración de éstas [16].

Área superficial

En la Figura 3 se muestra el comportamiento de las áreas superficiales encontradas para las diferentes velocidades de sedimentación teniendo en cuenta el rango de caudales de operación de la rallandería en estudio (0,8 a 1,5 L/s) Se observa una relación inversamente proporcional entre el tamaño de las partículas y el requerimiento de área, donde el tamaño de la partícula y el caudal de operación afectan sustancialmente el área superficial de sedimentación.

Las áreas superficiales estimadas implican zonas excesivamente grandes para obtener una completa sedimentación de partículas. Ésta aumentaba a medida que el tamaño de partícula disminuía, haciéndose más notorio

Figura 3. Área superficial asociada a V_s .



para las partículas de diámetro menores a $4,4 \mu\text{m}$, pues se observó que a partir de este tamaño la gráfica presentó una caída abrupta en su comportamiento, indicando que las partículas menores son la que limitan el proceso de sedimentación. Respecto a los diferentes caudales evaluados, el área requerida es mayor a medida que los caudales aumentan, siendo el más crítico $1,5 \text{ L/s}$.

Considerando como críticos el mayor caudal de operación ($1,5 \text{ L/s}^1$) y el menor tamaño de partícula ($2 \mu\text{m}$) a remover, el área superficial necesaria para su sedimentación debería ser del orden de 1.288 m^2 , situación inviable considerando la poca disponibilidad de terreno en la zona de estudio y los altos costos que implicarían la construcción de una estructura de estas dimensiones.

Tiempo de retención hidráulico teórico en la unidad-TRH

El área superficial y el caudal de operación implican un TRH para la sedimentación del material, por ello se evaluaron diferentes alturas de sedimentación, que garantizaran la existencia de régimen de flujo laminar. En las Figuras 4 y 5 se presentan los valores de régimen de flujo y TRH asociados a las alturas $1,0$; $1,5$ y $2,0 \text{ m}$, con el objetivo de contrastar la diferencia generada al emplear cada una en el cálculo.

Los números de Reynolds para las profundidades asumidas estuvieron por debajo de 2.000 implicando régimen laminar para el flujo del sobrenadante de los canales de sedimentación del almidón, lo que permitió chequear el cumplimiento de las condiciones para aplicar la ley de Stokes.

Con estos resultados, es factible la utilización de las diferentes alturas evaluadas para el diseño del sedi-

Figura 4. Re a láminas de agua de $1,0$; $1,5$ y $2,0 \text{ m}$.

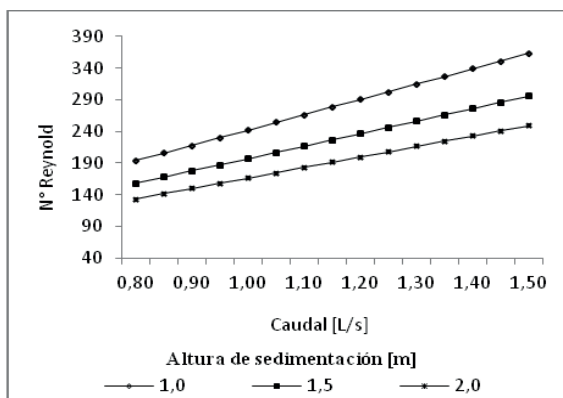
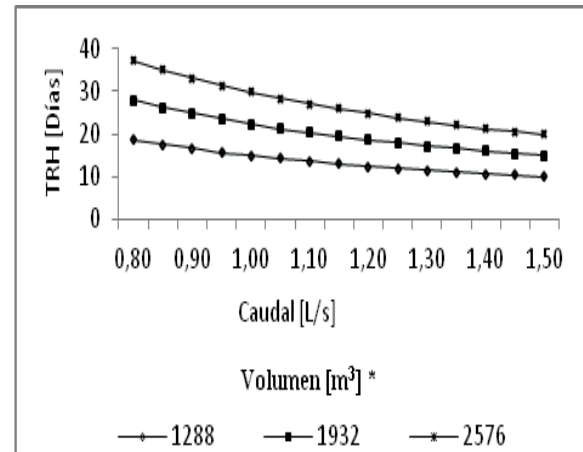


Figura 5. TRH a diferentes volúmenes de tratamiento asociados a láminas de agua de $1,0$; $1,5$ y $2,0 \text{ m}$.



mentador, pues cumplen los requerimientos hidráulicos necesarios en la sedimentación del material a remover mediante fenómenos de partículas discretas; sin embargo, los TRH (días) encontrados en la Figura 5, presentaron una disminución de su valor a medida que el caudal aumentó y el volumen del tanque disminuyó. Se obtuvo un máximo de 37 días (\emptyset de $2 \mu\text{m}$, volumen de 2.575 m^3 y caudal de $0,8 \text{ L/s}$) y un mínimo de 10 días (\emptyset de $8 \mu\text{m}$, volumen de 1288 m^3 y caudal de $1,5 \text{ L/s}$), siendo este último el más favorable para el tratamiento, pues implica una menor profundidad ($1,0 \text{ m}$) y reducción en el volumen del tanque a construir.

En las rallanderías como la estudiada, el sobrenadante de los canales es conducido a tanques (denominados tanques de sedimentación de mancha) que operan con TRH menores a 24 horas, lo que indica la baja retención de estas partículas en estas unidades. En estudios exploratorios sobre el comportamiento del fluido al interior del tanque de sedimentación de la mancha, la OPS [18] encontró que el caudal tratado en el tanque no supera los $0,4 \text{ L/s}$, al existir una estructura de reboso encargada de controlar el volumen de agua que permanece en el tanque, por lo que más del 50% del sobrenadante de los canales sería conducido directamente a la fuente de agua superficial o a la planta de tratamiento de aguas residuales (si existe), pues en la rallandería se generan caudales hasta $1,44 \text{ L/s}$ valor que se encuentra por encima del retenido en el tanque de sedimentación.

El TRH encontrado por la OPS [17], generalmente es inferior a 6 horas, por lo que no se logra superar el tiempo teórico requerido para la sedimentación de las partículas entre 2 y $8 \mu\text{m}$, los cuales varían entre 10 y

37 días. Se puede establecer que la estructura de sedimentación de la mancha tiene poca influencia en la separación de las partículas presentes en el sobrenadante de los canales de sedimentación del almidón, al no cumplir con los requerimientos hidráulicos necesarios.

A pesar de la factibilidad de aplicar de manera ideal los resultados obtenidos para la sedimentación de partículas a través de sedimentadores convencionales, en una estructura que cuente con área superficial de 1.288 m², altura de 1,0 m y TRH de 10 días aproximadamente, a nivel real no es económica y tecnológicamente viable, teniendo en cuenta que estas estructuras se sugieren para remover partículas entre 0,2 mm y 0,05 mm [16, 17], por lo tanto es recomendable evaluar una forma de separación de partículas entre 2 y 8 μm de manera más eficiente.

De esta manera, las partículas entre 2 y 8 μm para ser retenidas con mayor eficiencia requieren de mecanismos diferentes a la sedimentación convencional e incluso a la sedimentación de alta tasa, la cual fue evaluada por Ayala [18] empleando módulos con ductos de sección cuadrada en donde se encontró que dichas estructuras no permiten mejorar la eficiencia de remoción de material sedimentable.

CONCLUSIONES

Las partículas que no se retienen en la etapa de sedimentación en canales en el proceso de extracción de almidón de yuca, comúnmente denominadas mancha, presentan tamaños entre 2 y 8 μm ; la modelación teórica de la sedimentación de las mismas, mostró velocidades de sedimentación entre 0,007 y 0,112 cm/min.

Para lograr la separación de las partículas menores en forma convencional, se requeriría un área superficial de 1.288 m², altura de 1,0 m y TRH de 10 días aproximadamente, condiciones de difícil obtención por los altos costos y requerimientos excesivos de área que implicaría.

Dado que estas partículas se caracterizan por presentar un elevado nivel proteico, lo que puede hacerlas potencialmente aprovechables como alimento para porcinos y bovinos y para la obtención de compost entre otras actividades, se recomienda evaluar alternativas más eficientes que la sedimentación convencional o de alta tasa. Esta separación también permitiría evitar contaminar los cuerpos receptores de estos efluentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos a la Universidad del Valle y Colciencias por el apoyo económico otorgado para la realización del proyecto "Producción Limpia aplicada al proceso de extracción de almidón de yuca" y al propietario de la rallería Piedras Negras, donde fue desarrollado el estudio.

REFERENCIAS

- [1] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de servicios agrícolas de la FAO [online]. 2007. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1028s/a1028s.pdf>. [citado 24 octubre 2010].
- [2] OSPINA, B. Producción de mandioca y almidón en América. Tendencias y futuro de la producción. Resultado de investigaciones en el sector. Asunción (Paraguay): Seminario Internacional de Mandioca y Almidón, 2012, 39 p.
- [3] ARISTIZÁBAL, J., SÁNCHEZ, T. y MEJÍA, D. Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Roma (Italia): Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO, 163, 2007, p. 1-13.
- [4] TORRES, P., PÉREZ, A., MARMOLEJO, L.F., ORDÓÑEZ, J.A. y GARCÍA, R.E. Una mirada a la agroindustria de extracción de almidón de yuca, desde la estandarización de procesos. Revista EIA, 14, 2010, p. 23-38.
- [5] SAJEEV, M.S., KAILAPPAN, R., SREENARAYANAN, V.V. and THANGAVEL, K. pH-Postharvest Technology: Kinetics of Gravity Settling of Cassava Starch in its Aqueous Suspension. Journal of Biosystems Engineering, 83(3), 2002, p. 327-337.
- [6] TORRES-LOZADA, P., MARMOLEJO, L. and CAJIGAS, A. Cassava starch separation: evaluation of sedimentation by gravity in channels. Ingeniería e investigación, 34(1), 2014, p. 42-47.
- [7] BALLESTEROS, C.A.C. y VERGARA, U.E. Estudio de la Sedimentación del Residuo Mancha en el Proceso de Extracción de Almidón Agro de Yuca. Revista Ingeniería Hoy, 26, 2007, p. 20-26.
- [8] MARMOLEJO, L.F., PÉREZ, A., TORRES, P., CAJIGAS, A.A. and CRUZ, C.H. Utilization of the solid wastes generated in small scale cassava starch production. Livestock Research for Rural Development, 20(7), 2008, p. 1-17.

- [9] PÉREZ, A., TORRES, P. y SILVA, J. Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca: optimización de variables ambientales y operacionales. *Revista Dyna*, 76(160), 2009, p. 139-148.
- [10] COLIN, X., FARINET, J.L., ROJAS, O. and ALAZARD, D. Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flor filter with bamboo as support. *Journal of Bioresource Technology*, 98(8), 2007, p. 1602-1607.
- [11] RICHTER, C.A. *Água: Métodos e tecnologia de tratamento*. 1 ed. São Paulo (Brasil): Blucher, 2009, 340 p.
- [12] SPELLMAN, F.R. *Handbook of water and wastewater treatment plant operations*. 2 ed. Boca Raton (Estados Unidos): CRC Press Taylor & Francis Group, 2009, 826 p.
- [13] DI BERNARDO, L. e SABOGAL-PAZ, L.P. *eleção de tecnologias de tratamento de água*, São Paulo (Brasil): LDiBe Ltda. Ed, 2009. 1560 p.
- [14] YANG, C.Y., DING, Y., YORK, D. and BROECKX, W. Numerical simulation of sedimentation of microparticles using the discrete particle method. *Journal of Particuology*, 6(1), 2008, p. 38-49.
- [15] COLOMBIA. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Resolución 1096: Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) 2000. Bogotá (Colombia): 2000.
- [16] SALINAS, G., RUIZ, I. y BABICK, F. Análisis de la función de corrección de la velocidad de sedimentación para micropartículas. *Revista Chilena de Ingeniería*, 15(3), 2007, p. 283-290.
- [17] PERÚ. ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD - OPS. *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores*. Lima (Perú): 2005, 34 p.
- [18] AYALA, D. *Evaluación de la separación física del almidón y de la mancha en el proceso de extracción de almidón agrio de yuca* [Tesis Ingeniería Sanitaria]. Cali (Colombia): Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería Cali, 2005, 65 p.