

## IMPORTANCIA DEL pH Y LA ALCALINIDAD EN EL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA

### RESUMEN

Las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca se caracterizan por ser un residuo acidificado con alta carga contaminante. Este artículo muestra los resultados obtenidos en la operación de un filtro anaerobio a escala de laboratorio empleando dos productos: Cal Hidratada y Bicarbonato de Sodio. Las máximas eficiencias de remoción de DQO ocurrieron en los periodos en que se empleó Bicarbonato de Sodio, el cual garantizó la capacidad buffer necesaria para neutralizar los AGV. El índice AI/AP se mostró bastante sensible por lo que se recomienda como un excelente indicador para el control del proceso anaerobio.

**PALABRAS CLAVES:** Alcalinidad Bicarbonática; Almidón de yuca; Bicarbonato de Sodio; Cal Hidratada; Filtro Anaerobio; Índice buffer (AI/AP).

### ABSTRACT:

*The characteristic of wastewaters from cassava starch extraction process are acid waste with a high contamination load. This article shows the results obtained in the operation of bench scale anaerobic filter using two products: Lime and Sodium Bicarbonate. The maximum COD removal efficiencies were achieved when Sodium Bicarbonate was used, since buffer capacity in the reactor was enough to neutralize the VOC. The IA/PA index was very sensible, for that, this will be recommended as an excellent indicator for anaerobic process control.*

### KEYWORDS

*Bicarbonate Alkalinity; Cassava starch; Sodium Bicarbonate; Lime; Anaerobic filter; Buffer Index (IA/PA).*

## 1. INTRODUCCIÓN

Para lograr un adecuado funcionamiento de los sistemas anaerobios es indispensable generar las condiciones ambientales favorables para el desarrollo y crecimiento de la biomasa y de esta manera lograr las eficiencias remocionales esperadas en el tratamiento.

Durante los diferentes estudios realizados para evaluar la viabilidad del tratamiento de las aguas residuales procedentes de rallanderías mediante reactores anaerobios a escala de laboratorio y piloto, se ha verificado la necesidad de controlar la variable pH en el afluente del proceso siendo ésta, en conjunto con la alcalinidad, de los factores ambientales de mayor relevancia para el control del proceso.

En esta investigación se planteó la evaluación de dos alcalinizantes: Cal Hidratada y Bicarbonato de Sodio en la operación de un Filtro Anaerobio de flujo horizontal a escala de laboratorio, con el objetivo de seleccionar el que ofrece mejores beneficios en términos de aporte de alcalinidad bicarbonática y capacidad buffer necesarias para garantizar la estabilidad del sistema anaerobio.

### ALVARO ANDRES CAJIGAS CERON

Ingeniero Sanitario  
Profesor HC  
Universidad del Valle  
aacajigas@yahoo.es

### ANDREA PÉREZ VIDAL

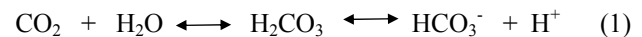
Ingeniera Sanitaria  
Asistente investigación  
Universidad del Valle  
andreaperezvidal@hotmail.com

### PATRICIA TORRES LOZADA

Ingeniera Sanitaria, Ph.D  
Profesora Asociada  
Universidad del Valle  
patoloz@univalle.edu.co

## 2. FUNDAMENTOS

En los procesos anaerobios, los dos principales factores que afectan el pH son el ácido carbónico y los ácidos volátiles. El rango de pH entre 6.0 y 7.5 y la capacidad buffer, es completamente dependiente del sistema **Gas Carbónico/Alcalinidad**, el cual, en equilibrio con la disociación del ácido carbónico, tiende a regular la concentración del ion hidrógeno así:



La capacidad amortiguadora de la alcalinidad debida a los ácidos grasos volátiles ocurre en la franja de pH entre 3.75 y 5.75, siendo por tanto de poca importancia en un proceso anaerobio.

Durante cierto tiempo, las sustancias que ejercen un poder tampón impiden la caída del pH. Solamente cuando toda la alcalinidad del medio no es suficiente para la neutralización de los ácidos volátiles, ocurrirá la caída del pH; por lo tanto, este parámetro se manifiesta muy tarde para poder corregir las fallas del proceso. Es por ello que es importante evaluar simultáneamente los

parámetros de pH, ácidos grasos volátiles, alcalinidad bicarbonática y total [7].

Cuando los ácidos volátiles aumentan, son neutralizados por la alcalinidad al bicarbonato y se forma la alcalinidad debida a los ácidos volátiles debido a que éstos son más fuertes que los bicarbonatos. En este caso, la alcalinidad total es debida a la alcalinidad al bicarbonato y a los ácidos volátiles. Cuando la alcalinidad debida a los ácidos volátiles supera la alcalinidad debida al bicarbonato, el sistema se inestabiliza, pudiendo sufrir sensibles caídas del pH con cualquier nuevo aumento de los ácidos volátiles [7].

Aunque el proceso anaerobio consta de cuatro etapas, la más sensible es la metanogénica, en la cual las bacterias consumen los ácidos de cadena corta (acetato). Si la tasa de producción de AGV es mayor que la tasa de consumo por las bacterias metanogénicas ocurre una acumulación de AGV en el reactor que provocaría su acidificación si no hay capacidad buffer (alcalinidad bicarbonática) suficiente para neutralizarlos, y solo volverá a funcionar adecuadamente con adición externa de alcalinidad [8]

Un aspecto importante en la determinación de la alcalinidad, se refiere al significado de la relación  $AI/AP$ , donde  $AI$  representa la alcalinidad debida a los ácidos grasos volátiles y  $AP$  la alcalinidad bicarbonática. De acuerdo con [6], valores de  $AI/AP$  superiores a 0.3 indican la ocurrencia de disturbios en el proceso de digestión anaerobia; sin embargo, dependiendo del agua residual, es posible que la estabilidad del proceso ocurra para valores de  $AI/AP$  diferentes a 0.3, siendo prudente la verificación para cada caso en particular [4] citado por [3].

Dependiendo de las características del agua residual a tratar, se hará necesario el ajuste del pH si éste lo requiere. Dado que las aguas residuales generadas en el proceso de extracción de almidón agrio de yuca, son de carácter ácido debido a las altas concentraciones de ácido láctico producto del proceso natural de acidificación que sufre este tipo de desecho [2], es fundamental la corrección del pH mediante la adición de productos químicos de tal forma que generen una capacidad de amortiguación del pH. Esta capacidad de amortiguación es denominada también capacidad buffer, la cual se refiere a la habilidad del reactor para resistir cambios en el pH, por ejemplo, la acumulación de ácidos grasos volátiles.

Estos productos químicos pueden ser diferenciados en dos grupos [3]:

- ❖ Los que ofrecen alcalinidad bicarbonática directamente ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ )
- ❖ Los que reaccionan con el gas carbónico para formar alcalinidad bicarbonática ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ).

### 3. METODOLOGÍA

Se empleó un filtro a escala de laboratorio el cual se operó durante 79 días con periodos de flujo discontinuo relacionados con las interrupciones en el proceso productivo debido a la escasez de materia prima (yuca) o por planeación en la producción. El sistema estuvo constituido por:

- ❖ Recipiente de almacenamiento del afluente
  - Sustrato: agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca
- ❖ Bomba peristáltica y regulador de velocidad
- ❖ Filtro anaerobio:
  - Medio de soporte: cáscara de coco
  - Inóculo: lodo anaerobio previamente aclimatado y procedente de un reactor UASB que trata aguas residuales municipales.
  - Recipiente de almacenamiento efluente

La Figura 1 muestra el esquema general del sistema:

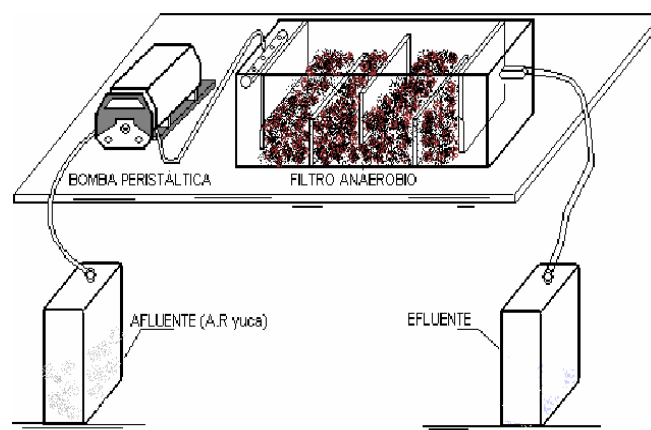


Figura 1. Esquema general del sistema

#### 3.1 Ajuste de Alcalinidad

Al iniciar el arranque del reactor, se empleó Cal hidratada como alcalinizante durante un periodo de 36 días, para el periodo restante se empleó Bicarbonato de Sodio.

#### 3.2 Parámetros de control

Se midieron una serie de parámetros de control durante el arranque del reactor que permitieron evaluar el estado diario del mismo. La tabla 1 muestra los análisis efectuados durante el arranque del reactor, con su respectiva frecuencia. El método empleado para los análisis corresponde a los establecido en [1], y el índice  $AI/AP$  fue medido de acuerdo con la metodología planteada por [6].

| ANÁLISIS  | FRECUENCIA     | AFLUENTE / EFLUENTE |
|---|----------------|---------------------|
| PH  | Diaria         | Afluente y Efluente |
| Índice AI/AP  | Diaria         | Efluente            |
| Alcalinidad total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )         | Diaria         | Afluente y Efluente |
| Alcalinidad Bicarbonática (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) | Diaria         | Afluente y Efluente |
| Ácidos Grasos Volátiles (meq/L)                     | Diaria         | Afluente y Efluente |
| Demanda química de oxígeno (mg/L)                   | 3 veces/semana | Afluente y Efluente |

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos medidos en el arranque del reactor

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La operación del filtro se dividió en cinco fases determinadas por la accesibilidad al agua residual (continuidad en la producción de la rallandería). La Tabla 2 muestra las cinco fases de operación del reactor y el respectivo tipo de alcalinizante empleado en cada una de ellas. En las tres primeras fases se adicionó Cal Hidratada y las dos últimas fases Bicarbonato de Sodio. En la Primera fase se realizó una adición puntual de Bicarbonato de Sodio.

| Fase Nº | Duración (día) | Tipo de alcalinizante empleado |
|---------|----------------|--------------------------------|
| 1       | 1 a 14         | Cal Hidratada *                |
| 2       | 16 a 18        | Cal hidratada                  |
| 3       | 22 a 35        | Cal Hidratada                  |
| 4       | 40 a 47        | Bicarbonato de Sodio           |
| 5       | 63 a 79        | Bicarbonato de Sodio           |

\* El día 6 se adicionó Bicarbonato de Sodio

Tabla 2. Condiciones de operación del filtro anaerobio

La Figura 2 muestra el comportamiento de la Carga Orgánica Volumétrica - COV afluente y efluente y de la eficiencia de remoción de DQO en el efluente durante todo el periodo de operación del reactor.

Se observa que la carga orgánica aplicada al reactor varió constantemente presentando una tendencia ascendente durante las cuatro primeras fases de operación. Esto se debió posiblemente al almacenamiento del agua residual donde la mancha (almidón de baja calidad) presente en la misma sedimentaba a medida que transcurría el tiempo; a pesar de que se trató al máximo de homogenizar las muestras antes de recolectar el agua, no se logró mantener una concentración constante dentro del recipiente ocasionando un aumento gradual de la DQO.

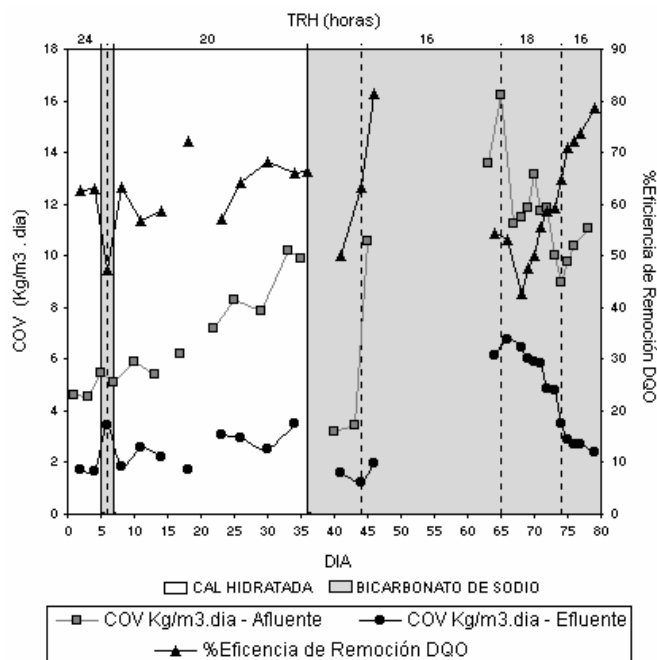


Figura 2. Gráfica comparativa COV (afluente-efluente) - % eficiencia de remoción DQO vs Tiempo

En la quinta fase se diluyó el agua residual con el objetivo de disminuir su elevado valor de DQO y mantener una concentración relativamente constante alrededor de 6000 mg/L lo cual se vio reflejado en la tendencia descendente de la COV aplicada a lo largo de esta fase. Así mismo, hubo que aumentar el TRH de 16 a 18 horas debido a la inestabilidad presentada en el reactor ocasionada por la elevada COV aplicada al inicio; sin embargo, al noveno día, se disminuyó nuevamente el TRH a 16 horas sin observarse ningún efecto negativo en el reactor y por el contrario, la eficiencia de remoción fue incrementándose.

La COV en el efluente estuvo siempre por debajo de la COV aplicada indicando que durante todo el periodo de operación, en el reactor existió remoción de carga orgánica. Esta eficiencia de remoción de DQO presentó valores mínimos alrededor del 42 – 47% en la primera fase (día 6) y la quinta fase (días 68 y 69) y valores máximos alrededor del 78 – 81% en la cuarta y quinta fase.

En general, se observa que los valores de máxima eficiencia remocional están asociados a las etapas en las cuales se empleó Bicarbonato de Sodio como alcalinizante; con el uso de Cal Hidratada se lograron eficiencias de remoción alrededor de 62%, valor inferior al logrado con el Bicarbonato de Sodio.

La Figura 3 muestra cómo la variación del índice AI/AP afectó los valores de las eficiencias remocionales de DQO, las cuales tendían a ser mayores al disminuir el índice y corroborando que la deficiencia en alcalinidad

bicarbonática afecta directamente la eficiencia de remoción de DQO.

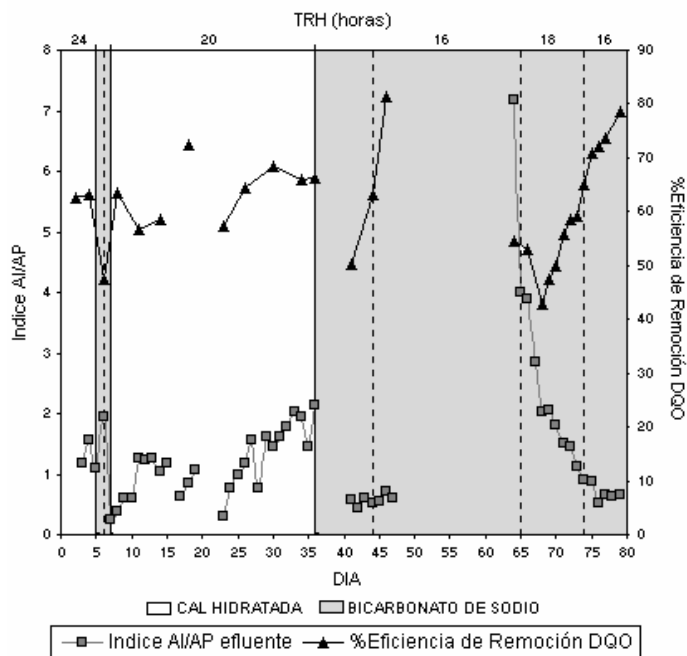


Figura 3. Gráfica comparativa Índice AI/AP – Eficiencia de remoción DQO (%) vs Tiempo

En la primera fase de operación se observa que la adición puntual de Bicarbonato de Sodio el día seis, aportó una elevada alcalinidad bicarbonática disminuyendo al siguiente día el Índice AI/AP del efluente de 2.0 a 0.25 y elevando el porcentaje de eficiencia de remoción el cual estaba tendiendo a disminuir antes de dicha adición.

En la última fase de operación se observa claramente que el elevado valor del índice AI/AP ocasionó la mínima eficiencia de remoción de DQO. Sin embargo, al finalizar esta fase se observó que el Bicarbonato de Sodio ofreció al sistema un comportamiento favorable respecto a las eficiencias de remoción.

En cuanto a los tiempos de retención hidráulicos bajo los cuales operó el reactor, se observó que se alcanzó un valor mínimo de 16 horas, correspondiente a los períodos en que se empleó Bicarbonato de Sodio, alcanzando una máxima eficiencia de remoción de 81.3%. El reactor presentó una tendencia creciente en términos de remoción de DQO al finalizar el período de operación, indicando probablemente que puede soportar cargas hidráulicas mayores (TRH menores) a las manejadas durante la fase experimental.

La Figura 4 muestra la variación del pH afluente y efluente durante el tiempo de operación del reactor, se observó un comportamiento del pH del efluente inferior al del afluente en todas las fases de operación donde se empleó Cal Hidratada como alcalinizante y un

comportamiento inverso durante las fases en que se empleó Bicarbonato de Sodio.

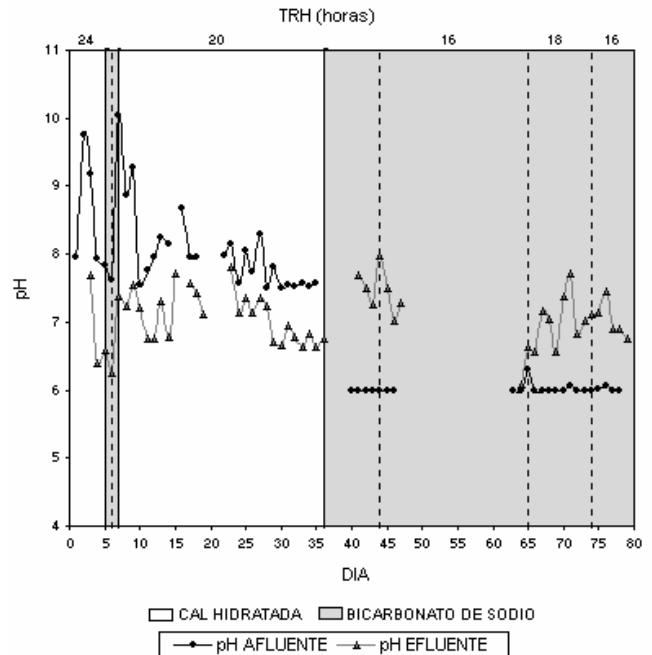


Figura 4. Gráfica comparativa pH (afluente - efluente) vs Tiempo

En la fase 1 de operación, el pH del efluente inició en un valor de 7.96; sin embargo, el día cuatro de operación se presentó un descenso notorio a 6.39 unidades alcanzando un valor mínimo de 6.26 unidades el día seis, indicando que probablemente el reactor no presentaba estabilidad y por el contrario estaba tendiendo a la acidificación a pesar de la adición de Cal Hidratada, lo que indicó insuficiencia de alcalinidad bicarbonática en el medio que neutralizara la acidez del sistema y que a su vez se reflejó en los elevados valores del índice AI/AP del efluente de 1.17 a 1.95.

Debido a esta situación, se decidió realizar una adición puntual de Bicarbonato de Sodio en el afluente el día seis con el objetivo de aportar mayor alcalinidad al medio. Se adicionó cumpliendo una relación DQO :  $\text{HCO}_3^-$  de 1:1, relación que elevó el pH a 7.5 unidades. Esto generó una reacción positiva en el reactor al siguiente día con una elevación de la alcalinidad bicarbonática en el efluente de 277 a 1604 mg/L  $\text{CaCO}_3$  y una disminución del Índice AI/AP a 0.25 lo cual se reflejó en un aumento del pH efluente (7.38 unidades).

Después de la adición puntual del Bicarbonato de Sodio se observó un efecto favorable en el sistema que perduró durante un período aproximado de tres días con valores altos de alcalinidad bicarbonática (2268 y 1084 mg/L  $\text{CaCO}_3$ ) y pH en el efluente entre 7.21 y 7.55 unidades. Sin embargo, después de este período el pH del efluente empezó a sufrir un ligero descenso debido probablemente a la disminución de la alcalinidad bicarbonática (500

mg/L CaCO<sub>3</sub>) indicando que la adición de Cal Hidratada durante esta fase no estaba aportando lo suficiente

Lo ocurrido al inicio de esta fase, es indicio de una aparente acumulación de Acidos Grasos Volátiles - AGV dentro del reactor, haciendo vulnerable el sistema a una posible acidificación. Lo anterior pudo evidenciarse en el comportamiento del índice AI/AP mostrado en la Figura 5, el cual presentó la misma tendencia de los AGV indicando que el sistema no estaba asimilándolos. Esto pudo deberse probablemente a que el uso de Cal Hidratada como alcalinizante no estaba contribuyendo con la suficiente alcalinidad bicarbonática para amortiguar las variaciones en el sistema.

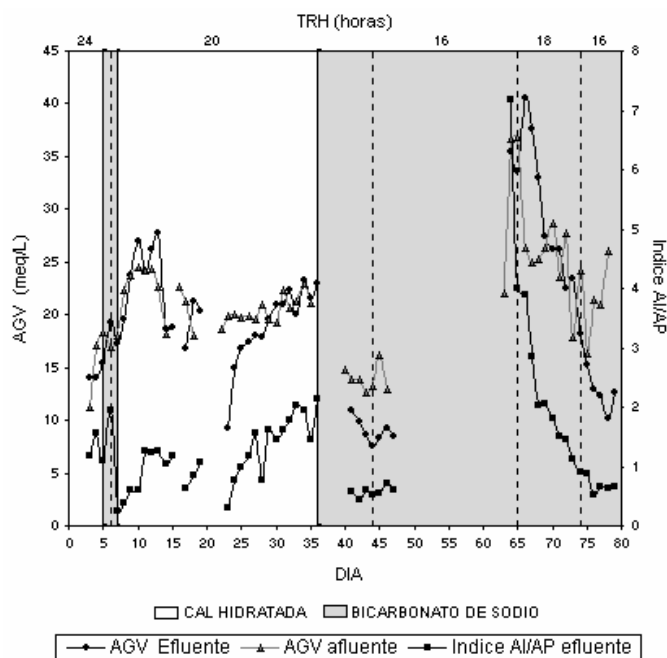


Figura 5. Gráfica comparativa Índice AI/AP – AGV (afluente – efluente)

Se observó que las paradas durante la operación del reactor lo beneficiaron permitiendo el consumo de los AGV remanentes dentro de éste; esto se reflejó en la disminución tanto de los AGV como del índice AI/AP al inicio de cada alimentación. Sin embargo, durante las fases en las que se empleó Cal Hidratada como alcalinizante después de un tiempo, el índice AI/AP y los AGV del efluente tendían a incrementarse presentando nuevamente valores de AGV en el efluente similares a los AGV del afluente y en ocasiones superiores, indicando nuevamente una aparente acumulación de AGV.

En la cuarta fase en la que se inicio la adición de Bicarbonato de Sodio, se observó que los AGV del efluente presentaron la misma tendencia de los AGV del afluente, con valores relativamente por debajo de estos, y tendientes a ser inferiores con respecto al afluente. Este comportamiento, llevó a pensar que la adición del nuevo

alcalinizante estaba contribuyendo a la disminución de los AGV dentro del reactor. Así mismo el Índice AI/AP osciló entre 0.4 y 0.7 con tendencia a mantenerse alrededor de 0.5 reflejándose en los valores de pH del efluente, los cuales se mantuvieron por encima de 7.0 unidades.

En general, se observa que durante el uso de Cal hidratada como alcalinizante, el pH del efluente presentó valores óptimos cuando el afluente tenía valores altos de pH, indicando posiblemente que se requiere una dosificación suficiente del producto de tal forma que garantice un elevado número de grupos hidroxilos (OH<sup>-</sup>) que reaccionen inicialmente con las elevadas concentraciones de H<sup>+</sup> presentes en el agua residual para neutralizar el sustrato y que a su vez garanticen un residual de Cal Hidratada, para formar bicarbonatos a través de su reacción con el CO<sub>2</sub> presente en el medio para generar una capacidad buffer. Sin embargo, es necesario tener cuidado con la sobredosificación de este producto el cual genera precipitados que pueden afectar el reactor.

Durante la operación del reactor se observó que la Cal Hidratada no generó la capacidad buffer esperada en el medio que garantizara la estabilización del reactor, a diferencia del Bicarbonato de sodio que si aportó capacidad buffer, lo cual se vio reflejado en la recuperación y estabilización del reactor durante los períodos en que se empleó este producto, garantizando una alcalinidad bicarbonática superior a la alcalinidad debida a los AGV y reflejándose en las máximas eficiencias de remoción.

Se recomienda para la operación del reactor a escala real, evaluar la combinación de los dos alcalinizantes (Cal hidratada y Bicarbonato de Sodio), con el fin de aprovechar de manera eficiente sus propiedades químicas y de esta forma reducir costos en la operación y garantizar un efluente de buena calidad. Se puede emplear la Cal Hidratada para que reaccione inicialmente con la acidez propia del agua residual y dosificar posteriormente Bicarbonato de Sodio para aportar la cantidad de alcalinidad bicarbonática requerida por el sistema y que no puede ser obtenida con la sola adición de Cal Hidratada.

### 5. CONCLUSIONES

En las fases de operación del reactor en las que se empleó Cal Hidratada como alcalinizante, se observó que este producto permitió mejorar los niveles de pH en el afluente pero no generó la suficiente alcalinidad bicarbonática que garantizara capacidad buffer en el sistema, a diferencia del Bicarbonato de Sodio el cual, además de corregir el pH aportó la alcalinidad bicarbonática necesaria para garantizar la estabilidad del pH en el reactor.

Se encontró que la variación del índice AI/AP durante el arranque del reactor influyó en las eficiencias remocionales de DQO tendiendo a ser mayores al disminuir el valor del índice AI/AP. Esto indica que la deficiencia en alcalinidad bicarbonática afecta de manera negativa el reactor ocasionando una disminución en el porcentaje de remoción de DQO.

Los resultados muestran que mientras el pH no es una variable sensible para el control del proceso anaerobio, la alcalinidad bicarbonática y el índice AI/AP se mostraron bastante sensibles, por lo que se recomienda su uso para el control en la operación de reactores anaerobios.

De acuerdo con los tiempos de retención hidráulico bajo los cuales operó el reactor, se observó que se alcanzó un valor mínimo de 16 horas, correspondiente a los periodos en que se empleó Bicarbonato de Sodio y alcanzando una máxima eficiencia de remoción de 81.3%. Al finalizar la quinta fase de operación, el reactor presentó una tendencia creciente en términos de remoción de DQO, indicando probablemente que el reactor podría soportar cargas hidráulicas mayores (menores TRH).

Se observó que las paradas durante la operación del reactor no afectaron de manera negativa su eficiencia, por el contrario permitieron un mayor tiempo de retención favoreciendo el consumo de los AGV remanentes y la disminución del índice AI/AP del efluente al inicio de cada parada.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] APHA, AWWA y WPCF. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 1985.

[2] ARROYAVE, G. ROJAS, O., y TORRES, P. Depuración anaerobia de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en sistemas de fases de fases separadas. Universidad del Valle. En: XI SINAFERM Simposio Nacional de Fermentaciones. Universidad Federal de Sao Carlos. Brasil. 1996.

[3] CHERNICHARO; C.A. Principios do Tratamento Biológico de Aguas Residuárias. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Sanitaria y Ambiental. Vol V. Brasil. 1997.

[4] FORESTI, E., L. VAN HAANDEL, A. Fundamentos do Tratamento Anaeróbico. En: Tratamento de Esgotos Sanitarios por Processo Anaeróbico e disposicao controlada no solo. PROSAB. 1998.

[5] PÉREZ, A. y CAJIGAS, A. Corrección de pH en reactores anaerobios tratando aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería. Cali, 2002. 86 p.

[6] RYPLEY, L.E; BOYLE, W.C y CONVERSE, J.C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. En: Journal water pollution control federation, V. 58.

[7] TORRES, P. Control de una planta anaerobia. En: AINSA. Medellín, 1993.

[8] VAN HAANDEL, A. y LETTINGA, G. Tratamento anaeróbico de esgotos. Brasil, 1994.