Remoción de carga contaminante en aguas residuales industriales a escala de laboratorio

Removal of pollutant load in industrial wastewater at laboratory scale

A remoção da carga poluente das águas residuais na indústria de escala de laboratório

Gustavo Adolfo Peña-Hernandez[1], Frank Alberto Cuesta-Gonzalez[2] & Jhon Fredy Betancur Perez[3]

[1]Ingeniero Químico. [2]Ingeniero Químico, Magister en Finanzas, Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. [3]Licenciado en Biología y Química, Especialista en Biología Molecular y Biotecnología, Doctor en Ciencias Agropecuarias

[1]Centro de Comercio y Servicios. [1]Centro para la Formación Cafetera. [1, 2]Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Regional Caldas. Manizales. Colombia. [3]Facultad de Ciencias de la Salud (CIMAD). Universidad de Manizales. Manizales. Colombia.

[1]iqgaph@misena.edu.co, [2]fcuesta@misena.edu.co, [3]jbetancur@umanizales.edu.co

Resumen

El desarrollo industrial de un país se encuentra relacionado con el uso de sus recursos naturales, es por esto que se deben definir nuevas estrategias de remoción de carga contaminante para cumplir la nueva normatividad de usos de agua y vertimientos líquidos en Colombia. Una de estas alternativas es utilizar bacterias nativas productoras de biopolímero EPS y PHA sintetizadas en laboratorio. Esta investigación tuvo como objetivos determinar la relación que existe entre la producción de biopolímeros y la remoción de DBO_5, DQO y SST en un reactor aerobio continuo y realizar la comparación de producción de EPS y PHA entre un reactor tipo batch y un reactor aerobio continuo, con efluentes de dos empresas del sector alimenticio de Manizales, Colombia. Se utilizó un sistema de biorreactores aerobios de flujo ascendente el cual se alimentó de forma continua por medio de tanques de suministro. En la empresa productora de golosinas los mayores valores de remoción fueron de 81,46%, 64,09% y 75,78% para DBO_5, DQO y S.S.T respectivamente. Se obtuvieron biopolímeros EPS y PHA en mayor cantidad de 2,38 y 0,667 mg l^{-1} respectivamente. Por otro lado el efluente de la empresa productora de derivados lácteos presentó fermentación de las aguas tratados en los biorreactores, caso que fue eliminado del estudio dada esta contaminación. En conclusión se obtuvieron biopolímeros EPS y PHA en los tratamientos, a la vez que se evidenció la remoción de carga orgánica de las aguas tratadas.

Palabras clave: exopolisacáridos, polihidroxialcanoatos, remoción de carga orgánica, tratamiento de agua, biorreactores, efluentes industriales

Abstract

The industrial development of a country is related to the use of its natural resources, which is the reason why new strategies of removal of pollutant load to fulfill the new regulations of water uses and liquid dumping in Colombia. One of these alternatives is to use biopolymer EPS and PHA producing native bacteria synthesized in laboratory. The objective of this investigation was to determine the relation between the production of biopolymers

and the removal of DBO5, DQO and SST in a continuous aerobic reactor and to compare the production of EPS and PHA in a batch reactor and a continuous aerobic reactor, using the effluent of two companies of the food processing sector located in Manizales, Colombia. An upflow anaerobic sludge blanket reactors system was used, the system was fed continuously using supply tanks. In the sweet goods company effluent the highest values of removal were 81,46%, 64,09% and 75,78% for DBO5, DQO and S.S.T respectively. EPS and PHA biopolymers were obtained in a quantity of 2,38 and 0,667 mg l^{-1} respectively. On the other hand the effluent from the dairy product company showed evidences of fermentation of the waters treated in the biorreactores, this case was eliminated from the study because of the contamination. In conclusion EPS and PHA biopolymers were obtained in the treatments, and the removal of organic load was also achieved.

Key-words: exopolysaccharides, polyhydroxyalkanoates, removal organic load, water treatment, bioreactors, industrial effluents

Resumo

O desenvolvimento industrial de um país está relacionado com a utilização de recursos naturais, é por isso que é necessário definir novas estratégias de remoção da carga de contaminantes para atenderos novos regulamentos de usos da água e as descargas líquidas na Colômbia. Uma destas alternativas é a utilização de bactérias nativas que produzem biopolimeros PHA EPS sintetizados no laboratório. Esta pesquisa teve como objetivo determinar a relação entre a produção de biopolímeros e remoção de DBO5, DQO e SST em um reator aeróbio contínuo e a comparação da produção de EPS e PHA entre um reactor tipo batch e um reator aeróbio contínuo, com efluentes de duas empresas do setor de alimentos em Manizales na Colômbia. Foi usado um sistema de biorreactores aeróbios de fluxo ascendente que é continuamente alimentado através de tanques de abastecimento. Na empresa que produz doces, os maiores valores de remoção foram 81,46%, 64,09% e 75,78% para DBO 5, COD e S.S.T respectivamente. Obtiveram-se biopolímeros EPS e PHA uma maior quantidade de 2,38 e 0,667 mg L-1, respectivamente. Por outro lado, o efluente a partir da companhia produtora de lacticinios, apresentou fermentação das águas tratadas nos biorreactores, sendo eliminado do estudo devido a esta contaminação. Em Conclusão foram obtidos biopolímeros EPS e PHA nos tratamentos, enquanto a remoção de carga orgânica da água tratada era evidente.

Palavras-chave: exopolissacarídeos, poli-hidroxialcanoatos, remoção de carga orgânica, tratamento de água, biorreatores, efluentes industriais

Introducción

Al hablar de desarrollo industrial en un país, se debe hablar indirectamente de los efectos secundarios que éstos conllevan con relación al uso de los recursos naturales. Debido a esta condición de crecimiento económico, se debe crear una serie de medidas para disminuir el impacto ambiental ocasionado, teniendo en cuenta un equilibrio sostenible entre el desarrollo económico industrial y la capacidad de asimilación del medio ambiente en función del aporte de recursos naturales y la recepción de agentes contaminantes que afecten al mismo (Bastidas & Ramírez, 2007).

En la ciudad de Manizales, Caldas, Colombia, las grandes empresas se establecieron en asentamientos industriales no en función del plan de ordenamiento sino en las zonas de su conveniencia para la depuración de sus residuos sólidos como de sus vertimientos líquidos (Bastidas & Ramírez, 2007). La zona industrial Juanchito es uno de estos asentamientos industriales, cuyos vertimientos líquidos afectan en una gran proporción a la quebrada Manizales (Corpocaldas, 2011); de acuerdo a lo establecido por el decreto 3930 de 2010 (aún

no reglamentado), el cual deroga al decreto 1594 de 1984 “usos del agua y vertimientos líquidos”, se obtienen valores específicos para la remoción de cargas contaminantes totales, los cuales ya se encuentran establecidos en la resolución 631 de 2015, mientras que en el decreto 1594 se establecían valores porcentuales, lo cual implica que las empresas del sector apliquen nuevas tecnologías de remoción de agentes contaminantes. Estas tecnologías, dependiendo de las características del efluente industrial tienden a variar, lo cual involucra la creación de nuevas tecnologías de remoción de agentes contaminantes orgánicos para cumplir con la normatividad legal vigente de Colombia.

En función de las alternativas que se han desarrollado para la disminución del impacto ambiental se tiene la biorremediación, y entre sus campos de aplicación más destacados se encuentran la degradación enzimática, la fitorremediación y la remediación microbiana.

Dentro de los procesos de biorremediación se utilizan actualmente las bacterias nativas obtenidas sintéticamente para la depuración de carga contaminante orgánica, además en algunos casos tienen un valor agregado como en el caso de las bacterias utilizadas en esta investigación, las cuales producen diferentes tipos de biopolímeros. Uno de estos biopolímeros son los Polihidroxialcanoatos (PHA) que se definen como polímeros sintetizados por microorganismos, los cuales son acumulados como reserva de carbono y energía. Estos polímeros permiten fabricar bioplásticos que tienen la misma resistencia de los plásticos tradicionales pero como valor agregado es la rápida degradación de estos (Serrano, 2010). Por otro lado los exopolisacáridos son biopolímeros que se constituyen fundamentalmente por unidades glucididcas que se producen por hongos y levaduras; se ha demostrado que las bacterias productoras de este biopolímero tienen la propiedad de retener metales, un ejemplo de estas bacterias es la *Zooglea ramigera,* bacteria que se ha utilizado en el tratamiento de aguas residuales (Paris, 2009). La unión de varias bacterias conlleva a la creación de consorcios bacterianos que se consideran una asociación que actúan como una comunidad donde todos se benefician de las actividades de los demás miembros de este consorcio. A nivel funcional un consorcio bacteriano suma las actividades de todas sus partes, lo cual para la descontaminación de aguas residuales significa que pueden remover carga contaminante orgánica siempre y cuando se mantenga la compatibilidad metabólica y los cambios ambientales en su hábitat permita la coexistencia entre las bacterias que pertenecen al consorcio (Ochoa & Montoya, 2010).

En Colombia se ha visto la biorremediación como una alternativa a problemas de contaminación del suelo y del agua por hidrocarburos, plaguicidas y otros agentes contaminantes (Ecopetrol, 2003), pero se ha encontrado que esta alternativa se centra especialmente en procesos de fitorremediación naturales y en muy pocas investigaciones se analiza la biorremediación por medio de procesos sintéticos (adición de bacterias al proceso de depuración), como las que se muestran a continuación: La empresa ECOPETROL realiza trabajos de investigación de biorremediación con el fin de realizar un diagnóstico inicial de contaminación de suelos y aguas subterráneas por parte de hidrocarburos, además de descontaminar estos a partir de un producto que se encuentra conformado por un consorcio bacteriano nativo que no se encuentra modificado genéticamente; dicho producto tiene la capacidad de degradar compuestos derivados de hidrocarburos para la biorremediación de aguas, suelos y residuos que se encuentran contaminados (Ecopetrol, 2003).

Díaz, Grigson & Grant-Burgess (2002) mediante el uso de consorcios bacterianos extremohalotolerantes para la biodegradación de crudo en ambientes salinos demostraron la efectividad de dichos consorcios en relación a los sistemas tradicionales de biorremediación. En otro trabajo realizado, Quintero (2011) realizó mediante consorcios bacterianos la evaluación del tratamiento biológico para la remoción del color índigo de las aguas residuales del sector textil utilizando

reactores de flujo discontinuo de lecho fluidizado y a escala de laboratorio, demostrando la capacidad de los consorcios bacterianos para la eliminación de la variable color y de la DQO total y soluble. Cuesta (2014) demostró la viabilidad de utilizar bacterias productoras de EPS y PHA en aguas residuales del sector de alimentos con el fin de evaluar la remoción de demanda química, demanda biológica de oxígeno y de sólidos suspendidos totales en un reactor tipo batch, en el cual se recomienda realizar una segunda fase en flujo continuo para ejecutar el posterior escalamiento del sistema a pruebas piloto debido a que la mayoría de los vertimientos industriales son de carácter continuo. Por este motivo es necesario estudiar el tratamiento de estas aguas bajo las condiciones descritas anteriormente

Los objetivos trazados en la presente investigación consistieron en determinar la relación que existe entre la producción de biopolímeros y la remoción de DBO_5, DQO y SST en un reactor aerobio continuo de flujo ascendente a escala de laboratorio, además de comparar el nivel de producción de Exopolisacáridos y Polihidroxialcanoatos en un reactor aerobio continuo de flujo ascendente y un reactor tipo batch a nivel de laboratorio.

Debido a que la mayoría de los vertimientos industriales son de carácter continuo fue necesario estudiar el tratamiento de aguas bajo estas condiciones, a la vez de dar continuidad a trabajos de investigación realizados previamente en condiciones de laboratorio (Cuesta, 2014).

Metodología

Para poder dar cumplimiento a los objetivos planteados, se partió de los resultados obtenidos por Cuesta (2014) donde se tiene la base para la selección de los consorcios bacterianos con los que se trabajó (Tabla 1) en esta investigación, la cual fue la remoción de sólidos suspendidos totales.

Tabla 1. *Selección de bacterias para la realización del proyecto*

Empresa	EPS	PHA
Empresa productora de golosinas	SE3, SE4	SP1, SP3
Empresa productora de derivados lácteos	NP2, NP4	NE3, NE9

Fuente: Cuesta, 2014

Diseño de los biorreactores y pruebas hidráulicas
El diseño del sistema de los reactores estaba compuesto por un tanque de almacenamiento de agua con un contenido total de 5 l; este tanque tuvo como función alimentar al biorreactor por medio de una válvula de venoclisis que regulaba el caudal de entrada. El segundo tanque era el biorreactor de flujo ascendente que contuvo el agua residual más los consorcios bacterianos y trabajó con un volumen efectivo de 3,5 l y posteriormente se encontraba un tanque sedimentador, que tenía como función recolectar el agua residual de salida del reactor, a la cual se le realizaron los análisis respectivos. El biorreactor se conectó al tanque sedimentador por medio de una manguera de media pulgada de diámetro. El biorreactor tuvo un sistema de aireación constante.

Se formaron 6 sistemas distribuidos de la siguiente manera:

- Un sistema con consorcios bacterianos productores de EPS, un sistema con consorcios bacterianos productores de PHA y un sistema con un consorcio total de bacterias productoras de EPS y PHA para la empresa de golosinas.

- Un sistema con consorcio total de productoras de EPS y PHA para la empresa de lácteos.

- Un sistema de control para cada una de las empresas.

Muestreo inicial

Se realizó un muestreo de 40 l para cada empresa con el fin de alimentar los 4 sistemas con bacterias productoras de biopolímeros más los sistemas de control.

A cada muestra inicial se realizó la medición de los siguientes parámetros:

- pH: mediante equipo portátil multiparámetro WTW 3430 SET F

- DBO_5: mediante equipo OXI700 BOD System.

- DQO: mediante kit nano color para análisis por espectrofotometría mediante equipo NANOCOLOR UV/VIS MN Since 1911.

- Sólidos suspendidos totales: mediante método gravimétrico.

Puesta en marcha de los biorreactores, toma de muestras:

Para esta fase se tomó dentro de los biorreactores un volumen de trabajo de 3,5 l, correspondiente al volumen efectivo de cada tanque, los cuáles fueron inoculados al 10% en relación V/V con los consorcios bacterianos descritos anteriormente; estos biorreactores contaron con un sistema de aireación constante para garantizar la condición aerobia de los mismos.

Para garantizar el inicio de la actividad microbiana en el biorreactor se tuvo un tiempo de un día en el cual no se realizó alimentación al mismo.

Pasado el día de inicio del proceso se procedió a la alimentación continua de los biorreactores, teniendo en cuenta el concepto de tiempo de retención hidráulica que se define como el tiempo medio teórico que se demoran las partículas de agua en un proceso de tratamiento (Resolución 1096 RAS, 2000). En cada tiempo de retención hidráulica de las empresas, en el ensayo en laboratorio se tomaron muestras del tanque sedimentador con el fin de realizar la medición de sólidos suspendidos totales para determinar el comportamiento de la remoción de esta variable en función del tiempo, con base en el criterio de control al pH en el alimentador. Para la empresa productora de golosinas este tiempo fue de 3 días. Para la empresa productora de derivados lácteos este tiempo fue de 12 horas.

Se tuvo especial cuidado al medir el parámetro de pH, puesto que las bacterias mesófilas aerobias crecen en un pH óptimo entre 6,5 – 8 (Tórtora, Funke & Case.2010). Por lo tanto se controló el pH en los alimentadores adicionando pequeñas dosis de solución de NaOH concentrada en caso de que el sistema se encuentre ácido ($pH < 6,5$) y gotas de H_2SO_4 concentrado en caso tal de que el sistema se encuentre alcalino ($pH > 8$) para conservar esta variable dentro del rango establecido. El pH se midió en cada uno de los biorreactores dos veces diarias, con el fin de monitorear el comportamiento de esta variable; igual se midió en los alimentadores para estabilizar el pH dentro del rango establecido.

Seguimiento de variables

Teniendo en cuenta los tiempos de retención hidráulica, se tomaron muestras en las empresas tanto al momento de realizar la alimentación al ensayo en laboratorio como en los sedimentadores con el fin de evidenciar la remoción de la carga contaminante expresada en DBO_5, DQO y S.S.T, es decir que los parámetros se medían cada tres días en la empresa productora de golosinas y cada 12 horas para la empresa de lácteos.

Resultados y discusión

A los 12 días de iniciado el proceso, fue necesario detener la experimentación debido a que en el biorreactor y en el sedimentador de las aguas

residuales de la empresa de lácteos que contenían bacterias productoras de biopolímeros se fermentaron debido a que los lácteos y sus derivados son altamente perecederos y por ende sus aguas residuales contienen bacterias que ayudan a acelerar el proceso de degradación aerobia (Figura 1).

Figura 1. Fermentación aerobia del sedimentador y biorreactor en la empresa de derivados lácteos.

Una vez reiniciado el ensayo solamente con aguas de la empresa de golosinas los nuevos sistemas que se trabajaron con las aguas de esta empresa fueron los siguientes:

- Un sistema con consorcios bacterianos productores de EPS (MES: Mezcla bacterias productoras de exopolisacáridos)
- Un sistema con consorcios bacterianos productores de PHA (MPS: Mezcla bacterias productoras de polihidroxialcanoatos)
- Un sistema con consorcios bacterianos totales, mezcla de EPS y PHA (MTS: Mezcla total de bacterias productoras de biopolímeros).
- Un sistema de control sin bacterias. (CS: Sistema sin bacterias)

Se realizó una nueva marcha de proceso y a los 15 días se realizó una reinoculación de bacterias para garantizar la población de éstas en el biorreactor.

Los resultados en la remoción de cada una de las variables estudiadas demuestran que el tratamiento control (sin bacterias productoras de biopolímero) es el sistema que más porcentaje de remoción promedio presenta en las variables DBO_5 (Tabla 2) y S.S.T. (Tabla 4) En la variable DQO (Tabla 3), el sistema que más porcentaje de remoción presentó fue el consorcio total de bacterias productoras de biopolímeros seguido por el sistema control, aunque la diferencia no es significativa; se podría decir que dicho porcentaje es igual (64,09% para el sistema con consorcio total de bacterias vs 64,05% para sistema control).

Tabla 2. *Porcentaje de remoción promedio de DBO5 de los consorcios bacterianos en la empresa de golosinas.*

	MES	MPS	MTS	CS
%Remoción DBO5	62,99	45,57	62,13	81,46

Tabla 3. *Porcentaje de remoción promedio de DQO de los consorcios bacterianos en la empresa de golosinas.*

	MES	MPS	MTS	CS
%Remoción DQO	63,90	41,68	64,09	64,05

Tabla 4. *Porcentaje de remoción promedio de S.S.T de los consorcios bacterianos en la empresa de golosinas.*

	MES	MPS	MTS	CS
%Remoción S.S.T	50,95	53,39	38,01	75,78

Para realizar la comparación con la normatividad colombiana legal vigente se muestran los valores establecidos por el decreto 1594 de 1984 (Tabla 5).

Tabla 5. *Porcentaje de remoción de carga según la normatividad colombiana legal vigente [Decreto 1594 de 1984]*

DBO5 Remoción Carga (%)	S.S.T Remoción Carga (%)
80	80

Analizando los resultados obtenidos con relación a la remoción de la variable DBO_5, el sistema más efectivo es el sistema con el consorcio sin bacterias (CS), y adicionalmente es el único sistema que cumple con el parámetro de remoción según la normatividad, igual sucede con la variable sólidos suspendidos totales, pero en el segundo caso el sistema control no alcanza a cumplir con la normatividad.

En las figuras 2, 3, 4 y 5 se muestra el seguimiento de las tres variables relacionadas con la remoción en cada uno de los sistemas, teniendo en cuenta el criterio de tiempo de retención hidráulica de la empresa de golosinas

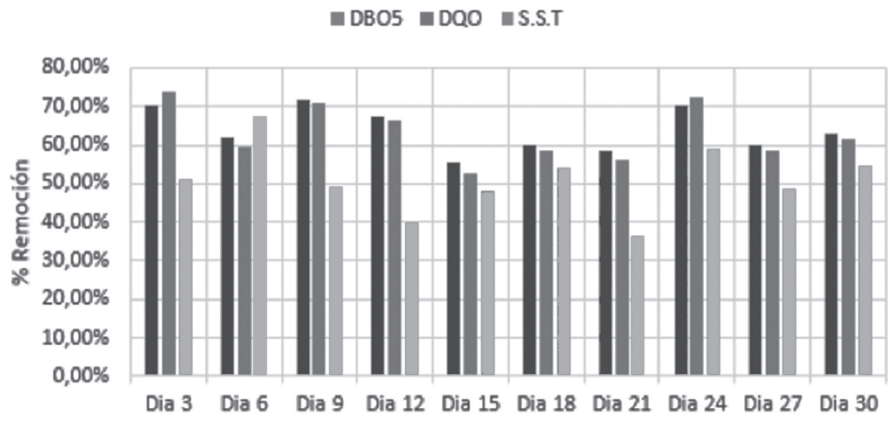

Figura 2. Seguimiento del porcentaje de remoción de DBO_5, DQO y S.S.T del consorcio de bacterias productoras de EPS en la empresa de golosinas

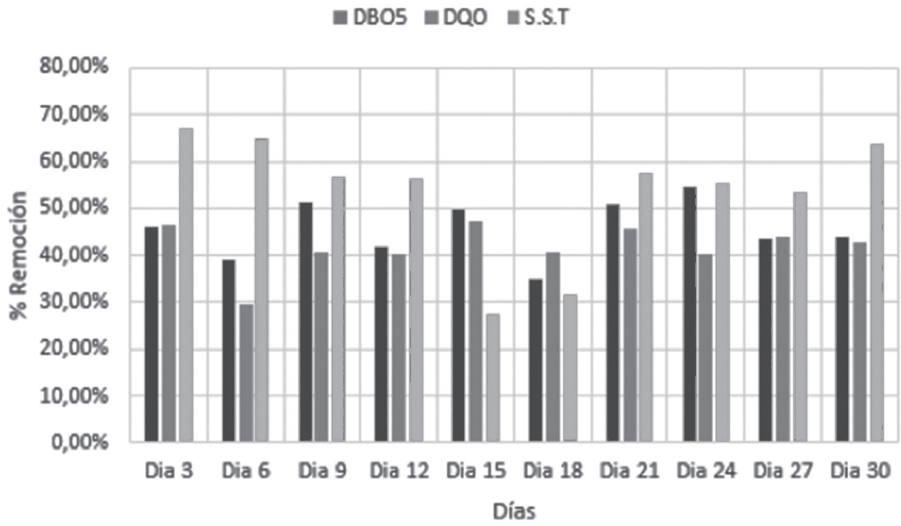

Figura 3. Seguimiento del porcentaje de remoción de DBO_5, DQO y S.S.T del consorcio de bacterias productoras de PHA en la empresa de golosinas

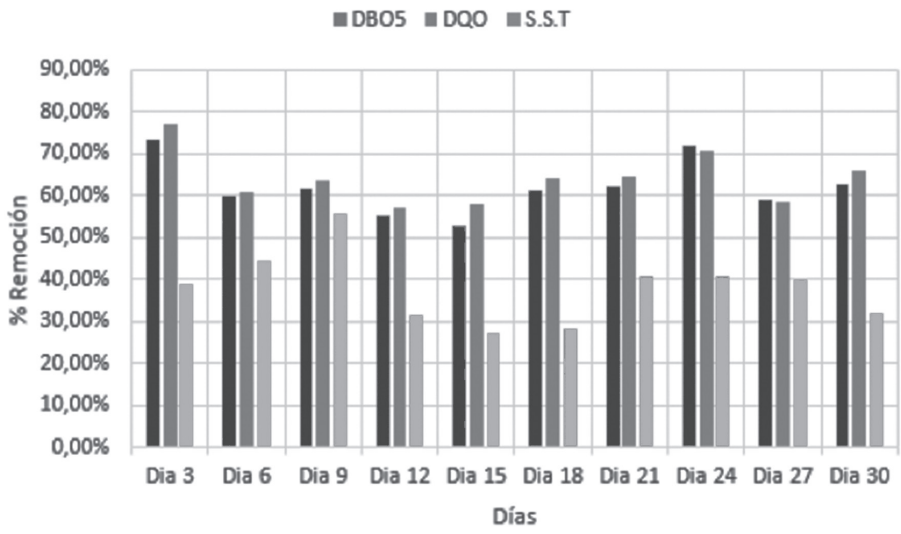

Figura 4. Seguimiento del porcentaje de remoción de DBO_5, DQO y S.S.T del consorcio total de bacterias productoras de EPS y PHA en la empresa de golosinas

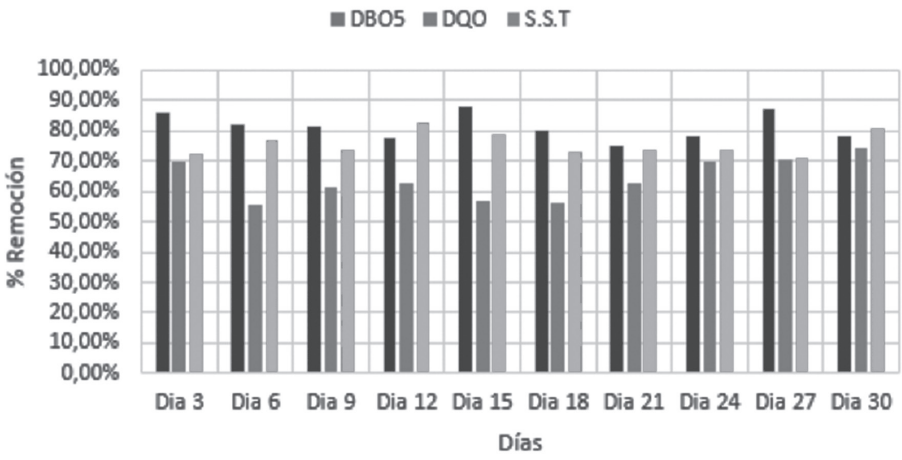

Figura 5. Seguimiento del porcentaje de remoción de DBO_5, DQO y S.S.T del sistema control en la empresa de golosinas

El comportamiento del porcentaje de remoción de cada una de las propiedades descritas en las Figuras, cada tiempo de retención hidráulica varía debido a que las muestras de agua residual de la empresa del sector de golosinas contienen aguas de diversos procesos de producción y agua de lavado de las áreas y equipos. Se puede observar que el sistema control fue el que tuvo el porcentaje de remoción más alto en las propiedades de estudio (DBO_5, DQO y S.S.T), mientras se observa que en el seguimiento de las variables el sistema con las bacterias productoras de PHA son las que tienen los porcentajes de remoción más bajos en las propiedades de estudio (DBO_5 y DQO). Cabe resaltar que el sistema de mezcla total de bacterias productoras de EPS y PHA presenta un menor porcentaje de remoción de S.S.T, pero a su vez presenta una mayor cantidad de producción de biopolímero (Tablas 4 y 6). Castillo-Borges *et al.* (2012) realizaron un proceso de

tratamiento de aguas residuales de centrales de sacrificio utilizando un proceso de Contactor Biológico Rotatorio, donde se evaluaron los porcentajes de remoción de DBO_5, DQO y SST, además de otras variables. Marín & Correa (2010) Realizaron un análisis de remoción de carga contaminante de aguas residuales domésticas en humedales artificiales utilizando *Guadua angustifolia* Kunth, se evaluaron valores de remoción de DBO_5, DQO y nitrógeno. La Tabla 6 compara los valores más altos de remoción de esta investigación con los valores más altos de remoción en los trabajos realizados por Castillo-Borges *et al.* (2012) y Marín & Correa (2010)

Tabla 6. *Comparación de valores de remoción de variables de estudio con otras investigaciones*.

Variables de remoción	Porcentajes de remoción Peña-Hernández *et al* (2016)	Porcentajes de remoción Castillo-Borges *et al* (2012)	Porcentajes de remoción Marín & Correa (2010)
DBO5	81,46 (CS)	98,35	92,21
DQO	64,09 (MTS)	97,96	84,31
SST	75,78 (CS)	48,33	-

Los resultados muestran que en el trabajo realizado por Borges-Castillo *et al.* (2012) los valores de DBO_5 y DQO son mayores que los resultados de esta investigación, pero que el porcentaje de remoción de SST es menor, igual pasa con el trabajo realizado por Marín & Correa (2010).

Las Figuras 6, 7, 8 y 9 muestran el seguimiento realizado al pH en el biorreactor en cada uno de los sistemas estudiados:

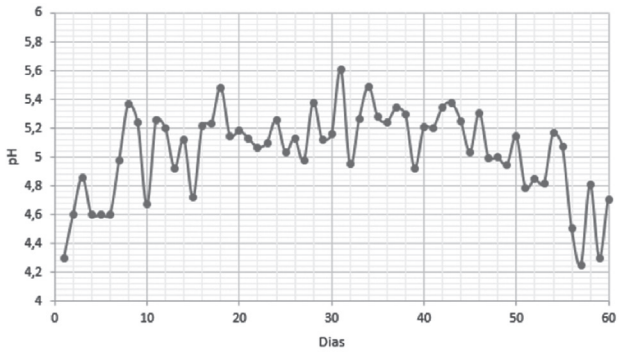

Figura 6. Seguimiento a la variable pH en el biorreactor del consorcio de bacterias productoras de EPS en la empresa de golosinas

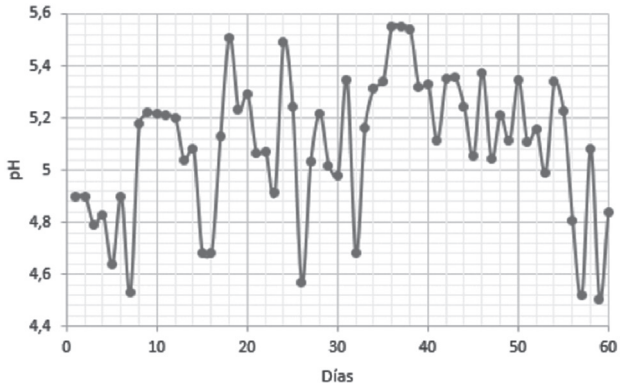

Figura 7. Seguimiento a la variable pH en el biorreactor del consorcio de bacterias productoras de PHA en la empresa de golosinas

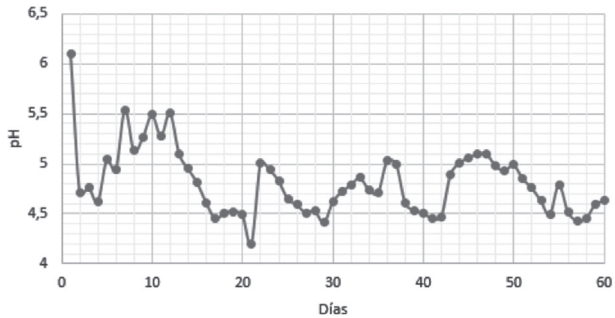

Figura 8. Seguimiento a la variable pH en el biorreactor del consorcio total de bacterias productoras de EPS y PHA en la empresa de golosinas.

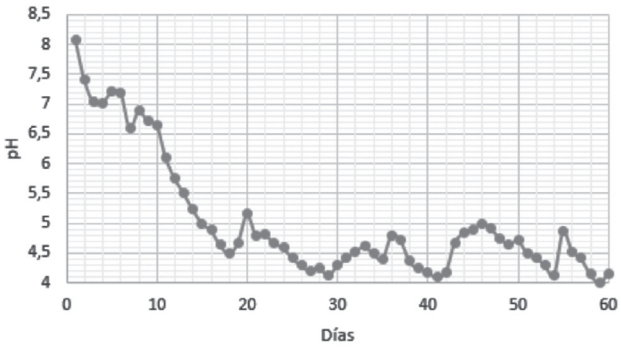

Figura 9. Seguimiento a la variable pH en el biorreactor del sistema control en la empresa de golosinas.

Las figuras 6, 7 y 8 muestran un comportamiento de pH similar donde los picos evidencian los momentos en los que se alimentaron nuevas muestras de agua residual al sistema y prácticamente tienen el mismo rango de pH. De esta manera se comprueba la actividad bacteriana dentro de los sistemas. La figura 9 (sistema control) muestra un comportamiento diferente inicialmente debido a que a las aguas no se les realizó un pretratamiento de adecuación de pH entre 6,5 – 8,0 para poder inocular las bacterias, pero se observa un momento en el que el pH del biorreactor alcanza el mismo comportamiento de los ensayos anteriores.

Se encuentra una similitud en la realización de esta investigación y el trabajo realizado por Quintero (2011), ya que el efluente industrial de la industria textil objeto de estudio tiene un pH de 11,78 y se ajusta esta variable a valores entre 7 y 8 antes de entrar a proceso con bacterias para garantizar la efectividad del proceso de remoción de carga contaminante. Las Tablas 7, 8 y 9, muestran la producción de biopolímeros en un proceso de flujo continuo.

Tabla 7. *Producción de biopolímeros en procesos de flujo continúo*

Sistema	Producción EPS (contaminado) (mg l^{-1})	Producción PHA (contaminado) (mg l^{-1})
MES	0,52	0
MPS	0	0,667
MTS	2,38	0,035
CS	0	0

Tabla 8. *Comparativo de producción de biopolímero EPS entre la presente investigación y el trabajo realizado por Cuesta (2014)*

Sistema	Producción EPS (contaminado) (mg l^{-1})	Producción EPS Cuesta (mg l^{-1}) (Promedio)
MES	0,52	50
MPS	0	0
MTS	22,38	1841
CS	0	0

Tabla 9. *Comparativo de producción de biopolímero PHA entre la presente investigación y el trabajo de Cuesta (2014)*

Sistema	Producción PHA (contaminado) (mg l^{-1})	Producción PHA Cuesta (mg l^{-1}) (Promedio)
MES	0	0
MPS	0,667	16,667
MTS	3,51	248
CS	0	0

Se observa que la producción de biopolímero tanto de EPS como de PHA es más alta en el sistema de mezcla total, tanto en los resultados de esta investigación como en la realizada por Cuesta (2014). Adicionalmente, hay una relación entre la producción de biopolímero en un sistema de flujo continuo y un sistema tipo batch realizado por Cuesta (2014) que se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. *Relación entre la producción de biopolímero realizado en esta investigación y el trabajo de Cuesta (2014)*

Sistema	Relación Producción Biopolímero batch/flujo continuo	Relación Producción Biopolímero flujo continuo/batch
MES	96,154	0,0104
MPS	24,998	0,04
MTS	82,261	0,0121
CS	70,655	0,0141

De acuerdo a los resultados en las Tablas 8, 9 y 10 Se observa que la cantidad de biopolímero obtenido en los sistema tipo batch en el trabajo realizado por Cuesta (2014) es mucho mayor a los valores obtenidos en los sistemas de flujo continuo en los tres casos a la vez que tienen una relación muy alta.

Conclusiones

Existe una relación entre la producción de biopolímeros y la remoción de S.S.T inversamente proporcional, lo cual se ve reflejado en la mezcla total de bacterias productoras de EPS y PHA, que obtuvo el menor porcentaje de remoción de S.S.T., pero a su vez la mayor producción de biopolímero.

El sistema control (sin bacterias) fue el que más valor obtuvo en la remoción de las variables DBO_5 y S.S.T, sin embargo en la variable DQO el sistema de mezcla total remueve mayor porcentaje pero a su vez el sistema control remueve prácticamente el mismo.

Los biopolímeros EPS y PHA obtenidos en los tres sistemas contienen una cantidad mínima en comparación con el proceso en sistemas batch; adicionalmente, los biopolímeros se encuentran contaminados, lo cual indica un rendimiento mucho menor.

Los porcentajes de remoción de cada uno de los sistemas cumple con los parámetros de remoción del decreto establecido actualmente para aguas residuales (decreto 1594 de 1984).

El seguimiento del pH a los biorreactores muestra la actividad aerobia bacteriana en el proceso debido a la disminución del mismo, adicionalmente, se realiza una adecuación de esta variable en los alimentadores, lo que demuestra que el pH es la única variable controlable y una de las más importantes en esta investigación.

Se recomienda el montaje de este experimento en una fase experimental en sitio, pues las variables evaluadas en la presente investigación fueron controladas bajo condiciones de laboratorio conservando la cadena de frío, lo cual podría influir en las propiedades de las muestras al momento de transportarlas. El implementar el montaje de este experimento en sitio implicaría tener condiciones reales de flujo continuo en cada uno de los efluentes industriales de estudio

Literatura citada

1. Bastidas, J.C. & Ramírez, L.C. (2007) Determinación de la carga contaminante de origen industrial, vertida sobre la quebrada Manizales. (Tesis de especialización). Universidad Nacional de Colombia. Manizales.
2. Castillo-Borges, E. R, Bolio-Rojas, A, Mendez-Novelo, R.I, Osorio-Rodriguez, J.H & Pat-Canul. R. (2012) Remoción de materia orgánica en aguas residuales de rastro por el proceso de Contactor Biológico Rotacional. *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería. Vol. 16,* No.2, Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán. México. p 83 – 91.
3. Colombia, Ministerio de Salud de Colombia. (Junio 26 de 1984) Decreto 1594. (Publicado en el Diario Oficial No. 38700 de Julio 23 de 1984).

4. Colombia Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2000). Resolución 1096 de 2000. RAS. Capitulo E: Tratamiento de aguas residuales.
5. Colombia, Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial. (Diciembre 23 de 2010) Decreto 3930. (Publicado en el Diario Oficial No. 47932 de Diciembre 23 de 2010).
6. Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (17 de Marzo de 2015). Resolución 631. (Publicada el 18 de abril de 2015.
7. Corpocaldas, Chec. (2011) Plan de acción inmediata de la quebrada Manizales 2010. Recuperado de http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/1016/PAI%20Cuenca%20Quebrada%20Manizales.pdf
8. Cuesta-González, F.A. (2014). Evaluación de los niveles de remoción en demanda química y bioquímica de oxígeno, y sólidos suspendidos totales de efluentes industriales con bacterias productoras de polihidroxialcanoatos y exopolisacáridos a escala de laboratorio en empresas del sector de alimentos de la ciudad de Manizales (Tesis Magister). Facultad de ciencias contables económicas y administrativas. Universidad de Manizales. Manizales, Colombia.
9. Diaz, M.P., Grigson, S. J. W. & Grant-Burgess, J. (2002) Uso de un consorcio bacteriano extremo-halotolerante para la biodegradación de crudo en ambientes salinos. *Revista colombiana de Biotecnología. Vol. 4*, núm. 1. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. p 36 – 42.
10. ECOPETROL. (2003). Laboratorio de biotecnología. ECOPETROL S.A. Recuperado de: [http://www.ecopetrol.com.co/paginas2.asp?pub_id=35814&cat_id=153&idCategoriaprincipal=153&cat_tit=LABORATORIO%20DE%20BIOTECNOLOGÍA.].
11. Marín-Montoya, J.P & Correa-Ramírez, J.C. (2010). Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *Guadua angustifolia Kunth.* (tesis pregrado). Facultad de tecnología. Escuela de tecnología química. Universidad tecnológica de Pereira. Pereira. Colombia.
12. Ochoa. D.C. & Montoya, A. (2010) Consorcios microbianos: una metáfora biológica aplicada a la asociatividad empresarial en cadenas productivas agropecuarias. *Revista facultad ciencias económicas. Vol. XVIII*. Diciembre 2010. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. p 55 – 74.
13. Paris-Ripol, X. (2009). Obtención de exopolisacáridos de interés industrial a partir del lactosuero y permeatos. (tesis doctoral). Facultad de farmacia. Departamento de microbiología Universidad de Granada. Granada, España.
14. Quintero-Rendón, L.A. (2011) Evaluación del tratamiento biológico para la remoción del color índigo del agua residual industrial textil, por un consorcio microbiano, en lecho fluidizado (tesis Magister). Facultad Nacional de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia.
15. Serrano-Riaño, J.C. (2010). Polihidroxialcanoatos (PHAs): Biopolímeros producidos por microorganismos. Una solución frente a la contaminación del medio ambiente. *Revista Teoría y Praxis Investigativa. Volumen 5* - No. 2, Julio - Diciembre 2010. Fundación Universitaria de Área Andina. p 79 – 84.
16. Tortora, G., Funke, B. & Case, C. (2010) Microbiology. Tenth edition. Editorial Benjamin Cummings.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Recibido: 07 de marzo de 2015
Aceptado: 27 de abril de 2015