



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE AGUA RESIDUAL  
DOMÉSTICA EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE  
LECHO EMPACADO**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**Doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas  
Tropicales**

Presenta:

**NOEMI MÉNDEZ DE LOS SANTOS**

Directores:

**DR. RAÚL GERMÁN BAUTISTA MARGULIS  
DR. GASPAR LÓPEZ OCAÑA**



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

JUNIO 21 DE 2021

**C. NOEMI MÉNDEZ DE LOS SANTOS  
PAS. DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y  
MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES  
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales titulado: **"CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE LECHO EMPACADO"**, asesorado por el Dr. Raúl German Bautista Margulis y Dr. Gaspar López Ocaña, cuyo jurado está integrado por el Dr. Eduardo Salvador López Hernández, Dr. Randy Howard Adams Schroeder, Dr. Raúl German Bautista Margulis, Dr. Gaspar López Ocaña, Dra. Rocío del Carmen Antonio Cruz, Dra. Ana Rosa Rodríguez Luna y Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E  
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR**

**U.J.A.T.  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**DIRECCIÓN**

C.c.p.- Expediente del Alumno.  
C.c.p.- Archivo

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA  
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, 337-9611, 337-9706, Fax (993) 354-4308 y 358-1579

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

## CARTA AUTORIZACIÓN

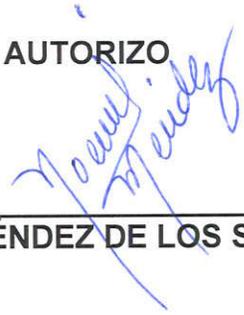
El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de doctorado denominado: **“CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE LECHO EMPACADO”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los 21 días del mes de junio de dos mil veintiuno.

AUTORIZO

  
\_\_\_\_\_  
NOEMÍ MÉNDEZ DE LOS SANTOS



## DEDICATORIA

A **DIOS**, ese ser supremo que sin él, no somos nada

A mis padres, ellos me enseñaron que debemos confiar en Dios, sobre todas las cosas

**Salatiel Méndez Aguirre** (†) (1999)

**Loida de los Santos Rivera** (†) (2020)

A mi esposo, **Carlos Rodríguez Jiménez** por acompañarme siempre para lograr mis metas

A mis hijos, esos ángeles que Dios mando a mi vida para guiarlos

**Carlos Eduardo Rodríguez Méndez** (Hijo)

**Alejandra Natalia Rodríguez Méndez** (Hija)

**Ricardo Díaz Palacios** (Hijo)

A mis hermanos, por su cariño

**Rubén Darío Méndez de los Santos**

**Salatiel Méndez de los Santos** (†) (2008)

**Juana Eligía Méndez de los Santos**





## AGRADECIMIENTOS

**Al Dr. Raúl Germán Bautista Margulis.**

Por ser ese guía y amigo incondicional en la realización de esta investigación.

**Al Dr. Gaspar López Ocaña**

Por ser de esos amigos que te ayudan a realizar los sueños como si fueran suyos.

A los Doctores

**Dra. Veronica Isidra Domínguez Rodríguez**

**Dr. Randy Howard Adams Schroeder**

Por estar comprometidos con sus asesorías para el desarrollo de esta investigación

A esos amigos que me apoyaron en esta investigación.

Sin su ayuda, no hubiese sido posible

**Dr. Rudy Solís Silvan**

**MenV. Carlos Rodríguez Jiménez**

**M.I. Jesús Alfredo García Ocaña**

**M.I. Luis Enrique Comparán Sánchez**

**Ing. Jose Eduardo Carrera Mayo**

**Ing. Selena Del Carmen Estrada García**

**Ing. José Giovanni Marín González**

**Ing. José Demetrio Gómez Sánchez**

**Ing. Iris Rubí Hernández Pereyra**

**Ing. Alejandra Roxana Gómez Domínguez**

A mis compañeros de posgrado del Instituto Tecnológico de Villahermosa, que pusieron su granito de arena, para cumplir esta meta.

**Mipa. María Berzabé Vázquez González**

**Mipa. Mario José Romellón Cerino**

**Dra. Rocio del Carmen Antonio Cruz**

**Dra. Rosa Margarita Hernández Vélez**

Eternamente agradecida a las autoridades del **Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Villahermosa**, por gestionar en tiempo y forma la BECA-COMISIÓN y el apoyo financiero de beca PRODEP, para contar con el tiempo suficiente para la realización de esta investigación, orgullosamente JAGUAR.

De igual manera se agradece a las autoridades de la **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco División DACBiol** por recibirme de nuevo como estudiante y darme todo el apoyo incondicional brindado en sus instalaciones, orgullosamente JUCHIMÁN.

Al Comité Sinodal, *Dr. Eduardo Salvador López Hernández, Dr. Randy Howard Adams Schroeder, Dr. Raúl Germán Bautista Margulis, Dr. Gaspar López Ocaña, Dra. Rocio del Carmen Antonio Cruz, Dra. Ana Rosa Rodríguez Luna y Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez*, por su apoyo incondicional para lograr esta meta.





## CONTENIDO

<b>Capítulo 1. Introducción general</b>	5
Objetivos	7
Objetivo general	7
Objetivos particulares	7
Hipótesis	8
Referencias	9
<b>Capítulo 2. Zeolitas nativas en el tratamiento de agua residual doméstica</b>	10
Resumen	11
Abstract	11
Introducción	12
Materiales y método	14
Resultados	17
Discusión	26
Conclusión	28
Agradecimientos	28
Referencias	28
<b>Capítulo 3. Cinética de degradación de agua residual doméstica en un sistema experimental de lecho empacado utilizando zeolitas nativas.</b>	33
Resumen	34
Abstract	35
Introducción	36
Materiales y método	38
Resultados y Discusión	46
Conclusión	54
Agradecimientos	55
Referencias	55
<b>Capítulo 4. Conclusiones generales</b>	58
<b>Anexos</b>	60





Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción General

---



## Introducción

El tratamiento de aguas residuales, conocido como depuración de contaminantes, es una serie de procesos utilizados para sanear las aguas residuales y poder reutilizarla en actividades diversas. El Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017 afirmó que en todos los países, excepto los más desarrollados, la mayor parte de las aguas residuales se vierte directamente al medio ambiente sin un tratamiento adecuado. Esto tiene repercusiones negativas en la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos de agua dulce ambiental y los ecosistemas.

Existen varios niveles para tratar las aguas, los cuales son: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento avanzado y especiales, donde describe que uno de los niveles de tratamiento más estudiados es el secundario (biológicos), esta etapa es fundamental en el desarrollo de un tren de tratamiento de aguas residuales en cuanto a tiempos de construcción, de operación y de mantenimiento, además de ello depende la elección de los procesos a seleccionar posteriormente (SEMARNAT, 2016). Por otra parte, la meta esencial de los tratamientos biológicos es estabilizar la materia orgánica y coagular y remover los sólidos coloidales flotantes que se encuentran en las aguas domésticas, aunque a veces se incluyen otros objetivos como la remoción de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, el tratamiento biológico convierte la materia orgánica carbonácea disuelta y en estado coloidal en diferentes gases y tejidos celulares, formando también copos biológicos compuestos de materia celular y de coloides orgánicos (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Se destaca que una de las tecnologías de tipo biológico que ofrece área requerida, bajos costos de operación y mantenimiento en comparación con tecnologías convencionales, reducción de energía y producción de lodos estables son los reactores de lecho empacado (Restrepo *et al.*, 2007), los reactores de lecho empacado cimientan su importancia para operar de manera eficiente en garantizar rigidez y estabilidad que les debe proporcionar el medio de soporte utilizado, para lograr adherencia de los microorganismos y exponer la máxima área superficial al flujo del líquido bajo tratamiento (Desbos, 1994).

El objetivo principal de esta investigación fue estudiar la cinética de degradación de agua residual doméstica en un sistema experimental de lecho empacado, utilizando como material de soporte a las zeolitas nativas del estado de Tabasco, México.

Los resultados obtenidos nos han permitido lograr un diseño óptimo del sistema experimental de lecho empacado utilizando como medio de soporte las zeolitas nativas del estado de Tabasco México que nos han permitido evaluar el buen crecimiento microbiano y que mejora el costo-beneficio en este tipo de procesos, en las comunidades donde se implemente en la zona de estudio.



## Objetivos

### Objetivo general

Determinar la cinética de degradación de agua residual doméstica en un sistema experimental de lecho empacado, utilizando como material de soporte zeolitas nativas del estado de Tabasco, México.

### Objetivos particulares

- Evaluar las propiedades físicas y químicas de los medios de soporte pétreos (zeolita nativa del estado de Tabasco y la zeolita comercial).
- Diseñar y construir el sistema experimental de lecho empacado.
- Evaluar y estabilizar las características fluido-dinámicas de operación del sistema de lecho empacado.
- Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes básicos en el influente y efluente del sistema de lecho empacado bajo diferentes condiciones de operación.
- Determinar el orden de reacción y el coeficiente cinético de degradación para formular un modelo cinético de DQO en el sistema experimental de lecho empacado con zeolitas nativas del estado de Tabasco, México en el medio de soporte.
- Verificar el cumplimiento normativo ambiental en materia de uso, reuso y descarga.





## Hipótesis

### *Hipótesis 1*

La zeolita nativa del estado de Tabasco, podría tener propiedades físicas y químicas que tienen los medios de soporte que se utilizan en sistemas de lecho empacado.

### *Hipótesis 2*

Diseñar, construir y evaluar la fluido-dinámica de un sistema experimental de lecho empacado con agua potable bajo diferentes condiciones de operación, podría garantizar resultados óptimos al iniciar su operación con agua residual doméstica.

### *Hipótesis 3*

Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes básicos en el influente y efluente de un sistema experimental de lecho empacado bajo diferentes condiciones de operación utilizando en el medio de soporte a las zeolitas nativas del estado de Tabasco México, podría garantizar obtener el orden de reacción y el coeficiente cinético de degradación para el agua residual doméstica y formular un modelo cinético de degradación de DQO en el biorreactor además de verificar la NOM-001-SEMARNAT-1996 en materia de uso, reuso y descarga.





## Referencias

- Crites, Ron.; George, Tchobanoglous. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. ISBN: 0-07-289087-8. ISBN: 958-41-0042-4. Impreso en Colombia. Mc Graw Hill.
- Desbos, G. (1994). Biofiltration as a Compact Technique for Small Wastewater Treatment Plants. Water Science and Technology. Vol. 29. No. 10-11.s.l.,s.n. 145-152p
- Informe. Un Water. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (2017). Aguas residuales el recurso desaprovechado.
- Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la Comisión Nacional del Agua. (2016). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento
- Restrepo, Inés.; Sánchez, Luis Darío.; Galvis, Alberto.; Rojas, Hhony.; Sanabria, Irma Janeth (2007). Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento (para el cumplimiento de las metas del milenio). Programa Editorial Universidad del Valle. Santiago de Cali. 580 p.; 24 cm – (Colección ciencias físicas, exactas y naturales). Consultado el 1 de Julio de 2017.  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vpFqgpfHBmYC&oi=fnd&pg=PA210&dq=importancia+de+lecho+empacado&ots=M22Stj6XCJ&sig=HehMisjyIYd6jsCxbtfn\\_XcAdZc#v=onepage&q=importancia%20de%20lecho%20empacado&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vpFqgpfHBmYC&oi=fnd&pg=PA210&dq=importancia+de+lecho+empacado&ots=M22Stj6XCJ&sig=HehMisjyIYd6jsCxbtfn_XcAdZc#v=onepage&q=importancia%20de%20lecho%20empacado&f=false)





## CAPÍTULO 2

---

### **Zeolitas nativas en el tratamiento de agua residual doméstica**

---

Méndez de los Santos, N., & López Ocaña, G. (2021). Zeolitas nativas en el tratamiento de agua residual doméstica. *CIBA Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas Y Agropecuarias*, 10 (19), 1-38. <https://doi.org/10.23913/ciba.v10i19.106>



# Zeolitas nativas en el tratamiento de agua residual doméstica

## *Native zeolites in domestic wastewater treatment*

**Noemi Méndez de los Santos**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Villahermosa

mimilla6566@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3788-8571>

**Gaspar López Ocaña**

(AUTOR CORRESPONSAL)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

ocanagl77@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8402-8160>

### Resumen

Las zeolitas naturales presentan alta capacidad de depuración en aguas residuales por su porosidad, superficie específica, capacidad de intercambio catiónico y son un producto disponible en la naturaleza. En Tabasco, México, las zeolitas de río y zeolitas de cerro del proceso de triturado fueron evaluadas para ver el potencial y beneficios en el tratamiento de aguas residuales. En la primera parte de esta investigación se diseñó y construyó un sistema experimental de tres biorreactores de lecho fijo de flujo ascendente (BLFFA) con una altura de 1.5 m y diámetro de 4 pulgadas. Posteriormente se arrancaron los BLFFA con un diseño factorial 3x3, operando con zeolita de río, zeolita de cerro y zeolita comercial como control (todas con partículas de ¼ de pulgadas), utilizando tres diferentes alturas de lecho (0.75, 0.90 y 1.10 m) y tres tiempos de retención hidráulica (6, 12 y 24 h). Se evaluaron las variables de respuesta mediante un ANOVA multifactorial y para discriminar entre las medias empleó el método de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher ( $p < 0.05$ , 95% de confianza). El BLFFA que presentó el mejor tratamiento fue el de la zeolita de cerro (con altura de lecho de 0.9 m en 24 h) obteniendo las mejores eficiencias de remoción en sólidos disueltos totales (71.42 %), turbiedad (84.34 %), color (96.33 %) y demanda química de oxígeno (97.28 %), seguido de la zeolita comercial que tuvo respuestas muy similares y por último el tratamiento con zeolita de río. La zeolita de cerro es la que presenta el mejor rendimiento en la remoción de contaminantes básicos operando con 0.9 m de altura de lecho y con 24 h de tiempo de retención hidráulica (TRH). Finalmente, podemos recomendar la implementación del uso de los BLFFA para el tratamiento secundario de efluentes domésticos en sistemas descentralizados del sureste de México como una alternativa viable en el tratamiento de sus aguas residuales.

**Palabras clave:** agua residual doméstica, biorreactor de lecho fijo ascendente, demanda química de oxígeno, eficiencia de remoción.

### Abstract

Natural zeolites have a high purification capacity in wastewater due to their porosity, specific surface, cation exchange capacity and they are a product available in nature. In Tabasco, Mexico, river zeolites and cerro zeolites from the crushing process were evaluated for potential and benefits in wastewater treatment. In the first part of this research, an experimental system

of three upflow fixed bed bioreactors (UFBB) with a height of 1.5 meters and diameter of 4 inches was designed and built. Later, the UFBB were started with a 3x3 factorial design, operating with river zeolite, hill zeolite and commercial zeolite as a control (all with ¼ inch particles), using three different bed heights (0.75, 0.90 and 1.10 m) and three hydraulic retention times (6, 12 and 24 hours). The response variables were evaluated by means of a multifactorial ANOVA and to discriminate between the means, the Fisher's least significant difference (LSD) method ( $p < 0.05$ , 95% confidence) was used. The UFBB that presented the best treatment was that of cerro zeolite (with a bed height of 0.9 m in 24 hours) obtaining the best removal efficiencies in total dissolved solids (71.42%), turbidity (84.34%), color (96.33 %) and chemical oxygen demand (97.28%), followed by the commercial zeolite that had very similar responses and finally the river zeolite treatment. Cerro zeolite is the one that presents the best performance in the removal of basic contaminants operating with 0.9 m of bed height and with 24 hours of HT. Finally, we can recommend the implementation of the use of UFBB for the secondary treatment of domestic effluents in decentralized systems in the southeast of Mexico as a viable alternative in the treatment of their wastewater.

**Keywords:** domestic wastewater, ascending packed bed bioreactor, chemical oxygen demand, removal efficiency.

## Introducción

El tratamiento de aguas residuales tiene como fin la depuración de contaminantes utilizando operaciones y procesos unitarios, mediante una combinación capaz de sanear las aguas residuales para poder reutilizarlas en actividades diversas (Noyola, Morgan-Sagastume, Güereca, 2013). Recientemente se estima que, en los países subdesarrollados, la mayor parte de las aguas residuales se vierten directamente al ambiente sin un tratamiento adecuado, presentándose repercusiones negativas en la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos de agua dulce y los ecosistemas (UNESCO, 2017).

Existen varios niveles para tratar las aguas, los cuales son: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento avanzado y especiales. Se ha demostrado que uno de los niveles de tratamiento más estudiados es el secundario (biológicos), esta etapa es fundamental en el desarrollo de un tren de tratamiento de aguas residuales en cuanto a tiempos de construcción, de operación y de mantenimiento, además de ello depende la elección de los procesos a seleccionar posteriormente (CONAGUA, 2016a).

Se destaca que una de las tecnologías de tipo biológico que ofrece bajos costos de operación, mantenimiento, reducción de energía y producción de lodos son los reactores de lecho empacado (Rodríguez, Pinzón, Arámbula, 2007). Estos operan de manera eficiente por el medio de soporte utilizado, logrando una óptima adherencia de los microorganismos y proporcionando la máxima área superficial al flujo del líquido bajo tratamiento (Desbos, 1994). Por otro lado, el tratamiento de las aguas residuales con tecnologías sostenibles se fundamenta en procedimientos naturales que no utilicen aditivos químicos y aprovechen recursos de las zonas donde se generan, garantizando la eliminación de las sustancias contaminantes en el agua aprovechando vegetación acuática, el suelo, materiales locales o microorganismos y resulten económicas en la inversión inicial y mantenimiento del sistema (Morató, Pires. y Subirana, 2009).

Se ha investigado la eficiencia de reactores de lecho empacado con diferentes medios de soporte. Investigadores mexicanos Vian, Vigueras, Velasco, y Puebla, (2020) evaluaron un

reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos (RAFAELL) para la degradación de desechos de frutas y verduras, obteniendo remoción de sólidos volátiles de 67% en 4 días de tiempo de retención hidráulica (TRH), con una productividad de metano ( $\text{CH}_4$ ) entre 0.5 y 3.6  $\text{L}_{\text{CH}_4}/(\text{L}\cdot\text{día})$  para cargas entre 1 y 10g SV/(L.día). La productividad expresada en  $\text{L}_{\text{CH}_4}/(\text{gSV}_{\text{consumido}}\cdot\text{día})$  estuvo entre 0.027 y 0.116  $\text{L}_{\text{CH}_4}/(\text{g SV}_{\text{consumido}}\cdot\text{día})$ , previamente los investigadores Viguera Vian, Velasco y Zafra (2016), estudiaron en un lecho empacado el tratamiento de residuos sólidos urbanos orgánicos vegetales obteniendo una remoción de sólidos de 67% en 12 días con productividades de metano de 1.45  $\text{L}_{\text{CH}_4}/(\text{L}\cdot\text{día})$ , valores proporcionales a las cargas orgánicas aplicadas al sistema (0.66 – 2.5 g SV/(L.día).

Fernández et al, (2020) estudiaron un efluente minero-metalúrgico que contiene Cu, Fe y Pb en un filtro bio-adsorbente con fibras lignocelulósicas (cáscaras de plátano, coco y naranja). La mejor eficiencia de remoción para el Cu se presentó con las cáscaras de coco (96.36%), sin embargo, el Fe las obtuvo con la combinación al 50 % cada uno de cáscaras de coco-naranja (92.05 %) y el Pb presentó su mayor remoción con una combinación de cáscaras de naranja y coco-naranja (97.34 %), trabajando con pH de 7.3 y un TRH de 3 h y tamaño de partículas de 0.25 mm en todos los tratamientos. Pérez et al. (2019) evaluaron el efecto de la adición de zeolita en un reactor anaeróbico - Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) para el tratamiento de aguas residuales porcinas con altas cargas orgánicas volumétricas (COV). Demostraron que la presencia de la zeolita no afectó la hidrodinámica del EGSB, ajustado al modelo de tanques en serie, operaron dos reactores (R1 y R2) con volumen de 3.04 L, temperatura de 30 °C, TRH de 12 h y con un flujo de 4 ml/min. En la primera corrida evaluaron la estrategia de choque de carga orgánica con velocidad ascensional ( $v_a$ ) de 6 m/h durante 180 días, determinaron que el reactor con inclusión de zeolita alcanzó una eficiencia de un 80 % a 32 kg demanda química de oxígeno (DQO)/ $\text{m}^3\cdot\text{día}$ . En la segunda corrida evaluaron un incremento gradual de carga orgánica y aumento de la velocidad ascensional hasta 10 m/h por un periodo de 255 días, observando un incremento de su eficiencia hasta el 90 % logrando mayor velocidad de degradación orgánica. Aseguran que adicionar 40 g/L de zeolita a los EGSB, permite estabilizar el sistema y se vuelve robusto ante variaciones en las condiciones operacionales, con cambios favorables en la diversidad microbiana.

Guerrero, Vázquez y Rodríguez (2019), evaluaron la remoción de nitrógeno en un sistema tubular y en su interior acondicionaron cuatro capas de zeolita de tamaños diferentes de los granos, la zeolita del tipo clinoptilolita fue adquirida comercialmente compraron granos de: 1.70 mm; 2 mm; 2.63 mm y 4.75 mm. Informan que se logró remover entre el 50 % y el 75 % del nitrógeno total y especialmente el nitrógeno amoniacal. Se redujo el contenido de fosfato entre un 50 % y un 95 %, así como la demanda bioquímica de oxígeno, que puede mejorarse hasta en un 45 %. Afirman que se eliminan los sólidos disueltos entre un 2 % y un 8 %, así como los sólidos suspendidos entre un 35 % y un 85 %, se logró mejorar la conductividad eléctrica hasta en un 3 % y el oxígeno disuelto entre un 2 % y un 7 %.

Cárdenas y Ramos (2009) evaluaron cuatro medios de contacto (concha marina, material sintético, material vitrificado y grava de río) en un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), la concha marina alcanzó las mayores remociones (DQO con 89.7 % y DBO con 87.8 %) debido a su estructura física que permitió un microambiente adecuado y por su composición química, fuente natural de alcalinidad y micronutrientes. En Colombia Rodríguez *et al.* (2007), desarrollaron e implementaron un biorreactor de lecho empacado cerámico donde trataron aguas residuales domésticas. Lograron remover SSV en 78 %, DBO<sub>5</sub> en 77 %, DQO en 57 %, COT en 79 % y P en 51 % con un TRH de pulso y paso fueron de 17.75 segundos y 34,577 segundos respectivamente.

Castillo, Solano y Rangel (2006), estudiaron en un reactor de lecho fijo de flujo descendente una biopelícula anaerobia sobre tusas de mazorca, estropajo y poliuretano sintético como material de soporte. El agua evaluada la tomaron de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Río Frío (Girón - Santander, Colombia) y otro proveniente de una laguna para el tratamiento de excretas porcícolas (Mesa de los Santos – Santander, Colombia) obtuvieron para la biopelícula sobre tusas de mazorca los mayores porcentajes de remoción DQO (50-75 %) y de composición de CH<sub>4</sub> en el biogás (45-75 %) cuando lo alimentaron con sustratos de cargas orgánicas mayores a 1500 mg/L de DQO con una temperatura de 38 °C, TRH entre 6 y 24 h y pH entre 6.5 – 7.5. Rivas, Nevárez, Bautista, Pérez y Saucedo (2003), estudiaron aguas residuales para ser utilizadas en la industria agrícola, utilizando un sistema biológico de lecho fijo de flujo ascendente a escala semipiloto, con variación en la altura de lecho y el diámetro del medio de soporte, manteniendo constantes el flujo de agua y aire, observaron que la eficiencia de remoción más alta de materia orgánica (91.9 %) se obtuvo cuando el biorreactor fue operado con una altura de lecho de 0.65 m y un tamaño de partícula de 1.87 mm.

A pesar de estos avances, en Tabasco, México, no hay reportes del uso de zeolitas nativas en BLFFA, aun cuando se cuenta con material nativo en la región, no se ha demostrado su eficacia en el tratamiento de aguas residuales. Para esta investigación se diseñó y construyó un sistema experimental de BLFFA y se estudió la eficiencia de las zeolitas nativas como medio de soporte, evaluando la remoción de parámetros de control como temperatura, pH, sólidos disueltos totales (SDT), color, turbiedad y DQO, para demostrar el potencial de estos materiales para su uso en las comunidades donde se implemente este tipo de procesos de tratamiento de aguas residuales.

## Materiales y método

El sistema experimental BLFFA fue construido en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) (N 17° 59' 26" y 17° 59' 17"; W 58' 16" y 92° 58' 37"). El agua residual provino de las instalaciones sanitarias de ese espacio en Villahermosa, Tabasco. Las zeolitas nativas fueron obtenidas en bancos de materiales pétreo (de cerro y de río) (17°34'27.62"N y 92°55'44.25"O, 17°32'45.91"N y 92°55'56.68"O) en Teapa, Tabasco. Las zeolitas se caracterizaron en el Laboratorio de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Villahermosa. La calidad del agua de los experimentos se caracterizó en el Laboratorio de Tecnología del Agua de la DACBiol.

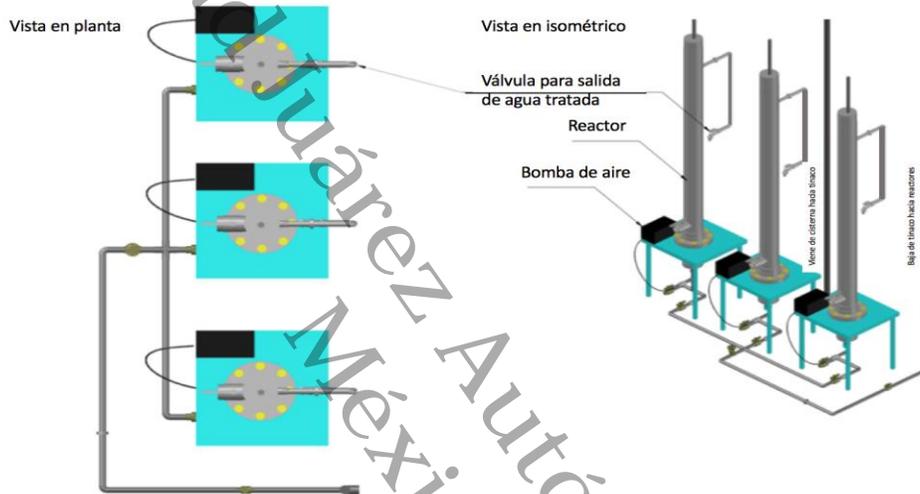
## Características del Sistema experimental

El sistema experimental BLFFA se instaló al lado del cárcamo de aguas residuales de la DACBiol-UJAT. El agua residual después de un tratamiento primario (eliminación de sólidos sedimentables y suspendidos) fue transportada a través de tuberías de ½ pulgada por una bomba de ¼ de HP a un tinaco con capacidad de 2.1 m<sup>3</sup> el cual por gravedad alimentó al BLFFA que contó con las siguientes características (Tabla 1, Figura 1 y Figura 2).

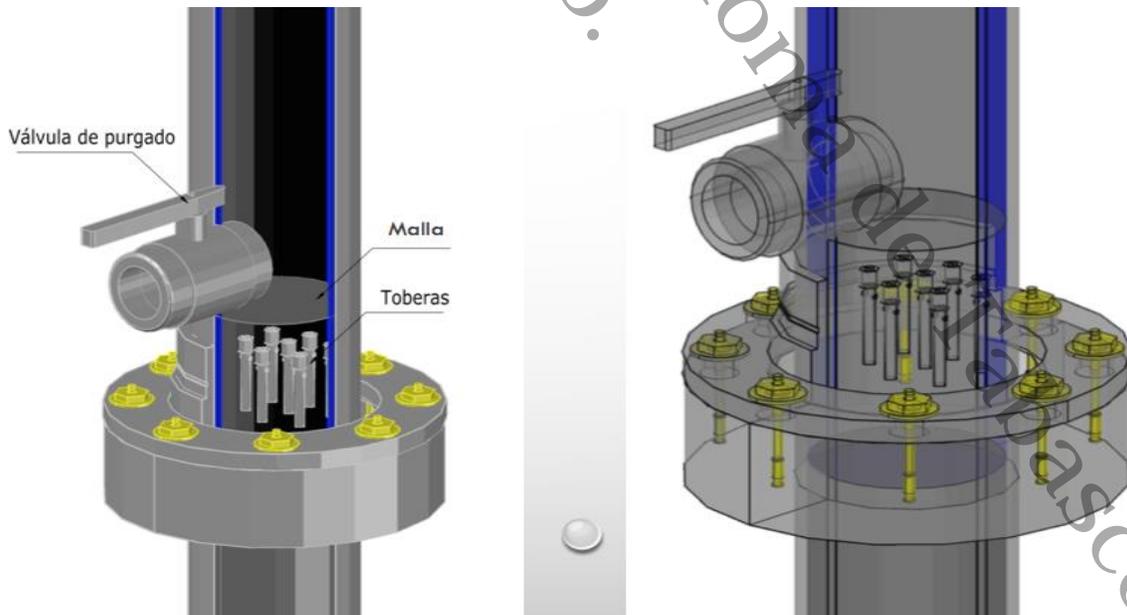
**Tabla 1.** Características y dimensiones de cada biorreactor del sistema experimental

Descripción	Unidad	Valor
Base de cada reactor y altura	m	0.5 x 0.5 x 0.5
Diámetro Plenum	m	0.1016
Altura Plenum	m	0.20
Área de la base del Plenum	m <sup>2</sup>	0.0081
Volumen del Plenum	m <sup>3</sup>	0.0016
Diámetro de plato distribuidor con 7 toberas y malla	m	0.1016
Altura de la columna de PVC	m	1.50
Volumen efectivo de la columna de PVC de cada reactor	m <sup>3</sup>	0.0122

Fuente: Elaboración propia



**Figura 1.** Configuración del sistema experimental de BLFFA.



**Figura 2.** Detalle interno del reactor, toberas y malla para no permitir el paso de las partículas, sobre la malla se colocó el lecho empacado de zeolitas.

## Características de las Zeolitas

Para caracterizar las zeolitas se tomaron cinco muestras de 25 kg de zeolita de río, zeolita de cerro (ambas trituradas de desecho en planta) y zeolita comercial (adquirida en Más Hidráulica (Soluciones en Sistemas de Agua) ubicada en el periférico Carlos Pellicer Cámara 1902, local 4 colonia Tamulté de las barrancas, Villahermosa, Tabasco de la marca Purikor, Villarreal División Equipos, S.A. de C.V., Nuevo León, México.). Se procesaron 10 muestras (5 kg) al azar de cada zeolita, la preparación incluyó el traslado, recepción, registro, secado, tamizado, homogeneizado y el almacenamiento para su conservación evitando la contaminación de la muestra y asegurando precisión y exactitud en el análisis. A las muestras se les determinó pH, CE, densidad aparente y real, peso específico, porosidad y solubilidad en ácido clorhídrico como lo establece Muñoz, Soler, López y Hernández (2013) y la NOM-021-RECNAT-2000.

## Monitoreo del sistema experimental

El muestreo se realizó bajo la NOM-AA-3-1980 después de tres meses de estabilización (febrero-abril 2018), en la fase experimental con los BLFFA (mayo-octubre 2018), se midieron los parámetros de control lunes, miércoles y viernes, tomando tres muestras simples obtenidas cada 6 h (6:00 am, 12:00 pm y 18:00 pm). Los parámetros determinados fueron temperatura, pH, SDT, color, turbiedad y DQO. Estos se midieron al inicio y final de cada experimento, tomando la muestra de agua residual (influyente) del cárcamo y la muestra de salida (efluente) después de cada experimento. Los métodos usados para la medición de los parámetros fueron: para la temperatura el Method 2550 Temperature “APHA (2017b)”, los sólidos disueltos totales el Method 2540 C Total Dissolved Solids “APHA (2017a)” y el pH por el Method 4500 H+ pH Value “APHA (2017c)” medidos con el equipo Hanna HI98129. La turbiedad se determinó por el método EPA 180.1, TC-300e, ISO7027, TC-300i, utilizando un equipo Hanna HI 98703. El color se determinó por el Method 2120 Color “APHA (2017)”, con un equipo Lamotte. El OD se determinó por el Method 4500-O Oxygen Dissolved (DO) “SMC (2001)” La DQO por el método EPA 410.4 (O'Dell, 1993). Cada experimento se realizó por triplicado realizando 27 experimentos, obteniendo 81 muestras de los experimentos. El sistema experimental BLEA fue operado a temperatura ambiente, con un suministro de aire que permitiera mantener en reactor  $4.5 \pm 0.7$  mg/L de OD respectivamente en los tratamientos.

## Diseño experimental

En la corrida experimental se empleó un diseño completamente al azar en un arreglo factorial de 3x3, con tres repeticiones para el tratamiento. Se utilizaron 3 BLFFA, cada corrida duró dos meses (Rivas *et al.* 2003) y los factores fueron los tres tipos zeolita con  $\emptyset$  de partícula de  $\frac{1}{4}$  pulgada de forma irregular, la altura del lecho (0.75, 0.90; 1.10 m) y el TRH (6, 12, 24 h) con caudales de 48.6, 24.3, 12.2 L/día respectivamente en cada reactor.

## Análisis estadístico y eficiencia en el sistema experimental

Todos los resultados obtenidos fueron evaluados en el programa estadístico Statgraphics centurion XVI.II®. Se compararon las variables de respuestas cuantitativas temperatura, pH, SDT, turbiedad, color y DQO de los diferentes tipos de tratamientos de las zeolitas, las alturas de lecho y los TRH. Para determinar si existían diferencias estadísticas significativas se realizó

un análisis ANOVA multifactorial y el método empleado para discriminar entre las medias fue el procedimiento de diferencia mínima significativa LSD de Fisher con una  $p < 0.05$  y con un 95% de nivel de confianza. El desempeño del biorreactor fue evaluado en base a los resultados de las diferencias de concentración entre el afluente y el efluente utilizando los datos promedios de los contaminantes como lo establece Torres, López, Cerino, Vázquez y Comparán (2020).

## Resultados

### Características de las zeolitas

En la (Tabla 2), se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica realizada a las zeolitas, estas presentan densidad real y aparente muy similar entre las tres. Sin embargo, destaca que la zeolita de cerro presenta mayores atributos en porosidad, característica muy importante y del mismo modo presentó la menor solubilidad en medio ácido clorhídrico.

**Tabla 2.** Características de las zeolitas. Valores promedio ( $N = 10$ ).

Parámetro	Zeolita de Río	Zeolita de Cerro	Zeolita comercial
Densidad real ( $\text{kg/m}^3$ )	2600	2700	2650
Densidad aparente ( $\text{kg/m}^3$ )	1550	1470	1600
Peso específico ( $\text{kg/m}^3$ )	2290	2420	2350
Absorción (%)	14.10	15.20	15.00
Porosidad (%)	53.00	62.00	51.00
CE (mS/cm)	65	70	67
pH (UpH)	7.3	7.4	7.0
Solubilidad en ácido clorhídrico (%)	59.66	29.96	51.30

Fuente: Elaboración propia

### Evaluación de parámetros de control y contaminantes básicos

El agua residual con la que se desarrolló el experimento presentó (promedio  $\pm$ DE) una temperatura  $25.26 \pm 1.76$  °C, pH de  $8.63 \pm 0.23$ , SDT con  $950.50 \pm 115.05$  mg/L, color de  $1305.10 \pm 141.46$  UC, turbiedad  $96.37 \pm 7.79$  UNT y DQO  $373 \pm 43$  mg/L. Esta agua residual es de concentración media pues la DQO está en el rango media-débil (250-500 mg/L) según Tchobanoglous, Burton y Stensel (2003). En la (Tabla 3) se presentan los resultados de los efluentes en los diferentes tratamientos de los BLFFA, se observa que el tratamiento con zeolita de río presentó la menor concentración de DQO en el H de 0.90 m y TRH de 24 horas con 23.46 mg/L, en la zeolita de cerro la menor concentración en el H de 0.90 m y TRH de 24 horas con 9.86 mg/L y la zeolita comercial fue el tratamiento H de 0.90 m y TRH de 12 horas con 11.87 mg/L.

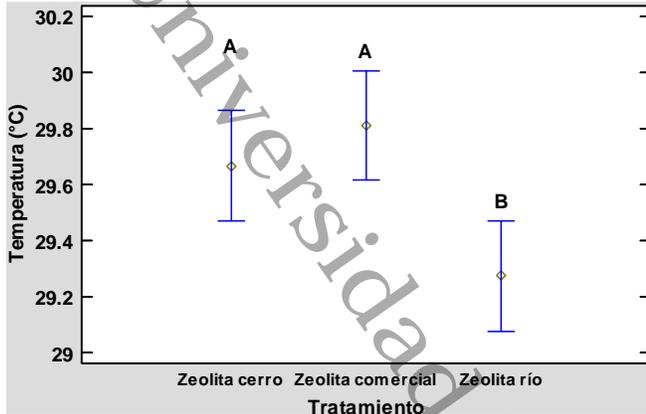
**Tabla 3.** Contaminantes básicos del agua residual en el efluente de los BLFFA en cada tratamiento. Valores promedio y DE ( $N = 81$ )

Parámetro	H=0.75 m			H=0.90 m			H=1.10 m			
	6 h	12 h	24 h	6 h	12 h	24 h	6 h	12 h	24 h	
Zeolita de Río	Temp. (°C)	28.93	29.77	28.83	28.87	29.17	28.77	29.53	30.07	29.53
	pH (UpH)	9.67	8.80	8.73	8.00	7.50	7.27	7.93	7.47	7.23
	SDT (mg/L)	993.07	902.30	889.40	830.77	817.77	805.20	827.47	820.40	805.43
	Color (UC)	824.05	777.42	728.34	489.13	235.13	234.10	478.53	237.27	236.27
	Turb. (UNT)	16.82	15.87	14.86	39.27	20.87	8.17	38.67	19.83	7.97
	DQO (mg/L)	48.31	45.58	42.70	112.81	59.95	23.46	111.08	56.98	22.89
Zeolita de Cerro	Temp. (°C)	29.83	30.00	30.40	29.17	28.77	29.17	30.07	29.53	30.07
	pH (UpH)	9.40	8.50	8.47	7.97	6.97	6.90	7.87	6.97	6.90
	SDT (mg/L)	965.80	873.53	873.00	591.13	271.67	266.63	528.00	271.13	266.70
	Color (UC)	820.75	768.39	768.42	470.80	204.43	203.43	470.80	208.97	206.97
	Turb. (UNT)	16.75	15.68	15.68	20.80	3.53	3.43	20.53	3.67	3.60
	DQO (mg/L)	48.12	45.05	45.05	59.75	10.15	9.86	58.99	10.53	10.34
Zeolita Comercial	Temp. (°C)	30.07	30.87	31.53	28.77	29.17	28.77	29.53	30.07	29.53
	pH (UpH)	9.37	8.53	8.43	7.93	6.83	6.77	7.97	6.80	6.83
	SDT (mg/L)	965.53	874.30	873.20	731.47	698.70	424.40	732.60	681.40	412.13
	Color (UC)	820.68	768.37	768.53	476.00	206.90	205.90	475.10	206.83	205.83
	Turb. (UNT)	16.75	15.68	15.68	20.97	4.13	4.33	20.63	4.27	4.23
	DQO (mg/L)	48.12	45.05	45.06	60.23	11.87	12.45	59.28	12.26	12.16

Fuente: Elaboración propia

**Temperatura.** El análisis ANOVA multifactorial ( $p < 0.05$ , 95% de nivel confianza) mostró que el factor zeolita tiene un efecto estadísticamente significativo sobre temperatura, mostrando que la menor temperatura en la zeolita de río (29.27 °C), seguido de zeolita de cerro (29.66 °C) y finalmente la zeolita comercial (29.81 °C) (Figura 3). El factor altura tiene un efecto estadísticamente significativo sobre temperatura presentando para H de 0.9 m la temperatura más baja (28.95 °C), seguido de H de 1.1 m (29.77 °C) y finalmente H de 0.75 (30.02 °C) (Figura 4). Para el factor TRH ninguno de los factores tiene un efecto estadísticamente significativo sobre temperatura mostrando la menor temperatura a 6 horas de TRH (29.62 °C) (Figura 5).

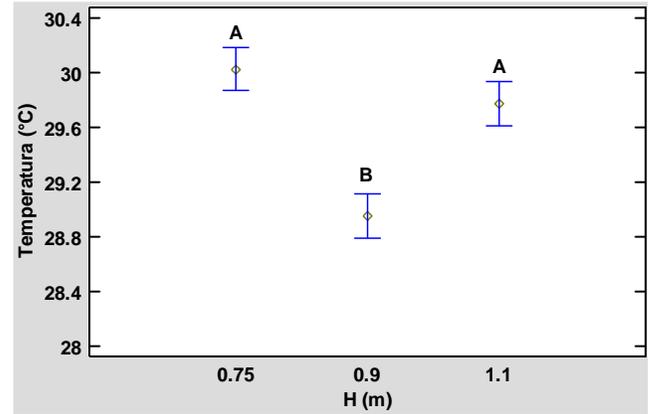
**Figura 3.** Valores de temperatura en cada Zeolita.  
Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

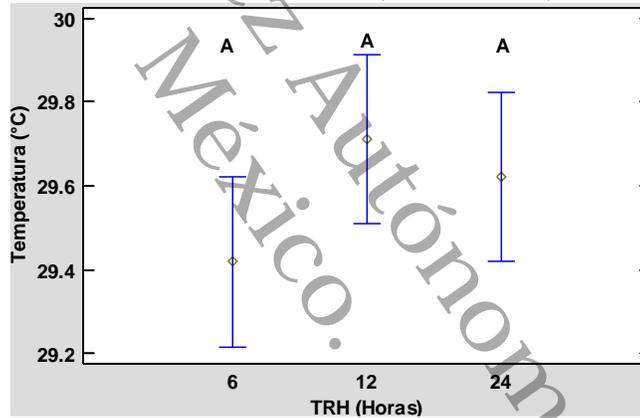
**Figura 4.** Valores de temperatura en cada altura de lecho. Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**Figura 5.** Valores de temperatura en cada TRH.  
Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)

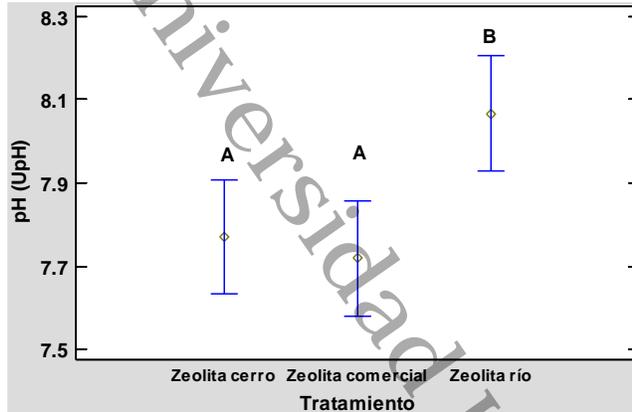


Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**pH.** El análisis ANOVA multifactorial ( $p < 0.05$ , 95% de nivel confianza) mostró que dos valores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre pH. El factor zeolita de río fue el que presentó un pH con tendencia alcalina (8.07) y los tratamientos zeolita de cerro y zeolita comercial tendieron a comportarse más estables (7.77 y 7.71) (Figura 6). El factor altura tuvo un comportamiento bastante homogéneo para pH 0.9m y 1.1m (7.35 y 7.33) y el pH en 0.75 m presentó tendencia alcalina (8.88) (Figura 7). Finalmente, en el tratamiento de 6 horas se presentó un pH alcalino (8.45) y para los otros tiempos el pH tiende a la neutralidad (Figura 8).

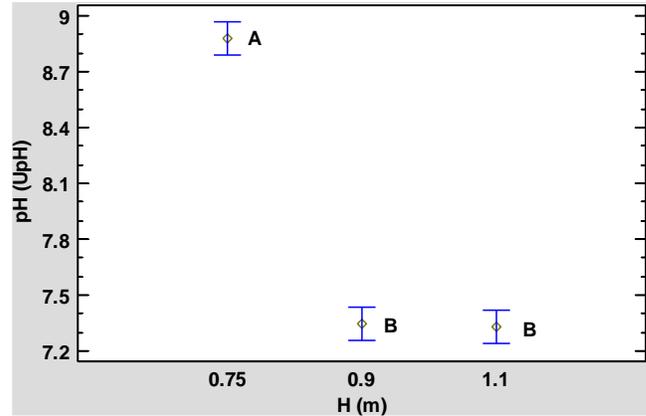
**Figura 6.** Valores de pH en cada Zeolita.  
Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

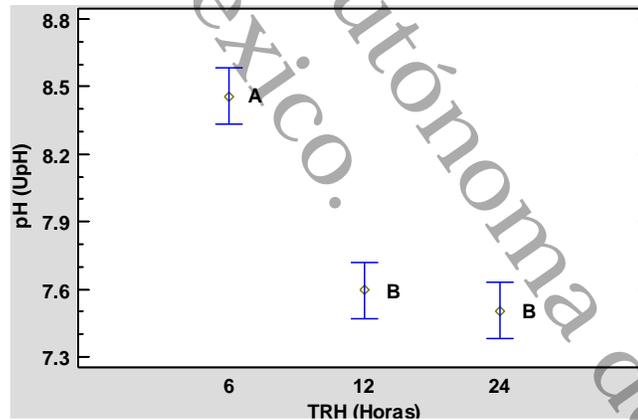
**Figura 7.** Valores de pH en cada altura de lecho.  
Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**Figura 8.** Valores de pH en cada TRH. Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)

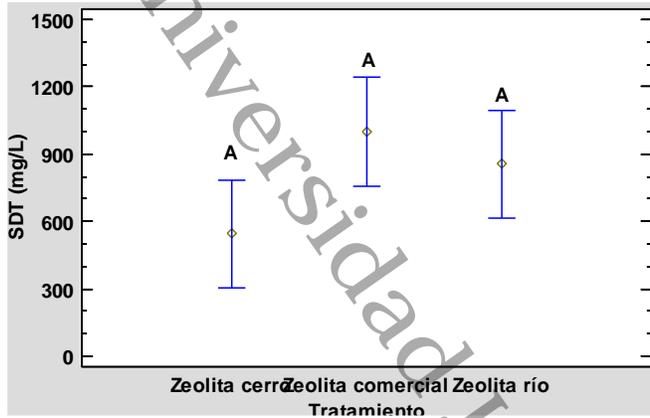


Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**Sólidos disueltos totales.** El análisis ANOVA multifactorial ( $p < 0.05$ , 95% de nivel confianza) muestran que el factor zeolita tiene un efecto estadísticamente significativo sobre SDT, siendo la zeolita de cerro la que presentó la menor media (545.28 mg/L), seguido de la de río (854.64 mg/L) y finalmente la zeolita comercial (1000.55 mg/L) (Figura 9). El factor altura presenta un efecto significativo en los SDT, siendo la menor concentración para H de 1.1 m (593.91 mg/L), seguido de H de 0.9 m (604.19 mg/L) y finalmente H de 0.75 (1202.37 mg/L) (Figura 10). Para el factor TRH la menor concentración se presentó a las 12 horas (690.13 mg/L), seguido de las 6 horas (796.20 mg/L) y la más alta a las 24 horas (914.14 mg/L) (Figura 11).

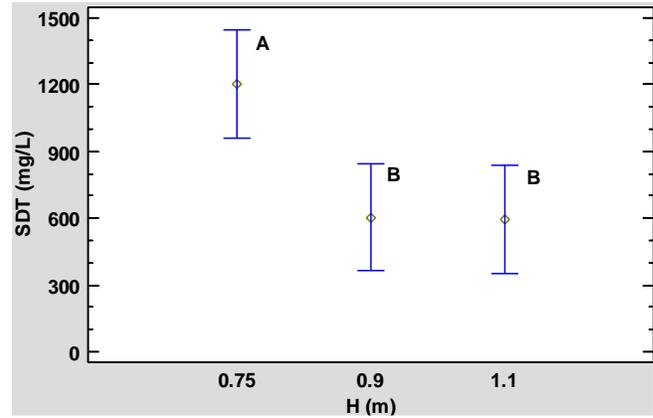
**Figura 9.** Valores de SDT en cada Zeolita.  
Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticas significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

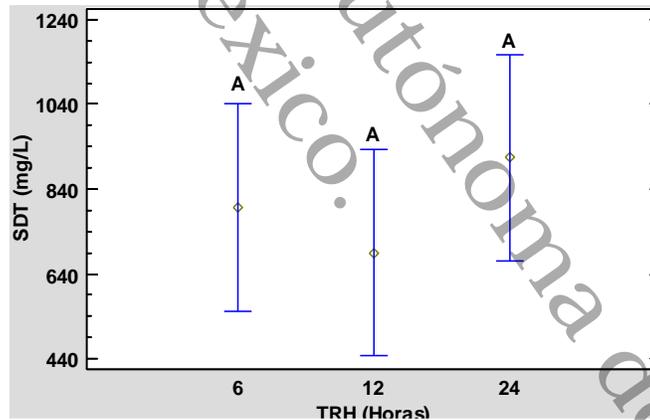
**Figura 10.** Valores de SDT en cada altura de lecho. Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticas significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**Figura 11.** Valores de SDT en cada TRH.  
Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)

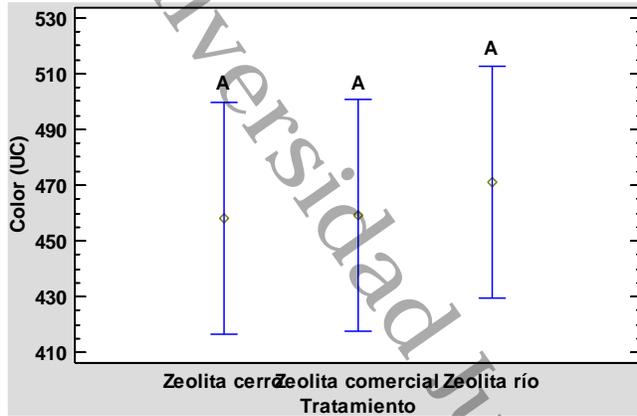


Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticas significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**Color.** El análisis ANOVA multifactorial ( $p < 0.05$ , 95% de nivel confianza) muestran que el factor zeolita no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el color, siendo la zeolita de cerro la que presentó la menor media (458.10 UC), seguido de la comercial (459.35 UC) y finalmente la zeolita de río (471.14 UC) (Figura 12). El factor altura presenta un efecto significativo en el color, siendo la menor concentración para h de 0.9 m (302.87 UC), seguido de h de 1.1 m (302.95 UC) y finalmente h de 0.75 (782.77 UC) (Figura 13). Para el factor TRH la menor concentración se presentó a las 24 horas (395.30 UC), seguido de las 12 horas (401.52 UC) y la más alta a las 6 horas (591.76 UC) (Figura 14).

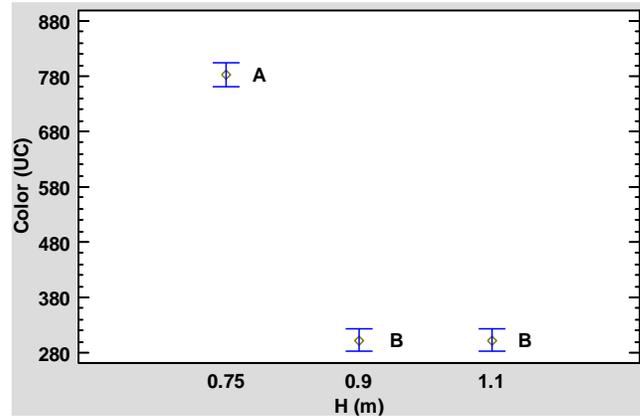
**Figura 12.** Valores de color en cada Zeolita.  
Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

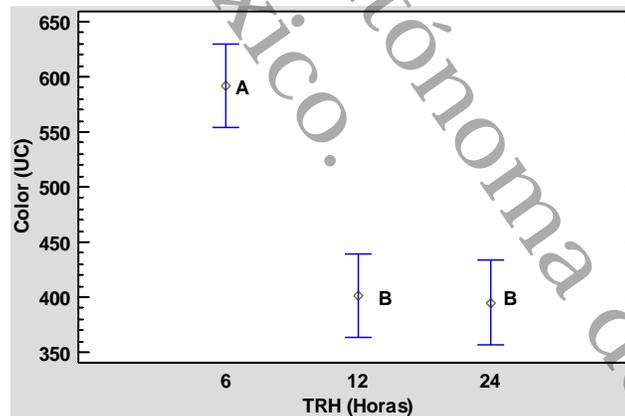
**Figura 13.** Valores de color en cada altura de lecho. Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**Figura 14.** Valores de color en cada TRH.  
Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



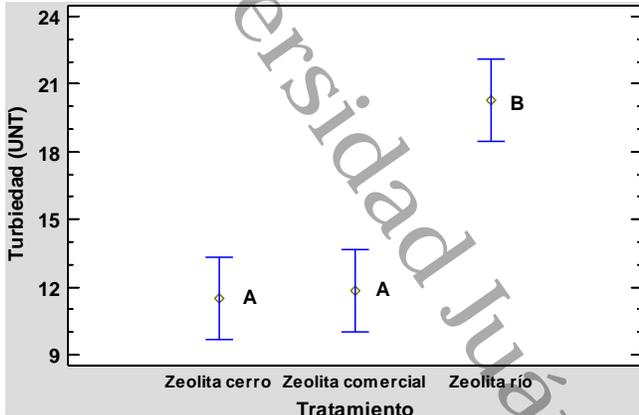
Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**Turbiedad.** El análisis ANOVA multifactorial ( $p < 0.05$ , 95% de nivel confianza) muestran que el factor zeolita tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la turbiedad, siendo la zeolita de cerro la que presentó la menor media (11.52 UNT), seguido de la comercial (11.85 UNT) y finalmente la zeolita de río (20.26 UNT) (Figura 15). El factor altura presenta un efecto significativo en la turbiedad, siendo la menor concentración para h de 1.1 m (13.71 UNT), seguido de h de 0.9 m (13.94 UNT) y finalmente h de 0.75 (15.98 UNT) (Figura 16). Para el

factor TRH la menor concentración se presentó a las 24 h (8.67 UNT), seguido de las 12 h (11.51 UNT) y la más alta a las 6 h (23.46 UNT) (Figura 17).

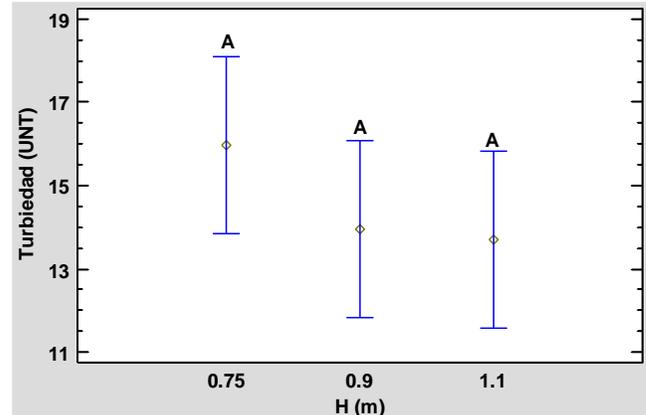
**Figura 15.** Valores de turbiedad en cada Zeolita. Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

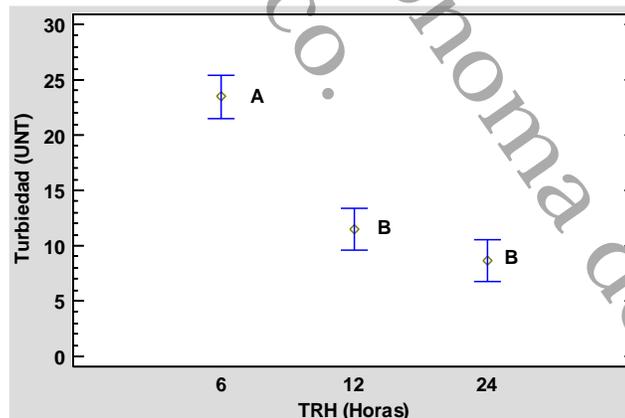
**Figura 16.** Valores de turbiedad en cada altura de lecho. Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**Figura 17.** Valores de turbiedad en cada TRH. Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



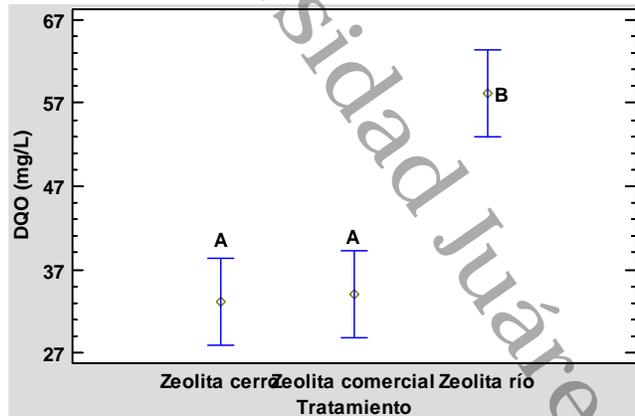
Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**Demanda química de oxígeno.** El análisis ANOVA multifactorial ( $p < 0.05$ , 95% de nivel confianza) muestran que el factor zeolita tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la DQO, siendo la zeolita de cerro la que presentó la menor media (33.09 mg/L), seguido de la comercial (34.0593 mg/L) y finalmente la zeolita de río (58.2037 mg/L) (Figura 18). El factor altura no presenta un efecto significativo en la DQO, siendo la menor concentración para la

altura H de 1.1 m (39.40 mg/L), seguido de H de 0.9 m (40.07 mg/L) y finalmente H de 0.75 (45.88 mg/L) (Figura 19). Para el factor TRH hay un efecto significativo y la menor concentración se presentó a las 24 h (24.90 mg/L), seguido de las 12 h (33.05 mg/L) y la más alta a las 6 h (67.40 mg/L) (Figura 20).

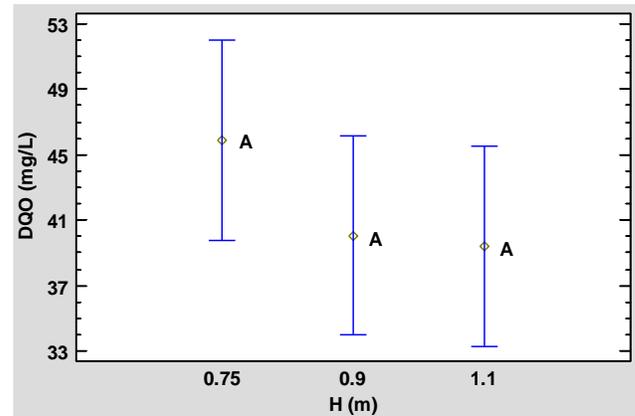
**Figura 18.** Valores de DQO en cada Zeolita.  
Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

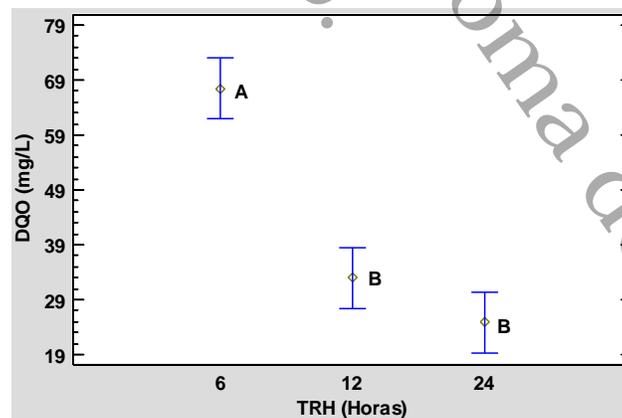
**Figura 19.** Valores de DQO en cada altura de lecho. Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

**Figura 20.** Valores de DQO en cada TRH.  
Contraste de medias (medias  $\pm$  EE)



Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas ( $N=18$ ).

Fuente: Elaboración propia

### Eficiencia de remoción de contaminantes básicos

En la (Tabla 4), se describen las eficiencias de remoción de los parámetros evaluados en los tratamientos. En la zeolita de río y de cerro el tratamiento más óptimo se presentó con una H=0.9 m y con 24 h de TRH, para la zeolita comercial en el tratamiento 0.9 m con 12 h. Esto nos permite observar que el mejor tratamiento es de zeolita de cerro pues alcanzó la mayor eficiencia con 71.95 % para SDT, 84.41 % para color, 96.44 % para turbiedad, y 97.36 % para DQO. Es importante aclarar que el signo negativo (-) en la eficiencia de remoción nos indica que el valor del parámetro es más alto en la salida y es menor en la entrada. Es relevante en el caso de la temperatura, porque nos muestra que al incrementar este valor en el efluente es la consecuencia de la actividad microbiana en los BLFFA.

**Tabla 4.** Eficiencias de remoción de contaminantes básicos en los BLFFA para diferentes tratamientos (zeolita, altura de lecho y TRH) (N = 81)

Parámetro	H=0.75 m			H=0.90 m			H=1.10 m			
	6 h	12 h	24 h	6 h	12 h	24 h	6 h	12 h	24 h	
Zeolita de Río	Temperatura °C	-3.67	-4.51	-3.57	-3.61	-3.91	-3.51	-4.27	-4.81	-4.27
	pH (UpH)	-1.03	-0.17	-0.10	0.63	1.13	1.37	0.70	1.17	1.40
	SDT (ppm) (%)	-4.48	5.07	6.43	12.60	13.96	15.29	12.94	13.69	15.26
	Color (UC) (%)	36.86	40.43	44.19	62.52	81.98	82.06	63.33	81.82	81.90
	Turbiedad (UNT) (%)	82.55	83.54	84.58	59.25	78.35	91.53	59.88	79.42	91.73
	DQO (mg/L) (%)	87.05	87.78	88.55	69.76	83.93	93.71	70.22	84.72	93.86
	Zeolita de Cerro	Temperatura °C	-4.57	-4.74	-5.14	-3.91	-3.51	-3.91	-4.81	-4.27
pH (UpH)		-0.77	0.13	0.17	0.67	1.67	1.73	0.77	1.67	1.73
SDT (ppm) (%)		-1.61	8.10	8.15	37.81	71.42	71.95	44.45	71.47	71.94
Color (UC) (%)		37.11	41.12	41.12	63.93	84.34	84.41	63.93	83.99	84.14
Turbiedad (UNT) (%)		82.62	83.73	83.73	78.42	96.33	96.44	78.69	96.20	96.26
DQO (mg/L) (%)		87.10	87.92	87.92	83.98	97.28	97.36	84.19	97.18	97.23
Zeolita Comercial		Temperatura °C	-4.81	-5.61	-6.27	-3.51	-3.91	-3.51	-4.27	-4.81
	pH (UpH)	-0.73	0.10	0.20	0.70	1.80	1.87	0.67	1.83	1.80
	SDT (ppm) (%)	-1.58	8.02	8.13	23.04	26.49	55.35	22.92	28.31	56.64
	Color (UC) (%)	37.12	41.13	41.11	63.53	84.15	84.22	63.60	84.15	84.23
	Turbiedad (UNT) (%)	82.62	83.73	83.73	78.24	95.71	95.50	78.59	95.57	95.61
	DQO (mg/L) (%)	87.10	87.92	87.92	83.85	96.82	96.66	84.11	96.71	96.74

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los valores de temperatura y pH son la diferencia entre el afluente y el efluente se presentan en sus unidades y para los SDT, Color, Turbiedad y DQO las eficiencias de remoción se presentan en porcentajes.

## Discusión

Los resultados muestran a la zeolita de cerro como el mejor medio de soporte comparada con la zeolita de río y la comercial, presentando similitud a la zeolita comercial que actualmente se utiliza en el tratamiento de aguas residuales. Lo atribuimos a las características físicas, químicas y mecánicas donde la zeolita de cerro sobresalió en parámetros como la porosidad, absorción y humedad, determinantes en el tratamiento de aguas residuales. La altura (H) óptima en los BLFFA fue 0.9 m, factor importante de evaluar ya que a mayor altura se aumentan los costos y las eficiencias no son relevantes para justificar la inversión y a menor altura cae el rendimiento en calidad del agua tratada. En ese sentido, las zeolitas nativas cuentan con propiedades físicas y químicas para ser utilizadas en el tratamiento de agua residual doméstica como plantea Florencia (2012), que aplicó zeolitas en el área de agronomía y ambiental, al igual que Céspedes et al., (2011) quienes evaluaron zeolitas para proponer como medios de soporte de bajos costos en el tratamiento de aguas. Por otra parte, Hernández et al., (2010) demostró el potencial de las zeolitas en el tratamiento de aguas residuales como es el caso en este estudio experimental.

La mayoría de los procesos biológicos que en la actualidad se utilizan son lagunas de estabilización, lodos activados, biofiltros, biodiscos, digestión anaerobia de segunda generación y aunque estos ofrecen remociones aceptables de materia orgánica (>80%), una de sus desventajas es el TRH que es demasiado grande, mientras que en los BLFFA los TRH son mucho menores y permite que las bacterias estén en contacto con el alimento presente en las aguas residuales, el cual es suficiente para que éstas asimilen o estabilicen la materia orgánica, pues si el TRH es muy pequeño, no toda la materia orgánica será removida y el efluente tendrá valores altos de DQO y si TRH es muy grande no se garantiza buen desempeño (CONAGUA, 2016b). La meta esencial en los tratamientos biológicos tipo BLFFA es estabilizar la materia orgánica, coagular y remover los sólidos coloidales flotantes que se encuentran en las aguas, incluyendo en algunos casos la remoción de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (Noyola et al., 2013), la biomasa convierte la materia orgánica carbonácea disuelta y en estado coloidal en diferentes gases y tejidos celulares, formando capas biológicas compuestas de materia celular y de coloides orgánicos importantes en el medio de soporte en los BLFFA (CONAGUA, 2016b). En este experimento los TRH de 24 h ayudaron a una mayor eficiencia de remoción de DQO en las zeolitas de río y de cerro favoreciendo una mayor presencia de microorganismos en el medio de soporte dentro de los BLFFA.

La temperatura juega un papel importante en el tratamiento de las aguas residuales, pues acelera las reacciones bioquímicas, reduce en la solubilidad de los gases, intensifica sabores y olores durante los tratamientos, en ese sentido, durante los tratamientos de los experimentos presentó una variación de 28.95 °C a 30.02 °C, permitiendo el desarrollo y establecimiento de microorganismos mesófilos responsables de la degradación de la materia orgánica (Torres *et al.*, 2020), cumpliendo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 en el valor descarga que es menor a 40 °C. En cuanto al pH, este presentó variaciones en los tratamientos presentándose de neutros a ligeramente alcalinos (de 7.3 a 8.9), condición importante para el establecimiento de microorganismos y manteniendo el rango del criterio de descarga que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996 que es 6.5 a 10 unidades. Espinosa, Delgado e Hidalgo (2020), trabajaron una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con proceso combinado (un reactor anóxico, dos de mezcla completa aerobio y un reactor biológico de membrana) con alto contenido de nitrógeno, cuyos comportamientos para el caso de temperatura fueron de 38 °C

para el anóxico, 40 °C en los aerobios y 39 °C para el de membrana y el comportamiento del pH se mantuvo en 8 unidades en todos los procesos, por lo que al comparar nuestros resultados, podemos observar que la temperatura es menor por estar sometida a un solo proceso como el lecho empacado y por las características del medio de soporte que son las zeolitas, en el caso del pH el rango es ligeramente alcalino como en los procesos evaluados por Espinosa *et al.*, (2020).

Los SDT son un parámetro que generalmente no se ocupa para medir el desempeño de los rectores, sin embargo, en este caso es importante determinar la capacidad de adsorción de iones disueltos y en este experimento se demostró que la zeolita de cerro es la más eficiente removiendo hasta un 71.95 %. Los valores que se lograron disminuir son sales inorgánicas disueltas (Hadad, Maine y Bonetto, 2006) y con este desempeño se corrobora que este material pétreo de cerro es una zeolita que captura iones disueltos, pues Mietto, Politeo, Breschigliaro y Borin, (2015) aseguran que para que materiales de soporte comunes (filtros biológicos o biofiltros) puedan tener valores similares a esta remoción se debe contar con TRH prolongados (> 6 días) para favorecer la eliminación de iones o nutrientes combinados con el efecto temperatura. Los valores de SDT en los efluentes de zeolita de cerro de nuestro estudio están dentro de lo permitido para descarga en riego (266.63 mg/L), ya que la concentración de SDT que no tienen efectos nocivos en ningún cultivo son menores a 500 mg/L (SEMARNAP-CONAGUA-SEDUE, 1989).

La turbiedad y color no son parámetros normados por la NOM-001-SEMARNAT-1996, pero son utilizados como variables de medición rápida en el desempeño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y están directamente relacionados con los sólidos suspendidos (Ortiz, López, Torres y Pampillón, 2018; Torres *et al.*, 2020), en tal sentido, el medio de soporte cumple una función filtrante de estos sólidos reteniéndolos por adhesión y en el caso de la materia coloidal es estabilizada por la biomasa (Crites y Tchobanoglous, 2000), por lo que las zeolitas presentan eficiencias altas en la remoción de turbiedad y color (>91% y >84% respectivamente), siendo la zeolita de cerro (0.9 m de altura de lecho y 24 h de TRH) la que alcanzó 96.44 % de remoción de turbiedad y 84.41 % de color.

La DQO cuantifica el oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica no putrescible presente en el agua residual (O'Dell, 1993); siendo la variable más importante en los procesos biológicos para medir el desempeño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Crites y Tchobanoglous, 2000). Espinosa *et al.*, (2020), evaluaron un sistema de tratamiento biológico (anóxico-aerobio-reactor biológico de membrana) que opera una empresa dedicada a la elaboración de harinas de sardina y atún, cuyos afluente se encuentran muy alto en DQO (7728.9±513.8 mg/L) y los efluentes (353.8±62.1 mg/L) se encuentran por arriba del proyecto de norma PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 (Semarnat, 5 de enero de 2018) para descarga en zonas marinas y estuarios (85 mg/L de DQO), sin embargo la eficiencia de remoción de este sistema se reporta en 95.4 % para este parámetro. En los tratamientos evaluados en este experimento se puede observar que la zeolita de cerro (97.36 %) y comercial (96.66 %) tienen mucha similitud en la remoción de DQO con 24 h de retención y 0.9 de altura de lecho, siendo la que presenta el menor eficiencia la zeolita de río (93.71 %), sin embargo, en nuestro caso al estar tratando aguas residuales domésticas el influente presenta concentración de 373.00±43.00 mg/L, lo que permite que los efluentes (9.8 mg/L de DQO) cumplan los límites permisibles de PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 (Semarnat, 5 de enero de 2018).

Comparando las zeolitas de este estudio con otros medios de soporte que se han utilizado en biorreactores de lecho fijo, podemos establecer que la zeolita de cerro tienen un alto potencial para su uso en las aguas residuales por las altas eficiencias de remoción obtenidas. Cárdenas y

Ramos (2009), encontraron que las conchas marinas permiten alcanzar hasta 89.7 % de remoción de DQO; Rodríguez et al., (2007), utilizando un medio de soporte cerámico alcanzó 57 % de remoción de DQO; Castillo et al., (2006), con material de desecho de mazorcas alcanzó remociones entre 50 y 70 % de DQO y finalmente Rivas et al., (2003), alcanzó hasta un 91 % de remoción con cargas de DQO de 463 mg/L muy similares a las de nuestro estudio.

## Conclusión

Las zeolitas nativas de cerro y de río deben ser implementadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas en BLFFA pues son eficientes en la remoción de contaminantes básicos y favorece los tiempos y costos de operación.

Los experimentos muestran que, aunque no existe una diferencia estadística significativa entre el uso de 12 o 24 h de TRH de 20 h en la remoción de color, turbiedad y DQO, las mejores eficiencias de remoción para estos parámetros se alcanzan en 24 h de TRH.

La zeolita de cerro es la que presenta el mejor rendimiento en la remoción de contaminantes básicos operando con 0.9 m de altura de lecho y con 24 h de TRH.

Para la utilización de los BLFFA es necesario que previo al proceso se cuente con un sistema de pretratamiento para la eliminación de sólidos sedimentables y suspendidos.

Finalmente, podemos recomendar la implementación del uso de los BLFFA para el tratamiento secundario de efluentes domésticos en sistemas descentralizados del sureste de México como una alternativa viable en el tratamiento de sus aguas residuales.

## Agradecimientos

La autora principal, agradece al Tecnológico Nacional de México, por gestionar en tiempo y forma la BECA-COMISIÓN y el apoyo financiero de beca PRODEP, para contar con el tiempo suficiente para la realización de esta investigación. De igual manera se agradece a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco División DACBiol por el apoyo incondicional brindado en sus instalaciones y a sus gestores Dr. Gaspar López Ocaña y Dr. Raúl Germán Bautista Margulis por todas las facilidades para la realización de este proyecto.

## Referencias

- American Public Health Association (APHA). 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 RD Edition, Method 2120 Color. Prepared and Published Jointly by American Public Health Association®, American Water Works Association® and Water Environment Federation ®. Retrieved from: [https://www.academia.edu/38769108/Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater 23rd edition](https://www.academia.edu/38769108/Standard_Methods_For_the_Examination_of_Water_and_Wastewater_23rd_edition)
- American Public Health Association (APHA). 2017a. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 RD Edition, Method 2540 C Total Dissolved Solids. Prepared and Published Jointly by American Public Health Association®, American Water Works Association® and Water Environment Federation ®. Retrieved from: [https://www.academia.edu/38769108/Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater 23rd edition](https://www.academia.edu/38769108/Standard_Methods_For_the_Examination_of_Water_and_Wastewater_23rd_edition)

- American Public Health Association (APHA). 2017b. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 RD Edition, Method 2550 Temperature. Prepared and Published Jointly by American Public Health Association®, American Water Works Association® and Water Environment Federation ®. Retrieved from: [https://www.academia.edu/38769108/Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater 23rd edition](https://www.academia.edu/38769108/Standard-Methods-For-the-Examination-of-Water-and-Wastewater-23rd-edition)
- American Public Health Association (APHA). 2017c. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 RD Edition, Method 4500 H+ pH Value. Prepared and Published Jointly by American Public Health Association®, American Water Works Association® and Water Environment Federation ®. Retrieved from: [https://www.academia.edu/38769108/Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater 23rd edition](https://www.academia.edu/38769108/Standard-Methods-For-the-Examination-of-Water-and-Wastewater-23rd-edition)
- Castillo, E.F., Solano, J.K., Rangel, M.P. (2006). Evaluación operacional de un sistema a escala laboratorio de biopelícula anaerobia soportada para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista ION, Bucaramanga (Colombia)*, 19(1): 18-22. Email: ceiam@uis.edu.com
- Cárdenas, C.G.L., Ramos, R.R.M. (2009). Evaluación de la eficiencia de reactores de lecho fijo utilizando aguas mieles residuales de trapiches artesanales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Vol. 19-1, pp. 25-38, Bogotá, Colombia. ISSN: 0124-8170
- Céspedes-Ortiz, MsC., Rodríguez-Iznaga, I., Petranovskii, V., Rizo-Beyra, R., Aguilera-Domínguez, L., (2011). “Zeolitas naturales de diferentes yacimientos cubanos: composición y estabilidad química y térmica”. *Revista Cubana de Química [en línea]* 2011, XXIII. Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543722011>> ISSN 0258-5995.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016a). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales No. 25. D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Recuperado de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016b). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Procesos de Oxidación Bioquímica con Biomasa Fija No. 34. D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Recuperado de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro34.pdf>
- Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Colombia: McGraw-Hill.
- Desbos, G. (1994). Biofiltration as a Compact Technique for Small Wastewater Treatment Plants. *Water Science and Technology*. Vol. 29. No. 10-11.s.l.,s.n. 145-152p.
- Espinosa, R.M.A., Delgado, D.R., Hidalgo, M.A. (2020). Evaluación de un proceso anóxico-aerobio-reactor biológico de membrana con alto contenido de nitrógeno. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 36 (2) 303-320, 2020. DOI: 10.20937/RICA.53111
- Environmental Protection Agency [EPA]. (1983). *Turbidity (Nephelometric) Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. Environmental Monitoring and Supporting Laboratory*. Cincinnati, United States: Environmental Protection Agency.

- Fernández, M., Flores, D., Yactayo, M., Lovera, D., Quispe, J., Landauro, C., Pardave, W. (2020). Remoción de metales pesados desde efluentes mineros, mediante cáscaras de frutas. *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*. Volumen 8, Número 1. Pág 21-28.
- Florencia Agosto, María. (2012). “Estudio de zeolitas procedentes de depósitos Argentinos. Aspectos tecnológicos que posibiliten su aplicación en agroindustria y contralor ambiental”. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata. Recuperada de <https://1library.co/document/nq7rg3dy-procedentes-depositos-argentinos-aspectos-tecnologicos-posibiliten-aplicacion-agroindustria.html>
- Guerrero, A.M.S., Vázquez, P.A., Rodríguez, G.M. (2019) La zeolita en la descontaminación de aguas residuales. *Universidad, Ciencia y Tecnología* Vol. 21, N° 02 (pp. 109-117). ISSN: 1316-4821/2542-3401
- Hadad H.R., Maine M.A., Bonetto C.A. (2006). Macrophyte growth in a pilot scale constructed wetland for industrial wastewater treatment. *Chemosphere*. Vol. 63, 2006, pp. 1744-1753. doi:10.1016/j.chemosphere.2005.09.014
- Hernández, M.A.; Rojas, F.; Lara, V.H.; Portillo, R.; Castelán, R.; Pérez, G.; Salas, R. (2010). “Estructura porosa y propiedades estructurales de mordenita y clinoptilolita”. *Superficies y vacío*, vol. 23, pp. 51-56. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C. Distrito Federal, México. ISSN: 1665-3521.
- Mietto, A., Politeo, M., Breschigliaro, S. and Borin, M. (2015). Temperature influence on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system in northern italy. *Ecological Engineering*, 75, 291-302. Doi:10.1016/j.ecoleng.2014.11.027.
- Morató J., Pires. y Subirana A. (2009). “Crisis del Agua”, Capítulo 1 del Manual de tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas elaborado por la Red ALFA TECSPAR (Tecnologías Sostenibles para la Potabilización y el Tratamiento de Aguas Residuales) ISBN: 978-958-44-5307-5.
- Muñoz Iniestra, S. A., López Galindo y Hernández Moreno (2013). *Edafología, Manual de métodos de análisis de suelos*. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores de Iztapalapa México, Distrito Federal. pp. 139
- Norma Oficial Mexicana 021-RECNAT-2000, la cual establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. 31 de diciembre de 2002. Recuperada de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación* el 6 de enero de 1997. Recuperada de: [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/10/NOM\\_001\\_002\\_003\\_SEMARNAT.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/10/NOM_001_002_003_SEMARNAT.pdf)
- Noyola A., Morgan-Sagastume J. M., Güereca L. P. 2013. Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. Universidad Nacional Autónoma de México © Instituto de Ingeniería. Primera edición: 2013 Impreso y hecho en México. ISBN: 978-607-02-4822-1. 126 páginas.
- O'Dell, J. W. (ed.) (1993). *Method 410.4, Revision 2.0: The Determination of Chemical Oxygen Demand by SemiAutomated Colorimetry*. Cincinnati, United States: Environmental Protection Agency. Retrieved from

- [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/method\\_410-4\\_1993.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/method_410-4_1993.pdf).
- Ortiz, A.V., López, O.G., Torres, B.C.A. y Pampillón, G.L. (2018). Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(13), 18-46.
- Pérez, P.T., Pereda, R.I., Teixeira, C.G., Pozzi, E. Hong, K.W., Oliva, M.D. (2019) Adición de zeolita en reactor EGSB para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Addition of zeolite in EGSB reactor for the treatment of swine wastewater. Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM). Infomin, Vol. 11, enero-diciembre 2019, E-ISSN: 1992-4194, <http://www.infomin.co.cu>. <http://opn.to/a/joiM7>
- Rodríguez, T., Pinzón, L., Arámbula, C. (2007) Implementación de un biorreactor de lecho empacado cerámico para el tratamiento de aguas residuales domésticas. En Restrepo, I.; Sánchez, L.D.; Galvis, A.; Rojas, H.; Sanabria, I.J. Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento (para el cumplimiento de las metas del milenio). Programa Editorial Universidad del Valle. Santiago de Cali. (pp 210-217). Recuperado de: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vpFqgpfHBmYC&oi=fnd&pg=PA210&q=importancia+de+lecho+empacado&ots=M22Stj6XCJ&sig=HehMisjyIYd6jsCxbtFN\\_XcAdZc#v=onepage&q=importancia%20de%20lecho%20empacado&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vpFqgpfHBmYC&oi=fnd&pg=PA210&q=importancia+de+lecho+empacado&ots=M22Stj6XCJ&sig=HehMisjyIYd6jsCxbtFN_XcAdZc#v=onepage&q=importancia%20de%20lecho%20empacado&f=false)
- Rivas, L.B.A., Nevárez, M.G.V., Bautista, M.R.G., Pérez, H.A., Saucedo, T.R. (2003) Tratamiento de aguas residuales de uso agrícola en un biorreactor de lecho fijo. *Agrociencia*, Vol. 37, núm.2, pp. 157-166. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México. ISSN: 1405-3195 [agrocien@colpos.mx](mailto:agrocien@colpos.mx). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30237206>
- Secretaría de Marina Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). (1989). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. Diario Oficial de la Federación. Miércoles 13 de diciembre de 1989.
- Standard Methods Committee (2001). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 RD Edition, Method 4500-O Oxygen Dissolved (DO). Prepared and Published Jointly by American Public Health Association®, American Water Works Association® and Water Environment Federation ®. Retrieved from: [https://www.academia.edu/38769108/Standard\\_Methods\\_For\\_the\\_Examination\\_of\\_Water\\_and\\_Wastewater\\_23rd\\_edition](https://www.academia.edu/38769108/Standard_Methods_For_the_Examination_of_Water_and_Wastewater_23rd_edition) and [https://edgeanalytical.com/wp-content/uploads/Inorganic\\_SM4500-O.pdf](https://edgeanalytical.com/wp-content/uploads/Inorganic_SM4500-O.pdf)
- Torres B.C.A., López, O.G., Romellón, C.M.J., Vazquez G.M.B. y Comparán, S.L.E. (2018). Biomasa de origen vacuno en la remoción de contaminantes básicos en un reactor discontinuo secuencial. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 9(18), 1-32.
- UNESCO. 2017. Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas 2017: Aguas residuales, el recurso desaprovechado. Recuperado de: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2017-wastewater-the-untapped-resource/>
- Vian, J., Viguera, C.S.E., Velasco, P.A., Puebla, H. (2020) A Novel Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket Solid-State Reactor for the Treatment of Fruit and Vegetable Waste. Una



novedosa manta anaerobia de lodos ascendentes en un reactor de estado sólido para el tratamiento de residuos de frutas y verduras. Environmental Engineering Science Vol. 37, No. 5. ISSN: 1092-8758. <https://doi.org/10.1089/ees.2019.0369>

Vigueras, C.S., Vian, P.J., Velasco, P.A., y Zafra, J.G. (2016) Diseño y operación de un reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos (RAFAELL) para la producción de metano. Revista de Sistemas Experimentales. Vol.3 No.8 1-7. ISSN: 2410-3950. ECORFAN®-Bolivia. Todos los derechos reservados

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.





# Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

## México

### Autónoma de Tabasco

# CAPÍTULO 3

---

## **Cinética de degradación de agua residual doméstica en un sistema experimental de lecho empacado utilizando zeolitas nativas.**

---

ENVIADO A: Revista Caldasia [revcaldasia\\_bog@unal.edu.co](mailto:revcaldasia_bog@unal.edu.co) Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá), Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales, oficina 314, Cra 30 # 45 - 03, A.A. 7495, Bogotá, Colombia <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal>





# Cinética de degradación de agua residual doméstica en un sistema experimental de lecho empacado utilizando zeolitas nativas

Kinetics of domestic wastewater degradation in an experimental packed-bed system using native zeolites

Noemi Méndez-de los Santos

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Villahermosa  
Carretera Villahermosa-Frontera km 3.5 S/N, Ciudad Industrial CP 86010  
[noemi.ms@villahermosa.tecnm.mx](mailto:noemi.ms@villahermosa.tecnm.mx)

Raúl Germán Bautista-Margulis

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas (DacBiol)  
Carretera Villahermosa-Cárdenas km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya CP 86150  
[mimilla6566@hotmail.com](mailto:mimilla6566@hotmail.com) y [margulisrg@hotmail.com](mailto:margulisrg@hotmail.com)

Gaspar López-Ocaña

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas (DacBiol)  
Carretera Villahermosa-Cárdenas km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya CP 86150  
[ocanagl77@hotmail.com](mailto:ocanagl77@hotmail.com)

Carlos Rodríguez-Jiménez

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Villahermosa  
Carretera Villahermosa-Frontera km 3.5 S/N, Ciudad Industrial CP 86010  
[cnla6566@hotmail.com](mailto:cnla6566@hotmail.com)

## Cinética de degradación de agua residual con zeolitas

Raúl Germán Bautista-Margulis (**AUTOR CORRESPONSAL**)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas (DacBiol)

Carretera Villahermosa-Cárdenas km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya CP 86150  
[margulisrg@hotmail.com](mailto:margulisrg@hotmail.com)

## Resumen

El objetivo fundamental de esta investigación fue determinar la cinética de degradación de agua residual doméstica en un sistema experimental de lecho empacado utilizando zeolitas nativas. Para ello, se evaluaron las propiedades de las zeolitas nativas de Tabasco (de río y de cerro) comparándola con la zeolita comercial para definir su uso en este tipo reactores como medio de soporte. Se emplearon tres reactores con diámetros de 4 pulgadas cada uno y altura de 1.50 m, con un volumen óptimo de 0.01216 m<sup>3</sup> (12.16 L), El medio de soporte efectivo utilizado fue zeolita de cerro con una altura estática en el reactor de 0.90 m (60 %) y un TRH=12 h. El funcionamiento óptimo se obtuvo partiendo de un volumen de partículas de 0.0073 m<sup>3</sup>, con un



volumen de espacios vacíos de  $0.0045 \text{ m}^3$  y un volumen por porosidad de  $0.0028 \text{ m}^3$  datos que equivalen a tratar 9.39 L efectivos de líquido en el reactor. Para el cálculo de la cinética de degradación se realizó un ajuste de datos con el método de mínimos cuadrados definiéndola con logaritmos porque expreso mejor los datos. Los parámetros de control en el funcionamiento efectivo de los reactores fueron para la  $T=28.77 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH}=6.97$  UpH,  $\text{SDT}=271.67 \text{ mg/L}$ ,  $C=204.43 \text{ UC}$ ,  $T=3.53 \text{ UNT}$  y  $\text{DQO}=10.15 \text{ mg/L}$ . Con respecto a los parámetros de control hidráulico (periodo de 9 meses), el  $Q=0.02432 \text{ m}^3/\text{día}$ ,  $L_v=0.746 \text{ kgDQO/L}\cdot\text{día}$ ,  $L_s=0.008 \text{ kg/día}\cdot\text{m}^2$ . Se logró calcular una cinética de primer orden ajustada donde  $y = -0.1299x + 2.6331$  y un  $R^2 = 0.9886$  para el medio de soporte zeolita de cerro concluyendo que  $R^2$  es un porcentaje adecuado, indicando que el modelo explica con confianza la variabilidad de los datos de respuesta. En el análisis el  $\text{TRH}=12 \text{ h}$  presentó un mejor comportamiento en la degradación de la DQO. Esto es, porque al aumentar el TRH se incrementa la eficiencia de remoción encontrando 97.28 % a las 12 h y 97.36% a 24 h, observando que de 12 a 24 h sólo se incremento la eficiencia en 0.08 % mejora no significativa y que en la práctica significa costos innecesarios. Sin embargo, debido a la naturaleza de los datos se modelo la función con logaritmos, debido a que en un tren de tratamiento en el proceso biológico no se logra al cien por ciento la degradación de la DQO.

**Palabras clave:** cinética, lecho empacado, zeolitas, agua residual

### Abstract

The main objective of this research was to determine the degradation kinetics of domestic wastewater in an experimental packed-bed system using native zeolites. For this, the properties of native Tabasco zeolites (river and hill) were evaluated, comparing it with commercial zeolite to define its use in this type of reactors as a support medium. Three reactors with diameters of 4 inches each and height of 1.50 m were used, with an optimal volume of  $0.01216 \text{ m}^3$  (12.16 liters). The effective support medium used was hill zeolite with a static height in the reactor of 0.90 m (60%) and Hydraulic Retention Time (HRT = 12 hours). The optimal performance was obtained starting from a volume of particles of  $0.0073 \text{ m}^3$ , with a volume of empty spaces of  $0.0045 \text{ m}^3$  and a volume by porosity of  $0.0028 \text{ m}^3$  data that are equivalent to treating 9.39 effective liters of liquid in the reactor. To calculate the degradation kinetics, a data fit was performed with the least squares method, defining that the quadratic function with logarithms was the one that best expressed the data. The control parameters in the effective operation of the reactors were for  $T = 28.77^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH} = 6.97$ UpH,  $\text{SDT} = 271.67\text{mg/L}$ ,  $C = 204.43\text{UC}$ ,  $T = 3.53 \text{ NTU}$  and  $\text{COD} = 10.15 \text{ mg/L}$ . Regarding the hydraulic control parameters (period of 9 months),  $Q = 0.02432 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $L_v=0.746 \text{ kgDQO/L}\cdot\text{day}$ ,  $L_s=0.008 \text{ kg/day}\cdot\text{m}^2$ . It was possible to calculate an adjusted first order kinetics where  $y = -0.1299x + 2.6331$  and an  $R^2=0.9886$  for the cerro zeolite support medium, concluding that  $R^2$  is an adequate percentage, indicating that the model confidently explains the variability of the data. response. In the analysis, HRT = 12 hours showed a better performance in the degradation of COD. This is because by increasing the HRT, the removal efficiency increases, finding 97.28% at 12 hours and 97.36% at 24 hours, observing that from 12 to 24 hours the efficiency was only increased by 0.08%, a non-significant improvement and that in the practical means unnecessary costs. However, due to the nature of the data, the quadratic function was modeled with logarithms, because in a treatment train in the biological process, the degradation of the COD is not achieved one hundred percent.

**Keywords:** kinetics, packed bed, zeolites, wastewater

## Introducción

El utilizar a las matemáticas como herramienta, es fundamental en el estudio de un modelo que pueda caracterizar el proceso de degradación de la materia orgánica en un agua residual y el comportamiento del crecimiento microbiano. Por otra parte, los parámetros como el pH, temperatura deben de controlarse incluyendo los elementos traza, una buena oxigenación y mezclas garantizadas, para asegurar que los microorganismos se encuentren aclimatados para su crecimiento, manteniendo homogéneo el flujo como garantía para una buena tasa de flujo y de carga orgánica (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Se debe destacar que se parte de estudiar la dinámica del fluido relevante en el tratamiento de aguas residuales, por lo que, investigadores han desarrollado diversos estudios con respecto al mecanismo hidrodinámico de reactores biológicos, afirmando que es determinante estudiar de manera minuciosa y detallada el mecanismo hidrodinámico de los reactores, ya que permite verificar en tiempo y forma fallas de diseño y de operación dando la posibilidad de desarrollar modelos matemáticos que potencialicen su hidrodinámica al momento de su puesta en marcha (Nardiet *et al.*, 1999 citado en Díaz *et al.*, 2014), un reporte elaborado por investigadores de la Universidad de Barcelona y el Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS) de Francia en el año 2018, afirma que el estudio de las propiedades dinámicas de los fluidos presenta un amplio escenario de aplicaciones en ámbitos como la eliminación de contaminantes en aguas residuales y otros problemas de ingeniería.

Se potencializa que las zeolitas naturales de desecho utilizadas como medio de soporte, son una alternativa sustentable para el tratamiento de aguas residuales domésticas en procesos biológicos, en este contexto, Misaelides (2011) publicó que las zeolitas naturales y la modificación de su forma, ofrecen ventajas de tipo económico, asegurando la disponibilidad de la materia prima, y la garantía de no introducir polución adicional en el medio ambiente. Es decir, el medio de soporte debe elegirse adecuadamente evaluando sus propiedades físicas, mecánicas y químicas, para garantizar un adecuado tratamiento de aguas residuales en todo proceso biológico, pueden estar constituidos por materiales como piedras, bloques cerámicos, espumas, materiales plásticos, conchas de ostras y mejillones, bloques modulares de PVC, granito, esferas de polietileno y bambú (Torres *et al.*, 2003).

A nivel internacional se han desarrollado trabajos de investigación tendientes a encontrar la cinética de degradación de aguas residuales en tratamientos biológicos evaluando las condiciones de operación y materiales de soporte, para garantizar sus eficiencias.

En Ecuador, investigadores estudiaron el rendimiento de un sistema de Contadores Biológicos Rotatorios (CBR) construido a nivel laboratorio en la Universidad Politécnica Salesiana. Utilizaron aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Ucubamba-Cuenca, llevaron un control y operación mediante la medición de parámetros físico químicos; nitratos, nitritos, cloro, amonio, pH, conductividad, sedimentación, turbidez y demanda química de oxígeno. Luego establecieron el modelo cinético de degradación del sustrato y validación del mismo, con los datos obtenidos en el laboratorio, comparandolos con un modelo teórico, se comprobó un ajuste experimental con un valor  $k$  (coeficiente de degradación de la materia orgánica) igual a 0,056 y con un  $R^2$  de 0,85 y 0,97 en el modelo teórico y experimental respectivamente (Duque *et al.*, 2018)

En Villahermosa, Tabasco, México, desarrollaron un estudio donde evaluaron humedales artificiales plantados con la especie vegetal *E. paniculatus* sometida a dos tipos de flujo,

subsuperficial (HAFS-E), y libre o superficial (HAFL-E). Las unidades experimentales fueron de 2.5 m de largo por 1.2 m de ancho y 1 m de altura. El caudal utilizado durante todo el experimento fue de  $202 \pm 4$  L/día, manteniendo un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 6.40 y 3.83 para el HAFL y HAFS, respectivamente. El medio de soporte fue grava de río (canto rodado) con porosidad de 49%. Las constantes cinéticas  $k$  obtenidas fueron de 0.61/día para el HAFL-E y de 1.27/día para el HAFS-E (García, 2020).

Otros investigadores mexicanos determinaron la eficiencia del tratamiento de un agua residual municipal mediante un humedal sub-superficial de flujo horizontal (SSFH) modificado con tres lechos porosos, localizado en la UAM-Azcapotzalco, a través de estudios cinéticos, estudiaron las siguientes órdenes de reacción, orden cero, orden uno y segundo orden, evaluándolas a través de la DBO y de la DQO, de los fosfatos y de los compuestos nitrogenados (nitratos, nitritos y amonio), sembrando con *Phragmites australis* (carrizo) y *Typha latifolia* (tule). Calcularon los tiempos de retención hidráulica y la concentración de nitratos en dos temporadas, de los años 2016 periodo posterior a lluvias y 2017 en el estiaje utilizando los coeficientes de Manning, la porosidad aparente del sustrato y la velocidad de flujo. Se midieron: temperatura, pH, potencial redox (ORP), oxígeno disuelto (OD), la alcalinidad y la dureza, esta última, mediante el cálculo del calcio y magnesio. Todas las cinéticas se ajustaron a un primer orden e incluso en las de los nitratos fueron de primer orden en las tres secciones, seleccionando la constante de primer orden en todas las temperaturas medida por corrida y se ajustó a un estándar de 20°C. Respecto al rendimiento la DQO y la DBO, dieron un buen rendimiento logrando alcanzar los límites permitidos por las normas: NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT1997 (González, 2017).

En la Universidad Nacional Autónoma de México, evaluaron agua residual con alta salinidad, cuyas características fueron similares a las que se presentan en las descargas generadas en plataformas marinas habitacionales, emplearon dos reactores aerobios de lecho fijo sumergidos (reactores 1 y 2) y empacados con cintas de polietileno de baja densidad con área superficial específica de  $1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . El desarrollo y aclimatación de la biomasa, se determinó por la remoción de materia orgánica a diferentes niveles de salinidad, la carga orgánica fue de  $1 \text{ gDQO}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ . La salinidad fue ajustada adicionando cloruro de sodio o sal común hasta las concentraciones deseadas (14,000 y 7,000 mg/L). Se aclimataron en un periodo de 173 días y 50 días, respectivamente, en tres fases experimentales variando la carga orgánica superficial de 1 a  $5 \text{ gDQO}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ . Se estudiaron cinéticas de degradación ajustando los datos experimentales a una regresión no lineal con base en el modelo de Monod, calcularon valores para  $K_s$  de 1,113 en el reactor 1 y 950.6 mg/L en el reactor 2. Ajustando una cinética de primer orden por medio de una regresión lineal, obteniéndose valores para  $K_s$  de 7.70 y 9.03/d en los reactores 1 y 2, en ese orden (Smith, 2016).

Analizaron el comportamiento de un reactor discontinuo secuencial (RBS) a escala de laboratorio con aguas residuales provenientes de la industria láctea. Determinaron las constantes cinéticas que gobiernan el proceso de degradación y crecimiento biológico, tales como: tasa máxima de utilización de sustrato ( $k$ ), constante de velocidad media ( $K_s$ ), coeficiente de producción de lodos ( $Y$ ) y coeficiente de desaparición de los microorganismos ( $K_d$ ), utilizando para ello los modelos cinéticos de Orozco y Michaelis-Menten. Establecieron un tiempo de retención hidráulica  $\text{TRH}=24$  horas y una edad del lodo ( $q_c$ ) de 20 días. Como resultados obtuvieron que el sistema de tratamiento puede describirse por el modelo de Orozco, obtuvieron los siguientes coeficientes cinéticos para las etapas anaerobia, aerobia 1 y aerobia 2 respectiva-

mente: 8,130; 1,350 y 0,765/d para “ $k$ ”, 0,167; 0,449 y 0,767 mg SSV/mg DQO para “ $Y$ ” y 0,0114; 0,0017 y 0,0023/d para “ $K_d$ ” (Cárdenas *et al.*, 2014)

A pesar de los avances del estudio de la cinética en tratamientos biológicos y la relevancia de estudiar materiales petreos de las regiones para garantizar procesos económicos. En esta investigación uno de los principales objetivos fue identificar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de zeolitas nativas regionales (de cerro de desecho y de río) encontradas en el estado de Tabasco, México, y compararlas con la zeolita comercial para determinar su uso. Fueron evaluadas en un sistema experimental de lecho empacado utilizando el agua de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, logrando su estabilización hidrodinámica y el control de los parámetros analizados in situ para determinar un TRH y altura en el lecho empacado óptimos en las corridas, lo que nos permitió plantear un estudio cinético de degradación del agua tratada para la DQO.

## Materiales y método

### Áreas de estudio

Con la finalidad de obtener las zeolitas regionales (materiales de soporte) para estudiarlas y evaluarlas se procedió a ubicar los principales bancos de arena y grava naturales (de origen mineral) localizados en el estado de Tabasco.

Las zeolitas nativas fueron obtenidas en bancos de materiales pétreo (de cerro y de río) (17°34'27.62"N y 92°55'44.25"O, 17°32'45.91"N y 92°55'56.68"O) en Teapa, se realizó un viaje a la gravera de roca triturada, donde nos colaboraron con 5 sacos de 25 kg de zeolita triturada de desecho (cerro y río) respectivamente, posteriormente, fueron transportadas al Laboratorio de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Villahermosa para su preparación para el estudio de propiedades.

Para la zeolita comercial, este material se procedió a comprar 3 sacos de 25 kg adquirida en Más Hidráulica (Soluciones en Sistemas de Agua) ubicada en el periférico Carlos Pellicer Cámara 1902, local 4 colonia Tamulté de las barrancas, Villahermosa, Tabasco de la marca Purikor, Villarreal División Equipos, S.A. de C.V., Nuevo León, México.

### Medios de soporte estudiados

#### Preparación previa de las muestras de zeolitas

**Obtención de las muestras.** Se tomaron cuatro muestras al azar de cada una de estas zeolitas. Evaluando en laboratorio sus principales características.

**Preparación de muestras de las zeolitas.** La preparación de la muestra incluyó el traslado, recepción, registro, secado, tamizado, homogeneizado, y el almacenamiento para su conservación, para evitar la contaminación de la muestra asegurando mayor precisión y exactitud en el resultado de los análisis, Esta operación se realizó en un lugar limpio. Las muestras se almacenaron en botes de 19 L.

**Tamizado.** Las zeolitas se hicieron pasar por las siguientes cribas # 4, # 6, # 8, # 12 y # 14 de acero inoxidable en una máquina cribadora de marca General Electric Excell, modelo 2C48GCX. Este grado de fineza fue necesario para la mayoría de los análisis requeridos con el

propósito de cumplir con los diámetros que requieren los medios de soporte para estudiarlos en el sistema experimental de lecho empacado.

Una vez tamizado el material se separó 3 kg de zeolita, cantidad suficiente para determinar sus propiedades que nos permitieron caracterizarlo para su estudio como medio de soporte y evaluarlas.

### ***Propiedades de las zeolitas***

Es importante destacar que estas pruebas, se les aplicaron a las zeolitas de cerro, zeolitas de río y también a la zeolita comercial utilizada como testigo en este estudio.

**Para determinar el pH de las zeolitas** se utilizó el manual de edafología (Muñoz, Soler, López y Hernández, 2013). Se realizó este análisis en el laboratorio de biorremediación del CICART ubicado en la DacBiol de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 1) En una balanza precisa BJ2200C se pesaron 10 g de zeolitas previamente preparadas y tamizadas por una malla menor a 1 mm, utilizando un tubo de plástico FALCON DE 50 ml con tapa y una espátula, este procedimiento se elaboró tres veces. 2) Luego se le adicionó 12.5 ml de agua desionizada relación (1:2:5). 3) Posteriormente los tres tubos fueron colocados en un multiagitador orbital marca NEW BRUNSWICK SCIENTIFIC por un tiempo de 30 minutos a 120 rpm. 4) Después de ese tiempo se dejaron reposar por una hora. 5) Inmediatamente se verificó el aparato medidor de pH marca Conductronic PC18 con las soluciones buffer (pH: 4, 7 y 10 respectivamente) para garantizar un resultado confiable y se verificó la calibración del equipo. 6) Tomándose la lectura asegurándose de que estuviera limpio y seco correctamente el sensor. 7) Por último se registraron los datos en una bitácora, y se interpretaron con el apoyo de la NOM-021-RECNAT-2000.

**Determinación de la conductividad eléctrica en solución de las zeolitas**, utilizando como guía el manual de edafología (Muñoz, Soler, López y Hernández, 2013). Realizamos este análisis en el laboratorio de biorremediación del CICART ubicado en la DacBiol de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 1) Se utilizaron 30 g de muestra de zeolita tamizada en una malla con diámetro menor a 1 mm. 2) Se pesaron 10 g en una balanza precisa BJ2200C con ayuda de una espátula y se colocó en un tubo agregándole 50 ml de agua desionizada, este procedimiento se repitió dos veces más. 3) Los tres tubos se colocaron en un multiagitador orbital marca NEW BRUNSWICK SCIENTIFIC a 80 rpm durante una hora. 4) Cuando paso el tiempo de agitación se retiraron las muestras y se dejaron decantar por 10 minutos. 5) Previamente se ajustó el conductivímetro con la solución patrón 1.4 dS/m (1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). 6) Después de haber dejado decantar las tres muestras se tomó la lectura y se anotó en la bitácora para posteriormente analizarlas con la NOM-021-RECNAT-2000.

**Obtención de la densidad aparente de las zeolitas**, Este análisis se realizó en el laboratorio de Tecnología del Agua ubicado en la DacBiol de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 1) Se utilizó una probeta de vidrio con capacidad de 1000 ml y se pesó en una balanza de precisión anotando su peso en la bitácora de trabajo. 2) Luego con ayuda de una espátula se colocó partículas de zeolitas en la probeta hasta que cubriera la marca de los 1000 ml inmediatamente sobre una franela y tapando la boquilla de la probeta se le aplicaron 5 golpes en seco, se volvió a rellenar la probeta hasta los 1000 ml y se le volvió a aplicar 5 golpes nuevamente, este proceso se repitió hasta lograr 25 golpes. 3) Se procedió a pesar la probeta junto con las zeolitas y se registró este dato en la bitácora. 4) Por último se realizó el cálculo

restando el peso de la probeta tomado inicialmente al último peso obtenido, con el único propósito de obtener el peso de la muestra de zeolitas en gr. y este dato dividirlo entre el volumen de 1000 ml convertidos a  $\text{cm}^3$  y así se obtuvo a nivel experimental el valor de la densidad aparente en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ . NOTA: Este experimento se realizó 10 veces consecutivamente.

**Obtención de la densidad absoluta de las zeolitas**, realizamos este análisis en el laboratorio de Tecnología del Agua ubicado en la DacBiol de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Este parámetro es de relevancia ya que al ser partículas heterogéneas es el único método en el que se puede evaluar su volumen con mayor precisión (Teorema de Pitágoras). 1) Se pesó 500 gr. de zeolitas en una balanza de precisión. 2) Previamente se aforó un picnómetro de acero al cual se le colocó agua potable a temperatura ambiente la cual fue atrapada en una probeta de vidrio y se esperó hasta que escurriera todo el excedente de agua por el orificio del picnómetro. 3) Luego de manera lenta y con mucho cuidado se colocó la muestra en el picnómetro y el agua empezó a escurrir por el orificio, donde esta fue escurriendo hacia la probeta de vidrio, se esperó que dejara de salir agua del orificio y se procedió a tomar el dato del volumen de agua que quedó atrapado en la probeta anotándolo en la bitácora. NOTA: Este experimento se repitió 10 veces. 4) Se procedió hacer el cálculo matemático dividiendo el peso de la muestra en gr entre el volumen de agua desalojado del picnómetro que quedó atrapado en la probeta de vidrio en ml y que se convirtió a  $\text{cm}^3$ .

**Obtención del peso específico de las zeolitas**. La determinación del peso específico de una muestra de zeolitas se realizó de la siguiente manera: 1) Se secaron 150 g de la muestra en una cápsula de porcelana durante 24 horas a una temperatura de  $105^\circ\text{C}$  en el horno del laboratorio de Cual y Cuanti del Instituto Tecnológico de Villahermosa (ITVH). 2) Una vez transcurrida las 24 h se sacó la muestra y se resguardó en un desecador para protegerla de la humedad y no alterara los resultados. 3) Se colocaron los 150 g de la muestra en vaso de precipitado de 500 ml y a este se le añadieron 100 ml de agua destilada para después hervirlo durante 5 minutos, todo esto con el fin de que se expulsara el aire que pudiera quedar. 4) Se pesó un matraz Erlenmeyer de 300 ml 5) Una vez que transcurrieron los 5 minutos donde hirvió la muestra, se dejó enfriar y se llevó la muestra al matraz. 6) Se llenó con agua destilada hasta la marca. 7) Se pesó el agua más el matraz más la muestra de zeolitas.

Se utilizó la siguiente fórmula con la que se llegó al resultado del peso específico:

$$S = \frac{\text{Peso de la muestra (150 g)}}{\text{Volumen de la muestra}}$$

**Obtención de la porosidad de las zeolitas**. Este parámetro fue calculado matemáticamente. Es importante recalcar que para esta investigación se realizó su cálculo en laboratorio de manera que fuese indicativa de la que existe realmente en los reactores convencionales, por ello se optó por analizar con el método de Hulbert y Feben en donde se siguieron los pasos siguientes: 1) Previamente se lavó 150 g de la muestra de zeolitas y se dejó secar en el horno por 24 h a una temperatura de  $105^\circ\text{C}$ . 2) A una probeta de vidrio de 250 ml se le agregó agua del grifo hasta la mitad (125 ml). 3) Se agregaron los 150 g de la muestra a la probeta con agua. 4) Se marcó la probeta con un lápiz especial, el borde superior de la piedra. 5) Se removió la piedra y el agua del tubo y se procedió a realizar el cálculo en porcentaje de porosidad.

La porosidad en porcentaje será igual a:

$$P = \frac{\text{Volumen de vacíos}}{\text{Volumen de la muestra}} \times 100$$

**Obtención de la solubilidad en ácido clorhídrico (HCl) de las zeolitas.** La solubilidad en ácido clorhídrico de las zeolitas nativas se determinó de la siguiente manera: 1) Con ayuda de la balanza analítica del laboratorio de Cual y Cuanti del Instituto Tecnológico de Villahermosa (ITVH), se pesó una pequeña muestra de zeolitas con un peso de 10 g en una capsula de porcelana. 2) Se lavó muy bien con agua destilada para quitar el exceso de tierra y polvo. 3) Se dejó secar en el horno por 24 h a una temperatura de 105 °C. 4) Se preparó una disolución de HCl al 40 % y para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \frac{V}{V} = \frac{\text{Volumen del soluto (ml)}}{\text{Volumen de la solución (ml)}} \times 100$$

Despejando la fórmula:

$$\text{Volumen del soluto} = \frac{\left(\% \frac{V}{V} \text{ de solución}\right) (\text{Volumen de la solución})}{100}$$

Una vez hecho los cálculos para la disolución de HCl al 40% se procedió a realizarla. 5) Para ello se utilizó la campana de extracción, una probeta de 100 ml donde se vertió el ácido clorhídrico y un matraz de aforo con tapón. 6) Aunado a esto, se llevó hasta la marca de aforo con agua destilada y se mezcló. 7) Obtenida la disolución se cambió a un frasco de color ámbar. 8) Transcurrida las 24 horas, se sacó la muestra del horno con un guante térmico. 9) Posteriormente se dejó enfriar y se sumergió la muestra en el HCl que previamente se preparó y donde se dejó otras 24 horas a una temperatura de 18–20 °C. 10) Pasado el tiempo, se lavó la muestra con agua destilada, se dejó secar para pesarla de nuevo.

El porcentaje de solubilidad será:

$$\% \text{ de Solubilidad} = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso original}} \times 100$$

### Diseño y construcción del sistema experimental de lecho empacado.

Para el diseño se tomó en cuenta las características de los biorreactores tradicionales, haciendo una fusión de los que trabajan con lechos fluidizados y lechos empacados, se utilizó la hoja de cálculo Excell, y software como Autocad y Revit. El sistema experimental fue construido de manera tradicional en la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, al lado de la cisterna receptora de las aguas domésticas generadas en dicha división.

### Experimentación de las zeolitas nativas en el reactor de lecho empacado

Es de importancia mencionar que las zeolitas tanto de río como las de cerro su diámetro osciló en un rango de (0.5 cm < Dp < 0.75 cm) fueron preparadas previamente antes de introducirlas en los reactores (lavadas con agua potable, agregando agua desionizada en las últimas lavadas y secadas a temperatura ambiente, para que se encontraran completamente

limpias antes de iniciar el experimento. Se procedió a introducir las en el sistema para evaluar las zeolitas de río en el reactor seguidas de las zeolitas de cerro de desecho y por último la zeolita comercial en igualdad de condiciones para alturas de 50%, 60% y 73% en el lecho empacado quedando de 0.75, 0.90 m y 1.10 m respectivamente.

### Cálculo de los parámetros hidrodinámicos

El sistema fue analizado para 3 diferentes TRH los cuales fueron calculados con la siguiente ecuación teórica  $TRH = V/Q$  donde V es el volumen interno (litros) ocupado por la columna de PVC y Q es el flujo volumétrico (gasto, caudal) (litros/día) en el afluente y efluente de los reactores.

### Medición de parámetros en el sistema experimental

El sistema experimental inició operación con un periodo de 270 días para todas las muestras, es decir, los primeros 30 días se colocaron las zeolitas a una altura de 0.75m (50%) evaluando durante 10 días el TRH que fue de 6 horas, posteriormente otros 10 días se aumento el TRH a 12 horas y finalmente los últimos 10 días el TRH fue de 24 horas, de manera similar pasando ese tiempo se aumento la altura del lecho empacado a 0.90m (60%) y se evaluaron nuevamente los TRH de 6, 12 y 24 horas. Finalmente se repitió el mismo procedimiento de periodos de tiempo para la altura de 1.10m (73%). Se llevó un análisis minucioso de los siguientes parámetros Q (Caudal)  $m^3/día$ , TRH (Tiempo de Retención Hidráulico) (día),  $L_v$  (Carga Orgánica Volumétrica) ( $kgDQO/L \cdot día$ ),  $L_s$  (Carga Orgánica Superficial) ( $kg/día \cdot m^2$ ), ER Eficiencia de Remoción de Materia Orgánica (%),  $S_e$  (Superficie Específica) ( $m^2/m^3$ )

### Gasto o caudal ( $m^3/día$ )

Es la cantidad de volumen de agua que atraviesa una tubería ó un deposito en un determinado tiempo.

$$Q = \frac{V}{TRH}$$

Donde:

V = Volumen ( $m^3$ )

TRH = Tiempo de retención hidráulico (día)

### TRH (Tiempo de Retención Hidráulico) (día)

Ha sido definido como el tiempo que se requiere para que un flujo que tiene un sustrato orgánico, inicie su recorrido desde el afluente hasta el efluente en un sistema como un reactor biológico, teniendo un contacto con el material de soporte, quien debe ser el responsable de la remoción de la materia orgánica, en esta investigación se determinó con la DQO (Demanda Química de Oxígeno). La fórmula utilizada fue para flujo pistón ideal (Crites & Tchobanoglous, 2000).

$$TRH = \theta_H = \frac{V}{Q}$$

Donde:

V = Volumen ( $m^3$ )

Q = Caudal ( $m^3/día$ )

### **L<sub>v</sub> (Carga Orgánica Volumétrica) (kgDQO/L.día)**

Esta definida como la carga orgánica que entra a un sistema en un determinado tiempo ( $Q \times S_0$ ) además de un volumen del sistema que estará en depuración, es común mencionarlo como la relación de la concentración contaminante del afluente ( $S_0$ ), expresado en kgDQO/m<sup>3</sup> involucrando al (TRH). Expresado de la siguiente manera.

$$L_v = \frac{Q \times S_0}{V} = \frac{DQO \times Q}{V} = \frac{S_0}{TRH}$$

Donde:

Q = Gasto ó Caudal (m<sup>3</sup>/día)

S<sub>0</sub> = Carga Orgánica en el Afluente ó Concentración de DQO (mgDQO/L)

V = Volumen (m<sup>3</sup>)

TRH = Tiempo de retención hidráulico (día)

### **L<sub>s</sub> (Carga Orgánica Superficial) (kg/día\*m<sup>2</sup>)**

Este parámetro tiene como característica que es de diseño físico, permite identificar la cantidad de materia orgánica en un determinado tiempo, que ingresa a un reactor, esta materia orgánica es la que se pone en contacto con el área disponible en el medio de soporte, y así, se logra la remoción utilizando el área de contacto.

$$L_s = \frac{Q \times S_0}{A_{\text{contacto}}}$$

Donde:

Q = Gasto ó Caudal (m<sup>3</sup>/día)

S<sub>0</sub> = Carga Orgánica en el Afluente ó Concentración de DQO (kgDQO/m<sup>3</sup>)

A<sub>contacto</sub> = Área de contacto en el medio de soporte (m<sup>2</sup>)

### **ER Eficiencia de Remoción de Materia Orgánica (%)**

El determinar este parámetro nos permite plantear las base fundamental en un sistema de depuración de aguas residuales. Está definido como el porcentaje de materia orgánica que queda atrapado dentro del reactor biológico como biomasa generada durante el tratamiento, es decir, en el efluente debe reducirse o eliminar la carga orgánica suministrada en el afluente determinando la calidad del funcionamiento del reactor.

La fórmula para calcular la eficiencia se expresa de la siguiente manera:

$$\% \eta_{\text{remoción}} = \frac{DQO_{\text{afluente}} - DQO_{\text{efluente}}}{DQO_{\text{afluente}}} * 100$$

Donde:

% $\eta$  = Eficiencia de remoción de la materia orgánica (%)

DQO<sub>afluente</sub> = Cantidad de materia orgánica en el afluente (entrada) (mg/L)

DQO<sub>efluente</sub> = Cantidad de materia orgánica en el efluente (salida) (mg/L)

## Se Superficie Específica (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

Este parámetro se calcula con la finalidad de determinar que área de contacto en m<sup>2</sup> ofrece el medio de soporte a los microorganismos para el proceso de depuración en un m<sup>3</sup> de volumen. Se encuentra con la siguiente ecuación:

$$Se = \frac{A_{MEDIO\ SOPORTE}}{V_{\acute{U}TIL}}$$

Donde:

Se = Superficie específica del medio de soporte (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

A<sub>MEDIO DE SOPORTE</sub> = Área total del medio de soporte en la superficie (m<sup>2</sup>)

V<sub>ÚTIL</sub> = Volumen libre por donde atraviesa el flujo hacia el efluente (m<sup>3</sup>)

## Cinética de primer orden

Un modelo cinético es esencial en el estudio de la remoción de la materia orgánica, es por ello que se consideró la siguiente ecuación que representa una cinética de primer orden (Mara, 1978), en donde lo que se busca determinar es el coeficiente de transferencia másico k.

$$\frac{L_e}{L_i} = e^{-k \frac{V Se}{Q}}$$

Donde:

Le= DQO del efluente (mg/L)

Li= DQO del afluente (mg/L)

k= Coeficiente de transferencia másico (m/día)

V= Volumen útil del reactor (m<sup>3</sup>)

Se = Superficie específica del medio de soporte (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

Q= Caudal (m<sup>3</sup>/día)

Está ecuación es un modelo matemático que se utiliza en el diseño de reactores biológicos con flujo pistón, donde el coeficiente de transferencia másico se determina a una temperatura específica, y que puede ser adaptada a la zona de estudio o donde se instale el experimento utilizando la ecuación de Arrhenius. En esta investigación se utilizó la temperatura promedio de 28.77 °C medida en campo y el coeficiente de actividad bacterial (θ) igual a 1.08 que lo utilizan en investigaciones basadas en el tratamiento biológico de lodos activados, uno de los más utilizados en la actualidad (Romero, 2000).

$$k_T = k_{28.77^\circ C} (1.08)^{T-28.77^\circ C}$$

## Método de ajuste de mínimos cuadrados

### Ecuación lineal

En esta investigación se utilizó el método de los mínimos cuadrados el cual está diseñado para calcular la recta de regresión lineal que minimiza los residuos, es decir, encontrar la recta en la que los datos experimentales se encuentren más cerca de este planteamiento y en un futuro utilizar esa ecuación como herramienta para determinar la degradación de los contaminantes en tratamientos similares de agua residual, esto es, las diferencias entre los valores reales y los estimados por la recta. Se revisa su fundamento y la forma de calcular los coeficientes de regresión con este método (Molina, 2020)

## Ecuación cuadrática con logaritmos

En algunas situaciones reales de tipo experimental no se puede plantear una ecuación a menos que los datos obtenidos en campo sean convertidos a un lenguaje matemático, dando origen a ecuaciones cuadráticas, y si las combinamos con logaritmos podemos plantear ecuaciones más apegadas a la realidad de nuestros datos experimentales.

Se decidió hacer un ajuste de mínimos cuadrados con logaritmos, ya que por la naturaleza de los datos, reforzados con información de investigaciones previas, nunca en un tratamiento biológico se tendrá una degradación y/o remoción al cien por ciento de los contaminantes en el agua residual, es decir, matemáticamente la gráfica se comportará de manera asíntota, lo que quiere decir que de forma lineal es imposible plantear una ecuación que represente los datos experimentales, lográndolo de manera más acertada en la combinación con logaritmos.

## Resultados y discusión

### Zeolitas nativas en esta investigación

Las zeolitas nativas del estado de Tabasco (río y cerro trituradas de desecho), se comprobó que cuentan con propiedades físicas, y químicas para poder ser estudiadas en esta investigación en el tratamiento de agua residual doméstica concordando con (Flores, 2012) que estudio las zeolitas en el área de agronomía y ambiental, al igual que los investigadores cubanos (Céspedes *et al.*, 2011) que desarrollaron un estudio in situ de zeolitas para proponer este medio de soporte de bajos costos en el tratamiento de aguas. Por otra parte, investigadores mexicanos (Hernández *et al.*, 2010) ya afirmaban el potencial de las zeolitas para el tratamiento de aguas residuales. En la Tabla 1, se presentan los resultados obtenidos de los estudios realizados a las zeolitas nativas de Tabasco, México.

**Tabla 1.** Características de las zeolitas de esta investigación

Material Pétreo	Zeolita de Río	Zeolita de Cerro de desecho	Zeolita Comercial
Densidad absoluta	2.6 g/cm <sup>3</sup>	2.7 g/cm <sup>3</sup>	2.65 g/cm <sup>3</sup>
Densidad aparente	1.55 g/cm <sup>3</sup>	1.47 g/cm <sup>3</sup>	1.60 g/cm <sup>3</sup>
Peso específico	2.29 g/cm <sup>3</sup>	2.42 g/cm <sup>3</sup>	2.35 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	14.1 %	15.2 %	15.0 %
Porosidad calculada matemáticamente	0.40	0.46	0.40
Porosidad calculada en laboratorio	0.53	0.62	0.51
Conductividad eléctrica	65 ms/cm	70 ms/cm	67 ms/cm
pH	7.3	7.4	7.0
Solubilidad en ácido clorhídrico	59.66 %	29.96 %	51.30 %

### Diseño y construcción del sistema experimental de lecho empacado.

Se logró el diseño y construcción del sistema utilizando agua potable para probar la tubería antes de su arranque y se dejó la instalación para que el agua de la cisterna fuese transportada a través de una bomba a un tinaco con capacidad de 2100 L el cual a través de

tuberías de ½ pulgada por gravedad alimentaba al sistema experimental que contó con las siguientes características y dimensiones que se aprecian en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Características y dimensiones de reactores de 4 pulgadas de diámetro

Descripción	Unidad	Valor
Base de cada reactor y altura	cm	50 x 50 x 50
Diámetro Plenum	pulgadas	4
Altura Plenum	cm	20
Plato distribuidor con 7 toberas	pulgadas	4
Malla circular	pulgadas	4
Altura de la columna de PVC	cm	150

### Cálculo de parámetros de control bioquímico

Se inició el experimento en dos fases, en la fase 1 se evaluaron los tres tipos de zeolita y se encontró que los datos más relevantes fueron para la zeolita de cerro, posteriormente en una fase 2, se volvió a correr el experimento utilizando solo a la zeolita de cerro con TRH = 6, 12 y 24 h para los cuales cuando estuvieron estabilizados los reactores se procedió a calcular los parámetros bioquímicos que se pueden apreciar en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Datos obtenidos para los parámetros de control bioquímico

Parámetros de control BIOQUÍMICO	AFLUENTE	EFLUENTE		
		6 h	12 h	24 h
T (Temperatura) (°C)	25.26 ± 1.76 °C	29.17	28.77	29.17
pH (Potencial de Hidrógeno) (UpH)	8.63 ± 0.23	7.97	6.97	6.90
SDT (Sólidos Disueltos Totales) (mg/L)	950.50 ± 115.05	591.13	271.67	266.63
Color (UC)	1305.10 ± 141.46	470.80	204.43	203.43
Turbiedad (UNT)	96.37 ± 7.79	20.80	3.53	3.43
DQO (Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	373 ± 43	59.75	10.15	9.86

El agua residual estudiada se considera de concentración media puesto que la DQO está en el rango media débil (250-500 mg/L) según (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### Cálculo de parámetros de control hidráulico

En la Tabla 4, se presentan los datos matemáticos calculados de los parámetros de control hidráulico.

**Tabla 4.** Datos obtenidos para los parámetros de control hidráulico

<b>Parámetros de control HIDRÁULICO</b>			
Q (Caudal) m <sup>3</sup> /día	0.01216	0.02432	0.04864
TRH (Tiempo de Retención Hidráulico) (día y horas)	(24 h)	(12 h)	(6 h)
Lv (Carga Orgánica Volumétrica) (kgDQO/L.día)	0.373	0.746	1.492
Ls (Carga Orgánica Superficial) (kg/día*m <sup>2</sup> )	0.004	0.008	0.016
ER Eficiencia de Remoción de Materia Orgánica (%)	83.98	97.28	97.36
Se (Superficie Específica) (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	254.01	254.01	254.01

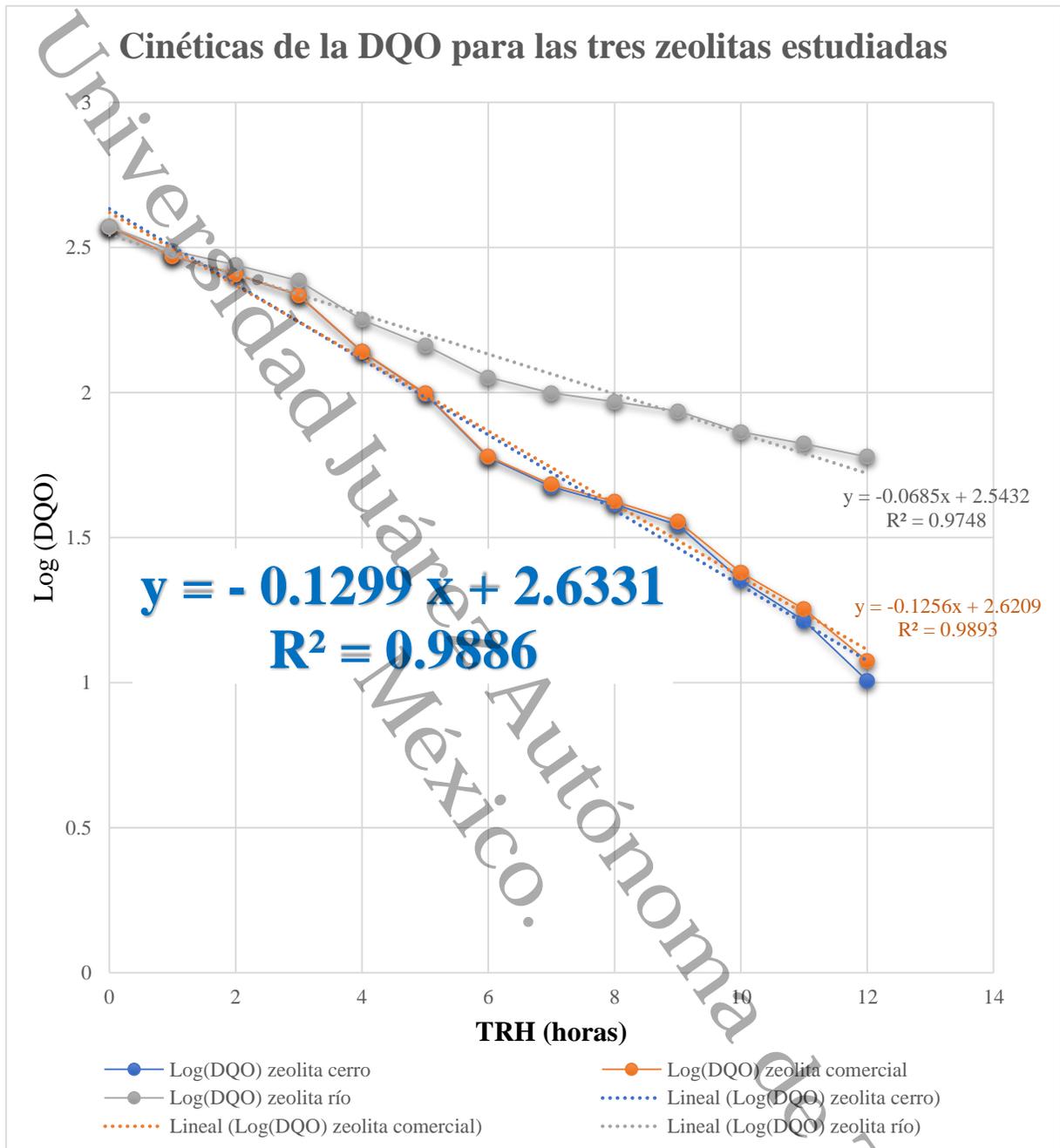
Los investigadores (Díaz, Dueñas y Cabrera 2014) demostraron que al manejar reactores en igualdad de condiciones con respecto al medio de soporte solo para evaluar el tránsito de un fluido en una columna experimental los resultados serán similares, concordando con ellos en este experimento ya que en los resultados obtenidos fueron muy similares en nuestro caso. Por otra parte no coincidimos del todo con los investigadores cubanos porque se considera que en toda investigación para determinar una altura y TRH apropiados a pesar de apoyarse con la literatura estas decisiones deben tomarse con varias corridas donde esten involucrados estos parámetros antes de comenzar a estudiar el agua contaminada (Gainza *et al.*, 2012).

#### **Cálculo de las ecuaciones de degradación de la DQO**

Se evaluó de manera gráfica el comportamiento de la DQO con los tres tipos de zeolita (río, de cerro y comercial) para un TRH=12 h y H=0.9 m, comportándose como se puede apreciar en la Tabla 5 y Figura 1, datos tomados en campo. Observando que el mejor tratamiento fue el de las zeolitas de cerro.

**Tabla 5.** Degradación de la DQO para los tres tratamientos con un TRH=12 h y H=0.9 m, datos tomados en campo

<b>Tiempo (h)</b>	<b>ZEOLITA DE CERRO</b>	<b>ZEOLITA COMERCIAL</b>	<b>ZEOLITA DE RIO</b>
0	373.00	373	373
1	294.69	294.81	307.95
2	255.53	255.71	275.43
3	216.38	216.62	242.91
4	138.06	138.42	177.86
5	98.91	99.33	145.33
6	59.75	60.23	112.81
7	47.35	48.14	99.60
8	41.15	42.10	92.99
9	34.95	36.05	86.38
10	22.55	23.96	73.17
11	16.35	17.92	66.56
12	10.15	11.87	59.95



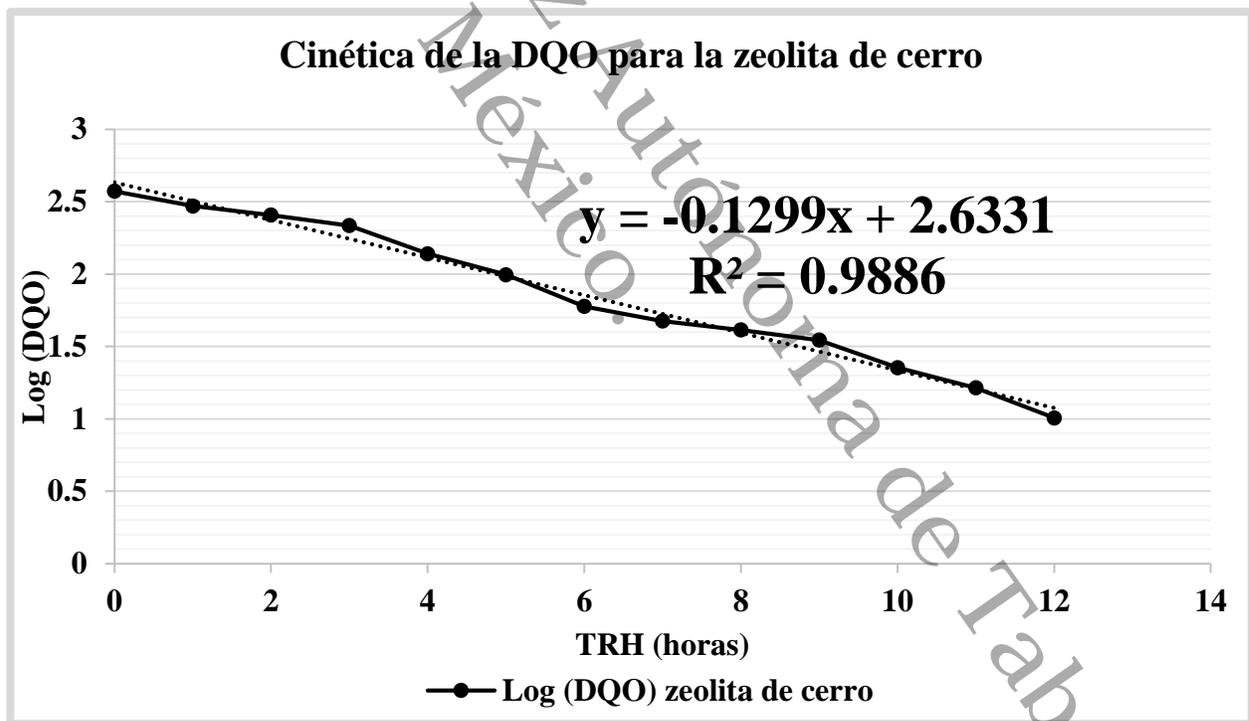
**Figura 1.** Ecuaciones de cinética de la degradación de la DQO en los tres tratamientos

#### **Cálculo de la cinética de primer orden para la zeolita de cerro**

Se ha descrito anteriormente la ecuación de modelo cinético, sin embargo para el cálculo de la cinética en esta investigación, se planteo con mayor sencillez mostrando un coeficiente de variación excelente ( $R^2 = 0.9886$ ), como se aprecia en la Tabla 6 y la Figura 2. Esta ecuación de cinética esta planteada con el tratamiento que nos arrojó los mejores resultados de respuesta: zeolita de cerro con un  $H=0.9$  m y un TRH de 12 h, ya que a partir de ese tiempo hasta las 24 h que se monitoreo, no presento eficiencias de remoción significativas.

**Tabla 6.** Datos de campo ajustados a logaritmos para la cinética de primer orden

(TRH) (horas)	(DQO) zeolita de cerro	Log (DQO) zeolita de cerro
0	373	2.572
1	294.69	2.469
2	255.53	2.407
3	216.38	2.335
4	138.06	2.140
5	98.91	1.995
6	59.75	1.776
7	47.35	1.675
8	41.15	1.614
9	34.95	1.543
10	22.55	1.353
11	16.35	1.214
12	10.15	1.006

**Figura 2.** Constante de degradación  $k$ , calculada con la ecuación de cinética de primer orden

Se logró un ajuste donde  $y = -0.1299x + 2.6331$  y un  $R^2 = 0.9886$  evaluando con los datos experimentales

Se tiene congruencia en el valor de  $k = -0.1299$  encontrado, según reporta (García, 2020) que desarrollo una cinética de primer orden para humedales donde los TRH son

considerablemente mayores comparandolo con este tratamiento biológico, las constantes cinéticas  $k$  que obtuvo esta investigadora fueron de 0.61/día para el HAFL-E y de 1.27/día para el HAFS-E.

Con respecto al  $R^2$  podemos observar que se logró un buen porcentaje casi del 100% indicándonos que el modelo explica con confianza la variabilidad de los datos de respuesta.

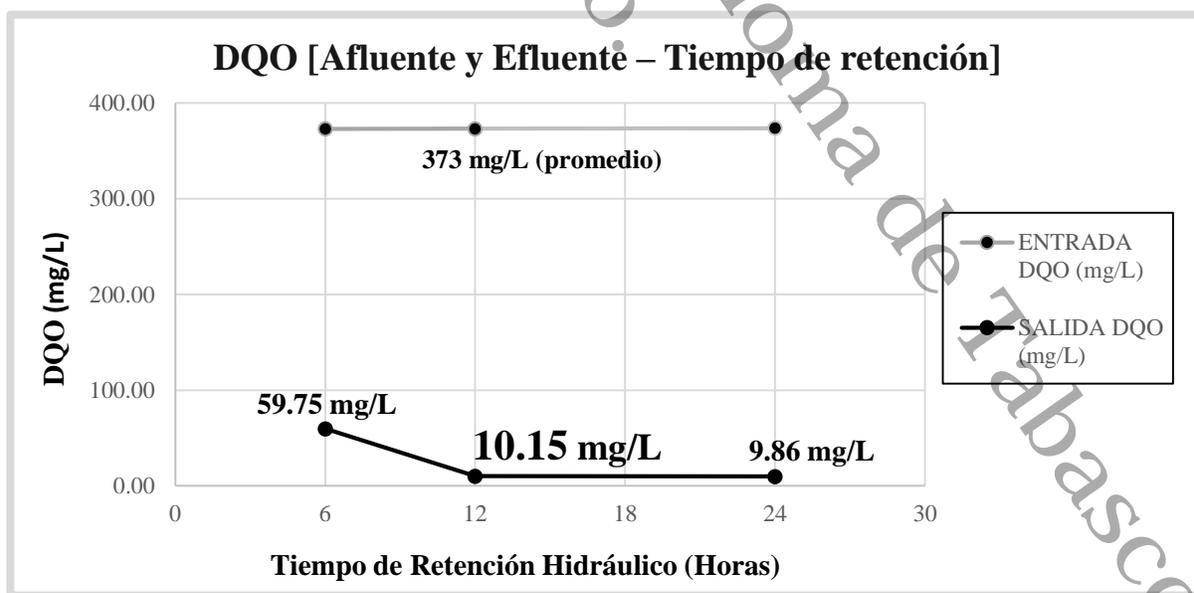
### Comportamiento de degradación de la DQO contra el TRH

Los valores promedios de la DQO evaluados con el medio de soporte zeolita de cerro se pueden apreciar en la Tabla 7, además del análisis de su eficiencia en el tratamiento.

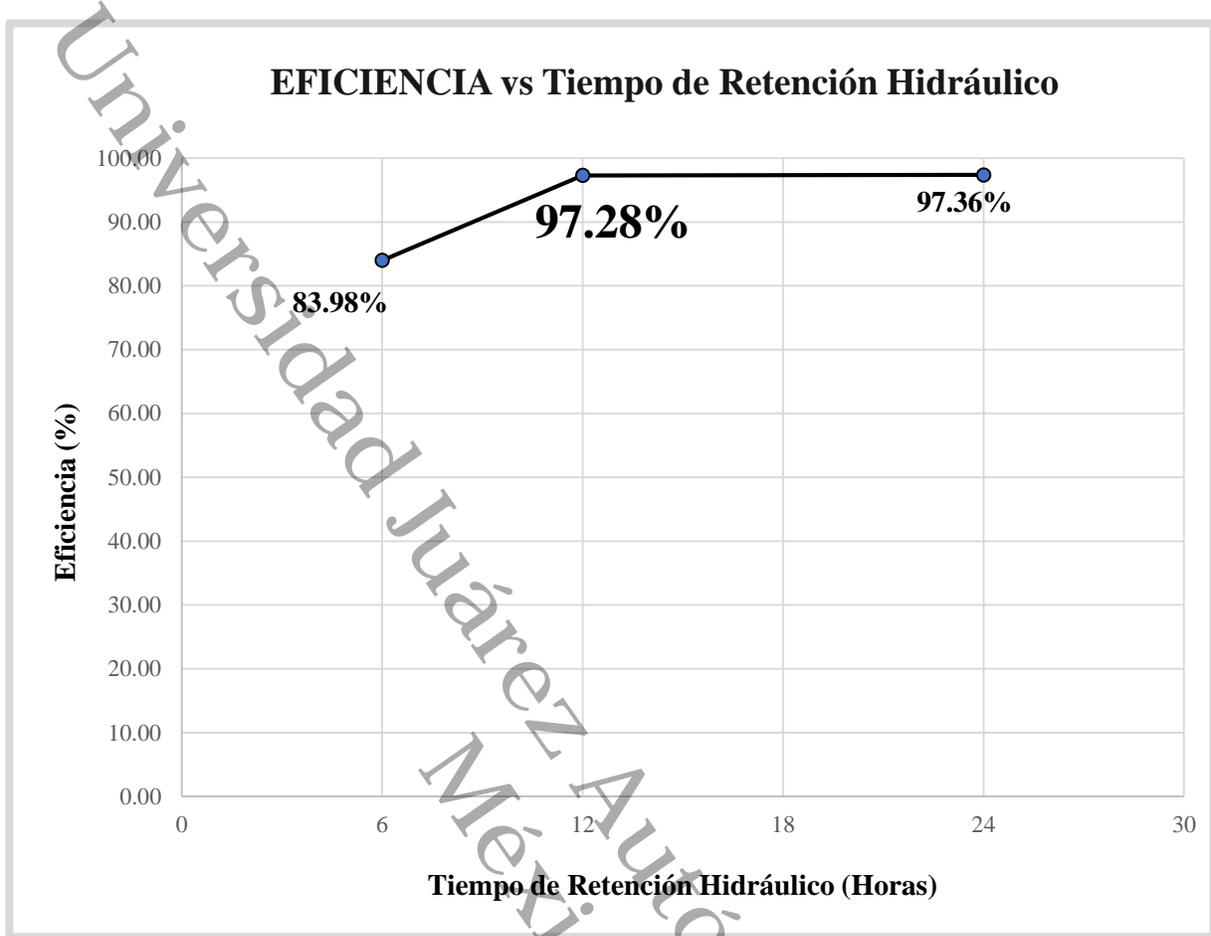
**Tabla 7.** DQO y degradación desde el afluente hasta el efluente y la eficiencia obtenida

Valores promedios de la dqo			Eficiencia
TRH (horas)	Entrada DQO (mg/l)	Salida DQO (mg/l)	DQO contra TRH
6	372.97	59.75	83.98
12	373.16	10.15	97.28
24	373.48	9.86	97.36

En la Figura 3 podemos observar el comportamiento de la DQO con respecto al tiempo como se va degradando la materia orgánica desde un tiempo de 6 h hasta 24 h, observando que a las 12 h ya se degrado considerablemente, y aunque a las 24 h siguió disminuyendo el porcentaje de degradación, se considera que el tiempo de 12 h es el que realmente presentó un mejor comportamiento en el tratamiento. En la Figura 4 se aprecia, como a medida que aumenta el TRH, aumenta también la eficiencia, sin embargo, a partir de las 12 h, aunque la eficiencia aumenta, ya no es redituable el TRH, ya que el incremento de la eficiencia no crece de manera significativa, que se pueda garantizar mejor tratamiento al agua residual.



**Figura 3.** Valores promedios de la DQO y su comportamiento con respecto al TRH



**Figura 4.** Eficiencias de remoción de la degradación de la DQO con respecto al TRH

### Conclusión

Las zeolitas nativas del estado de Tabasco, México, cumplieron ampliamente con la expectativa de tener propiedades físicas, mecánicas y químicas para su uso en el tratamiento de agua residual doméstica, garantizando con ello ahorro en costos de operación al utilizarlas como medio de soporte en procesos biológicos de reactores de lecho empacado.

Utilizando una cinética de primer orden se calculó un ajuste donde  $y = -0.1299x + 2.6331$  y un  $R^2 = 0.9886$  calculada con los datos experimentales donde se utilizó en el medio de soporte a la zeolita de cerro con un  $H = 0.9$  m y un TRH = de 6, a 12 h.  $R^2$  se concluye que se logra un porcentaje adecuado, indicándonos que el modelo explica con confianza la variabilidad de los datos de respuesta.

De los tres TRH evaluados se concluye que el más recomendable es el de 12 h el cual presentó un mejor comportamiento en la degradación de la DQO. Es decir, al ir aumentando el TRH se fue incrementando la eficiencia de remoción ER, de 83.98 % a las 6 h, 97.28 % a las 12 h y 97.36 % a 24 h, analizando que de 12 a 24 h sólo se incremento la eficiencia en 0.08 % mejora no significativa y que en la práctica significa costos innecesarios.

## Agradecimientos

La autora principal, agradece al Tecnológico Nacional de México, por gestionar en tiempo y forma la BECA-COMISIÓN y el apoyo financiero de beca PRODEP, para contar con el tiempo suficiente para la realización de esta investigación. De igual manera se agradece a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco División DacBiol por el apoyo incondicional brindado en sus instalaciones y a sus gestores Dr. Raúl Germán Bautista Margulis y Dr. Gaspar López Ocaña por todas las facilidades para la realización de este proyecto.

## Referencias

- Cárdenas, C., Landeta, K., Perruolo, T., Ángulo, N., Yabroudi, S., Trujillo, A., Flores, P. (2014). “Determinación de las constantes cinéticas para el diseño de tratamientos biológicos de un efluente lácteo en régimen discontinuo”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 37, No 1, 11 - 19, 2014.  
[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702014000100003](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702014000100003)
- Céspedes-Ortiz, MsC., Rodríguez-Iznaga, I., Petranovskii, V., Rizo-Beyra, R., Aguilera-Domínguez, L., (2011). “Zeolitas naturales de diferentes yacimientos cubanos: composición y estabilidad química y térmica”. Revista Cubana de Química [en línea] 2011, XXIII [Fecha de consulta: 16 de mayo de 2018] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543722011> ISSN 0258-5995.
- Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Colombia: McGraw-Hill.
- Díaz-Marrero, M.A., Dueñas-Moreno, J., Cabrera-Díaz A., (2014). “Estudio Hidrodinámico de reactores empacados de flujo ascendente (REFA)”. CIH Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol, XXXV, No.3, Sep-Dic 2014, p. 101-108. CITMA Certificado, Scielo. ISSN 1815-591X, RNPS 2066.
- Duque-Sarango, P., Heras-Naranjo, C., Lojano-Criollo, D., Vilorio, T., (2018) “Modelamiento del tratamiento biológico de aguas residuales; estudio en planta piloto de contactores biológicos rotatorios”. Revista Ciencia UNEMI. Vol. 11, No 28, Septiembre - Diciembre 2018, pp. 88 – 96. ISSN 1390-4272 Impreso. ISSN 2528-7737 Electrónico <http://dx.doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol11iss28.2018pp88-96>
- Florencia Agosto, María. (2012). “Estudio de zeolitas procedentes de depósitos Argentinos. Aspectos tecnológicos que posibiliten su aplicación en agroindustria y contralor ambiental”. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Ciencias Exactas. Departamento de Química.
- Gainza-Delgado, Y., Rojas-Vargas, A., Trujillo-Nieves, M.E., Rodríguez-Hernández, J.C., (2012). “Diseño y evaluación hidrodinámica de una minicolumna empacada”. RTQ vol.32 no.3 Santiago de Cuba sept.-dic. 2012. Tecnología Química versión On-line ISSN 2224-

6185. Scielo. Consultado el 1 de octubre de 2019. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852012000300004](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852012000300004)
- García, R.F.Y. (2020). “Cinética de degradación en aguas residuales domésticas con humedales artificiales utilizando *Echinodorus paniculatus*”. Tesis para obtención de grado Maestría en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ciencias Biológicas. <http://ri.ujat.mx/handle/20.500.12107/3446>
- González. G.J.T. (2017). “Determinación de la eficiencia del tratamiento de un agua residual municipal mediante un humedal modificado a través de las constantes cinéticas de parámetros fisicoquímicos”. Tesis que para obtener el grado de: Maestro en Ciencias e Ingeniería Ambientales. Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/6889>
- Hernández, M.A.; Rojas, F.; Lara, V.H.; Portillo, R.; Castelán, R.; Pérez, G.; Salas, R. (2010). “Estructura porosa y propiedades estructurales de mordenita y clinoptilolita”. Superficies y vacío, vol. 23, pp. 51-56. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C. Distrito Federal, México. ISSN: 1665-3521.
- Mara, D.; (1978). “Sewage treatment in hot climate”. John Wiley & Sons. 112-113
- Misaelides Panagiotis, (2011). “Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review, Microporous and Mesoporous Materials” 144, 15.
- Molina, A.M.; (2020). “La distancia más corta el método de los mínimos cuadrados”. <https://anestesiario.org/2020/la-distancia-mas-corta-el-metodo-de-los-minimos-cuadrados/>. Consultado el 15 de febrero de 2021.
- Muñoz Iniestra, Soler Aburto, López Galindo y Hernández Moreno (2013). Edafología, Manual de métodos de análisis de suelos. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores de Iztapalapa México, Distrito Federal. pp. 139
- Nardiet, I.R., Zaiat, M., y Foresti, E. (1999). “Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors”, Bioprocess Engineering, Vol.21, No.5, pp. 469-476, Berlin, Germany.
- Norma Oficial Mexicana 021-RECNAT-2000, la cual establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre de 2002. Recuperada de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997. Recuperada de: [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/10/NOM\\_001\\_002\\_003\\_SEMARNAT.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/10/NOM_001_002_003_SEMARNAT.pdf)



Romero, J.; (2000). “Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño”. Primera edición. Centro editorial. Santafé de Bogotá.

Smith, N.H.V. (2016). “Tratamiento de aguas residuales de plataformas marinas habitacionales mediante sistemas con biomasa inmovilizada”. Tesis que para optar por el grado de Maestra en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Ambiental – Agua.  
<http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1569?show=full>

Torres, Patricia; Rodríguez, Jenny A.; Uribe, Iris Eugenia; (2003). “Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: Influencia del medio de soporte. Scientia Technica Año IX, No 23, Diciembre 2003. UTP. ISSN 0122-1701.





Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

## CAPÍTULO 4

---

### Conclusiones Generales

---



## Conclusiones Generales

En la primera etapa de esta investigación se ha logrado demostrar que las zeolitas nativas de cerro y de río deben ser implementadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas en BLFFA puesto que son eficientes en la remoción de contaminantes básicos y favorecen los tiempos y costos de operación.

Todos los experimentos nos mostraron que, aunque no existieron diferencias estadísticas significativas en la elección de 12 o 24 h de TRH en la remoción de color, turbiedad y DQO, las mejores eficiencias de remoción para estos parámetros se alcanzan en 24 h de TRH.

La zeolita de cerro fue la que presentó el mejor rendimiento en la remoción de contaminantes básicos operando con 0.9 m de altura de lecho y con 24 h de TRH. Sin embargo, se propone la de 12 h ya que lo alcanzado en ese tiempo optimizará los procesos.

Para utilizar esta tecnología BLFFA es fundamental que previo al proceso se cuente con un sistema de pretratamiento para la eliminación de sólidos sedimentables y suspendidos.

También se recomienda que al evaluar en estos reactores su hidrodinámica queda demostrado ampliamente que estos estudios son inherentemente obligatorios para garantizar un estudio posterior en cualquier investigación donde se pretenda utilizar agua contaminada de cualquier fuente que la genere.

En la segunda fase de la investigación se evaluó la cinética a través de ecuaciones matemáticas ajustadas a datos de campo, que nos facilitaron el análisis de estos tratamientos. Para que cuando por situaciones adversas no se puedan adquirir todos los datos de campo, se tengan herramientas confiables y fidedignas para evaluar su eficiencia. Quedando demostrado que la función con logaritmos es la que más se ajusta a la realidad en este tipo de procesos.

Por otra parte, se invita a las autoridades correspondientes a utilizar los resultados de esta investigación en su quehacer diario en las responsabilidades que conlleva sus cargos.

Es por ello que se invita a investigadores a evaluar medios de soporte de origen nativo en las zonas donde se desee tratar aguas contaminadas de cualquier índole, además de incluir un estudio hidrodinámico antes de empezar a operar.

Finalmente, podemos recomendar la implementación del uso de los BLFFA para el tratamiento secundario de efluentes domésticos en sistemas descentralizados del sureste de México como una alternativa viable en el tratamiento de sus aguas residuales.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

# ANEXOS

---

## Evidencia de Artículos

---

