

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

ESTUDIO DE REMOCIÓN EN BIOFILTROS NO CONVENCIONALES.

DR. EDSON B. ESTRADA A./ INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA.

1. REMOCIÓN DE COMPUESTOS EMERGENTES MEDIANTE SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN

1.1 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN UN SISTEMA DE BIOFILTRO EMPACADO CON MATERIAL ORGÁNICO

La metodología empleada para la investigación se representa la Figura 1.

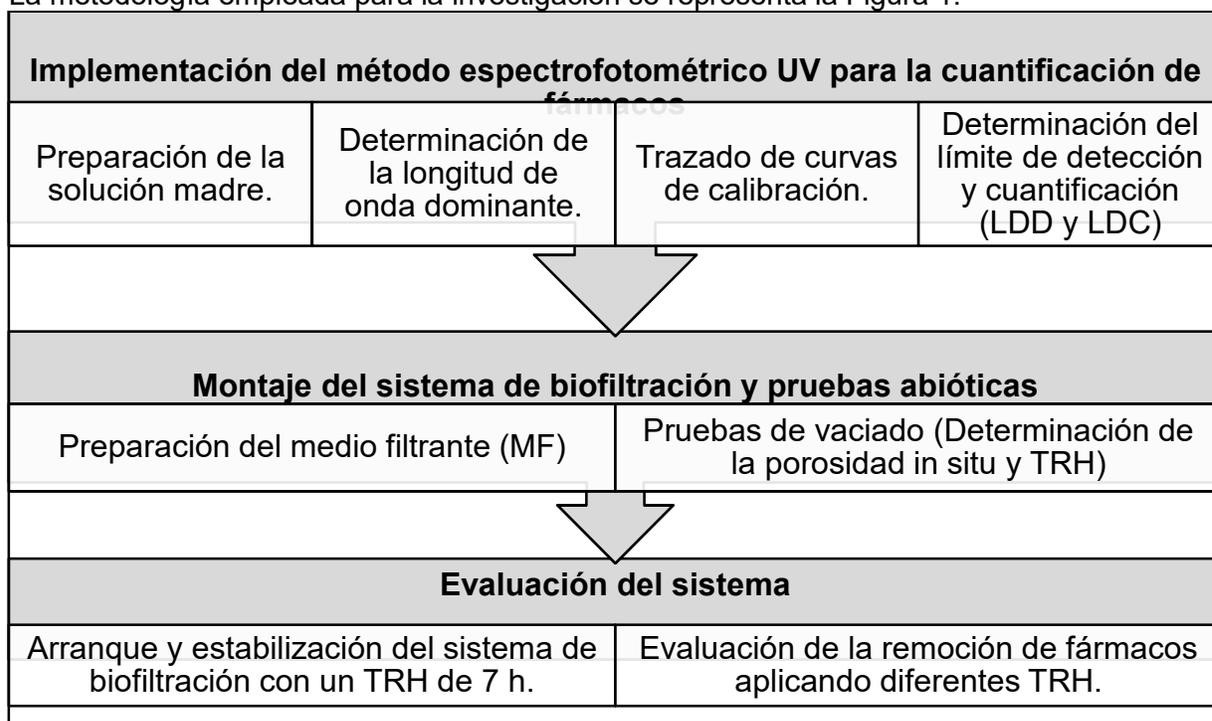


Figura 1. Diagrama de la metodología empleada para el desarrollo de la investigación

Método espectrofotométrico UV para la cuantificación de los fármacos

Se implementó un procedimiento nuevo para poder determinar la concentración de los compuestos seleccionados en el agua residual, éste fue adaptado como una alternativa de la cromatografía líquida y se caracteriza por su facilidad para la manipulación y tratamiento de las muestras, el bajo costo que representa y el poco tiempo que se emplea para realizar la medición. A continuación se describen los insumos y el procedimiento necesario para el desarrollo y aplicación del método.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Reactivos

El clorhidrato de metformina y clorhidrato de ciprofloxacino fueron obtenidos como tabletas comerciales de las marcas Setebaid y Z-Xin en presentaciones de 850 mg y 500 mg respectivamente. Para disolver los medicamentos solo se utilizó agua destilada.

Materiales y equipos

1 matraz volumétrico (1,000 mL)
15 matraces volumétricos (100 mL)
2 frascos ámbar (1,000 mL)
1 matraz kitasato (1,000 mL)
2 vasos de precipitados (1,000 mL)
1 celda de cuarzo, marca Hellma Analytics, mod. QC: 514
2 papel filtro, marca whatman # 40 (retiene partículas de 0.8 μm)
1 pipeta automática marca Biohit, mod. 5000 (500-5000 μL)
1 Agitador magnético
Baño ultrasónico, marca Auto Science, mod. AS5150B
Espectrofotómetro, marca Agilent Technologies, mod. Cary 60 (200-1100 nm)
Termoagitador, marca Corning, mod. PC-320
Balanza analítica, marca Adventure Ohaus, mod. AR2140

Preparación de la solución madre

Se preparó una solución madre (estándar) para cada fármaco con una concentración de 300 mg/L y 100 mg/L (metformina y ciprofloxacino respectivamente). Fueron pesadas en la balanza analítica las tabletas de cada medicamento con el fin de conocer la cantidad necesaria para alcanzar las concentraciones deseadas. Una vez pesados los medicamentos, éstos fueron diluidos con agua destilada en matraces volumétricos de 1 L manteniéndose en agitación durante una hora y posteriormente pasándolo al baño ultrasónico durante 15 minutos para mejorar la calidad de la dilución (en la preparación de la solución madre no se requirió de la pulverización de las tabletas ya que ambos medicamentos mostraron facilidad para disolverse en el agua y además para evitar pérdidas del medicamento al momento de trasvasarse). Por último las soluciones preparadas fueron filtradas con el papel filtro indicado en la lista de materiales y almacenadas en frascos de color ámbar para su posterior preservación a 4°C.

Determinación de la longitud de onda dominante

Para determinar la longitud de onda dominante de los medicamentos diluidos en agua, se tomaron 15 diluciones de la solución madre en matraces volumétricos de 100 mL y se probaron diferentes concentraciones hasta detectar el intervalo de trabajo en el espectrofotómetro. Se realizó el barrido espectrofotométrico de las muestras en un rango de 200 nm a 400 nm (rango ultravioleta) para probar las longitudes de onda mencionadas por Arayne y colaboradores en un estudio del 2009, en el que utilizaron soluciones farmacéuticas de metformina para su cuantificación por medio de un método espectrofotométrico y en ese

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

mismo rango de longitud de onda para verificar el comportamiento del ciprofloxacino. Los resultados se muestran en la sección de resultados y discusión de este trabajo.

Determinación del límite de detección (LDD) y cuantificación (LDC)

El barrido espectrofotométrico permitió determinar dos cosas, primero, la longitud de onda dominante al comparar el comportamiento de las 15 diluciones preparadas a partir de la solución madre, y segundo, el espectro resultante mostró que a determinada concentración (tanto superior como inferior) la lectura ya no presentó una relación entre la absorbancia y la longitud de onda dominante, estableciéndose un rango delimitado de trabajo para el método.

El límite de detección del método (entendido como la concentración mínima de un analito detectable por el método) fue determinado mediante el siguiente procedimiento:

1. Se realizó la medición de 10 blancos independientes y se calculó la media y la desviación estándar de dicha medición.
2. Los resultados obtenidos fueron relacionados mediante la Ecuación 1 para calcular la señal del límite de detección.

$$Y_{LDD} = \hat{y}_b + 3\sigma_b \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Y_{LDD} = Señal del límite de detección (adimensional)

\hat{y}_b = Promedio de la medición de blancos (adimensional)

$3\sigma_b$ = Tres veces la desviación estándar de la medición de blancos (adimensional)

3. Se calculó la concentración del límite de detección haciendo uso de la ecuación de la curva de calibración (Ecuación 2).

$$C_{LDD} = \frac{(\hat{y}_b + 3\sigma_b) - b}{m} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

C_{LDD} = Concentración del límite de detección (unidades de concentración)

b = ordenada al origen (adimensional)

m = Pendiente (adimensional)

El límite de cuantificación (LDC), entendido como la concentración más pequeña del analito que puede ser determinada con un nivel de exactitud y precisión aceptables, se determinó multiplicando el LDD por 3.18.

Curvas de calibración

El trazado de las curvas de calibración se realizó mediante una lectura simple de las diluciones preparadas, la única diferencia es que se descartaron todos los puntos que mostraron diferencias con respecto a la longitud de onda y relación absorbancia/concentración en el barrido espectrofotométrico. Los datos obtenidos de las

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

pruebas anteriormente descritas se presentan en la sección de resultados y discusión mediante gráficos que permiten visualizar el comportamiento de las muestras procesadas.

Montaje del sistema de biofiltración

Se montó una columna de acrílico de 4.5 L de volumen con dimensiones de 10 cm de diámetro y 55 cm de altura, a la cual se le instalaron mangueras en la parte superior e inferior que se utilizaron como conductos de entrada y salida (influyente y efluente) del agua residual en el sistema, asimismo, se acopló una entrada de aire en el costado inferior de la columna junto con un rotámetro que reguló un flujo de 500 mL/min de aire.

La columna fue empacada con 3.5 L de astillas de madera de ficus como medio filtrante, sobre una cama de grava de 500 mL para impedir la obstrucción del efluente por el contacto directo con las astillas. El medio filtrante fue inoculado con 500 mL de lodo activado de una planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados con nitrificación, esto para propiciar el crecimiento microbiano sobre la superficie del soporte orgánico. El caudal de entrada al biofiltro fue regulado por una bomba peristáltica de la marca Masterflex que succionaba el agua residual desde una garrafa de 20L hasta la parte superior del biofiltro, la salida del agua residual tratada o efluente se obtuvo por acción de la gravedad hacia el canal de desagüe. El esquema del biofiltro se observa en la Figura 2.

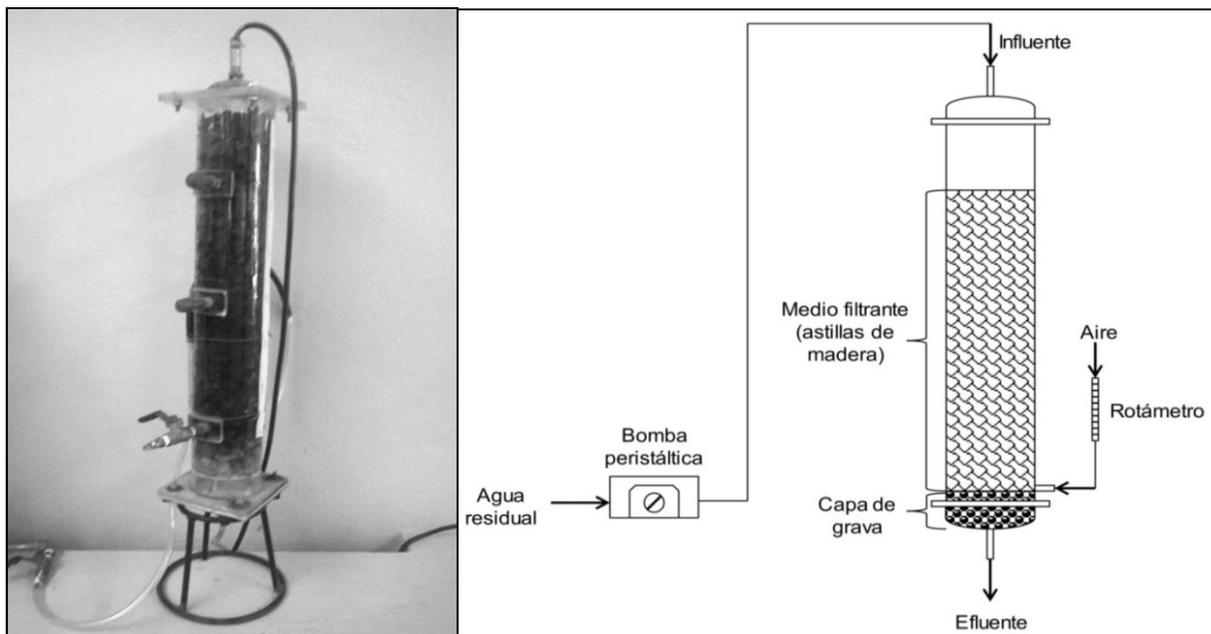


Figura 2. Fotografía y esquema del prototipo de biofiltración empleado

Preparación del medio filtrante y empacado del biofiltro

El material de soporte utilizado en el biofiltro fue el *Ficus Benjamina*, el cual, es un árbol siempre verde y de gran abundancia en la entidad que se puede utilizar para adornar y dar sombra en parques y áreas verdes, por tal motivo, su empleo como medio filtrante implica costos sumamente bajos ya que durante las temporadas de poda los residuos de éste pasan a ser un desecho (Hernández, 2010).

Una vez obtenido el material filtrante fue aplicado el tratamiento siguiente:

1. Se dejó secar al sol para facilitar el triturado.
2. Fue triturado hasta alcanzar la homogeneidad en el tamaño de estilla.
3. El material ya triturado fue tamizado con tamices de pruebas físicas.

El medio filtrante se humedeció al 65% antes de empacar los reactores, tal como se describe en Garzón-Zúñiga (2001), para corroborar la humedad se realizó una prueba simple tomando una muestra del MF y apretándola con los puños. Se dice que está humedecida al 65% si solo escurren unas cuantas gotas.

Determinación de la porosidad in situ y TRH (Pruebas de vaciado)

Ya listas las astillas y una vez empacada la columna de acrílico se procedió a realizar las pruebas de vaciado para determinar la porosidad y TRH del biofiltro. Estas pruebas fueron realizadas mediante el procedimiento descrito por Garzón-Zúñiga (2001). El procedimiento se describe a continuación.

1. Se pesa la columna de acrílico (reactor) vacío.
2. Se empaca la columna con 500 mL de grava y se pesa. Después se agregan 3500 mL de medio filtrante húmedo y se pesa nuevamente la columna.
3. Se llena el reactor con agua hasta el nivel de la grava, se vacía y se mide el agua evacuada. Esto indica el valor de los espacios vacíos que se encuentran en el volumen de la grava.
4. El reactor es llenado por el fondo con agua hasta que el medio filtrante esté completamente inmerso, el llenado se debe realizar lentamente para prevenir la expansión del mismo y la formación de burbujas de aire. Se deja reposar toda la noche.
5. Se vacía la columna.
6. La columna se llena nuevamente con agua y se comienzan las pruebas de vaciado. La duración de estas pruebas es de 1200 min y se hacen por triplicado. El volumen acumulado en varios intervalos de tiempo (1, 2, 4, 15, 30, 60, 180, 240, 420 y 1200 min).

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

7. Después de las tres pruebas de vaciado se toman muestras del medio filtrante de la parte alta, media y baja del biofiltro y se determina el contenido de agua haciendo un promedio de las tres columnas de cada reactor.
8. Con los resultados se calcula la porosidad *in situ*, la porosidad debe ser igual al valor del volumen del agua acumulada al final de las pruebas de vaciado, adicionado al volumen de agua contenido en el medio filtrante (promedio del contenido de agua en las 3 muestras del medio filtrante),

Pruebas abióticas

Fue realizada una prueba abiótica con tres filtros individuales alimentados con agua sintética y tres diferentes caudales para evaluar el fenómeno de adsorción de fármacos sobre el medio de soporte, esta prueba se empleó para determinar el efecto del caudal de entrada sobre la remoción por adsorción de contaminantes (Figura 3). El procedimiento para realizar la prueba se describe a continuación:

1. Fueron seleccionados 3 L del medio filtrante previamente tamizado y se introdujeron en autoclave durante 2 h para propiciar un ambiente abiótico.
2. Una vez lista la madera, se agregaron 700 mL a cada una de las tres columnas montadas previamente como se muestra en la figura 3.3.
3. Posteriormente se procedió con el arranque de los sistemas, para esto, fue preparada un agua sintética con 300 mg/L de metformina y 20 mg/L de ciprofloxacino, además, se adicionó azida de sodio en una proporción de 1 g/L para inhibir el crecimiento microbiano durante la realización de la prueba.

La duración de esta prueba se programó hasta que la adsorción de los fármacos en el medio filtrante alcanzara un punto de saturación.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

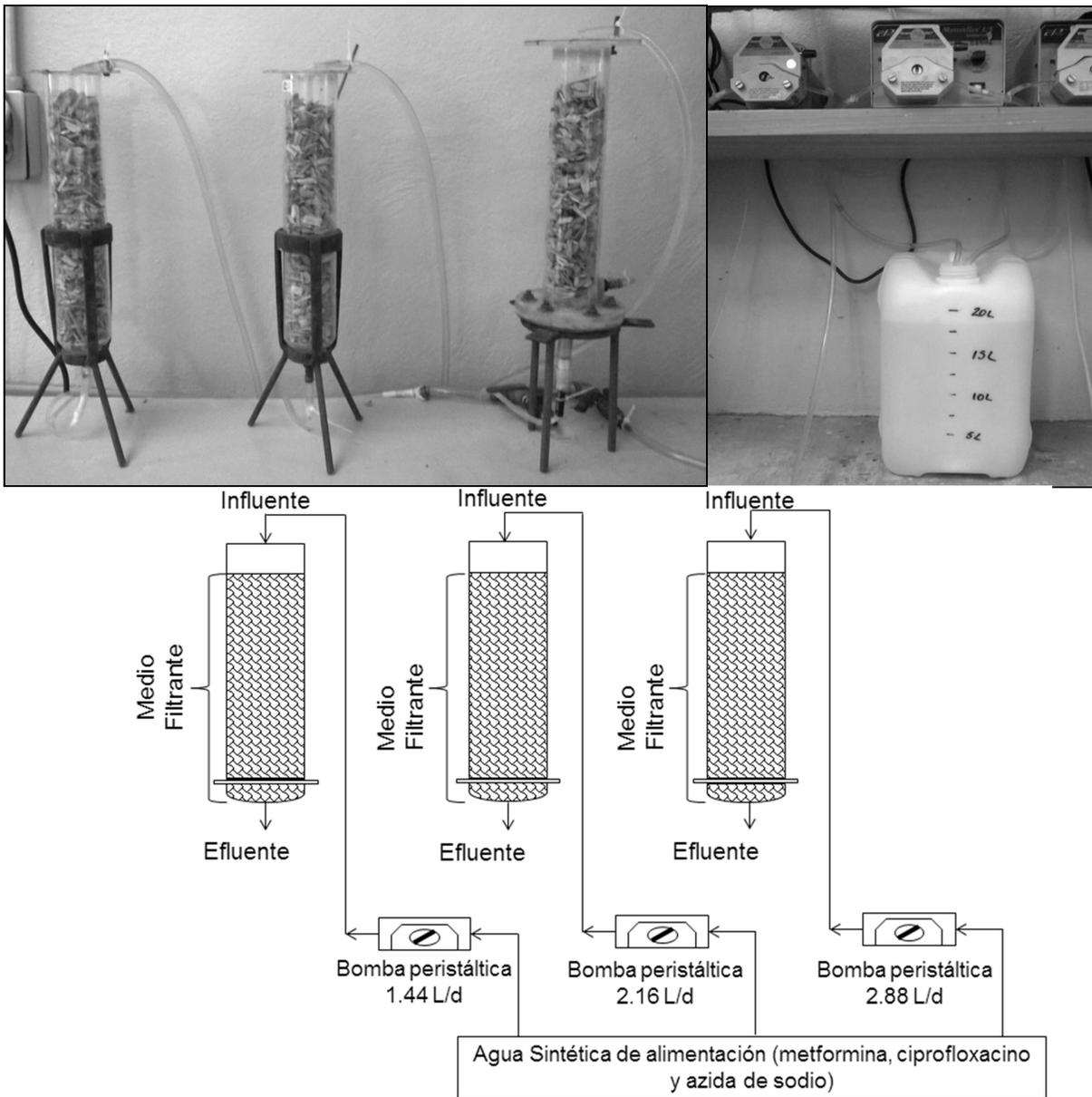


Figura 3. Fotografías y esquema de los sistemas abióticos utilizados

Caracterización del agua residual y monitoreo

La caracterización del agua residual se llevó a cabo en el influente y efluente del sistema de biofiltración, para esto fueron seleccionados los parámetros que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Técnicas y equipos utilizados para el control del biofiltro

Parámetro	Técnica analítica	Equipo
pH	Potenciométrico	Potenciómetro/Conductímetro HACH (pH, T, CND, SDT) modelo Seslon 156
Temperatura	Electrodo	
Conductividad	Electrodo	
SDT	Electrodo	
Turbiedad	Método nefelométrico	Turbidímetro HACH modelo 2100P
SST	Método fotométrico	Espectrofotómetro HACH modelo DR/2400
N-NH ₄	Método Nessler	
N-NO ₂	Método del sulfato ferroso	
N-NO ₃	Método de reducción con Cadmio	
DQO	Método del reflujo cerrado	Reactor HACH modelo DRB 200 Espectrofotómetro HACH modelo DR/2400
NT	Método de digestión con persulfato	
PT	Método del molybdovanadato con digestión de ácido persulfato	

Fuente: elaboración propia

El muestreo se realizó dos veces por semana para su correspondiente caracterización. Los parámetros mencionados en la tabla fueron monitoreados durante la estabilización que tuvo una duración de aproximadamente 80 días.

Evaluación del sistema

La evaluación del sistema consistió en adicionar una concentración conocida de metformina y ciprofloxacino al agua residual para alimentar al biofiltro, y así, monitorear su comportamiento mediante la caracterización del influente y efluente. La adición de los fármacos al agua residual cruda se realizó pesando la cantidad necesaria de los mismos para obtener una concentración de 300 mg/L y 20 mg/L de metformina y ciprofloxacino respectivamente en 20 L (volumen del recipiente de alimentación) para alimentar al biofiltro.

La evaluación del biofiltro se dividió en dos etapas:

1. **Arranque y estabilización del sistema de biofiltración con un TRH de 7 h.** En esta etapa solo se llevó a cabo el monitoreo de la DQO y los nutrientes sin la adición de fármacos.
2. **Evaluación de la remoción de fármacos aplicando diferentes TRH.** Una vez estabilizado el biofiltro se determinó la remoción de la metformina, ciprofloxacino, DQO, nitrógeno y fósforo probando tres diferentes TRH: 4, 5 y 7 h.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Muestreo

Para el muestreo los frascos fueron enjuagados con un poco del agua residual cruda para la muestra del influente y tratada para la muestra del efluente, debía recolectarse una muestra para los parámetros de control del agua residual y otra para los fármacos, es decir, dos influentes y dos efluentes. En caso de ser necesaria la preservación de la muestra, ésta fue almacenada en frascos color ámbar y refrigerada a 4°C para conservar sus características representativas (preferentemente la caracterización era realizada inmediatamente a la toma de muestra). Cabe destacar que se realizó una prueba para determinar la vida útil de las muestras sin perder sus características cuantificables para el caso de los fármacos, ésta consistió en almacenar una muestra bajo las condiciones antes descritas y medir su concentración hasta notar una variación con respecto a la primera medición realizada. El resultado fue que las muestras tomadas para los fármacos pudieron preservarse durante aproximadamente 20 días conservando su estado, posterior al tiempo mencionado disminuye la concentración de ambos fármacos.

La cantidad de muestra a obtener debía considerar el volumen a utilizar en cada parámetro más un excedente para solventar posibles errores o pérdidas dependiendo del tratamiento por aplicar.

Tratamiento de las muestras

La medición de la materia orgánica, nutrientes, pH, conductividad y sólidos no requería un tratamiento específico, solamente se realizaba alguna dilución en caso de ser necesario por la concentración presente de cada contaminante, sin embargo y preferentemente, la muestra debía ser cuantificada directamente para evitar la mayor cantidad de errores posibles. Cabe mencionar que en el caso de nitritos y nitratos se volvía necesaria la filtración de la muestra cuando la carga de sólidos como turbiedad era muy notable, esto produciría interferencias en la medición de dichos parámetros y con ello el aumento de errores.

La muestra de los fármacos por espectrofotometría uv requirió de la eliminación de la turbiedad para descartar interferencias, para esto, fue necesario filtrarlas con papel filtro whatman # 40 para la retención de sólidos suspendidos que confieran un color a la muestra ya que la medición en esta región del espectrofotómetro está sujeta a un mayor número de interferencias que en el ultravioleta visible. La muestra filtrada debía diluirse para llevar la concentración de los fármacos al intervalo delimitado por la curva de calibración.

2. REMOCIÓN DE COMPUESTOS EMERGENTES MEDIANTE SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN

2.1. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN UN SISTEMA DE BIOFILTRO EMPACADO CON MATERIAL ORGÁNICO

Implementación del método espectrofotométrico UV

Determinación de la longitud de onda dominante

El método espectrofotométrico en el rango UV implementado sirvió para cuantificar tanto a la metformina como al ciprofloxacino, la diferencia consistió en la longitud de onda dominante y los límites de detección y cuantificación para cada fármaco. El trazado del espectrofotograma determinó la longitud de onda para cada compuesto quedando en 233 nm para la metformina y en 277 nm para el ciprofloxacino, los resultados se muestran en las Figuras 4 y 5.

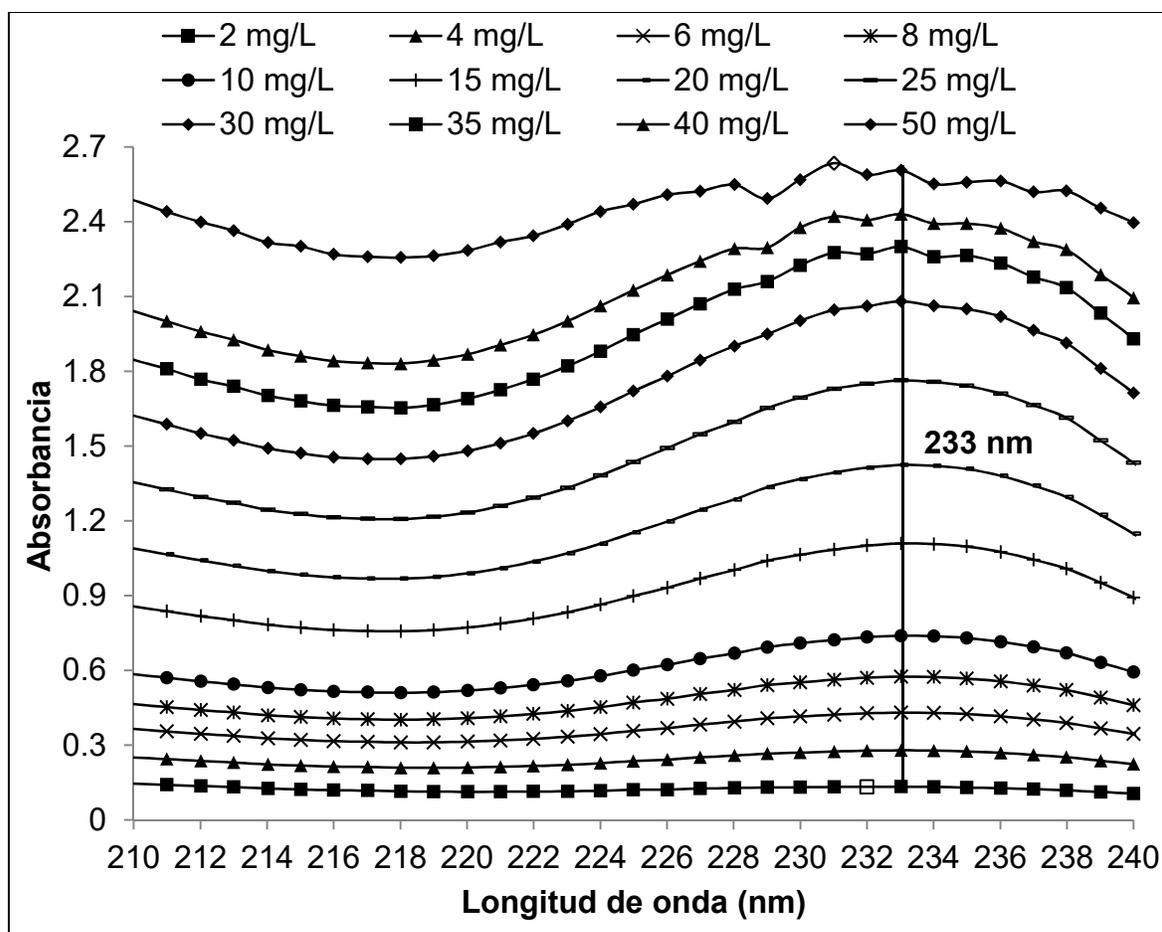


Figura 4. Espectrofotograma del clorhidrato de metformina a diferentes concentraciones

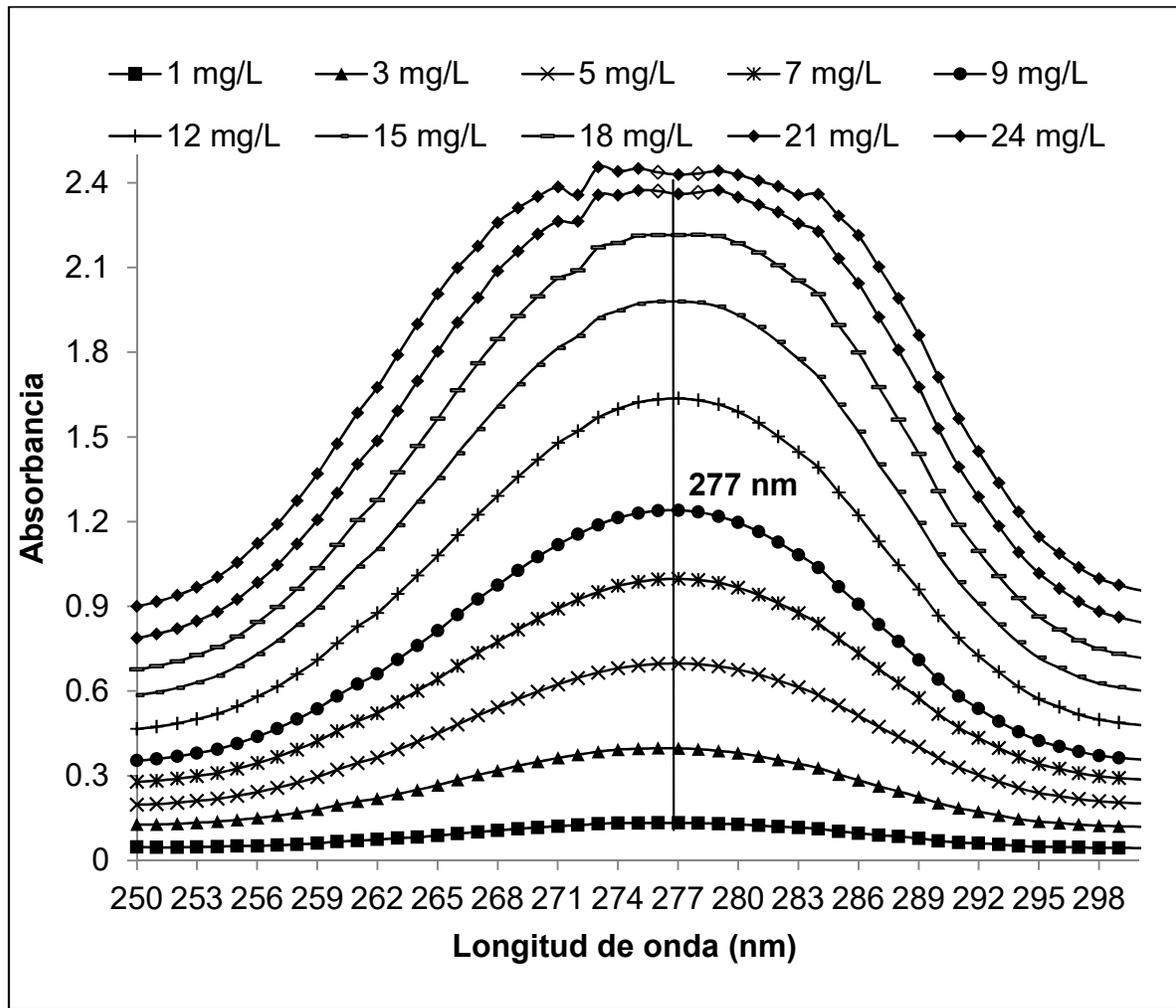


Figura 5 Espectrofotograma del clorhidrato de ciprofloxacino a diferentes concentraciones

Para determinar la longitud de onda dominante de los fármacos, se tomaron 15 diluciones de la solución madre en matraces volumétricos de 100 mL y se probaron diferentes concentraciones hasta detectar el intervalo de trabajo en el espectrofotómetro. Se realizó el barrido espectrofotométrico de las muestras en un rango de 200 nm a 400 nm (rango ultravioleta) para probar las longitudes de onda mencionadas por Arayne y colaboradores en un estudio del 2009, en el que utilizaron soluciones farmacéuticas de metformina para su cuantificación por medio de un método espectrofotométrico UV, y en ese mismo rango de longitud de onda para verificar el comportamiento del ciprofloxacino.

Una vez determinada la longitud de onda de cada compuesto, se realizó un barrido del agua residual cruda y agua residual adicionada con ambos fármacos, en la Figura 6 se muestra el espectrofotograma de las dos muestras y se observa que las características fisicoquímicas del agua residual cruda no representan una interferencia para la identificación y cuantificación de la metformina y el ciprofloxacino, ya que la detección de ambos se realiza

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

en un área diferente del espectro, además, debido a la alta concentración en que son adicionados los fármacos, cuando se realizó la medición de las muestras del biofiltro se requería de una dilución, lo que significa un clarificado de la muestra.

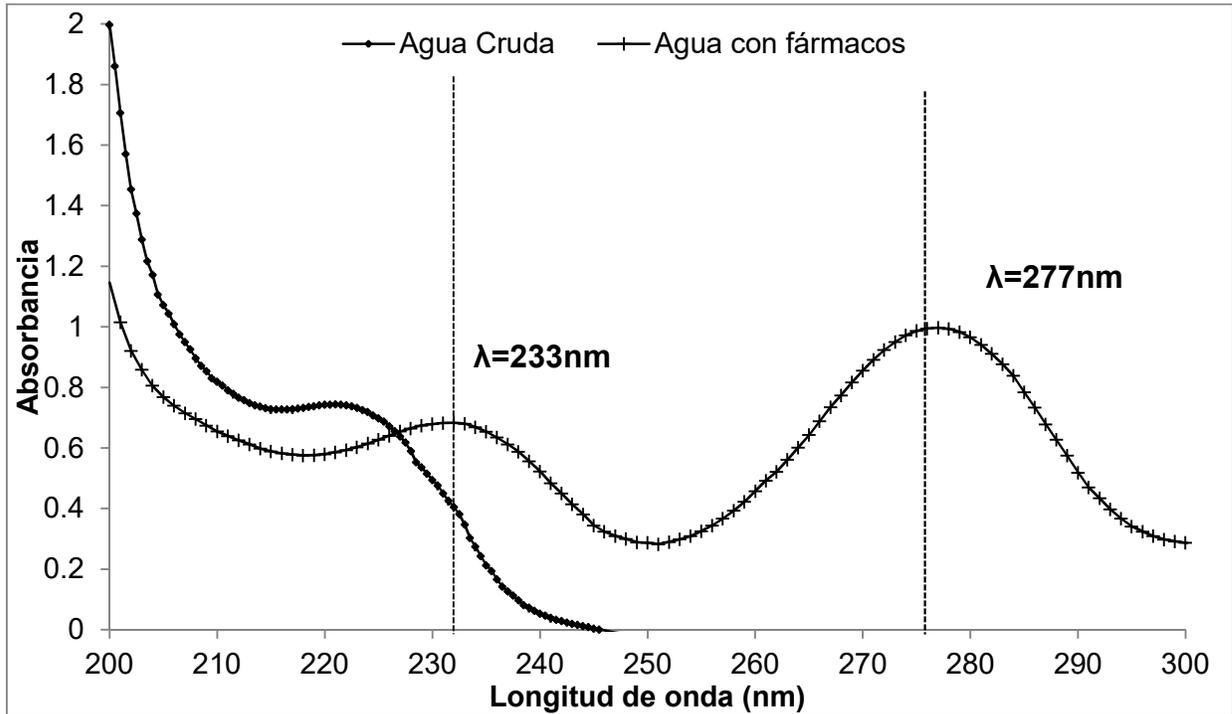


Figura 6 Comparación de espectros del agua residual y agua fortificada con fármacos

Trazado de las curvas de calibración

La curva de calibración para la metformina se muestra en la Figura 7 y la curva de calibración del ciprofloxacino se muestra en la Figura 8.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

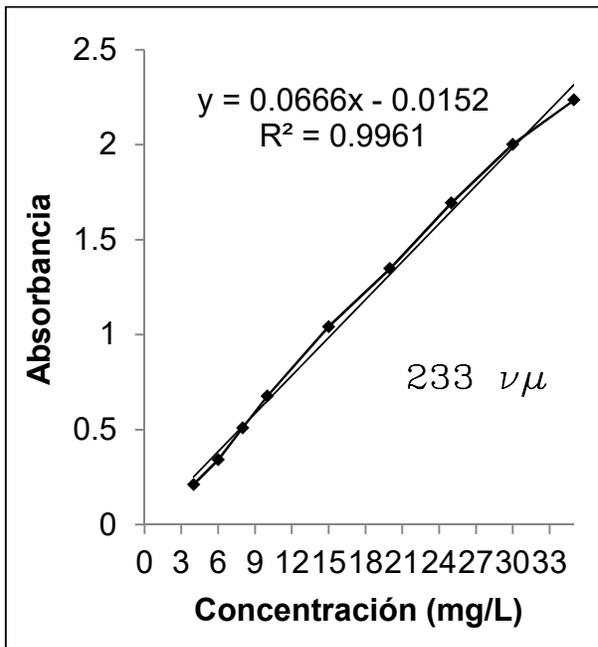


Figura 7 Curva de calibración de la metformina

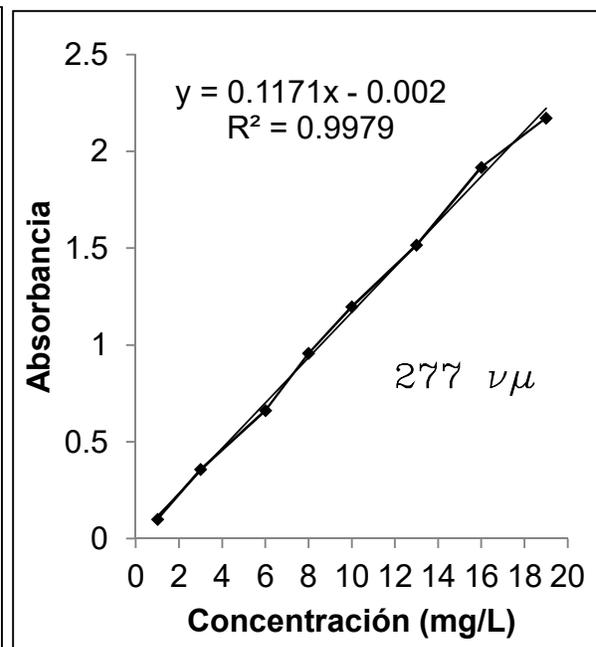


Figura 18 Curva de calibración del ciprofloxacino

Para comprobar que no hubiera interferencias causadas por las características fisicoquímicas del agua residual (por ejemplo, los sólidos y el color), se realizó un barrido del agua residual fortificada y un estándar de cada fármaco en la región ultravioleta del espectrofotómetro, estas muestras fueron procesadas tal como se describe en la metodología.

En las Figuras 9 y 10 se observa el comportamiento de los fármacos con el método analítico propuesto, la línea vertical punteada indica la posición de la señal intensa correspondiente a la presencia del fármaco, en ambos casos se ubica en la longitud de onda de 233 nm para la metformina y 277 nm para el ciprofloxacino. En estas mismas gráficas se observa que tras los 220 nm las líneas tiene una tendencia ascendente, esto se debe a la presencia de compuestos detectados en esta región del espectro, sin embargo, por su ubicación no representan interferencia alguna para la determinación de los fármacos seleccionados.

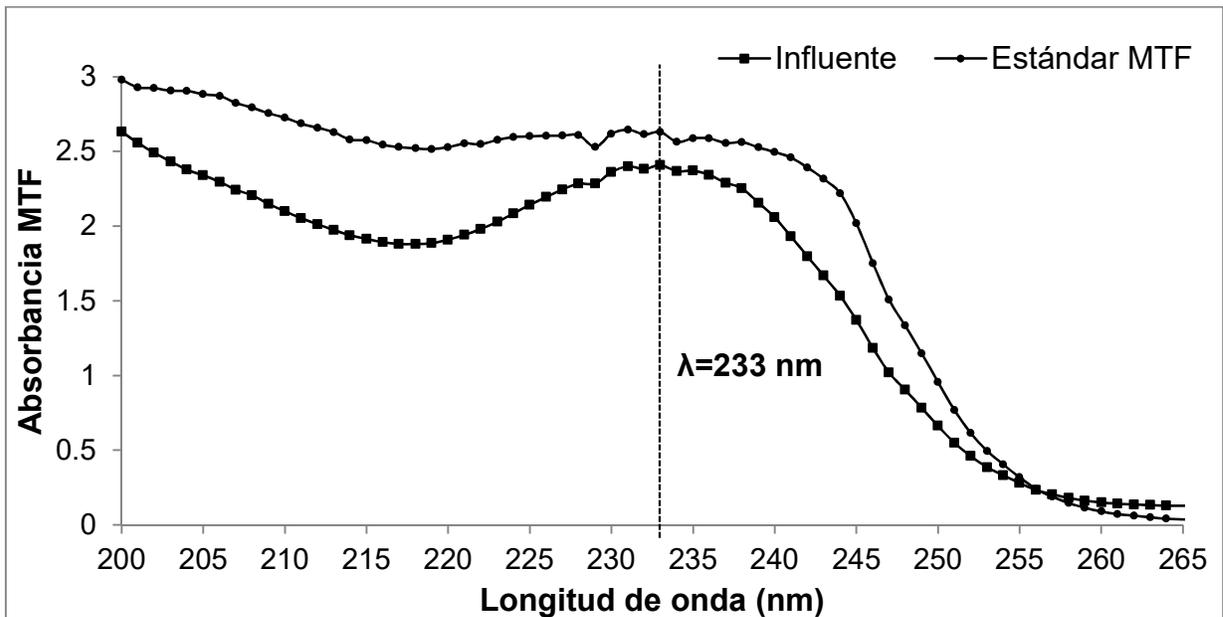


Figura 9 Barrido de las muestras del biofiltro y los estándares de la metformina

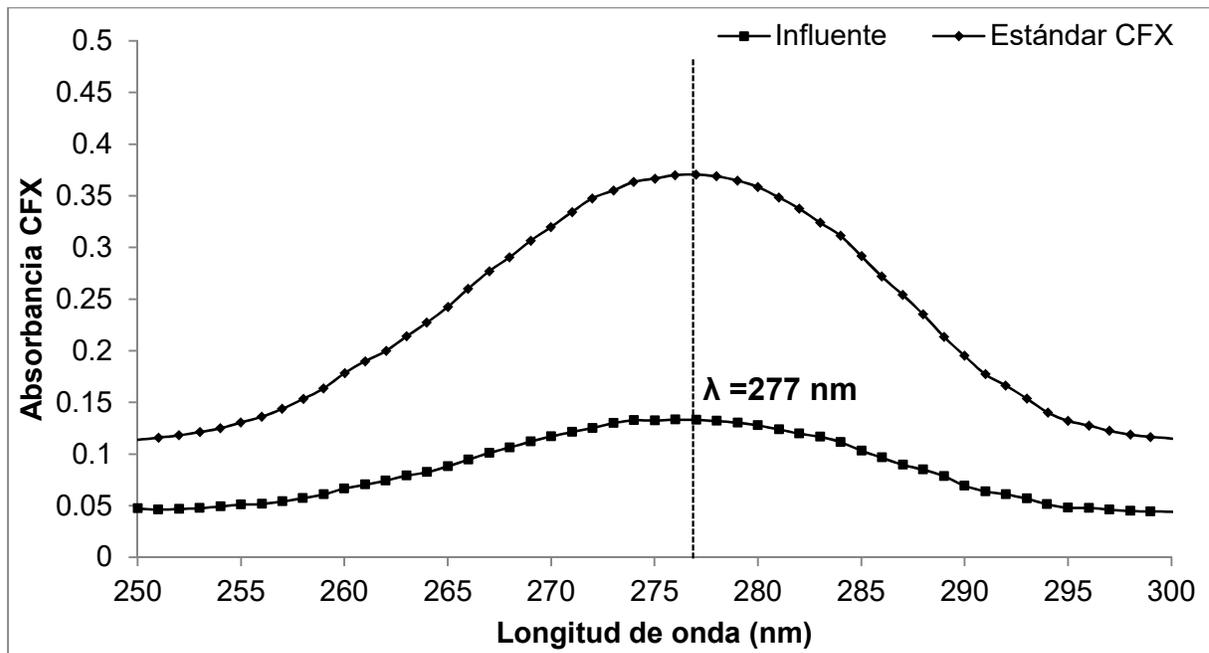


Figura 10 Barrido de las muestras del biofiltro y los estándares del ciprofloxacino

4.1.3.- Determinación de los límites de detección (LDD) y cuantificación (LDC) del método

Para la determinación del LDD se utilizaron los resultados de la lectura de 10 blancos analíticos y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la medición de blancos para la determinación del LDD

No. de blanco	Absorbancia (MTF)	Absorbancia (CFX)
1	0.0892	0.0798
2	0.0801	0.0711
3	0.0853	0.0711
4	0.1075	0.0739
5	0.0862	0.0779
6	0.0933	0.0721
7	0.0855	0.0728
8	0.0862	0.0779
9	0.0878	0.0731
10	0.0931	0.0804
Promedio	0.0894	0.0750
Desv. Est.	0.0074	0.0036

Aplicando las ecuaciones 1 y 2 en los blancos utilizados para la metformina se tiene que:

$$Y_{LDD} = 0.0894 \text{ mg/L} + 3(0.0074)$$

$$C_{LDD} = \frac{(0.0894 \text{ mg/L} + 3(0.0074)) + 0.0152}{0.0666} = 1.9039 \text{ mg/L}$$

$$C_{LDC} = 3.18 \left(1.9039 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 6.0544 \text{ mg/L}$$

Por lo tanto la concentración del límite de detección del método para la metformina es de 1.9039 mg/L y el límite de cuantificación fue de 6.0544 mg/L.

Aplicando las ecuaciones 1 y 2 en los blancos utilizados para el ciprofloxacino se tiene que:

$$Y_{LDD} = 0.0750 \text{ mg/L} + 3(0.0036)$$

$$C_{LDD} = \frac{(0.0750 \text{ mg/L} + 3(0.0036)) + 0.002}{0.1171} = 0.79 \text{ mg/L}$$

$$C_{LDC} = 3.18 \left(0.79 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 2.5122 \text{ mg/L}$$

Por lo tanto la concentración del límite de detección del método para el ciprofloxacino es de 0.79 mg/L y el límite de cuantificación fue de 2.5122 mg/L.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Montaje del sistema de biofiltración

Determinación de la porosidad in situ y TRH

De acuerdo con las pruebas de vaciado se obtuvo que la columna de acrílico empacada con las astillas de madera cuenta con un porcentaje de porosidad de 76.8%, que equivale a un volumen de agua retenido de 2.69 L. El TRH fue calculado mediante la siguiente ecuación descrita por Garzón (2001):

$$TRH = \frac{V_t}{Q} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

TRH = Tiempo de residencia hidráulica (d).

V_t = V. agua en tratamiento (L) (V. porosidad – V. espacios vacíos).

Q = Caudal (L/d).

Puesto que el sistema sería evaluado con tres diferentes cargas hidráulicas, se determinó el TRH para cada una de ellas aplicando la ecuación de espacios vacíos resultante de las pruebas de vaciado. En la Tabla 3 se muestran los resultados.

Tabla 3. Cálculos para determinar el TRH del biofiltro para tres caudales diferentes

Ecuación de espacios vacíos	Y = -22ln(x)+2271.2		
Caudal (L/d)	1.44	2.16	2.88
Volumen de espacios vacíos (L)	2.26	2.25	2.25
Volumen de porosidad (L)	2.69	2.69	2.69
Volumen de agua residual en tratamiento (L)	0.43	0.44	0.44
TRH (h)	7	5	4

Pruebas abióticas y efecto del caudal de entrada

Las pruebas abióticas fueron realizadas con la finalidad de evaluar el desempeño del medio filtrante para retener por adsorción a los fármacos utilizados aplicando tres caudales distintos, mismos que representan los caudales utilizados en la evaluación del sistema biológico. En la Tabla 4 se muestran los porcentajes de remoción más altos obtenidos de cada compuesto en los tres sistemas de filtración, estos porcentajes representan la cantidad de medicamento retenido en el medio filtrante.

Tabla 4. Máximos porcentajes de remoción alcanzados en los sistemas abióticos

	Caudal (L/d)	Carga Hidráulica (m ³ /m ² *d)	% Remoción MTF	% Remoción CFX
Filtro 1	1.44	0.37	23.48	47.77
Filtro 2	2.16	0.74	18.90	49.83
Filtro 3	2.88	0.55	18.68	45.59

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Los valores presentados en la Tabla 5 indican que cada fármaco se comporta de manera distinta con respecto al caudal de entrada, lo cual puede deberse al valor del coeficiente de partición octanol/agua (K_{ow}) que presenta cada uno (-1.43 para la metformina y 1.32 para el ciprofloxacino), es decir, que tienen un K_{ow} Bajo. En la con la Tabla 4 se describe el comportamiento medioambiental de sustancias químicas de acuerdo con su K_{ow} .

Tabla 5. Descripción del significado medioambiental del K_{ow} de sustancias químicas

Coeficiente de partición octanol/agua (K_{ow})	¿Qué indica esta propiedad acerca de la sustancia química?	¿Qué es lo que ocurre si la sustancia química tiene...?	
Es una medida de la hidrofobicidad o la afinidad hacia los lípidos, de una sustancia disuelta en agua.	Potencial de adsorción. Potencial de bioconcentración de una sustancia química en los tejidos grasos).	Alto K_{ow} Probable: -Bioacumulación -Bioconcentración -Adsorción en suelo y sedimentos. Poco probable: -Movilidad	Bajo K_{ow} Probable: -Movilidad -Solubilidad -Biodegradación -Metabolización Poco probable: -Bioacumulación

Por lo tanto, de acuerdo con la información mostrada en la Tabla 4 se establece que tanto la metformina y el ciprofloxacino son compuestos con poco potencial de adsorción sobre una matriz sólida, pero con probabilidad de solubilidad y biodegradación.

En las gráficas se muestra el comportamiento de la metformina (Figura 11) y el ciprofloxacino (Figura 12) a las diferentes cargas hidráulicas durante los 22 días de operación de los filtros abióticos. En ellas se muestra que durante los primeros 10 días hubo adsorción en el medio filtrante y a partir del día 11 se presentó un aumento de la concentración en el efluente incluso por encima de la concentración del influente indicando la desorción de los compuestos, posteriormente al día 16 se vuelve a presentar adsorción durante dos días indicándose así el ciclo de regeneración del medio filtrante y sus etapas de saturación.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

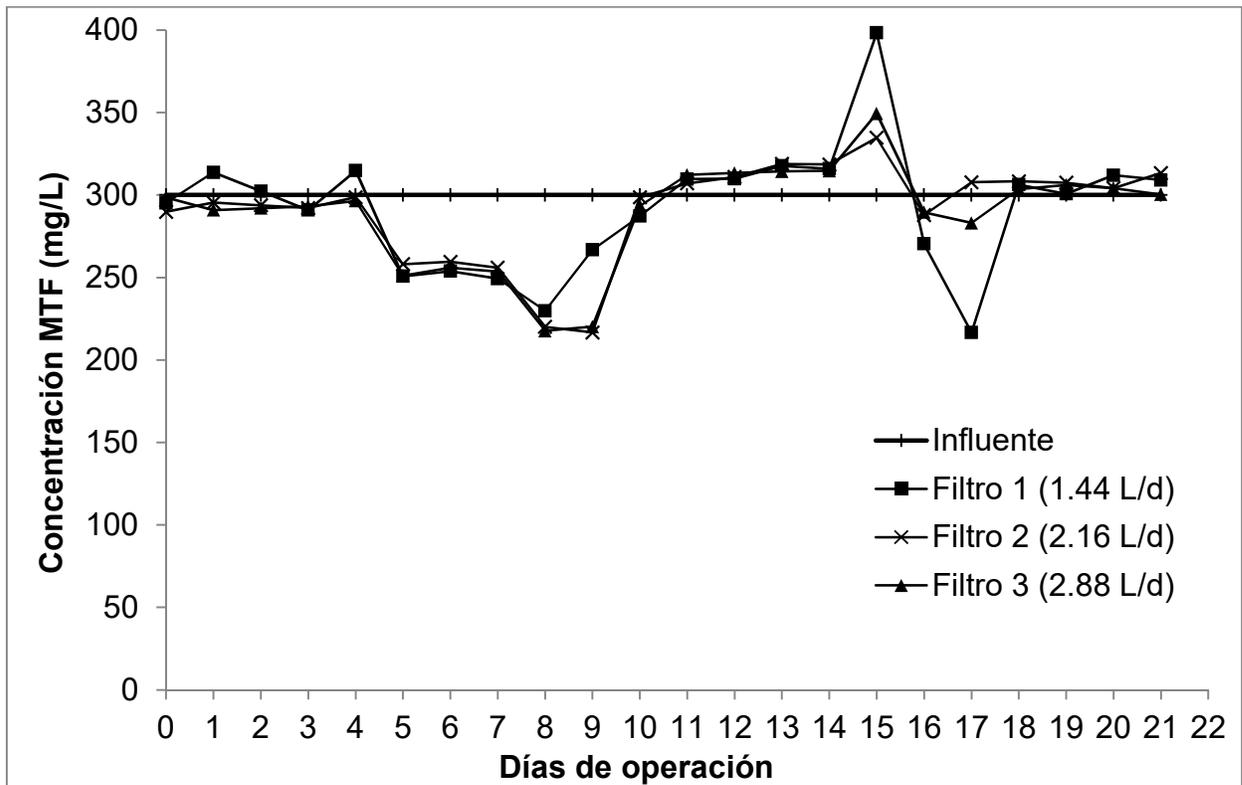


Figura 11 Comportamiento de la metformina en los sistemas abióticos operados a tres diferentes caudales

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

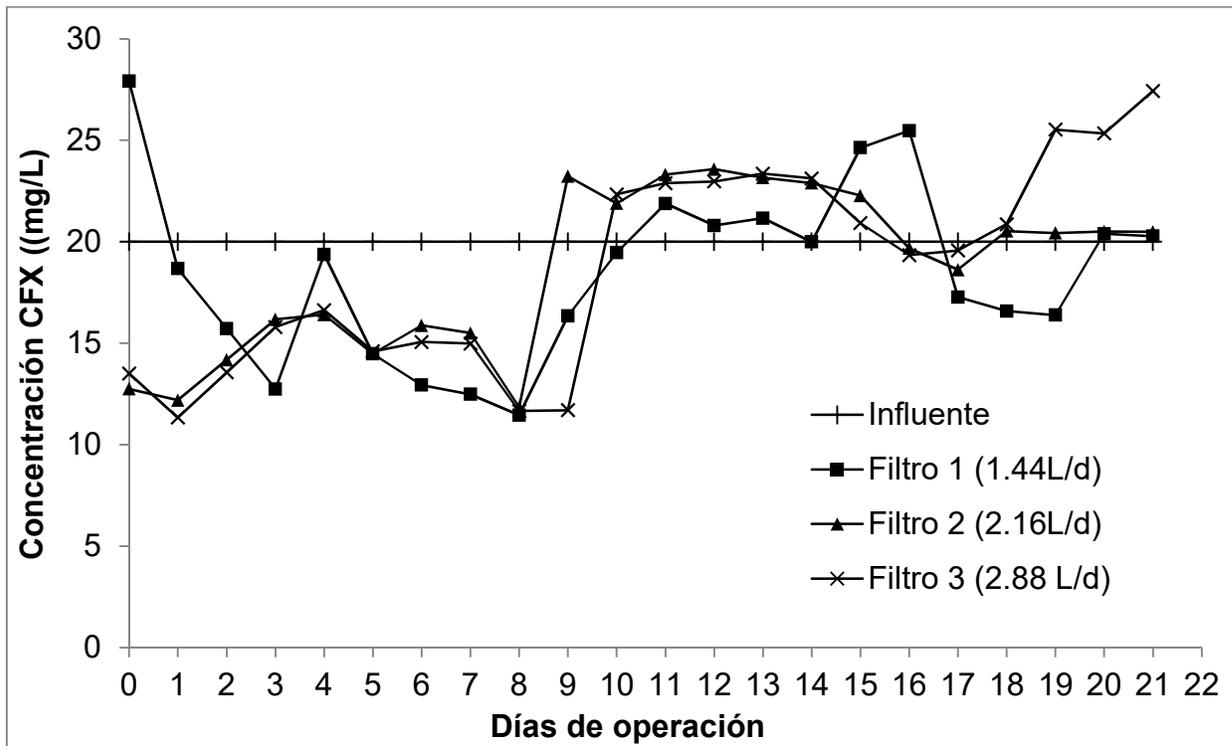


Figura 12 Comportamiento del ciprofloxacino en los sistemas abióticos operados a tres diferentes caudales

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar los resultados obtenidos durante la evaluación de los filtros abióticos, indican que no existe una influencia significativa por efecto de la carga hidráulica para ambos compuestos. El valor obtenido de la razón F es menor que el valor establecido en tablas de referencia para ambos compuestos en este caso es de 4.96 (Véanse tablas 6 y 7)

Tabla 6. Análisis de varianza de la metformina en la prueba abiótica

Anova Metformina				
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Razón F
Tratamientos	5.69	2	2.85	0.04
Error	4350.34	63	69.05	
Total de la correlación	4356.03			

Tabla 7. Análisis de varianza del ciprofloxacino en la prueba abiótica

Anova Ciprofloxacino				
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Razón F
Tratamientos	341.38	2	170.69	0.19
Error	56751.63	63	900.82	
Total de la correlación	57093.01			

Esta prueba solo indicó el efecto de la carga hidráulica sobre la capacidad de adsorción de los medicamentos en el medio, sin embargo, el sistema biológico cuenta con la película microbiana, esto quiere decir que la remoción en el biofiltro se produce principalmente por biodegradación una vez aclimatados los microorganismos ya que los fármacos quedarían retenidos inicialmente en la biomasa y que descartando efectos bruscos por la hidrodinámica se afirma y comprueba que el tiempo de contacto entre la biomasa y los contaminantes favorece la biodegradación.

Caracterización del agua residual

El agua residual fue tomada de la unidad habitacional “El Texcal” del municipio de Jiutepec, Morelos, su caracterización presentó los valores mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Composición del agua residual empleada

Parámetro	Concentración (mg/L)
DQO	228.38
SST	352.00
Turb (NTU)	220.00
NT	25.00
N-NH₄	16.80
N-NO₂	1.00
N-NO₃	0.60
PT	11.80
pH	7.29
Temp. (°C)	26.2
Cond. (mS/cm)	647
SDT (mg/L)	352

De acuerdo con Metcalf y Eddy (2003) estas características pertenecen a un agua residual urbana clasificada como de concentración baja.

Evaluación del biofiltro

Etapas 1: Arranque y estabilización del sistema de biofiltración sin adición de fármacos

La primera etapa de la evaluación consistió en el arranque y estabilización del biofiltro, tuvo una duración de 80 días en los que no se adicionó a los fármacos para el estudio, solamente se evaluó la remoción de materia orgánica medida como DQO, nutrientes (nitrógeno y fósforo), aplicando un caudal de 1.44 L/d y un TRH de 7 h, la velocidad de suministro de materia orgánica medida como carga orgánica superficial (COS) promedio fue de $52.31 \pm 19.03 \text{ gDQO/m}^2\cdot\text{d}$.

La concentración promedio de DQO en el influente durante los primeros 45 días fue de $224.48 \pm 75.40 \text{ mg/L}$ y en el efluente fue de $50.09 \pm 24.64 \text{ mg/L}$, es decir, alcanzando una remoción promedio de $76.77 \pm 10.58 \%$, a partir del día 50 el biofiltro presentó un incremento notable en la remoción de este parámetro, que fue de $88.07 \pm 3.03 \%$, también incrementó la concentración de DQO en el influente ($355.68 \pm 88.85 \text{ mg/L}$), esto debido a que durante los primeros meses de operación hubo eventos de lluvia que diluyeron el agua residual y por tanto la carga orgánica disminuyó, sin embargo, a pesar del incremento en la concentración de DQO al cesar la lluvia después del día 50, el efluente presentó una concentración promedio de $41.60 \pm 12.86 \text{ mg/L}$ estabilizándose hasta el final de esta etapa. En la Tabla 9 se muestra un resumen de las concentraciones y porcentajes de remoción alcanzados durante la primera etapa.

Tabla 9. Concentración y remociones promedio de DQO durante la etapa de estabilización

Días de operación	TRH (h)	COS (g DQO/m ² *d)	Influente (mg DQO/L)	Efluente (mg DQO/L)	% Remoción
3-45	7	52.31 ± 19.03	224.48 ± 75.40	50.09 ± 24.64	76.77 ± 10.58
50-80	7	52.31 ± 19.03	355.68 ± 88.85	41.60 ± 12.86	88.07 ± 3.03

En la Figura 13 se muestra gráficamente el comportamiento de la DQO durante la etapa de estabilización. Un factor que justifica las bajas remociones obtenidas al inicio, es que durante los primeros días se desarrolló la biopelícula sobre el medio de soporte, la cantidad de microorganismos y la limitación de sustrato por la lluvia provocó las variaciones en la remoción hasta el día 36, a partir de allí, el porcentaje de remoción fue aumentando hasta mostrar estabilidad después del día 53, fue durante estos días que también hubo un incremento en la concentración de DQO, esto indica un mayor suministro de sustrato y por consiguiente el engrosamiento de la biopelícula al generarse más biomasa producto de la biodegradación de materia orgánica, el aumento a la remoción también demostró la adaptación de los microorganismos a las características fisicoquímicas del agua residual. Este comportamiento en la remoción indica también la efectividad en los canales formados entre la biopelícula que son los encargados de la difusión del aire para oxigenar al biofiltro y

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

se sabe que la remoción en este tipo de sistema está limitada por la difusión de sustrato en la biopelícula (Reyes-Lara y Reyes-Mazzoco, 2009).

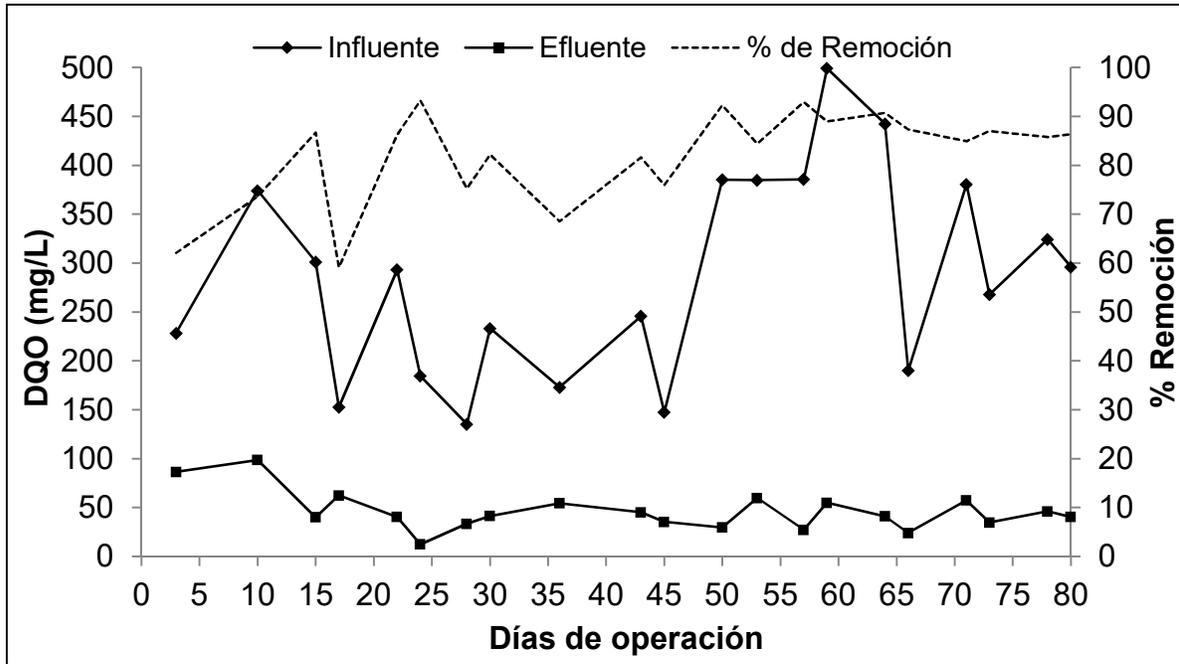


Figura 13. Variación de la concentración de MO medida como DQO y porcentaje de remoción durante la aclimatación del sistema

Otros factores que intervienen en la biodegradación de materia orgánica son el pH y la temperatura (T). En la Figura 14 se muestra el comportamiento de estos dos parámetros durante esta primera etapa. El pH fue cuantificado en el influente y efluente y la temperatura solamente en el influente.

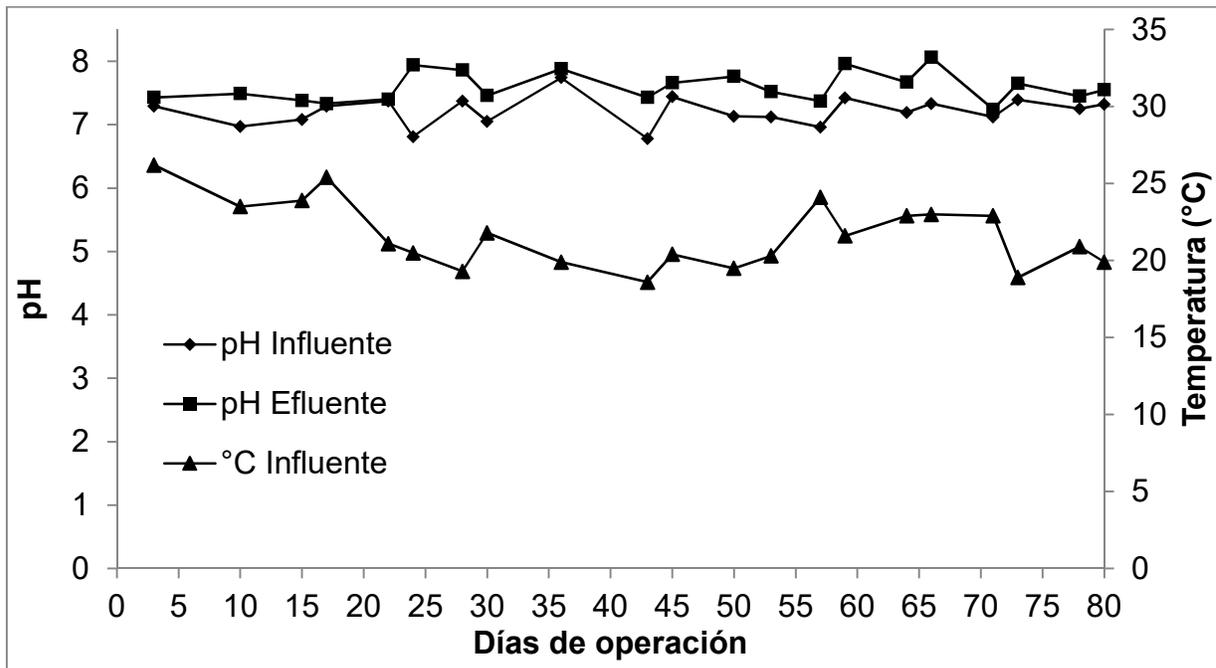


Figura 14. Comportamiento del pH y la temperatura durante la etapa de estabilización

Las bacterias pueden vivir y reproducirse en una gran gama de valores de pH. La mayoría de las bacterias prefiere un valor pH de cerca de 7. Por lo común, la reproducción es buena cuando los valores de pH llegan hasta 8.5. Por encima de este valor la actividad microbiana disminuye muy rápido y para un valor inferior a 6 la actividad bacteriana disminuye igualmente, por su parte la temperatura óptima para el desarrollo de los microorganismos está entre 20 y 40 °C, es decir, a temperatura mesófila (Jedlitschka y Tazir, 1989). De acuerdo con la Figura 3.1.1.24 los valores de pH se encuentran dentro del rango óptimo para el desarrollo de los microorganismos con un promedio en el influente de 7.21 ± 0.29 y en el efluente de 7.59 ± 0.15 y una temperatura de 21.6 ± 2.16 °C.

La remoción de $N-NH_4^+$ se mantuvo constante a partir del día 15 alcanzando valores de 99% y concentraciones en el efluente por debajo de 1mg/L, mientras que la concentración promedio de NO_3^- producida y cuantificada en el efluente durante esta etapa tuvo un valor promedio de 1.8 ± 1.1 mg/L al mostrarse una estabilización en la remoción de $N-NH_4^+$, sin embargo, el monitoreo del nitrógeno total presentó porcentajes de remoción de hasta 90% sugiriendo el desarrollo del proceso nitrificación/desnitrificación, esto posiblemente a que en la biopelícula debieron formarse pequeñas zonas anóxicas debido al grosor de la misma, a su vez, el proceso de desnitrificación podría explicar el pequeño aumento del pH en el efluente, ya que de acuerdo con Fernández (2004) por cada mg de nitrógeno desnitrificado en forma de nitratos, se generan aproximadamente 3 mg de alcalinidad expresada como $CaCO_3$ implicando una recuperación parcial de la alcalinidad consumida en el proceso de nitrificación. Mientras que la alta oxidación del $N-NH_4$ representa una buena distribución de la aireación a través de los canales en la capa superficial de la biopelícula. La descripción del proceso de remoción del nitrógeno durante esta etapa se muestra en la Figura 15, aquí se puede apreciar que la remoción de nitrógeno amoniacal fue estable desde el día 15 y hasta

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

el término de esta etapa, debido al pronto desarrollo de las bacterias nitrificantes y la baja carga hidráulica aplicada, por otra parte, la generación de nitratos se vio estable hasta después del día 45, día en el que la remoción de nitrógeno total también inició su estabilidad.

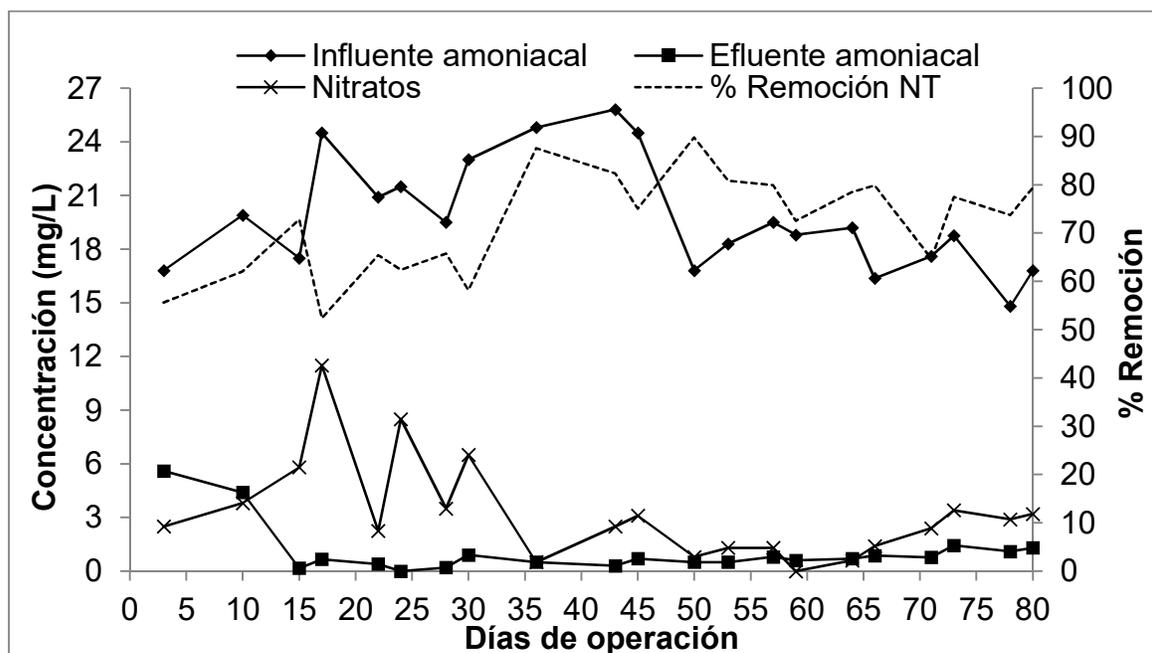


Figura 15 Remoción de nitrógeno amoniacal y proceso nitrificación/Desnitrificación para remoción de nitrógeno total

La Tabla 10 muestra el balance de masa de las distintas formas de nitrógeno en la operación del biofiltro durante los 80 días de estabilización.

Tabla 10. Balance de nitrógeno durante la estabilización del biofiltro.

Días de operación	Influent e N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	Efluent e N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	Efluent e N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	Efluent e N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	Influent e NT (mg/L)	Efluent e NT (mg/L)	% Remoción NT
3-45	21.7	1.25	2.81	4.59	26.69	8.66	67.2
	±	±	±	±	±	±	±
	3.07	1.88	1.66	3.21	3.04	3.11	11.08
50-80	17.69	0.90	2.40	1.73	22.56	4.98	77.70
	±	±	±	±	±	±	±
	1.49	0.33	1.71	1.17	1.87	1.26	6.50

En la tabla anterior, se puede apreciar cómo disminuye el valor de la desviación estándar para prácticamente todos los resultados después del día 50 y hasta el 80, lo cual comprueba la estabilización del sistema y el proceso de degradación biológica de nitrógeno en el agua residual por acción de la biopelícula.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

La concentración promedio de fósforo total en el influente durante los 80 días de la primera etapa fue de 16.9 ± 4.91 mg/L y en el efluente fue de 9.7 ± 3.78 mg/L, esto significó una remoción promedio de 40 ± 18.8 %, estos valores indican que este parámetro no se estabilizó totalmente durante esta primera etapa, sin embargo, en la Tabla 11 se observa como después del día 45 se incrementa la remoción de este nutriente, justamente cuando la concentración de DQO aumentó considerablemente y esto se debe a la relación que existe entre el consumo de materia orgánica y la acumulación de polifosfatos en la célula bacteriana.

Tabla 11. Concentración y remociones promedio de fósforo total durante la etapa de estabilización

Días de operación	TRH (h)	Influente PT (mg/L)	Efluente PT (mg/L)	% Remoción
3-45	7	14.4 ± 2.68	8.80 ± 2.46	38.00 ± 16.20
50-80	7	19.6 ± 5.45	10.70 ± 4.76	42.20 ± 22.00

En la Figura 16 se muestra el comportamiento del fósforo total durante la etapa de estabilización, a diferencia del nitrógeno y la DQO, la gráfica presenta fluctuaciones intensas durante los 80 días de operación. Los criterios necesarios para que se lleve a cabo la acumulación biológica de fósforo no pudieron presentarse en el biofiltro, por ejemplo, el área anaerobia que por la constante aireación no pudo ocupar un gran espacio en el biofiltro disminuyendo la cantidad de microorganismos acumuladores.

La remoción de fósforo pudo verse favorecida por el descenso de temperatura el cual se presenta con una diferencia de poco más de 5 °C, y como lo mencionan González y Wilderer (1991) la temperatura repercute en la liberación de fosfatos bajo condiciones anaerobias ya que a mayor temperatura se tiene menos liberación de ortofosfatos al medio.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

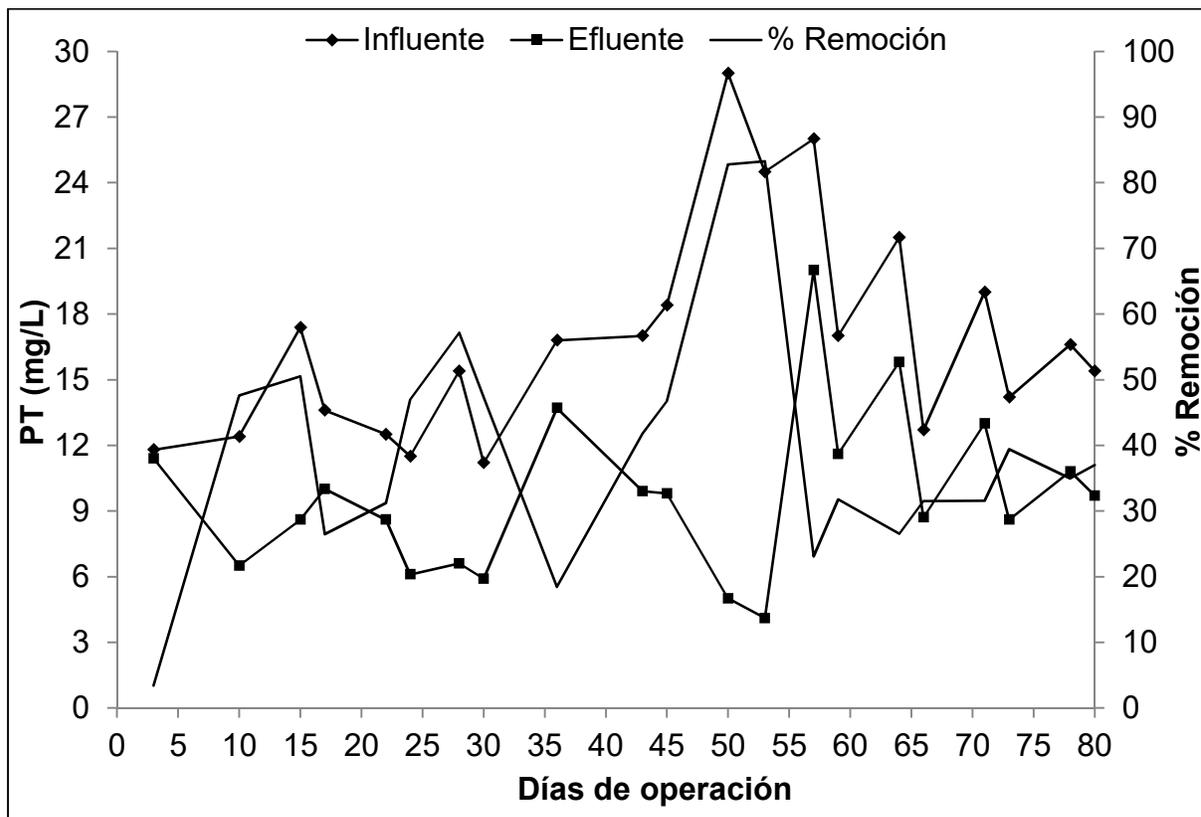


Figura 16 Variación de la concentración de PT y porcentaje de remoción durante la aclimatación del sistema

Etapa 2: Remoción de fármacos aplicando diferentes TRH

Una vez estabilizado el biofiltro durante la remoción de DQO, el agua residual fue fortificada con metformina (300 mg/L) y ciprofloxacino (20 mg/L) y se evaluó el desempeño del biofiltro aplicando tres diferentes cargas orgánicas con el objeto de determinar la variación en la remoción de los fármacos con diferentes condiciones de operación (Tabla 12). La variación del caudal se realizó hasta mostrar una remoción estable de los fármacos. El monitoreo de los fármacos se realizó diariamente en días hábiles durante un periodo de 103 días. Esta evaluación se inició una vez establecido y aplicado exitosamente el método de cuantificación de los fármacos, tarea que duró aproximadamente 3 meses y tiempo en el cual se realizaban mediciones aleatorias para comprobar el desempeño del sistema en cuanto a materia orgánica y nutrientes se refiere.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Tabla 12. Diferentes cargas aplicadas al biofiltro respecto al caudal de entrada

Parámetro	Caudal (L/d)		
	1.44	2.88	2.16
COS (gDQO/m²d)	87.22±1.23	87.94±0.28	83.41±12.96
COV (gDQO/m³d)	208.8 ± 2.94	210.51±0.68	199.67±31.03
CHS (m³/m²d)	0.18	0.37	0.27
CHV (m³/m³d)	0.41	0.82	0.62

En la tabla anterior se observa que el valor de la COS es muy parecido en las dos primeras cargas orgánicas aplicadas (87.22 gDQO/m²d y 87.94 gDQO/m²d) a pesar del cambio de caudal, esto se debió a que en los primeros días en que fueron adicionados los fármacos se incrementó la concentración de DQO en el influente, en parte por la aportación de los fármacos (aproximadamente 150 mg/L), ya que fueron adicionados en concentraciones elevadas y por otro lado la DQO propia del agua residual. Para esto fueron tomados los datos del análisis de dos muestras del influente en días distintos, uno antes de la adición de los fármacos y otro después de la adición de los fármacos. En este análisis se consideraron la DQO, NTU, SDT y conductividad debido a la relación que existe entre ellos, asimismo, al presentarse esta situación se analizó el efecto de la presencia de los fármacos con los nutrientes nitrógeno y fósforo.

En la Tabla 13. se observa que en ambas muestras se tiene una concentración similar de DQO, sin embargo, cuando se adicionan los fármacos se pierde la relación que tiene con la turbiedad, indicando una mayor demanda de oxígeno ante menor cantidad de materia suspendida, al mismo tiempo que se incrementa la concentración de SDT y la conductividad por la presencia de los fármacos disueltos en el agua residual. Ambas muestras mantienen en común el caudal de entrada de 1.4 L/d, por lo que la similitud entre las cargas orgánicas depende exclusivamente de la concentración de DQO, misma que se vio afectada por la adición de fármacos. En el caso de los nutrientes así como el pH se muestra que no causa ningún efecto la presencia de los fármacos en el influente ya que siguen presentando concentraciones similares a las obtenidas antes de adicionarlos.

Tabla 13. Comparación de parámetros

	Sin fármacos	Con fármacos
	25/Nov/2014	19/Mar/2015
DQO (mg/L)	443	489
UNT	204	84
SDT (mg/L)	318	448
Cond. (mS/cm)	654	903
NT (mg/L)	21.5	24
N-NH₄ (mg/L)	19	23.6
N-NO₂ (mg/L)	1	0
N-NO₃ (mg/L)	0.2	0.2
PT (mg/L)	21.5	12.5
pH	7.2	7.0

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

La concentración de los fármacos fue determinada en el influente y efluente del biofiltro, como se mencionó anteriormente, a los 23 días de haber sido adicionados los fármacos éstos no fueron cuantificados debido a la inconclusión del método analítico y por tal motivo, puede observarse que durante el lapso de 24 a 43 días de operación con los fármacos (con un caudal de 1.44 L/d y TRH de 7 h) ya existía una estabilización en la remoción de ambos compuestos, el porcentaje promedio de remoción fue de 82.88 ± 6.25 % de metformina con una concentración en el influente de 354.56 ± 21.98 mg/L y un efluente de 60.58 ± 21.33 mg/L y la remoción de 71.01 ± 6.22 % de ciprofloxacino con una concentración en el influente de 16.15 ± 3.20 mg/L y un efluente de 4.58 ± 0.82 mg/L (Figura 17 y 18).

A partir del día 44 se incrementó el caudal duplicando su valor, aumentando también la carga de contaminantes y manifestándose una alteración en la eficiencia de remoción para ambos compuestos, en el caso de la metformina se disminuyó la eficiencia en aproximadamente 20% y el ciprofloxacino bajó prácticamente el 50%. Los porcentajes de remoción promedio obtenidos con un caudal de 2.88 L/d y TRH de 4 h, fueron de 76.26 ± 14.85 % de metformina y una concentración de 352.60 ± 15.75 mg/L en el influente y 43.98 ± 25.80 mg/L en el efluente, el ciprofloxacino fue removido en 41.16 ± 16.66 % con 15.45 ± 2.05 mg/L en el influente y 9.09 ± 2.52 mg/L de efluente. La disminución en la remoción pudo ser causada por la disminución del TRH al incrementar la carga hidráulica de $0.41 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ a $0.82 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$, ya que disminuye el tiempo de contacto entre los contaminantes del agua y la biopelícula. Estadísticamente este fenómeno se comprueba a partir del análisis de varianza (Tablas 3.1.1.24 y 3.1.1.25) y la prueba de rangos múltiples que ofrece el programa statgraphics (Tablas 3.1.1.26 y 3.1.1.27), esta última se utiliza cuando la razón F en la tabla ANOVA indica diferencias significativas entre medidas muestrales y determina cuáles son significativamente diferentes entre sí, es decir el contraste entre las diferentes cargas aplicadas a partir de un intervalo de confianza para cada par de medidas (mínima diferencia significativa de Fisher).

La última fase, que fue operada con un caudal de 2.16 L/d y un TRH de 5 h, La remoción de los fármacos fue de 86.60 ± 7.47 % con un influente de 360.28 ± 22.30 mg/L y efluente de 43.98 ± 25.80 mg/L de metformina y la remoción de ciprofloxacino fue de 44.49 ± 11.55 % con un influente de 16.45 ± 1.50 mg/L y efluente de 9.00 ± 1.02 mg/L, en este caso, se disminuyó nuevamente la carga hidráulica de $0.82 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ a $0.62 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{d}$ y por lo tanto, al tener un valor intermedio se incrementa la remoción de ambos compuestos, la metformina es removida hasta en 92% mientras que el ciprofloxacino alcanza el 50% con un alto grado de estabilidad según indica el valor de la desviación estándar (Tabla 14).

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Tabla 14. Valores promedio de concentración obtenidos en el influente y efluente del biofiltro y porcentajes de remoción por etapas

	TRH (h)	Días de operación	Concentración (mg/L)		Porcentaje de remoción (%)
			Influente	Efluente	
MTF	7	24-43	355.56 ± 21.98	60.58 ± 21.33	82.88 ± 6.25
	4	44-58	357.65 ± 12.62	126.70 ± 51.64	64.59 ± 14.00
		59-75	348.33 ± 17.31	47.72 ± 18.26	86.31 ± 5.33
5	78-88	341.53 ± 19.15	62.12 ± 18.32	81.89 ± 5.13	
	89-103	375.62 ± 8.73	29.14 ± 21.40	92.28 ± 5.61	
CFX	7	24-43	16.15 ± 3.20	4.58 ± 0.82	71.01 ± 6.22
	4	44-58	15.71 ± 2.38	9.86 ± 0.90	35.94 ± 11.08
		59-75	15.23 ± 1.80	8.43 ± 3.24	45.58 ± 19.58
5	78-88	15.19 ± 1.31	9.32 ± 1.42	37.73 ± 14.61	
	89-103	17.48 ± 0.46	8.73 ± 0.46	50.03 ± 2.47	

En las Figuras 17 y 18 se presenta el comportamiento de los fármacos durante 103 días de operación a partir de la adición de los mismos, en ésta se muestra el efecto que se produce al incrementar la carga hidráulica de entrada en el día 43 y su disminución el día 75. Las líneas verticales indican los cambios de caudal descritos en la Tabla 12.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

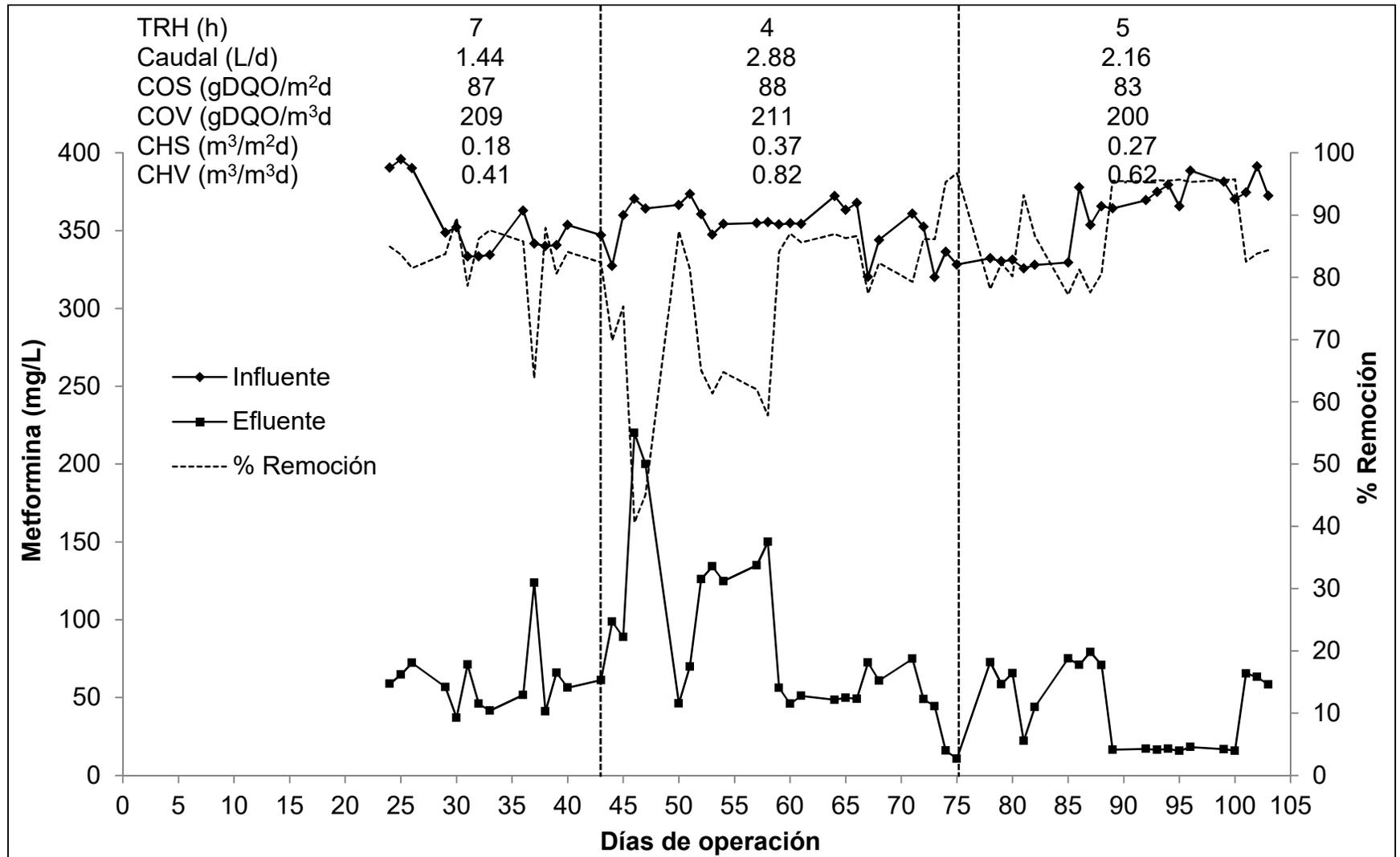


Figura 17. Variación de la concentración de metformina durante la operación del biofiltro

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

En la Figura 17 se muestra la evolución del biofiltro respecto a la remoción de metformina, durante los primeros días se aprecia la estabilidad en el sistema debido al tiempo en que se inició con el monitoreo, durante esta primera fase se mantuvo el TRH de 7 h con que se operó en la etapa de estabilización y adaptación al agua residual, sin embargo, hay un incremento en la carga orgánica por motivo de la aportación antes mencionada de DQO de los fármacos, esta fase fue monitoreada del día 24 hasta día 43 (indicado con una línea vertical punteada) de operación tras la adición de fármacos y presentó una remoción promedio de $82.88 \pm 6.25 \%$.

El día 44 se analizó el cambio de carga hidráulica de 0.41 a $0.82 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$ y el porcentaje de remoción se redujo de 82 a 69% en el caso de la metformina, este fenómeno se atribuyó principalmente a que el aumento de caudal disminuyó significativamente el TRH de 7 a 4 h limitando el contacto de los contaminantes con la biopelícula, sin embargo, como se observa en la gráfica el biofiltro se recuperó hasta estabilizarse nuevamente después del día 59 removiendo metformina hasta en 86%.

Por último, el día 75 marcado con una línea vertical punteada se realizó un cambio más a la carga hidráulica, esta ocasión disminuyéndolo de 0.82 a $0.62 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$ y un TRH de 5 h, en esta fase no se afecta tan marcadamente la remoción de metformina como en la fase anterior, pudiendo ser debido a que el cambio de caudal fue menos brusco que el anterior y no consistió en disminuir el tiempo de contacto, es decir, favoreciéndolo nuevamente, esto se ve reflejado en las altas remociones de metformina, mismas que fueron las más elevadas durante toda la evaluación con valores de hasta 95%.

El análisis de varianza (Tabla 15) realizado para evaluar los resultados obtenidos durante la evaluación del biofiltro, indican que efectivamente existe una influencia significativa por el cambio del caudal de operación. El valor obtenido de la razón F es mayor que el valor establecido en tablas de referencia, que en este caso es de 5.01.

Tabla 15. Análisis de varianza aplicado a los resultados obtenidos de la cuantificación de metformina

ANOVA metformina				
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Razón F
Tratamientos	1425.94	2	712.97	5.91
Error	6635.06	55	120.64	
Total correlación	8061.00			

En la prueba estadística de múltiples rangos que se muestra en la Tabla 16 se observa el efecto de la carga hidráulica desde un punto de contraste entre cargas, es decir, se evalúa la interacción entre las variaciones de carga y, a partir de ella se estableció el punto con mayor diferencia respecto a los porcentajes de remoción alcanzados en cada fase de la evaluación.

Tabla 16. Prueba de múltiples rangos con 99% de confianza para la metformina

Prueba de múltiples rangos (99% de confianza)			
Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

(TRH en h)			
4 – 7		-6.618	9.86
4 – 5	*	-11.34	8.87

*** Diferencia Sig.**

En esta prueba se indica que la significancia se presenta en el cambio entre la segunda y tercera fase (cambio de TRH de 4 a 5 h) con un nivel de confianza de 99%, que es cuando el sistema aumentó prolongadamente los porcentajes de remoción de metformina, esto indica que la remoción de este compuesto se ve afectada ante cambios bruscos de hidrodinámica, disminución de la carga orgánica y tiempos cortos de residencia hidráulica.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

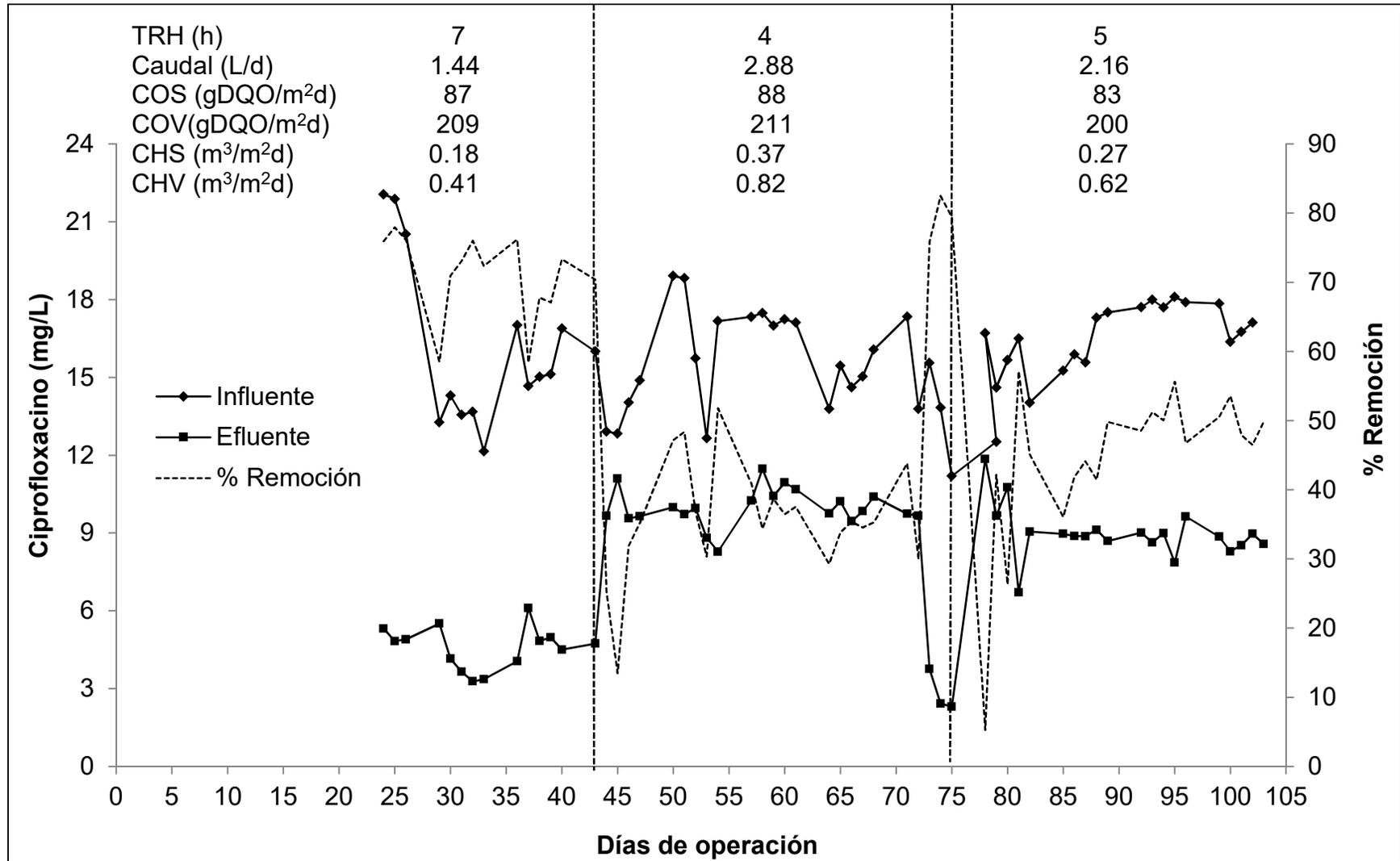


Figura 18. Variación de la concentración de ciprofloxacino durante la operación del biofiltro

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

En la Figura 18 se muestra la evolución del biofiltro respecto a la remoción de ciprofloxacino. A diferencia de la metformina que alcanzó su remoción de 82.88 ± 6.25 % durante la evaluación de la primera carga hidráulica aplicada, el ciprofloxacino se removió un 71.01 ± 6.22 % y de la misma forma que con la metformina su estabilidad en la remoción se atribuye al tiempo de operación antes de concretar el método analítico.

En el primer cambio de carga hidráulica aplicado el día 43 la remoción del compuesto se vio significativamente afectada alcanzando un valor de 13.47 % y se recuperó después del día 60, sin embargo, su estabilización fue menor que en el caso de la metformina y en la última fase, es decir, a partir del día 75 se obtuvo la mayor estabilidad de este compuesto con una remoción promedio de 44.49 ± 11.55 %.

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar los resultados obtenidos durante la evaluación del biofiltro, indica influencia significativa al cambio de la carga hidráulica. El valor obtenido de la razón F es mayor que el valor establecido en tablas de referencia para ambos compuestos en este caso es de 5.01 (Tabla 17)

Tabla 17. Análisis de varianza aplicado a los resultados obtenidos de la cuantificación de ciprofloxacino

ANOVA ciprofloxacino				
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Razón F
Tratamientos	8645.45	2	4322.72	25.24
Error	9419.84	55	171.27	
Total correlación	18065.29			

La prueba de múltiples rangos aplicada a las remociones de ciprofloxacino se muestra en la Tabla 18, en ella se observa que la diferencia significativa se aplica en el cambio entre la primera y la segunda fase (cambio en el TRH de 7 a 4 h) con un nivel de confianza de 99%, esto indica que la remoción de este compuesto se ve afectada ante cambios bruscos de hidrodinámica, aumento de la carga orgánica y tiempos medios de residencia hidráulica, en los valores aplicados para este trabajo.

Tabla 18. Prueba de múltiples rangos con 99% de confianza para el ciprofloxacino

Prueba de múltiples rangos (99% de confianza)			
Contraste (TRH en h)	Significancia	Diferencia	+/- Límites
4 – 7	*	-29.84	11.74
4 – 5		-3.331	10.57

* Diferencia Sig.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

El barrido de las lecturas realizadas para cuantificar a los fármacos se muestra en la Figuras 19 y 20.

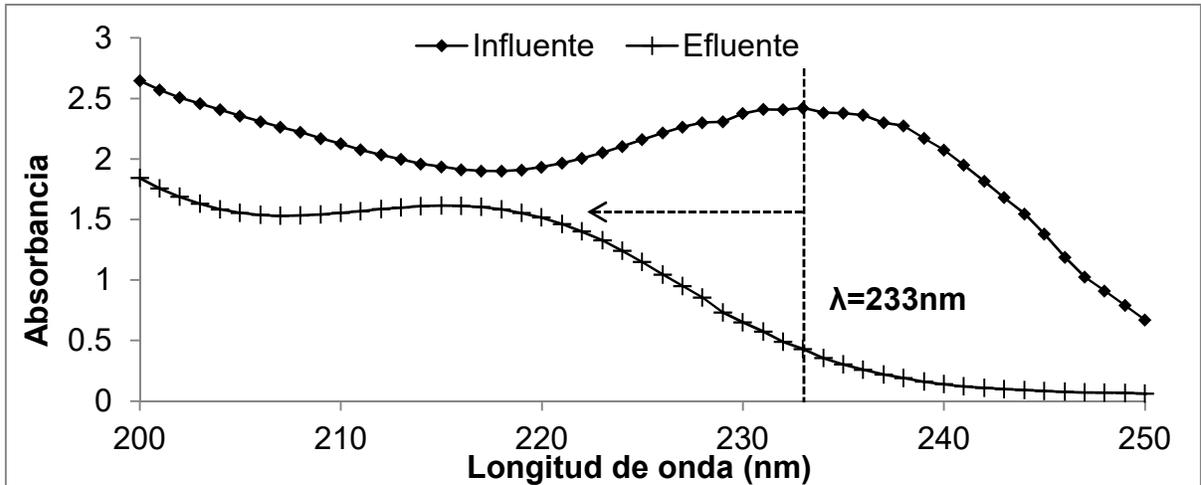


Figura 19 Espectro del influente y efluente del biofiltro en la región para identificar la metformina

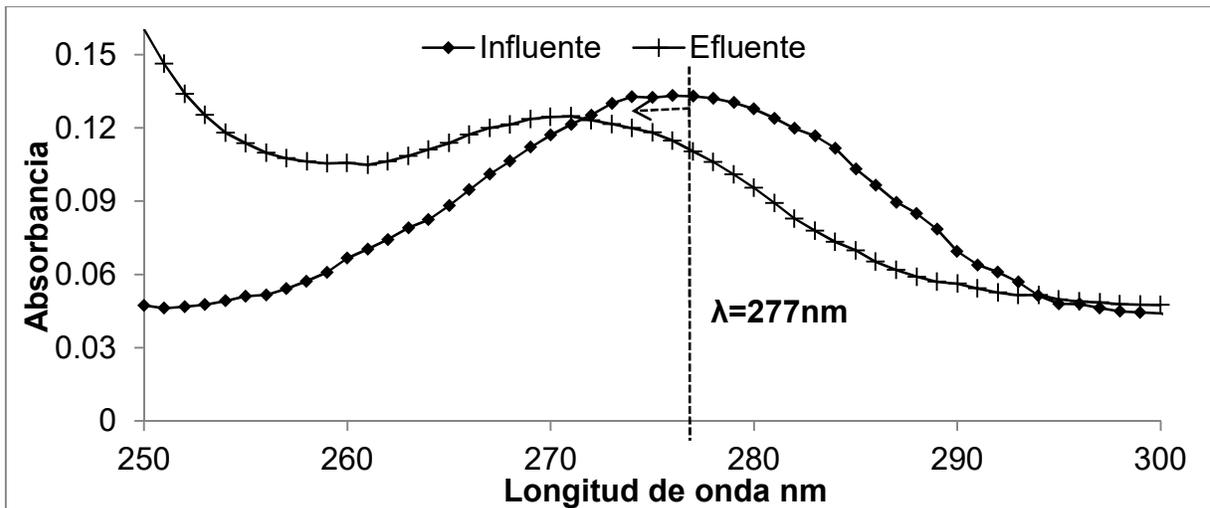


Figura 20. Espectro del influente y efluente del biofiltro en la región para identificar al ciprofloxacino.

En las Figuras 19 y 20 se muestra cómo en el espectro del efluente hay un desplazamiento de la señal más intensa en la longitud de onda, la longitud de onda dominante de cada compuesto se representa con una línea vertical punteada, la flecha indica la dirección a la que se desplaza dicha señal. Este desplazamiento sugiere la formación de subproductos del proceso de biodegradación de los fármacos.

En un estudio realizado por Trautwein y Kümerer (2011) propusieron los posibles esquemas de fragmentación de la metformina a partir de la degradación aerobia incompleta, además,

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

fue caracterizado el principal subproducto obtenido de la biodegradación de metformina, la guanilurea. Los resultados de la aplicación de la espectrometría de masas (MS/MS o MS2) en este estudio se muestran en la Figura 21 (Trautwein y Kümerer, 2011).

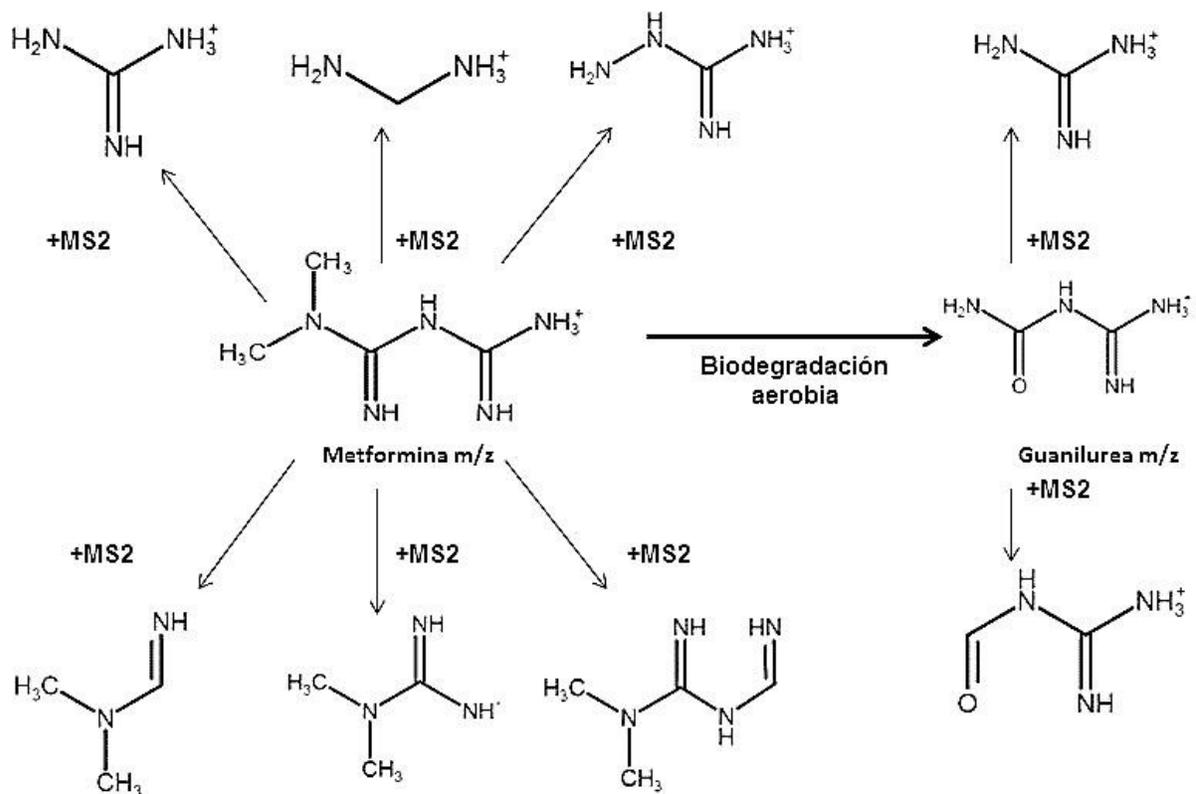


Figura 21 Esquema de posible fragmentación de metformina (MS/MS) y guanilurea (MS/MS)

En este mismo estudio, el análisis de las muestras a partir de la cromatografía líquida de alto rendimiento acoplada a espectrometría de masas de múltiples etapas (HPLC-MS(n)) se observó que la completa biodegradación de metformina produce guanilurea como el único y estable producto de transformación.

En el caso del ciprofloxacino no se encontró literatura que muestre los posibles subproductos obtenidos del tratamiento biológico de este compuesto, sin embargo, en la figura 4.17 el efluente también muestra un desplazamiento indicando la posibilidad de generación de productos de transformación en el biofiltro.

Factores que afectan la remoción de los fármacos

En la Figura 22 se muestra el efecto del pH sobre la remoción de metformina y ciprofloxacino.

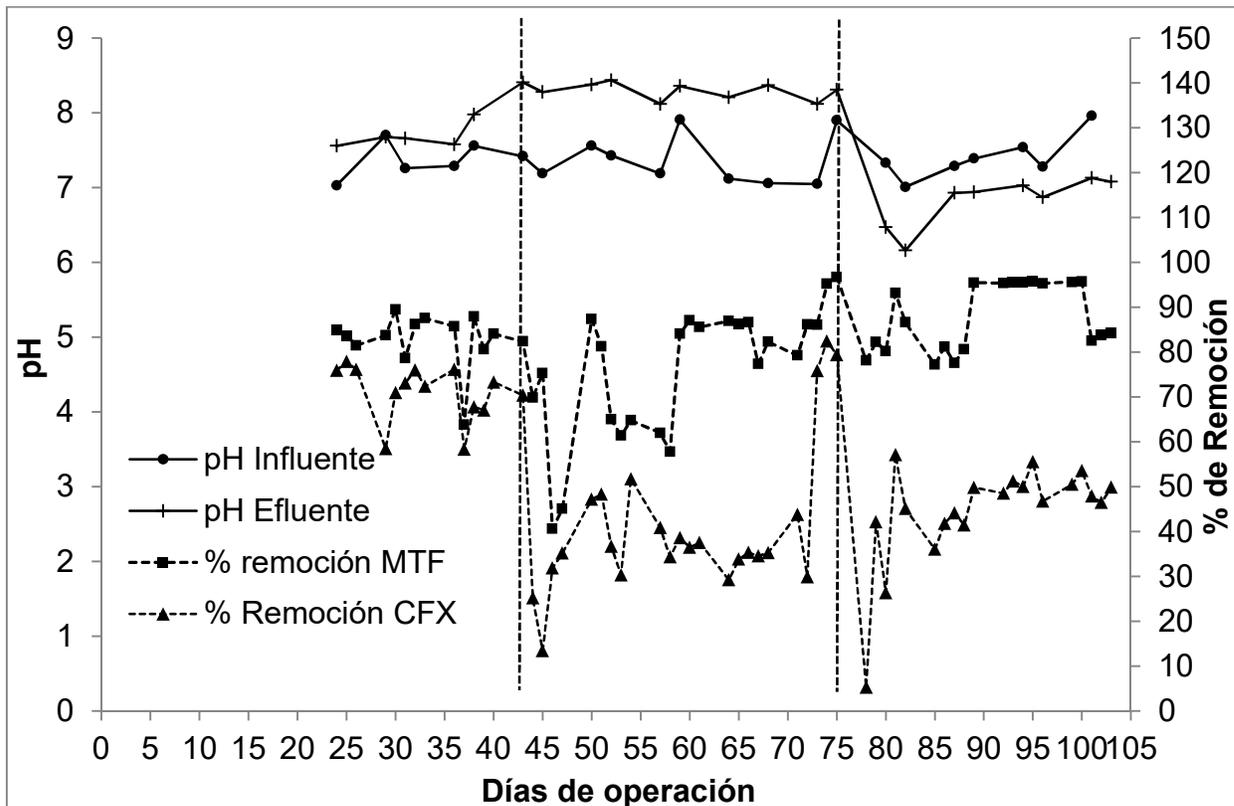


Figura 22 Efecto del pH sobre la remoción de fármacos

En la Figura 22 se muestra el comportamiento del pH durante la evaluación de la remoción de fármacos en el biofiltro, las líneas verticales punteadas indican los días en que se realizó un cambio de carga hidráulica que, aunque no tiene un efecto sobre el pH, anteriormente se demostró que si lo tuvo en la remoción de los fármacos, por lo tanto es un indicador indirecto del efecto que pudiese tener sobre el pH.

Durante los días 24 a 43 los valores de pH en el influente y efluente se mostraron similares (Influente 7.36 ± 0.26 y efluente de 7.69 ± 0.17 de pH), posteriormente del día 44 a 75 se registró un incremento notable en el pH del efluente de 8.3 ± 0.12 unidades y junto con esto la disminución de la remoción de ambos compuestos, como ya se mencionó, son varios los factores que intervienen en la remoción de contaminantes en el agua residual, sin embargo, de acuerdo con Dorival-García, et al., (2013) el pH tiene una influencia sobre la sorción de este tipo de contaminantes en condiciones aerobias y anóxicas, en ese estudio se determinó que el pH óptimo para una mayor sorción es de 7.4, por lo que concuerda el aumento del pH con la baja remoción registrada durante esta fase de evaluación, ya que la remoción en sí depende de la cantidad de contaminante que se adsorben y absorben en la biopelícula.

Por último del día 76 y hasta terminar la evaluación, el pH tuvo un descenso nuevamente hasta 6.8 ± 0.34 , sin embargo, en la gráfica se observa que este cambio brusco de pH no representa un problema para la remoción de fármacos, ya que en el caso de la metformina es durante esta etapa que se alcanzaron las remociones más altas de toda la evaluación y el

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

ciprofloxacino simplemente se mantuvo con remociones constantes y similares a los de la segunda fase.

En la figura 23 se muestra el efecto de la temperatura sobre la remoción de metformina y ciprofloxacino.

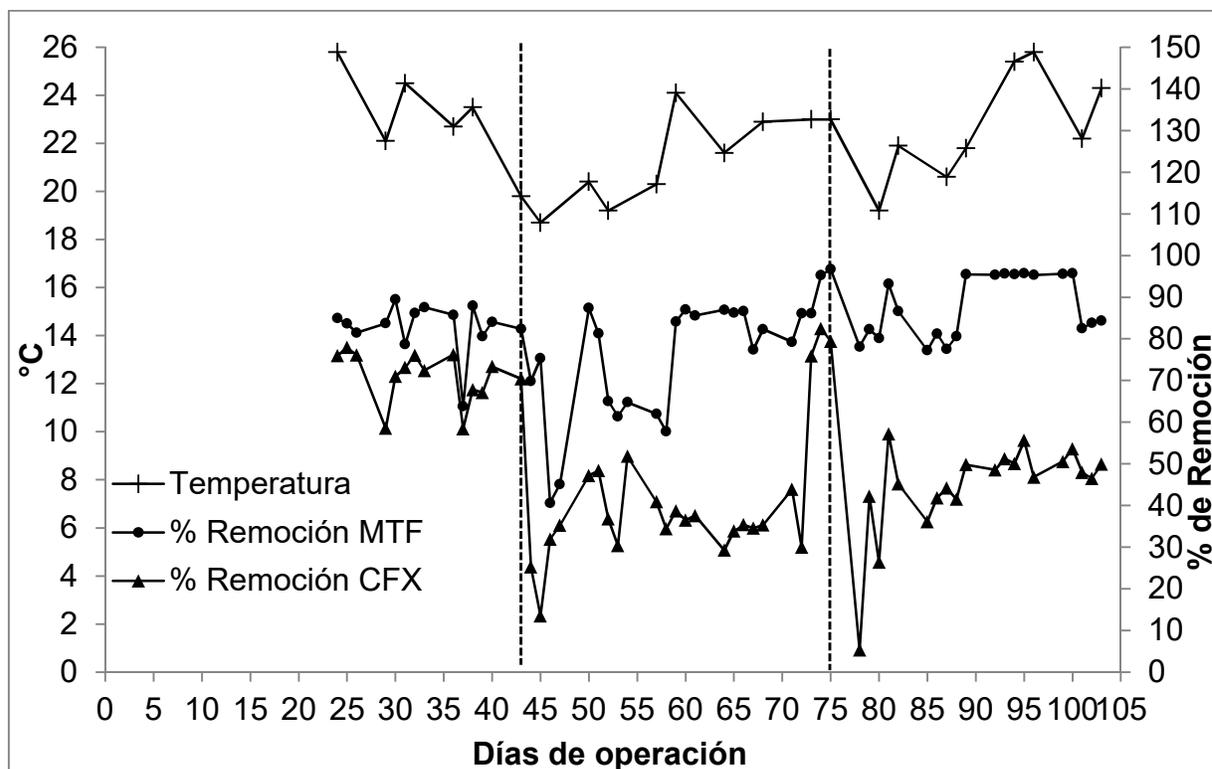


Figura 23. Efecto de la temperatura sobre la remoción de fármacos

La temperatura es un factor que al igual que el pH no depende ni se ve afectado por las variaciones de la carga hidráulica de manera significativa, sin embargo, de acuerdo con Dorival-García, et al., (2013) la temperatura y la DQO son factores decisivos en la remoción de antibióticos, en ese estudio se determinó que una remoción alta de ciprofloxacino ocurre a 38 °C. Por otro lado Trautwein y Kümerer (2011) realizaron pruebas de remoción aerobia de metformina a 20 °C.

En la Figura 23 se muestra que durante los primeros días la temperatura fue de 23.72 ± 1.47 °C, a partir del día 44 y hasta el día 75 de operación la temperatura promedio del agua residual fue de 21.3 ± 1.87 °C y durante la última fase de evaluación el influente ingresó con 22.65 ± 2.32 °C, temperaturas que en teoría favorecerían la remoción de metformina ya que en comparación con los estudios mencionados la temperatura se asemeja a las condiciones establecidas por Trautwein y Kümerer.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

En la Figura 24 se muestra la remoción de los fármacos con respecto a la presencia de sólidos suspendidos.

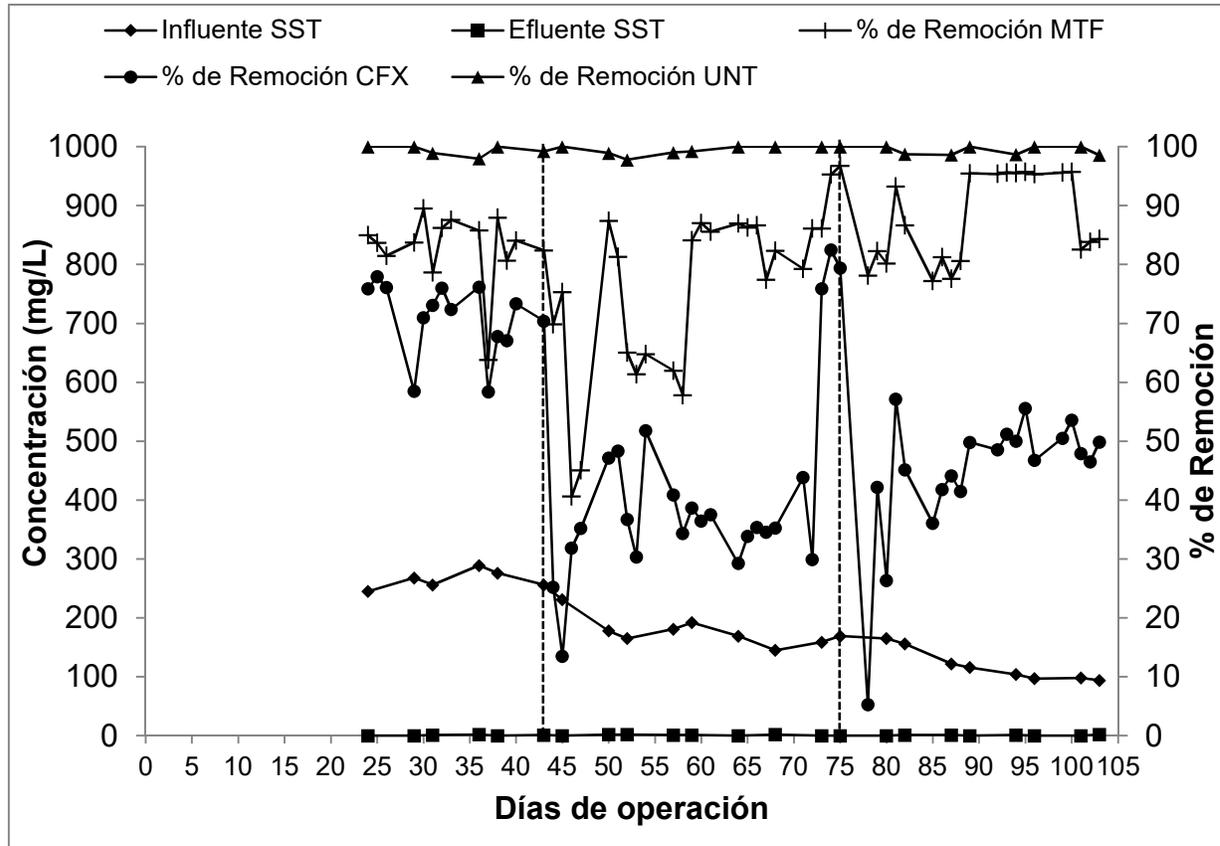


Figura 24 Concentración de SST y comparación con la remoción de fármacos

De acuerdo con la Figura 24 la concentración de SST fue disminuyendo constantemente durante las tres fases de la evaluación, durante los días 24 a 43 se cuantificó en el influente con una concentración media de 266 ± 17.1 mg/L, del día 44 a 75 fue de 185.5 ± 34.1 mg/L y la última fase presentó 119 ± 27.5 mg/L de SST, por otro lado la remoción de la turbiedad se mantuvo constante durante toda la evaluación con valores de <99%.

Ante las concentraciones registradas de SST se observa que durante la primera fase que presenta mayores remociones de ambos fármacos, esto pudo deberse al papel que juegan los sólidos en la adsorción y difusión de los compuestos en la biopelícula, en la segunda etapa se observó un descenso en la concentración de SST al igual que disminuyó la remoción de ciprofloxacino, de acuerdo con Dorival-García, et al., (2013) en un estudio del proceso de lodos activados, observaron que al aumentar la concentración de sólidos suspendidos se incrementó también la absorción y biodegradación de ciprofloxacino.

Efecto de la remoción de los fármacos sobre el nitrógeno

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

En un estudio realizado por González et al. (2014) evaluaron el efecto del ciprofloxacino sobre el proceso de nitrificación parcial sobre la biomasa de un biofiltro sumergido, utilizaron cuatro bioreactores operados en paralelo y adicionaron el antibiótico a 100 ng/L y 350 ng/L durante 30 días. Los resultados demostraron que a 100 ng/L la biomasa presenta una progresiva adaptación a la presencia del antibiótico en las condiciones de operación del reactor, mientras que a 350 ng/L se produce un decaimiento en el proceso de nitrificación parcial.

En el caso de la metformina no se encontró literatura que hiciera referencia a los efectos que tiene sobre el proceso de remoción de nitrógeno, sin embargo, las altas concentraciones adicionadas y la remoción obtenida demuestran que existió una transformación de su estructura química que favoreció el incremento de la concentración de este nutriente en forma de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos, según las mediciones realizadas de estas formas de nitrógeno en el influente y efluente del biofiltro, lo anterior supone el hecho de que exista una inhibición de los microorganismos del biofiltro por la toxicidad de los nitratos y demás características no evaluadas durante la experimentación, sin embargo, los resultados indican que las condiciones de operación favorecieron la adaptación de los microorganismos en la biopelícula.

En la Figura 25 se muestran las concentraciones obtenidas de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos obtenidas en el efluente del biofiltro durante la etapa de estabilización y posteriormente en la Figura 26 se presentan las concentraciones de estos mismos parámetros una vez adicionados los fármacos, las líneas verticales indican el cambio de carga hidráulica mencionado con anterioridad.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

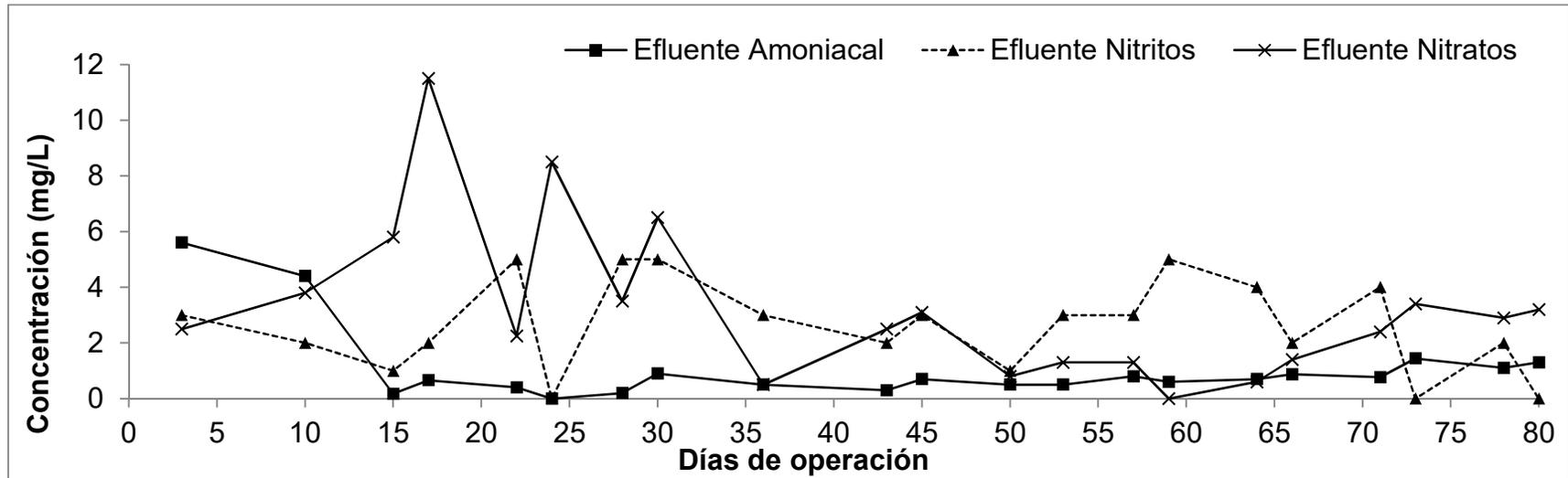


Figura 25 Concentración de formas de nitrógeno en el efluente del biofiltro sin la adición de fármacos

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

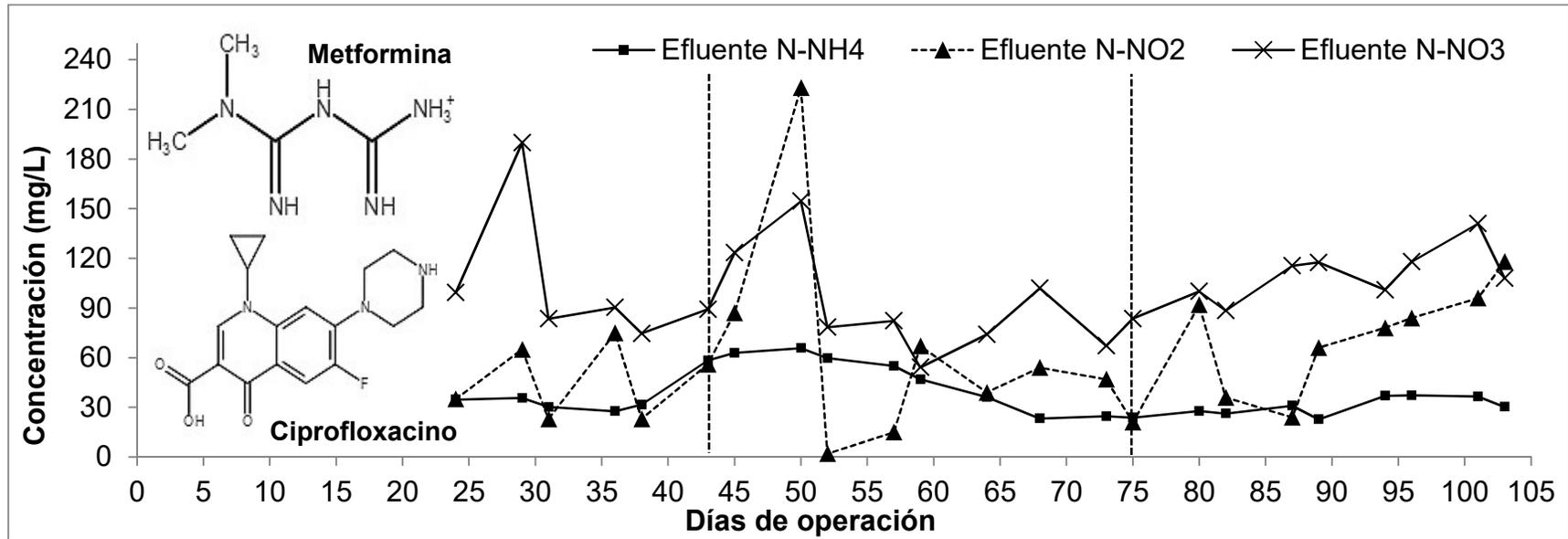


Figura 26 Concentración de formas de nitrógeno en el efluente del biofiltro con adición de fármacos.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

La comparación de las Figuras 25 y 26, es decir, antes y después de la adición de la metformina y el ciprofloxacino, se muestra un incremento en la concentración de las formas de nitrógeno a partir de la adición y biodegradación de los fármacos. El nitrógeno amoniacal presentó una concentración media de 1.12 ± 1.4 mg/L en el efluente antes de adicionar a los fármacos, mientras que nitritos se presentaba con 2.61 ± 1.65 mg/L y nitratos con 3.22 ± 2.81 mg/L en el efluente (Figura 25), después de la adición las concentraciones fueron de 37.6 ± 13.6 mg/L de amoniacal, 62 ± 46.2 mg/L de nitritos y 101.6 ± 30.4 mg/L de nitratos.

Los resultados obtenidos muestran que existe un incremento en la concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente por encima del valor del influente, esto se debe posiblemente a que los productos de la degradación de los fármacos tienen en su estructura química nitrógeno detectable por el método para la cuantificación de nitrógeno amoniacal, este incremento se presenta únicamente después de haber adicionado los compuestos estudiados. Por otra parte, también es posible observar que aumenta la concentración de nitritos y nitratos en el efluente siendo el valor de este último mayor que el de nitritos, lo que indica que aún con el aporte de nitrógeno de los fármacos y el efecto que tienen sobre la biopelícula se propicia el proceso de nitrificación, sin embargo, al no ser posible la caracterización de los metabolitos farmacéuticos se vuelve imposible para efecto de este trabajo definir el efluente como no tóxico.

En la Tabla 18 se muestran las concentraciones promedio de fármacos y formas de nitrógeno cuantificadas en el influente y efluente del biofiltro en la segunda etapa de la evaluación, como se mencionó anteriormente la adición de fármacos presentó una aportación importante de nitrógeno en el efluente, es decir, una vez transformados y metabolizados por los microorganismos. Este fenómeno afectó principalmente a la cuantificación de nitrógeno total, la cual mostraba concentración excedida del límite de la técnica utilizada y por lo cual no se presenta en la tabla, sin embargo, como se observó en la Figura 26, el nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos muestran que el proceso de nitrificación continuó manifestándose durante las tres fases evaluadas al adicionar los fármacos.

Tabla 18. Concentraciones de fármacos y formas de nitrógeno durante la segunda etapa de evaluación

Días de operación	TRH (h)	Influente (mg/L)				
		MTF	CFX	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
24-43	7	356.61 ±24.46	16.19 ±3.63	23.90 ±1.42	0.20 ± 0.45	0.26 ± 0.18
44-75	4	351.28 ±15.21	15.40 ±2.00	23.10 ±4.02	0.70 ± 0.48	0.11 ± 0.14
76-103	5	361.75 ±21.88	16.66 ±1.21	24.90 ±3.41	0.50 ± 0.53	0.06 ± 0.09
Días de operación	Caudal (L/d)	Efluente (mg/L)				
		MTF	CFX	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

24-43	7	60.42 ±24.22	4.54 ±0.92	32.00 ±3.26	44.20 ±24.31	107.50 ±46.90
44-75	4	81.38 ±50.47	8.72 ±2.77	45.60 ±4.02	61.10 ±62.28	90.90 ±29.27
76-103	5	42.47 ±25.58	8.84 ±0.79	31.10 ±3.41	74.25 ±31.32	111.20 ±15.81

Efecto de la remoción de los fármacos sobre la DQO

Con respecto al efecto que produjo la adición de fármacos sobre la DQO, se comentó anteriormente la aportación de DQO de estos compuestos al agua residual, este comportamiento se puede apreciar en la comparación de las Figuras 27 y 28 en donde la Figura 27 muestra las concentraciones obtenidas durante la estabilización del sistema al agua residual y la Figura 28 muestra las concentraciones obtenidas durante la etapa de evaluación del biofiltro adicionando los fármacos, cuya presencia se representa con las estructuras químicas correspondientes dentro del gráfico. Las líneas verticales representan el cambio de las cargas orgánica e hidráulica y los valores de dichas cargas se muestran en la Tabla 19 junto con los porcentajes medios de remoción obtenidos de DQO y ambos fármacos.

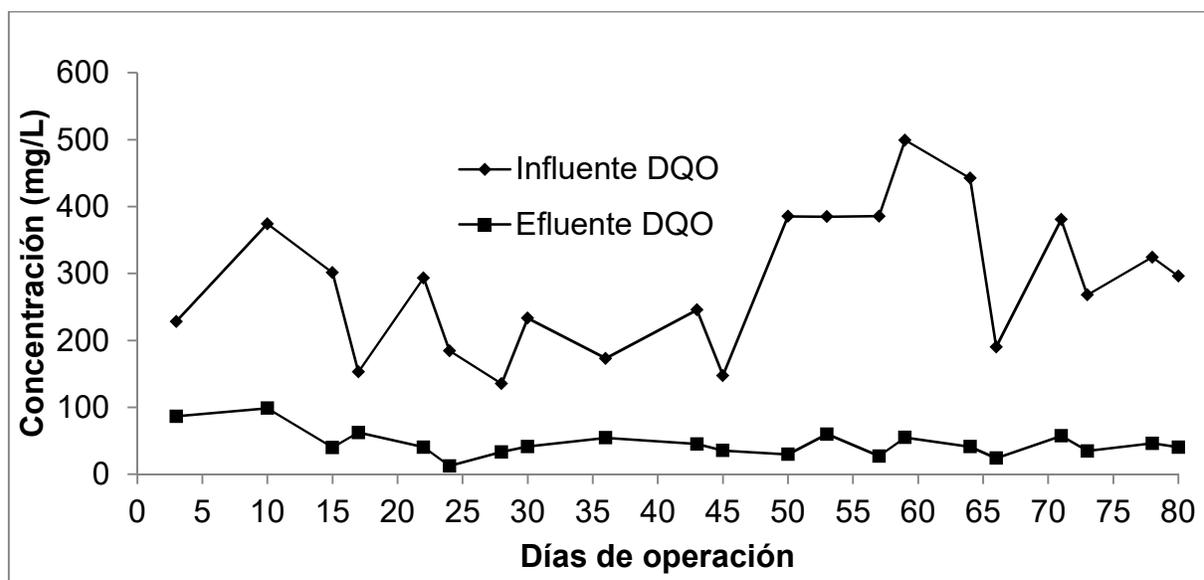


Figura 27. Concentraciones obtenidas de DQO durante la etapa de estabilización del biofiltro

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

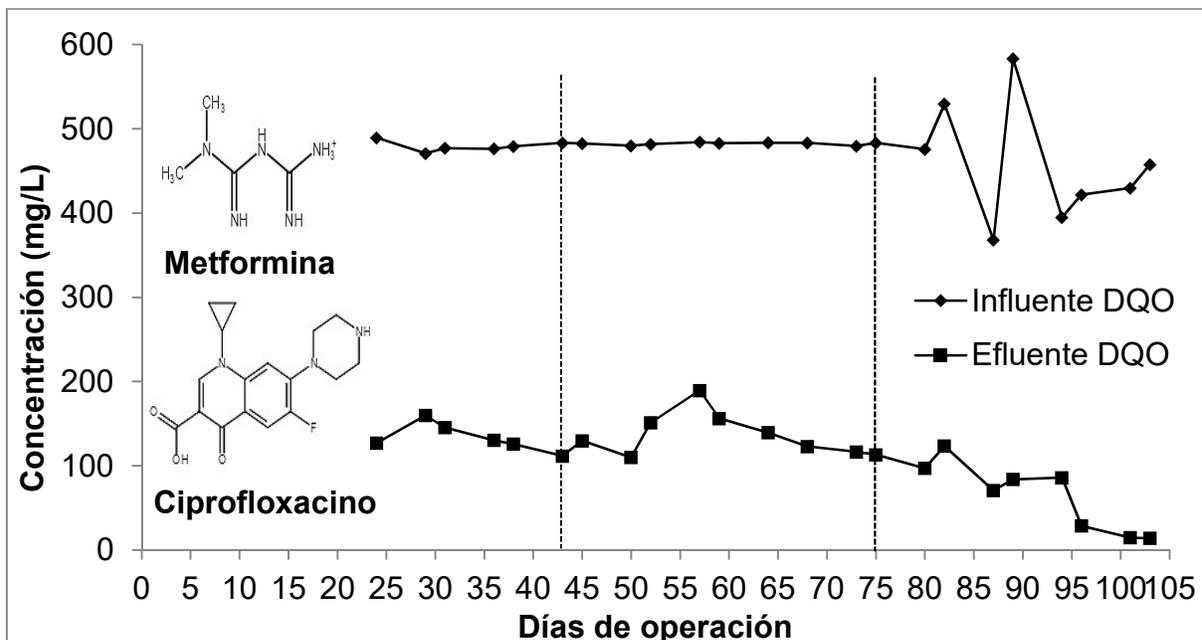


Figura 28. Concentraciones obtenidas de DQO durante la etapa de evaluación del biofiltro con la adición de fármacos.

La concentración media de DQO alcanzada durante la etapa de estabilización fue de 286.96 ± 104.42 mg/L en el influente y de 46.05 ± 19.92 mg/L en el efluente, mientras que en la etapa de evaluación con los fármacos la concentración media de DQO fue de 472.93 ± 41.86 mg/L en el influente y de 110.76 ± 44.89 mg/L en el efluente. Estas concentraciones indican que la remoción de DQO no se vio tan afectada por la presencia de altas concentraciones de los fármacos ni por la aplicación de diferentes cargas hidráulicas y TRH, este hecho también indica que no hubo inhibición microbiana como lo reportaron González et al. (2014), posiblemente a que los microorganismos se adaptaron exitosamente a estos compuestos. Por otro lado el incremento en la concentración de DQO podría explicar el decaimiento en la remoción de ciprofloxacino, ya que según Dorival-García, et al., (2013) determinaron que un aumento en la concentración de la DQO disminuye la biodegradación de este fármaco. En el caso de la metformina, se sabe que su biodegradación aumenta la concentración del nitrógeno amoniacal, esto podría explicar el consumo de oxígeno y por lo tanto la remociones alcanzadas de DQO de hasta 95% ya que según Metcalf y Eddy (2003), indican que por cada gramo oxidado se requieren 4.75 g de O_2 y la oxidación del $N-NH_4$ se comprueba con el desarrollo del proceso de nitrificación observado en la Figura 26 y reforzando así la suposición de que hubo una exitosa adaptación microbiana a la presencia de altas concentraciones de fármacos.

Tabla 19. Parámetros de operación del biofiltro y remoción de DQO y fármacos durante la evaluación.

Días de operación	TRH (h)	COS (gDQO/m ² d)	CHS (m ³ /m ² d)	Remoción de DQO (%)	Remoción de MTF (%)	Remoción de CFX (%)
24-43	7	87.22	0.18	71.22	82.88	71.01
		±		±	±	
		1.23		3.39	6.25	6.22
44-75	4	87.92	0.37	72.23	76.26	41.16
		±		±	±	
		0.29		5.23	14.85	16.66
76-103	5	83.41	0.27	85.95	86.60	44.49
		±		±	±	
		12.96		8.44	7.47	11.45

Efecto de la remoción de los fármacos sobre el fósforo

Durante la etapa de estabilización la concentración media del fósforo total fue de 16.9 ± 4.91 mg/L en el influente y de 9.7 ± 3.6 mg/L, lo que significó una remoción de 40 ± 18.8 %, posteriormente, al haber sido adicionados los fármacos la concentración media fue de 15.48 ± 2.49 mg/L en el influente y de 12.36 ± 3.2 mg/L en el efluente, lo que representa una remoción media de 21 ± 11.8 %. Al realizar la comparación de las Figuras 3.1.1.39 y 3.1.1.40, se aprecia que a diferencia del nitrógeno y la DQO, los fármacos no reflejaron una alteración en la concentración normal de fósforo en el agua residual ni en el influente ni efluente del biofiltro, esto pudo ser porque las moléculas de los fármacos no contienen fósforo, sin embargo, se puede ver disminuido el porcentaje de remoción que pudo deberse al desequilibrio causado en los microorganismos como se describió anteriormente para el caso del nitrógeno y la DQO. En la Figura 30 se observa también que la remoción de fósforo se mantuvo estable a pesar de los cambios de carga hidráulica aplicados y manteniéndose así hasta terminar con la evaluación.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

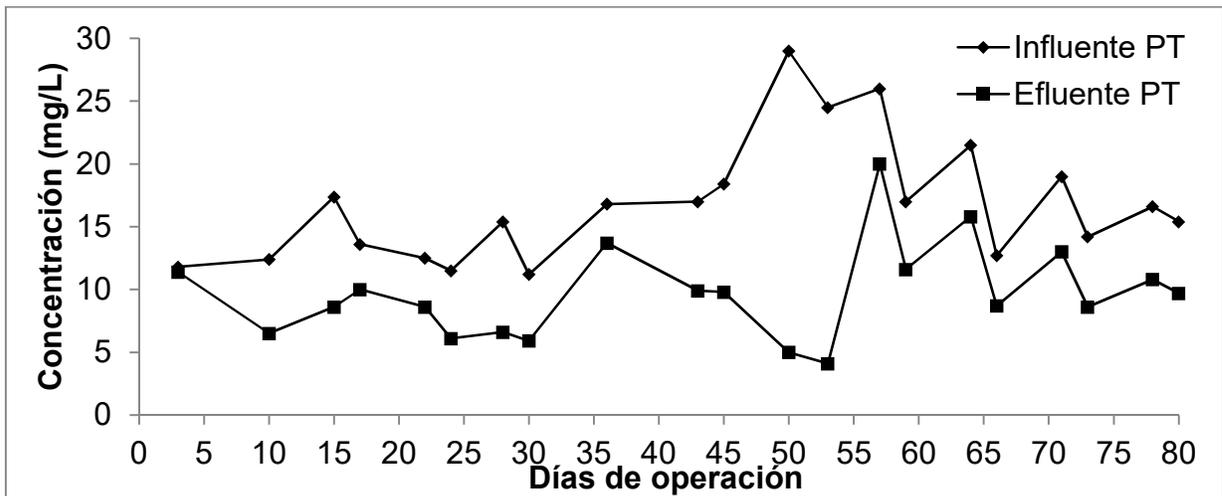


Figura 29 Concentraciones obtenidas de PT durante la etapa de estabilización del biofiltro

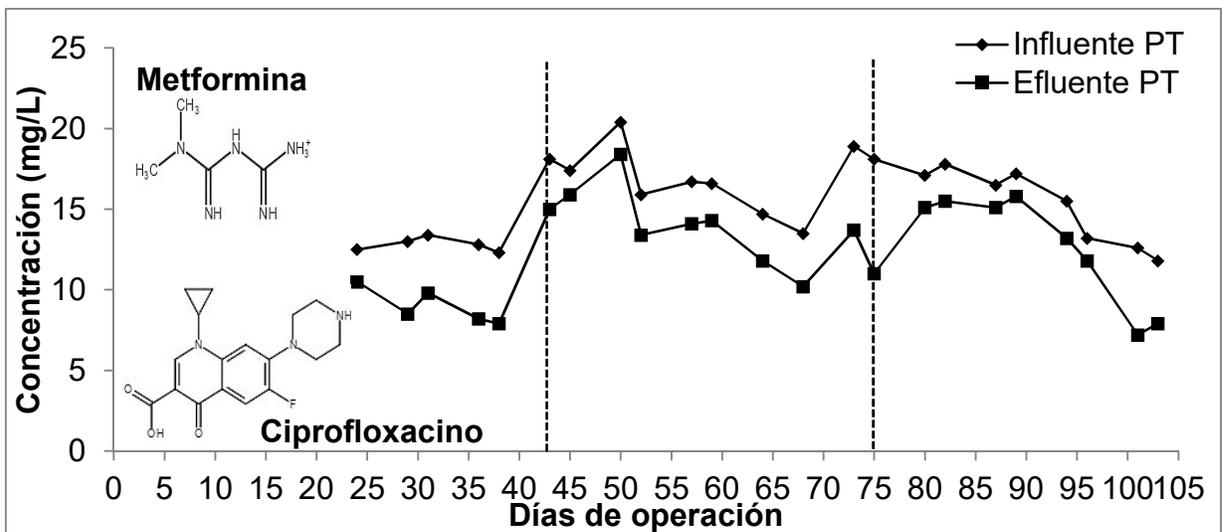


Figura 30 Concentraciones obtenidas de PT durante la etapa de evaluación del biofiltro con la adición de fármacos

De acuerdo con los resultados obtenidos en la evaluación del biofiltro, considerando su desempeño, la estabilidad y los porcentajes de remoción de la DQO, nutrientes y los fármacos, las mejores condiciones para obtener un desarrollo estable del sistema fueron las aplicadas durante la primera fase de la evaluación una vez adicionados los fármacos, es decir, operando el biofiltro con un caudal de 1.44 L/d, TRH de 7 h, una COS de 87.22 ± 1.23 gDQO/m²d, COV de 208.81 ± 2.94 gDQO/m³d, CHS de 0.18 y CHV de 0.41, bajo estas condiciones de operación se alcanzó una remoción promedio de 82.88 ± 6.25 % de metformina, 71.01 ± 6.22 % de ciprofloxacino, 71.22 ± 3.39 % de DQO, 29.8 ± 8.6 % de fósforo total, una concentración en el efluente de 32.0 ± 3.3 mg/L de nitrógeno amoniacal con una generación de 44 mg/L de nitritos y 107 mg/L de nitratos.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Comparación con otros sistemas de tratamiento

En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos en otros sistemas de tratamiento biológico respecto a los fármacos, DQO y nutrientes evaluados en el biofiltro empacado con *Ficus benjamina*, posteriormente en la Tabla 3.1.1.30 se muestra la comparación de resultados obtenidos por diferentes sistemas biológicos de tratamiento en la remoción de metformina y ciprofloxacino.

Tabla 20. Comparación de la remoción de materia orgánica y nutrientes en diferentes sistemas tratamiento biológico

Sistema	Parámetro	Máxima remoción alcanzada	Autor
Filtro biológico aerobio	DQO	94 %	Domínguez, 2012
	N-NH ₄	56 %	
	PT	26 %	
Lodos activados convencional	DQO	92 %	González y Saldarriaga, 2008
	N-NH ₄	87 %	
	PT	83 %	
Humedal Artificial	DQO	30 %	Vera, et al., 2010
	N-NH ₄	55 %	
	PT	15 %	
Sistema UTC híbrido (University Cape Town)	DQO	90 %	Saldarriaga, et al., 2009
	N-NH ₄	85 %	
	PT	95 %	
Biodisco	DQO	45 %	Su, et al., 2015
	N-NH ₄	40 %	
	PT	---	
Biofiltro con <i>Ficus benjamina</i>	DQO	90 %	---
	N-NH ₄	99 %	
	PT	40 %	

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Tabla 21. Comparación de remociones alcanzadas por diferentes sistemas de tratamiento biológico respecto a los fármacos estudiados

Sistema	Parámetro	Remoción máxima alcanzada	Autor
Filtros percoladores	Metformina	77 %	Santos, et al., 2013
	Ciprofloxacino	70 %	
MBR anaerobio	Metformina	<99 %	Monsalvo, et al., 2013
Lodos activados – MBR	Ciprofloxacino	52.8 %	Dorival-García, et al., 2012
MBR anaerobio con lecho fluidizado – sistema de carbón activado granular	Ciprofloxacino	Fase 1.- 89.4 % Fase 2.- ND (100%)	Dutta, et al., 2014
Sistema convencional de lodos activados	Ciprofloxacino	80 %	Jelic', et al., 2012
Composteo	Ciprofloxacino	100 %	Motoyama, et al., 2011
Biofiltro empacado con <i>Ficus benjamina</i>	Metformina	89.5 %	---
	Ciprofloxacino	77.9 %	

En las tablas anteriores se muestra la efectividad del biofiltro empacado con ficus para remover contaminantes incluso mejor que sistemas combinados, por lo tanto se convierte en una opción económica para su implementación en el tratamiento de aguas residuales.