



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA BIOQUÍMICA**

TESIS

**Toxicidad del efluente gaseoso del biofiltro en la
biodegradación del tolueno por *Macrophomina
phaseolina***

PRESENTA

Zaira Marissa Rodela Rodríguez

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS ÁREA TOXICOLOGÍA**

TUTORES

Dra. en C. Elsa Marcela Ramírez López

Dr. en C. Roberto Rico Martínez

INTEGRANTE DEL COMITÉ TUTORAL

Dr. en C. Francisco Javier Avelar González

Aguascalientes, Ags., 17 de junio del 2021

AUTORIZACIONES



CARTA DE VOTO APROBATORIO
COMITÉ TUTORAL

JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS
P R E S E N T E

Por medio del presente como Miembros del Comité Tutorial designado del estudiante **ZAIRA MARISSA RODELA RODRIGUEZ** con ID 260694 quien realizó la tesis titulada: **Toxicidad del efluente gaseoso del biofiltro en la biodegradación del tolueno por *Macrophomina phaseolina*** un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 16 de junio de 2021.

Dra. en ciencias Elsa Marcela Ramírez López
Tutor de tesis

Dr. En Ciencias Roberto Rico Martínez
Co-Tutor de tesis

Dr. En ciencias Francisco Javier Avelar González
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-16
Actualización: 00
Emisión: 17/05/19



DICTAMEN DE LIBERACION ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aa: 16 de Junio del 2021

NOMBRE: ZAIRA MARISSA RODELA RODRÍGUEZ ID: 260694

PROGRAMA: MAESTRIA EN CIENCIAS: ÁREAS DE BIOTECNOLOGIA VEGETAL O TOXICLOGÍA LGAC (del posgrado): TOXICLOGÍA

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo práctico
Título: Toxicidad del efluente gaseoso de un biofiltro en la biodegradación del tolueno por Macrophomina phaseolina

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Generación de conocimiento científico. Se logró establecer una nueva alternativa de control de contaminantes atmosféricos

INDICAR SI/NO SEGÚN CORRESPONDA:

Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:

- SI El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
NA Generó transferencia del conocimiento o tecnológica

El egresado cumple con lo siguiente:

- SI Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
SI Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI Coincide con el título y objetivo registrado
SI Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI Tiene el CVU del Conacyt actualizado
NA Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)

En caso de Tesis por artículos científicos publicados:

- NA Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
NA El estudiante es el primer autor
NA El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
NA En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
NA Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
NA La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado

SI X
No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Elsa Marcela Ramírez López
Dra. en C. Elsa Marcela Ramírez López

NOMBRE Y FIRMA DE LA SECRETARIO TÉCNICO:

Raquel Guerrero Alba
Dra. en C. Raquel Guerrero Alba

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, según paut el Decato.

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Marydeé Martínez Rivalcaba
Dra. en C. Marydeé Martínez Rivalcaba

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

M. en C. Jorge Martín Alferez Chávez

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Elaborado por: D. Apoyo al Posg.
Revisado por: D. Control Escolar/D. Gestión de Calidad
Aprobado por: D. Control Escolar/ D. Apoyo al Posg.

Código: DO-EE-FD-13
Actualización: 01
Revisión: 20/06/19

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), le agradezco por la beca recibida durante el periodo de mi maestría.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes por las instalaciones y los programas utilizados para la elaboración del proyecto.

A los integrantes del centro de ciencia básicas, y del posgrado de ciencias básicas en el área de biotecnología o toxicología, por hacer de mi proyecto un recorrido mas ameno.

Al Dr. Gustavo Emilio Santos Medrano por su ayuda y enseñanzas durante la fase experimental.

A los integrantes de mi comité tutorial el Dr. Roberto Rico Martínez y el Dr. Francisco Javier Avelar González por sus correcciones y aportaciones para la mejora del proyecto.

Y mi más profundo agradecimiento a la Dra. Elsa Marcela Ramírez López, que en el transcurso del proyecto nunca dudo de mis habilidades, y por brindarme su amistad, su conocimiento, su tiempo, sus correcciones y sobre todo su apoyo para concluir mi maestría.

Dedicatoria

A mi madre Guadalupe Rodríguez, mi padre Raúl Rodela, mis hermanos Zuriel y Gerardo porque sin ellos esto no hubiera sido posible, y todos mis logros se los debo a ellos.

A mis amigos, Juliana, Alejandra, Andrea, Oscar, Emmanuel y Efraín por acompañarme en este recorrido.

A la Dra. Elsa Marcela Ramírez López, por su tiempo, dedicación y paciencia para hacer esta meta posible.

A Vicente por animarme todos los días a seguir adelante, por sus palabras de apoyo y sobre todo por su presencia durante todo este proceso de superación.

¡A todos gracias!

ÍNDICE

	Página
Índice de tablas.....	3
Índice de figuras.....	4
1. Introducción.....	8
2. Antecedentes.....	9
2.1. Contaminación atmosférica.....	9
2.1.1. Contaminación atmosférica a nivel mundial.....	10
2.1.3. Contaminación atmosférica en Aguascalientes.....	14
2.1.4. Daños a la salud a causa de la contaminación atmosférica.....	16
2.1.5. Contaminantes atmosféricos.....	17
2.2 Tolueno.....	18
2.2.1. Daños al ambiente.....	20
2.2.1.1 Aire.....	20
2.2.1.2. Agua.....	21
2.2.1.3. Suelo.....	21
2.2.2. Toxicidad del tolueno para el ser humano.....	21
2.3. Tratamientos de compuestos orgánicos volátiles COV.....	22
2.3.1. Métodos de tratamiento físicos y químicos de los COV.....	23
2.3.2. Tratamiento biológico de los COVs.....	25
2.3.2.1. Biofiltros.....	25
2.3.2.2.4. Importancia económica.....	29
2.4. Organismo bioindicador.....	30
3. Justificación.....	33
4. Hipótesis.....	34
5. Objetivo.....	34
5.1. Objetivos específicos.....	34
6. Metodología.....	35
6.1. Diseño del biofiltro.....	35
6.1.1. Características fisicoquímicas del material de empaque.....	35

6.1.1.1. Determinación de la densidad del soporte.....	35
6.1.1.2. Medición de pH.....	36
6.1.1.3. Determinación de la porosidad del lecho.....	36
6.1.2. Condiciones ambientales de operación.....	36
6.1.3. Determinación de la eficiencia de eliminación del biofiltro.....	36
6.1.4. Carga volumétrica del contaminante.....	37
6.1.4. Capacidad de eliminación del biofiltro.....	37
6.2. Pruebas de toxicidad.....	38
6.2.1. <i>Raphidocelis subcapitata</i>	38
6.2.1.1. Cultivo.....	38
6.2.1.2. Pruebas de sensibilidad al tolueno.....	38
6.2.1.3. Pruebas toxicológicas de las emisiones gaseosas del biofiltro con <i>Raphidocelis subcapitata</i>	39
7. Resultados.....	40
7.1. Eficiencia de eliminación del tolueno en el biofiltro.....	40
7.2 Pruebas de toxicidad.....	45
7.3. Pruebas de toxicidad con el biofiltro.....	47
8.1. Capacidad de biodegradación del tolueno por <i>Macrophomina phaseolina</i> en un biofiltro empacado con vaina de cacahuate.....	49
8.2. Pruebas de toxicidad.....	50
9. Conclusión.....	53
10. Referencia.....	54
ANEXOS.....	59

Índice de tablas

	Página	
Tabla 1	Contaminantes atmosféricos primarios	19
Tabla 2	Características fisicoquímicas del tolueno	20
Tabla 3	Vías de degradación de contaminantes	26
Tabla 4	Características de los biofiltros.	38
Tabla 5	Porcentajes de inhibición de crecimiento de <i>Raphidocelis subcapitata</i> ocasionada por tolueno.	45
Tabla 6	Resultados de CL50, CL10, NOEC, LOEC y coeficiente de variación.	45
Tabla 7	Porcentajes de inhibición de crecimiento de <i>Raphidocelis subcapitata</i> ocasionada por el efluente gaseoso de los biofiltros.	47

Índice de figuras

	Página	
Figura 1	Contaminación en Londres en la época victoriana (1837-1901)	11
Figura 2	Contaminación en la ciudad de México	13
Figura 3	Contaminación en el Estado de Aguascalientes	16
Figura 4	Ubicación de estaciones de monitoreo de la calidad del aire del Estado de Aguascalientes	17
Figura 5	Ruta de degradación del tolueno por <i>Pseudomonas putida</i>	27
Figura 6	Sistema de evaluación de la toxicidad del efluente gaseoso en la biodegradación del tolueno por <i>Macrophomina phaseolina</i> .	39
Figura 7	Eficiencia de eliminación del tolueno en el biofiltro 1 durante el proceso de operación.	40
Figura 8	Eficiencia de eliminación del tolueno en el biofiltro 2 durante el proceso de operación.	40
Figura 9	Capacidad de eliminación a diferentes cargas volumétricas de tolueno en el biofiltro 2.	41
Figura 10	Capacidad de eliminación a diferentes cargas volumétricas de tolueno en el biofiltro 2.	42
Figura 11	Temperatura y humedad relativa durante el proceso del biofiltro 1	44
Figura 12	Temperatura y humedad relativa durante el proceso del biofiltro 2	45
Figura 13	Regresión lineal del porcentaje de inhibición de crecimiento con las concentraciones en mg/L de tolueno.	46
Figura 14	Sistema de evaluación de la toxicidad del efluente gaseoso en la biodegradación del tolueno por <i>Macrophomina phaseolina</i> .	47
Figura 15	Regresión lineal del porcentaje de inhibición de crecimiento con las concentraciones en mg/L del efluente gaseoso del biofiltro.	48

Acrónimos

CAI	Clean Air Institute
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
OMS	Organización Mundial de la Salud
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SINIARN	Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales
SSMAA	Secretaría de Sustentabilidad y Medio Ambiente de Aguascalientes

Nomenclatura

CL₁₀	Concentración letal 10
CL₅₀	Concentración letal 50
CO:	Monóxido de carbono
CO₂:	Dióxido de carbono
COV	Compuesto Orgánico Volátil
HC	Hidrocarburos
LOEC	Concentración baja a la cual se observan efectos
NOEC	Concentración en la cual no se observan efectos
NOx	Óxidos de nitrógeno
PAH	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, por su siglas en inglés
PCB	Policlorobifenilos
PM_{2.5}	Partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 µm
PM₁₀	Partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor a 10 µm
SOx:	Óxidos de azufre

RESUMEN

El aumento de las emisiones gaseosas contaminantes hacia la atmosfera ha sido un tema muy preocupante, por lo que se han buscado alternativas de control tanto fisicoquímicas como biológicas. La biofiltración es una de las alternativas económicas y eficientes para el control de estos contaminantes, principalmente los compuestos orgánicos volátiles (COVs). En un biofiltro la biopelícula generalmente está conformada, principalmente, por un consorcio bacteriano. No obstante, se han estudiado algunos hongos microscópicos para la degradación de COVs, y se continúa en la búsqueda de diferentes microorganismos capaces de adaptarse a las condiciones ambientales en el biofiltro, para los diferentes COVs como fuente de energía.

En el presente estudio se evaluó la capacidad del hongo microscópico *Macrophomina phaseolina* para la biodegradación del tolueno en un biofiltro empacado con vaina de cacahuate. También se estudió la toxicidad del efluente gaseoso de este mismo utilizando el alga microscópica *Raphidocelis subcapitata* como organismo bioindicador. Los resultados obtenidos mostraron una buena eficiencia de eliminación del tolueno por *Macrophomina phaseolina* siendo superior al 99.99 % bajo una carga volumétrica de 1.2 a 1.9 kg/m³_{lecho}.h⁻¹ y del 99% para 4.9 a 5.5 kg/m³_{lecho}.h⁻¹. Las emisiones gaseosas del biofiltro con bajas concentraciones de los productos de la biodegradación del tolueno se consideraron tóxicas cuando se tienen concentraciones superiores a los 2 mg.L⁻¹ del tolueno.

Palabras clave: biofiltración, toxicología ambiental, biorremediación, remoción de gases, organismos bioindicadores.

ABSTRACT

The increase in gaseous pollutant emissions into the atmosphere has been a matter of major concern, so have been sought both physicochemical and biological control alternatives. Biofiltration is one of the economical and efficient alternatives for the control of pollutants, mainly volatile organic compounds (VOCs). In a biofilter, the biofilm generally consists of a bacterial consortium. However, some microscopic fungi have been studied for the degradation of VOCs, and the research continues to find different microorganisms capable of adapting to the environmental conditions in the biofilter, for the different VOCs as an energy source.

In the present study we evaluated the ability of the fungus *Macrophomina phaseolina* for the biodegradation of toluene in a biofilter packaged with peanut pod, as well as the toxicity of the same effluent gas using the microalgae *Raphidocelis subcapitata* as bioindicator organism. The results obtained showed a good toluene removal efficiency by *Macrophomina phaseolina*, being higher than 99.99% under a volumetric load of 1.2 to 1.9 kg/m³_{pb}.h⁻¹ and 99% to a volumetric load of 4.9 to 5.5 kg/m³_{pb}.h⁻¹. The gaseous emissions of the biofilter with low concentrations of the biodegradation products of toluene were considered toxic when there were concentrations higher than 2 mg.L⁻¹ of toluene.

Keywords: Environmental Toxicology; Bioremediation; Gas removal; Bioindicator Organisms.

1. Introducción

La contaminación por partículas atmosféricas siempre ha existido de forma natural o biogénica por las erupciones volcánicas, los bosques, los pantanos, entre otras, emitiendo una gran diversidad de compuestos orgánicos e inorgánicos. Al paso del tiempo, y con la primera revolución industrial las emisiones se incrementaron de forma importante por la actividad antropogénica y hasta la fecha, los contaminantes presentes en la atmósfera continúan causando graves problemas de salud.

Con el fin de mejorar la salud de la población, a lo largo de la historia se han desarrollado una gran diversidad de tratamientos para reducir las emisiones gaseosas industriales a través de procesos fisicoquímicos y biológicos. Entre estos últimos está la biofiltración, el cual es una biotecnología que elimina los contaminantes de las fuentes de emisión gaseosas industriales de fuentes fijas atrapándolas en una matriz; este método es eficiente para bajas concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos volátiles y semivolátiles con elevados flujos de gas. Los contaminantes pasan a través de un empaque poroso en el que se inmovilizan los cultivos donde se degradan los contaminantes. En condiciones óptimas, los contaminantes pueden degradarse completamente a dióxido de carbono y agua, o usarse como fuentes de energía y carbono para la formación de nuevas células.

En el presente estudio se marca un capítulo tratando aspectos generales sobre la contaminación y las tecnologías para tratamiento de las emisiones contaminantes. En seguida se describe la metodología para el manejo de biofiltros y el sistema instalado para el estudio de la toxicidad de las emisiones gaseosas de los biofiltros. El objetivo de este estudio fue determinar la eficiencia de eliminación del tolueno y la capacidad de eliminación del biofiltro y determinar si sus emisiones gaseosas pueden presentar toxicidad en algas microscópicas.

2. Antecedentes

2.1. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica se define según la Agencia Ambiental Europea como “la existencia de sustancias nocivas en la atmósfera en concentraciones que genere daños o riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos” (Álvarez et al., 2017). La organización mundial de la salud (OMS) la define como la aparición en el aire de una o varias sustancias extrañas en tales cantidades y durante un lapso prolongados como para producir efectos nocivos sobre el hombre, los animales y las plantas o el suelo, así como perturbar el bienestar o el uso de los bienes (Gallego et al., 2012).

Estos contaminantes pueden venir de diferentes fuentes ya sea: a) naturales como las erupciones volcánicas, incendios forestales, etc., b) antrópicas considerando a las fuentes fijas y móviles, incluyendo a los procesos de combustión de combustibles fósiles o de uso doméstico (contaminación del aire interior), que en este último es posible encontrar un amplio abanico de contaminantes de diferentes fuentes, por ejemplo, las calefacciones residenciales, que generan dióxido y monóxido de carbono (Álvarez et al., 2017). Así también en la clasificación de contaminantes químicos presentes en áreas domésticas encontramos: a) productos de combustión el CO₂, CO, y el humo de tabaco; b) materiales de construcción tenemos a las fibras de vidrio y amianto, formaldehído y radón; c) productos de consumo encontramos a las pinturas, cosméticos, barnices, pesticidas, productos de limpieza, etc. (Gallego et al., 2012). En todas estas fuentes de emisión se encuentran presentes los compuestos orgánicos volátiles (COV), que se definen como un: "Un compuesto orgánico es todo aquel compuesto que contenga carbono y uno o más de los siguientes elementos: hidrógeno, halógenos, oxígeno, azufre, fósforo, silicio o nitrógeno, salvo los óxidos de carbono y los carbonatos o bicarbonatos inorgánicos".

"Un Compuesto Orgánico Volátil (COV) es todo aquel compuesto orgánico que tenga a 293.15K una presión de vapor de 0.01kPa o más, o que tenga una volatilidad equivalente en las condiciones particulares de uso"

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) los define como (USEPA, 2017):

“Los compuestos orgánicos volátiles o COVs son compuestos químicos orgánicos cuya composición hace posible que se evaporen en condiciones atmosféricas interiores normales de temperatura y presión”.

2.1.1. Contaminación atmosférica a nivel mundial

Existen evidencias de que en la antigüedad la biomasa, como la madera fue empleada como combustible para la preparación de alimento en interiores domésticos mal ventilados, teniendo como consecuencia efectos nocivos sobre la salud de los humanos. Este mismo daño se ha observado en momias egipcias, o restos arqueológicos escandinavos y sajones, que estos presentaron problemas respiratorios, lo que da una idea de que pudieron someterse a una prolongada exposición al humo de la combustión de la madera en interiores (Gallego et al., 2012).

En el siglo XVIII se da inicio a la revolución industrial (Silva Otero Arístides, 2005) y con ellas miles de toneladas de emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de desechos sólidos como la carbonilla y gaseosos como los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, compuestos orgánico volátiles, etc., emitidos por la degradación de esos desechos y la quema del carbón mineral y la biomasa. Esta contaminación atmosférica ascendió de forma significativa a nivel mundial provocando daños a la salud (Gutierrez et al., 1999).

Al pasar del tiempo han ocurrido desastres causados por la contaminación del aire, por ejemplo, en el caso de Bélgica en diciembre de 1930 aproximadamente 6000

personas enfermaron y 63 murieron. En Donora, Pennsylvania el 26 de octubre de 1948, enfermaron más de 6000 y murieron alrededor de 20 personas (Gutierrez et al., 1999).

En diciembre de 1952 se dio el caso más notorio de contaminación, esto ocurrió en la ciudad de Londres en donde una masa de aire frío cubrió la ciudad (Figura 1). Esto debido a que, por el descenso de temperatura, las personas optaron por prender sus estufas de carbón, y adicional a los humos de las industrias también fueron las emisiones de los vehículos, ocasionando así un incremento en los niveles de contaminación atmosférica, a tal punto que el día 6 del mes de diciembre de ese año, la luz del sol apenas penetraba la densa nube de contaminantes, que no podía salir del valle de Támesis debido a la inversión térmica que se desarrolló. Lo que ocasionó problemas graves de salud, como el incremento de la incidencia de ataques cardíacos y dificultades respiratorias. Cuando al fin el viento despejó el cielo, se estima que unas 4000 personas habían muerto por razones atribuibles al fenómeno (Antonio Chamiazo et al., n.d.).



Figura 1.- Contaminación de Londres en la revolución industrial (1837-1901) (Rodríguez G., 2018).

Ésta y otras catástrofes similares que han ocurrido a través de la historia han hecho tomar conciencia a diversos sectores de la población, aunque muchos otros aún ignoran las letales consecuencias de la contaminación.

2.1.2. Contaminación atmosférica a nivel nacional

En México la revolución industrial comenzó a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX, 150 años más tarde que Inglaterra y Estados Unidos (Oropez, 2013). Y se habla de industrias como la minería, la industrial de pieles y zapatos, fabricación de pólvora, jabones, tabaco e industria textil algodonera, esta última principalmente en los estados de Puebla, Veracruz y México (Haber et al., 1993). En 1920 se establecen las industrias automotrices (Vicencio, 2007) la farmacéutica, la petroquímica entre otras. Desde entonces la contaminación atmosférica sería un problema serio en nuestro país.

Los estados que históricamente han presentado mayor desarrollo industrial y por consecuencia mayor nivel de contaminación atmosférica son la Ciudad de México, Toluca, Guadalajara, y Monterrey.

En la ciudad de México a partir de 1966 se empezó a monitorear la calidad del aire instalando cuatro estaciones las cuales arrojaban datos de concentraciones de dióxido de azufre y del material particulado suspendido. Pero no es, sino hasta en 1972 cuando se creó la subsecretaría de mejoramiento del ambiente, y se empezaron a utilizar las metodologías de la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) para realizar adecuadamente el monitoreo de la calidad del aire (SINIARN, 2016). A partir del año 1998 comienza la elaboración de los “Inventarios de emisiones de contaminantes criterio”(Secretaría del medio ambiente, 2012).

Y es en el año 2004 cuando se realizó el “inventario de emisiones de contaminantes tóxicos” esto por la creciente emisión de los compuestos orgánicos

volátiles (COVs), precursores del ozono troposférico, por lo que, varios compuestos están considerados como contaminantes tóxicos atmosféricos, y altamente nocivos para la salud humana (Secretaría del medio ambiente, 2012).

En el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero, en el 2012, se reportaron las emisiones por tipo de fuente puntuales, área, móviles, vegetación y suelos. En este inventario mencionaron que las emisiones partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) fueron alrededor de las 35 mil toneladas al año, y el 27% correspondían a las partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), y sin dejar atrás las emisiones de monóxido de carbono (CO) que alcanzaron los 1,600,000 mil toneladas al año (Secretaría del medio ambiente, 2012).

En la figura 2 se muestra la contaminación atmosférica caracterizada por smog en la Ciudad de México. Un estudio realizado en el 2012 por el instituto de aire limpio (Clean Air Institute) México es considerado el segundo país de América latina con mayor número de muertes por contaminación atmosférica (Ureste, 2013).

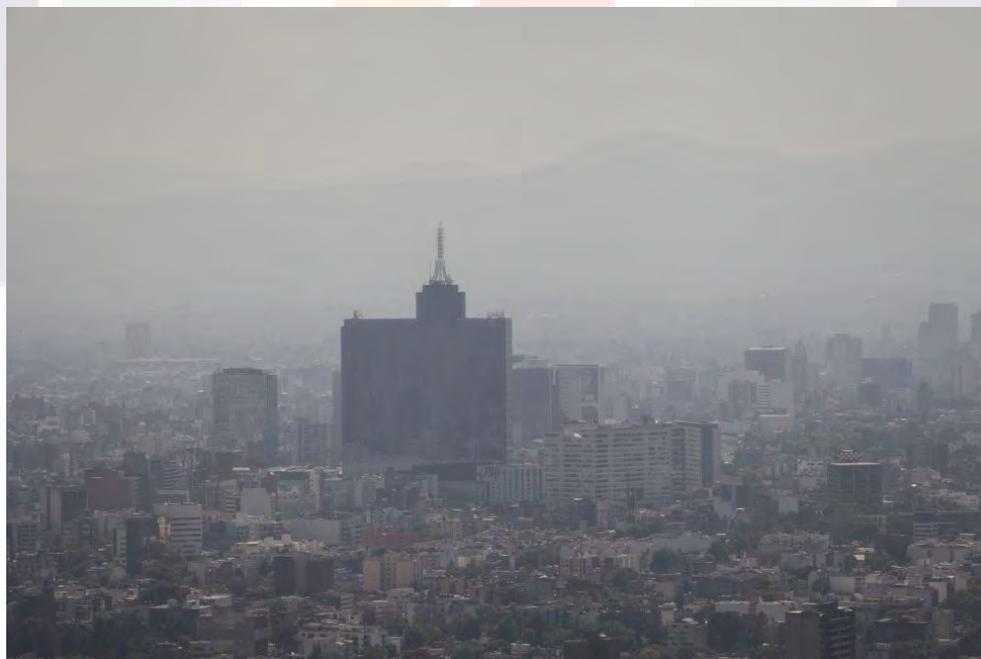


Figura 2. Contaminación en la ciudad de México (Ruíz, 2017).

Guadalajara, a partir de 1934, ha sido un importante centro comercial y manufacturero, lo que ha provocado un incremento de las vías de comunicación y

el flujo migratorio; esto ha acentuado de manera directa e indirecta la creciente emisión de contaminantes atmosféricos desde entonces a la fecha (Ramírez et al., 2006).

En el estado de Jalisco se llevó a cabo el Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara 1997-2001 que tiene por objetivo el proteger la salud de la población, abatiendo permanentemente la contaminación atmosférica, menciona que en 1995, las principales fuentes de contaminación atmosférica fueron el transporte (73.5 %), el suelo (21.2%), la industria (1.1%) y los servicios (4.5%) (SEMARNAT, 1997).

2.1.3. Contaminación atmosférica en Aguascalientes

En la ciudad de Aguascalientes la contaminación atmosférica al igual que en las diferentes grandes ciudades del país ha ido aumentando durante los años esto a causa de la industrialización y el crecimiento de la población (Figura 3).

En el año de 1975 se construyó la primera ciudad industrial en Aguascalientes, ocupaba 224 hectáreas en las cuales se ubicaron 279 plantas industriales, entre ellas la de alimentos, metalmecánica, automotriz, y de electrónica (Acosta et al., 2013) . Hasta la fecha Aguascalientes se sigue industrializando, esto a lo largo del valle de Aguascalientes podemos encontrarnos con varios parques industriales integrados logísticamente al corredor norte-sur de la ciudad (Padilla et al., 2015).

En 1996 se realizó un estudio de la calidad del aire en la ciudad de Aguascalientes por el Instituto Nacional de Ecología que consistió en 8 días de monitoreo, en donde se reportó las concentraciones máximas registradas de ozono (O_3) de 79 ppb, 19 ppb de dióxido de azufre (SO_2), 50 ppb de bióxido de nitrógeno (NO_2), 54 $\mu g/m^3$ partículas PM_{10} y 2.2 ppm monóxido de carbono (CO) (Secretaría del medio ambiente, 2017).



Figura 3.- Contaminación en el Estado de Aguascalientes (Ruiz, 2017).

En la actualidad Aguascalientes se tiene una red de monitoreo atmosférico, la cual consta de 4 casetas, la estación CBTIS, estación centro UAA, estación norte, estación Secretaria de Medio Ambiente (SSMAA) (figura 4) con el objetivo de diagnosticar y vigilar la calidad del aire. Los gases contaminantes que se reportan cada una de estas estaciones de monitoreo atmosférico se encuentra el monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas PM₁₀ y partículas PM_{2.5} (SSMAA, 2018).

En el 2016 se reportó el inventario de emisiones por fuentes fijas las cuales incluyen todas las industrias en la región de Aguascalientes las cuales arrojaron una cantidad preocupante de contaminantes atmosféricos en los cuales tenemos los siguientes PM10: 474.03, PM5: 333.66, SOx: 1992.04, CO: 222.73, NOx: 2719.05, COV: 1449.56, NH3: 4.95.

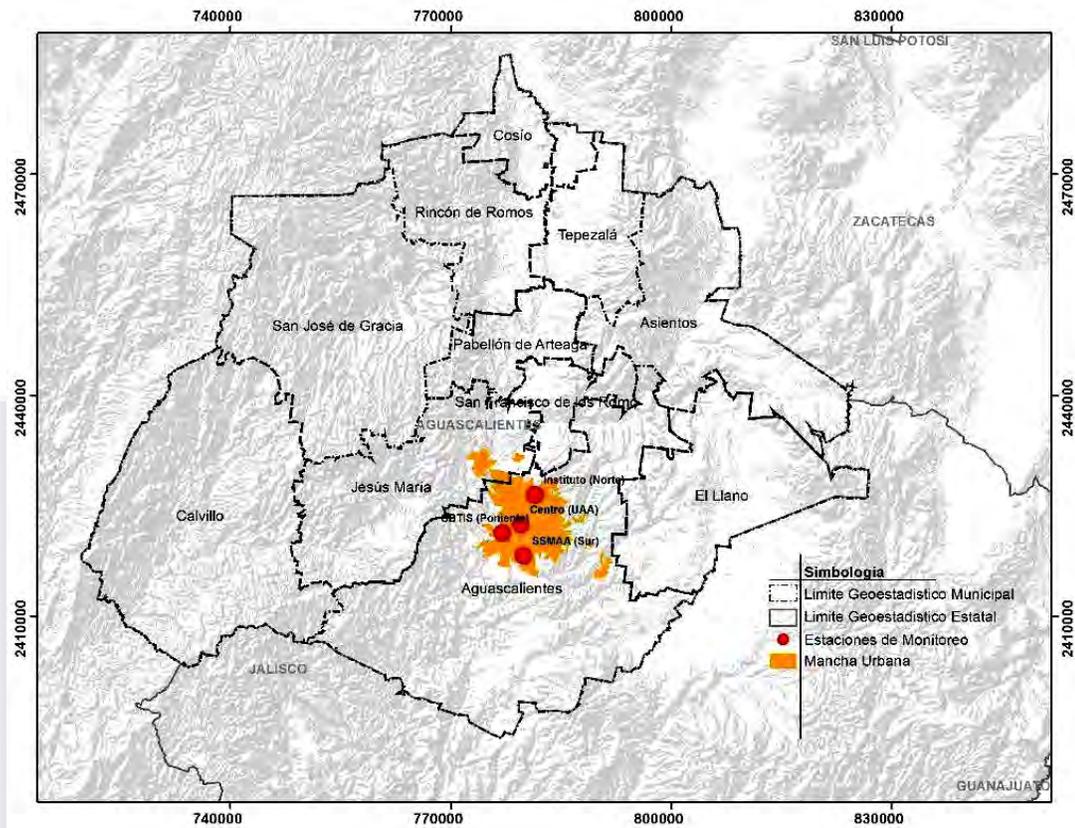


Figura 4.- Ubicación de estaciones de monitoreo de la calidad del aire del Estado de Aguascalientes (SSMAA, 2018).

2.1.4. Daños a la salud a causa de la contaminación atmosférica

Un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que la contaminación atmosférica exterior en el 2012 produjo alrededor de 3.7 millones de muertes a causa de fuentes urbanas y rurales en todo el mundo. También las últimas estimaciones de la OMS sobre la carga mundial de morbilidad, la contaminación del aire exterior e interior provocan unos siete millones de defunciones prematuras. Esto representa actualmente uno de los mayores riesgos sanitarios mundiales, comparable a los riesgos relacionados con el tabaco, y superado únicamente por los riesgos sanitarios relacionados con la hipertensión y la nutrición. La OMS estima que un 80% de las defunciones prematuras

relacionadas con la contaminación del aire exterior se deben a cardiopatía isquémica y accidente cerebrovascular, mientras que un 14% se deben a neumopatía obstructiva crónica o infección aguda de las vías respiratorias inferiores, y un 6% a cáncer de pulmón.

La evaluación del 2013 realizada por la Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer de la OMS determinó que la contaminación del aire exterior es carcinógena para el ser humano, y que las partículas del aire contaminado están estrechamente relacionadas con la creciente incidencia del cáncer, especialmente el cáncer de pulmón. También se ha observado una relación entre la contaminación del aire exterior y el aumento del cáncer de vías urinarias y vejiga (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, 2017).

2.1.5. Contaminantes atmosféricos

En la atmosfera se encuentran una serie de compuestos que contribuyen a la contaminación del aire, de los cuales se pueden diferenciar dos grupos principales (SEMARNAT, 2013):

Contaminantes primarios: Son vertidos directamente a la atmosfera por alguna fuente de emisión como chimeneas, automóviles, entre otros como se muestra en la Tabla 1. Dentro de estos contaminantes se encuentran los compuestos orgánicos volátiles (COV) producidos por una variedad de industrias, y sus emisiones se enfrentan a regulaciones ambientales cada vez más estrictas (Cheng et al., 2016). Uno de ellos es el REAL DECRETO 117/2003, que habla sobre limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades (Diario Oficial de la Unión Europea, 2003):

Contaminantes secundarios. Estos contaminantes se originan principalmente por la transformación y la reacción química de los contaminantes primarios cuando llegan a la atmosfera.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Ozono troposférico (O_3). Es formado por las reacciones químicas entre los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánico-volátiles, en presencia de oxígeno atmosférico y luz solar. Constituye un problema de salud ya que es considerado como un contaminante con capacidad irritante en tejidos y sobre muchos materiales (Aránguez et al., 1999).
 - Lluvia ácida. Esta lluvia se forma una vez que el SO_2 y los NO_x en presencia de agua, oxígeno y compuestos químicos forman ácido sulfúrico y ácido nítrico, y estos precipitan a la tierra en forma líquida cuando se presentan lluvias o en forma seca en presencia de nevadas o neblinas. El pH de la lluvia normal es de alrededor de 6, mientras que la lluvia ácida presenta un pH menor a 5.
 - Contaminación fotoquímica. La constituyen la luz solar y sustancias susceptibles de ser oxidadas. El smog fotoquímico es una mezcla de contaminantes que se forman por reacciones producidas por la luz solar al incidir sobre los contaminantes primarios (SEMARNAT, 2013).

2.2 Tolueno

El tolueno se clasifica dentro de los compuestos orgánicos volátiles y se encuentra naturalmente en el árbol de tolú y en el petróleo crudo, y es comúnmente empleado en las industrias de fabricación de pinturas, y diluyentes como esmaltes de uñas, lacas, adhesivos y caucho, también en algunos procesos de impresión y curtido de cuero.

Tabla 1.- Contaminantes atmosféricos primarios

CONTAMINANTE	FORMACIÓN	EMISORES	DAÑOS AL AMBIENTE	CONSULTA
ÓXIDO DE AZUFRE	SO _x Combustión de azufre presente en carbón y petróleo	Erupciones volcánicas, industrias como las del papel, petroquímica, centrales eléctricas.	Provoca la lluvia ácida.	(SEMARNAT , 2013)
MONÓXIDO DE CARBONO	CO Combustión de material orgánico, en presencia de oxígeno.	El 80% de las emisiones son de motores de combustión interna y procesos industriales.	Formación de smog, reacciona para crear ozono a nivel del suelo.	(Téllez et al., 2006)
ÓXIDO DE NITROGENO	NO _x Combustión de hidrocarburos o combustibles fósiles	Quema de hidrocarburos y de madera, producción de fertilizantes explosivos, tabaco, etc.	Precursor del smog fotoquímico.	(Fernández , 2015)
PARTÍCULAS SUSPENDIDAS	PM Partículas sólidas o líquidas como polvo, hollín de diésel, metales, cemento, polen, COVs, etc.	Elementos biológicos, productos químicos, y se dividen en dos grupos partículas menores a 10 µm (PM ₁₀) y las de fracción respirable más pequeña (PM _{2.5}).	Afecta a la composición química de la atmosfera.	(Arciniégas, 2012)
HIDROCARBUROS	HC Derivados del petróleo (COVs, PCB, PAH)	Automóviles, pinturas, vertederos, industrias textiles, cosméticos, agricultura, composteos entre otros.	Afectaciones a la capa de ozono.	(SEMARNAT , 2013)

En la tabla 2 se muestran las características fisicoquímicas del tolueno. Este Compuesto orgánico volátil es un líquido incoloro con olor muy característico. Se considera con un buen solvente, y se puede encontrar en gasolina junto con el benceno y el xileno (ATSDR, 2000).

Tabla 2. Características fisicoquímicas del tolueno (ATSDR, 2000).

Propiedad	Información
Peso molecular	92.14
Color	Característico
Estado físico	Líquido
Punto de ebullición	110.6°C
Punto de fusión	-95°C
Densidad a 20°C	0.8669 g/ml
Densidad de vapor	3.2 (aire=1)
Solubilidad en agua 25°C	534.8 mg/L
Coefficiente de partición OA	2.72
Presión de vapor a 25°C	28.4 mm/Hg

2.2.1. Daños al ambiente

El tolueno puede llegar al ambiente de distintas formas, ya sea por desechos industriales, del hogar, los automóviles, pinturas, humo de cigarro, etc. Una vez que ingresa al ambiente se dirige al aire ya sea de forma directa o por el agua o el suelo (ATSDR, 2015).

2.2.1.1 Aire

La evaporación de los derivados del petróleo como la gasolina y otros combustibles están considerados como los principales emisores de tolueno (5–7%), también su uso como solvente de pinturas, lacas y pegamentos puede llegar a generar hasta el 33 % total de emisión de este contaminante a la atmosfera, sin dejar atrás el uso indiscriminado de los automóviles que llegan hasta el 65% de emisión (Mendez, 2010).

Una vez que el tolueno se encuentra en el aire se degrada por reacción con los radicales hidroxilos que llevan hasta el cresol y benzaldehído, estos sufren rompimiento del anillo aromático formando hidrocarburos simples (ATSDR, 2000).

2.2.1.2. Agua

El tolueno se puede encontrar en el agua por las descargas industriales y desechos urbanos, así también como en derrames de petróleo o sus derivados como la gasolina u otros solventes.

Las cantidades de tolueno presentes en las superficies acuáticas puede variar de 3 ppb hasta 20 ppb dependiendo de la ciudad ya que si es una muy industrializada estas cantidades van a aumentar. La estadía del tolueno en este medio va depender de los factores como al solubilidad, la volatilización este último depende del tipo de agua, si se trata de agua estancada puede durar hasta 16 horas y si se habla de aguas turbulentas la eliminación tarda de 5 a 6 horas (Fawell et al., 2004).

2.2.1.3. Suelo

Al igual que en el agua el tolueno se puede encontrar en el suelo a causa de los derrames accidentales de combustibles o solventes así como los desechos industriales como la del petróleo y pinturas (ATSDR, 2000).

La permanencia del tolueno en el suelo es muy baja y depende de factores como el tipo de suelo, la temperatura y la humedad. Se sabe que se llega a liberar el 90% del tolueno derramado y el 10% sobrantes se absorbe de forma permanente y se llega a degradar gracias a los microorganismos (Mendaz, 2010).

2.2.2. Toxicidad del tolueno para el ser humano

La inhalación es la vía de exposición primaria para el tolueno, ya sea en entornos ocupacionales o durante episodios de abuso intencional. Los estudios toxicológicos del tolueno en los humanos han sido revisado, tanto sus efectos: a) genéticos, b) reproductivos, c) desarrollo y d) metabolismo (toxicocinética y toxicodinámica) (Mcgregor, 1994).

El tolueno a diferencia del benceno no posee las propiedades mielotóxicas. Por otra parte, los problemas vinculados con la exposición del tolueno es que deprime el sistema nervioso central e irrita a piel y los ojos y también llega a provocar efecto fototóxico. Se ha demostrado que a una exposición a 800 partes ppm llega a provocar fatiga intensa y ataxia, 10000 ppm producen inconsciencia a muy breve plazo. Los efectos de la exposición al tolueno por largo tiempo no se han definido, dado que los estudios en seres humanos que señalan efectos conductuales se ocupan más bien de exposición a varios disolventes. Sin embargo, en estudios ocupacionales limitados y en trabajadores expuestos también a otros disolventes, no se han observado interacciones metabólicas ni modificación de los efectos del tolueno (Teitelbaum, 2010).

2.3. Tratamientos de compuestos orgánicos volátiles COV

Es de suma importancia llevar un control de la contaminación atmosférica que no solo tiene que ver con los daños directos que causa a la salud de ser humano, a la flora y la fauna o las alteraciones al medio ambiente, sino también con los impactos negativos sobre la economía como resultado de las pérdidas derivadas de los efectos directos e indirectos, así como los gastos relacionados con la aplicación de medidas para controlar dicha polución (Cárdenas, 2003).

Las técnicas empleadas para el control de los compuestos orgánicos volátiles en emisiones industriales se pueden clasificar en técnicas fisicoquímicas y las técnicas biológicas, aunque muchas veces se utilizan en conjunto de acuerdo con las características de la emisión.

Para escoger la adecuada técnica de tratamiento de los COV se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos (Cárdenas, 2003):

- Características de los contaminantes a tratar (propiedades fisicoquímicas, concentraciones).

- La eficiencia con la cual será removida (dictadas por las normas de emisión vigente).
- Posibilidad de recuperar y reutilizar el contaminante, así como identificar los subproductos que se puedan generar con el proceso y el costo de su disposición.
- Dentro de los costos de inversión debe calcularse, la materia prima, el mantenimiento y sobre todo los requerimientos de potencia.

2.3.1. Métodos de tratamiento físicos y químicos de los COV

Los métodos físicos son empleados para el control de material particulado sólido o líquido como polvo y aerosoles, utilizando un sedimentador gravitacional, separador centrífugo, ciclón, filtro de tela y precipitador electrostático (Hinojosa et al., 2011)

Algunos métodos de tratamiento pueden ser recuperativos como la adsorción, la absorción, la condensación y la oxidación catalítica, y uno de los destructivos es la incineración térmica. Estos procesos los podemos definir a continuación (Fernández, 2010):

- **Incineración u oxidación:** Consiste en la captura del gas contaminante por un sistema industrial de ventilación, precalentado, mezclado y oxidado a altas temperaturas que da como resultado otros compuestos. La eficiencia de destrucción de este método es mayor al 99%. Estos sistemas se dividen en dos tipos principalmente:
 - **Oxidación térmica:** Se utiliza frecuentemente cuando la concentración de los vapores orgánicos es generalmente 50% menor al límite inferior de explosividad.

- **Oxidación catalítica:** Se emplea cuando las concentraciones de los contaminantes (vapores orgánicos) son menores al 25% de su límite inferior de explosividad.
- **Absorción:** Este proceso se basa en la transferencia en donde el contaminante de un gas pasa al interior de un líquido en el cual se solubiliza.
- **Adsorción:** Proceso en el cual un sólido (adsorbente) retiene el fluido en su superficie. En este método el gas contaminante pasa a través de un sólido en una superficie del cual se condensará la parte contaminante del gas. Es comúnmente empleada para la eliminación de mezclas poco concentradas y heterogéneas.
- **Condensación:** El gas es pasado al líquido mediante la variación en los factores de presión o temperatura del gas. Se obtienen por un lado el gas depurado y por el otro, el líquido.

Sin embargo, tienen algunas desventajas (Cárdenas, 2003):

- a) como es el uso de oxidantes químicos, los cuales son costosos y en algunos casos peligrosos. En ciertas ocasiones el contaminante solo se transfiere de una fase a otra y queda el problema de disposición sea del agua o del carbón activado saturado en compuestos tóxicos peligrosos.
- b) se utiliza un alto consumo de energía, consumo de agua y combustibles, lo que lleva a unos altos costos tanto de instalación como de mantenimiento. Sin embargo, se consideran que son técnicas muy eficientes y rápida y en casos, son la única opción para el control de ciertas emisiones.

2.3.2. Tratamiento biológico de los COVs

A diferencia de los tratamientos fisicoquímicos para el control de COV, en un tratamiento biológico se emplean microorganismos capaces de utilizar los contaminantes gaseosos como fuentes de energía, estos métodos de tratamiento se denominan biofiltración (Fernández, 2010). Los sistemas biológicos empleados para mitigar las concentraciones de contaminantes en las emisiones gaseosas pueden ser biofiltros, biofiltros percoladores y biolavadores.

2.3.2.1. Biofiltros

La biofiltración se define como todo proceso biológico utilizado para el control o tratamiento de compuestos orgánicos volátiles e inorgánicos volátiles presentes en la fase gaseosa. En la biofiltración, los microorganismos son los responsables de la degradación biológica de los contaminantes volátiles contenidos en corrientes de aire residual. Durante el proceso de biofiltración, el gas contaminante se inyecta a través de un lecho orgánico que soporta la biopelícula (Gaudin et al., 2008). La degradación de los contaminantes ocurre previa transferencia del aire a un medio líquido en donde los compuestos orgánicos son utilizados como fuente de carbono y energía, o como fuente de energía en el caso de los compuestos inorgánicos. La utilización implica producción de biomasa y la oxidación parcial o total del contaminante. A su vez, la biomasa, bajo ciertas condiciones sufre una oxidación por respiración endógena. De esta manera, los procesos de biofiltración dan lugar a una descomposición completa de los contaminantes, creando productos no peligrosos (INECC, 2007).

Para tener una buena operación del biofiltro se deben tener en cuenta varios factores (Fernández, 2010) como son la actividad microbiana, y el material de empaque, soporte o lecho.

1. Microorganismos

En la biofiltración los microorganismos se encuentran adheridos sobre el soporte (lecho). La mezcla de nutrientes y agua que proporciona el lecho logra que los microorganismos formen una biopelícula, en la cual los contaminantes son absorbidos para su degradación lo cual da por resultado dióxido de carbono y agua (Fernández, 2010), como se muestra en el mecanismo de reacción biológica siguiente:



Existen muchas bacterias u hongos capaces de degradar contaminantes, y se pueden emplear de dos maneras, una es conocer el microorganismo e inocularlo con las características adecuadas de crecimiento, o dejar que la naturaleza siga su curso y el microorganismo que más predomine fue el que mejor se adaptó a las condiciones del contaminante.

- Mecanismos de degradación del contaminante

Existen diferentes vías por las cuales los microorganismos logran transformar el contaminante en subproductos no tóxicos, en la tabla 3 se presentan tres vías alternativas:

Tabla 3.- Vías de degradación de contaminantes

Contaminante	Enzimas	Subproducto	Producto	Productos finales	Fuente
Hidrocarburos alifáticos	Deshidrogenasas	Ácido graso	acetil-CoA	CO ₂ y H ₂ O	(Suárez Medellin, 2004)
Hidrocarburos aromáticos	Deshidrogenasas Dioxigenasa	Catecol Protocatechuate	Piruvato	CO ₂ y H ₂ O	(Janssen et al., 2001)

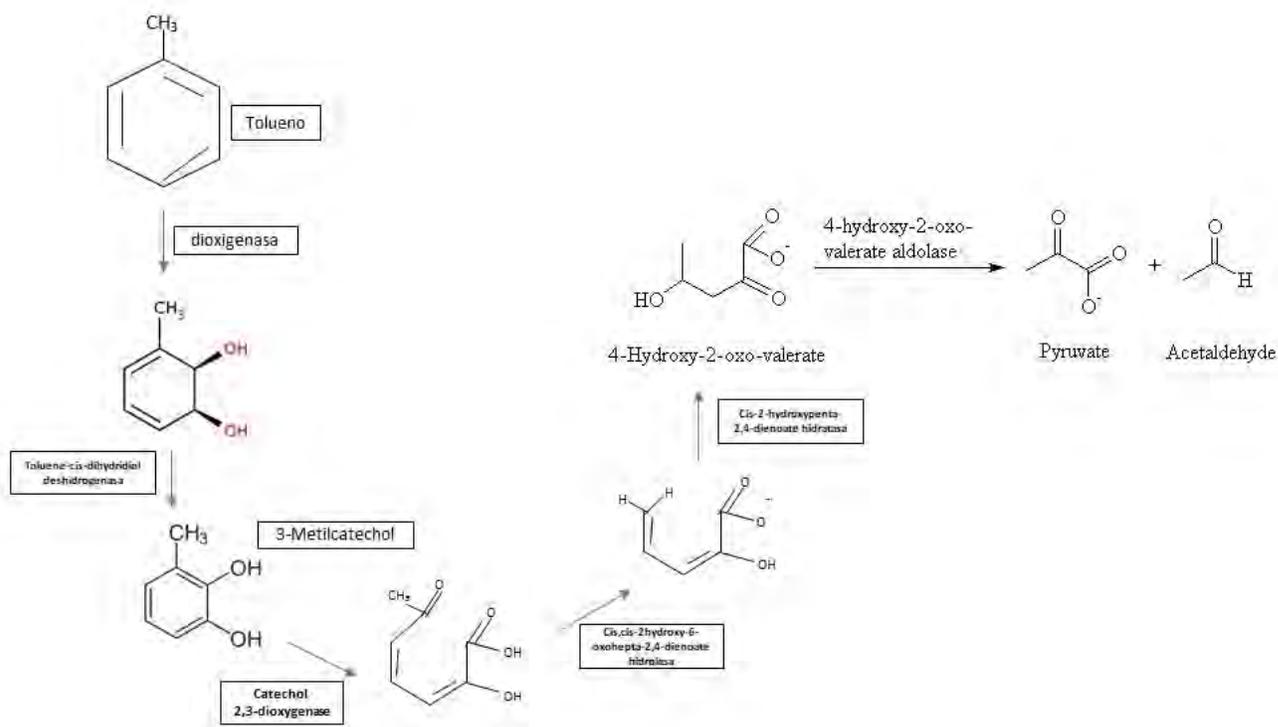


Figura 5.- Ruta de degradación del tolueno por *Pseudomonas putida* (modificada) (Suárez Medellín, 2004)

2. Material de empaque

El material de empaque comúnmente empleado es de tipo orgánico, como puede ser composta, cáscaras de cacahuate y nuez, corteza de árbol, semillas de diferentes frutas como la guayaba, la uva, etc. Se escoge el material que tenga un gran aporte nutritivo para el crecimiento de microorganismos aunque se pueden añadir medios enriquecedores para el desarrollo óptimo (Gaudin et al., 2008).

Para la elección de un buen material de empaque debemos tomar en cuenta ciertas características; 1) el área de superficie específica, tamaño de partícula y fracción vacía, estos nos indican el espacio disponible la fijación de la biomasa (Devinny et al., 1999); 2) Aportación de nutrientes; 3) Baja densidad (Ramírez Piña, 2008) y resistencia mecánica para mejorar las propiedades hidrodinámicas y así evitar la compactación del lecho (Gaudin et al., 2008); 4) Retención de humedad

(20 % - 60%) (Warren et al, 1997); 5) Propiedad de amortiguación para evitar fluctuaciones del pH (Gaudin et al., 2008).

2.3.2.2. Tipos de biofiltros

En la actualidad las tecnologías de la biofiltración pueden diferir en distintos factores como, por ejemplo, a) la presencia o ausencia de un soporte, b) el tipo de soporte empleado, c) si se requiere una fase líquida móvil y d) la capacidad de emplear distintos contaminantes (Thalasso, 2002). De esta manera los biofiltros pueden ser clasificados en tres tipos: 1) Biofiltro percolador, 2) Biolavador y 3) Biofiltros de lecho fijo (Ramírez, 2008).

2.3.2.2.1. Biofiltro de percolador

Esta tecnología consiste en un proceso biológico aerobio para la degradación de compuestos contaminantes, principalmente para compuestos solubles en agua, en el cual una columna empacada con un soporte (inorgánico, orgánico o una mezcla de ambos) donde se formará la biopelícula. El biofiltro percolador se alimenta de una corriente de gas contaminado y una corriente líquida que es comúnmente recirculada a través del biorreactor y que tiene como función la aportación de nutrientes esenciales para los microorganismos, así también como remover los productos de biodegradación (Cárdenas et al., 2003).

2.3.2.2.2. Biolavador

El biolavador está compuesto por la torre de absorción o lavador, la cual puede ser empacada con materiales inorgánicos estructurados, o no empacada, en donde se lleva a cabo el proceso de transferencia de masa, de la fase gas, el cual acarrea al contaminante, hacia la fase líquida, o al lecho poroso más la película líquida, en el

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cual es absorbido junto con el O₂. Posteriormente, la fase líquida es alimentada a un reactor en donde se encuentran los microorganismos encargados de degradar el contaminante (Cárdenas, 2003).

Los biolavadores se consideran útiles para el tratamiento de compuestos que son solubles en agua.

2.3.2.2.3. Biofiltro de lecho fijo

Consiste en un soporte empacado con material filtrante, el cual servirá como fuente de nutrientes necesarios para el crecimiento microbiano y de sostén (material orgánico) y como fuente de soporte microbiano (material inorgánico). El proceso de biofiltración consiste en hacer pasar una corriente de gas contaminante a través del lecho en donde los contaminantes son degradados por los microorganismos adheridos al material de empaque. Una característica importante de este tipo de biofiltro es la ausencia de la fase acuosa móvil por lo que hace posible el tratamiento de contaminante poco solubles en agua (Cárdenas, 2003; Ramírez, 2008).

2.3.2.2.4. Importancia económica

Los costos asociados a la utilización de un biofiltro son bastante menores que a los procesos fisicoquímicos (absorción, adsorción, oxidación y condensación).

La Biofiltración se encuentra dentro de las tecnologías más económicas si se habla de grandes flujos de aire poco contaminando. Hablando de costos de tratamiento es muy variable y puede oscilar entre 0.3 y 2.5 dólares americanos por 1000 m³ tratados, lo cual es de 3 a 10 veces inferior a las tecnologías de tratamiento de tipo fisicoquímico, dependiendo de la concentración y toxicidad de los contaminantes (Thalasso, 2002).

2.4. Organismo bioindicador

La toxicología ambiental integra diversos factores como los indicadores de exposición y las dosis con los datos de los efectos producidos por los contaminantes ambientales, evaluando así, en forma cuantitativa, la probabilidad de que en una población o ecosistema se presenten efectos nocivos ocasionados por las sustancias tóxicas presentes en el ambiente (Juárez *et al.*, 2000).

Las exposiciones a los contaminantes ambientales pueden ser valorados bajo diferentes técnicas: i) midiendo la concentración del tóxico en el aire, agua o suelo o ii) identificando parámetros biológicos en los organismos expuestos, por ejemplo, sangre, orina o aire exhalado (Juárez *et al.*, 2000). En los ensayos de toxicidad se utilizan diversos organismos, que incluyen bacterias bioluminiscentes, algas, crustáceos y peces, a lo que son llamados como organismo bioindicador (Juárez *et al.*, 2000).

Para la selección adecuada de un organismo de prueba (bioindicador) es necesario tomar en cuenta las siguientes características: sensibilidad, que es la capacidad del organismo de detectar variaciones físicas o químicas del ambiente; su posición en trama trófica; su distribución geográfica; facilidad de cultivo y/o mantenimiento en condiciones de laboratorio; su ciclo de vida; entre otras (González *et al.*, 2014).

El propósito para el uso de bioindicador está en minimizar las amenazas para la salud humana; garantizar que los ecosistemas sean autosuficientes y que las especies particulares no disminuyan (González *et al.*, 2014).

En palabras más concretas, la toxicología ambiental integra diversos factores como los indicadores de exposición y las dosis con los datos de los efectos producidos por los contaminantes ambientales, evaluando así, en forma cuantitativa, la probabilidad de que en una población o ecosistema se presenten efectos nocivos ocasionados por las sustancias tóxicas presentes en el ambiente.

Como conclusión los estudios de toxicología ambiental nos ayudan a descubrir las concentraciones aceptables y/o permisibles de los contaminantes ambientales, para el bienestar de las poblaciones, desde los más sensibles de efectos adversos potenciales derivados de la exposición ambiental a las sustancias tóxicas (Carriquiriborde, 2021).

- **Pruebas de toxicidad**

Las pruebas de toxicidad los podemos definir como prueba que mide la toxicidad de una sustancia en respuesta a un organismo o sistema biológico.

A principios del siglo XX se desarrollaron las primeras pruebas toxicológicas con sustancias nocivas en organismos. El análisis biológico de peces se introdujo en 1940 y las pruebas de invertebrados y algas comenzaron en la década de 1950, con el fin de conocer los niveles de concentración de sustancias tóxicas (Díaz et al., 2004).

El tiempo establecido para las pruebas de toxicidad en organismos bioindicadores va de la mano a la especie y a su ciclo de vida y está muy relacionado a los contaminantes y a los parámetros a medir. En este caso tenemos dos definiciones una de ella es la toxicidad aguda la cual ocurre en un lapso corto de tiempo (segundo, horas o días), y con dosis o concentraciones de exposición altas que causen, mortalidad, mientras que la exposición prolongada (de días a años) de concentraciones subletales se define como toxicidad crónica. La respuesta que pueden tener los organismos a los contaminantes se clasifica en “letal” que lleva a la muerte y “subletal” que mide el efecto sobre diferentes parámetros (endpoints) como puede ser: a) enzimáticos, metabólicos, fisiológicos, de comportamiento, inhibición de crecimiento poblacional, etc. Estos conceptos se determinan con estimaciones de concentración, por ejemplo, la CL_{50} que se define como la concentración letal media, o la DL_{50} que es la dosis letal media, lo que significa que es letal para el 50% de los organismos. Además, la información sobre la concentración más alta en donde no se observa toxicidad a (NOEC, por sus siglas

en inglés) y la concentración más baja (LOEC, por sus siglas en inglés) que causan efectos tóxicos se puede utilizar para estimar los niveles de exposición que no implican riesgo (Pica *et al.*, 2004).



3. Justificación

La contaminación atmosférica en México ha sido uno de los mayores problemas que se ha tenido que enfrentar. La generación de nuevas industrias, el uso indiscriminado de automóviles, la sobrepoblación, las actividades domésticas, los contaminantes emitidos continuamente por la actividad humana tienen consecuencias a niveles locales, regionales y globales.

En la ciudad de Aguascalientes se cuenta con 16 parques industriales en donde podemos encontrar industrias automotrices, elaboración de cemento y cal, metalúrgica, industria del petróleo y petroquímica, química, industria textil, elaboración de accesorios y aparatos eléctricos, alimentos y bebidas, plástico y papel. Los principales contaminantes emitidos se cuentan a las partículas suspendidas respirables como las $PM_{2.5}$ en una razón de 333.66 t/a, las PM_{10} , 474.03 t/a; los compuestos orgánicos volátiles (COVs), 1449.56 t/a; los óxidos de nitrógeno, 2716.05 t/a; el dióxido de azufre, 1.992.04 t/a, y el ozono que afectan seriamente la salud humana y los ecosistemas.

Para mitigar las emisiones de contaminación principalmente la de los COVs se han implementado biotecnologías para el tratamiento de efluentes gaseosos como son los biofiltros, aunque estos procesos de tratamiento de contaminantes son conocido aún se siguen investigando y obteniendo nuevos microorganismos como potentes biodegradadores de los COVs. Sin embargo, no se han evaluado la toxicidad de las emisiones por el biofiltro, por lo que, no se sabe si las emisiones gaseosas de esta biotecnología son tóxicas o realmente aportan un beneficio al ambiente y a la salud humana, animal y ambiental.

4. Hipótesis

La biopelícula de *Macrophomina phaseolina* formada sobre la vaina de cacahuate es capaz de degradar al tolueno, presente en el gas influente del biofiltro, y el efluente no provocará toxicidad en el bioindicador.

5. Objetivo

Determinar la eficiencia de eliminación del tolueno en un biofiltro empacado con vaina de cacahuate e inoculado con *Macrophomina phaseolina*. Y evaluar la toxicidad del efluente gaseoso del biofiltro en un bioindicador.

5.1. Objetivos específicos

- Establecer un organismo como bioindicador, seleccionado entre cladóceros, rotíferos y algas.
- Evaluar la capacidad de degradación del tolueno en el biofiltro, empacado con vaina de cacahuate y el hongo microscópico *Macrophomina phaseolina*.
- Evaluar la toxicidad de las emisiones gaseosas del biofiltro empleando a un bioindicador seleccionado.

6. Metodología

En este estudio se empleó un biofiltro para la degradación del tolueno presente en la corriente gaseosa, y se determinó la eficiencia de eliminación de este contaminante, y la capacidad de eliminación del biofiltro. Asimismo, con el fin de conocer si las emisiones del biofiltro son perjudiciales para el ambiente, se hicieron pruebas de toxicidad, además para determinar los porcentajes de remoción de toxicidad.

6.1. Diseño del biofiltro

Los biofiltros fueron contruidos en material de vidrio con una capacidad aproximadamente de 0.7 L, empacados con vaina de cacahuate previamente humedecida, acidificada e inoculadas con el hongo microscópico *Macrophomina phaseolina* y manteniendo las mismas condiciones ambientales y con un flujo descendente de 4.8 L.h⁻¹.

6.1.1. Características fisicoquímicas del material de empaque

La caracterización fisicoquímica de la vaina de cacahuate, empleada como material de empaque o soporte en el biofiltro, se hizo determinando la densidad de la vaina de cacahuate, la porosidad del lecho, y la medición de las unidades de pH.

6.1.1.1. Determinación de la densidad del soporte

Esta propiedad se determinó directamente en el reactor utilizando material húmedo, pesando y midiendo el volumen que ocupó el mismo (ecuación 1).

$$Densidad_{soporte} = \frac{Peso_{soporte}}{Volumen_{soporte}} \quad (1)$$

6.1.1.2. Medición de pH

Para determinar esta propiedad química se pesaron 50 g de cáscara de cacahuate seca la cual se dejó reposar en agua destilada por 30 min y con la ayuda de un potenciómetro se midieron las unidades de pH

6.1.1.3. Determinación de la porosidad del lecho

La porosidad del lecho se determina por diferencia de volumen ocupado por el aire en una probeta de 1 L previamente pesada y se adiciona hexano hasta ajusta el volumen a 1 L, midiéndose el volumen del líquido utilizado. El cálculo se realiza empleando la ecuación 2:

$$Porosidad_{soporte} = \frac{Volumen_{liquido}}{Volumen_{soporte}} \quad (2)$$

6.1.2. Condiciones ambientales de operación

Durante la operación del biofiltro se midió el pH, la temperatura y el porcentaje de humedad del efluente gaseoso para mantener las condiciones ambientales favorables para el crecimiento y desarrollo del hongo microscópico *Macrophomina phaseolina*. Las mediciones se hicieron con un higrotermómetro marca Fisher.

6.1.3. Determinación de la eficiencia de eliminación del biofiltro

La eficiencia de eliminación del biofiltro se determinará por mediciones diarias de la degradación del tolueno empleando un cromatógrafo de gases marca

PerkinElmer AutoSystem con un detector FID, empleando una columna capilar de 30m.

La muestra de gas efluente fue tomada empleando una bomba de muestreo SKC y pasando aproximadamente 30 L de gas a través de un bulbo de vidrio para muestra. La eficiencia de eliminación (EE) del tolueno se calculó de acuerdo a la ecuación (3).

$$EE (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} 100 \quad (3)$$

Donde:

- C_i : Concentración del compuesto en el influente (g_{compuesto}·m³_{gas})
- C_f : Concentración en el efluente (g_{compuesto}·m³_{gas})

6.1.4. Carga volumétrica del contaminante

La carga volumétrica (C_v) del tolueno hacia el biofiltro se calculó de acuerdo a la expresión (4):

$$C_v = \frac{Q}{V_l} C_i \quad (4)$$

Donde

- V_l : Volumen del material de empaque m³_{material}
- C_i : Concentración en el influente g_{compuesto}·m³_{gas}
- Q : Flujo de gas influente (m³·h⁻¹)

6.1.4. Capacidad de eliminación del biofiltro

La capacidad de eliminación marcó la eficiencia de degradación del biofiltro bajo diferentes concentraciones, el cálculo se llevó a cabo bajo ecuación (5).

$$CE = \frac{C_i - C_f}{V_i} Q \quad (3)$$

6.2. Pruebas de toxicidad

En las pruebas de toxicidad se utilizó tolueno grado HPLC bajo diferentes concentraciones 0.87 mg.L⁻¹, 2.16 mg. L⁻¹, 3.46 mg. L⁻¹, 4.76 mg. L⁻¹ y 6.1 mg. L⁻¹.

6.2.1. *Raphidocelis subcapitata*

6.2.1.1. Cultivo

Se tomó un matraz de 500 mL y se llenó con medio Bold el cual se llevó a esterilizar a 121°C por 15 minutos. Posteriormente se le añadió 1 mL de microelementos, y un mililitro de vitaminas, finalmente se inoculó 20 mililitros de concentrado de alga. Se llevó a la incubadora a 25°C por 7 días en aireación y un periodo de luz-oscuridad.

6.2.1.2. Pruebas de sensibilidad al tolueno

Para las pruebas de toxicidad con algas, se realizó un conteo celular en cámara de Neubauer para determinar la concentración de alga microscópica *Raphidocelis subcapitata* en nuestro matraz. Posteriormente en un frasco de vidrio de rosca con septum se inocularon 1x10⁵ células y se aforó a 10 mL con medio Bold, para estas pruebas se llevó a cabo un control negativo, en las cuales todos fueron incubados a 25°C por 96 horas, esto con el fin de determinar el porcentaje de inhibición de crecimiento del alga, NOEC, LOEC, CL50 y CL10.

6.2.1.3. Pruebas toxicológicas de las emisiones gaseosas del biofiltro con *Raphidocelis subcapitata*.

Para las pruebas de toxicidad se emplearon 5 biofiltros, en la tabla 4 se describen las características de cada columna empleada. El gas influente contaminado con tolueno como contaminante modelo, hacia el biofiltro se generó inyectando el tolueno al aire. Éste fue generado por pequeños compresores.

Tabla 4.- Características de los biofiltros.

Biofiltro	Empaque	Tolueno	<i>Macrophomina phaseolina</i>
1	Sí	Sí	Sí
2	Sí	Sí	Sí
3	No	Sí	No
4	Sí	No	Sí
5	Sí	No	No

Para estas pruebas se utilizaron matraces con entrada de gas de 250 ml, en el cual se inyectaron 1×10^6 células de *Raphidocelis subcapitata* las cuales se aforaron a 100 ml de medio Bold. Posteriormente se conectaron a la salida de las columnas del biofiltro controlando la salida de aire y manteniendo a temperatura ambiente por 96 horas. Transcurrido el tiempo se determinó el porcentaje de inhibición de crecimiento.

7. Resultados

7.1. Eficiencia de eliminación del tolueno en el biofiltro

El biofiltro de vidrio empleado para la degradación biológica del tolueno se puede observar en la figura 6, empacado con cáscara de cacahuate y el hongo microscópico *Macrophomina phaseolina*. Fue operado durante 60 días continuos y se estuvo midiendo diariamente la temperatura y la humedad relativa. Así como también la concentración de tolueno en el efluente del biofiltro.



Figura 6. Sistema de evaluación de la toxicidad del efluente gaseoso en la biodegradación del tolueno por *Macrophomina phaseolina*.

En la figura 7 y 8 se muestra la eficiencia de eliminación del tolueno en los biofiltros a sus diferentes concentraciones durante los 60 días de operación continua.

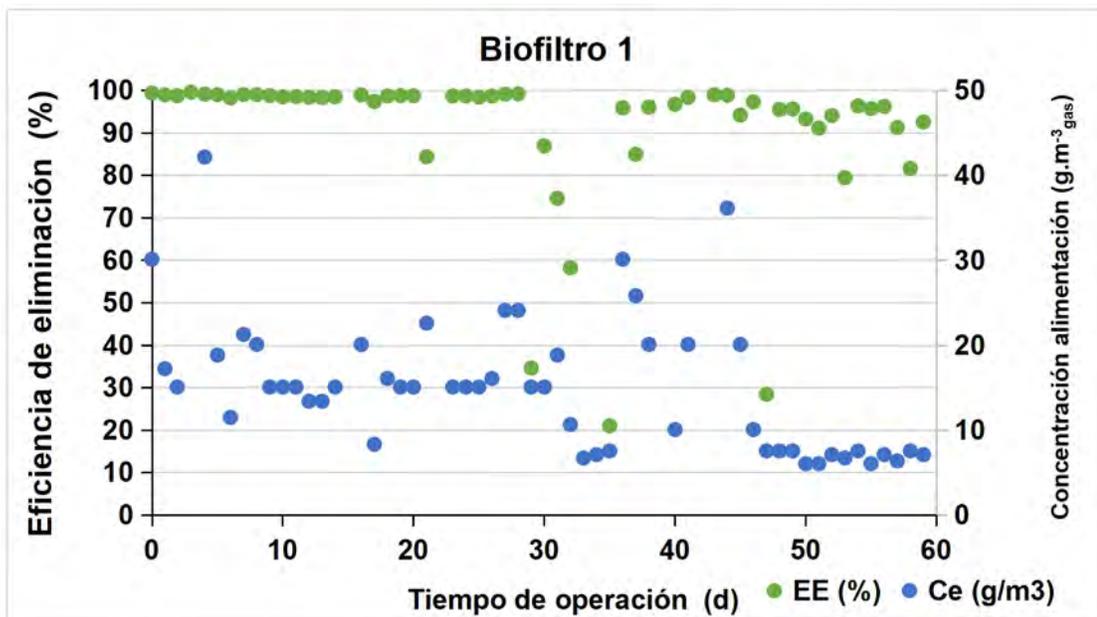


Figura 7.- Eficiencia de eliminación (EE) del tolueno en el biofiltro 1 durante la operación. Ce: concentración de alimentación del tolueno.

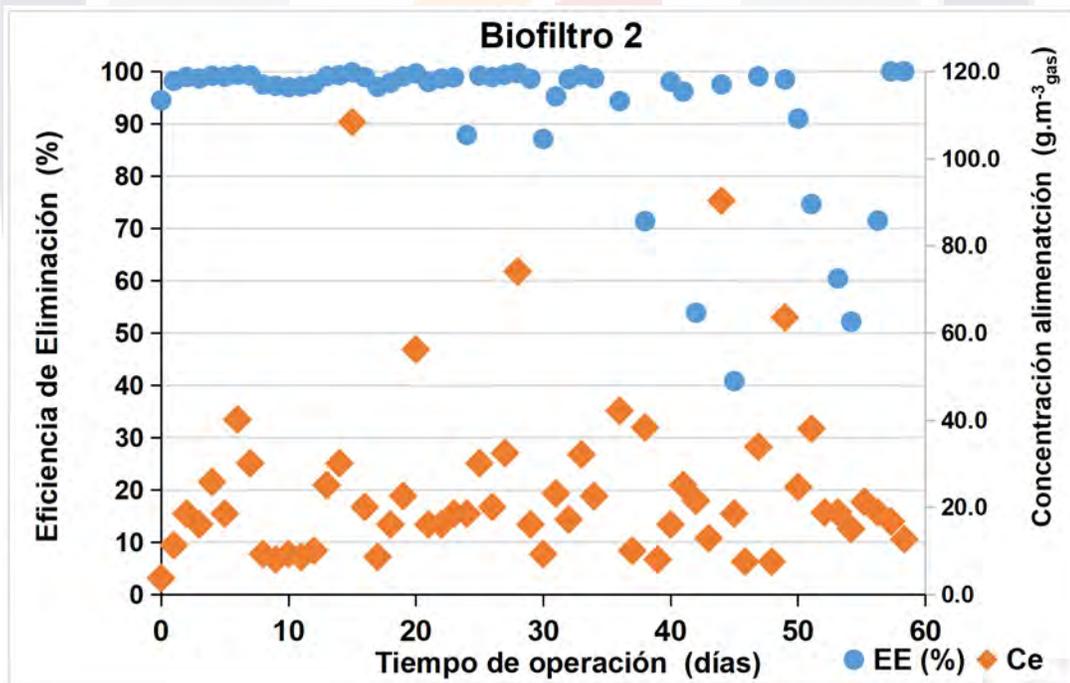


Figura 8.- Porcentaje de eliminación del tolueno en el biofiltro 2 durante el proceso de operación.

7.2. Eficiencia del biofiltro

En las figuras 9 y 10 nos muestran la eficiencia del biofiltro la cual es expresada por la capacidad de eliminación del tolueno en función de la carga volumétrica del tolueno. La eficiencia de eliminación del tolueno del biofiltro 1 (figura 9) fue de 99% se mostró cuando la capacidad de la eliminación del tolueno varió entre 1.9 a 2.6 $\text{kg}/\text{m}^3_{\text{lecho}} \cdot \text{h}^{-1}$. Mientras que en el biofiltro 2 (figura 10) se observó una capacidad de eliminación del 100% en concentraciones de 1.23 a 1.54 $\text{kg}/\text{m}^3_{\text{lecho}} \cdot \text{h}^{-1}$ y del 99% en cantidades 5.55 a 4.93 $\text{kg}/\text{m}^3_{\text{lecho}} \cdot \text{h}^{-1}$.

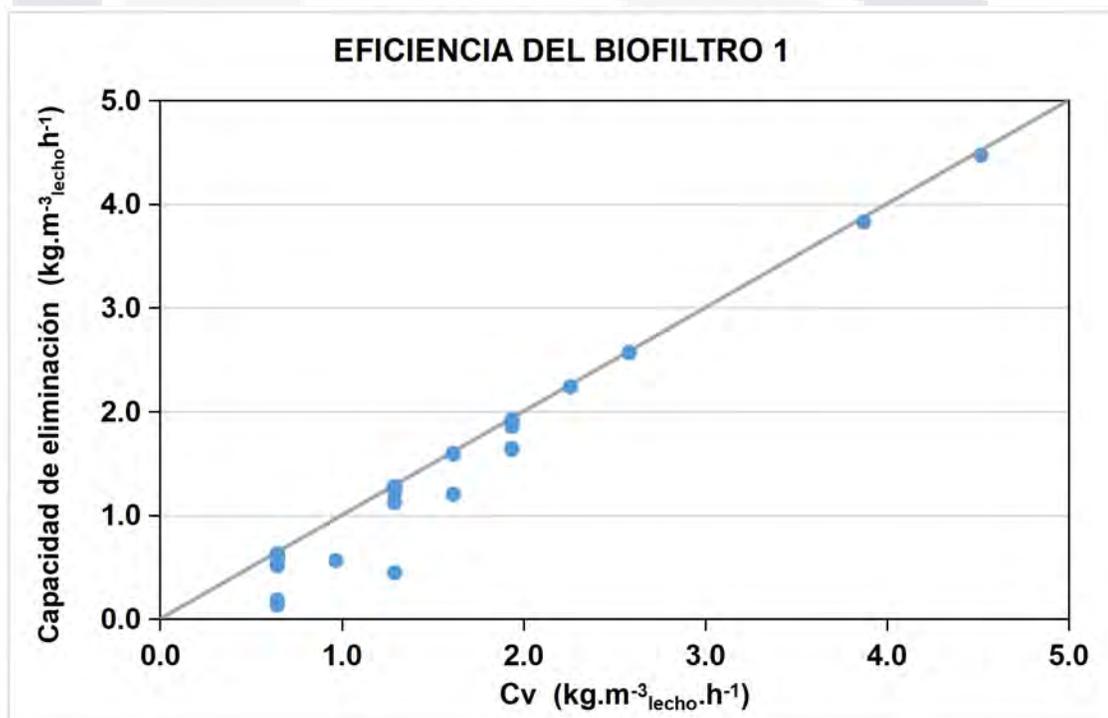


Figura 9.- Capacidad de eliminación a diferentes cargas volumétricas de tolueno en el biofiltro 1.

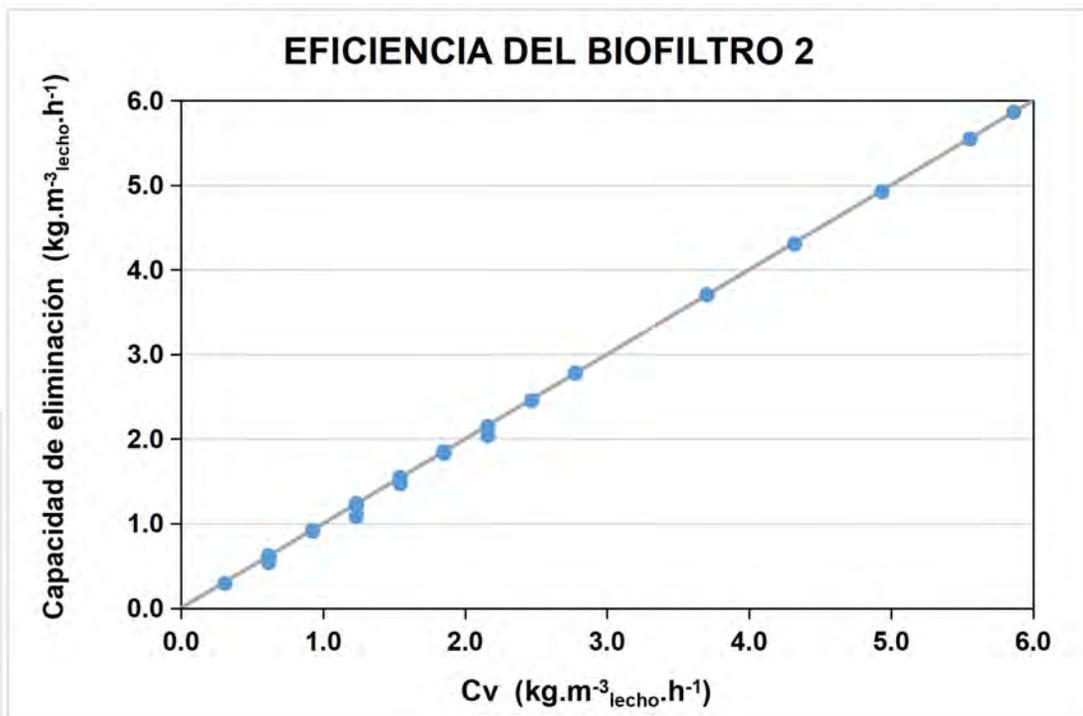


Figura 10.- Capacidad de eliminación a diferentes cargas volumétricas de tolueno en el biofiltro 2.

7.3. Condiciones ambientales de operación

La temperatura durante la operación de los dos biofiltros (figura 11 y 12) se mantuvo entre los 19 a 24°C, a lo largo de la operación fue incrementándose gradualmente teniendo como promedio una temperatura de operación de 23°C, mientras la humedad relativa fue muy cambiante con una humedad relativa de entre 20 a 87%.

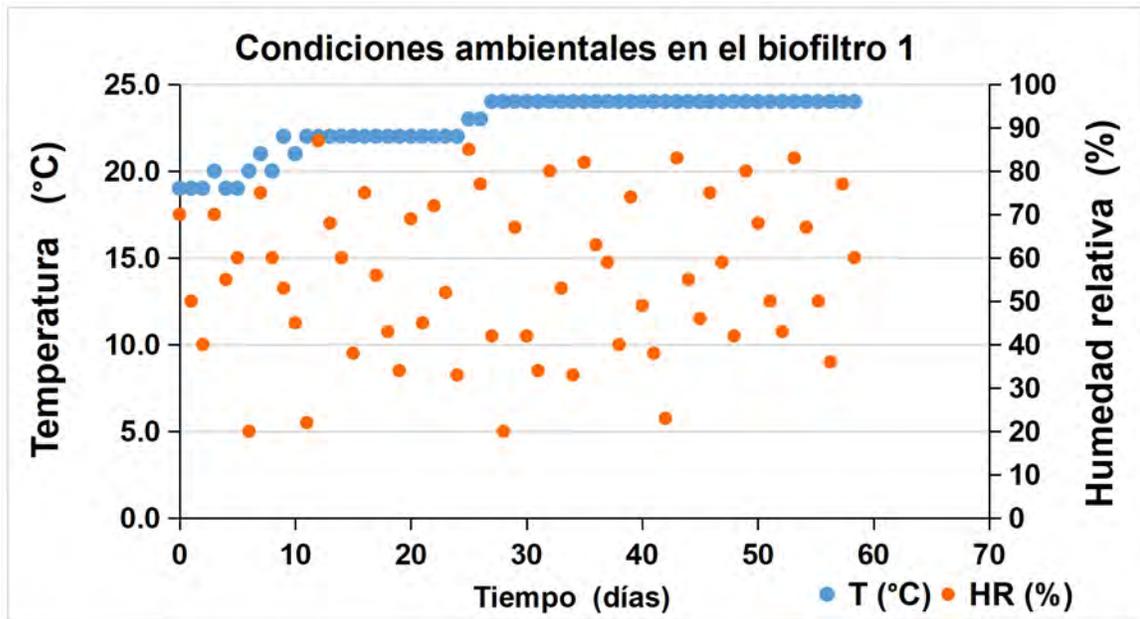


Figura 11.- Temperatura y humedad relativa durante el proceso del biofiltro 1.

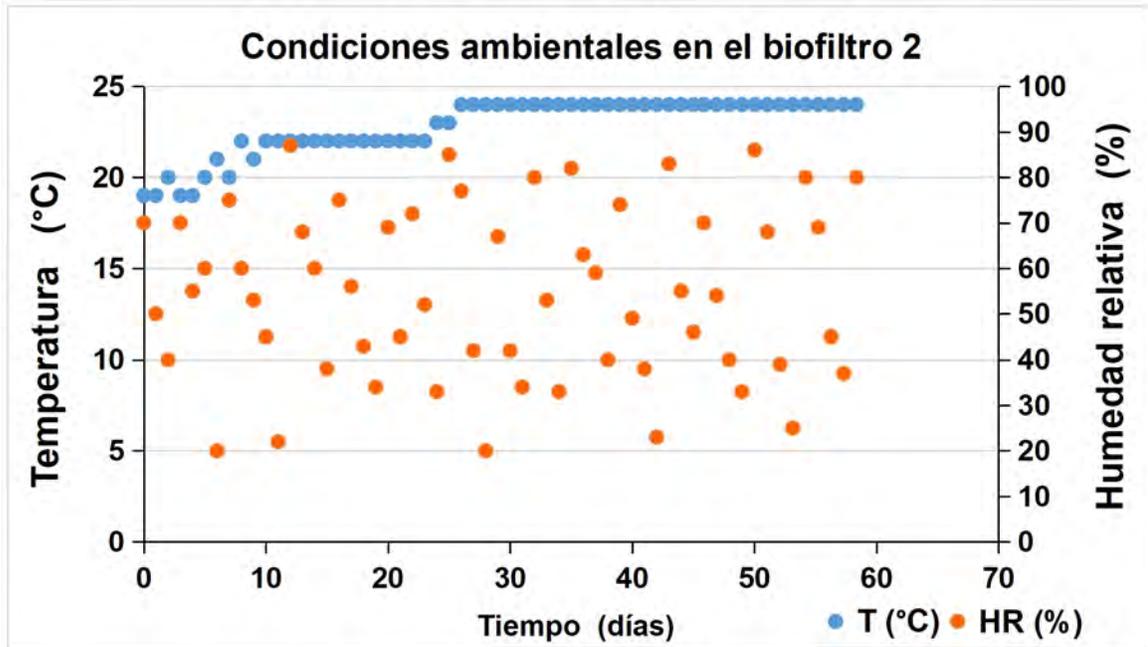


Figura 12.- Temperatura y humedad relativa durante el proceso de operación del biofiltro 2.

7.2 Pruebas de toxicidad

En la tabla 5 se muestran los promedios de los resultados de las 5 réplicas de las pruebas de toxicidad con el alga *Raphidocelis subcapitata*. En la cual mayor concentración de tolueno mayor porcentaje de inhibición de crecimiento.

Tabla 5. Porcentajes de inhibición de crecimiento de *Raphidocelis subcapitata* ocasionada por tolueno.

Concentraciones	# de células	% de inhibición
Control (-)	400,000	0
0.867 mg/L	270,000	35.5
2.16 mg/L	170,000	57.5
3.46 mg/L	140,000	65.0
4.76 mg/L	100,000	75.0
6.06 mg/L	40,000	90.0

En la tabla 6 se encuentran los resultados de la concentración letal 50 (CL₅₀), concentración letal (CL₁₀), la concentración en la cual no se observan efectos (NOEC), la concentración más baja en la cual se observan efectos (LOEC). También se incluye el coeficiente de variación de los datos obtenidos el cual es muy satisfactorio tomando en cuenta que el rango aceptable es de 1 al 20%.

Tabla 6. Resultados de CL₅₀, CL₁₀, NOEC, LOEC y coeficiente de variación.

CL₅₀	2.45 mg/L
CL ₁₀	0.22 mg/L
NOEC	0.12 mg/L
LOEC	0.22 mg/L
Coeficiente de variación	4.39%

En la gráfica (figura 14) tenemos la regresión lineal de los porcentajes de inhibición de crecimiento del alga *Raphidocelis subcapitata* con las concentraciones de tolueno en mg/L, en la cual obtuvimos una $R^2 = 0.90$.

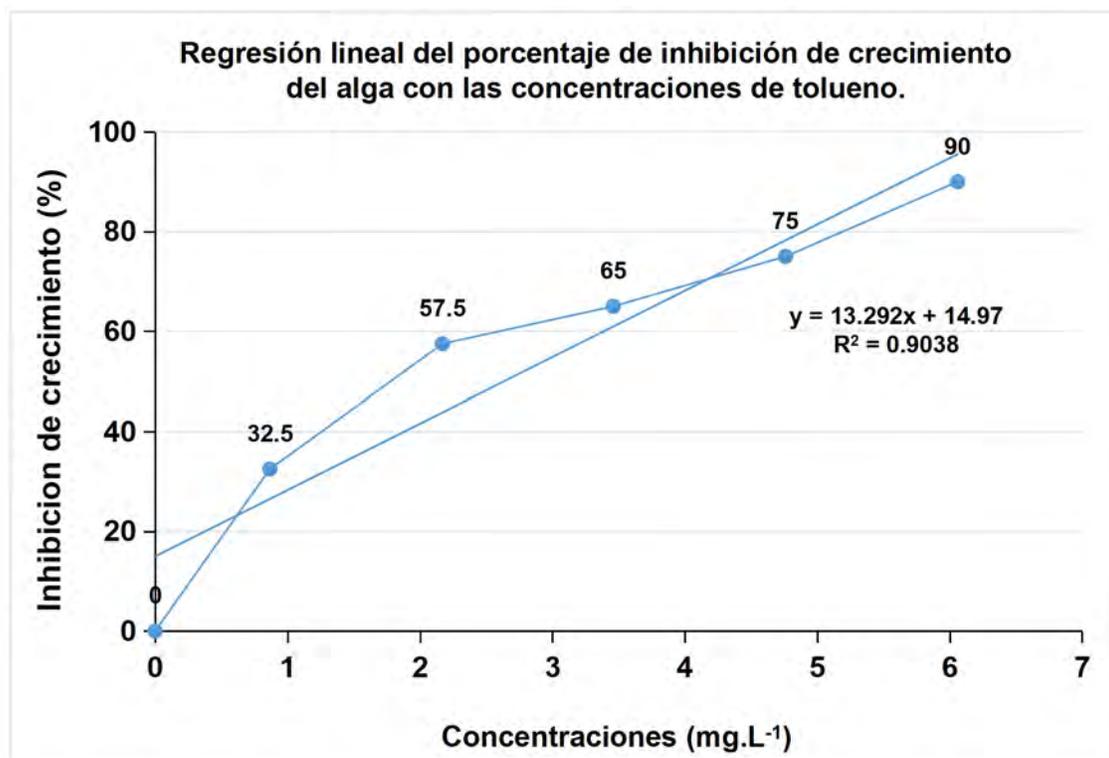


Figura 13. Regresión lineal del porcentaje de inhibición de crecimiento con las concentraciones en mg.L⁻¹ de tolueno.

7.3. Pruebas de toxicidad con el biofiltro

La figura 13 muestra el sistema adaptado para las pruebas de toxicidad del efluente gaseoso del biofiltro, el cual puede contener alguna concentración traza de tolueno además del dióxido de carbono, y algunos otros subproductos de la biodegradación.



Figura 14.- Sistema de evaluación de la toxicidad del efluente gaseoso en la biodegradación del tolueno por *Macrophomina phaseolina*.

El resultado de 4 réplicas de exposición del efluente gaseoso de los diferentes tipos de columnas los podemos expresar en promedio de las concentraciones y el promedio del porcentaje de inhibición como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7.- Porcentajes de inhibición de crecimiento de *Raphidocelis subcapitata* ocasionada por el efluente gaseoso de los biofiltros.

	Concentración del efluente gaseoso (mg/L)	DS	Porcentaje de inhibición
Control	0		0
Control con el hongo	0		26.27
Biofiltro 1	0.5945	0.1321	14.67
Biofiltro 2	2.6678	1.0420	28.33
Control tolueno	8.2865	7.0107	62.45

En la figura 15 observamos la regresión lineal de los porcentajes de inhibición de crecimiento del alga *Raphidocelis subcapitata* con las concentraciones de tolueno del efluente gaseoso del biofiltro en mg.L⁻¹, en la cual obtuvimos una R²= 0.83.

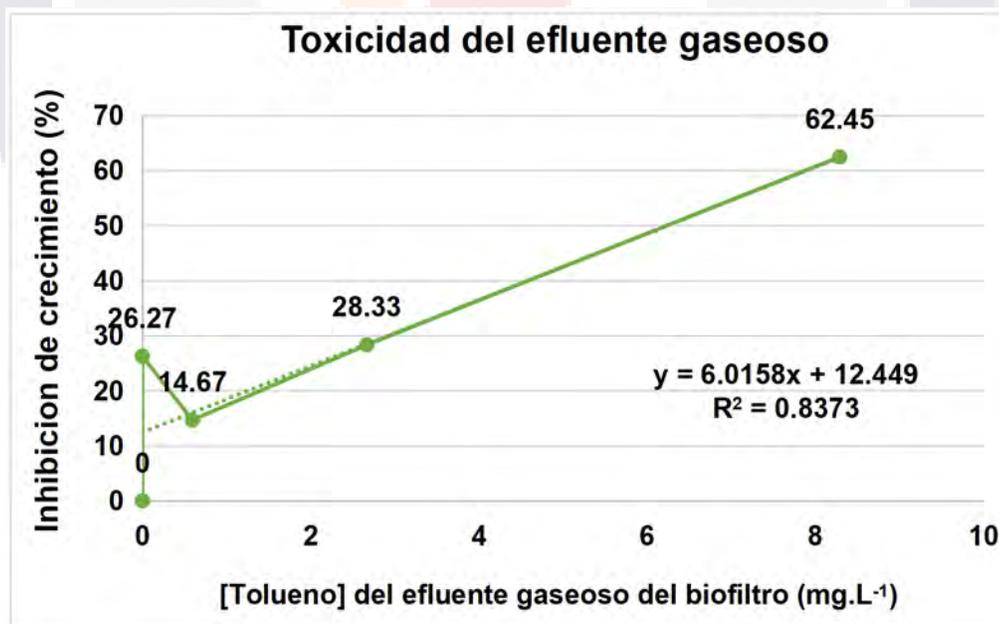


Figura 15.- Regresión lineal del porcentaje de inhibición de crecimiento con las concentraciones en mg/L del efluente gaseoso del biofiltro

8. Discusión

Los resultados los podemos dividir en 3 fases: la primera la capacidad de degradación del tolueno en el biofiltro empacado con vaina de cacahuate y el hongo microscópico *Macrophomina phaseolina*; la segunda fue determinar la sensibilidad del bioindicador *Raphidocelis subcapitata*; y por último la fase 3, la toxicidad del efluente gaseoso de biofiltro después de la biodegradación del tolueno.

8.1. Capacidad de biodegradación del tolueno por *Macrophomina phaseolina* en un biofiltro empacado con vaina de cacahuate

La eficiencia de eliminación del biofiltro mostrada en la figura 7 y 8 podemos ver el comportamiento de adaptación del biofiltro, detectando las fases de la biodegradación descritas por Deviny et al. (1999), comenzando por el mecanismo de sorción del tolueno, durante las primeras 24 horas de arranque en donde se observó el 99.8% de eficiencia de eliminación, tiempo corto para el crecimiento del microorganismo *Macrophomina phaseolina*. En la fase dos descrita como la “aclimatación” de la biomasa la eficiencia de eliminación disminuyó muy poco 84% en el biofiltro 1, y 87 % en el biofiltro 2, la cual nos demuestra que ha terminado la parte de adsorción del tolueno para iniciar la fase 3 correspondiente a la actividad metabólica del hongo observada después de los 14 días de operación llegando a una eficiencia de eliminación del 99% con cargas de 1.9 a 2.6 kg/m³_{lecho}.h⁻¹ en el biofiltro 1, mientras que en el biofiltro 2 se observó una capacidad de eliminación del 100% en concentraciones de 1.23 a 1.54 kg/m³_{lecho}.h⁻¹ y del 99% en cantidades 5.55 a 4.93 kg/m³_{lecho}.h⁻¹, concentraciones superiores a las reportadas por Ghaseni et al. (2020) empleando a *Pleurotus ostreatus*. Lo cual nos demuestra que el hongo microscópico *Macrophomina Phaseolina* se adaptó fácilmente a las condiciones de operación del biofiltro. Zhang et al. en el 2019 trabajó en un

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

biofiltro empacado con arena de cerámica e inoculado con la especie *Fusarium oxysporum* para el tratamiento del tolueno y consiguió una eficiencia de eliminación del 92.5%, para una carga de 7.0 y hasta 100.9 g/m³_{lecho}.h⁻¹, una capacidad máxima de eliminación de 98.1 g/m³.h⁻¹ para una carga de 100.3 g/m³_{lecho}.h⁻¹. Arriaga y Revah (2005) trabajaron con *Fusarium solani* para la degradación de n-hexano, y para el mismo compuesto Spigno et al., 2003 encontró que *Aspergillus niger* logró una capacidad de eliminación promedio de 150 g/m³.h⁻¹ y aumentó con la carga orgánica hasta un nivel máximo de 300 g/m³.h⁻¹.

En este estudio demostramos que *Macrophomina phaseolina* tiene una buena eficiencia de eliminación alcanzando más del 99.999 % para las cargas y concentraciones estudiadas, siendo una buena opción para el uso en estas biotecnologías.

La capacidad de *Macrophomina phaseolina* para crecer en medios con bajo nivel de humedad (Coser et al., 2017; Sridharan et al., 2020), demostró que durante los 60 días de operación del biofiltro, en la cual se mantuvo en condiciones de humedad relativa variante entre el 20 y 87% de humedad relativa, como se muestra en la figura 11 y 12, permitió su crecimiento y lograr buenos niveles de biodegradación. Y la temperatura se mantuvo en rangos de 19 a 24 °C, dentro de las condiciones ambientales favorables para el crecimiento de los microorganismos que es entre 8 y 35 °C, como lo mencionan Devinny *et al.* (1999), Ramírez Piña (2008), y Avilés *et al.* (2008) menciona que a 35 °C es lo más óptimo para el crecimiento. Otro parámetro es el pH el cual se manejó de 4.15 unidades, considerando que el rango de la vaina de cacahuate en este caso el soporte del biofiltro tiene como pH 6.5 unidades, y una de las ventajas de este soporte es su fácil manipulación para llegar a los parámetros establecidos (Ramírez, 2008).

8.2. Pruebas de toxicidad

Los viales de septum con rosca ayudaron a evitar que el tolueno se volatilizara, lo que permitió establecer una clara relación de dosis respuesta. Sin embargo, los ensayos llevados a cabo dentro de cualquier tipo de sistema de contención artificial tienen la posibilidad de afectar las propiedades de crecimiento (Nyholm et al., 1989) y puede no representar de manera directa las condiciones dentro del entorno natural (Herman et al., 1990). Los parámetros que se tienen que optimizar para el crecimiento adecuado para las algas son, nutrientes (calidad y cantidad), luz, pH, turbulencia (aireación), salinidad, y temperatura (Barsanti & Gualtieri, 2010). En las pruebas de sensibilidad realizadas en este estudio no se utilizó la aireación por el hecho de que el tolueno es altamente volátil, no obstante, no hubo afectación en el crecimiento. Herman et al., 1990 examinaron la toxicidad de los COVs sobre el crecimiento de *Selenastrum capricornutum* empleando una especie de viales herméticos con medio Bristol adicionando bicarbonato de sodio al 0.4% con exposición a compuestos orgánico volátiles como el benceno, xileno y tolueno, en el cual obtuvo una CL_{50} para tolueno de 9.4 mg.L^{-1} , comparando con nuestros resultados obtenidos de $CL_{50} = 2.45 \text{ mg.L}^{-1}$, se observa una gran diferencia entre concentraciones, por lo que la adición de bicarbonato de sodio permite superar la inhibición del crecimiento. Los resultados de Herman et al. (año), evidenciaron lo ya mencionado, que a mayor cantidad de tolueno mayor sensibilidad del alga.

Comparando la sensibilidad del alga *Raphidocelis subcapitata* con otras especies de organismo acuáticos como las diferentes especies de *Lecane* en el estudio de Pérez-Legaspi et al. (2001) en donde *Lecane luna*, *Lecane hamara* y *Lecane quadridentata*, tuvieron una CL_{50} de 277.4 mg.L^{-1} , 236.7 mg.L^{-1} y 191.4 mg.L^{-1} respectivamente, podemos afirmar que *Raphidocelis subcapitata* es un organismo más sensible al tolueno.

8.3. Evaluación de la toxicidad del efluente gaseoso en la biodegradación del tolueno por *Macrophomina phaseolina*

Basado en lo anterior, el hongo *Macrophomina phaseolina* logró biodegradar al tolueno con una gran eficiencia, sin embargo, para las pruebas de toxicidad el porcentaje de inhibición de crecimiento, en el biofiltro control e inoculado con el hongo microscópico, fue del 26.27% (tabla 7) y es altamente probable que se haya presentado un crecimiento competitivo, ya que *Macrophomina phaseolina* es un hongo con alta tolerancia a estrés hídrico, como lo menciona en su estudio Martínez *et al.* (2016). En el biofiltro 1 se expuso en promedio a una concentración de 0.5945 mg.L⁻¹ de tolueno teniendo un porcentaje de inhibición del 14.67%, lo cual es una reacción esperada ya que en las pruebas de sensibilidad vemos que a una concentración de 0.867 mg.L⁻¹ de tolueno tuvimos una inhibición del 35.5%. En el biofiltro 2 tenemos una respuesta similar ya que en promedio se emitió una concentración de 2.66 mg/L de tolueno teniendo una inhibición del 28.33%. y en las pruebas de toxicidad observamos que aun concentración de 2.16 mg.L⁻¹ se alcanzó una inhibición del 57.2%, lo que podemos determinar, es que la adición de una técnica de aireación es un beneficio en el crecimiento del alga. En la columna de control con tolueno se tuvo una inhibición del 62.45% con una concentración de 8.2865 mg.L⁻¹ (tabla 7).

9. Conclusión

De acuerdo a los estudios realizados en el presente trabajo se determinó que el hongo microscópico *Macrophomina phaseolina* es un buen degradante del tolueno, teniendo una eficiencia de eliminación del 100% en concentraciones de 1.2 a 1.9 kg/m³_{lecho}.h⁻¹ y del 99% en cantidades 4.9 a 5.5 kg/m³_{lecho}.h⁻¹, siendo una buena opción para el uso en estas tecnologías, por su adaptación a diferentes condiciones ambientales.

El alga microscópica *Raphidocelis subcapitata* es un organismo bioindicador muy útil para bajas concentraciones de tolueno.

Las emisiones gaseosas cargadas en tolueno del biofiltro resultaron tóxicas cuando se tienen altas concentraciones del contaminante, teniendo una reacción de dosis respuesta.

10. Referencia

- Acosta Collazo, A., Rosas, A., & Layuno, M. (2013). *Convergencias del diseño y de la construcción II arquitectura, ingeniería civil y urbanismo*. (Alejandro Acosta Collazo, Ed.) (Primera ed). Aguascalientes, Aguascalientes, México. Retrieved from www.uaa.mx/direcciones/dgdv/editorial/
- Álvarez Isabel Méndez Martínez, J., Bello Rodríguez, B. M., Benítez Fuentes, B., Escobar Blanco, L. M., & Zamora Monzón, R. (2017). Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. *Revista Médica Electrónica*, 39(5), 1160–1170. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18242017000500017
- Antonio C., & Garritz, A. (n.d.). V. La atmósfera. La contaminación del aire. Retrieved March 14, 2019, from http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/097/htm/sec_11.htm
- Aránguez, E., María Ordóñez, J., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). *Contaminantes atmosféricos y su vigilancia*. *Rev Esp Salud Pública* (Vol. 73). Retrieved from http://scielo.isciii.es/pdf/resp/v73n2/contam_atmos.pdf
- Arciniégas Suárez, C. A. (2012). *Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable pm 10*.
- Atsdr. (2015). *Public Health Statement for Toluene*. Retrieved from www.atsdr.cdc.gov/
- ATSDR. (2000). *Toxicological profile for toluene*. Atlanta, Georgia: Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2010). *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*. (Second Edi). Pisa, Italy: CRC Press. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=AZCIAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=.+Algae.+Anatomy,+Biochemistry,+and+Biotechnology.&ots=aGa5Yi10zh&sig=DMILQzkiUqbUIC0jiyXshw1sLd0#v=onepage&q=.+Algae.+Anatomy,+Biochemistry,+and+Biotechnology.&f=false>
- Cárdenas González, B., & Cárdenas González, B. (2003). *Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas*. Instituto Nacional de Ecología.
- Carriquiriborde, P. (2021). *Principios de Ecotoxicología*. Buenos aires, Argentina.
- Cheng, Z., Lu, L., Kennes, C., Yu, J., & Chen, J. (2016). Treatment of gaseous toluene in three biofilters inoculated with fungi/bacteria: Microbial analysis, performance and starvation response. *Journal of Hazardous Materials*, 303, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.017>
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017). Antecedentes (aire ambiente). Retrieved March 14, 2019, from <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/antecedentes-aire-ambiente>
- Deviny, J. S., Deshusses, M. A., & Webster, T. S. (1999). *Biofiltration for air pollution control*. Lewis Publishers.
- Diario Oficial de la Unión Europea. (2003). *Real decreto 117/2003, de 31 de enero, sobre limitación*

de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades. Retrieved from https://www.asturias.es/medioambiente/articulos/ficheros/Real Decreto 117_2003.pdf

- Díaz Báez, M. C., Pica Granados, Y., Ronco, A., Sobrero, C., Bulus Rossini, G., Feola, G., ... Sanchez-Bain, A. (2004). *Ensayos Toxicológicos Y Métodos de Evaluación de Calidad de Aguas - Google Libros*. (G. Castillo Morales, Ed.) (Primera). Mexico. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=GD7-N3154OIC&oi=fnd&pg=PA17&dq=bioensayos+concepto&ots=Tqcm-Nzts0&sig=n94DADYd0P3Lqx8kJelfc4G4jGs#v=onepage&q=bioensayos concepto&f=false>
- Fernández Rivas, L., & Fernández Rivas, L. (2015). El papel de los óxidos de nitrógeno en el cambio climático. Efectos sobre la salud.
- Fernández Sé F. (2010). *Evaluación de los costes de construcción y operación de un biofiltro*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Gallego P., A., González F., I., & Sánchez G., B. (2012). *Contaminacion atmosférica*. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Gaudin, F., Andres, Y., & Le Cloirec, P. (2008). Packing material formulation for odorous emission biofiltration. *Chemosphere*, 70(6), 958–966. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.08.014>
- González Zuart, A., Adriana, V., Pérez Jiménez, J. C., & Low Pfeng, A. (2014). *BIOINDICADORES: guardianes de nuestro futuro ambiental*. (Primera ed). San Cristobal de Las Casas, Chiapas: El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur) Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).
- Gutierrez Roa, J., Trejo Lopez, O., Camacho Navarrete, S., Castillo Gutierrez, R., Cruz Ruiz, S., & Castaneda Gutierrez, J. (1999). *Distrito Federal: Educación ambiental: caminos ecológicos*. Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- Haber, S. H., Elena, L., Varela, P., Mexicana, S. H., Una, H., Centenario, Q., ... Haber, S. H. (1993). La industrialización de México: historiografía y análisis, 42(3), 649–688.
- Herman, D. C., Inniss, W. E., & Mayfield, C. I. (1990). Impact of volatile aromatic hydrocarbons, alone and in combination, on growth of the freshwater alga *Selenastrum capricornutum*. *Aquatic Toxicology*, 18(2), 87–100. [https://doi.org/10.1016/0166-445X\(90\)90020-P](https://doi.org/10.1016/0166-445X(90)90020-P)
- Hinojosa Reyes, M., Arriaga García, S. L., & Rodríguez González, V. (2011). *Estudio de un sistema híbrido de degradación de etilbenceno: oxidación avanzada UV/TiO2-In acoplada a un biofiltro*. Retrieved from <https://repositorio.ipicyt.edu.mx//handle/11627/101>
- INECC. (2007). Biofiltración. Retrieved March 14, 2019, from <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/biofiltra.html>
- J.K. Fawell, E. Ohanian, M. G. (2004). *Toluene in Drinking-water, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. Retrieved from https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/toluene.pdf
- Janssen, D. B., Oppentocht, J. E., & Poelarends, G. J. (2001). Microbial dehalogenation. *Environmental Biotechnology*, 12, 254–258.

- Juárez, F. J., Rincón Sánchez, A. R., & Martínez, R. R. (2000). *Toxicología ambiental*. Aguascalientes, Ags.: Universidad Autónoma de Aguascalientes. Retrieved from https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1sH2_PDVZK8Y1WJfJbqf2yLsXp6igmMTE
- Martínez-Villarreal, R., Garza-Romero, T. S., Moreno-Medina, V. R., Hernández-Delgado, S., & Mayek-Pérez, N. (2016). Bases bioquímicas de la tolerancia al estrés osmótico en hongos fitopatógenos: el caso de *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. *Revista Argentina de Microbiología*, 48(4), 347–357. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.05.004>
- Mcgregor, D. (1994). The genetic toxicology of toluene. *Elsevier*.
- Mendaz, Á. (2010). Tolueno | La Guía de Química. Retrieved November 20, 2019, from <https://quimica.laguia2000.com/compuestos-quimicos/tolueno>
- Nyholm, N., & Källqvist, T. (1989, August 1). Methods for growth inhibition toxicity tests with freshwater algae. *Environmental Toxicology and Chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/etc.5620080807>
- Oropeza García. (2013). *México en el desarrollo de la revolución industrial: evaluaciones y perspectivas*. Mexico D.F. Retrieved from www.juridicas.unam.mxhttp://biblio.juridicas.unam.mx
- Padilla Lozano, F., Castorena, P. G., & García, J. L. (2015). *Nueva industria regional en Aguascalientes*.
- Pérez-Legaspi, I. A., & Rico-Martínez, R. (2001). Acute toxicity tests on three species of the genus *Lecane* (Rotifera: Monogononta). *Hydrobiologia*, 446/447(1), 375–381. <https://doi.org/10.1023/A:1017531712808>
- Pica Granados, Y., Ronco, A., & Díaz Báez, M. C. (2004). Ensayos de toxicidad crónica con el alga *Selenastrum capricornutum* (pp. 69–76).
- Ramírez Piña, J. (2008). *Biofiltración de metanol utilizando como soporte semilla de uva y vaina de cacahuete*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Ramírez Sánchez, H., Andrade García, M. D., González Castañeda, M. E., & Celis de la Rosa, A. J. (2006). Contaminantes atmosféricos y su correlación con infecciones agudas de las vías respiratorias en niños de Guadalajara, Jalisco, 385–394.
- Rodríguez G., E. (2018, July 28). Así era el primer coche eléctrico, del siglo XIX. Retrieved July 22, 2020, from https://www.elespanol.com/omicrono/20180728/primer-coche-electrico-siglo-xix/325967986_0.html
- Ruiz, R. O. (2017, August 4). Llega a niveles peligrosos contaminación en Aguascalientes; hasta 100 puntos IMECA. Retrieved June 12, 2020, from <https://binoticias.com/nota.cfm?id=2287&t=llega-a-niveles-peligrosos-contaminacion-en-aguascalientes-hasta-100-puntos-imeca>
- Ruíz, S. (2017). Contaminación en la ciudad de México. Retrieved from https://elpais.com/internacional/2017/02/11/mexico/1486826862_301377.html
- Secretaría del medio ambiente. (2012). *Inventario de emisiones de contaminantes de efecto invernadero 2012*. Zona Metropolitana Del Valle De México.

- Secretaría del medio ambiente. (2017). *Boletín Calidad del Aire*.
- SEMARNAT. (1997). *Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara 1997-2001*. Mexico.
- SEMARNAT. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida*. Mexico, D.F. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>
- Silva Otero Arístides, M. de G. M. (2005). *La llamada Revolución Industrial*. Retrieved from https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YmbEneoFEI0C&oi=fnd&pg=PA13&dq=origenes+de+la+revolución+industrial&ots=_oK4eb7p97&sig=3kXj3m9cRbjf0XxC0MefC1dRG8#v=onpage&q=origenes+de+la+revolución+industrial&f=false
- SINIARN. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. <https://doi.org/10.3334/CDIAC>
- Spigno, G., Pagella, C., Fumi, M. D., Molteni, R., & De Faveri, D. M. (2003). VOCs removal from waste gases: Gas-phase bioreactor for the abatement of hexane by *Aspergillus niger*. *Chemical Engineering Science*, 58(3–6), 739–746. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00603-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00603-6)
- Sridharan, A. P., Thankappan, S., G., K., & Uthandi, S. (2020). Comprehensive profiling of the VOCs of *Trichoderma longibrachiatum* EF5 while interacting with *Sclerotium rolfsii* and *Macrophomina phaseolina*. *Microbiological Research*, 236, 126436. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126436>
- SSMAA. (2018). *Programa Cielo Claro para la Mejora en la calidad del aire en el Estado de Aguascalientes*. Aguascalientes, Ags.
- Suárez Medellín, L. P. (2004). *Degradación de tolueno y xileno por bacterias nativas colombianas y detección de los genes todA y xylB*. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias, Bogota.
- Teitelbaum, D. T. . M. (2010). Introducción a la toxicología: ocupacional y ambiental. In S. B. M. A. J. T. Bertram G. Katzung (Ed.), *Farmacología básica y clínica* (12th ed., pp. 1001–1012). México: McGraw-Hill. Retrieved from <http://www.epa.gov>
- Téllez, J., Rodríguez, A., & Fajardo, Á. (2006). Contaminación por monóxido de carbono: Un problema de salud ambiental. *Revista de Salud Pública*. Universidad Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.1590/s0124-00642006000100010>
- Thalasso, F. (2002). *Biofiltración: tratamiento biológico de aire contaminado*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/228594656>
- Ureste, M. (2013). México, 2º país de America Latina con más muertes por contaminación. Retrieved January 3, 2020, from <https://www.animalpolitico.com/2013/04/mexico-2o-pais-de-al-con-mas-muertes-por-contaminacion-oms/>
- USEPA. (2017). Technical Overview of Volatile Organic Compounds. Retrieved June 5, 2019, from <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds#definition>
- Vicencio Miranda, A. (2007). La industria automotriz en México: Antecedentes, situación actual y perspectivas. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-10422007000100010

Warren, B., Swanson, J., & Loehr, R. C. (1997). Biofiltration: fundamentals, design and operations principles, and applications, *123*(6), 538–546.



ANEXOS



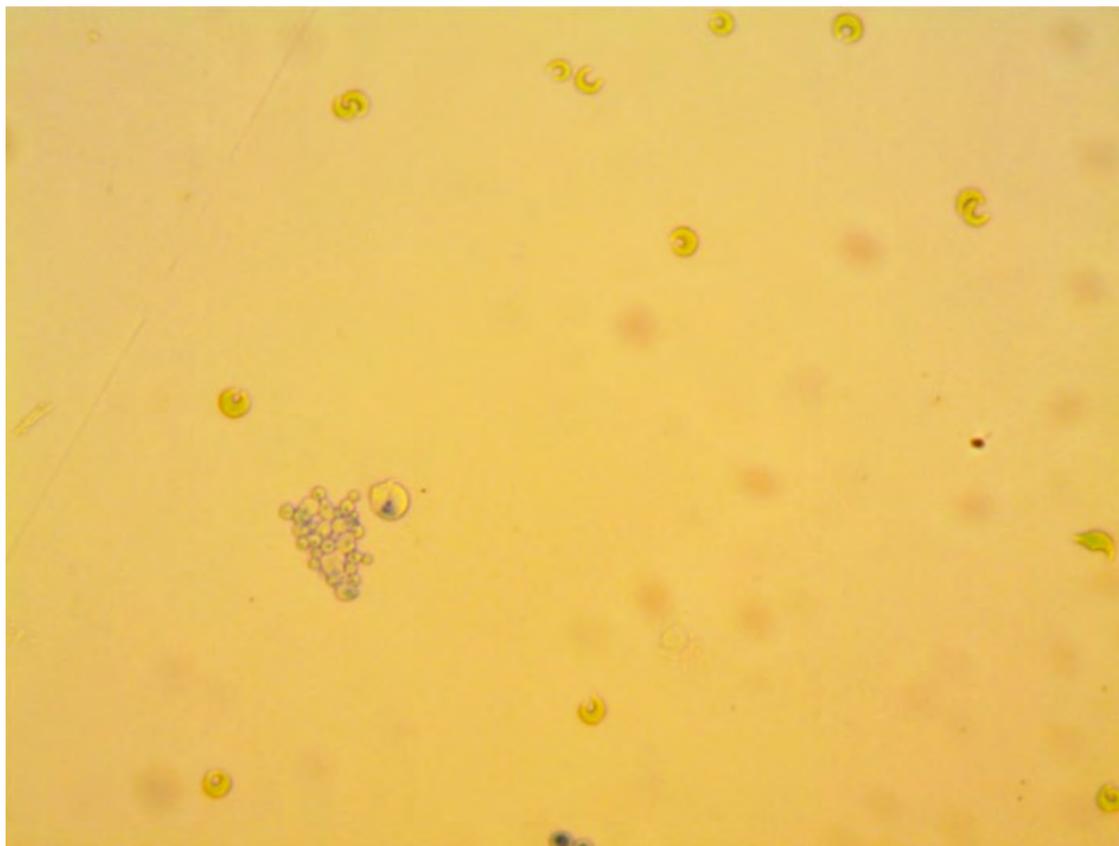


Figura A1.- Crecimiento de *Macrophomina phaseolina* en el medio BOLD junto con el alga *Raphidocelis subcapitata*.

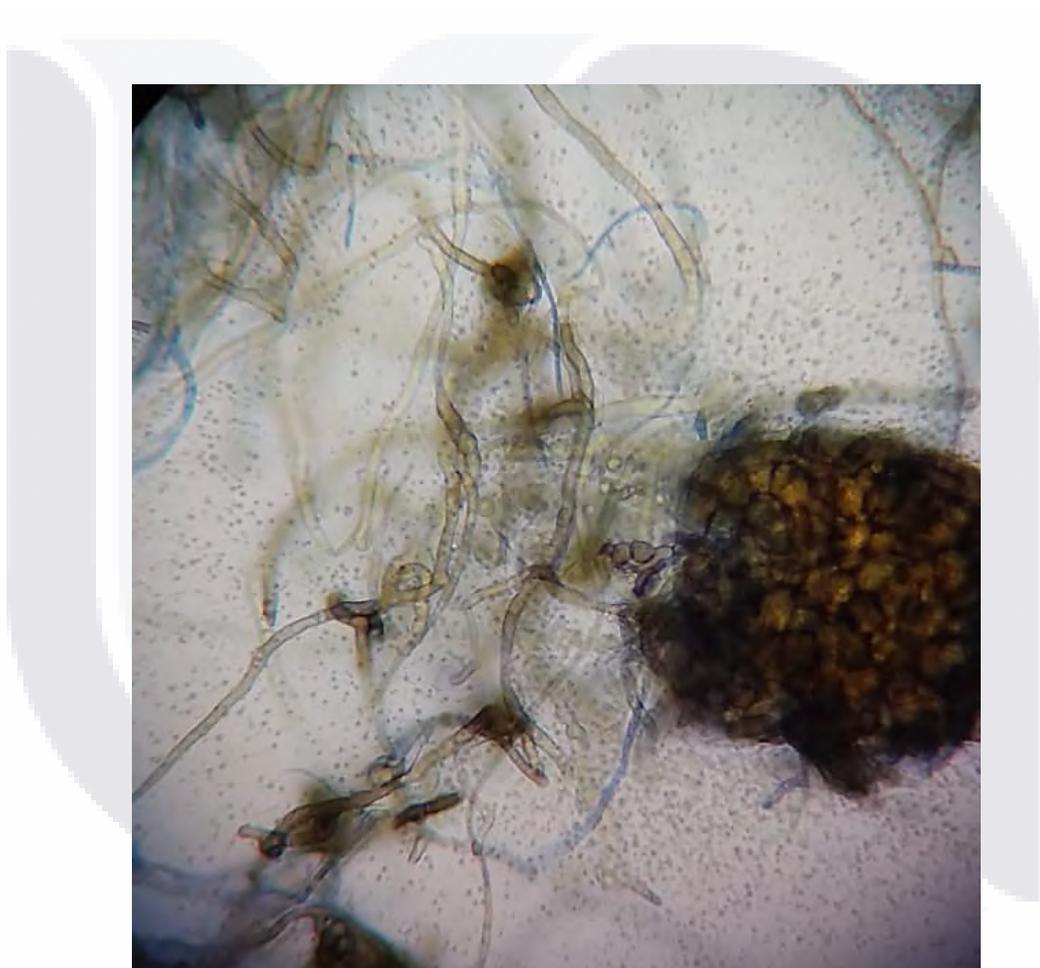


Figura A2.- Observación al microscopio de *Macrophomina phaseolina*.