



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**SISTEMA DE FOTOCATÁLISIS-MICROBIOLÓGICO PARA
EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES**

Tesis presentada para obtener el grado de:

LICENCIADA EN BIOTECNOLOGÍA

PRESENTA:

GABRIELA ALLENDE VALERA

DIRECTOR DE TESIS:

D.C. JOSÉ CARLOS MENDOZA HERNÁNDEZ

CO-DIRECTORA DE TESIS:

D.C. GABRIELA PÉREZ OSORIO

ASESORAS DE TESIS:

D.C. FABIOLA AVELINO FLORES

D.C. MA. DOLORES CASTAÑEDA ANTONIO



MARZO 2023



Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mis padres, Cristina Valera Martínez y Gumercindo Allende Vázquez, por estar siempre para mí, ayudarme a cumplir mis metas, brindarme su apoyo incondicionalmente y guiarme. Gracias por todos los sacrificios que han hecho por mí, por su amor y por ayudarme a ser quien soy.

A Héctor, por acompañarme en toda esta etapa y siempre darme ánimos.

A mi director de tesis, D.C. José Carlos Mendoza Hernández por abrirme las puertas de su laboratorio, compartirme sus conocimientos, guiarme en el trabajo, atender mis interrogantes y permitirme desarrollar este trabajo de investigación.

A mi co-directora, D.C. Gabriela Pérez Osorio por brindarme su apoyo e instruirme.

A los compañeros que en algún momento compartieron sus conocimientos conmigo para poder desarrollar mi trabajo.

A todos los que me apoyaron y estuvieron para mí incondicionalmente.

Dedicatoria

A mi mamá, por estar siempre para mí, ser mi inspiración, escucharme, apoyarme y hacer hasta lo imposible para poder cumplir mis sueños y metas.

Índice

Resumen	5
Introducción	6
Antecedentes	8
Agua.....	8
Contaminación del agua	9
Industria textil.....	10
□ Etapas del proceso de producción	11
Efluentes textiles: compuestos químicos, características y efectos nocivos...	14
Métodos de tratamiento para aguas residuales textiles	16
□ Fotocatálisis	17
□ Consorcios microbianos	17
□ Sistemas combinados fotocátalisis-consorcios microbianos	18
Planteamiento del problema	21
Objetivo general	22
Objetivos particulares	22
Hipótesis	22
Materiales y métodos	23
Aislamiento de microorganismos con capacidad degradadora de colorantes....	23
Identificación de cepas microbianas	24
Primera prueba con tratamiento microbiológico	24
Inóculo bacteriano	24
Curva de calibración	24
Biodegradación de colorantes	25
Segunda prueba con tratamiento microbiológico	25

Inóculo bacteriano	25
Biodegradación de colorantes	25
Prueba pre-eliminar del tratamiento microbiológico en aguas residuales reales	26
Inóculo bacteriano	26
Aguas residuales	26
Biodegradación de colorantes de las aguas residuales textiles.....	26
Prueba final con el tratamiento combinado: fotocátalisis- microbiológico en aguas residuales reales.....	27
Aguas residuales	27
Fotocátalisis.....	27
Prueba de oscuridad	27
Fotocátalisis heterogénea	27
Tratamiento microbiológico.....	28
Inóculo bacteriano	28
Biodegradación de colorantes	28
Parámetros de entrada y salida	28
Cinética de biodegradación.....	28
Prueba de fitotoxicidad de los productos de biodegradación	29
Resultados	31
Capacidad de degradación de los colorantes sintéticos con las cepas aisladas	31
Caracterización de las cepas microbianas.....	34
Degradación de los colorantes sintéticos textiles mediante la cepa M2N de <i>Escherichia coli</i>	35
Curva de calibración de los colorantes sintéticos textiles	35
Biodegradación de colorantes sintéticos.....	35
Parámetros cinéticos de la biodegradación de los colorantes sintéticos	39

Análisis de los parámetros indicadores de fitotoxicidad.....	41
Biodegradación de los colorantes sintéticos mediante el consorcio bacteriano .	41
Eficacia de la biodegradación de colorantes.....	41
Parámetros cinéticos de la biodegradación de los colorantes sintéticos textiles	46
Análisis de los parámetros indicadores de fitotoxicidad de los productos de biodegradación del tratamiento con el consorcio bacteriano con y sin sacarosa	48
Tratamiento microbiológico de aguas residuales reales	50
Biodegradación de los colorantes presentes en las aguas residuales textiles	51
Orden de reacción de la biodegradación de aguas residuales textiles	55
Aplicación del tratamiento combinado a las aguas residuales textiles	56
Eficacia de degradación de colorantes en las aguas residuales reales con el proceso combinado fotocátalisis- microbiológico.....	56
Parámetros de entrada y salida	68
Orden cinético de la biodegradación de los colorantes en aguas residuales textiles reales.....	69
Análisis de los parámetros indicadores de fitotoxicidad de los productos de biodegradación de las aguas residuales reales	70
Discusiones	71
Conclusiones	84
Bibliografía	86
Anexos	94

Resumen

La contaminación ambiental es un problema al cual el ser humano se enfrenta día a día como consecuencia de múltiples actividades que realiza con la finalidad de satisfacer sus necesidades básicas. Un claro ejemplo de ello es la industria textil, la cual no solo satisface las necesidades de vestimenta del ser humano, sino que también es una fuente de empleos y de ingresos económicos. Sin embargo, también es generadora de una gran cantidad de efluentes que afectan el medio ambiente y ponen en riesgo la vida de los seres vivos. La producción de prendas se encuentra conformada por una serie de etapas, en las cuales hay generación inminente de residuos, entre ellos, las aguas residuales textiles, las cuales están compuestas por múltiples compuestos químicos. Este tipo de efluentes tienen un gran impacto en el medio ambiente, en especial a los cuerpos de agua, debido a que muchas veces las industrias no les dan el tratamiento adecuado y los vierten a los cuerpos de agua con la finalidad de deshacerse de ellos sin gastar en un tratamiento que permita mejorar las características de las aguas residuales y que no represente un peligro inminente para el ambiente, por ello, deben buscarse y aplicarse tratamientos que permitan tratar las aguas residuales textiles de una manera rentable y eficiente.

En el siguiente trabajo se presenta una propuesta de tratamiento de aguas residuales textiles mediante un sistema combinado de fotocátalisis-microbiológico, el cual permite degradar eficientemente los colorantes presentes y a su vez mejora la apariencia y características de los efluentes. Para lo cual, se realizó el aislamiento de la cepa bacteriana M2N de *Escherichia coli* con capacidad degradativa de colorantes textiles en diferentes concentraciones, misma que se utilizó para la formación de un consorcio microbiano que fue probado en diferentes ensayos con los colorantes textiles: azul marino 606, verde ultramar 667 y rojo escarlata 604, para finalmente utilizarlo en el tratamiento combinado. La aplicación del tratamiento a las aguas residuales textiles mostró porcentajes de biodegradación prometedores y a través de una prueba de fitotoxicidad con semillas de *Medicago sativa* se comprobó que el tratamiento de los efluentes no genera productos tóxicos.

Introducción

Actualmente la contaminación ambiental es uno de los principales problemas a los cuales se enfrenta el ser humano como consecuencia de las diversas actividades que realiza, las cuales tienen como objetivo satisfacer sus necesidades básicas de una manera eficiente y económicamente redituable (Khan & Malik, 2014). Pero a la vez, es importante tener en cuenta que gran parte de las actividades que se realizan tienen un impacto negativo en el medio ambiente debido a que utilizan una amplia variedad de compuestos que resultan ser contaminantes y, por ende, conducen al deterioro del medio ambiente (Saratale *et al.*, 2020).

El agua es un recurso no renovable de suma importancia pues sustenta la vida de todos los seres vivos y se encuentra involucrada en los procesos que se desarrollan para satisfacer sus requerimientos y generar un bienestar (Singh *et al.*, 2019). Por ello, el agua es un componente clave no solo a nivel organismo, sino también a nivel industrial, ya que, a través de los distintos procedimientos realizados en los sectores industriales heterogéneos se obtienen una infinidad de productos y servicios que facilitan la vida del ser humano (Roy Choudhury, 2014). Teniendo en cuenta lo mencionado, es necesario considerar que la industria no solo proporciona beneficios dado que es una de las principales fuentes de efluentes en cuya composición se encuentran compuestos contaminantes para el medio ambiente, y que principalmente afectan a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos al ser vertidos a los mismos sin antes haberles realizado algún tratamiento previo que garantice la reducción o eliminación de los contaminantes presentes en ellos (Saratale *et al.*, 2020; Roy Choudhury, 2014).

La industria textil forma parte de la vida cotidiana del ser humano y tiene un gran impacto en el desarrollo económico y en la generación de empleos, también se considera como una de las fuentes principales de contaminación ambiental debido a los efluentes provenientes de los procesos que realizan, por lo cual, es una de las industrias de mayor preocupación debido al gran volumen de agua que requieren para poder realizar cada uno de sus procedimientos, la contaminación de la misma

y las propiedades de los diversos contaminantes, por ejemplo: toxicidad, persistencia y bioacumulación (Saratale *et al.*, 2020; Roy Choudhury, 2014).

Las aguas residuales procedentes de la industria textil son un contaminante de gran interés debido a los compuestos que se encuentran en ella dado que en cada etapa se utilizan compuestos de diferentes naturalezas y que causan efectos nocivos en el medio ambiente alterando su composición y la salud de los seres vivos (Khan & Malik, 2014). Como se mencionó con anterioridad dependiendo de las propiedades de los contaminantes se producirán distintos riesgos y de igual forma el tiempo de exposición y la concentración de estos pueden producir efectos crónicos o agudos en los organismos que han estado expuestos, ejemplo de ello es el impacto que tienen estos efluentes en la vida marina porque el oxígeno es indispensable y la presencia de las aguas residuales textiles en el agua agota la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, de igual forma se reduce la actividad fotosintética debido a la disminución de la penetración de la luz, así como la reproductividad de los organismos acuáticos, ahora bien, en el caso del ser humano se ha reportado que gran parte de los compuestos presentes en estas aguas contaminadas son cancerígenos, tienen efectos sistemáticos desencadenando dermatitis, alteraciones hormonales e incluso pueden provocar déficits en el desarrollo y reproducción (Khan & Mlik, 2014; Darbra *et al.*, 2011).

Tomando en cuenta los daños ocasionados por las aguas residuales, es fundamental tomar acciones que permitan degradar los compuestos tóxicos presentes en estos efluentes y, por lo tanto, disminuir o idealmente eliminar la presencia de estos en los cuerpos de agua (Singh, 2019).

Una de las posibles soluciones que ha tomado gran interés es el uso de la biorremediación, ya que esta proporciona diversas técnicas que permiten aminorar el problema a través del uso de microorganismos y otros elementos. Además, es un proceso que no representa algún tipo de riesgo mayor para el medio ambiente debido al origen de los elementos que utiliza (Singh, 2019; Saratale *et al.*, 2020). Por lo tanto, el estudiar la eficacia de diferentes sistemas que permitan revertir los daños ocasionados en el medio ambiente es primordial para tener argumentos más

sólidos acerca de las acciones que se pueden tomar para dar una solución a esta situación.

Antecedentes

Agua

El agua es un recurso esencial para el desarrollo de la vida y, por lo tanto, es una de las necesidades más demandadas por los seres vivos porque el agua es fundamental para el funcionamiento, desarrollo y mantenimiento de los organismos (Saravanan *et al.*, 2021; Hossain *et al.*, 2020; Jeevanantham *et al.*, 2019). A pesar de que uno de los principales propósitos del agua es beberla para sobrevivir, está juega un papel fundamental en múltiples actividades realizadas por el ser humano, al ser utilizada principalmente en las labores domésticas, la agricultura y en la industria (Hossain *et al.*, 2020).

Saravanan *et al.* (2021) mencionan que del 71 % del contenido total de agua presente en la tierra, solo el 2.5% es agua pura y como se sabe, el agua pura o también conocida como agua dulce, es fundamental para el mantenimiento de la vida. Cabe mencionar que el agua dulce se encuentra distribuida principalmente en ríos, lagos, estanques, agua subterránea y arroyos. Ahora bien, en cuestión de las necesidades básicas del ser humano y las actividades industriales, aproximadamente solo el 1% de agua se encuentra de manera accesible y el resto de este recurso se encuentra de forma inutilizable (es decir, está presente como agua subterránea y en glaciares).

Tomando en cuenta lo mencionado, es importante resaltar que actualmente nos enfrentamos a una escasez de agua debido a múltiples factores, como, por ejemplo, el cambio climático, el uso desmedido del agua, la industrialización y la contaminación. Por lo cual es importante comenzar a buscar posibles soluciones a dicha problemática.

Uno de los principales factores que comprometen la disponibilidad y calidad del agua es la contaminación, la cual es producida como consecuencia de distintas actividades antropogénicas (Hossain *et al.*, 2020). En consecuencia, se deben

buscar distintas alternativas que permitan recuperar, tratar, descontaminar y reutilizar el agua procedente de distintas actividades industriales o cuerpos de agua que han sido contaminados por la misma razón, lo cual podría dar una solución parcial a los efectos de escases y contaminación del agua.

Contaminación del agua

La calidad del agua ha sido afectada de manera casi irremediable debido al aumento de la demanda del agua dulce utilizada para el desarrollo de diversas actividades y por la descarga de efluentes a los cuerpos de agua, causando su contaminación (Saravanan *et al.*, 2021).

Existe una gran diversidad de fuentes de contaminación del agua, no obstante, las que son de mayor importancia debido al volumen de residuos que producen son: los efluentes industriales, domésticos, agrícolas y municipales, derrames de petróleo, compuestos utilizados en los cultivos agrícolas (fertilizantes, pesticidas, etc.), descargas de productos químicos provenientes de la industria textil, alimenticia, farmacéutica, petroquímica, refinerías y minas así como las descargas de compuestos xenobióticos y la presencia de microorganismos patógenos (Jeevanantham *et al.*, 2019; Saravanan *et al.*, 2021).

Dado que las fuentes de contaminación del agua son muy variadas, los compuestos presentes en cada uno de estos efluentes son distintos de acuerdo con la actividad de origen. Liu y Qiu (2020) mencionan que los componentes principales que están relacionados directamente con la contaminación del agua son los colorantes, iones metálicos, fármacos, aceites y disolventes. Por otra parte, Saravanan *et al.* (2021) sugieren que los contaminantes ambientales de mayor importancia pueden ser agrupados en microorganismos patógenos, químicos orgánicos e inorgánicos, dentro de los cuales se encuentran los metales pesados, colorantes, compuestos orgánicos volátiles, aceites, plásticos, insecticidas, pesticidas y herbicidas. Debido a que la naturaleza de cada uno de estos compuestos es diferente, los efectos nocivos que pueden causar en el ser humano y en el ambiente son variados. En la tabla 1 se describen brevemente algunas de los principales efectos y fuentes de estos contaminantes.

Tabla 1. Principales contaminantes ambientales.

Contaminante	Origen	Efectos en la salud del ser humano	Efectos en medio ambiente
Metales pesados	Residuos industriales, minería, lodos de depuradora	Enfermedades cancerígenas y deterioro de algunos órganos	Bioacumulación y estrés oxidativo
Colorantes	Residuos de industria textil, pintura, papel, impresión y curtido	Carcinógeno, mutágeno, disfunción de órganos	Reducción de la actividad fotosintética, aumento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO), crecimiento suprimido de las plantas
Aceites	Derrames de petróleo de transporte y efluentes industriales	Problemas respiratorios, irritación neurológica, ocular y nasal	Destrucción de ecosistemas acuáticos, reducción del oxígeno disuelto (OD) en el agua
Plásticos	Desechos de material de embalaje e industrial	Disfunción hepática, problemas pulmonares, sordera, deterioro del sistema inmunológico	Bloqueo del sistema respiratorio de los organismos acuáticos
Pesticidas y herbicidas	Actividades agrícolas	Alteración del sistema endocrino y disfunción de órganos	Biomagnificación y disminución de la biodiversidad
Microorganismos patógenos	Descargas domésticas, aguas residuales, desechos hospitalarios	Efectos graves en el metabolismo	Reducción del contenido de oxígeno disuelto (OD)

Modificada de Saravanan *et al.* (2021)

Industria textil

El sector de la industria manufacturera es una de las más extendidas del mundo y se caracteriza por requerir agua durante las etapas de procesamiento de producción

por lo cual, se estima que la demanda de agua de estas industrias a nivel mundial para el año 2050 aumente en un 400% (Babuna, 2011; Haque *et al*, 2021). Debido a la contribución que tiene la industria textil al sector industrial, este tipo de industria se encuentra catalogada como el tercer usuario más grande de recursos de agua dulce a nivel mundial por los diversos procesos de operación que se describen a continuación (Haque *et al*, 2021).

La industria textil es generadora de una infinidad de productos como, por ejemplo: alfombras, calcetería, tejidos de mezclilla, hilados, etc., a partir de diversas materias primas, entre las cuales se encuentra el algodón, lana, polímeros naturales, yute, seda, lino, entre otros, con la ayuda de la maquinaria necesaria (Babuna, 2011). Debido a esto, la industria requiere una gran cantidad de agua y se sabe que el volumen que se necesita generalmente va a depender de las fibras que se utilicen, las maquinarias, equipos y operaciones, entre otras cosas (Haque *et al*, 2021).

Además del problema generado por esta industria debido al agua requerida, otro de los inconvenientes de mayor preocupación es la contaminación del agua por el uso de una gran cantidad de productos químicos empleados en cada una de las etapas del proceso, de acuerdo con lo reportado en la literatura, este tipo de efluentes contiene ácidos, álcalis, sales, almidón y una mezcla de diversos colorantes (Kalia *et al.*, 2021).

- Etapas del proceso de producción

La producción de textiles es realizada a través de una serie de etapas (Figura 1) que van desde la obtención de las materias primas hasta la obtención de las prendas en cuestión (Madhav *et al.*, 2018). En este caso, hay 4 etapas claves durante la producción de los textiles, estas son: formación de hilo, formación de tejido, procesamiento de tejidos o también conocido como procesamiento húmedo y, por último, la confección textil (Madhav *et al.*, 2018). Diversas investigaciones señalan que la mayoría de los productos químicos son utilizados durante el procesamiento en húmedo, motivo por el cual es la etapa en la cual se obtienen una mayor cantidad de efluentes con presencia de compuestos químicos variados (Roy Choudhury, 2014).

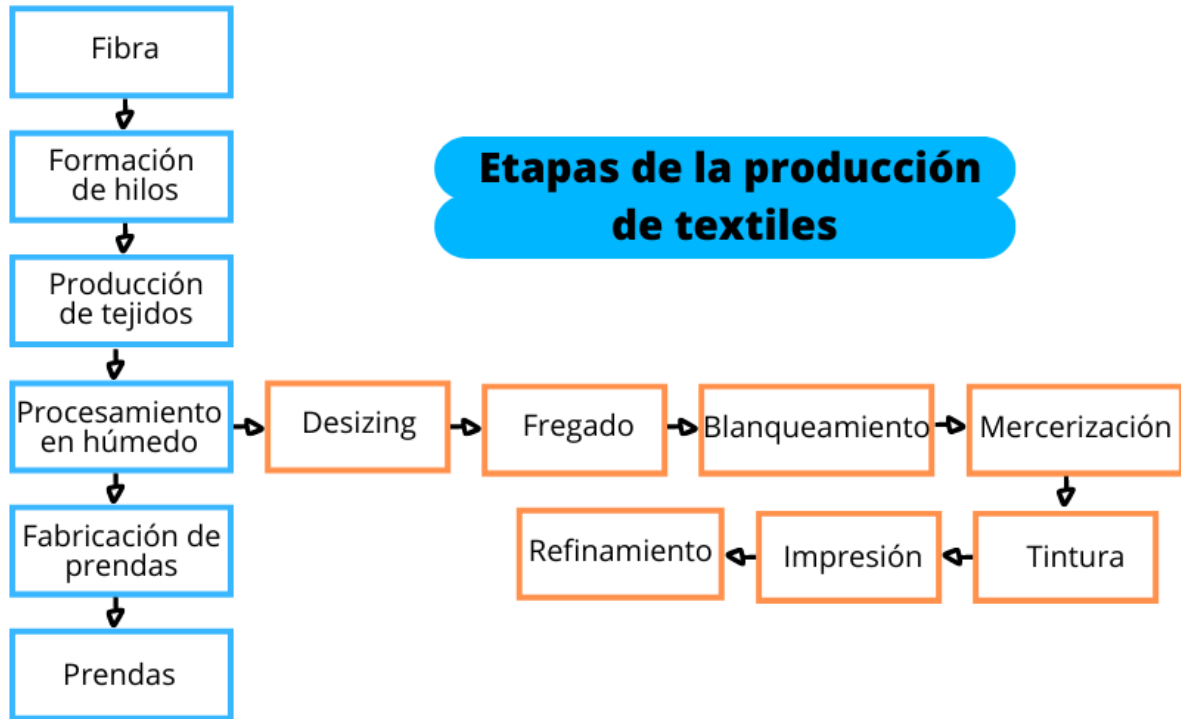


Figura 1. Etapas de la producción de textiles. Modificada de Madhav *et al.* (2018)

En la siguiente tabla se describen brevemente cada una de las etapas que se realizan en el procesamiento en húmedo.

Tabla 2. Etapas del procesamiento en húmedo.

Etapa	Descripción	Compuestos utilizados	Efluentes generados	Referencia
Dimensionamiento	Primer paso de preparación en el cual el hilo se recubre para facilitar su manipulación. Se adicionan compuestos químicos para dar resistencia a las fibras y minimizar su rotura en los procesos subsecuentes.	Almidón, alcohol polivinílico, ácidos policíclicos o carboximetilcelulosa.	Almidón, colorantes, sólidos en suspensión, alcoholes polivinílicos, suavizantes y ácidos grasos.	(Khan & Malik, 2014; Madhav <i>et al.</i> , 2018; Periyasamy <i>et al.</i> , 2018)
Desizing	Se encarga de la eliminación de los compuestos de apresto adicionados en la etapa anterior.	Ácido clorhídrico, agua o enzimas	Almidón, almidón hidrolizado, enzimas, sales, pH ácido, alcohol polivinílico, carboximetilcelulosa	(Khan & Malik, 2014; Periyasamy <i>et al.</i> , 2018)
Fregado	Se realiza la eliminación de las impurezas de las fibras (ceras, proteínas, grasas, pectinas, etc.) utilizando soluciones alcalinas.	Hidróxido de sodio	Álcalis, tensioactivos, aceites saponificados, pectinas hidrolizadas, silicatos, colorantes naturales, proteínas.	(Khan & Malik, 2014; Madhav <i>et al.</i> , 2018; Periyasamy <i>et al.</i> , 2018)
Blanqueamiento	Eliminación de los colores no deseados en las fibras.	Hipoclorito, peróxido de hidrógeno o ácido peracético	Hipocloritos, álcalis, silicatos, peróxidos, alcoholes y cloro.	(Khan & Malik, 2014; Madhav <i>et al.</i> , 2018; Periyasamy <i>et al.</i> , 2018)
Mercerización	Tratamiento químico continuo específico del algodón, su finalidad es aumentar el potencial de absorción del tinte, el brillo y la apariencia de la fibra.	Solución alcalina y solución ácida	Sólidos en suspensión con alto contenido de álcali.	(Khan & Malik, 2014; Madhav <i>et al.</i> , 2018; Periyasamy <i>et al.</i> , 2018)
Teñido	Aplicación de pigmentos químicos a las fibras o a los tejidos para proporcionarles los colores deseados.	Colorantes generalmente sintéticos y dependiendo del proceso de teñido se utilizan tensioactivos, metales, sales, sulfuros y formaldehído.	Colorantes, ácidos, sales, álcalis, cromo, cobre.	(Khan & Malik, 2014; Madhav <i>et al.</i> , 2018; Periyasamy <i>et al.</i> , 2018)
Impresión	Es una subdivisión del teñido, se aplican los colorantes en secciones seleccionadas y específicas de la tela, lo cual constituye el diseño.	Urea, PVC y ftalatos.	Detergentes, colorantes, cromo, cobre, álcalis, ácidos, espesantes, ceras, aceites.	(Madhav <i>et al.</i> , 2018; Periyasamy <i>et al.</i> , 2018)
Acabado	Se realiza para desarrollar ciertas características en la tela refinada y requiere de una amplia variedad de agentes de acabados que se encargan de reticular, suavizar e impermeabilizar.	Biocidas de acabado)	Siliconas, compuestos orgánicos e inorgánicos, sólidos en suspensión.	(Madhav <i>et al.</i> , 2018; Periyasamy <i>et al.</i> , 2018)

Efluentes textiles: compuestos químicos, características y efectos nocivos

Roy Choudhury (2014) menciona que, del total de la producción de compuestos químicos, aproximadamente el 25% de los mismos es utilizado en la industria textil, por lo cual se estima que durante las etapas de la producción de textiles y sobre todo en la etapa de procesamiento en húmedo, se utilizan al rededor 2000 compuestos químicos distintos (Roy Choudhury, 2014; Khan & Malik, 2014). De igual manera, Abdelouahab Reddam *et al.* (2020) mencionan que la industria textil utiliza más de 30 mil compuestos distintos, de los cuales aproximadamente 10 mil son colorantes.

Al igual que en otras industrias, la industria textil genera residuos líquidos, sólidos y gases, en los cuales se encuentran diversos contaminantes. Por ejemplo, se sabe que genera emisiones de óxidos de nitrógeno y azufre, disolventes, así como emisiones de hidrocarburos volátiles. En relación con los desechos sólidos generalmente se encuentran los materiales utilizados para los envases empleados para presentar los productos en las tiendas, como es el caso de los plásticos, aluminio, metal, papel, etc. (Roy Choudhury, 2014).

Como se ha venido mencionando, la contaminación más preocupante es la que ocurre durante la producción de los textiles a consecuencia de que se requiere de una gran cantidad de productos químicos y agua (Khan & Malik, 2014). Los productos químicos son de gran importancia debido a sus características y, en parte, son de las principales razones por las cuales se consideran de gran riesgo para la salud y el medio ambiente por sus propiedades de persistencia, bioacumulación y toxicidad (Roy Choudhury, 2014).

Los reactivos necesarios en la etapa de procesamiento húmedo son diversos por lo cual, pueden ser desde compuestos inorgánicos hasta compuestos orgánicos y polímeros. Khan & Malik (2014) mencionan que los compuestos químicos pueden ser clasificados en 1) auxiliares textiles, los cuales incluyen los agentes complejantes, surfactantes, emulsionantes, agentes humectantes, dispersantes y secuestrantes, 2) productos químicos básicos y ácidos, 3) colorantes, dentro de los cuales están los colorantes, reguladores de pH, transportistas, absorbentes de

ultravioleta y agentes protectores de colorantes, agentes fijadores y agentes niveladores y 4) acabados.

Además de los compuestos mencionados con anterioridad hay otras sustancias involucradas y presentes en los efluentes textiles, en la siguiente tabla se describen brevemente algunos de ellos, así como los efectos que estos tienen.

Tabla 3. Principales contaminantes originados por la industria textil.

Contaminante	Efectos nocivos en salud y medio ambiente
Ácidos	Causa reducción del pH produciendo corrosión, ayuda en la liberación de Na_2S destruye a los microorganismos presentes y el sistema de auto purificación del agua.
Álcalis	Aumentan del pH, favorece la liberación de iones de hidrógeno, destruye a los microorganismos y la auto purificación del agua.
Sólidos disueltos	Cloruros, sulfatos, nitratos, bicarbonatos de algunos metales inorgánicos, puede afectar a las plantas por los cambios osmóticos, afectan a los seres vivos y aumenta la demanda química y bioquímica de oxígeno.
Materia suspendida	Hay residuos insolubles, destruye la auto purificación del agua, reduce la actividad fotosintética de las plantas, puede ahogar las branquias de los peces y generar olores desagradables.
Colorantes	Cambian la coloración del agua, aumenta la demanda química y bioquímica del oxígeno, produce cáncer, trastornos y discapacidades.
Aceites	Afectan la absorción de oxígeno del aire en el agua afectada, afectan a los animales y la vida vegetal presente en el agua y aumentan la demanda química y bioquímica del agua.
Detergentes sintéticos	Reducen la biodegradabilidad y toxicidad, aceleran las reacciones en cadena y afecta la aireación natural.
	Destruyen la auto purificación del agua, producen enfermedades de la piel, discapacidades y desórdenes,

Metales tóxicos	destruyen microorganismos presentes en el agua y afectan a los animales acuáticos, pueden ser introducidos a la cadena alimentaria.
Pesticidas	Afectan gravemente a los peces, las actividades metabólicas del cuerpo y la fotosíntesis de las plantas.
Contaminantes gaseosos	Entre estos se encuentran el amoníaco, cloro y sulfuro de hidrógeno. Aumentan la toxicidad, la demanda de oxígeno, matan a los microorganismos, afectan al reino animal y vegetal.
Efluentes calentados	Reducen la concentración de oxígeno disuelto, afectan la vida acuática, destruyen y desequilibran todo el ecosistema debido a las fluctuaciones de temperatura altas.
Residuos radioactivos	Generan cambios metabólicos, trastornos, discapacidades, daños genéticos, enfermedades crónicas, cáncer, malformaciones tanto en seres humano, animales y plantas.

Tomada y modificada de Periyasamy *et al.* (2018).

Métodos de tratamiento para aguas residuales textiles

En la literatura se ha reportado la efectividad de diversos métodos de tratamiento aplicados a las aguas residuales, sin embargo, algunas presentan limitaciones frente a otras debido a las variables que alberga cada uno de los métodos. De manera particular, para el tratamiento de aguas residuales textiles el interés se ha centrado en los procesos combinados de oxidación química y biológica ya que una de las posibles desventajas del empleo de solo tratamientos biológicos como es el caso de consorcios microbianos, puede ser lento (Jafari *et al.*, 2012).

Hay diferentes métodos químicos, entre los cuales los procesos avanzados de oxidación (AOP) son de gran interés para el tratamiento de las aguas residuales textiles para poder realizar la oxidación de una gran variedad de compuestos presentes en dichos efluentes (Ambaye & Hagos., 2020). De manera específica, la degradación fotocatalítica, la cual emplea semiconductores como por ejemplo TiO₂ y ZnO, es el método más prometedor, además, si posteriormente se aplica un proceso biológico como es el caso de los consorcios microbianos, la degradabilidad

de los compuestos contaminantes aumenta considerablemente (Ambaye y Hagos., 2020).

- Fotocatálisis

La creciente preocupación por la remediación de aguas ha redoblado las investigaciones acerca de las tecnologías y tratamientos que pueden ser utilizados para un tratamiento sostenible de aguas residuales industriales y la eliminación de contaminantes orgánicos, colorantes, pesticidas, entre otros (Mueses *et al.*, 2021). Algunas de las razones por las cuales se considera una técnica de interés es debido a que tiene una fuerte capacidad de oxidación, es de bajo costo, tiene una alta efectividad, puede ser ampliamente aplicable y es amigable con el medio ambiente (Madhav *et al.*, 2018).

La fotocatálisis es definida como aquella tecnología de oxidación avanzada que se basa en la fotoactivación de fotocatalizadores (como es el caso de los materiales semiconductores) con fotones incidentes emitidos por una fuente de radiación, la cual puede ser una fuente de luz solar o artificial (Mueses *et al.*, 2021). Al realizarse la activación del fotocatalizador se generan pares “electrón-hueco” que, al estar en contacto con los portadores de carga, como por ejemplo H_2O , H_2O_2 y O_3 , producen especies reactivas de oxígeno (ROS) como radicales hidroxilos (Mueses *et al.*, 2021). Las especies reactivas de oxígeno son consideradas como compuestos transitorios y atacan a los contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua y a las especies biológicas presentes en la fase fluida mediante las vías de reacción de tipo oxidativa o reductora (Mueses *et al.*, 2021). Cabe mencionar que una de las características más importantes de esta técnica son la accesibilidad de catalizadores, entre los cuales se encuentran el dióxido de titanio (TiO_2) y el óxido de zinc (ZnO), los cuales son eficaces para realizar la conversión de materiales tóxicos y biorresistentes a especies inocuas, como es el caso de CO_2 y H_2O (Hosseini *et al.*, 2021).

- Consorcios microbianos

Un consorcio microbiano es definido como una combinación de diferentes organismos que tienen un alto potencial para eliminar contaminantes ambientales

(Patil *et al.*, 2021). Por lo cual, se pueden utilizar diferentes especies microbianas y vegetales en consorcios para lograr la degradación de contaminantes de interés como, por ejemplo: colorantes sintéticos, fertilizantes, pesticidas e hidrocarburos (Patil *et al.*, 2021).

Una de las principales características de los consorcios es que la efectividad que tienen para degradar los contaminantes se debe a que algunos organismos del consorcio realizan la biorremediación y otros ayudan en la desintoxicación y estabilización del peso (Patil *et al.*, 2021). Por lo cual un consorcio puede tener una mayor degradación de compuestos en comparación a un monocultivo (Patil *et al.*, 2021).

El uso de los consorcios microbianos para el tratamiento de las aguas residuales textiles se utiliza para lograr una mayor tasa de decoloración, degradación y mineralización de los contaminantes presentes en estos efluentes (Saratale *et al.*, 2020). Además, un aspecto importante de mencionar es que las comunidades microbianas presentes en los sitios contaminados tienen un papel fundamental para la desintoxicación de la misma, debido a que tienen la capacidad de adaptarse al ambiente que se genera debido a las características de las aguas residuales (Saratale *et al.*, 2020).

Una de las principales consideraciones que se debe tener al trabajar con consorcios microbianos es que cada una de las cepas tiene un modo de acción diferente contra algún compuesto en específico y el grado de degradación del compuesto será dependiente de su biodisponibilidad, la persistencia de los microorganismos en el sitio de degradación, el pH, la temperatura, los nutrientes disponibles así como de los intermediarios y subproductos obtenidos al final de la degradación (Patil *et al.*, 2021).

- Sistemas combinados fotocátalisis-consorcios microbianos

La fotocátalisis heterogénea es uno de los procesos de oxidación avanzados que ha mostrado resultados prometedores en el tratamiento de las aguas residuales, a pesar de ello, este tipo de procesos muestran algunos inconvenientes, como, por ejemplo, no ser económicamente rentable, tener una mineralización incompleta de

los contaminantes y, en la etapa final del proceso puede haber productos tóxicos (Waghmode *et al.*, 2019).

Otro tipo de tratamientos que han mostrado resultados favorables en el tratamiento de aguas residuales textiles, son los biológicos, entre los cuales, los consorcios microbianos son de gran interés y existe una gran variedad de estudios que respaldan a los mismos en su empleo eficaz en la degradación de compuestos contaminantes como es el caso de los colorantes y, una de las principales razones por las cuales el uso de consorcios microbianos favorece la degradación de contaminantes presentes es la variedad de enzimas involucradas de los diferentes microorganismos que conforman el consorcio pero, al igual que se mencionó en el otro proceso, el empleo de los consorcios microbianos como único tratamiento tiene la desventaja de que requiere de períodos de tiempo largos para poder obtener buenos resultados y que se pueda realizar la transformación de las contaminantes y por ende, su mineralización total (Waghmode *et al.*, 2019).

En la literatura se han reportado distintas combinaciones de tratamientos que involucran los métodos de oxidación química y los métodos biológicos, pero, algo que se menciona acerca de los mismos es que la combinación de este tipo de procesos para las aguas residuales provenientes de la industria textil, depende de distintos factores, entre los cuales destacan: los componentes de las aguas residuales, la calidad que requiere el agua al finalizar el tratamiento, y los costos (da Silva *et al.*, 2019).

La combinación de los procesos de oxidación avanzados, como es el caso de la fotocatálisis, con un proceso biológico como los consorcios microbianos, muestra una biodegradabilidad más alta de los contaminantes en comparación a los procesos aplicados individualmente. Al aplicar la fotocatálisis como pretratamiento o postratamiento se tienen ventajas como la disminución de los costos y sobre todo la biodegradabilidad de los contaminantes, enunciado que está fundamentado gracias a los resultados que se han obtenido en múltiples investigaciones que indican la existencia de una reducción significativa en el peligro y las características de toxicidad de los subproductos obtenidos al finalizar el tratamiento secuencial

fotocatálisis-biológico o viceversa, por lo tanto, los subproductos representan un menor peligro para los microorganismos (Zeghioud *et al.*, 2021).

La investigación de Nidheesh *et al.* (2020) demuestra que la fotocatálisis aumenta la biodegradabilidad de los contaminantes orgánicos y, se produce como resultado la formación de subproductos no tóxicos. Otra de las características y a su vez ventaja, es que produce una suficiente cantidad de carbono orgánico, el cual estará disponible para el proceso biológico que será aplicado de manera secuencial y será aprovechado por los microorganismos que conforman a los consorcios microbianos (Nidheesh *et al.*, 2020).

Con base a la revisión bibliográfica referente a este tipo de tratamientos, la combinación de los mismos mejora la biodegradabilidad de la amplia gama de compuestos contaminantes presentes en las aguas residuales textiles y a su vez, contribuyen a desintoxicar a las mismas (Bhatia *et al.*, 2018).

Planteamiento del problema

En México, la industria textil es considerada como una de las industrias más importantes debido a la generación de una gran cantidad de empleos, una alta producción y las ganancias que esta genera. De acuerdo a los datos publicados en el documento emitido en 2020 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Cámara Nacional de la Industria Textil (CANAINTEX) perteneciente a la colección de estudios sectoriales y regionales, titulado “*Conociendo la industria textil y de la confección*”, se sabe que la presencia de la industria textil se concentra principalmente en 10 estados de la República Mexicana, los cuales se estima que contribuyen con aproximadamente el 85.75% de producción nacional de dicha industria. Dentro de los estados en los cuales se concentra la industria textil se pueden mencionar al estado de Puebla y Tlaxcala, ya que en estos estados la industria textil contribuye de manera significativa en su desarrollo económico.

A pesar de la importancia económica que representa, la industria textil es una fuente inminente de contaminación principalmente a causa de las aguas residuales generadas, las cuales son vertidas a los cuerpos de agua con la finalidad de deshacerse de estos residuos sin generar algún costo adicional a sus procesos. Es por ello que los efluentes provenientes de esta industria han sido caracterizados como una preocupación ambiental de suma importancia desde hace algunos años, ya que las afectaciones que producen son variadas, por ejemplo, afectan la calidad del agua, afectan cualquier forma de vida presente en el ecosistema acuático, disminuyen la fertilidad del suelo, afecta el crecimiento de plantas y son un detonante de algunas afectaciones del ser humano como consecuencia del contacto con este tipo de aguas.

Considerando los daños que producen este tipo de contaminantes, es importante denotar que repercuten de forma directa en los ecosistemas, dañando la calidad de vida de los seres vivos y algunas de las actividades realizadas por el ser humano, como es el caso de la agricultura o ganadería, puesto que para estas actividades el agua es fundamental, motivo por el cual que es de gran relevancia atender dicha problemática.

Objetivo general

- Diseñar un sistema de fotocátalisis-microbiológico para el tratamiento de aguas residuales textiles.

Objetivos particulares

- Determinar la eficacia de la fotocátalisis en la degradación de aguas residuales textiles.
- Evaluar la eficacia microbiológica de un consorcio microbiano en la degradación de aguas residuales textiles.
- Analizar la degradación de aguas residuales textiles después del tratamiento con un sistema combinado de fotocátalisis-microbiológico.

Hipótesis

El sistema de fotocátalisis-microbiológico establecido permitirá degradar los compuestos contaminantes presentes en las aguas residuales textiles sin generar algún grado de toxicidad.

Materiales y métodos

Aislamiento de microorganismos con capacidad degradadora de colorantes

Se utilizaron 6 muestras de suelo provenientes de diferentes de sitios contaminados con hidrocarburos (tabla 4). Las muestras de suelo se pusieron por duplicado en crecimiento en caldo Luria Bertani (LB) con aproximadamente 400 mg l^{-1} del colorante negro 601 y azul marino 606 de la marca comercial Mariposa®. Posteriormente, se metieron a incubación durante 120 h a $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Las muestras se etiquetaron de acuerdo al número de muestra y el colorante correspondiente.

Después del tiempo de incubación indicado, se eligieron las cepas que tuvieron una mejor decoloración y se verificó que tuvieran la capacidad de utilizar a los colorantes como su única fuente de carbono y a la vez biodegradarlos. Para ello, se montaron 4 ensayos que consistieron en poner en crecimiento a las cepas en 5 ml de medio mínimo mineral (MMM) de la siguiente manera: MMM con 150 mg l^{-1} de colorante negro 601, MMM con 150 mg l^{-1} de colorante negro 601 y 5 g l^{-1} de sacarosa, MMM con 150 mg l^{-1} de colorante azul marino 606 y MMM con 150 mg l^{-1} de colorante azul marino 606 y 5 g l^{-1} de sacarosa. Los ensayos fueron inoculados $100 \text{ } \mu\text{l}$ de las cepas seleccionadas y se incubaron durante 168 h a $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Luego del tiempo de incubación, se analizó cualitativamente la degradación en cada ensayo para seleccionar las cepas con resultados prometedores.

Las cepas seleccionadas fueron puestas nuevamente en crecimiento, agregando una fuente de carbono adicional, siendo esta la sacarosa a diferentes concentraciones y así, conocer la concentración a la cual hay mayor eficiencia de degradación. Para ello se montaron 4 ensayos en 5 ml de MMM, los cuales consistieron en: MMM con 100 mg l^{-1} de colorante azul marino 606 y 1 g l^{-1} de sacarosa, MMM con 100 mg l^{-1} de colorante azul marino 606 y 2 g l^{-1} de sacarosa y MMM con 100 mg l^{-1} de colorante azul marino 606 y 3 g l^{-1} de sacarosa, MMM con 100 mg l^{-1} de colorante azul marino 606 y 4 g l^{-1} de sacarosa. Estos se inocularon con $50 \text{ } \mu\text{l}$ de las cepas correspondientes y se incubaron a $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 h.

Finalmente, se eligieron las cepas y la concentración de sacarosa a la cual se identificaron los mejores resultados.

Tabla 4. Ubicación de las muestras de suelo utilizadas para el aislamiento de cepas.

Muestra	Coordenadas geográficas (DD)
M1	18.99910, - 98.194267
M2	19.004618, - 98.195892
M3	19.004445, -98.195120
M4	19.005732, - 98.199516
M5	18.999810, - 98.194267
M6	19.004618, - 98.195892

*DD: grados decimales

Identificación de cepas microbianas

La cepa seleccionada al finalizar los ensayos descritos previamente, se sembró en agar nutritivo y agar Mc Conkey, se incubó durante 24 h a 30 °C. Después del tiempo de incubación, se realizó la identificación de la misma a través de las siguientes pruebas bioquímicas: agar hierro lisina (LIA), agar movilidad indol ornitina (MIO), ureasa, rojo de metilo (RM) Vogues-Proskauer (VP), agar triple azúcar hierro TSI, agar citrato y gas.

Primera prueba con tratamiento microbiológico

Inóculo bacteriano

La cepa aislada e identificada en este trabajo se puso en crecimiento en caldo LB durante 48 h a 30 °C. Subsecuentemente, fueron centrifugadas a 8 000 rpm durante 15 minutos. Después de la centrifugación se removió el sobrenadante y el pellet se resuspendió en MMM hasta obtener una absorbancia de 0.5 a 600 nm lo cual es equivalente a aproximadamente 1×10^9 UFC/ml

Curva de calibración

Para la determinación de la longitud de onda a la cual absorbe cada uno de los colorantes utilizados en las pruebas propuestas, se realizó una curva de calibración de cada colorante de 10 a 100 mg l⁻¹ y se le realizó un barrido con el espectrofotómetro UV/Vis (Perkin Elmer Lambda 25).

Biodegradación de colorantes

Los colorantes utilizados para este trabajo son: azul marino 606, rojo escarlata 604 y verde ultramar 667. Dichos colorantes pertenecen a la marca comercial Mariposa[®] y la concentración utilizada de cada uno fue de 100 mg l⁻¹. Se montaron dos ensayos por triplicado de cada colorante en MMM, los ensayos contenían: 100 mg l⁻¹ de colorante y 100 mg l⁻¹ de colorante con 3 g l⁻¹ de sacarosa. Cada uno de ellos fue inoculado con 2 ml de la cepa correspondiente y, posteriormente, se incubaron durante 120 h a 30 °C a 80 rpm. Diariamente se tomó una alícuota de 3 ml y se centrifugó a 11 000 rpm por 15 minutos y, al sobrenadante obtenido se le realizó una lectura mediante el espectrofotómetro UV/Vis (Perkin Elmer Lambda 25).

Segunda prueba con tratamiento microbiológico

Inóculo bacteriano

Para esta prueba, se emplearon las cepas mostradas en la tabla 5, en las cuales se encuentra la cepa aislada en este trabajo junto con las cepas previamente aisladas e identificadas por Mendoza *et al.* (2015) y Mendoza *et al.* (2016). La generación del inóculo de cada una de las cepas se realizó de la manera descrita con anterioridad. Una vez obtenidos los inóculos, se formó el consorcio bacteriano, para el cual se utilizaron 500 µl de cada cepa.

Tabla 5. Cepas que conforman el consorcio bacteriano.

Cepa	Taxón de identificación
M6A	<i>Escherichia coli</i>
M2N	<i>Escherichia coli</i>
K131	<i>Enterobacter sp.</i>
B44	<i>Pseudomonas putida</i>
N16	<i>Enterobacter sp.</i>
MC188	<i>Salmonella sp.</i>

Biodegradación de colorantes

Los colorantes utilizados para esta prueba fueron los mismos de la marca comercial Mariposa[®]: azul marino 606, rojo escarlata 604 y verde ultramar 667. En este caso,

la concentración utilizada fue de 50 y 100 mg l^{-1} . Se montaron cuatro ensayos en 200 ml de MMM, los cuales consistieron en: 1) 50 mg l^{-1} de colorante, 2) 50 mg l^{-1} de colorante adicionado con 3 g l^{-1} de sacarosa, 3) 100 mg l^{-1} de colorante y 4) 100 mg l^{-1} de colorante adicionado con sacarosa. Los ensayos fueron inoculados con el consorcio formado (tabla 5) y se metieron a incubación durante 120 h a 30 °C. Diariamente se tomó una alícuota de 3 ml y se centrifugó a 11 000 rpm por 15 minutos y, al sobrenadante obtenido se le realizó una lectura mediante el espectrofotómetro UV/Vis (Perkin Elmer Lambda 25).

Prueba pre-eliminar del tratamiento microbiológico en aguas residuales reales

Inóculo bacteriano

Las cepas utilizadas para el tratamiento de las aguas residuales fueron las mostradas en la tabla 5. La generación del inóculo bacteriano se realizó como se describió en las pruebas anteriores. Asimismo, se formó nuevamente el consorcio con 500 μ l de cada cepa (tabla 5).

Aguas residuales

Las aguas residuales empleadas en este ensayo fueron obtenidas de una planta de tratamiento de una industria textil del estado de Puebla. Se utilizaron 3 aguas residuales, mismas que fueron nombradas de la siguiente manera: agua residual 1 (agua de coloración aparente café), agua residual 2 (agua de coloración aparente azul) y agua residual 3 (agua de coloración aparente morada). A cada una de las aguas residuales se les realizó un barrido espectral para conocer la longitud de onda a la cual absorben y a su vez, conocer el valor de la absorbancia inicial puesto que, dicho valor se tomará como referencia para conocer el porcentaje de degradación obtenido al finalizar cada uno de los tratamientos aplicados.

Biodegradación de colorantes de las aguas residuales textiles

Para cada agua se montaron dos ensayos, los cuales consistieron en: agua residual adicionada con 3 g l^{-1} de sacarosa y agua residual sin sacarosa. Las muestras correspondientes se inocularon con el consorcio formado. Posteriormente, las muestras se incubaron 120 h a 30 °C y, diariamente se tomó una alícuota de 2 ml de cada muestra, misma que se centrifugó a 11 000 rpm durante 15 minutos. Al

sobrenadante formado se le realizó un barrido espectral utilizando el espectrofotómetro UV/Vis (Perkin Elmer modelo Lambda 25). De igual manera, a cada una de las aguas residuales utilizadas se les realizó un barrido espectral para determinar la longitud de onda a la cual absorben.

Prueba final con el tratamiento combinado: fotocátalisis- microbiológico en aguas residuales reales

Aguas residuales

Las aguas residuales empleados para las pruebas finales, se obtuvieron de una planta de tratamiento de una industria textil del estado de Puebla. Se utilizaron 3 aguas residuales distintas a las utilizadas anteriormente y se nombraron como: M1 (agua residual azul), M2 (agua residual roja) y M3 (agua residual café).

Fotocatálisis

Cada una de las 3 aguas residuales fue sometida a fotocátalisis. El fotocatalizador utilizado fue el $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, el cual se trabajó en dos concentraciones: $[A]=0.05 \text{ gl}^{-1}$ y $[B]=0.1 \text{ gl}^{-1}$. Antes de realizar la fotocátalisis heterogénea, se realizó una prueba de oscuridad para poder determinar si hay adsorción de los colorantes por parte del catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ en la solución acuosa.

Prueba de oscuridad

Por cada muestra de agua residual (M1, M2 y M3) se colocó por duplicado la concentración correspondiente ($[A]$ y $[B]$) de fotocatalizador en 1000 ml de muestra y se dejó durante 24 h. Posterior a este tiempo, se tomó una alícuota de 10 ml de cada muestra y se les realizó un barrido espectral mediante el espectrofotómetro UV/Vis (Perkin Elmer modelo Lambda 25).

Fotocatálisis heterogénea

Las soluciones con catalizador previamente sometidas a la prueba de oscuridad, así como el blanco analítico (agua residual sin catalizador) se pasaron a matraces de bola de 1000 ml. Los matraces se colocaron sobre una base cubierta de aluminio, cuya inclinación fue de aproximadamente 19°C con una orientación de norte a sur. La exposición solar fue de 6 h, durante la cual existió una aireación mediante una bomba de aire con la finalidad de suministrar oxígeno y dispersar el catalizador en

la solución. Cada 2 h se tomaron alícuotas de 10 ml de cada muestra, a las cuales posteriormente se les realizó un barrido espectral mediante el espectrofotómetro UV/Vis (Perkin Elmer modelo Lambda 25).

Tratamiento microbiológico

Inóculo bacteriano

Las cepas utilizadas para la prueba final de tratamiento combinado, son las mostradas en la tabla 5. La generación del inóculo se realizó como se ha descrito con anterioridad, pero, en este caso, el consorcio se formó con 1600 µl de suspensión bacteriana.

Biodegradación de colorantes

Las muestras finales obtenidas de la fotocátalisis fueron sometidas a dos ensayos que consistieron en: 100 ml de agua residual después de fotocátalisis adicionada con sales del MMM y 3 g l⁻¹ de sacarosa, por otra parte, 100 ml de agua residual después de fotocátalisis adicionada con sales del MMM. Las muestras se inocularon con 9.6 ml de consorcio bacteriano y después se incubaron durante 72 h a 30 °C. Se tomó diariamente una alícuota de 1.5 ml de cada muestra. Mismas que fueron centrifugadas a 11 000 rpm. Al sobrenadante se le realizó un barrido espectral con el espectrofotómetro UV/Vis (Perkin Elmer Lambda 25). Para determinar la longitud a la que absorbe cada agua residual (M1, M2 y M3), se realizó de igual manera un barrido espectral.

Parámetros de entrada y salida

Se realizó la medición de los siguientes parámetros de las aguas residuales M1, M2 y M3 sin tratamiento y al finalizar el tratamiento combinado fotocátalisis-microbiológico: pH, sólidos totales, sólidos totales volátiles y sólidos suspendidos totales (siguiendo lo indicado por la NOM-AA-34-1976), DBO₅ (siguiendo la NOM-AA-28-1976), nitrógeno total (siguiendo la NMX-AA-026-SCFI-2001) y fósforo total (de acuerdo a la NMX-AA-029-SCFI-2001).

Cinética de biodegradación

Los datos que se obtuvieron de la lectura realizada con el espectrofotómetro de cada una de las pruebas realizadas (primera y segunda prueba con tratamiento

microbiológico, prueba pre-eliminar del tratamiento microbiológico en aguas residuales reales y prueba final con el tratamiento combinado: fotocátalisis-microbiológico en aguas residuales reales), se analizaron mediante las ecuaciones mostradas a continuación correspondientes a los modelos cinéticos de orden cero, primer orden y segundo orden para poder determinar el orden de biodegradación correspondiente (Wanyonyi *et al.*, 2017).

$$C_t = C_0 - K_0 t \quad (1)$$

$$\ln(C_t) = K_1 t + \ln(C_0) \quad (2)$$

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_0} + K_2 t \quad (3)$$

Donde:

C_t = concentración del colorante en cualquier instante (mg l^{-1})

C_0 = concentración inicial del colorante (mg l^{-1})

t = tiempo

La determinación de la constante de grado cero (K_0) en $\text{mg l}^{-1} \text{ h}$ se emplearon los valores de C_t contra el tiempo, para la constante de primer orden (K_1) en h^{-1} se utilizaron los valores de $\ln(C_t)$ contra el tiempo y, en el caso de la constante de segundo orden (K_2) en $\text{mg l}^{-1} \text{ h}$, se consideraron los valores de $\frac{1}{C_t}$ contra el tiempo. Subsecuentemente a los datos obtenidos se les calculó la pendiente (m), el factor de correlación (R^2) y la ordenada al origen (b).

Prueba de fitotoxicidad de los productos de biodegradación

Al finalizar cada uno de los ensayos de biodegradación (exceptuando la prueba pre-eliminar del tratamiento microbiológico en aguas residuales reales, ya que como lo indica, es una prueba pre-eliminar) se montó la prueba de toxicidad, para la cual se emplearon semillas de *Medicago Sativa*, a las cuales se les dio un tratamiento de desinfección con una solución de hipoclorito de sodio al 3% por 1 minuto y, posteriormente se lavaron con agua destilada.

La prueba consistió en la colocación de 10 semillas sobre papel filtro previamente colocado en cajas Petri. Se humedecieron con 5 ml de los tratamientos correspondientes y se utilizó como control agua dura. Se metieron a incubación a 25 °C durante 120 h en ausencia de luz. Al finalizar el tiempo de incubación mencionado, se determinó: el porcentaje de la germinación relativa de las semillas (GRS), el crecimiento relativo de la radícula (CRR) y el índice de germinación (IG) de acuerdo a las ecuaciones propuestas por Rodríguez *et al.* (2014).

$$GRS(\%) = \frac{\text{Numero de semillas germinadas con el residuo de la biodegradación}}{\text{Número de semillas germinadas en agua dura (control)}} \times 100$$

$$CRR(\%) = \frac{\text{Longitud promedio de la radícula con el residuo de la biodegradación}}{\text{Longitud promedio de la radícula en agua dura (control)}} \times 100$$

$$IG(\%) = \frac{GRS \times CRR}{100}$$

Resultados

Capacidad de degradación de los colorantes sintéticos con las cepas aisladas

De las 6 muestras que se pusieron en crecimiento en caldo LB con los colorantes azul marino 606 y negro 601 a 400 mg l^{-1} , se observó que 4 cepas fueron las que mostraron mejores resultados cualitativamente en relación a la degradación de los colorantes después de las 72 h de incubación, siendo estas las muestras (denominadas cepas en este trabajo): M6N, M6A, M2A y M2N.

Como se mencionó con anterioridad, los 4 ensayos propuestos para verificar que las cepas seleccionadas realmente tuvieran la capacidad de utilizar los colorantes como única fuente de carbono y de igual manera biodegradarlos, fueron inoculados las 4 cepas mencionadas. Los resultados obtenidos de la biodegradación de colorantes se muestran a continuación en la tabla 6. Los resultados se evaluaron como: degradación favorable (+++), degradación regular (++) y degradación no favorable (+).

Tabla 6. Biodegradación de colorantes a 50 mg l⁻¹ y 100 mg l⁻¹

Cepa	Ensayo	Degradación
M6N	MMM+S+CN	+
M6N	MMM+CN	++
M6N	MMM+S+CA	+++
M6N	MMM+CA	+
°M6N	MMM+S+CN	+
°M6N	MMM+CN	+++
°M6N	MMM+S+CA	+++
°M6N	MMM+CA	+++
M6A	MMM+S+CN	+
M6A	MMM+CN	+
M6A	MMM+S+CA	+++
M6A	MMM+CA	+
°M6A	MMM+S+CN	+
°M6A	MMM+CN	+
°M6A	MMM+S+CA	+++
°M6A	MMM+CA	+
M2A	MMM+S+CN	+
M2A	MMM+CN	++
M2A	MMM+S+CA	+++
M2A	MMM+CA	++
°M2A	MMM+S+CN	+
°M2A	MMM+CN	+
°M2A	MMM+S+CA	+++
°M2A	MMM+CA	+
M2N	MMM+S+CN	+
M2N	MMM+CN	++
M2N	MMM+S+CA	+++
M2N	MMM+CA	+
°M2N	MMM+S+CN	+
°M2N	MMM+CN	++
°M2N	MMM+S+CA	+++
°M2N	MMM+CA	++

*MMM: medio mínimo mineral, S: sacarosa, CA: colorante azul, CN: colorante negro, °: duplicados de los ensayos con colorantes a concentración de 100 mg l⁻¹.

Considerando los resultados de las cepas, se observó que la cepa que mostró mejores resultados en comparación de las demás cepas, fue la cepa M2N (Figura 2).

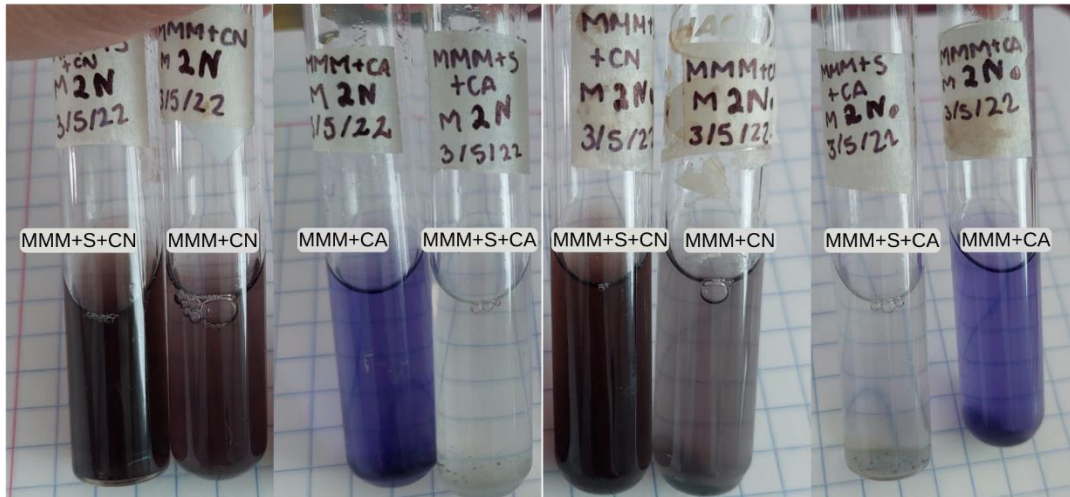


Figura 2. Biodegradación de colorantes a 150 mg l^{-1} mediante la cepa M2N.

Los resultados obtenidos de los ensayos propuestos para determinar la concentración de sacarosa a la cual se ve favorecida la biodegradación de colorantes de manera cualitativa (figura 3), indican que de las 4 concentraciones utilizadas (1 gl^{-1} ... 4 gl^{-1}) la concentración de 3 gl^{-1} de sacarosa muestra mejores resultados en comparación a las demás.

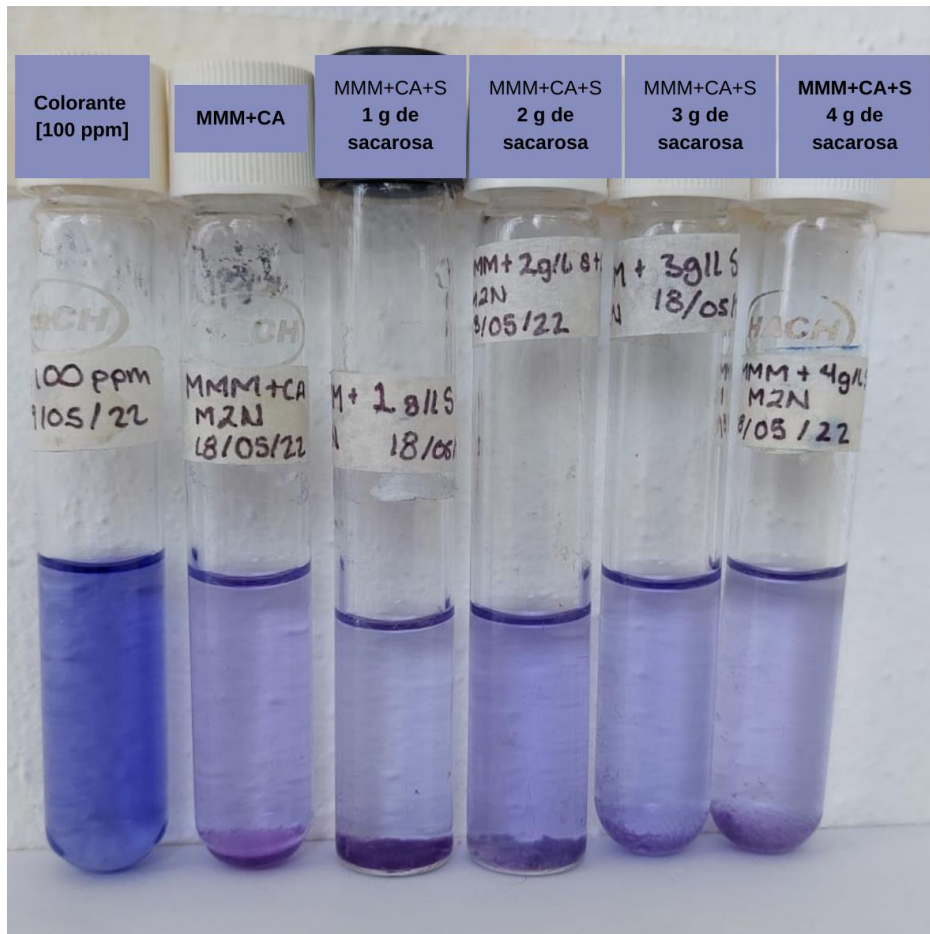


Figura 3. Determinación de la concentración óptima de sacarosa con la cepa M2N. Siendo MMM: medio mínimo mineral y CA: colorante azul marino 606 a [100 ppm].

De acuerdo con los ensayos montados con las cepas seleccionadas, la cepa M2N fue la que mostró mejores resultados de manera cualitativa. Por lo cual, dicha cepa se utilizó para los ensayos correspondientes junto con la concentración de 3 g l^{-1} de la fuente de carbono adicional (sacarosa).

Caracterización de las cepas microbianas

Las pruebas bioquímicas realizadas a la cepa M2N indicaron que la cepa corresponde a la bacteria *Escherichia coli*. Lo cual se muestra en la tabla 7, indicando las pruebas y su respectivo resultado.

Tabla 7. Resultados de las pruebas bioquímicas aplicadas a la cepa M2N

Prueba bioquímica	Resultado	
LIA	+	
M O	• Movilidad	+
	• Indol	-
	• Ornitina	+
Ureasa	+	
RM	+	
VP	-	
TSI	Ac/Ac con gas	
Citrato	-	
Gas	+	

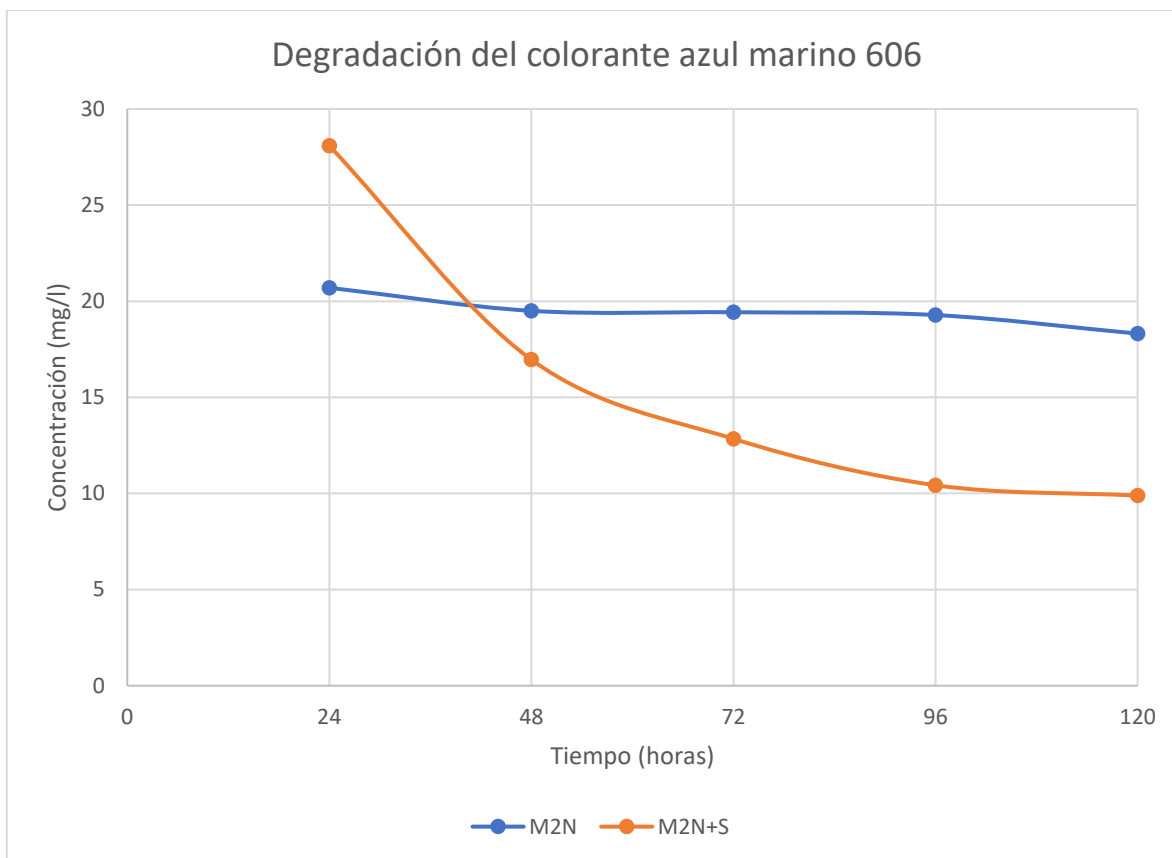
Degradación de los colorantes sintéticos textiles mediante la cepa M2N de *Escherichia coli*

Curva de calibración de los colorantes sintéticos textiles

Los resultados obtenidos de la lectura espectrofotométrica realizada a la curva de calibración de los colorantes indican que, el colorante azul marino 606 absorbe a 553 nm, el rojo escarlata 604 a 508 nm y el verde ultramar 667 a 384 nm.

Biodegradación de colorantes sintéticos

Los valores de degradación del colorante azul marino 606 se muestran en la tabla 8 y en la gráfica 1.



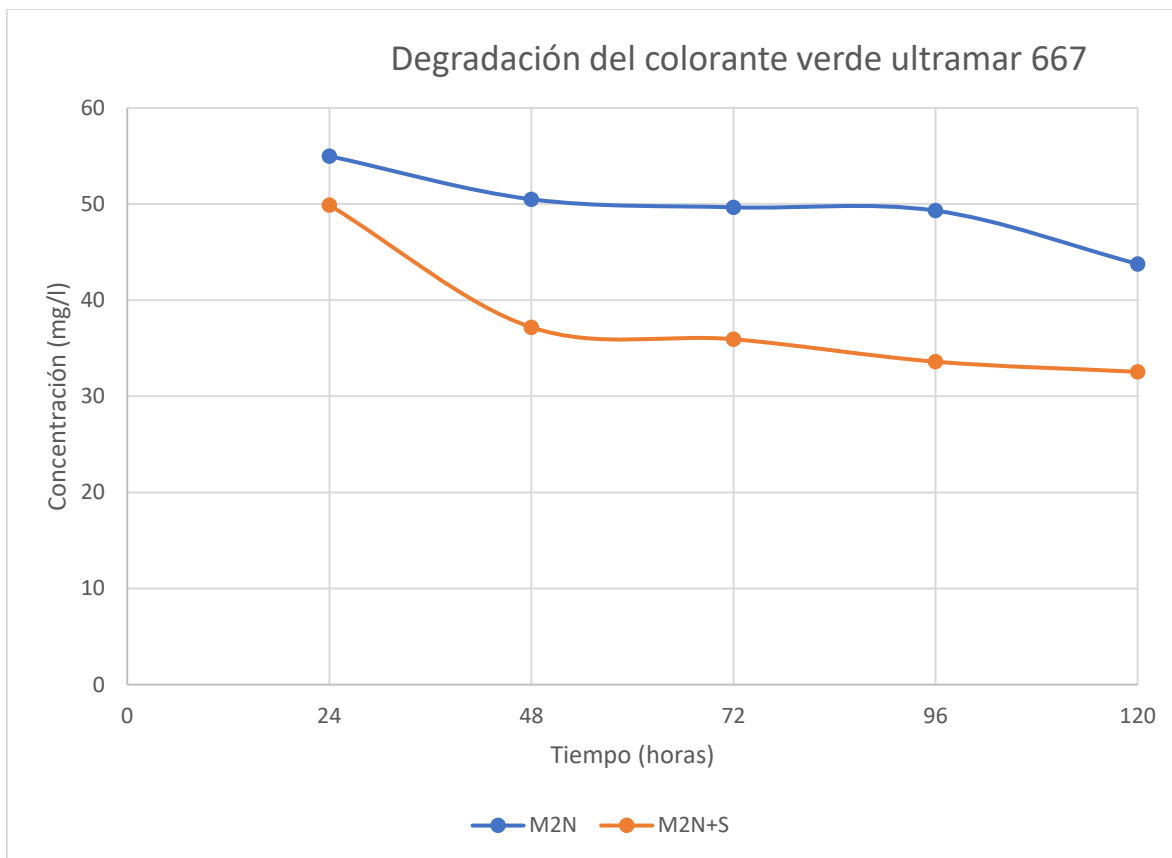
Grafica 1. Variación de la concentración del colorante azul marino 606 respecto al tiempo durante el tratamiento biológico con la cepa *Escherichia coli* M2N

Tabla 8. Porcentaje de degradación del colorante azul marino 606 mediante el tratamiento biológico con la cepa *Escherichia coli* M2N

Tiempo (horas)	M2N (%)	M2N+S (%)
24	79.29±0.70	71.91±0.49
48	80.50±0.56	83.03±0.82
72	80.57±0.73	87.15±0.51
96	80.71±0.93	89.57±0.41
120	81.68±0.91	90.11±0.11

El tratamiento del colorante azul marino 606 con la cepa *Escherichia coli* M2N sin sacarosa, después de 120 h de tratamiento obtuvo una concentración final de 18.31 mg/l¹ (gráfica 1), lo cual indica un 81.68% de degradación (tabla 8). Con respecto al

tratamiento con sacarosa, se tuvo una concentración final del colorante de 9.88 mg l⁻¹ (gráfica 1), siendo este valor equivalente al 90.11% de degradación al finalizar el tratamiento microbiológico (tabla 8).



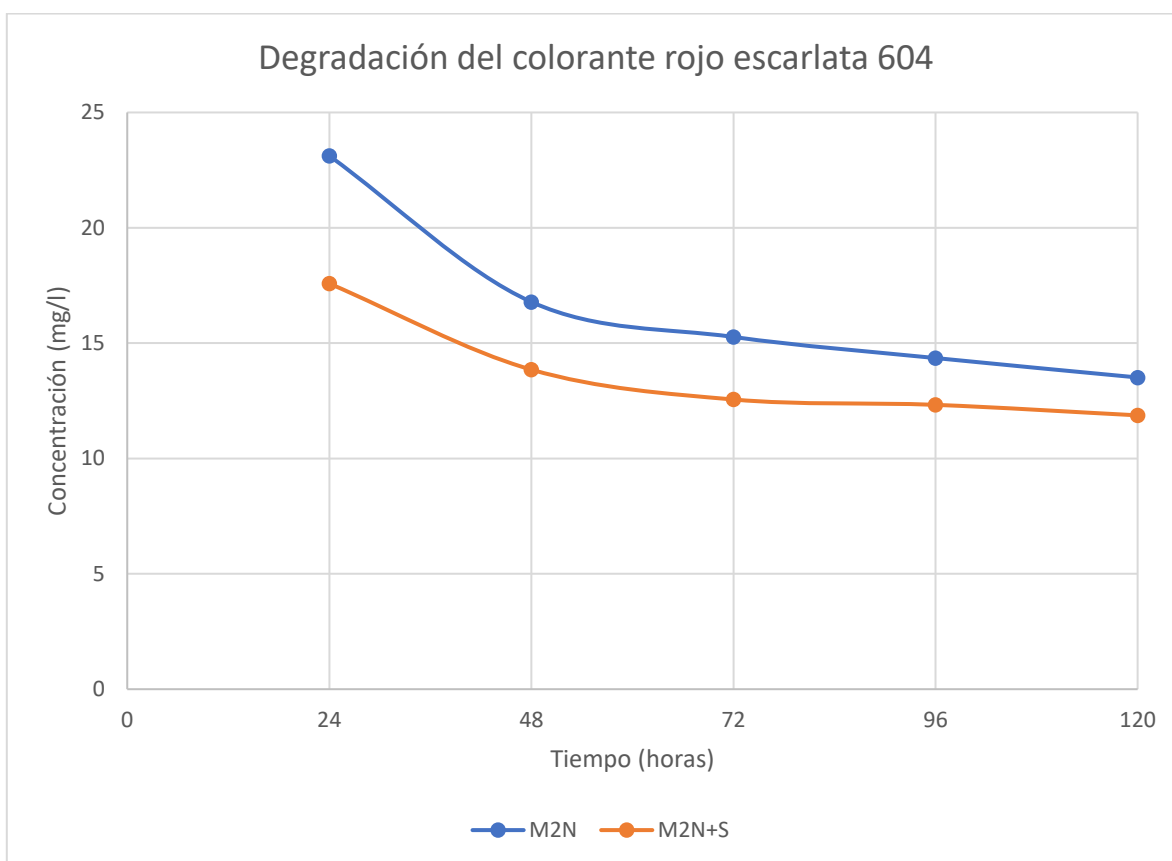
Grafica 2. Variación de la concentración del colorante verde ultramar 667 respecto al tiempo durante el tratamiento biológico con la cepa *Escherichia coli* M2N

La degradación del colorante verde ultramar 667 se muestra en la tabla 9 y en la gráfica 2. De acuerdo a los valores de la tabla 9, al finalizar el tratamiento biológico, la concentración final fue de 43.76 mg l⁻¹, lo cual indica un porcentaje de degradación del 56.23% (tabla 9). Sin embargo, cuando se adicionó sacarosa al tratamiento, la concentración fue de 32.54 mg l⁻¹ (gráfica 2), equivalente al 67.45% de degradación del colorante (tabla 9).

Tabla 9. Porcentaje de degradación del colorante verde ultramar 667 mediante el tratamiento biológico con la cepa *Escherichia coli* M2N

Tiempo (horas)	M2N (%)	M2N+S (%)
24	45.02±0.59	50.11±0.60
48	49.50±0.67	62.82±0.63
72	50.34±0.80	64.06±0.73
96	50.69±0.51	66.40±0.18
120	56.23±0.71	67.45±0.64

Los datos obtenidos de la decoloración del colorante rojo escarlata 604 se muestran en la gráfica 3 y en la tabla 10 mostradas a continuación.



Grafica 3. Variación de la concentración del colorante rojo escarlata 604 respecto al tiempo durante el tratamiento biológico con la cepa *Escherichia coli* M2N

Después del tratamiento de 120 h del colorante rojo escarlata 604 con la cepa de *E. coli* M2N sin sacarosa, se observó que la concentración final del colorante fue de 13.51 mg l⁻¹ (gráfica 3), o sea, se logró un porcentaje de degradación del 86.48% (tabla 10), por otra parte, el tratamiento complementado con sacarosa mostró una concentración final de 11.87 mg l⁻¹ (gráfica 3), siendo esta el 88.12% de degradación después de la aplicación del tratamiento biológico (tabla 10).

Tabla 10. Porcentaje de degradación del rojo escarlata 604 mediante el tratamiento biológico con la cepa *Escherichia coli* M2N

Tiempo (horas)	M2N (%)	M2N+S (%)
24	76.88±0.77	82.41±0.59
48	83.21±0.80	86.14±0.52
72	84.73±0.58	87.44±0.76
96	85.64±0.82	87.67±0.88
120	86.48±0.65	88.12±0.63

Parámetros cinéticos de la biodegradación de los colorantes sintéticos

En las tablas mostradas a continuación, se reportan los parámetros cinéticos correspondientes a la biodegradación de los colorantes azul marino 606 (tabla 11), verde ultramar 667 (tabla 12) y rojo escarlata 604 (tabla 13) mediante el tratamiento microbiológico con la cepa M2N con y sin sacarosa.

Tabla 11. Parámetros cinéticos de la biodegradación del colorante azul marino 606

Cepa	K ₀	R ²	K ₁	R ²	K ₂	R ²
M2N	-0.014243239	0.859453979	-0.000735525	0.999457997	3.80279E-05	0.99727028
M2N-S	-0.106976376	0.621936244	-0.006550922	0.980333359	0.000437168	0.905321978

Los valores obtenidos del factor de correlación (R²) de la biodegradación del colorante azul marino 606 (tabla 11), muestran que en ambos casos se sigue una cinética de biodegradación de primer orden. El R² del tratamiento con la cepa M2N

sin sacarosa fue de 0.999457997, por otro lado, el R^2 con la cepa M2N con sacarosa fue de 0.980333359, por lo tanto, la biodegradación del colorante es dependiente de la concentración del mismo.

Tabla 12. Parámetros cinéticos de la biodegradación del colorante verde ultramar 667

Cepa	K_0	R^2	K_1	R^2	K_2	R^2
M2N	-0.069470794	0.923557172	-0.001427394	0.998178581	2.94457E-05	0.983979689
M2N+S	-0.096022209	0.576283225	-0.00242272	0.99750448	6.21019E-05	0.982011187

El factor de correlación obtenido en la biodegradación del colorante verde ultramar 667 (tabla 12) indica que en los tratamientos con la cepa M2N con y sin sacarosa, el orden de biodegradación es de primer orden, por consiguiente, la biodegradación es dependiente de la concentración del colorante. El R^2 del tratamiento con la cepa M2N sin sacarosa fue de 0.998178581, por otro lado, el R^2 del tratamiento con sacarosa fue de 0.99750448.

Tabla 13. Parámetros cinéticos de la biodegradación del colorante rojo escarlata 604

Cepa	K_0	R^2	K_1	R^2	K_2	R^2
M2N	-0.054706918	0.620635523	-0.003154668	0.995323247	0.00018632	0.97591362
M2N+S	-0.032402555	0.592850477	-0.002277908	0.997853182	0.00016222	0.98954806

Al igual que en el caso de los colorantes anteriores, el orden de biodegradación del colorante rojo escarlata 604 es de primer orden, lo cual se ve reflejado en el factor de correlación R^2 obtenido, siendo este de 0.995323247 para el tratamiento con la cepa M2N sin sacarosa y de 0.997853182 para el tratamiento con sacarosa. Por lo tanto, la degradación es dependiente de la concentración del colorante.

Análisis de los parámetros indicadores de fitotoxicidad

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la prueba de fitotoxicidad realizada tomando como referencia los parámetros de: porcentaje de la germinación relativa de las semillas (GRS), crecimiento relativo de la radícula (CRR) y el índice de germinación (IG). En la tabla 14 se reportan las respuestas biológicas de las plántulas humedecidas con el colorante sin tratamiento y con el colorante tratado.

Tabla 14. Respuesta Biológica de las plántulas de *Medicago sativa* humedecidas con los colorantes sin tratamiento y los residuos de los colorantes tratados con la cepa M2N con y sin sacarosa.

R	Colorantes sin tratamiento			Residuos del tratamiento biológico sin sacarosa			Residuos del tratamiento biológico con sacarosa		
	Azul marino 606	Rojo escarlata 604	Verde ultramar 667	Azul marino 606	Rojo escarlata 604	Verde ultramar 667	Azul marino 606	Rojo escarlata 604	Verde ultramar 667
GRS (%)	50±0.3	50±0.4	45±0.3	76±0.4	70±0.3	70±0.4	90±0.3	90±0.4	80±0.3
CRR (%)	22.4±0.4	21.5±0.3	19.7±0.2	75.1±0.6	74.5±0.6	69.3±0.3	87.1±0.9	81.4±0.7	75.3±0.4
IG (%)	11.2±0.6	10.8±0.4	8.87±0.3	58.8±0.7	52.2±0.4	48.98±0.4	78.7±0.5	73.2±0.6	60.25±0.5

Siendo R: respuesta biológica, GRS: germinación relativa de las semillas, CRR: crecimiento relativo de la radícula e IG: índice de germinación

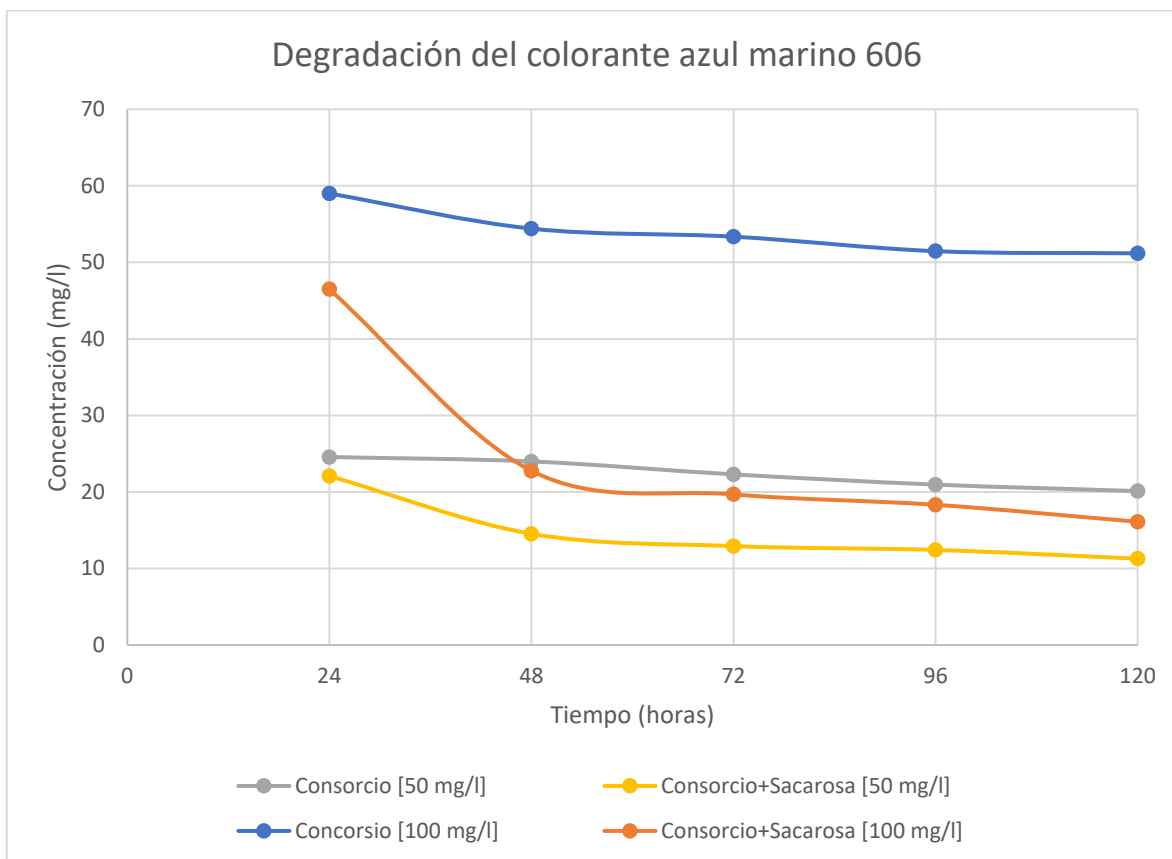
Biodegradación de los colorantes sintéticos mediante el consorcio bacteriano

Eficacia de la biodegradación de colorantes

Los resultados obtenidos del ensayo realizado con los colorantes a 50 y 100 mg^l⁻¹ se reportan a continuación en las gráficas 4-7 y en las tablas 15-17.

En la gráfica 4 y en la tabla 15 se indican los resultados correspondientes a la degradación del colorante azul marino 606 a 50 y 100 mg^l⁻¹. Posterior a la aplicación del tratamiento biológico al colorante azul marino 606 a 50 mg^l⁻¹ se observó que, el

tratamiento con el consorcio sin sacarosa tuvo una concentración final de 20.11 mg/l^{-1} (gráfica 4) , lo cual es equivalente a un 79.88% de degradación (tabla 15), pero al aplicar el tratamiento con el consorcio adicionado con sacarosa se alcanzó una concentración de 11.28 mg/l^{-1} (gráfica 4), siendo esto el 88.71% de biodegradación después de 120 h de tratamiento (tabla 15).



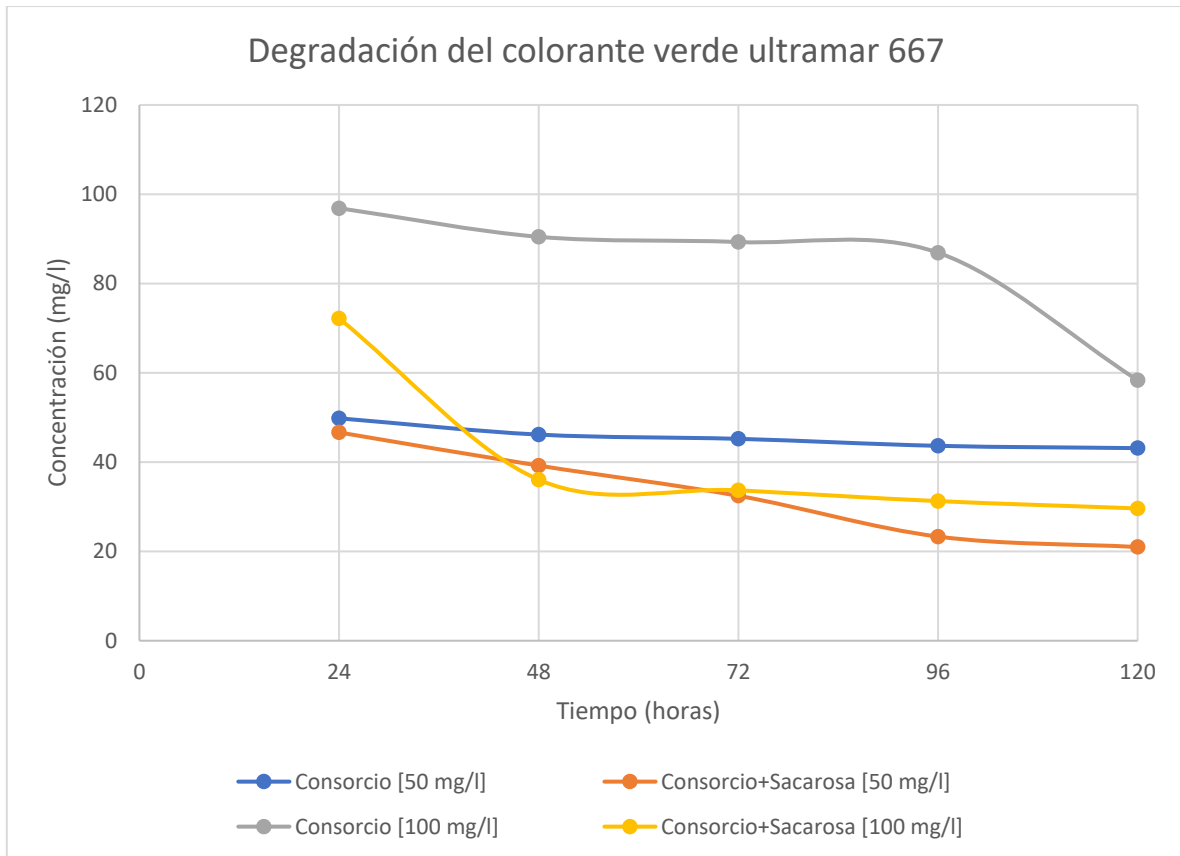
Gráfica 4. Variación de la concentración del colorante azul marino 606 a 50 mg/l^{-1} y 100 mg/l^{-1} respecto al tiempo durante el tratamiento biológico con el consorcio.

En el caso del tratamiento biológico del colorante azul marino 606 a 100 mg/l^{-1} , la concentración final obtenida con el consorcio sin sacarosa fue de 51.17 mg/l^{-1} (gráfica 4), lo que significa que el colorante se logró degradar un 48.82% después de 120 h (tabla 15), en cambio, la concentración del colorante al finalizar el tratamiento con el consorcio con sacarosa fue de 16.10 mg/l^{-1} (gráfica 4), por lo cual, la degradación fue de un 83.89% (tabla 15).

Tabla 15. Porcentaje de degradación del colorante azul marino 606 a 50 mg^l⁻¹ y 100 mg^l⁻¹ mediante el tratamiento biológico con el consorcio.

Tiempo (horas)	Azul marino 606 [50 mg ^l ⁻¹]		Azul marino 606 [100 mg ^l ⁻¹]	
	Consortio (%)	Consortio+Sacarosa (%)	Consortio (%)	Consortio+Sacarosa (%)
24	75.43±0.17	77.92±1.18	41±2.11	53.50±0.59
48	76.01±0.56	85.46±0.31	45.59±0.58	77.23±0.88
72	77.70±1.45	87.07±0.46	46.64±1.02	80.31±0.04
96	79.03±0.08	87.57±0.10	48.54±0.99	81.67±0.01
120	79.88±0.03	88.71±0.55	48.82±1.02	83.89±0.12

Los resultados obtenidos respecto a la biodegradación del colorante verde ultramar 667 a 50 y 100 mg^l⁻¹ se muestran en la gráfica 5 y tabla 16. Como se observa en la gráfica 5, la concentración del colorante verde ultramar 667 a 50 mg^l⁻¹ después de 120 h de tratamiento con el consorcio se redujo a 43.13 mg^l⁻¹, lo cual indica que el porcentaje de degradación fue del 56.86% (tabla 16), con respecto a la concentración final del colorante posterior al tratamiento con el consorcio con sacarosa fue de 20.98 mg^l⁻¹ (gráfica 5), por lo tanto, el porcentaje de degradación alcanzado fue del 79.01% (tabla 16).



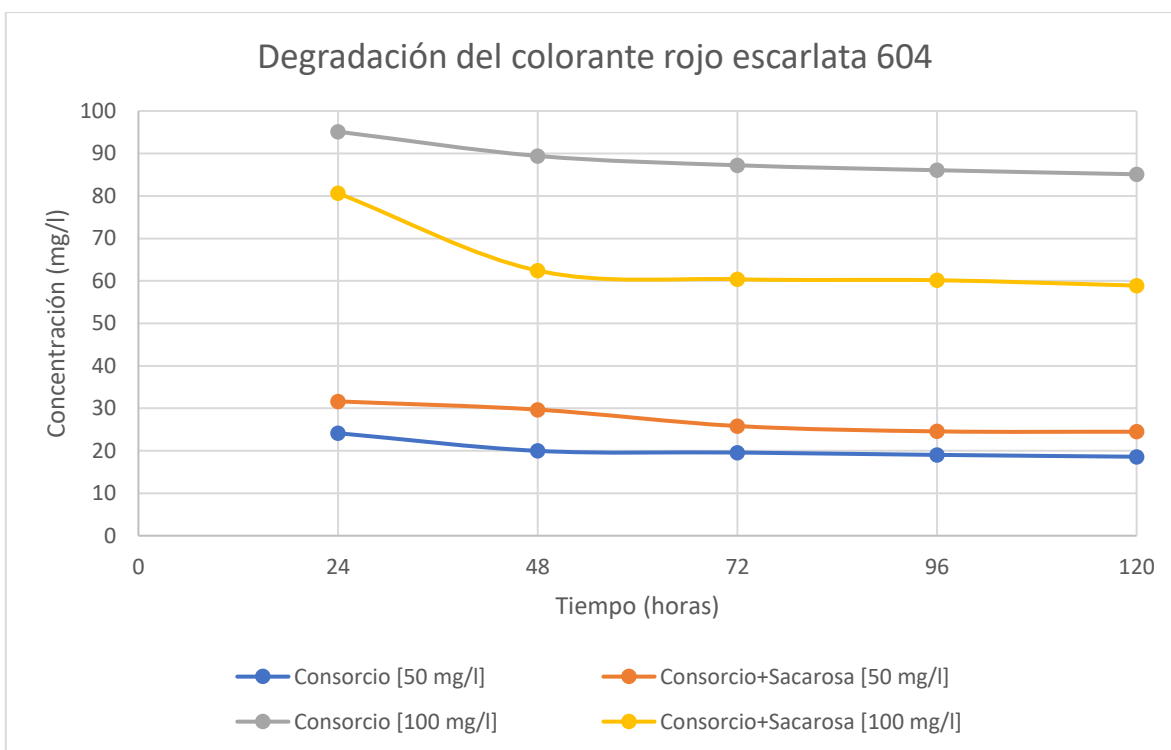
Gráfica 5. Variación de la concentración del colorante verde ultramar 667 a 50 mg/l¹ y 100 mg/l¹ respecto al tiempo durante el tratamiento biológico con el consorcio.

Al concluir el tratamiento del colorante verde ultramar 667 a 100 mg/l¹ con el consorcio sin sacarosa se obtuvo una concentración de 58.36 mg/l¹ (gráfica 5), lo que sugiere que el porcentaje de biodegradación fue del 41.63% (tabla 16), en cambio, cuando el tratamiento con el consorcio fue adicionado con sacarosa, la concentración final fue de 29.63 mg/l¹ (gráfica 5), o sea, el colorante se degradó un 70.36% (tabla 16).

Tabla 16. Porcentaje de degradación del colorante verde ultramar 667 a 50 mg/l⁻¹ y 100 mg/l⁻¹ mediante el tratamiento biológico con el consorcio.

Tiempo (horas)	Verde ultramar 667 [50 mg/l ⁻¹]		Verde ultramar 667 [100 mg/l ⁻¹]	
	Consortio (%)	Consortio+Sacarosa (%)	Consortio (%)	Consortio+Sacarosa (%)
24	50.18±0.03	53.34±1.79	3.12±3.39	27.81±4.61
48	53.83±2.79	60.77±1.69	9.52±4.37	63.93±0.43
72	54.78±1.85	67.54±2.04	10.69±4.45	66.30±0.75
96	56.34±1.70	76.67±0.69	13.08±3.50	68.72±0.17
120	56.86±1.65	79.01±0.78	41.63±2.04	70.36±1.38

Los datos correspondientes a la biodegradación del colorante rojo escarlata 604 a 50 y 100 mg/l⁻¹ después de aplicar el tratamiento biológico se muestran en la gráfica 6 y tabla 17.



Gráfica 6. Variación de la concentración del colorante rojo escarlata 604 a 50 mg/l⁻¹ y 100 mg/l⁻¹ respecto al tiempo durante el tratamiento biológico con el consorcio.

Como se observa en la gráfica 6, después de tratar el colorante rojo escarlata 604 en una concentración inicial 50 mg l^{-1} con el consorcio bacteriano, la concentración final obtenida fue de 18.60 mg l^{-1} , siendo esto el 81.39% de degradación (tabla 17). En cuanto a la concentración final del colorante tratado mediante el consorcio con sacarosa fue de 24.49 mg l^{-1} , lo cual indica que el porcentaje de degradación fue del 75.43% (tabla 17).

Tabla 17. Porcentaje de degradación del rojo escarlata 604 a 50 mg l^{-1} y 100 mg l^{-1} mediante el tratamiento biológico con el consorcio

Tiempo (horas)	Rojo escarlata 604 [50 mg l^{-1}]		Rojo escarlata 604 [100 mg l^{-1}]	
	Consorcio (%)	Consorcio+Sacarosa (%)	Consorcio (%)	Consorcio+Sacarosa (%)
24	75.85 ± 0.66	68.37 ± 0.10	4.87 ± 0.79	19.37 ± 2.16
48	80.01 ± 0.80	70.31 ± 0.18	10.57 ± 1.98	37.58 ± 1.01
72	80.40 ± 0.88	74.17 ± 0.96	12.76 ± 0.56	39.60 ± 0.77
96	80.96 ± 0.57	75.43 ± 0.51	13.93 ± 1.50	39.83 ± 0.89
120	81.39 ± 1.11	75.50 ± 0.41	14.88 ± 1.48	41.09 ± 1.44

La concentración final del colorante rojo escarlata 604 a 100 mg l^{-1} posterior al tratamiento con el consorcio sin sacarosa fue de 85.11 mg l^{-1} (gráfica 6), por lo tanto, solo se logró biodegradar el 14.88% del colorante a las 120 h (tabla 17), en cambio, utilizando el consorcio con sacarosa la concentración final obtenida fue de 58.90 mg l^{-1} , equivalente al 41.09% de degradación.

Parámetros cinéticos de la biodegradación de los colorantes sintéticos textiles

En las tablas mostradas a continuación se reportan los valores correspondientes a los parámetros cinéticos obtenidos de los colorantes utilizados: azul marino 606 (tabla 18), verde ultramar 667 (tabla 19) y rojo escarlata 604 (tabla 20).

Tabla 18. Parámetros cinéticos de la biodegradación del colorante azul marino 606 a 50 mg^l⁻¹ y 100 mg^l⁻¹.

[C]	Tx	K ₀	R ²	K ₁	R ²	K ₂	R ²
50 mg ^l ⁻¹	C	-0.0497275	0.980555328	-0.0022291	0.99937224	0.00010021	0.99507313
	C+S	-0.0987091	0.754128331	-0.006245	0.99359113	0.00040963	0.95942585
100 mg ^l ⁻¹	C	-0.0857291	0.832070557	-0.0015562	0.99951317	0.00002831	0.99496575
	C+S	-0.09870916	0.754128331	-0.006245	0.99359113	0.00040963	0.95942585

Siendo [C]: concentración, Tx: tratamiento aplicado, C: Consorcio sin sacarosa y C+S: consorcio con sacarosa.

De acuerdo a los valores obtenidos en factor de correlación (R²), se observa que la cinética de biodegradación del colorante azul marino 606 a 50 y 100 mg^l⁻¹ es de primer orden. El valor del R² de la degradación del colorante a 50 mg^l⁻¹ tratado con el consorcio es de 0.99937224 y con el consorcio adicionado con sacarosa es de 0.99359113 (tabla 18). Por otra parte, el valor del R² de la degradación del colorante a 100 mg^l⁻¹ tratado con el consorcio sin sacarosa fue de 0.99951317 y mediante el consorcio con sacarosa fue de 0.99359113 (tabla 18).

Tabla 19. Parámetros cinéticos de la biodegradación del colorante verde ultramar 667 a 50 mg^l⁻¹ y 100 mg^l⁻¹.

[C]	Tx	K ₀	R ²	K ₁	R ²	K ₂	R ²
50 mg ^l ⁻¹	C	-0.06460000	0.90471457	-0.00140211	0.999553921	0.000030479	0.88883194
	C+S	-0.28110000	0.97785075	-0.00882220	0.989310283	0.000290850	0.78521355
100 mg ^l ⁻¹	C	-0.11548375	0.93066694	-0.00192075	0.99911359	0.00003207	0.98915722
	C+S	-0.49878708	0.70514724	-0.01396343	0.97297683	0.00046252	0.81938711

Siendo [C]: concentración, Tx: tratamiento aplicado, C: Consorcio sin sacarosa y C+S: consorcio con sacarosa.

Considerando los valores del factor de correlación R² reportados en la tabla 19 correspondientes al colorante verde ultramar 667 se observa que, en ambas concentraciones tratadas aplicando el consorcio con y sin sacarosa, la cinética de biodegradación se acopla a un modelo de primer orden. El R² del tratamiento con el

consorcio del colorante a 50 mg^l⁻¹ fue de 0.999553921 (tabla 19) y del tratamiento suplementado con sacarosa fue de 0.989310283 (tabla 19). Para el caso del colorante a 100 mg^l⁻¹, el R² del tratamiento sin sacarosa fue de 0.99911359 (tabla 19) y de 0.97297683 para el tratamiento con sacarosa (tabla 19).

Tabla 20. Parámetros cinéticos de la biodegradación del colorante rojo escarlata 604 a 50 mg^l⁻¹ y 100 mg^l⁻¹.

[C]	Tx	K ₀	R ²	K ₁	R ²	K ₂	R ²
50 mg ^l ⁻¹	C	-0.0501054	0.72866065	-0.00237432	0.99924799	0.00011316	0.99436848
	C+S	-0.0808125	0.89673635	-0.00292006	0.999317264	0.00010604	0.99260227
100 mg ^l ⁻¹	C	-0.09750375	0.858388024	-0.00108712	0.99977744	0.000012133	0.97467341
	C+S	-0.19047291	0.630424816	-0.00277015	0.99956021	0.000040631	0.99324838

Siendo [C]: concentración, Tx: tratamiento aplicado, C: Consorcio sin sacarosa y C+S: consorcio con sacarosa.

El factor de correlación correspondiente a la biodegradación del colorante rojo escarlata 604 a 50 mg^l⁻¹ mediante el consorcio sin sacarosa fue de 0.99924799 (tabla 20) y de 0.999317264 (tabla 20) para el tratamiento con sacarosa. Por lo que refiere a la biodegradación del colorante a 100 mg^l⁻¹ utilizando el consorcio sin sacarosa tuvo un R² de 0.99977744 (tabla 20) y con el consorcio adicionado con sacarosa fue de 0.99956021 (tabla 20).

Tomando en cuenta lo mencionado con anterioridad y como se observa en las tablas 18 a 20, el modelo cinético al cual se adeco mejor la biodegradación de los tres colorantes es al de primer orden, por lo tanto, la degradación de los colorantes es directamente proporcional a la concentración inicial de los mismos.

Análisis de los parámetros indicadores de fitotoxicidad de los productos de biodegradación del tratamiento con el consorcio bacteriano con y sin sacarosa
 En las tablas 21 a 23 se muestran los valores obtenidos en las respuestas biológicas de las plántulas de *Medicago sativa*, previamente señaladas, siendo estas: porcentaje de la germinación relativa de las semillas (GRS), crecimiento relativo de la radícula (CRR) y el índice de germinación (IG).

La tabla 21 corresponde a los valores obtenidos de la respuesta biológica de las plántulas de *Medicago sativa* expuestas a los colorantes azul marino 606, rojo escarlata 604 y verde ultramar 667, sin tratamiento previo.

Tabla 21. Respuesta Biológica de las plántulas de *Medicago sativa* humedecidas con los colorantes sin tratamiento

Respuesta	Azul marino 606	Rojo escarlata 604	Verde ultramar 667
GRS (%)	66.67±0.4	55.56±0.2	66.67±0.6
CRR (%)	63.77±0.6	67.04±0.4	67.43±0.3
IG (%)	42.52±0.7	37.25±0.3	44.95±0.4

Siendo GRS: germinación relativa de las semillas, CRR: crecimiento relativo de la radícula e IG: índice de germinación.

En la tabla 22 se reportan los valores de las respuestas biológicas de las plántulas de *Medicago sativa* expuestas a los residuos del tratamiento de los colorantes a 50 mg^l⁻¹ mediante el tratamiento utilizando el consorcio con y sin sacarosa.

Tabla 22. Respuesta Biológica de las plántulas de *Medicago sativa* humedecidas con los residuos de los colorantes a [50 mg^l⁻¹] tratados aplicando el consorcio con y sin sacarosa

Respuesta	Residuos del tratamiento biológico sin sacarosa			Residuos del tratamiento biológico con sacarosa		
	Azul marino 606	Rojo escarlata 604	Verde ultramar 667	Azul marino 606	Rojo escarlata 604	Verde ultramar 667
GRS (%)	77.78±.3	88.89±.5	77.78±.2	88.89±.3	77.78±.4	88.89±.2
CRR (%)	67.32±.2	82.83±.6	72.77±.5	67.52±.6	78.94±.2	68.07±.5
IG (%)	52.36±.4	73.63±.3	56.60±.4	60.02±.3	61.40±.5	60.51±.4

Siendo GRS: germinación relativa de las semillas, CRR: crecimiento relativo de la radícula e IG: índice de germinación.

La respuesta biológica de las plántulas de *Medicago sativa* expuestas a los residuos del tratamiento usando el consorcio con y sin sacarosa de los colorantes a 100 mg l⁻¹ se reportan en la tabla 23.

Tabla 23. Respuesta Biológica de las plántulas de *Medicago sativa* humedecidas con los residuos de los colorantes a [100 mg l⁻¹] tratados mediante el consorcio con y sin sacarosa.

Respuesta	Residuos del tratamiento biológico sin sacarosa			Residuos del tratamiento biológico con sacarosa		
	Azul marino 606	Rojo escarlata 604	Verde ultramar 667	Azul marino 606	Rojo escarlata 604	Verde ultramar 667
GRS (%)	88.89±.5	88.89±.4	88.89±.2	88.89±.5	88.89±.5	77.78±.8
CRR (%)	67.27±.3	68.71±.2	83.45±.4	82.37±.2	86.35±.6	79.07±.3
IG (%)	59.80±.6	61.96±.5	74.17±.2	73.21±.3	76.76±.2	61.50±.6

Siendo GRS: germinación relativa de las semillas, CRR: crecimiento relativo de la radícula e IG: índice de germinación.

Tratamiento microbiológico de aguas residuales reales

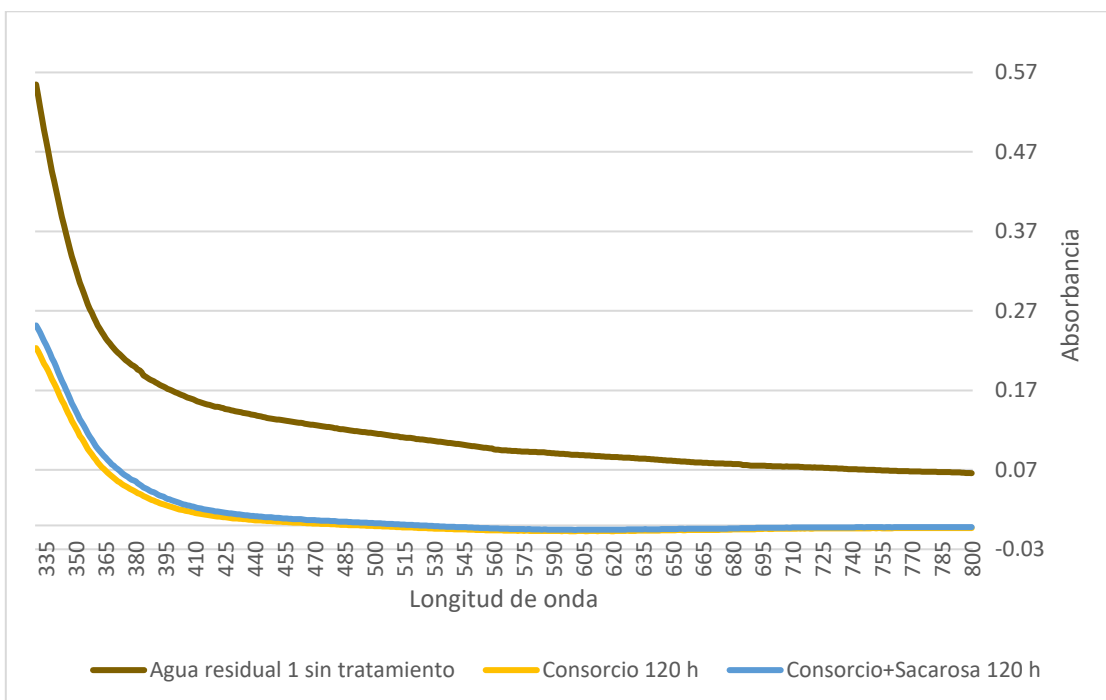
En la tabla 24 se muestra la longitud de onda a la cual absorbe cada una de las aguas residuales, así como la absorbancia inicial de acuerdo al barrido espectral realizado, misma que se empleó para determinar la biodegradación del colorante después de la aplicación del tratamiento biológico.

Tabla 24. Resultados del barrido espectral de las aguas residuales 1, 2 y 3

Agua residual	Longitud de onda	Absorbancia inicial
Agua residual 1 (coloración aparente café)	380 nm	0.19883
Agua residual 2 (coloración aparente azul)	670 nm	0.404415
Agua residual 3 (coloración aparente morada)	570 nm	0.396515

Biodegradación de los colorantes presentes en las aguas residuales textiles

Como se indica en la tabla 24, el agua residual 1 de coloración aparente café absorbe a una longitud de onda de 380 nm, teniendo una absorbancia de 0.19883. Tomando en cuenta esto, en la tabla 25 se reporta la degradación del agua residual 1 y a su vez, en la gráfica 7 se muestran los espectros de absorción UV-vis correspondientes al agua residual sin tratamiento y al agua residual después de 120 h de tratamiento biológico.



Gráfica 7. Espectros de absorción UV-vis respecto al tiempo del agua residual 1: coloración café

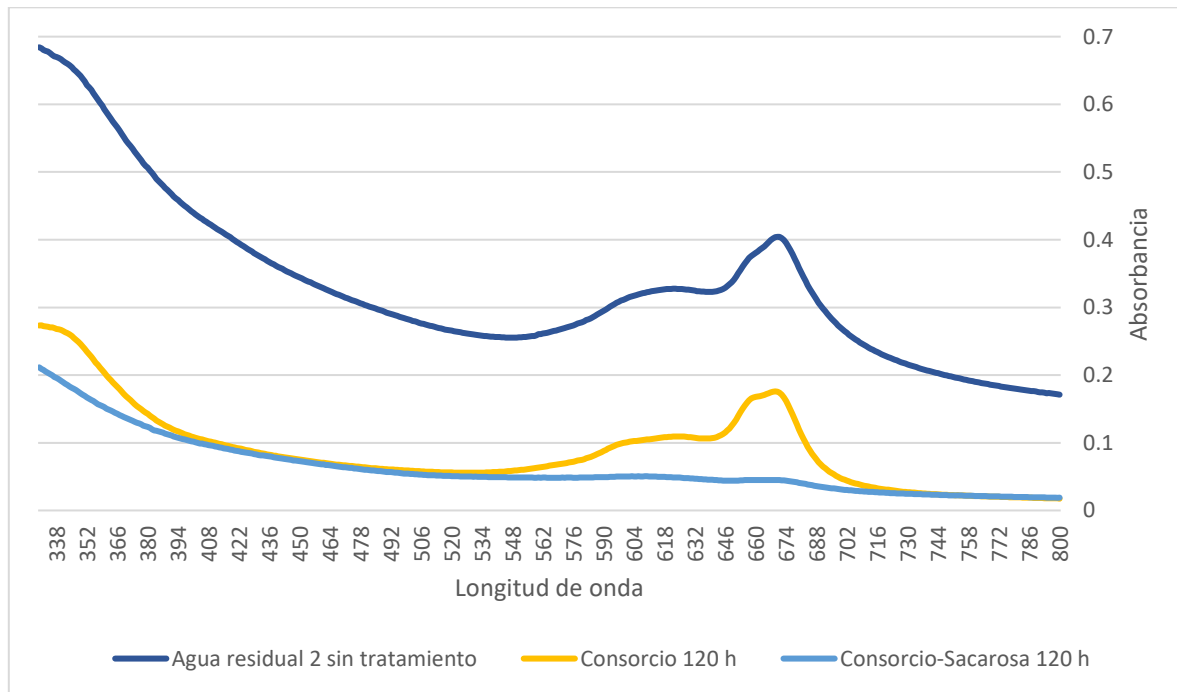
La degradación del agua residual tratada con el consorcio sin sacarosa, alcanzó un porcentaje de degradación del 78.83% después de 120 h de tratamiento (tabla 25), por otra parte, el tratamiento con el consorcio adicionado con sacarosa tuvo un porcentaje menor, siendo este del 72.17% (tabla 25).

Tabla 25. Porcentaje de degradación del agua residual 1: coloración café, después de 120 h de tratamiento biológico

Tiempo (horas)	% de degradación	
	C	C+S
24	73.50±0.51	63.51±0.65
48	73.75±0.42	63.51±0.45
72	73.75±0.32	70.59±0.63
96	74.70±0.75	71.74±1.03
120	78.83±0.68	72.17±1.03

*Siendo C: consorcio sin sacarosa y C+S: consorcio con sacarosa

En la gráfica 8 se muestran los espectros de absorción correspondientes al agua residual 2: coloración aparente azul. En ella se incluyen los espectros de absorción UV-vis del agua sin tratamiento y del agua tratada con el consorcio con y sin sacarosa. Como se observa en la tabla 24, el pico de absorción más alto del agua residual 2 fue a los 670 nm, teniendo una absorbancia de 0.404415nm.



Gráfica 8. Espectros de absorción UV-vis respecto al tiempo del agua residual 2: coloración azul

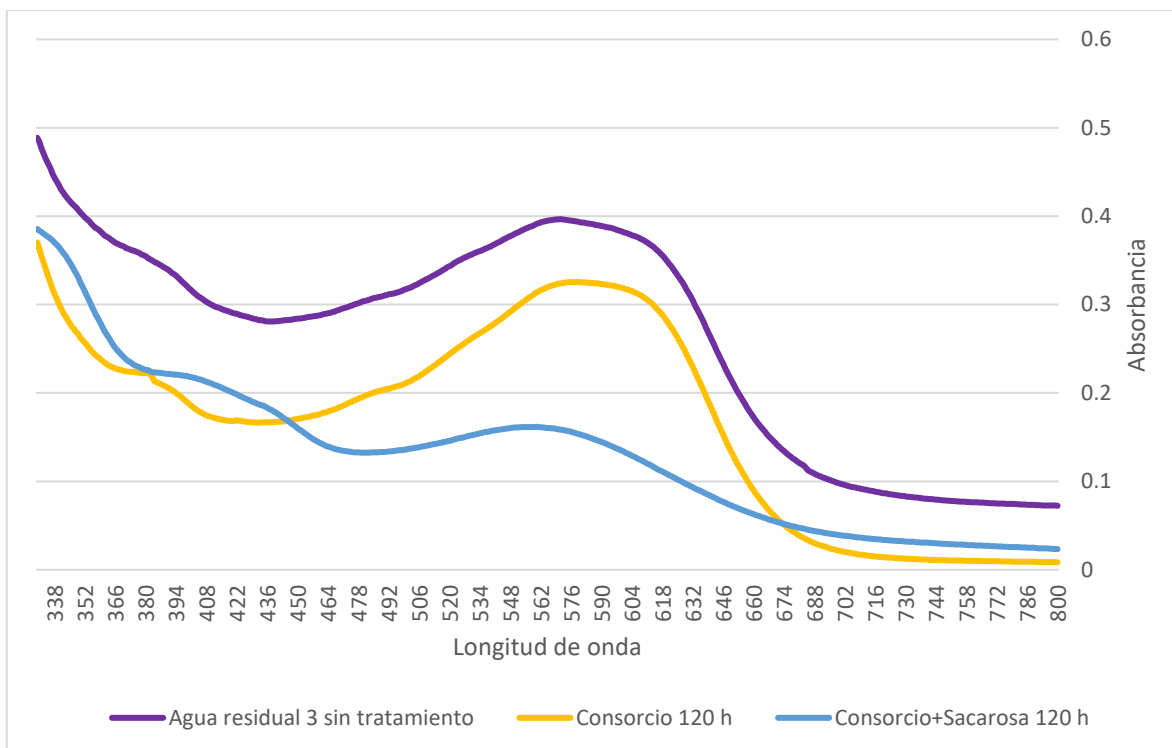
Considerando los valores mostrados en la tabla 26, los porcentajes de degradación fueron aumentando conforme transcurría el tiempo del tratamiento biológico con el consorcio con y sin sacarosa. En el caso del tratamiento del agua residual 2 con el consorcio sin sacarosa, al finalizar el tratamiento el porcentaje de degradación fue de 56.63% (tabla 26), sin embargo, cuando se utilizó el consorcio con sacarosa el porcentaje de degradación después de 120 h de tratamiento fue de 88.83% (tabla 26), siendo notablemente mayor que sin sacarosa.

Tabla 26. Degradación del agua residual 2: coloración azul, después de 120 h de tratamiento biológico

Tiempo (horas)	% de degradación	
	Consortio	Consortio-Sacarosa
24	36.98±0.60	81.65±0.66
48	38.91±0.58	83.84±0.75
72	44.71±0.46	87.24±0.45
96	48.57±0.78	88.53±0.33
120	56.63±1.15	88.83±0.32

*Siendo C: consorcio sin sacarosa y C+S: consorcio con sacarosa

La gráfica 9 muestra los espectros de absorción UV-vis del agua residual 3: coloración aparente morada. En ella se incluye el espectro de absorción del agua residual 3 sin tratamiento, la cual tuvo un mayor pico de absorbancia a los 570 nm, teniendo así, una absorbancia de 0.396515 (tabla 24). De igual manera, se incluyen los espectros de absorción del agua tratada con el consorcio con y sin sacarosa.



Gráfica 9. Espectros de absorción UV-vis respecto al tiempo del agua residual 3: coloración morada

Tabla 27. Degradación del agua residual 3: coloración morada, después de 120 h de tratamiento biológico.

Tiempo (horas)	% de degradación	
	Consorcio	Consorcio-Sacarosa
24	7.90±0.47	0.69±0.67
48	9.83±0.32	11.40±0.69
72	10.48±0.66	12.82±0.79
96	14.72±0.36	13.36±0.80
120	18.43±0.58	59.93±0.33

La tabla 27 muestra la degradación del agua residual 3 (coloración morada) y como se observa en ella, al finalizar el tratamiento aplicando el consorcio sin sacarosa el porcentaje de biodegradación fue de 18.43% y, al adicionar el consorcio con sacarosa, el porcentaje fue mayor, siendo este del 59.93%.

Orden de reacción de la biodegradación de aguas residuales textiles

En las tablas 28 a 30 se reportan los parámetros cinéticos de la biodegradación de las aguas residuales 1 (coloración café), 2 (coloración azul) y 3 (coloración morada).

Tabla 28. Parámetros cinéticos de la biodegradación del agua residual 1: coloración café.

Tx	K ₀	R ²	K ₁	R ²	K ₂	R ²
C	8.2083E-05	0.48794161	0.00175318	0.15488245	-0.03758244	0.1551855
C+S	0.00021172	0.837614	0.00332412	0.70457408	-0.05250103	0.71333062

Siendo Tx: tratamiento aplicado, C: consorcio y C+S: consorcio con sacarosa.

De acuerdo a los valores del factor de correlación (R²) mostrados en la tabla 28, se denota que el valor más alto en el caso del tratamiento del agua residual 1 con el consorcio sin sacarosa fue de 0.48794161 (tabla 28), por lo cual, el modelo al cual se adapta mejor la biodegradación del agua residual es a uno de orden cero. De manera similar sucede en la biodegradación del agua residual tratada con el consorcio adicionado con sacarosa, donde el R² más alto corresponde a un modelo de orden cero, teniendo un valor de 0.837614 (tabla 28). Considerando el resultado de ambos tratamientos, el orden de reacción al cual se acopla la biodegradación del agua es de orden cero, lo cual sugiere que, la biodegradación es dependiente del tiempo que dure el tratamiento del agua residual.

Tabla 29. Parámetros cinéticos de la biodegradación del agua residual 2: coloración azul.

Tx	K ₀	R ²	K ₁	R ²	K ₂	R ²
C	-0.00082517	0.96133428	-0.00383223	0.99684917	0.01798821	0.96959635
C+S	-0.0003211	0.91810298	-0.00556979	0.99689378	0.09839549	0.98559785

Siendo Tx: tratamiento aplicado, C: consorcio y C+S: consorcio con sacarosa.

La tabla 29 muestra los parámetros cinéticos de la biodegradación del agua residual 2: coloración azul, con el tratamiento biológico durante 120 h. De acuerdo a los valores del factor de correlación, se observa que en el caso de la biodegradación del agua residual 2 con el consorcio sin sacarosa, el factor de correlación más alto

es de 0.99684917 (tabla 29), correspondiente a un orden de reacción de orden 1. Algo similar sucede con el tratamiento con sacarosa, en donde el factor de correlación más alto es de 0.99689378 (tabla 29), siguiendo también una biodegradación de primer orden. Teniendo en cuenta esto, en ambos casos la biodegradación se adapta mejor a un modelo de primer orden, por lo tanto, la biodegradación del agua residual es dependiente de la concentración del colorante presente en el agua residual. Lo cual se basa en la suposición que el colorante es uno de los contaminantes que se encuentra en mayor concentración.

Tabla 30. Parámetros cinéticos de la biodegradación del agua residual 3: coloración morada.

Tx	K₀	R²	K₁	R²	K₂	R²
C	-0.00042895	0.93273218	-0.0012448	0.99974602	0.00361626	0.97899522
C+S	-0.00198978	0.67911202	-0.00765659	0.99452246	0.03155513	0.49545221

Siendo Tx: tratamiento aplicado, C: consorcio y C+S: consorcio con sacarosa.

Los valores del factor de correlación más altos correspondientes a la biodegradación del agua residual 3: coloración morada (tabla 30) son los que corresponden a un modelo de primer orden, siendo que, para el caso del tratamiento con el consorcio el R² fue de 0.99974602 y de 0.99452246 para el caso del tratamiento con el consorcio con sacarosa. Siendo así, en ambos casos se sigue un orden de reacción de orden 1, lo que indica que al igual que en el agua residual número 2, la biodegradación de la misma es dependiente de la concentración del colorante presente en el efluente, suponiendo que este contaminante es el que se encuentra en mayor concentración.

Aplicación del tratamiento combinado a las aguas residuales textiles

Eficacia de degradación de colorantes en las aguas residuales reales con el proceso combinado fotocátalisis- microbiológico

En la tabla 31 se muestran los resultados correspondientes al área bajo la curva de las muestras de aguas residuales sin tratamiento: M1: agua residual azul, M2: agua residual roja y M3: agua residual café de acuerdo al barrido espectral realizado a

cada muestra. Dicha área bajo la curva es el valor de referencia utilizado para conocer la biodegradación del agua residual alcanzado con el tratamiento combinado.

Tabla 31. Área bajo la curva de las muestras de aguas residuales M1, M2 y M3 sin tratamiento.

Muestra	Área bajo la curva
M1	203.13
M2	103.92
M3	33.02

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos posterior a la aplicación del tratamiento combinado fotocátalisis-microbiológico (utilizando el consorcio bacteriano formado) a las muestras de agua residual M1 (agua residual azul), M2 (agua residual roja) y M3 (agua residual café) se obtuvo que, los mejores resultados fueron al utilizar 3 g l^{-1} de sacarosa y que la concentración del catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ efectiva fue diferente en cada muestra.

Para el caso de la muestra M1 (agua residual azul), los resultados prometedores se observaron al utilizar la concentración [B] del catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, siendo esta de 0.1g. En la tabla 32 se muestra el área bajo la curva y la biodegradación del agua residual azul (M1) alcanzada al aplicar el tratamiento combinado fotocátalisis - microbiológico.

Tabla 32. Biodegradación de la muestra M1: agua residual azul posterior al tratamiento combinado fotocátalisis-microbiológico.

Tratamiento	Tiempo (horas)	Área bajo la curva	% de degradación
Sin tratamiento	0	203.13	0
Fotocátalisis ([0.1 g] de $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$)	2	105.20	48.20±0.65
	4	102.98	49.30±0.33

	6	98.77	51.37±0.59
Microbiológico (consorcio bacteriano)	24	23.02	88.66±0.13
	48	21.88	89.22±0.08
	72	8.38	95.87±0.12

Considerando los valores reportados en la tabla 32, se observa que después de que la muestra M1 (agua residual azul) fue sometida a 6 horas de fotocatalisis el área bajo la curva disminuyó a 98.77, por lo tanto, se logró degradar un 51.37%, en la figura 4 y 5 se puede observar el comportamiento de la muestra M1 durante la fotocatalisis utilizando las concentraciones de catalizador señalado.

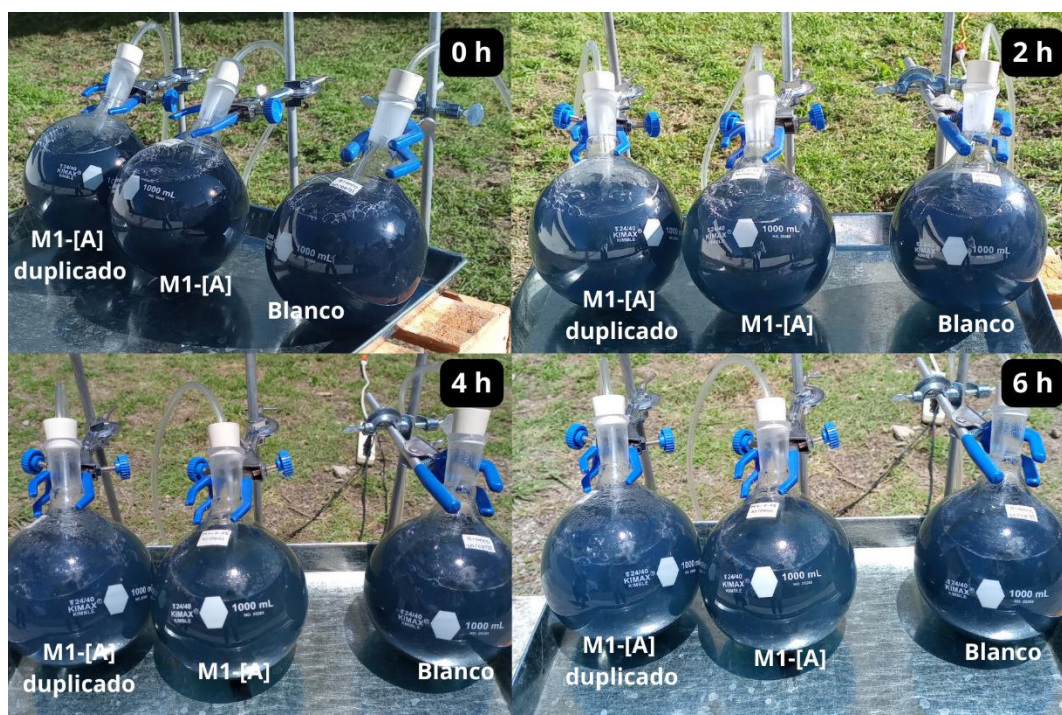


Figura 4. Fotocatalisis de la muestra M1: agua residual azul con la concentración [A]=0.05 g de catalizador.

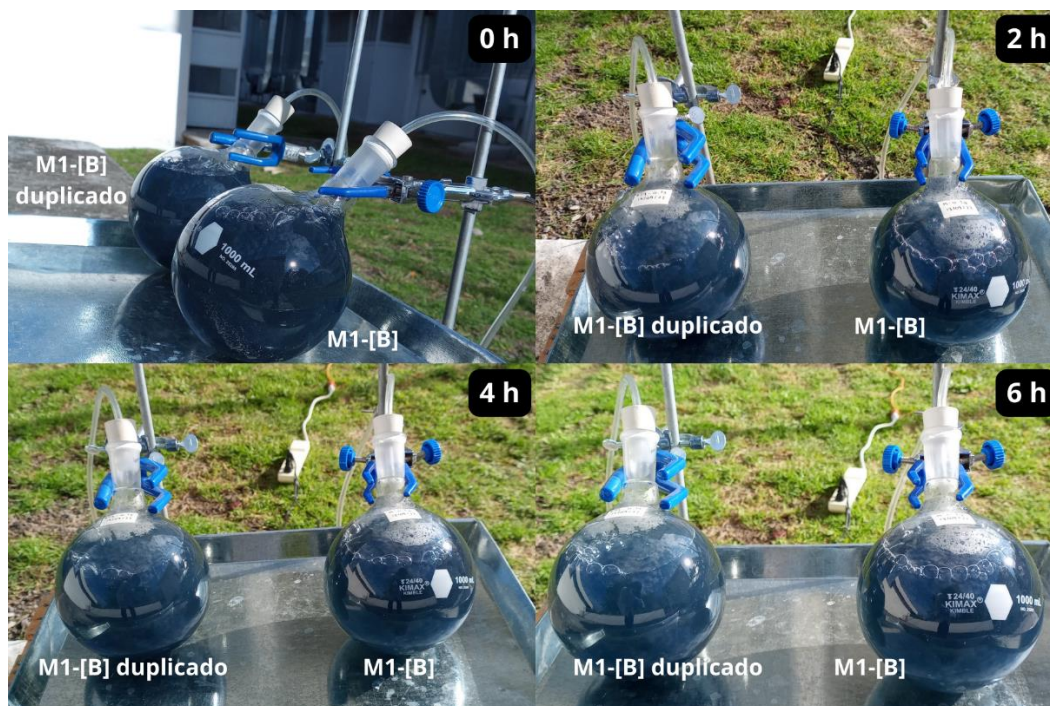


Figura 5. Fotocatálisis de la muestra M1: agua residual azul con la concentración $[B]=0.1$ g de catalizador.

Al aplicar consecutivamente el tratamiento biológico mediante el empleo del consorcio bacteriano, el valor del área bajo la curva fue menor (tabla 32), siendo este de 8.38, equivalente a un porcentaje de biodegradación de 95.87%. En la figura 6 se muestra el tratamiento microbiológico y los cambios visuales que ocurrieron al pasar las horas de tratamiento, por otra parte, en la gráfica 10 se reportan los espectros de absorción UV-vis correspondientes a la muestra M1: agua residual azul tratada mediante el proceso combinado fotocátalisis-microbiológico.

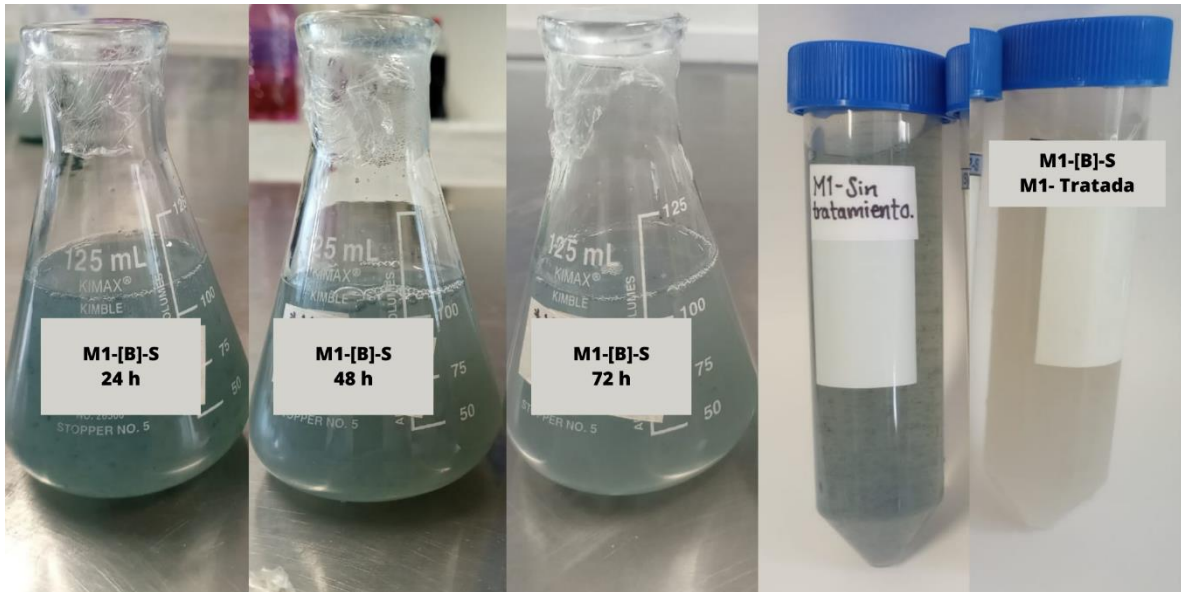
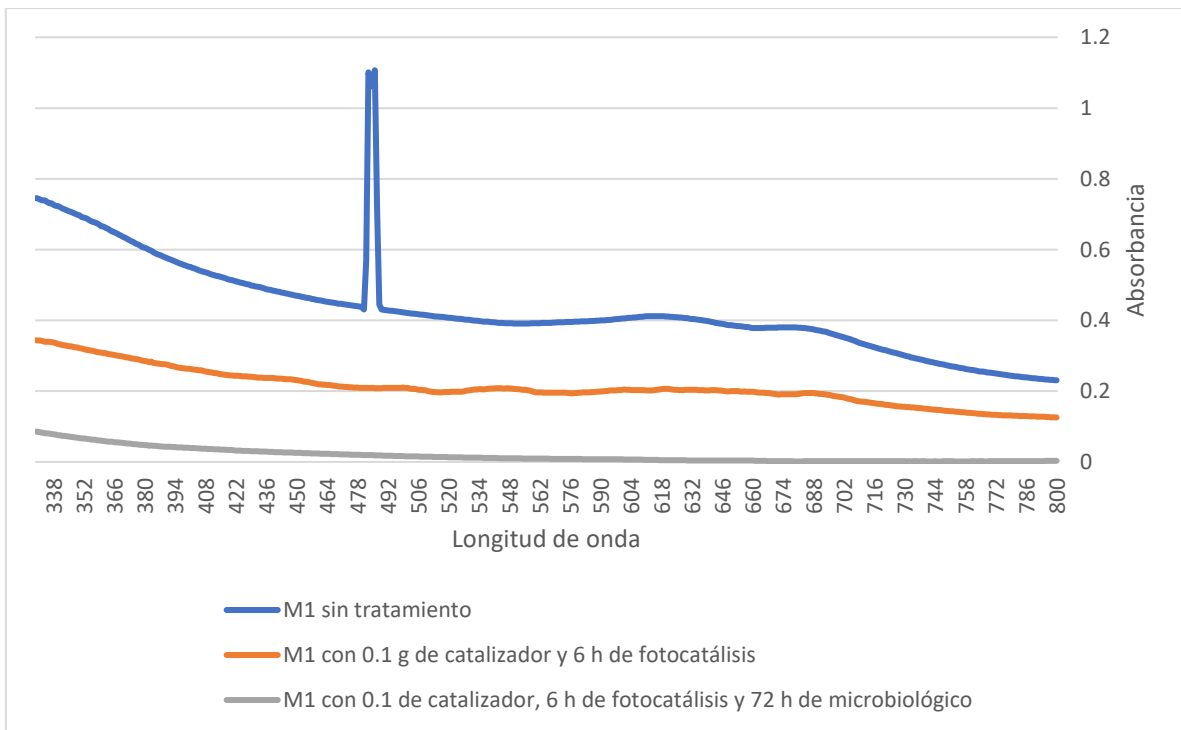


Figura 6. Tratamiento microbiológico con consorcio, posterior a la fotocatalisis de la muestra M1: agua residual azul



Gráfica 10. Espectros de absorción UV-vis respecto al tiempo de la muestra M1: agua residual azul.

La concentración del catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ que tuvo mejores resultados para la muestra M2 (agua residual roja) fue la [A], siendo esta de 0.05 g. En la tabla 33 se indican los valores correspondientes al área bajo la curva y el porcentaje de biodegradación obtenido del agua residual al aplicar el tratamiento combinado fotocatalisis-microbiológico.

Tabla 33. Biodegradación de la muestra M2: agua residual roja posterior al tratamiento combinado fotocatalisis-microbiológico.

Tratamiento	Tiempo (horas)	Área bajo la curva	% de degradación
Sin tratamiento	0	103.92	0
Fotocatalisis ([0.05 g] de $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$)	2	44.39	57.28±0.79
	4	41.22	60.33±0.51
	6	33.67	67.59±0.54
Microbiológico (consorcio bacteriano)	24	23.33	77.54±0.44
	48	20.60	80.16±0.72
	72	18.98	81.72±0.94

Al finalizar el tratamiento fotocatalítico de la muestra M2: agua residual roja (tabla 33, figura 7 y 8), el área bajo la curva de la muestra M2 se redujo a 33.67, ya que como se indicó en la tabla 23, el valor inicial fue de 103.92. Por lo tanto, el agua residual roja tuvo una biodegradación del 67.59%.

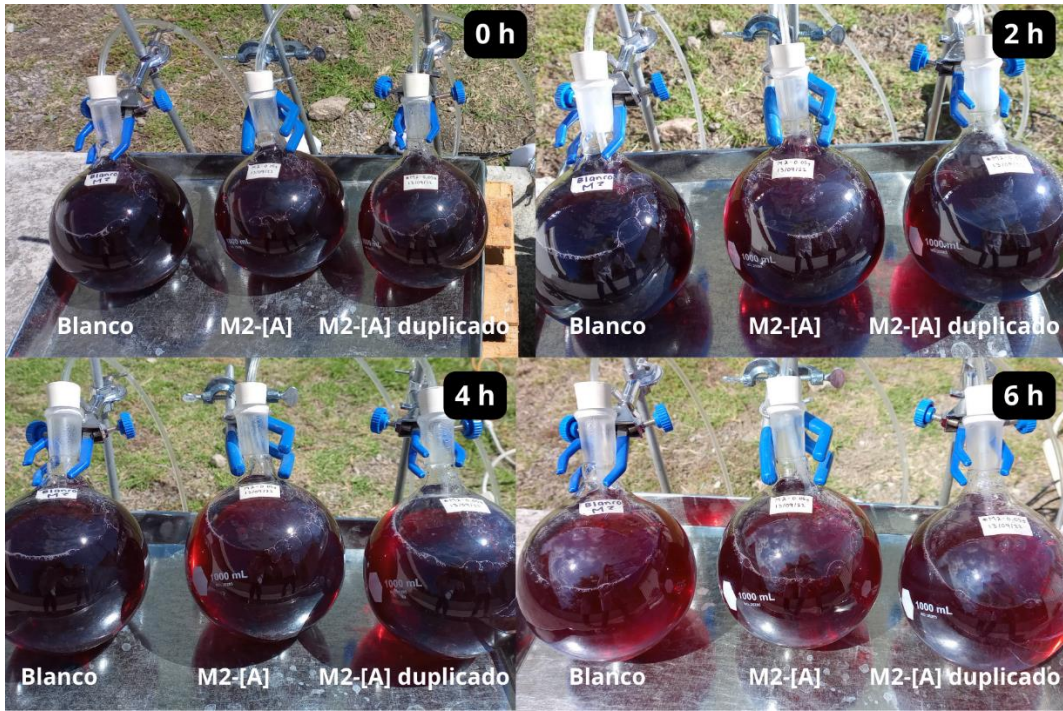


Figura 7. Fotocatálisis de la muestra M2: agua residual roja con la concentración [A]=0.05 g de catalizador.

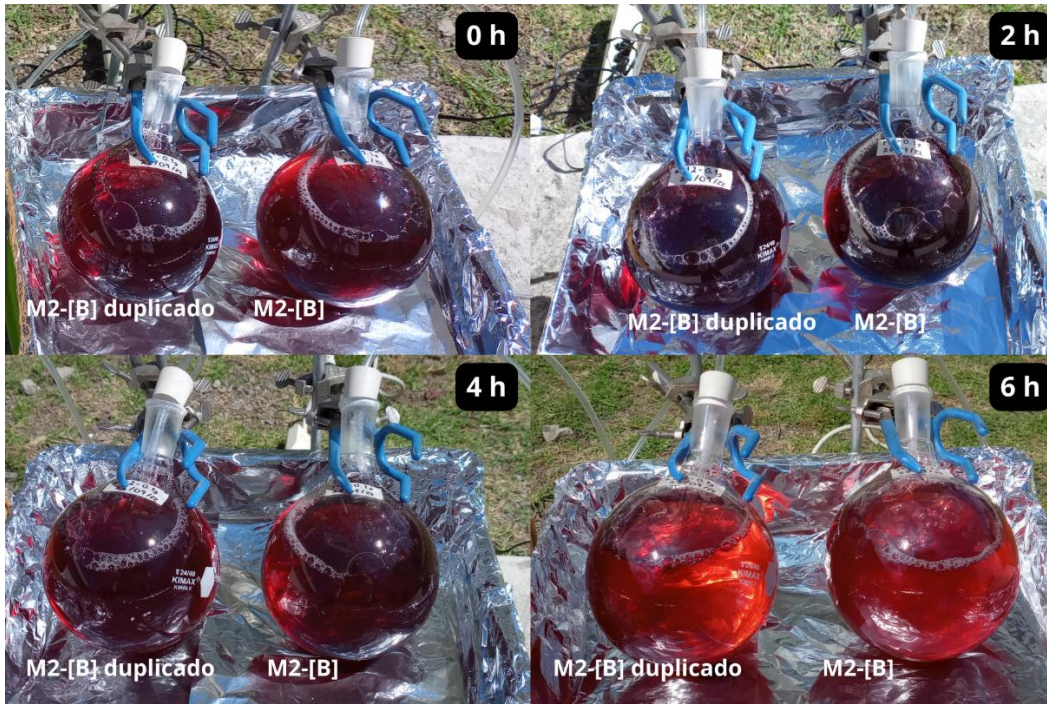


Figura 8. Fotocatálisis de la muestra M2: agua residual roja con la concentración [B]=0.1 g de catalizador.

Al aplicar secuencialmente el tratamiento microbiológico mediante el uso del consorcio bacteriano (figura 9), el área bajo la curva fue menor, siendo de 18.98, lo que indica que el agua residual roja logró biodegradarse un 81.72% (tabla 33). El comportamiento del agua residual roja (M2) durante la aplicación de los tratamientos se observa en la gráfica 11, la cual muestra los espectros de absorción UV-vis de la misma.

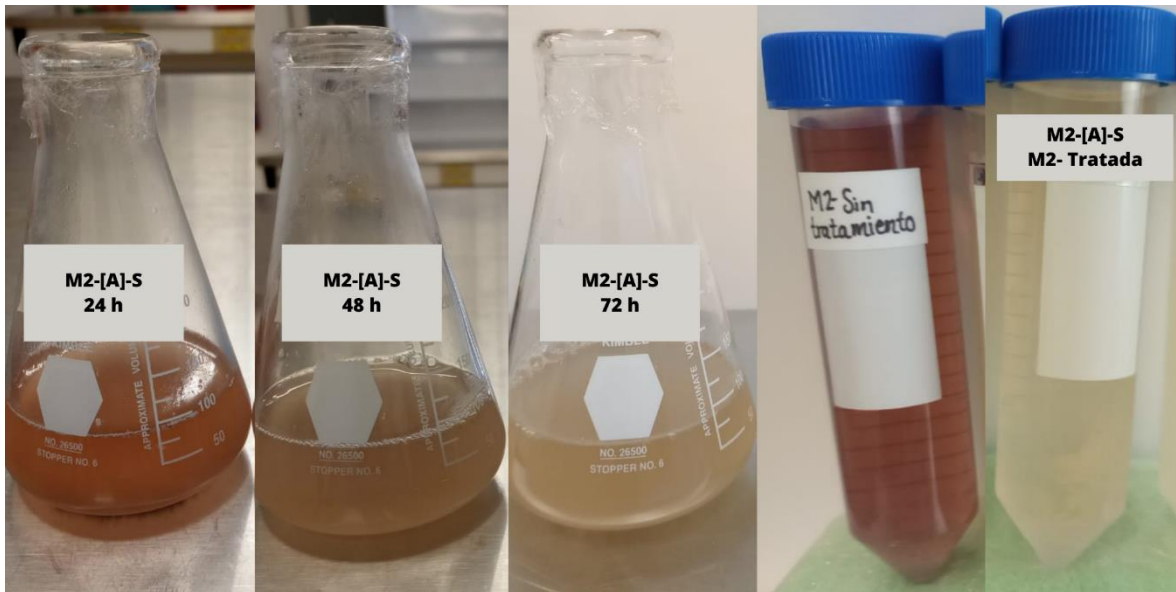
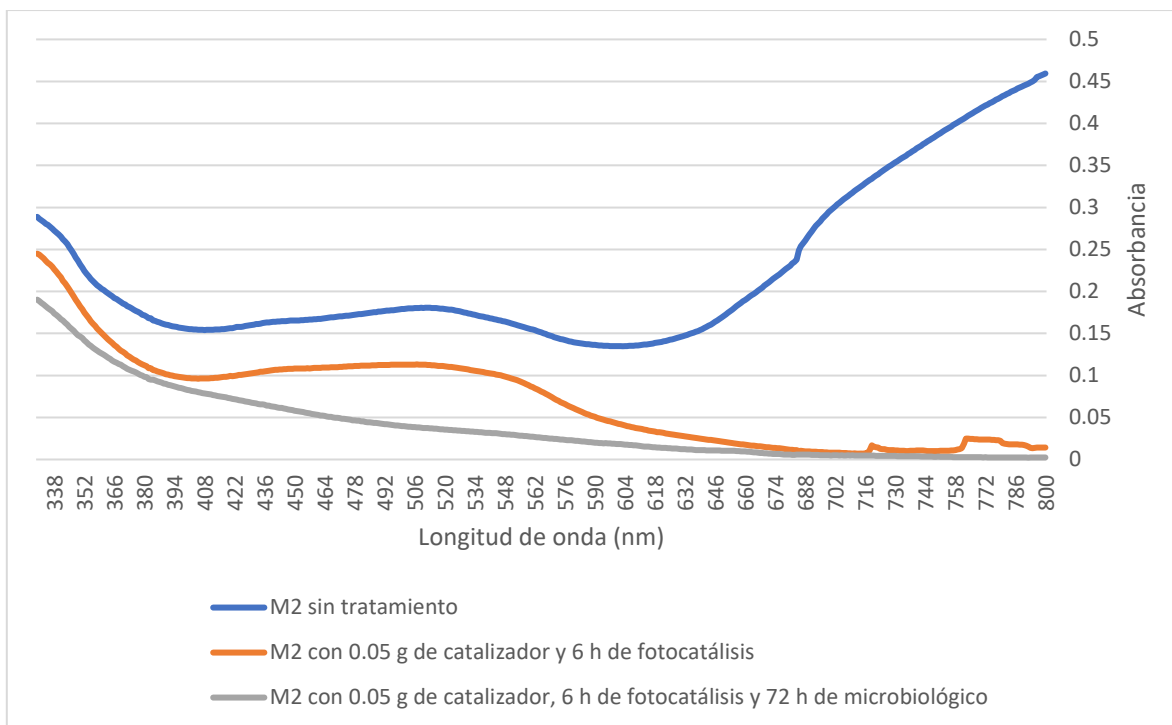


Figura 9. Tratamiento microbiológico con consorcio, posterior a la fotocatalisis de la muestra M2: agua residual roja



Gráfica 11. Espectros de absorción UV-vis respecto al tiempo de la muestra M2: agua residual roja

Al igual que en la muestra anterior, los resultados indican que para la muestra M3 (agua residual café) la concentración con mejores resultados es la [A], equivalente a 0.05 g de catalizador de $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. En la tabla 34 se muestran los valores correspondientes al área bajo la curva y el porcentaje de biodegradación del agua residual café después de la aplicación del tratamiento de fotocatalisis-microbiológico.

Tabla 34. Biodegradación de la muestra M3: agua residual café posterior al tratamiento combinado fotocátalisis-microbiológico

Tratamiento	Tiempo (horas)	Área bajo la curva	% de degradación
Sin tratamiento	0	33.02	0
Fotocátalisis ([0.05 g] de TiO ₂ /SiO ₂)	2	30.85	6.57±0.42
	4	27.54	16.60±0.31
	6	19.80	40.02±0.98
Microbiológico (consorcio bacteriano)	24	19.12	42.09±0.95
	48	15.17	54.03±0.71
	72	11.67	64.65±0.45

Al concluir el tratamiento con fotocátalisis de la muestra M3 (agua residual café), se tuvo un área bajo la curva de 19.80, siendo esta equivalente a un 40.02% de degradación del agua residual (tabla 34). En las figuras 10 y 11 se muestra el tratamiento de fotocátalisis aplicado a la M3 y el comportamiento que se tuvo.

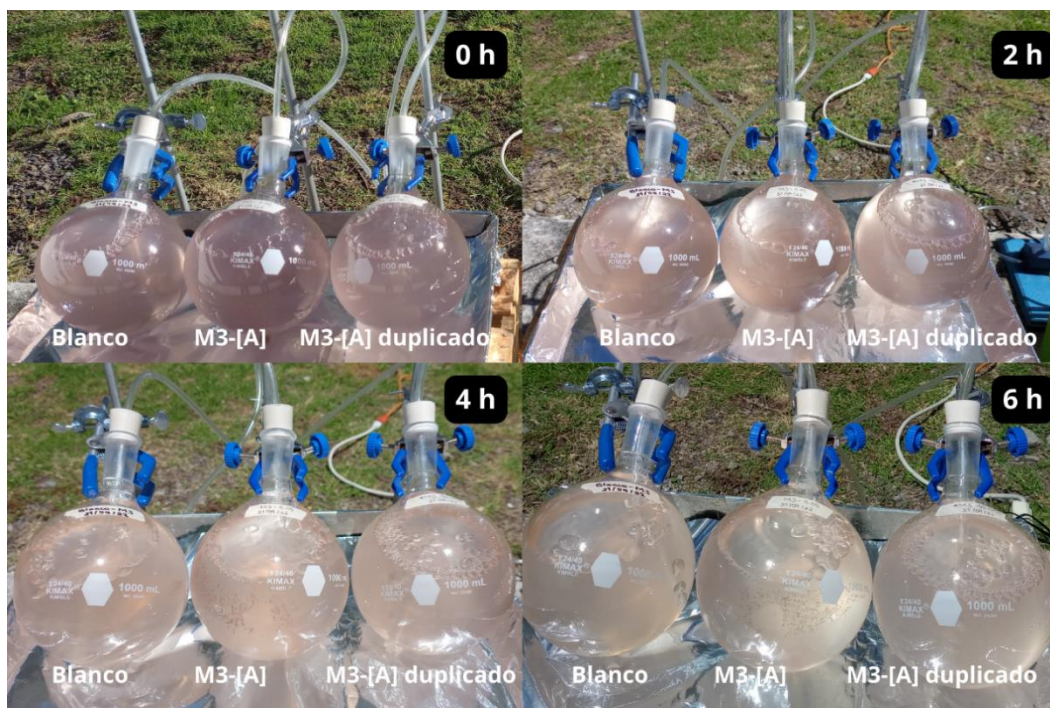


Figura 10. Fotocatálisis de la muestra M3: agua residual café con la concentración [A]=0.05 g de catalizador.

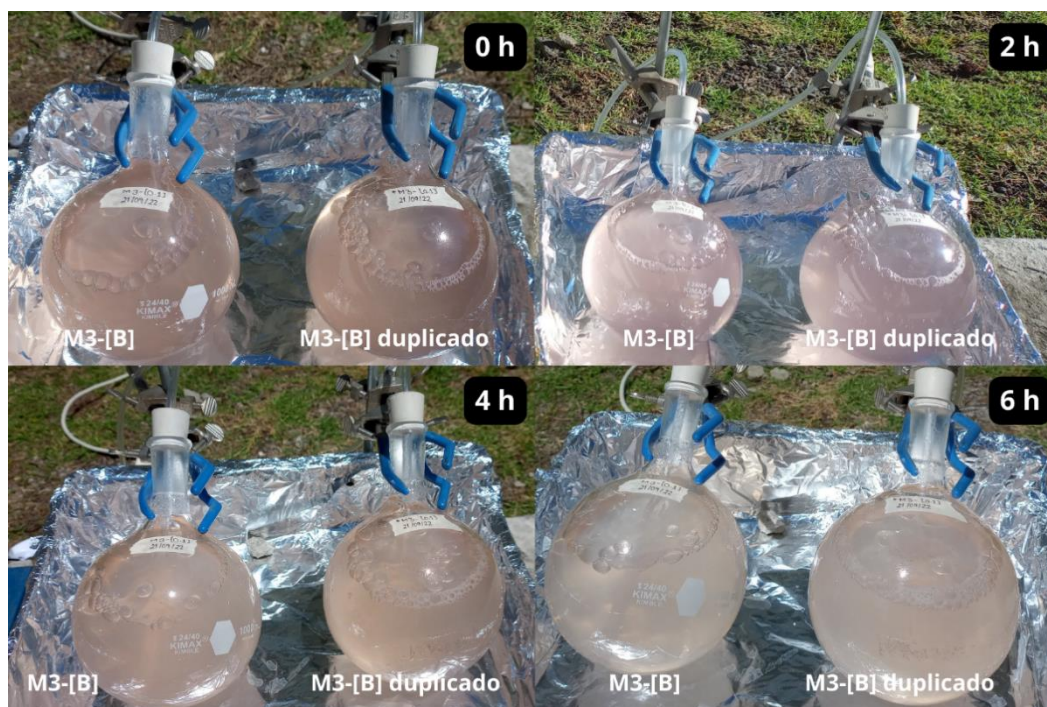


Figura 11. Fotocatálisis de la muestra M3: agua residual café con la concentración [B]=0.1 g de catalizador.

Al finalizar la aplicación del tratamiento biológico (figura 12), el área bajo la curva tuvo una reducción a 11.67, siendo así que, el agua residual café logró degradarse un 64.65% (tabla 34). En la gráfica 12 se muestran los espectros de absorción de la muestra M3 respecto al tiempo de acuerdo al tratamiento aplicado.

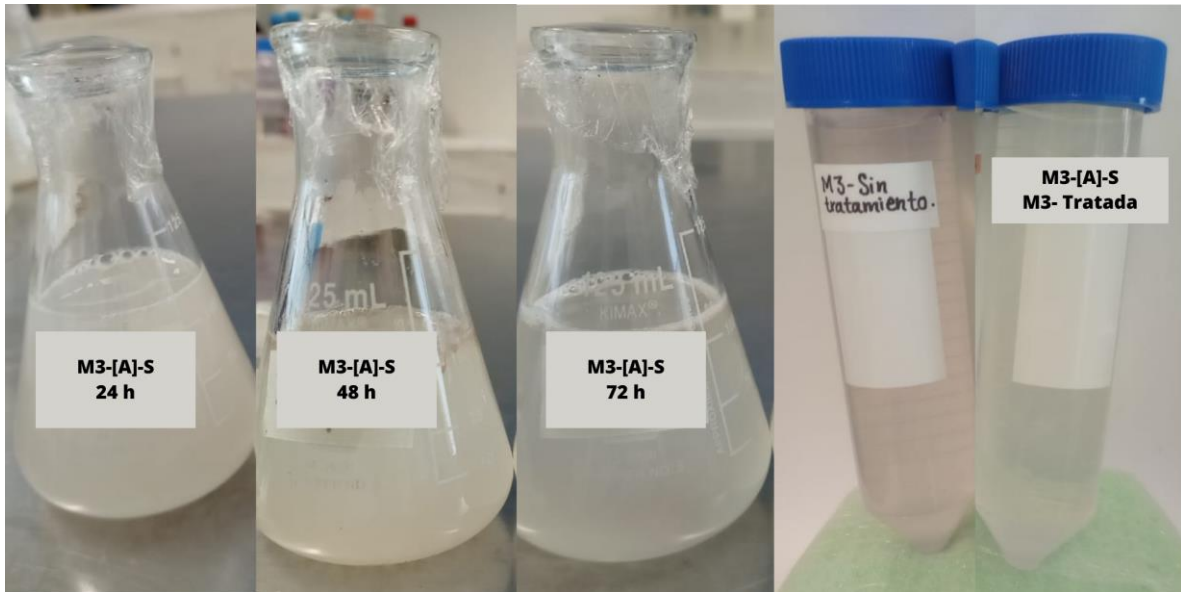
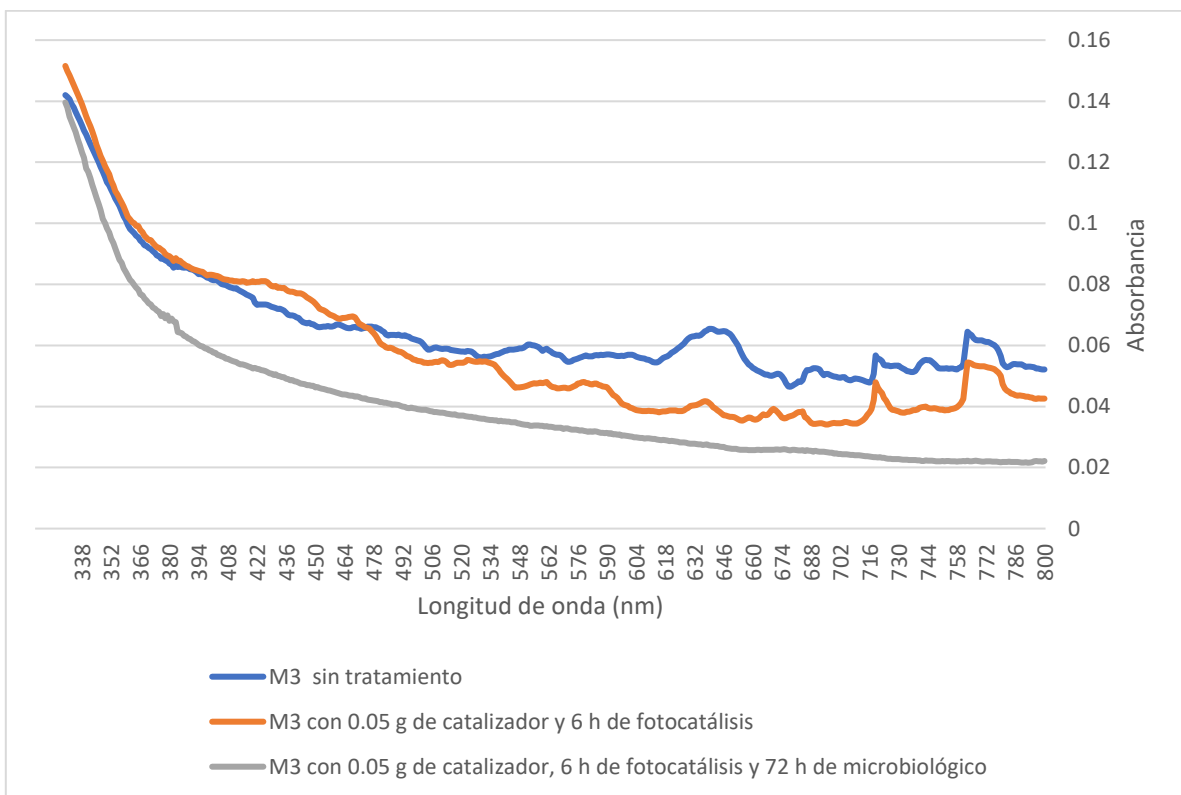


Figura 12. Tratamiento microbiológico con consorcio, posterior a la fotocatalisis de la muestra M3: agua residual café.



Gráfica 12. Espectros de absorción UV-vis respecto al tiempo de la muestra M3: agua residual café

Parámetros de entrada y salida

En las tablas 35 a 37 se reportan los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos de entrada y salida de las muestras de aguas residuales tratadas siendo que, entrada hace referencia al agua sin tratamiento y salida al agua tratada con el proceso combinado de fotocátalisis-microbiológico.

Tabla 35. Parámetros fisicoquímicos de entrada y salida de la muestra M1: agua residual azul

Parámetro	Entrada	Salida
Fósforo (mg^l⁻¹)	1.19	0.31
Nitrógeno (mg^l⁻¹)	4	0.6
DQO (mg^l⁻¹)	1587.45	187.45
DBO₅ (mg^l⁻¹)	44	2.77
Sólidos totales (mg^l⁻¹)	7555	3602.5
Sólidos volátiles (mg^l⁻¹)	1655	327.5
Sólidos suspendidos totales (mg^l⁻¹)	140	45
pH	9.38	7.38
Conductividad (mS)	4.14	1.58

Tabla 36. Parámetros fisicoquímicos de entrada y salida de la muestra M2: agua residual roja

Parámetro	Entrada	Salida
Fósforo (mg^l⁻¹)	2.19	0.97
Nitrógeno (mg^l⁻¹)	0.8	0.2
DQO (mg^l⁻¹)	2154.78	289.45
DBO₅ (mg^l⁻¹)	46	7.98
Sólidos totales (mg^l⁻¹)	3870	1525
Sólidos volátiles (mg^l⁻¹)	1475	395
Sólidos suspendidos totales (mg^l⁻¹)	65	35
pH	10.74	7.62

Conductividad (mS)	5.22	1.98
---------------------------	------	------

Tabla 37. Parámetros fisicoquímicos de entrada y salida de la muestra M3: agua residual café

Parámetro	Entrada	Salida
Fósforo (mg^l⁻¹)	1.15	0.03
Nitrógeno (mg^l⁻¹)	2.4	0.5
DQO (mg^l⁻¹)	1356.89	121.58
DBO₅ (mg^l⁻¹)	48	13
Sólidos totales (mg^l⁻¹)	3870	1525
Sólidos volátiles (mg^l⁻¹)	535	340
Sólidos suspendidos totales (mg^l⁻¹)	90	60
pH	6.8	5.79
Conductividad (mS)	1.65	0.21

Orden cinético de la biodegradación de los colorantes en aguas residuales textiles reales

En la tabla 38 se reportan los datos correspondientes a los parámetros cinéticos de a biodegradación de las aguas residuales. Como se puede observar, las tres muestras tienen un comportamiento similar, siendo que, los valores más altos del factor de correlación (R^2) se acoplan a un modelo de segundo orden siendo estos de: 0.910319338 para la M1 (agua residual azul), 0.803553711 para la M2 (agua residual roja) y 0.92734375 para la M3 (agua residual café), por lo cual, la biodegradación de las aguas residuales es dependiente del tiempo de tratamiento así como de la concentración y complejidad de la muestra.

Tabla 38. Parámetros cinéticos de la biodegradación de las muestras: M1 (agua residual azul), M2 (agua residual roja) y M3 (agua residual café).

Muestra	K ₀	R ²	K ₁	R ²	K ₂	R ²
M1	-1.967029118	0.63200303	-0.039192395	0.89454299	0.0014074	0.910319338
M2	-0.647065401	0.37126784	-0.01639935	0.59845959	0.00050405	0.803553711
M3	-0.2551063	0.7642198	-0.01283446	0.86083091	0.00069424	0.92734375

Análisis de los parámetros indicadores de fitotoxicidad de los productos de biodegradación de las aguas residuales reales

En la tabla 39 se reporta la respuesta biológica de las plántulas de *Medicago sativa* expuestas y humedecidas a los residuos de las muestras de aguas residuales M1 (agua residual azul), M2 (agua residual roja) y M3 (agua residual café) sin tratamiento y con tratamiento fotocátalisis-microbiológico. La respuesta biológica abarca el porcentaje de la germinación relativa de las semillas (GRS), crecimiento relativo de la radícula (CRR) y el índice de germinación (IG). En la figura 13 se muestran la prueba de fitotoxicidad realizada.

Tabla 39. Respuesta biológica de las plántulas de *Medicago sativa* expuestas con los residuos de las muestras de aguas residuales sin tratamiento y tratadas con el sistema de fotocátalisis-microbiológico.

Respuesta	M1		M2		M3	
	No tratada	Tratada	No tratada	Tratada	No tratada	Tratada
GRS (%)	40±.4	90±.6	40±.3	90±.6	60±.8	90±.3
CRR (%)	10.98±.8	68.32±.3	27.81±.5	73.39±.4	33.10±.2	97.93±.5
IG (%)	4.39±.2	61.49±.5	11.12±.3	66.05±.2	19.86±.5	88.13±.4

Siendo GRS: germinación relativa de las semillas, CRR: crecimiento relativo de la radícula e IG: índice de germinación.

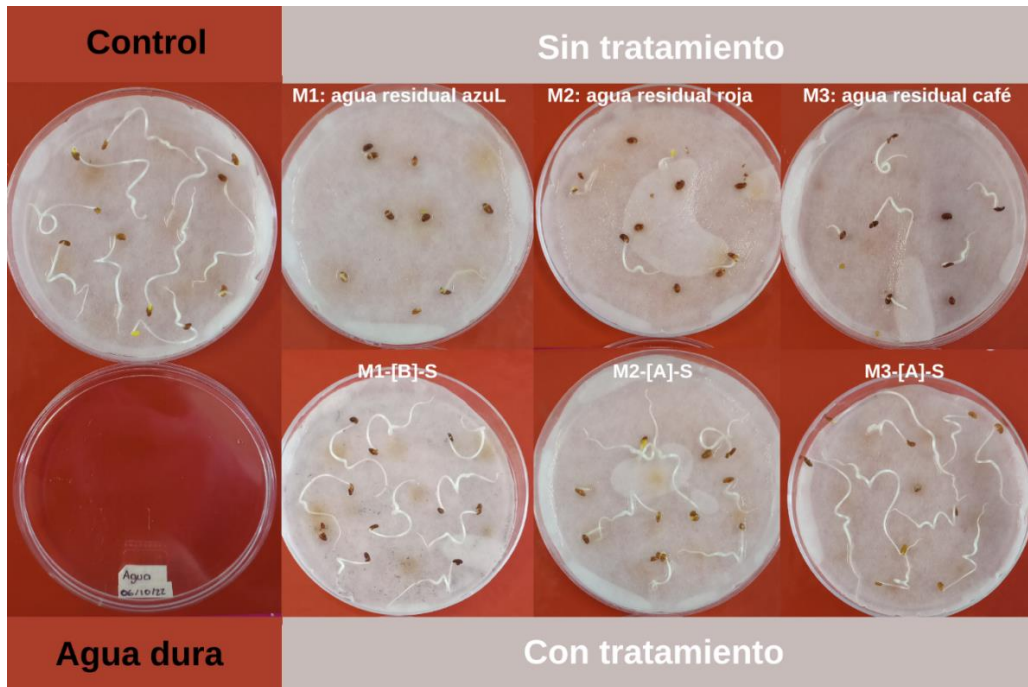


Figura 13. Prueba de fitotoxicidad de los productos de biodegradación de las aguas residuales

Discusiones

Los microorganismos juegan un papel importante en el medio ambiente, ya que una gran diversidad de estos, son capaces de disminuir la contaminación presente y a su vez, mantener sostenibles a los ecosistemas, lo cual permite que sean utilizados para eliminar o disminuir la presencia de ciertos contaminantes (Poddar *et al.*, 2019). Un claro ejemplo de ello es este caso en donde a partir del aislamiento realizado de las muestras de suelo provenientes de sitios contaminados de hidrocarburos (tabla 4) se obtuvieron 4 cepas: M6N, M6A, M2A y M2N, de las cuales, la cepa M2N fue la que mostró mejores resultados en la degradación de colorantes tal y como se indicó en los resultados del ensayo mostrados en la tabla 6 y en la figura 2. De acuerdo a la caracterización realizada mediante las pruebas bioquímicas (tabla 7), se logró identificar que la denominada cepa M2N correspondía a la bacteria *Escherichia coli* y a través de los ensayos propuestos, se supo que *E. coli* M2N es capaz de degradar eficazmente los colorantes y aguas residuales tratadas con ella y que la biodegradación se veía favorecida utilizando una fuente adicional de carbono, siendo esta 3 gl^{-1} de sacarosa. A pesar de que han mostrado buenos

resultados, Cerboneschi *et al.* (2015) mencionan que las bacterias entéricas como es el caso de *E. coli*, no se han estudiado lo suficiente en relación a la biodegradación de colorantes.

El primer ensayo realizado para continuar evaluando la efectividad de *E. coli* M2N frente a la biodegradación de colorantes mostró que, en el caso del colorante azul marino 606 a 100 mgL⁻¹ tratado durante 120 h con la cepa M2N sin sacarosa el porcentaje de degradación final fue de 81.68% y, al aplicar el tratamiento adicionado con sacarosa el porcentaje fue mayor, siendo este del 90.11% (tabla 8 y gráfica 1). Chaieb *et al.* (2016) estudiaron la biodegradación de 3 colorantes, entre ellos el colorante azul de Evans en una concentración de 100 mgL⁻¹ aplicando un tratamiento biológico con la bacteria *Staphylococcus lentus* adicionado con [7mM] de glucosa durante 24 h y, los resultados indican que al finalizar el tratamiento la biodegradación fue solo de 19.7%. Al comprar estos resultados con los obtenidos a las 24 h de tratamiento, el colorante azul marino 606 tenía un mayor porcentaje degradación con y sin sacarosa, mismo que aumento al finalizar el tratamiento, mostrando la eficacia del mismo.

La biodegradación del colorante verde ultramar 607 después de aplicar el tratamiento con la cepa M2N obtuvo que (gráfica 2 y tabla 9), utilizando la cepa sin sacarosa el porcentaje de biodegradación fue de 56.23% y al complementar el tratamiento con la sacarosa fue de 67.45%. De acuerdo a lo reportado en la literatura, se ha encontrado que los porcentajes de biodegradación han sido mayores utilizando otras bacterias, por ejemplo, Vijayalakshmi y Muthukumar (2014) mencionan que el porcentaje biodegradación del verde malaquita a 100 mgL⁻¹ tratado por *Ochrobactrum* sp. durante 48 h fue de aproximadamente 80%.

En relación al colorante rojo escarlata 604 al finalizar el tratamiento con la *E. coli* M2N sin sacarosa se obtuvo que el porcentaje de biodegradación fue de 86.48% y al suplementarlo con sacarosa fue de 88.12% (gráfica 3 y tabla 10). Al analizar los respectivos porcentajes correspondientes a los tratamientos con y sin sacarosa, se puede observar que hay una alta biodegradación, sin embargo, contrastando estos resultados con lo reportado por Chaieb *et al.* (2016) en donde analizaron la

biodegradación del colorante rojo Congo a 100 mg l^{-1} utilizando a la bacteria *Staphylococcus lentus* y [7mM] de sacarosa durante 24 h, reportan que dicha bacteria fue capaz de degradar un 97.63% y que el 50% de la degradación del colorante fue a las 8h de tratamiento.

La cinética de biodegradación de los tres colorantes de estudio (azul marino 606, verde ultramar 667 y rojo escarlata 604) mostró que los modelos a los que se acoplaban mejor para describir su comportamiento eran de primer orden tanto para el tratamiento con la *E. coli* M2N sin y con sacarosa, siendo así que son dependientes de la concentración del colorante. Los resultados respecto al orden cinético son similares a lo obtenido por Lim *et al.* (2013) en cuyo trabajo mencionan que la cinética de biodegradación del colorante Acid Orange 7 tratado con la cepa ZL de *Enterococcus faecalis* se acoplo a una reacción de primer orden.

La prueba de fitotoxicidad permite conocer si el tratamiento aplicado a la muestra problema realmente lo hace viable, en este caso, se ve reflejado en la respuesta biológica de *Medicago Sativa*. La respuesta biológica para el colorante azul marino 606 sin tratamiento (tabla 14) indicó que solo el 50% de las semillas germinó (GRS), el crecimiento relativo de la radícula (CRR) fue de 22.4% y que el índice de germinación (IG) fue de 11.2%, lo que muestra que hay una inhibición de la germinación debido a la presencia del contaminante sin tratamiento. Después del tratamiento biológico (tabla 14), los valores se vieron favorecidos, siendo que para los residuos del tratamiento sin sacarosa el GRS fue de 76%, el CRR de 75.1% y el IG fue de 58.8%. Los valores para el tratamiento con sacarosa fueron de 90% de GRS, 87.1 % de CRR y 78.7 de IG, lo cual muestra la eficacia del tratamiento. Al contrastar los resultados con lo descrito por Chaieb *et al.* (2016), en donde de igual manera realizaron un ensayo de fitotoxicidad con semillas de *Triticum aestivum* y *Sorghum bicolor* para el producto degradado del colorante azul de Evans a 100 mg l^{-1} descrito anteriormente. Con *Sorghum bicolor* el porcentaje de germinación antes del tratamiento fue de 80% y después del tratamiento fue de 100% y la longitud de la raíz fue de 2.81 cm sin tratamiento y 5.2 cm con tratamiento. En el caso de *Triticum aestivum* el porcentaje de germinación fue de 80% sin tratamiento y 100%

con tratamiento, la longitud de la raíz fue de 2.5 cm sin tratamiento y 4.5 cm con tratamiento.

La respuesta biológica obtenida en las plántulas de *Medicago sativa* expuestas al colorante verde ultramar 667 sin tratamiento (tabla 14) mostraron un GRS de 45%, CRR de 19.7% y un IG de 8.87%, dichos valores indican que hubo una notable inhibición en la germinación de las mismas. Por otra parte, al ser expuestas a los residuos del colorante tratado con la cepa M2N sin sacarosa, el valor del GRS fue de 70%, el CRR de 69.3% y el IG de 48.98%, así mismo, para el tratamiento con sacarosa el GRS fue de 80%, CRR de 75.3% y el IG de 60.25%, indicando que el tratamiento fue eficaz y los residuos permiten la germinación de las semillas (tabla 14). Tomando en cuenta esto, hay una respuesta similar de acuerdo al ensayo de fitotoxicidad realizado por Vijayalakshmi y Muthukumar (2014) con los productos de biodegradación del colorante verde malaquita 100 mg l⁻¹ tratado por *Ochrobactrum* sp., utilizando semillas de *Trigonella foenumgraecum*, donde el porcentaje de germinación del colorante sin tratamiento fue de menor (40%) y posterior al tratamiento aumento a 90%, siendo que la radícula con el colorante sin tratamiento fue de 1.21 cm y con el tratado de 3.85 cm.

El ensayo de fitotoxicidad realizado con el colorante rojo escarlata 604 sin tratamiento (tabla 14) indican que el GRS fue de 50%, el CRR de 21.5% y el IG de 10.8%. En cambio, cuando las semillas de *Medicago sativa* se humedecieron con los residuos del tratamiento con la cepa M2N sin sacarosa el GRS fue de 70%, el CRR de 74.5% y el IG de 52.2%, cuando se humedecieron con la cepa M2N con sacarosa la respuesta biológica se vio favorecida, siendo el CRS de 90%, el CRR de 81.4% y el IG de 73.2%. En el estudio previamente mencionado de Chaieb *et al.* (2016) se montó el ensayo de fitotoxicidad con los productos de biodegradación del colorante rojo Congo a 100 mg l⁻¹ utilizando *Staphylococcus lentus*. El porcentaje de germinación de las semillas de *Sorghum bicolor* expuestas al colorante sin tratamiento fue de 90% y la raíz tuvo una longitud de 2.81 cm, sin embargo, al ser expuestas al colorante tratado el porcentaje de germinación fue de 100% y una longitud de raíz de 6.4 cm. Para el caso de las semillas de *Triticum aestivum*

humedecidas con el colorante sin tratar el porcentaje de germinación fue de 90% y después de su tratamiento la germinación fue del 100%, la longitud de la raíz de las semillas con el colorante sin tratamiento fue de 2.72 cm y posterior al tratamiento fue 5.8 cm.

La segunda prueba del tratamiento microbiológico aplicando el consorcio formado por las cepas mostradas en la tabla 5, indicó que el tratamiento fue eficiente para los tres colorantes en ambas concentraciones (50 y 100 mg l^{-1}), mostrando un porcentaje de biodegradación distinto para cada caso. Esto se sustenta con lo reportado por Poddar *et al.* (2019), quienes mencionan que el uso de consorcios bacterianos tiene mejores resultados debido a que la presencia de diversas especies bacterias hace que exista una amplia variedad de rutas metabólicas que lo que promueve una mejor degradación de contaminantes, en comparación al empleo de una sola bacteria.

La biodegradación del colorante azul marino 606 en una concentración de 50 mg l^{-1} (tabla 15 y gráfica 4), aplicando el tratamiento sin sacarosa fue de 79.88% y con sacarosa de 88.71%, siendo mayor al utilizar la fuente adicional de carbono. En el caso del colorante a 100 mg l^{-1} (tabla 15 y gráfica 4), el porcentaje de biodegradación al finalizar el tratamiento sin sacarosa fue de 48.82% y 83.89% con la adición de sacarosa. Contrastando los porcentajes de biodegradación obtenidos, Nanjani *et al.* (2020) mencionan que el consorcio mixto formado por *Stenotrophomonas acidaminiphila* APG1, *Cellulomonas* sp. APG4 y *Pseudomonas stutzeri* APG2, logró degradar en 96 h el 92% del colorante reactive red blue 28 en una concentración de 100 ppm.

El porcentaje de biodegradación del colorante verde ultramar 667 a 50 mg l^{-1} (tabla 16 y gráfica 5) al concluir el tratamiento con el consorcio sin sacarosa fue de 56.86% y con sacarosa de 79.01%, siendo un porcentaje de biodegradación más alto en comparación al tratamiento que no fue adicionado con sacarosa. La biodegradación del colorante a 100 mg l^{-1} (tabla 16 y gráfica 5) utilizando el consorcio sin sacarosa fue solo de 41.63% y con sacarosa de 70.36%. En ambas concentraciones se observa como el porcentaje de biodegradación se ve favorecido en los tratamientos

que utilizan la fuente de carbono adicional. En comparación a la literatura, Das y Mishra (2017) mencionan que el tratamiento del colorante Reactive Green-19 en una concentración de 100 mg l^{-1} utilizando el consorcio bacteriano formado por las cepas *Zobellella taiwanensis* AT 1-3 y *Bacillus pumilus* HKG212, ha logrado una degradación del 97% en condiciones optimizadas ($32.04 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y pH de 8.3).

Los valores obtenidos de la biodegradación del colorante rojo escarlata 604 a 50 mg l^{-1} (tabla 17 y gráfica 6) posterior al tratamiento fueron de 81.39% con el consorcio sin sacarosa y de 75.43% con sacarosa. Por otra parte, en el caso del colorante a 100 mg l^{-1} (tabla 17 y gráfica 6) el porcentaje de biodegradación sin sacarosa fue de solo un 14.09% y 41.09% con sacarosa. Comparando los porcentajes de biodegradación obtenidos con el colorante rojo escarlata 604 se encontró que, Eslami *et al.* (2019) estudiaron la degradación del colorante reactivo red 198 a diferentes concentraciones durante 72 h mediante el consorcio bacteriano formado por las bacterias *Enterococcus faecalis* y *Klebsiella variicola*. Cuando se trabajó el colorante a 50 mg l^{-1} el porcentaje de biodegradación fue de 55.62% y de 15.42% en el caso del colorante a 100 mg l^{-1} .

Los parámetros cinéticos mostrados en las tablas 18, 19 y 20, correspondientes a los colorantes azul marino 606, verde ultramar 667 y rojo escarlata 604, respectivamente, indican que al orden de reacción al cual se acoplan mejor para describir la biodegradación de los mismos es de orden 1, siendo que la misma es dependiente de la concentración del colorante problema. Los resultados obtenidos en la decoloración del tinte son similares a lo obtenido por Patel y Gupte (2023) en cuyo trabajo trataron el colorante Acid Marron V a 100 mg l^{-1} mediante el consorcio bacteriano denominado EDPA formado por: *Enterobacter dissolvens* AGYP1 y *Pseudomonas aeruginosa* AGYP2 en presencia de mediadores redox y, al finalizar el tratamiento observaron que la degradación se acopló mejor a un orden de reacción de orden uno. De igual manera, Das y Mishra (2017) reportaron que la cinética de biodegradación del Reactive Green-19 mediante el consorcio formado por *Zobellella taiwanensis* AT 1-3 y *Bacillus pumilus* HKG212 es de orden uno para distintos valores de concentraciones.

Los datos obtenidos en la respuesta biológica de la prueba de fitotoxicidad montada con las semillas de *Medicago sativa* expuestas al colorante azul marino 606 sin tratamiento (tabla 21) mostraron que el GRS fue 66.67%, CRR de 63.77% y el IG de 42.52%. Al utilizarse los residuos del tratamiento biológico del colorante a 50 mg l⁻¹ con y sin sacarosa los valores fueron: GRS de 88.89% y 77.78%, CRR de 67.52% y 67.32%, el IG de 60.02% y 52.36%, respectivamente (tabla 22). La respuesta biológica de las semillas al ser humedecidas con los residuos del tratamiento del colorante a 100 mg l⁻¹ con y sin sacarosa (tabla 23) mostró un 88.89% y 88.89% de GRS, 82.37% y 67.27% de CRR, 73.21% y 59.80% de IG, respectivamente. La respuesta biológica fue favorecida cuando el colorante se trató con el consorcio bacteriano, lo cual coincide con lo reportado por Saratale *et al.* (2010), en donde realizaron una prueba de fitotoxicidad con semillas de *Phaseolus mungo* expuestas a los residuos del colorante verde HE4BD tratado con el consorcio conformado por *Proteus vulgaris* NCIM-2027 y *Micrococcus glutamicus* NCIM-2168, mostrando un porcentaje de biodegradación y una longitud de la raíz fue mayor en comparación al colorante sin tratar.

El colorante rojo escarlata 604 sin tratamiento (tabla 21) tuvo un GRS de 55.56%, CRR de 67.04% y el IG de 37.25. En el caso de las semillas expuestas con los residuos del tratamiento del colorante a 50 mg l⁻¹, sin sacarosa, fueron: GRS de 88.89%, CRR de 82.83% y el IG de 73.63% y con sacarosa fueron: GRS de 77.78%, CRR de 78.94% y el IG de 61.40% (tabla 22). La respuesta de *M. sativa* al ser humedecida con los residuos del tratamiento del colorante a 100 mg l⁻¹ con y sin sacarosa (tabla 23) mostro los siguientes valores: 88.89% y 88.89% de GRS, 86.35% y 68.71% de CRR, 76.76% y 61.96% de IG, respectivamente. El favorecimiento de la respuesta biológica coincide con lo observado por Saha *et al.* (2022) en donde el IG y el GRS de las semillas de *Phaseolus mungo* y *Cicer arietinum* se favorecieron con el tratamiento del colorante Reactive Orange 16 mediante el consorcio bacteriano denominado VITPBC6, conformado por *Bacillus flexus* VITSP6, *B. paraflexus* VITSPB7, *B. megaterium* VITSPB9, *B. firmus* VITEPB1, *B. flexus* VITEPB2 y *B. aryabhatai* VITEPB3.

Los valores correspondientes al colorante verde ultramar 667 sin tratamiento (tabla 21) fueron: GRS de 66.67%, CRR de 67.43% y un IG de 44.95%. Cuando las semillas de *Medicago sativa* se humedecieron con los residuos del tratamiento del colorante a 50 mg l⁻¹ (tabla 22) con y sin sacarosa, los porcentajes fueron: GRS de 88.89% y 77.78%, CRR de 68.07% y 72.77% y el IG de 60.51% y 56.60%, respectivamente. La exposición de las semillas a los residuos del tratamiento del colorante a 100 mg l⁻¹ con y sin sacarosa (tabla 23) tuvieron un 77.78% y 88.89% de GRS, 79.07% y 83.45% de CRR, 61.50% y 74.17% de IG, respectivamente. Al igual que en este ensayo de fitotoxicidad, Vignesh *et al.* (2020) reportaron que el ensayo de fitotoxicidad realizado con las semillas de *Vigna radiate* expuestas con los residuos del tratamiento del colorante verde malaquita mediante la bacteria *Streptomyces chrestomyceticus* S20, mostró que los productos de biodegradación no fueron tóxicos, mostrando un porcentaje de biodegradación arriba del 90%.

Al aplicar el consorcio bacteriano formado a las aguas residuales textiles reales, se observó que al someterlas al tratamiento microbiológico con y sin sacarosa mostraron buenos porcentajes de biodegradación. Lo cual indica que las bacterias que conforman el consorcio tienen la capacidad de biodegradar eficazmente las muestras de agua 1, 2 y 3 a pesar de la complejidad que estas representan considerando que dichos efluentes están compuestos por más de un contaminante.

La degradación del agua residual 1 (agua residual café) después de 120 h de tratamiento con el consorcio fue de 78.83% y cuando se adicionó con sacarosa este fue de 72.17% (tabla 25). Mostrando así que, el consorcio en ambos casos logró degradar más del 50% del agua residual de manera eficiente. Los porcentajes de biodegradación al final la aplicación del tratamiento con el consorcio, son cercanos a los reportados por Samuchiwal *et al.* (2021), en donde trataron aguas residuales textiles mediante el empleo de un consorcio bacteriano cuyas especies fueron aisladas de un efluente pretratado, alcanzando así un porcentaje de biodegradación que oscila entre el 70-73%.

Para el caso del agua residual 2 correspondiente al agua residual de tonalidad azul, el tratamiento que mostró mayor porcentaje de biodegradación al concluir el

tratamiento fue el suplementado con sacarosa, teniendo un porcentaje de 88.83%, en comparación con el tratamiento sin sacarosa que tuvo un 56.63% de degradación (tabla 26). La literatura ha reportado que la remoción del colorante reactive blue 40 presente en aguas residuales textiles reales ha sido degradado en un 99% mediante el empleo del consorcio conformado por las especies *Pseudomonas putida*, *Chlorella* y *Lactobacillus plantarum* (Ayed *et al.*, 2021).

La biodegradación del agua residual 3 (agua residual morada) tuvo porcentajes de biodegradación más bajo en comparación a las demás al aplicar el consorcio microbiano sin sacarosa, siendo este del 18.43%, sin embargo, cuando el tratamiento fue adicionado con sacarosa el porcentaje se vio favorecido, siendo este del 59.93%, lo cual sigue demostrado que la sacarosa como fuente de carbono adicional favorece la degradación (tabla 27). Considerando los porcentajes de biodegradación obtenidos, se observa que al adicionar el consorcio con sacarosa el valor aumento. El porcentaje de biodegradación puede ser atribuido a diferentes factores, como las especies bacterianas y la concentración o naturaleza del colorante presente en el agua residual. Varna Vishakar *et al.* (2021) reportan que el consorcio bacteriano conformado por *Pseudomonas putida* y *Phanerocheate chryso sporium* ha logrado degradar el 91% de colorantes como es el caso del reactive red 198 a pesar de la complejidad y condiciones que deben cumplir durante el tratamiento.

De acuerdo a los parámetros cinéticos reportados en la tabla 28 correspondientes al agua residual café, el modelo cinético que mejor describe la biodegradación de la misma es de orden cero, siendo así que, la degradación es dependiente del tiempo, concentración y complejidad del efluente tratado. Estos resultados son similares a lo obtenido en el estudio de Saha *et al.* (2022) previamente mencionado, donde la biodegradación del colorante Reactive Orange 16 tratado con el consorcio VITPBC6, siguió una cinética de biodegradación de orden cero.

Por otra parte, en el caso del agua residual azul y el agua residual morada, los parámetros cinéticos muestran que el valor más alto del coeficiente de correlación (R^2) es de un orden de reacción de orden 1, por lo cual, la biodegradación es

dependiente de la concentración del colorante del agua residual tratada. Das y Mishra (2017) reportaron un comportamiento similar en la biodegradación del colorante Reactive Green-19, en donde la cinética se acopla mejor a un orden uno.

La prueba final realizada para tratar las muestras de aguas residuales problema, (M1, M2 y M3) mediante el tratamiento combinado de fotocátalisis-microbiológico mostró resultados favorables, mostrando aspectos distintos en cada caso, por ejemplo, la concentración del catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. Además, al realizar el análisis de los resultados, se observó que al igual que en las pruebas anteriores, la adición de sacarosa al tratamiento microbiológico aumentaba la biodegradación.

Los resultados en relación a la fotocátalisis de la muestra M1 correspondiente al agua residual azul, mostraron ser mejores al utilizar 0.1 g del catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (figura 5), logrando así un porcentaje de degradación del 51.37% al finalizar la fotocátalisis (tabla 32). Al someter la muestra final de fotocátalisis al tratamiento con el consorcio bacteriano con sacarosa, el porcentaje de biodegradación aumento a 95.87% (tabla 32, gráfica 10 y figura 6), lo que confirma que un tratamiento combinado favorece el porcentaje de biodegradación. La combinación del tratamiento de fotocátalisis con el microbiológico mostró como el acoplamiento de ambos mejora el proceso de biodegradación del agua residual textil, lo cual coincide por lo reportado por Ambaye y Hagos (2020) en donde trataron un efluente textil real con presencia del colorante Reactive Black 5 utilizando de igual manera el tratamiento de oxidación fotocatalítico y biológico, en donde después de 25 h de fotocátalisis el porcentaje de biodegradación fue de 44.73% y al someter la prueba pre-tratada al biológico durante 55 h el porcentaje se vio favorecido, siendo este del 75.15%.

La concentración de catalizador $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ que mostró mejores resultados para la muestra M2 fue de 0.05 g (figura 7). El porcentaje de biodegradación al concluir las 6 h de fotocátalisis fue de 67.59% (tabla 33). Al aplicar secuencialmente el tratamiento microbiológico con el consorcio bacteriano adicionado con sacarosa a la muestra final de fotocátalisis, el porcentaje de biodegradación final fue de 81.72% (tabla 33, gráfica 11 y figura 9). La combinación de los procesos muestra la

efectividad de los mismos y como es que la biodegradación se ve favorecida en comparación al empleo de un solo tratamiento como el fotocatalítico, siendo similar a lo observado por Zeghioud *et al.* (2021), en donde utilizan el mismo proceso combinado. Al término de 8 h de fotocatalisis (con TiO_2 como catalizador) el porcentaje de degradación del colorante Reactive Green 12 fue de 45.4% y 74.9% después de 7 días de tratamiento biológico.

Al igual que para el agua residual roja, la concentración de 0.05 g de catalizador de $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ tuvo mejores resultados para la muestra M3: agua residual café (figura 10). Al concluir el tratamiento fotocatalítico de la muestra M3 el porcentaje de degradación fue de 40.02% (tabla 34 y gráfica 12), sin embargo, al tratar la muestra subsecuentemente con el consorcio microbiano suplementado con sacarosa, el porcentaje de biodegradación ascendió a 64.65% (figura 12, tabla 34 y gráfica 12). A pesar de que los porcentajes de biodegradación obtenidos son bajos en comparación a las muestras anteriores, se puede observar como la utilización del tratamiento secuencial favorece la remoción del colorante del agua residual, lo cual sustenta el potencial que el tratamiento combinado tiene para la biodegradación de colorantes presentes en aguas residuales textiles reales (Gebregiorgis *et al.*, 2018)

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos medidos antes y después del tratamiento de las muestras de aguas residuales M1, M2 y M3 mostraron una reducción notable como se indicó en las tablas 35 a 37. Para cada uno de los parámetros: fósforo, nitrógeno, DQO, DBO_5 , sólidos totales, sólidos volátiles, sólidos suspendidos totales, pH y conductividad, se pudo constatar que la aplicación del tratamiento combinado de fotocatalisis-microbiológico, logró mejorar las características de las aguas residuales textiles problema estudiadas en este trabajo, siendo así que las hace más viables para darles otro uso en alguna actividad, además de que constata que las características de las mismas no representan un riesgo más al medio ambiente y que el impacto que estas pudieran generar al ser reincorporadas no dañarán más el medio ambiente en comparación a las aguas residuales textiles no tratadas de ningún tipo.

Considerando los valores de los parámetros cinéticos de las tres muestras de agua M1, M2 y M3, el factor de correlación (R^2) más alto corresponde a un modelo de segundo orden. Siendo así que, la biodegradación de las aguas residuales es directamente proporcional al tiempo de tratamiento, la concentración y la complejidad del agua residual tratada, lo cual difiere con lo reportado por Pérez-Osorio *et al.* (2020) en donde la biodegradación de los colorantes azul de Solofenilo, azul de Erionilo y azul Terasil tratados mediante el sistema combinado de biodegradación bacteriana-fotocatálisis siguió una cinética de primer orden, indicando que la biodegradación depende de la concentración de los colorantes.

Como se observó en los resultados mostrados con anterioridad respecto al tratamiento de las aguas residuales azul, roja y café, el tratamiento secuencial de fotocátalisis-microbiológico fue eficiente, sin embargo, es importante constatar que los productos de biodegradación generados al finalizar el tratamiento no son tóxicos, lo cual se comprobó mediante la prueba de fitotoxicidad realizada con *M. sativa*. De acuerdo con la respuesta biológica expresada por las semillas de *M. sativa*, los productos de biodegradación de las aguas residuales a los cuales fueron expuestos mostraron no inhibir la germinación de las mismas, lo cual se vio reflejado en los valores del GRS, CRR y el IG (tabla 39), por su parte, estos valores se vieron disminuidos al exponer las semillas a las aguas residuales sin tratamiento algún (tabla 39). El comportamiento que se observó en la fitotoxicidad de las aguas residuales con y sin tratamiento es similar a lo observado por Zeghioud *et al.* (2021) en donde la respuesta biológica de las plántulas de berros fue mejor al concluir el tratamiento combinado de fotocátalisis-biológico, donde el porcentaje de germinación aumento en comparación al colorante sin tratamiento.

La biodegradación lograda en cada una de las pruebas desarrolladas permite evaluar la eficiencia que presenta el aislado de la bacteria *E. coli* M2N y la funcionalidad del consorcio formado. Además, se puede destacar que el empleo de una fuente adicional de carbono implica un impacto favorable en los valores de degradación, ya que, permite el desarrollo de los microorganismos y a su vez les permite utilizar a los colorantes como fuente de carbono, siendo estos los contaminantes de interés

para este estudio. De igual manera, los resultados de las pruebas de fitotoxicidad realizadas en los ensayos montados en este trabajo muestran como el empleo de los microorganismos ya se individualmente o en consorcio, no genera algún tipo producto final peligroso, siendo así, se puede establecer que el tratamiento combinado fue eficiente y logró hacer menos tóxicas las aguas residuales, lo cual abre una ventana para que puedan ser utilizadas para algo más.

Enfocando los resultados a las muestras de aguas residuales textiles problemas, la metodología establecida permitió degradar favorablemente las aguas residuales textiles, lo que es un indicador que de esto puede ser llevado a otro nivel, o sea, escalarlo con las modificaciones adecuadas. Además, se abre una ventana acerca del empleo de un nuevo consorcio que tiene una amplia capacidad de degradar estos efluentes tan complejos que son generados en un gran volumen diariamente por las industrias textiles, las cuales, como se ha mencionado con anterioridad, son de gran importancia en el desarrollo económico, no solo a nivel estatal o nacional, sino que es a nivel mundial. Por lo cual, es de gran relevancia aplicar y estudiar nuevas metodologías que permitan aminorar el impacto que general al medio ambiente y ponen en riesgo la salud de los seres humano.

Conclusiones

La realización de este trabajo permitió aislar la cepa M2N de *Escherichia coli* capaz de degradar colorantes textiles en una concentración de 100 mg l⁻¹, dando como resultado una buena biodegradación (azul marino 606 con sacarosa: 90.11% y sin sacarosa: 81.68%, verde ultramar 667 con sacarosa: 67.45% y sin sacarosa: 56.23%, rojo escarlata 604 con sacarosa: 88.12% y sin sacarosa: 86.48%), misma que fue corroborada con el análisis correspondiente, así como con las pruebas de fitotoxicidad realizadas. Además, se logró determinar que una concentración adecuada de sacarosa (3 g l⁻¹) permite aumentar la biodegradación de los colorantes, ya que esta cumple la función de ser una fuente de carbono adicional a los colorantes textiles problemas estudiados.

De igual manera, la formación del consorcio bacteriano en donde se incluyó la cepa aislada en este trabajo, mostró ser eficiente en la degradación de colorantes textiles (azul marino 606 a 50 y 100 mg l⁻¹ con sacarosa: 88.71% y 83.89%, sin sacarosa: 79.88% y 48.82%, verde ultramar 667 a 50 y 100 mg l⁻¹ con sacarosa: 79.01% y 70.36%, sin sacarosa: 56.86% y 41.63%, rojo escarlata 604 a 50 y 100 mg l⁻¹ con sacarosa: 75.50% y 41.09%, sin sacarosa: 81.39% y 14.88%) y en aguas residuales reales (agua residual café con sacarosa: 72.17% y sin sacarosa: 78.8%, agua residual azul con sacarosa 88.83% y sin sacarosa: 56.63%, agua residual morada con sacarosa 59.93% y sin sacarosa: 18.43%), lo cual amplía las opciones bacterianas que pueden ser utilizadas en el tratamiento de estos efluentes sin generar algún tipo de peligro debido a los metabolitos de biodegradación que pudieran formarse, ya que las pruebas fitotóxicas mostraron ser favorables con los residuos del tratamiento con el consorcio bacteriano.

La aplicación de la fotocatalisis heterogénea como pre-tratamiento de las aguas residuales textiles reales permitió la degradación de estas eficientemente y al combinar con el tratamiento microbiológico, la degradación de los contaminantes del efluente fue casi total.

El uso de consorcios microbianos para el tratamiento de efluentes textiles permite que los microorganismos trabajen en sinergia, logrando que los contaminantes

puedan ser degradados gracias a la presencia de diversas enzimas y rutas metabólicas.

En síntesis, retomando los objetivos establecidos en el inicio, mediante este trabajo se logró establecer un sistema secuencial de fotocatalisis-microbiológico que permite tratar aguas residuales textiles reales de manera eficiente, logrando degradar los colorantes presentes en las mismas. Además, la evaluación de ambos tratamientos por separado mostró porcentajes de biodegradación favorables y, al aplicarlos de manera combinada fotocatalisis-microbiológico, los porcentajes de biodegradación de las aguas residuales textiles reales aumentaron (Biodegradación del agua residual azul por fotocatalisis: 51.37% y por fotocatalisis + microbiológico: 95.87%, agua residual roja mediante fotocatalisis: 67.59% por y fotocatalisis + microbiológico: 81.72%, agua residual café por fotocatalisis: 40.02% y por fotocatalisis + microbiológico: 64.65%) y mediante las pruebas de fitotoxicidad efectuadas se corroboró que el tratamiento combinado de estos efluentes no genera compuestos que representen un peligro, dado que los índices de fitotoxicidad después del tratamiento son cercanos a los obtenidos en el blanco, siendo este el agua dura.

Bibliografía

- Abdelouahab Reddam, H., Elnail, R., Lloria, S. C., Monrós Tomás, G., Reddam, Z. A., & Coloma-Pascual, F. (2020). Synthesis of Fe, Mn and Cu modified TiO₂ photocatalysts for photodegradation of Orange II. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 59(4), 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2019.09.005>
- Ambaye, T. G., & Hagos, K. (2020). Photocatalytic and biological oxidation treatment of real textile wastewater. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5(3), 28. <https://doi.org/10.1007/s41204-020-00094-w>
- Ambaye, T. G., & Hagos, K. (2020). Photocatalytic and biological oxidation treatment of real textile wastewater. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5(3), 28. <https://doi.org/10.1007/s41204-020-00094-w>
- Ayed, L., Ladhari, N., el Mzoughi, R., & Chaieb, K. (2021). Decolorization and phytotoxicity reduction of reactive blue 40 dye in real textile wastewater by active consortium: Anaerobic/aerobic algal-bacterial-probiotic bioreactor. *Journal of Microbiological Methods*, 181, 106129. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2020.106129>
- Babuna, F. G. (2011). Wastewater Reuse in Textile Industry. In A. T. Atimtay & S. K. Sikdar (Eds.), *Security of Industrial Water Supply and Management* (pp. 131–139). Springer Netherlands.
- Bhatia, V., Dhir, A., & Ray, A. K. (2018). Integration of photocatalytic and biological processes for treatment of pharmaceutical effluent. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 364(May), 322–327. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.06.027>
- Cerboneschi, M., Corsi, M., Bianchini, R., Bonanni, M., & Tegli, S. (2015). Decolorization of acid and basic dyes: understanding the metabolic

degradation and cell-induced adsorption/precipitation by *Escherichia coli*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(19), 8235–8245. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6648-4>

Chaieb, K., Hagar, M., & Radwan, N. R. E. (2016). Biodegradation and decolorization of azo dyes by adherent *Staphylococcus lentus* strain. *Applied Biological Chemistry*, 59(3), 405–413. <https://doi.org/10.1007/s13765-016-0169-4>

Conociendo la Industria Textil y de la Confección. (n.d.). www.inegi.org.mx

da Silva, L. S., Gonçalves, M. M. M., & Raddi de Araujo, L. R. (2019). Combined photocatalytic and biological process for textile wastewater treatments. *Water Environment Research*, 91(11), 1490–1497. <https://doi.org/10.1002/wer.1143>

Darbra, R. M., Dan, J. R. G., Casal, J., Àgueda, A., Capri, E., Fait, G., Schuhmacher, M., Nadal, M., Rovira, J., Grundmann, V., Barceló, D., Ginebreda, A., & Guillén, D. (2012). Additives in the Textile Industry. In B. Bilitewski, R. M. Darbra, & D. Barceló (Eds.), *Global Risk-Based Management of Chemical Additives I: Production, Usage and Environmental Occurrence* (pp. 83–107). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/698_2011_101

Das, A., & Mishra, S. (2017). Removal of textile dye reactive green-19 using bacterial consortium: Process optimization using response surface methodology and kinetics study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 612–627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.10.005>

Eslami, H., Shariatifar, A., Rafiee, E., Shiranian, M., Salehi, F., Hosseini, S. S., Eslami, G., Ghanbari, R., & Ebrahimi, A. A. (2019). Decolorization and biodegradation of reactive Red 198 Azo dye by a new *Enterococcus faecalis*–*Klebsiella variicola* bacterial consortium isolated from textile wastewater sludge. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(3), 38. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2608-y>

- Gebregiorgis, T., van Hullebusch, E. D., & Hagos, K. (2018). Decolourization of Real Textile Wastewater by the Combination of Photocatalytic and Biological Oxidation Processes. In A. Kallel, M. Ksibi, H. ben Dhia, & N. Khélifi (Eds.), *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions* (pp. 115–117). Springer International Publishing.
- Haque, M. S., Nahar, N., & Sayem, S. M. (2021). Industrial water management and sustainability: Development of SIWP tool for textile industries of Bangladesh. *Water Resources and Industry*, 25, 100145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100145>
- Hossain, N., Bhuiyan, M. A., Pramanik, B. K., Nizamuddin, S., & Griffin, G. (2020). Waste materials for wastewater treatment and waste adsorbents for biofuel and cement supplement applications: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120261>
- Hosseini, A., karimi, H., Foroughi, J., Sabzehmeidani, M. M., & Ghaedi, M. (2021). Heterogeneous photoelectro-Fenton using ZnO and TiO₂ thin film as photocatalyst for photocatalytic degradation Malachite Green. *Applied Surface Science Advances*, 6, 100126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100126>
- Jafari, N., Kasra-Kermanshahi, R., Soudi, M. R., Mahvi, A. H., & Gharavi, S. (2012). Degradation of a textile reactive azo dye by a combined biological-photocatalytic process: *Candida tropicalis* Jks2 -TiO₂/Uv. *Iranian journal of environmental health science & engineering*, 9(1), 33. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-9-33>
- Jeevanantham, S., Saravanan, A., Hemavathy, R. V., Kumar, P. S., Yaashikaa, P. R., & Yuvaraj, D. (2019). Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: A survey on application and future prospects. *Environmental Technology and Innovation*, 13, 264–276. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.12.007>

- Kalia, S., Bhattacharya, A., Prajapati, S. K., & Malik, A. (2021). Utilization of starch effluent from a textile industry as a fungal growth supplement for enhanced α -amylase production for industrial application. *Chemosphere*, 279, 130554. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130554>
- Khan, S., & Malik, A. (2014). Environmental and Health Effects of Textile Industry Wastewater. In A. Malik, E. Grohmann, & R. Akhtar (Eds.), *Environmental Deterioration and Human Health: Natural and anthropogenic determinants* (pp. 55–71). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7890-0_4
- Lim, C. K., Bay, H. H., Aris, A., Abdul Majid, Z., & Ibrahim, Z. (2013). Biosorption and biodegradation of Acid Orange 7 by *Enterococcus faecalis* strain ZL: Optimization by response surface methodological approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(7), 5056–5066. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1476-5>
- Liu, H., & Qiu, H. (2020). Recent advances of 3D graphene-based adsorbents for sample preparation of water pollutants: A review. *Chemical Engineering Journal*, 393(January), 124691. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124691>
- Madhav, S., Ahamad, A., Singh, P., & Mishra, P. K. (2018). A review of textile industry : Wet processing , environmental impacts , and effluent treatment methods. 31–41. <https://doi.org/10.1002/tqem.21538>
- Mendoza-Hernández, J.C., Perea-Vélez, Y.S. Arriola-Morales J., Martínez-Simón S.M. & Pérez-Osorio, G. (2016). Assessing the effects of heavy metals in ACC deaminase and IAA production on plant growth-promoting bacteria. *Microbiological Research*, 188-189, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.05.001>
- Mendoza-Hernández, J.C., Vega-Hernández M., Silveti-Loeza Á., Arriola-Morales J. & Pérez-Osorio G. (2015). Estudio de la estructura de las biopelículas de *Pseudomonas putida* mediante microscopia de fuerza atómica (AFM) en

presencia de permetrina y cipermetrina. *International Multilingual Journal of Contemporary Research*, 3(2), 120-130.
<http://dx.doi.org/10.15640/imjcr.v3n2a12>

Mueses, M. A., Colina-Márquez, J., Machuca-Martínez, F., & Li Puma, G. (2021). Recent advances on modeling of solar heterogeneous photocatalytic reactors applied for degradation of pharmaceuticals and emerging organic contaminants in water. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 30, 100486.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100486>

Nanjani, S., Rawal, K., & Keharia, H. (2020). Decoding social behaviors in a glycerol dependent bacterial consortium during Reactive Blue 28 degradation. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51(4), 1837–1851.
<https://doi.org/10.1007/s42770-020-00303-3>

Nidheesh, P. V., Couras, C., Karim, A. V., & Nadais, H. (2020). A review of integrated advanced oxidation processes and biological processes for organic pollutant removal. *Chemical Engineering Communications*, 0(0), 1–43.
<https://doi.org/10.1080/00986445.2020.1864626>

Patel, Y., & Gupte, A. (2023). Accelerated biodecolorization and detoxification of synthetic textile dye Acid Maroon V by bacterial consortium under redox mediator system. *3 Biotech*, 13(2), 51. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03466-6>

Patil, R., Deshmukh, H., Deollikar, R., Vyavahare, G., Shinde, S., Desai, N., Pandit, S., & Jadhav, J. (2021). Microbial diversity, interactions and biodegradation of hazardous textile wastewater using biological consortium technology. In *Wastewater Treatment Reactors*. BV. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823991-9.00019-8>

Pérez-Osorio, G., Hernández-Gómez, F. D. R., Arriola-Morales, J., Castillo-Morales, M., & Mendoza-Hernández, J. C. (2020). Blue dye degradation in an aqueous

medium by a combined photocatalytic and bacterial biodegradation process. *Turkish Journal of Chemistry*, 44(1), 180–193. <https://doi.org/10.3906/kim-1902-33>

Periyasamy, A. P., Ramamoorthy, S. K., Rwawiire, S., & Zhao, Y. (2018). Sustainable Wastewater Treatment Methods for Textile Industry. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8591-8_2

Poddar, K., Sarkar, D., & Sarkar, A. (2019). Construction of potential bacterial consortia for efficient hydrocarbon degradation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 144, 104770. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104770>

Rodríguez Romero, A. J., Robles Salazar, C. A., Ruiz Picos, R. A., López López, E., Sedeño Díaz, J. E., & Rodríguez Durantes, A. (2014). Índices De Germinación Y Elongación Radical de Calidad del Agua del Río Chalma. *Revista Internacional de Contaminacion Del Ambiente*, 30(3), 307–316.

Roy Choudhury, A. K. (2014). Environmental Impacts of the Textile Industry and Its Assessment Through Life Cycle Assessment. In S. S. Muthu (Ed.), *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing: Environmental and Social Aspects of Textiles and Clothing Supply Chain* (pp. 1–39). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-287-110-7_1

Saha, P., Sivaramakrishna, A., & Rao, K. V. B. (2022). Bioremediation of reactive orange 16 by industrial effluent-adapted bacterial consortium VITPBC6: process optimization using response surface methodology (RSM), enzyme kinetics, pathway elucidation, and detoxification. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24501-8>

Samuchiwal, S., Gola, D., & Malik, A. (2021). Decolourization of textile effluent using native microbial consortium enriched from textile industry effluent. *Journal of*

- Saratale, R. G., Rajesh Banu, J., Shin, H.-S., Bharagava, R. N., & Saratale, G. D. (2020). Textile Industry Wastewaters as Major Sources of Environmental Contamination: Bioremediation Approaches for Its Degradation and Detoxification. In G. Saxena & R. N. Bharagava (Eds.), *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety: Volume I: Industrial Waste and Its Management* (pp. 135–167). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1891-7_7
- Saratale, R. G., Saratale, G. D., Chang, J. S., & Govindwar, S. P. (2010). Decolorization and biodegradation of reactive dyes and dye wastewater by a developed bacterial consortium. *Biodegradation*, 21(6), 999–1015. <https://doi.org/10.1007/s10532-010-9360-1>
- Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P. R., & Reshma, B. (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, 280, 130595. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595>
- Singh, R. P., Singh, P. K., Gupta, R., & Singh, R. L. (2019). Treatment and Recycling of Wastewater from Textile Industry. In R. L. Singh & R. P. Singh (Eds.), *Advances in Biological Treatment of Industrial Waste Water and their Recycling for a Sustainable Future* (pp. 225–266). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1468-1_8
- Varna Vishakar, V., Vidya, C., Hariharan, N., & Ashik Mohamed, M. (2021). Investigational study on microbial degradation of reactive dye by using mixed consortium in the environment. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2036–2039. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.792>

- Vignesh, A., Manigundan, K., Santhoshkumar, J., Shanmugasundaram, T., Gopikrishnan, V., Radhakrishnan, M., Joseph, J., Ayyasamy, P. M., Kumar, G. D., Meganathan, R., & Balagurunathan, R. (2020). Microbial degradation, spectral analysis and toxicological assessment of malachite green by *Streptomyces chrestomyceticus* S20. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 43(8), 1457–1468. <https://doi.org/10.1007/s00449-020-02339-z>
- Vijayalakshmi, S. R., & Muthukumar, K. (2014). Biodegradation of malachite green by *Ochrobactrum* sp. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30(2), 429–437. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1452-8>
- Waghmode, T. R., Kurade, M. B., Sapkal, R. T., Bhosale, C. H., Jeon, B. H., & Govindwar, S. P. (2019). Sequential photocatalysis and biological treatment for the enhanced degradation of the persistent azo dye methyl red. *Journal of Hazardous Materials*, 371(February), 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.004>
- Wanyonyi, W. C., Onyari, J. M., Shiundu, P. M., & Mulaa, F. J. (2017). Biodegradation and Detoxification of Malachite Green Dye Using Novel Enzymes from *Bacillus cereus* Strain KM201428: Kinetic and Metabolite Analysis. *Energy Procedia*, 119, 38–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.044>
- Zeghioud, H., Khellaf, N., Amrane, A., Djelal, H., Bouhelassa, M., Assadi, A. A., & Rtimi, S. (2021). Combining photocatalytic process and biological treatment for Reactive Green 12 degradation: optimization, mineralization, and phytotoxicity with seed germination. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10), 12490–12499. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11282-1>
- Zeghioud, H., Khellaf, N., Amrane, A., Djelal, H., Bouhelassa, M., Assadi, A. A., & Rtimi, S. (2021). Combining photocatalytic process and biological treatment for Reactive Green 12 degradation: optimization, mineralization, and phytotoxicity with seed germination. *Environmental Science and Pollution*

Anexos

*Revista Latinoamericana
el Ambiente
y las Ciencias*

BUAP

www.rlac.buap.mx

Sistemas de biorremediación de colorantes textiles: una perspectiva

Bioremediation systems for textile dyes: a perspective

Gabriela Allende Valera¹, Ana María Pancho Márquez¹, Berenice Sánchez Cerón¹, Galilea López Candelaria¹, Omar Vásquez Jiménez¹, Rafael Rodríguez¹, Fátima Esmeralda Almanza Orea¹, José Carlos Mendoza Hernández^{*}, Gabriela Pérez Osorio¹.

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ingeniería Ambiental, 14 sur y Av. San Claudio.

[*josecarlos.mendozahdez@gmail.com](mailto:josecarlos.mendozahdez@gmail.com)

RESUMEN. La contaminación de los recursos hídricos por compuestos xenobióticos orgánicos e inorgánicos emitidos por la industria textil representan un problema global, particularmente los colorantes textiles comprometen significativamente la calidad estética, química y biológica de los cuerpos de agua. Las tecnologías de remediación tradicionales que incluyen procesos físicos y químicos tienen varios inconvenientes como el alto costo y generación secundaria de residuos, por lo tanto, se ha optado por implementar métodos biológicos más rentables en la que bacterias, plantas, algas, hongos y mediante técnicas biotecnológicas, se puede lograr el restablecimiento del ecosistema dañado y la generación de organismos más degradantes y resistentes. Esta revisión examina estrategias de biorremediación de colorantes textiles mediante el uso de organismos y sus consorcios en la degradación del contaminante, así como estudios de caso donde fueron implementados los sistemas de biorremediación abordados.

ABSTRACT. Contamination of water resources by organic and inorganic xenobiotic compounds from the textile industry is a global concern, particularly textile dyes significantly compromise the aesthetic, chemical and biological quality of water bodies. Traditional remediation technologies including physical, and chemical have several drawbacks such as high cost and secondary waste generation, therefore, it has been chosen to implement more cost-effective biological methods in which bacteria, plants, algae, fungi and through biotechnological techniques, the restoration of the damage ecosystem and the generation of more degrading and more resistant organisms can be achieved. This review examines textile dye bioremediation strategies using organisms and their consortium in degradation of this pollutant, as well as case studies where the bioremediation systems addressed were implemented.

Palabras clave: Biorremediación, colorantes textiles, sistemas aeróbicos y anaeróbicos.

Keywords: Bioremediation, textile dyes, aerobic and anaerobic systems.

Biodegradación De Colorantes Textiles Por *Escherichia Coli*

Berenice Sánchez Cerón
Biotecnología
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
berenice.sanchezceron@viep.com.mx

Gabriela Allende Valera
Biotecnología
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
gabriela.allende@alumno.buap.mx

José Carlos Mendoza Hernández
Ingeniería Ambiental
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
josecarlos.mendozahdez@gmail.com
autor de correspondencia

Gabriela Pérez Osorio
Ingeniería Ambiental
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
gabriela.perez@correo.buap.mx

Abstract— La industria textil es una de las industrias manufactureras con mayor impacto ambiental debido a la contaminación del agua generada por el uso indiscriminado de colorantes textiles. Se han empleado distintos tratamientos para la eliminación de colorantes, entre los cuales, el uso de organismos bacterianos es una de las opciones más viables por los costos y simplicidad de su aplicación. En este estudio se evaluó la efectividad de dos cepas de *Escherichia Coli* (M2N y M6A) aisladas de sitios contaminados con hidrocarburos, para biodegradar tres colorantes textiles comerciales en una concentración de 100 mgL⁻¹: azul marino 606, rojo escarlata 60 y verde ultramar 667 con una biodegradación del 90%, 88% y 67%, respectivamente. La prueba de toxicidad con semillas de *Medicago sativa* determinó que no hay una toxicidad por parte del residuo y por consiguiente este mismo se puede usar para riego.

Keywords—component; *Biodegradación, colorantes textiles, Escherichia Coli, industria textil, tratamientos, toxicidad.*

I. INTRODUCCIÓN

La industria textil es considerada como una de las industrias manufactureras de mayor importancia a nivel mundial y juega un papel significativo en la generación de empleos y el desarrollo de la economía [1,2]. La cadena de producción de textiles está conformada por diferentes procesos, mismos que requieren de una gran cantidad de agua y diversos compuestos químicos, como lo son productos orgánicos, inorgánicos, elementales y poliméricos [3], lo cual hace que esta industria sea un de las más contaminantes, teniendo serias repercusiones en uno de los recursos vitales del ser humano, el agua [1,2]. Dentro de la manufactura textil, el proceso de teñido es uno de los más importantes, sobre todo en países en desarrollo, donde la descarga descontrolada por

parte de las empresas afecta en gran medida el ecosistema [4].

Los efluentes de la industria textil pueden tener efectos tóxicos aditivos o sinérgicos en la vida humana, animal y marina [5], y se ha demostrado que algunos de los colorantes y solventes utilizados en la industria tienen propiedades mutagénicas y cancerígenas [6, 7,8]. Hablando específicamente de los colorantes hay que tener en cuenta que de acuerdo con la estructura química pueden contener elementos más tóxicos para el medio ambiente, por ejemplo, más del 40% de los colorantes usados en la industria contienen cloro, que es un carcinógeno conocido además de algunos metales pesados, como el Cr, Pb, Hg, As y Cd, que no son biodegradables e incluso pueden causar mutaciones en el ADN [4, 5]. De igual forma, la coloración que provocan los colorantes en el agua perjudica la penetración, a través de la superficie, de la luz requerida por los productores primarios para la fotosíntesis, el crecimiento de plantas y de la biota acuática [8, 9,10]. Gita et al [11] reportan que al introducir agua residual textil en cuerpos de agua, se reduce la penetración de la luz solar, conduciendo a una disminución de la actividad fotosintética de las plantas, lo que a su vez reduce el contenido de oxígeno disuelto en el agua, afectando seriamente, la calidad del agua y reduciendo su ocupación en actividades básicas del ser humano.

Otro de los problemas del agua residual de la industria textil es que contiene numerosos contaminantes no detectados debido a las técnicas de detección específicas utilizadas para caracterizarlos químicamente [6] por lo que es de gran importancia realizar estudios sobre la toxicidad de estas.

Actualmente los tratamientos más empleados para remover los colorantes de las aguas residuales textiles, en la industria son la precipitación química y lodos activados [12], pero debido que aún con estos tratamientos aplicados las aguas residuales no cumplen con las normativas para su liberación por lo que surgen tratamientos más innovadores, como la

BIODEGRADACIÓN DE COLORANTES TEXTILES COMERCIALES MEDIANTE CONSORCIOS MICROBIANOS

BIODEGRADATION OF COMMERCIAL TEXTILE DYES THROUGH MICROBIAL CONSORTIA

**Gabriela Allende-Valera², Berenice Sánchez-Cerón², José C. Mendoza-Hernández^{1*},
Gabriela Pérez-Osorio¹**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, (1) Facultad de Ingeniería Ambiental, (2) Facultad de Ciencias Biológicas,
18 sur y Av. San Claudio, Puebla, Pue. México

*autor de correspondencia: josecarlos.mendoza@correo.buap.mx

Recibido: 31/08/2022 - Evaluado: 10/09/2022 - Aceptado: 29/09/2022

RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales textiles cada vez tiene más importancia, pues estas causan problemas ambientales y a la salud, es imperativo buscar métodos de tratamiento entre los que encontramos los biológicos que ofrecen una variedad de ventajas en su utilización, por su bajo costo y la biotransformación. En este estudio se evaluaron dos consorcios bacterianos en la biodegradación de tres colorantes azul marino 606, rojo escarlata 604 y verde ultramar 667 a concentraciones de 50 y 100 mgL⁻¹ con y sin sacarosa. La biodegradación de los colorantes se midió mediante espectrofotometría de UV/vis y los mejores resultados correspondieron al colorante azul marino 606 con un 89% de degradación a una concentración inicial de 50 mgL⁻¹ y 83.89% a una concentración inicial de 100 mgL⁻¹. El estudio de toxicidad por germinación en *Medicago sativa* confirma que no hay toxicidad en los efluentes tratados en comparación con el colorante original.

ABSTRACT

The treatment of textile wastewater is becoming more important since these cause environmental and health problems, it is imperative to search for treatment methods, among which we find biological ones that offer a variety of advantages in their use, due to their low cost and biotransformation. In this study, two bacterial consortia were evaluated in the biodegradation of three dyes navy blue 606, scarlet red 604, and ultramarine green 667 at concentrations of 50 and 100 mgL⁻¹ with and without sucrose. The biodegradation of the dyes was measured by UV/vis spectrophotometry and the best results corresponded to the marine blue dye 606 with 89% degradation at an initial concentration of 50 mgL⁻¹ and 83.89% at an initial concentration of 100 mgL⁻¹. The germination toxicity study in *Medicago sativa* confirms that there is no toxicity in the treated effluents compared to the original dye.

Palabras clave: colorantes antraquinonicos, consorcios, toxicidad, *Medicago sativa*
Keywords: anthraquinone dyes, consortia, toxicity, *Medicago sativa*



Departamento de Ciencias del Agua y del Medio Ambiente



El Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente del Instituto Tecnológico de Sonora, a través de sus Programas Educativos de Ingeniero en Ciencias Ambientales e Ingeniero Químico, en conjunto con los Cuerpos Académicos de Ciencias del Agua, Biotecnología para el Tratamiento y Aprovechamiento de Residuos y Tratamiento de Aguas y Tecnologías Alternas

OTORGA LA PRESENTE CONSTANCIA A:

José Carlos Mendoza Hernández, Berenice Sánchez Cerón,
Gabriela Allende Valera y Gabriela Pérez Osorio

Por su valiosa participación con el tema:

“Biorremediación de aguas residuales textiles mediante consorcios microbianos”

en el VI Congreso Nacional y I Congreso Internacional de Tecnología y Ciencias Ambientales

Llevado a cabo en modalidad híbrida (remoto-presencial) del 17 al 21 de octubre del 2022, en Cd. Obregón, Sonora

FOLIO CNITCA-P22-021

Mtro. David Heberto Encinas Yepis
Coordinador General del Congreso

Dr. Enrico Arturo Yépez González
Responsable del Comité Científico