

# BIODEGRADACIÓN DE COLORANTES TEXTILES COMERCIALES MEDIANTE CONSORCIOS MICROBIANOS

## BIODEGRADATION OF COMMERCIAL TEXTILE DYES THROUGH MICROBIAL CONSORTIA

---

**Gabriela Allende-Valera<sup>2</sup>, Berenice Sánchez-Cerón<sup>2</sup>, José C. Mendoza-Hernández<sup>1\*</sup>,  
Gabriela Pérez-Osorio<sup>1</sup>**

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<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> y 83.89% a una concentración inicial de 100 mgL<sup>-1</sup>. 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<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> and 83.89% at an initial concentration of 100 mgL<sup>-1</sup>. 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*

## INTRODUCCIÓN

La industria textil juega un papel importante en la economía mundial, sin embargo, a pesar de la importancia que esta representa, también es considerada como una de las industrias más contaminantes teniendo una lista ilimitada de los impactos negativos que genera en el medio ambiente lo cual se atribuye principalmente al uso de energía, el empleo de una amplia variedad compuestos químicos tóxicos, la cantidad de agua requerida y el gran volumen de desechos que se generan a lo largo de los procesos de producción de textiles (Moazzem *et al.*, 2022; Moorthy *et al.*, 2022).

Una de las principales causas por las cuales la industria textil es considerada como una de las más contaminantes es debido al volumen de agua residual generada y la toxicidad de esta (Gita *et al.*, 2019). Además, este tipo de efluentes es comúnmente liberado por las plantas o industrias sin dar un tratamiento previo, desencadenando una serie de complicaciones ambientales que afectan a la flora y fauna presente (Moorthy *et al.*, 2022). Este tipo de efluente contiene diversos compuestos, entre los cuales, los colorantes resaltan debido a las cantidades exorbitantes que se utilizan, por lo cual, son considerados como uno de los contaminantes del agua más importantes debido a los daños que estos causan en los seres vivos, teniendo efectos cancerígenos, mutagénicos, genotóxicos, teratogénicos, tóxicos y no biodegradables (Onder *et al.*, 2022; Gita *et al.*, 2019).

Los colorantes textiles provocan daños en el ambiente y la salud, principalmente por ser moléculas no biodegradables que se relaciona con su característica de ser de un color intenso, pH variable, alto contenido de sal y carga orgánica (Santana *et al.*, 2019; Pieczyńska *et al.*, 2019). Los colorantes reducen la penetración de la luz, lo que conlleva una reducción de la actividad fotosintética y causa deficiencia de oxígeno en ambientes acuáticos (Gita *et al.*, 2019) afectando la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) de los cuerpos de agua, lo que conlleva a la muerte de la fauna y la flora acuática; además de disminuir la tasa de germinación y producción de biomasa de diversas especies de plantas (Maqbool *et al.*, 2016). Cuando el tratamiento del agua residual textil es poco eficiente o nulo los productos de descomposición de los colorantes son tóxicos, cancerígenos o mutagénicos para las formas de vida debido a la presencia de carcinógenos, como bencidina, naftaleno y otros compuestos aromáticos (Gita *et al.*, 2021). Cuando existe una exposición a largo plazo se puede provocar una serie de enfermedades en humanos como dermatitis, ulceración de la piel, diarrea, hemorragia, cáncer de vejiga, problemas respiratorios y supresión del sistema inmunitario (Maqbool *et al.*, 2016).

Debido a la contaminación causada por este tipo de efluentes, se han investigado distintos procesos que permitan remover los colorantes y así darles un tratamiento adecuado a las aguas residuales generadas para que estas no representen un peligro al medio ambiente y al ser humano. Se han aplicado algunos métodos fisicoquímicos incluyendo la adsorción, filtración por membrana, coagulación/floculación, entre otros (Santana *et al.*, 2019), pero se han encontrado algunas limitantes durante su aplicación, por otra parte, el empleo de microorganismos ha mostrado resultados prometedores debido a la amplia variedad de microorganismos que tienen la capacidad de degradar colorantes recalcitrantes sin generar metabolitos tóxicos y a un precio económicamente rentable (Shafqat *et al.*, 2017). Se han observado beneficios en el empleo de consorcios microbianos en el tratamiento biológico de estos residuos como un mayor grado de biodegradación y mineralización por la actividad metabólica sinérgica de la comunidad mixta microbiana en conjunto, atacar las moléculas de colorante en diferentes posiciones o tener la capacidad de utilizar metabolitos producidos por las cepas coexistentes para promover la descomposición (Saroj *et al.*, 2015).

El objetivo general de este trabajo es proponer dos consorcios bacterianos en la degradación de tres colorantes antraquinónicos (azul marino 606, rojo escarlata 604 y verde ultramar 667) en dos concentraciones de 50 y 100 mgL<sup>-1</sup>, además de evaluar la toxicidad de los residuos del tratamiento en semillas de *Medicago sativa*.

## METODOLOGÍA

### Cepas microbianas

Las cepas utilizadas fueron aisladas e identificadas anteriormente por Sánchez-Cerón *et al.* (2022), Mendoza-Hernández *et al.* (2015) y Mendoza-Hernández *et al.* (2016) (Tabla 1).

Tabla 1: Cepas de especies identificadas previamente a utilizar en la formación de consorcios.

Cepa	Taxon de identificación
M6A	<i>Escherichia coli.</i>
M2N	<i>Escherichia coli.</i>
B03	<i>Pseudomonas putida</i>
B44	<i>Pseudomonas putida</i>
N9	<i>Enterobacter sp.</i>
N16	<i>Enterobacter sp.</i>
K120	<i>Serratia sp.</i>
K131	<i>Enterobacter sp.</i>
MC188	<i>Salmonella sp.</i>

### Generación de inóculo bacteriano

Las cepas se crecieron en caldo Luria Bertani (10 gL<sup>-1</sup> peptona de caseína, 5 gL<sup>-1</sup> extracto de levadura y 10 gL<sup>-1</sup> de ClNa) durante 48 h a 30 °C. Después del tiempo de incubación, se centrifugaron durante 15 minutos a 8000 rpm. Posteriormente, el sobrenadante se decantó y el pellet fue resuspendido en Medio Mínimo Mineral (0.4 gL<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 2 gL<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 0.2 gL<sup>-1</sup> MgSO<sub>4</sub>, 0.1 gL<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>, 0.005 gL<sup>-1</sup> FeSO<sub>4</sub>, 0.002 gL<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>B<sub>3</sub>O<sub>3</sub>, 0.005 gL<sup>-1</sup> ZnSO<sub>4</sub>, 0.001 NaMo, 0.003 MnSO<sub>4</sub>, 0.001 CoSO<sub>4</sub>, 0.001 gL<sup>-1</sup> CuSO<sub>4</sub>, 0.001 gL<sup>-1</sup> NiSO<sub>4</sub>) ajustando a 0.5 A a 600 nm que equivale a 1x10<sup>9</sup> UFCmL<sup>-1</sup> aproximadamente. Con las cepas seleccionadas se formaron dos consorcios, colocando 500 µl de cada cepa, el consorcio uno (C1) se formó con las cepas: *Escherichia coli* M6A, *Pseudomonas putida* B03, *Enterobacter sp.* N9, *Serratia sp.* K120 y *Enterobacter sp.* K131, por otra parte, el consorcio dos (C2) se formó con las cepas: *Escherichia coli* M2N, *Pseudomonas putida* B44, *Enterobacter sp.* N16, *Salmonella sp.* MC188 y *Enterobacter sp.* K131.

### Biodegradación de colorantes

Para este ensayo se utilizaron los colorantes de tipo antraquinonico de la marca comercial Mariposa®: azul marino 606, rojo escarlata 604 y verde ultramar 667 en concentraciones de 50 y 100 mgL<sup>-1</sup>. Se realizaron cuatro tratamientos por duplicado con Medio Mínimo Mineral (MMM), el primero con el colorante a una concentración de 50 mgL<sup>-1</sup> y el segundo 50 mgL<sup>-1</sup> adicionado con 3 gL<sup>-1</sup> de sacarosa, el tercer ensayo fue con el colorante a una concentración de 100 mgL<sup>-1</sup> y el cuarto fue a 100 mgL<sup>-1</sup> adicionado con 3 gL<sup>-1</sup> de sacarosa. Cada uno de los ensayos se inocularon con el consorcio correspondiente y se incubaron durante 5 días a 30 °C.

Para cada uno de los colorantes utilizados se realizó una curva de calibración de 10 a 100 mgL<sup>-1</sup> y se realizó un barrido con el espectrofotómetro UV/Vis (PerkinElmer modelo Lambda 25) para poder determinar la longitud de onda a la que absorbe cada colorante.

Durante los 5 días se tomó una alícuota diariamente de 2mL, misma que se centrifugó durante 15 minutos a 11 000 rpm y, posteriormente, al sobrenadante se le realizó una lectura con el espectrofotómetro UV/Vis (PerkinElmer modelo Lambda 25) a la longitud de onda correspondiente de cada colorante.

### Cinética de biodegradación

Se realizó un análisis para determinar la cinética de degradación de los colorantes utilizados a partir de los datos obtenidos en el espectrofotómetro UV/Vis. El modelado cinético del proceso de degradación se realizó de acuerdo con la ecuación 1, 2 y 3 (Wanyonyi *et al.*, 2017); esto para encontrar el orden de la reacción.

$$C_t = C_0 - k_0 t \quad (1)$$

$$\ln(C_t) = k_1 t + \ln(C_0) \quad (2)$$

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_0} + k_2 t \quad (3)$$

Donde  $C_t$  es la concentración de colorante ( $\text{mgL}^{-1}$ ) después del tratamiento en un tiempo determinado ( $t$ ) y  $C_0$  es la concentración inicial del colorante ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Para establecer la constante de grado 0 ( $K_0$  en  $\text{mgL}^{-1}/\text{h}$ ) se usaron los valores de la concentración ( $C_t$ ) contra el tiempo, para la constante de grado 1 ( $K_1$  en  $\text{h}^{-1}$ ) se consideraron los valores del logaritmo natural de la concentración ( $C_t$ ) contra el tiempo y, por último, para la constante de grado 2 ( $K_2$  en  $\text{mgL}^{-1}/\text{h}$ ) se tomaron en cuenta los valores del inverso de la concentración ( $C_t$ ) contra el tiempo.

Finalmente, se definió el factor de correlación ( $R^2$ ), la pendiente ( $m$ ) y la ordenada al origen ( $b$ ).

### Toxicidad de productos de biodegradación

Las pruebas de toxicidad se realizaron con semillas de *Medicago sativa* (también llamada alfalfa). El método consistió en exponer las semillas a la solución del colorante antes y después del tratamiento durante 120 horas a una temperatura de 25 °C en ausencia de luz. Para la prueba se colocaron 10 semillas, previamente desinfectadas con una solución de hipoclorito de sodio al 3 % durante 1 minuto y posterior lavado con agua destilada, sobre un disco de papel filtro en una caja Petri para después humedecer con 5 ml de la solución de colorante. Se utilizó agua destilada como control. Al término del tratamiento se determinó el porcentaje de la germinación relativa de semillas (GRS) (ec. 4), el crecimiento relativo de la radícula (CRR) (ec. 5) y el índice de germinación (IG) (ec. 6) de acuerdo con Rodríguez Romero *et al.* (2014).

$$GRS (\%) = \frac{\text{Número de semillas germinadas con el residuo de la biodegradación}}{\text{Número de semillas germinadas en agua dura (Control)}} \times 100 \quad (4)$$

$$CRR (\%) = \frac{\text{Longitud promedio de la radícula con el residuo de la biodegradación}}{\text{Longitud promedio de la radícula en agua dura (Control)}} \times 100 \quad (5)$$

$$IG = \frac{GRS \times CRR}{100} \quad (6)$$

### Análisis estadístico

En el caso de la degradación de los colorantes a analizar, las estimaciones analíticas se realizaron por duplicado y se consideraron los valores promedio con sus respectivas desviaciones estándar.

## RESULTADOS

### Biodegradación de colorantes

Para la determinación de la longitud de onda en la que se efectuó la lectura del porcentaje de degradación de los colorantes utilizados se realizó un barrido espectral, teniendo como resultado que el colorante azul marino 606 absorbe a 553nm, el rojo escarlata 604 absorbe a 508nm y el verde ultramar 667 absorbe a 384nm (Tabla 2).

Tabla 2: Longitud de onda ( $\lambda$ ) en la que absorbe cada colorante.

Colorante textil	Longitud de onda ( $\lambda$ )
Azul marino 606	553 nm
Rojo escarlata 604	508 nm
Verde ultramar 667	384 nm

Después de aplicar el tratamiento biológico utilizando los consorcios formados se observó que, la degradación de los colorantes a una concentración inicial de 50 y 100 mgL<sup>-1</sup> fue disminuyendo conforme pasaban los días, cada colorante mostrando diferentes porcentajes de biodegradación como se muestra a continuación.

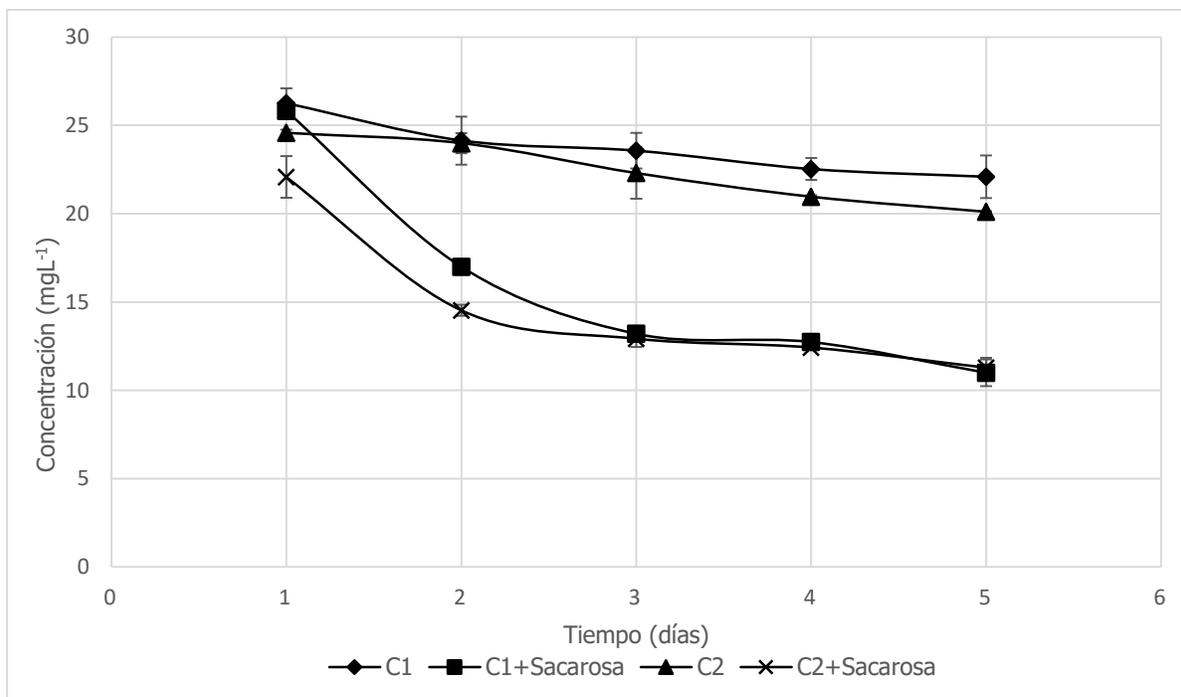


Fig. 1: Variación de la concentración del colorante azul marino 606 [50 mgL<sup>-1</sup>] respecto al tiempo al aplicar el tratamiento biológico con los consorcios C1 y C2

Tabla 3: Degradación del colorante azul marino 606 [50 mgL<sup>-1</sup>] aplicando los consorcios C1 y C2

Tiempo (días)	Porcentaje de degradación del colorante azul marino 606 [50 mgL <sup>-1</sup> ]			
	C1	C1+Sacarosa	C2	C2+Sacarosa
1	73.7547	74.182	75.4339	77.92405
2	75.8607	83.0007	76.01365	85.46895
3	76.43515	86.79475	77.7047	87.07595
4	77.4745	87.26265	79.0385	87.5762
5	77.9113	89.00105	79.88875	88.71555

En la figura 1 y tabla 3 se reportan los resultados obtenidos de la biodegradación del colorante azul marino 606 a 50 mgL<sup>-1</sup>, en donde se muestra que, el consorcio C1 después de 5 días de tratamiento mostró una concentración de 22.0887 mgL<sup>-1</sup>, lo cual equivale a un porcentaje de degradación del 77.9113%. Por otra parte, el ensayo con el C1 con sacarosa tuvo una concentración final de 10.9989 mgL<sup>-1</sup>, que corresponde al 89.0010% de degradación. En el caso del consorcio C2 al finalizar el tratamiento alcanzó una concentración de 20.1112 mgL<sup>-1</sup> equivalente al 79.8887% de degradación, cuando el C2 fue adicionado con sacarosa se alcanzó una concentración final de 11.2844 mgL<sup>-1</sup>, siendo el 88.7155% de degradación. Tomando en cuenta los resultados reportados en la tabla 3, cabe mencionar que los ensayos con los que se obtuvo mayor porcentaje de degradación son los que fueron adicionados con sacarosa, siendo en este caso el consorcio C1+Sacarosa el que obtuvo el porcentaje de degradación más alto (89.0010%).

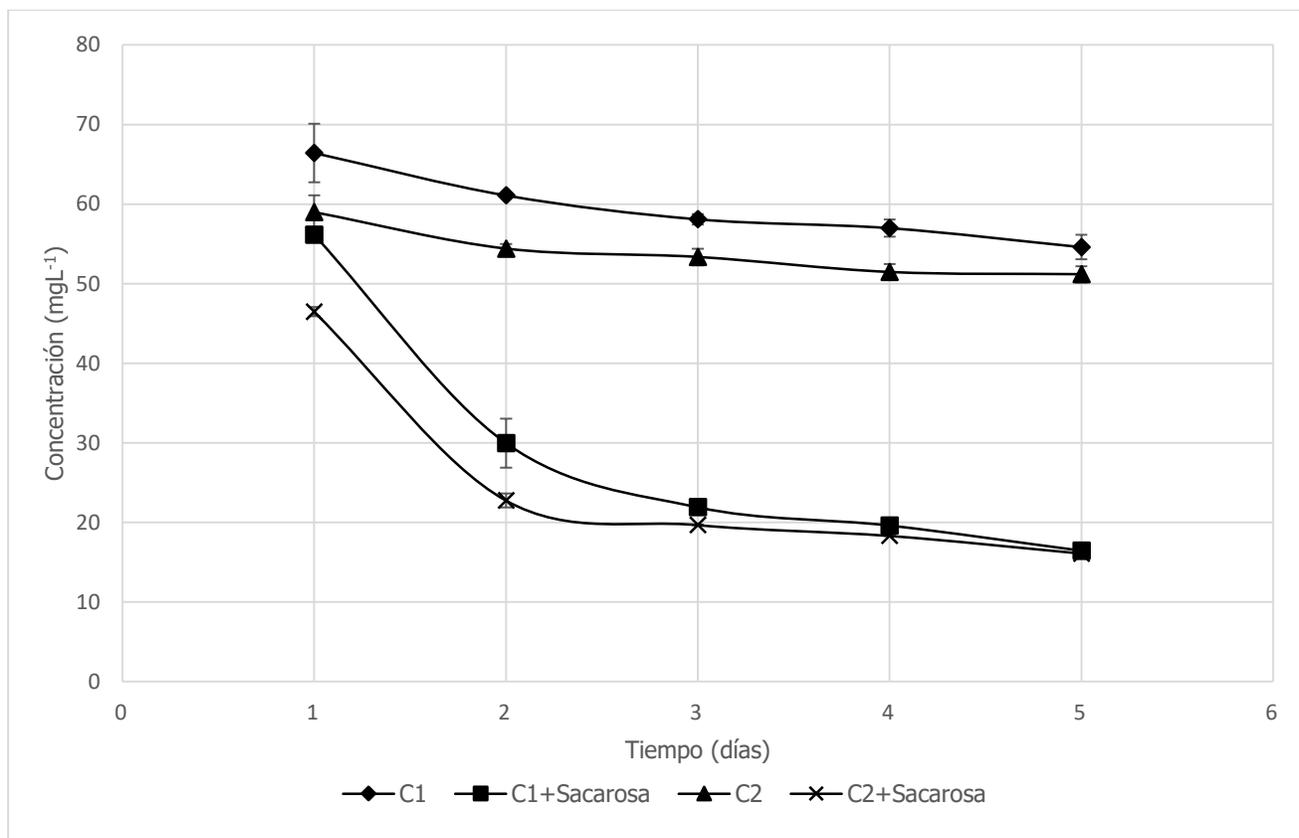


Fig. 2: Variación de la concentración del colorante azul marino 606 [100 mgL<sup>-1</sup>] respecto al tiempo al aplicar el tratamiento biológico con los consorcios C1 y C2

Tabla 4: Degradación del colorante azul marino 606 [100 mgL<sup>-1</sup>] aplicando los consorcios C1 y C2

Tiempo (días)	Degradación del colorante azul marino 606 [100 mgL <sup>-1</sup> ]			
	C1	C1+Sacarosa	C2	C2+Sacarosa
1	33.58295	43.86295	41.00685	53.508
2	38.90835	70.02785	45.59265	77.23095
3	41.90185	78.0878	46.6452	80.31795
4	43.01015	80.38135	48.54005	81.67875
5	45.3901	83.54065	48.8207	83.8921

La figura 2 y tabla 4 muestran los resultados obtenidos de la degradación del colorante azul marino 606 a 100 mgL<sup>-1</sup> después de aplicar los ensayos. Se observa que, después de 5 días de tratamiento, el consorcio C1 obtuvo una concentración final de 54.6099 mgL<sup>-1</sup>, equivalente al 45.3901% de degradación, pero, cuando el C1 fue complementado con sacarosa se alcanzó una concentración de 16.4593 mgL<sup>-1</sup>, lo cual corresponde al 83.5406% de degradación. El consorcio C2 después del quinto día de tratamiento mostró una concentración final de 51.1793 mgL<sup>-1</sup> siendo el 48.8207% de degradación, en el ensayo con el C2 complementado con sacarosa se tuvo una concentración de 16.1079 mgL<sup>-1</sup> lo cual equivale a un 83.8921% de degradación. De acuerdo a los resultados se infiere que los ensayos con mayor porcentaje de degradación son los adicionados con sacarosa, teniendo una mínima diferencia en los valores de degradación como se reportó en la tabla 4.

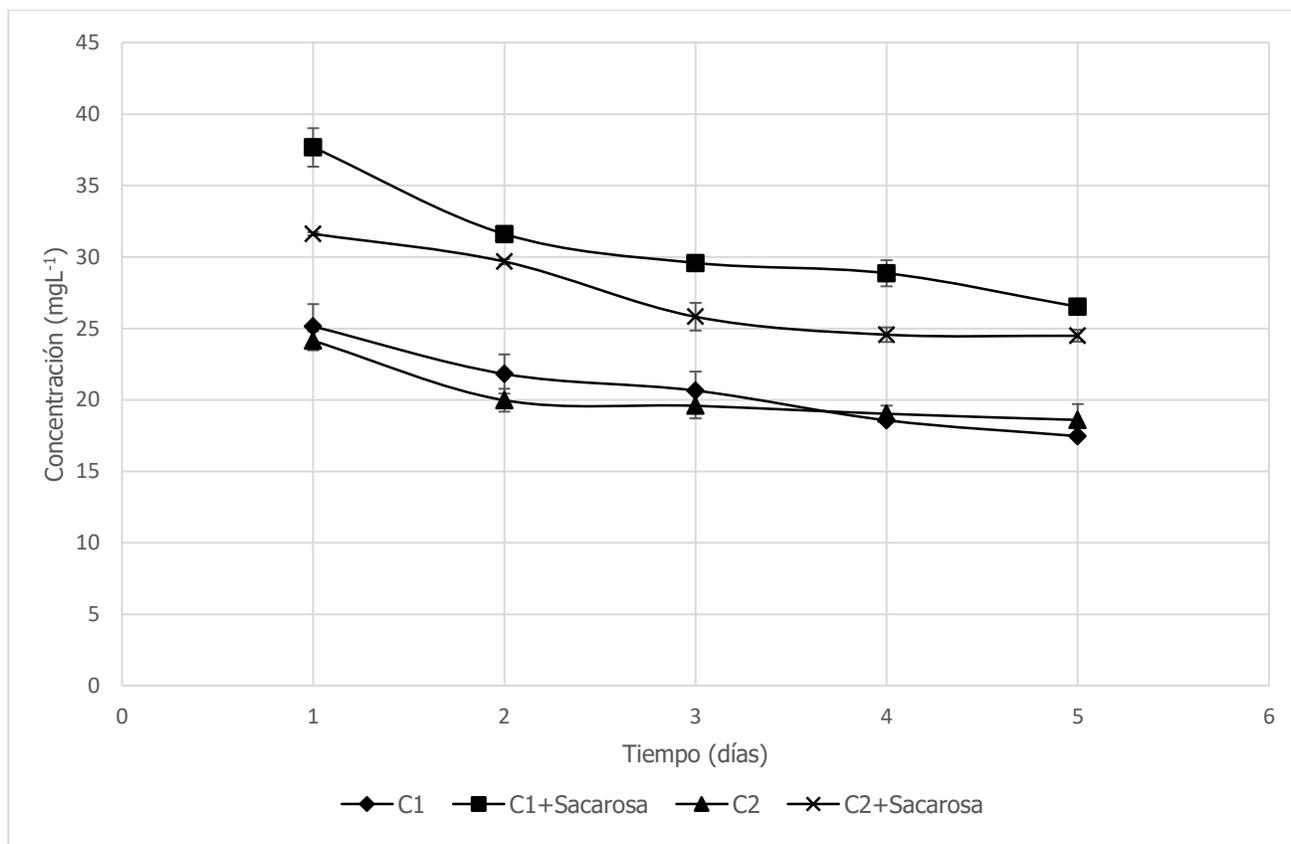


Fig. 3: Variación de la concentración del colorante rojo escarlata [ $50 \text{ mgL}^{-1}$ ] respecto al tiempo al aplicar el tratamiento biológico con los consorcios C1 y C2

Tabla 5: Degradación del colorante rojo escarlata 604 [ $50 \text{ mgL}^{-1}$ ] aplicando los consorcios C1 y C2

Tiempo (días)	Degradación del colorante rojo escarlata 604 [ $50 \text{ mgL}^{-1}$ ]			
	C1	C1+Sacarosa	C2	C2+Sacarosa
1	74.8573	62.32425	75.85805	68.37145
2	78.18205	68.3873	80.0198	70.3133
3	79.3442	70.41215	80.4087	74.17565
4	81.42195	71.1366	80.9669	75.43145
5	82.53245	73.4735	81.39715	75.50985

De acuerdo con los datos de biodegradación del colorante rojo escarlata a  $50 \text{ mgL}^{-1}$  reportados en la figura 3 y tabla 5, después de aplicar el tratamiento el consorcio C1 alcanzó una concentración final de  $17.4675 \text{ mgL}^{-1}$  por lo tanto, tuvo un porcentaje de degradación de 82.53245%, siendo el valor más alto de degradación. Cuando al consorcio C1 se le adicionó sacarosa, se obtuvo una concentración final de  $26.5265 \text{ mgL}^{-1}$  lo cual equivale al 73.4735% de degradación. Al utilizar el consorcio C2 la concentración final fue de  $18.6028 \text{ mgL}^{-1}$ , lo cual es el 81.39715% de degradación, siendo el segundo valor más alto de degradación. Por otra parte, cuando el C2 se complementó con sacarosa la concentración final fue de  $24.4901 \text{ mgL}^{-1}$ , teniendo un porcentaje de degradación de 75.50985%.

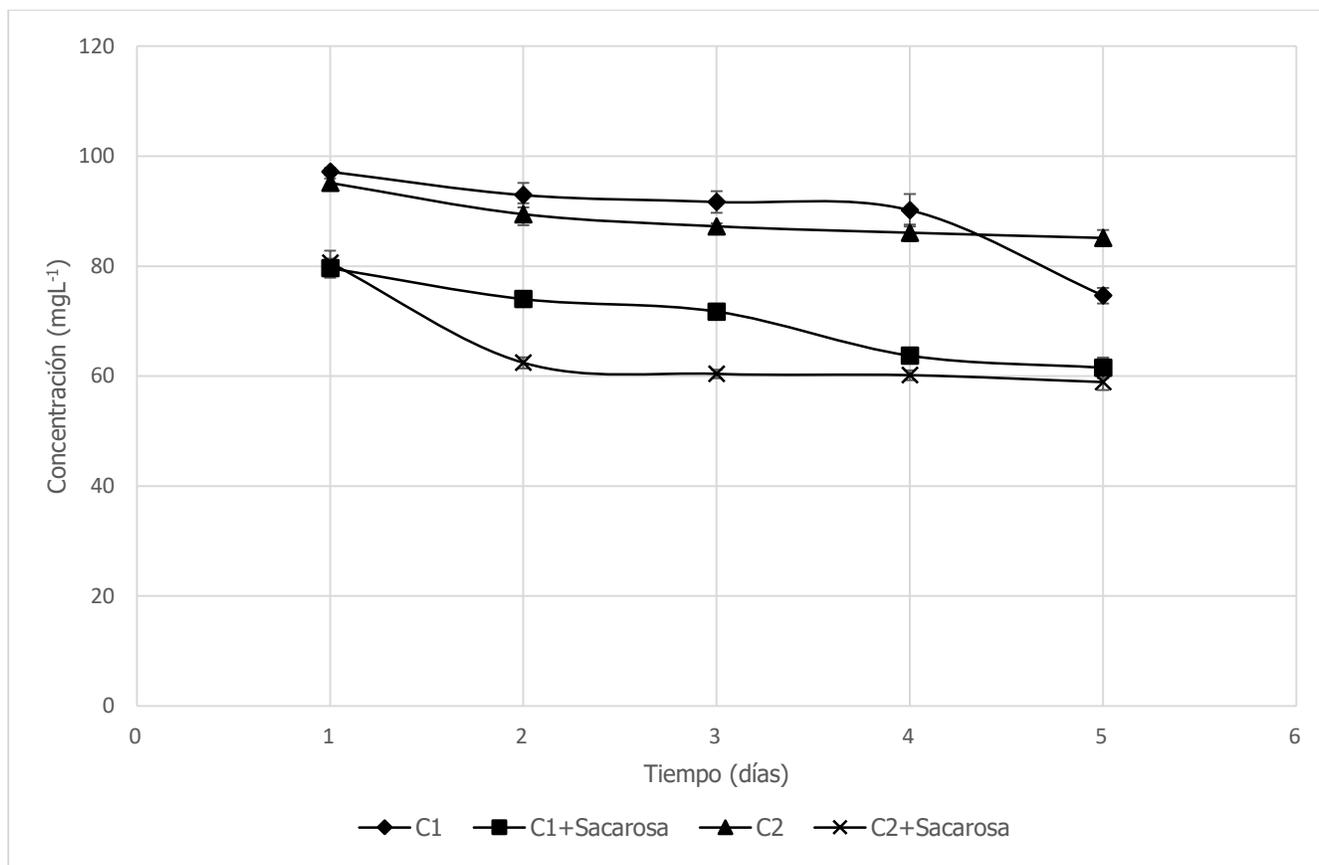


Fig. 4: Variación de la concentración del colorante rojo escarlata 604 [100 mgL<sup>-1</sup>] respecto al tiempo al aplicar el tratamiento biológico con los consorcios C1 y C2

Tabla 6: Degradación del colorante rojo escarlata 604 [100 mgL<sup>-1</sup>] aplicando los consorcios C1 y C2

Tiempo (días)	Degradación del colorante rojo escarlata 604 [100 mgL <sup>-1</sup> ]			
	C1	C1+Sacarosa	C2	C2+Sacarosa
1	2.82685	20.37175	4.87175	19.3709
2	7.0845	26.0111	10.57155	37.58005
3	8.33225	28.2769	12.7695	39.60455
4	9.8314	36.30355	13.9383	39.8356
5	25.3737	38.50405	14.88885	41.0999

En la figura 4 y tabla 6 se muestran los resultados de la degradación del colorante rojo escarlata 604 a 100 mgL<sup>-1</sup>. De acuerdo con los resultados obtenidos después de 5 días de tratamiento, el consorcio C1 mostró una concentración final de 74.6263 mgL<sup>-1</sup>, equivalente al 25.3737% de degradación, por otra parte, cuando se adicionó sacarosa al C1 se alcanzó una concentración de 61.49595 mgL<sup>-1</sup>, siendo un 38.50405 % de degradación. Para el caso del consorcio C2 la concentración al quinto día fue de 85.1111 mgL<sup>-1</sup>, lo cual equivale al 14.88885% de degradación. Cuando al consorcio C2 se le adicionó sacarosa la concentración final obtenida fue de 58.9001 mgL<sup>-1</sup> lo cual tiene un porcentaje de degradación de 41.0999%, siendo el porcentaje de degradación más alto.

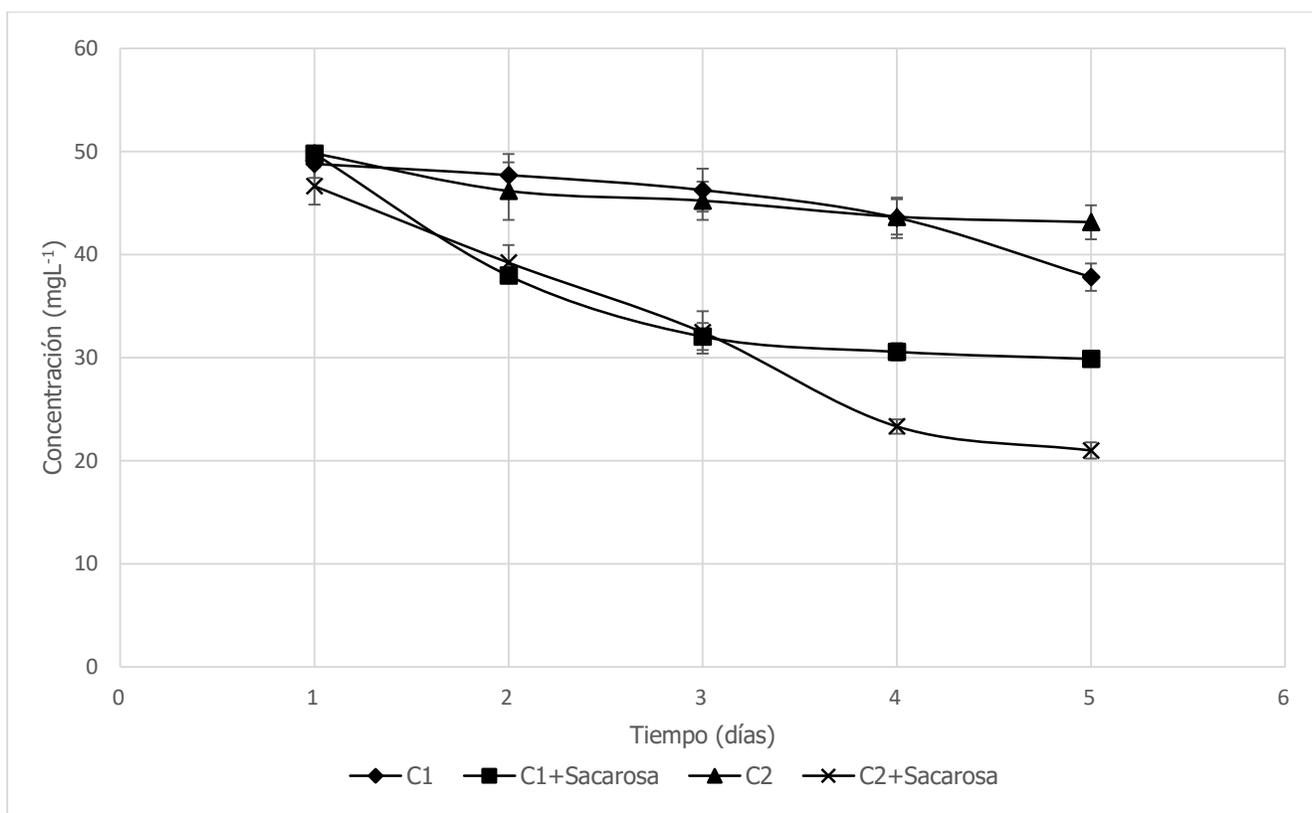


Fig. 5: Variación de la concentración del colorante verde ultramar 667 [50 mgL<sup>-1</sup>] respecto al tiempo al aplicar el tratamiento biológico con los consorcios C1 y C2

Tabla 7: Degradación del colorante verde ultramar 667 [50 mgL<sup>-1</sup>] aplicando los consorcios C1 y C2

Tiempo (días)	Degradación del colorante verde ultramar [50 mgL <sup>-1</sup> ]			
	C1	C1+Sacarosa	C2	C2+Sacarosa
1	51.21095	50.21685	50.1843	53.34895
2	52.2994	62.0495	53.83305	60.7764
3	53.75235	67.9504	54.7827	67.54445
4	56.43645	69.43245	56.3443	76.67385
5	62.18935	70.1191	56.865	79.01335

Los datos correspondientes a la degradación del colorante verde ultramar 604 a 50 mgL<sup>-1</sup> se muestran en la figura 5 y tabla 7. Al finalizar el tratamiento, el consorcio C1 obtuvo una concentración de 37.8106 mgL<sup>-1</sup>, lo cual indica un porcentaje de degradación de 62.18935%. Cuando el C1 fue adicionado con sacarosa la concentración final fue de 29.8809 mgL<sup>-1</sup>, equivalente al 70.1191% de degradación. Por otra parte, el consorcio C2 mostró una concentración final de 43.135 mgL<sup>-1</sup>, lo cual equivale al 56.865% de degradación, siendo el valor de degradación más bajo. El consorcio C2 complementado con sacarosa obtuvo la concentración final más baja, siendo esta de 20.9866 mgL<sup>-1</sup>, por lo tanto, el porcentaje de degradación correspondiente es de 79.01335%, siendo el más alto.

En la figura 6 y tabla 8 se muestran los resultados correspondientes a la degradación del colorante verde ultramar 667 a 100 mgL<sup>-1</sup>. Después de 5 días de tratamiento se observa que el consorcio C1 tuvo una concentración final de 62.21335 mgL<sup>-1</sup>, lo cual indica que su porcentaje de degradación fue de 37.78665%, siendo este el valor más bajo.

Cuando se aplicó el consorcio C1 con sacarosa la concentración fue de  $56.2587 \text{ mgL}^{-1}$ , lo cual equivale al 43.7413% de degradación. Por otra parte, con el consorcio C2 se alcanzó una concentración de  $58.368 \text{ mgL}^{-1}$ , indicando que se alcanzó el 41.632%, sin embargo, el consorcio C2 con sacarosa mostro una concentración final de  $29.6339 \text{ mgL}^{-1}$  lo que equivale al 70.36605% de degradación, siendo este el porcentaje de degradación más alto.

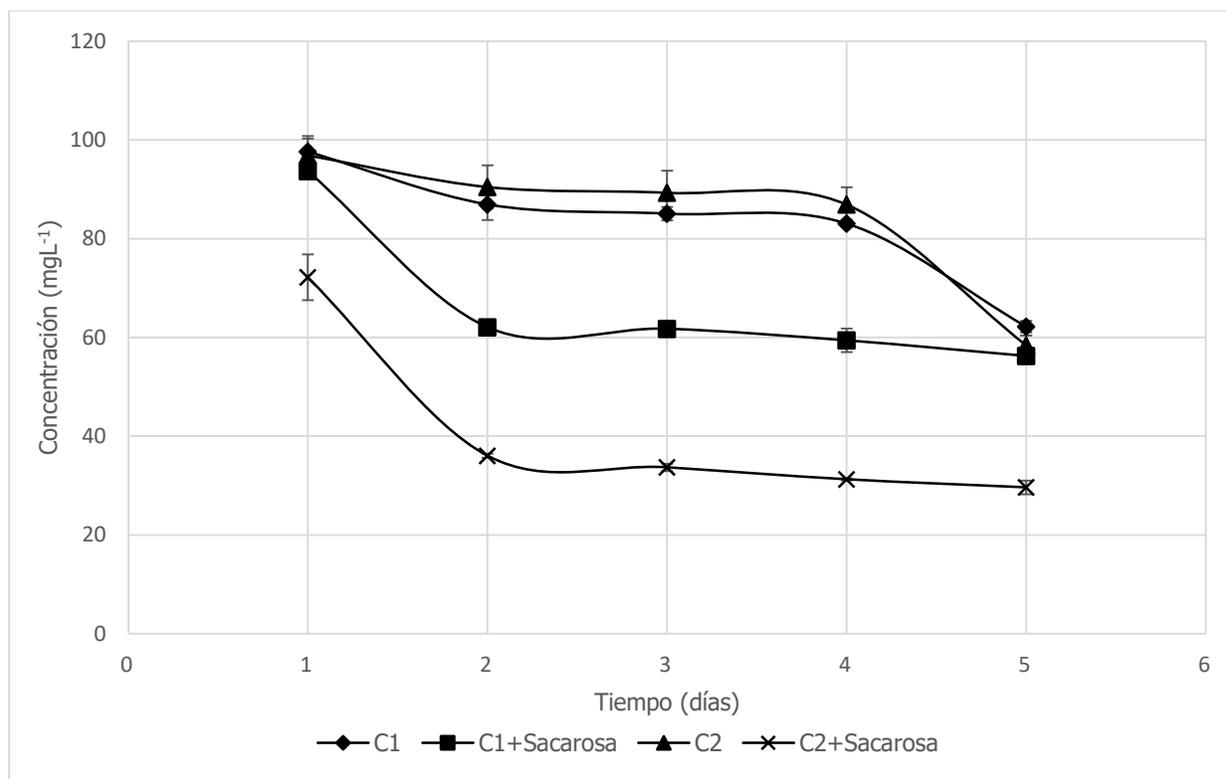


Fig. 6: Variación de la concentración del colorante verde ultramar 667 [ $100 \text{ mgL}^{-1}$ ] respecto al tiempo al aplicar el tratamiento biológico con los consorcios C1 y C2

Tabla 8: Degradación del colorante verde ultramar 667 [ $100 \text{ mgL}^{-1}$ ] aplicando los consorcios C1 y C2

Tiempo (días)	Degradación del colorante verde ultramar 667 [ $100 \text{ mgL}^{-1}$ ]			
	C1	C1+Sacarosa	C2	C2+Sacarosa
1	2.3933	6.3195	3.1213	27.81565
2	13.0594	37.91305	9.5291	63.9383
3	14.9396	38.2295	10.69835	66.3035
4	16.94395	40.5926	13.086	68.7276
5	37.78665	43.7413	41.632	70.36605

### Cinética de biodegradación

La cinética de decoloración se modeló utilizando modelos cinéticos de orden cero, primer orden y segundo orden. Se obtuvieron los valores de los parámetros cinéticos para cada uno de los colorantes utilizados en el tratamiento biológico. Los valores de las constantes cinéticas de degradación ( $K_0$ ,  $K_1$  y  $K_2$ ) así como los coeficientes de correlación ( $R^2$ ) para ver el modelo al que mejor se acopló la degradación para cada colorante se muestran en las

Tablas 9-14; donde de acuerdo con el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) todos los colorantes se ajustaron mejor al primer orden de reacción, es decir, la biodegradación es dependiente de la concentración inicial del colorante.

Tabla 9: Parámetros cinéticos del colorante Azul marino 606 en el tratamiento a 50 mgL<sup>-1</sup>

Tratamiento	K0	R2	K1	R2	K3	R2
C1	-0.0413625	0.92402897	-0.0017251	<b>0.99929349</b>	0.00007212	0.9939557
C1 + S	-0.1427558	0.81270287	-0.0083713	<b>0.98727033</b>	0.00051914	0.91845469
C2	-0.0497275	0.980555328	-0.0022291	<b>0.99937224</b>	0.00010021	0.99507313
C2 + S	-0.0987091	0.754128331	-0.006245	<b>0.99359113</b>	0.00040963	0.95942585

Tabla 10: Parámetros cinéticos del colorante Azul marino 606 en el tratamiento a 100 mgL<sup>-1</sup>

Tratamiento	K0	R2	K1	R2	K3	R2
C1	-0.11548375	0.930666945	-0.0019207	<b>0.99911359</b>	0.00003203	0.98915722
C1 + S	-0.3737875	0.77927348	-0.01199	<b>0.97556426</b>	0.00043122	0.85173625
C2	-0.0857291	0.832070557	-0.0015562	<b>0.99951317</b>	0.00002831	0.99496575
C2 + S	-0.09870916	0.754128331	-0.006245	<b>0.99359113</b>	0.00040963	0.95942585

Tabla 11: Parámetros cinéticos del colorante Rojo escarlata 604 en el tratamiento a 50 mgL<sup>-1</sup>

Tratamiento	K0	R2	K1	R2	K3	R2
C1	-0.0774589	0.9617083	-0.00370498	<b>0.99677151</b>	0.00017894	0.97613599
C1 + S	-0.1043654	0.8786417	-0.00330303	<b>0.997051129</b>	0.00010552	0.96077548
C2	-0.0501054	0.72866065	-0.00237432	<b>0.99924799</b>	0.00011316	0.99436848
C2 + S	-0.0808125	0.89673635	-0.00292006	<b>0.999317264</b>	0.00010604	0.99260227

Tabla 12: Parámetros cinéticos del colorante Rojo escarlata 604 en el tratamiento a 100 mgL<sup>-1</sup>

Tratamiento	K0	R2	K1	R2	K3	R2
C1	-0.19933541	0.771298884	-0.00232505	<b>0.9989834</b>	0.00002728	0.832831
C1 + S	-0.19398791	0.969475697	-0.00277743	<b>0.99878153</b>	0.000039957	0.97434998
C2	-0.09750375	0.858388024	-0.00108712	<b>0.99977744</b>	0.000012133	0.97467341
C2 + S	-0.19047291	0.630424816	-0.00277015	<b>0.99956021</b>	0.000040631	0.99324838

Tabla 13: Parámetros cinéticos del colorante Verde ultramar 667 en el tratamiento a 50 mgL<sup>-1</sup>

Tratamiento	K0	R2	K1	R2	K3	R2
C1	-0.10872458	0.88658554	-0.00250231	<b>0.998820947</b>	0.000057889	0.8546296
C1 + S	-0.19661417	0.80579794	-0.00515524	<b>0.995977841</b>	0.00013801	0.83759266
C2	-0.06460000	0.90471457	-0.00140211	<b>0.999553921</b>	0.000030479	0.88883194
C2 + S	-0.28110000	0.97785075	-0.00882220	<b>0.989310283</b>	0.000290850	0.78521355

Tabla 14: Parámetros cinéticos del colorante Verde ultramar 667 en el tratamiento a 100 mgL<sup>-1</sup>

Tratamiento	K0	R2	K1	R2	K3	R2
C1	-0.11548375	0.93066694	-0.00192075	<b>0.99911359</b>	0.00003203	0.98915722
C1 + S	-0.49878708	0.70514724	-0.01396343	<b>0.97297683</b>	0.00046252	0.81938711
C2	-0.11548375	0.93066694	-0.00192075	<b>0.99911359</b>	0.00003207	0.98915722
C2 + S	-0.49878708	0.70514724	-0.01396343	<b>0.97297683</b>	0.00046252	0.81938711

## Toxicidad de productos de biodegradación

En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos después de las 120 h de incubación de las semillas de *Medicago sativa* expuestas a los colorantes sin tratamiento previo misma que se compara con la respuesta de las semillas de la especie con los residuos del colorante azul marino 606 (Tabla 16 y 17), rojo escarlata 604 (Tabla 18 y 19) y verde ultramar 667 (Tabla 20 y 21).

En los tres colorantes sin un tratamiento previo se observa que existe una clara disminución en la germinación de las semillas de *Medicago sativa* (Tabla 15), teniendo que el GRS en azul marino y verde ultramar es de 66.67%, mientras que para el colorante rojo escarlata 604 es de 55.56%; de igual forma se muestran valores bajos de CRR lo que indica que la longitud de las radículas también se ven afectadas en comparación del crecimiento de las semillas en agua dura, donde se observa que el azul marino 606 tiene un valor de 63.77%, el rojo escarlata 604 tiene un valor de 67.04% y el verde ultramar 667 tiene un valor de 67.43%. Por último, el Índice de Germinación (IG) en los tres colorantes presenta valores bajos, para el azul marino 606 el IG es de 42.52, en el rojo escarlata 604 el IG es de 37.25 y el verde ultramar 667 el IG es de 44.95.

Tabla 15: Parámetro de toxicidad de colorantes sin tratamiento previo

Parámetro	Azul marino 606	Rojo escarlata 604	Verde ultramar 667
$\bar{x}$ de radícula (cm)	2.88	3.03	3.04
GRS (%)	66.67	55.56	66.67
CRR (%)	63.77	67.04	67.43
IG	42.52	37.25	44.95

Para el residuo del colorante azul marino 606 en el tratamiento de 50 mgL<sup>-1</sup> (Tabla 16) se tiene que tanto el porcentaje de germinación relativa (GRS) como el crecimiento relativo de la radícula (CRR) y el índice de germinación (IG) son mayores que los valores presentados por el colorante sin tratar lo que indica que la toxicidad del colorante disminuyó después del tratamiento. Para el caso del GRS en el consorcio 1 en los tratamientos con y sin sacarosa son iguales (88.89%) y en el consorcio 2 hay una ligera variación que no presenta mayor riesgo de toxicidad en el tratamiento sin sacarosa teniendo un valor para GRS del 77.78% y para el tratamiento con sacarosa el GRS es de 88.89%. En cuanto a los valores del CRR el consorcio 1 con el tratamiento con sacarosa presenta el valor más alto con 92.17%, seguido del consorcio 1 sin sacarosa con 87.13%, consorcio 2 con sacarosa con un valor de 67.52% y por último el consorcio 2 con tratamiento sin sacarosa con 67.32%. Para el IG, las semillas con el mayor valor fueron las expuestas al consorcio 1 con sacarosa con un IG de 81.93.

Tabla 16: Respuesta Biológica determinada en plántulas de *Medicago sativa* expuestas a los residuos del colorante azul marino 606 en el tratamiento de 50 mgL<sup>-1</sup>

Parámetro	Consortio 1		Consortio 2	
	Sin sacarosa	Con sacarosa	Sin sacarosa	Con sacarosa
$\bar{x}$ de radícula (cm)	3.93	4.16	3.04	3.05
GRS (%)	88.89	88.89	77.78	88.89
CRR (%)	87.13	92.17	67.32	67.52
IG	77.45	81.93	52.36	60.02

El residuo del colorante azul marino 606 en el tratamiento de 100 mgL<sup>-1</sup> (Tabla 17) tuvo la siguiente respuesta biológica en las semillas de *Medicago sativa*, el resultado de porcentaje de germinación relativo es de 88.89% para ambos consorcios en sus respectivos tratamientos con y sin sacarosa. En cuanto al CRR el consorcio que tuvo mejores resultados es número 1, pues el tratamiento sin sacarosa presentó un CRR de 94.08%, mientras que con sacarosa tuvo un CRR de 84.25%; para el consorcio 2 en el tratamiento sin y con sacarosa los valores de CRR fueron de 67.27% y 82.37%, respectivamente. El índice de germinación en todos los casos fue alto, presentado valores mejores

en el consorcio 1 con 83.63 en el tratamiento sin sacarosa y 74.89 en el tratamiento con sacarosa y para el consorcio 2 se obtuvieron valores de 73.21 en el tratamiento con sacarosa y 59.80 sin sacarosa.

Tabla 17: Respuesta Biológica determinada en plántulas de *Medicago sativa* expuestas a los residuos del colorante azul marino 606 en el tratamiento de 100 mgL<sup>-1</sup>.

Parámetro	Consortio 1		Consortio 2	
	Sin sacarosa	Con sacarosa	Sin sacarosa	Con sacarosa
$\bar{x}$ de radícula (cm)	4.25	3.80	3.04	3.72
GRS (%)	88.89	88.89	88.89	88.89
CRR (%)	94.08	84.25	67.27	82.37
IG	83.63	74.89	59.80	73.21

Los resultados de toxicidad para el residuo del colorante rojo escarlata 604 después de tratamiento biológico con concentración inicial de 50 mgL<sup>-1</sup> se muestra en la Tabla 18. El GRS en ambos consorcios tuvo un comportamiento similar pues en los tratamientos sin sacarosa se obtuvo un 88.89% y en los tratamientos con sacarosa se obtuvo un 77.78%. El CRR tuvo mejores resultados mejores en el C1 con sacarosa con un 85.27%, seguido de C2 sin sacarosa con 82.83%, C2 con sacarosa con 78.94% y finalmente C1 sin sacarosa con 68.85%. El IG de menor valor lo obtuvo C1 sin sacarosa mientras que el IG de mayor valor fue el de C2 sin sacarosa con 73.63. En todos los resultados se observa que los valores de GRS, CRR e IG aumentaron lo que nos indica que la toxicidad ejercida inicialmente por el colorante disminuyó.

Tabla 18: Respuesta Biológica determinada en plántulas de *Medicago sativa* expuestas a los residuos del colorante rojo escarlata 604 en el tratamiento de 50 mgL<sup>-1</sup>.

Parámetro	Consortio 1		Consortio 2	
	Sin sacarosa	Con sacarosa.	Sin sacarosa	Con sacarosa
$\bar{x}$ de radícula (cm)	3.11	3.85	3.74	3.56
GRS (%)	88.89	77.78	88.89	77.78
CRR (%)	68.85	85.27	82.83	78.94
IG	61.20	66.32%	73.63	61.40

En cuanto a la respuesta de *Medicago sativa* expuestas al residuo del colorante rojo escarlata de concentración inicial de 100 mgL<sup>-1</sup> (Tabla 19) se tiene que el GRS para el C1 fue de 77.78% para el tratamiento sin y con sacarosa y para el C2 fue de 88.89% sin y con sacarosa. El crecimiento relativo de la radícula fue mayor en ambos consorcios en el tratamiento con sacarosa presentando mejores resultados en el C2 con 86.35% y 80.62% para el C1 y en el tratamiento sin sacarosa se obtuvieron los valores de 72.89% para C1 y de 68.71% para el C2. En los resultados de IG de igual forma se obtuvieron mayores resultados en el tratamiento con sacarosa con 76.76 para C2 y 62.70 para C1 y en el tratamiento sin sacarosa se obtuvo 61.96 para C2 y 56.70 para C1. En los valores se ve un aumento en comparación con el rojo escarlata 604 sin tratamiento previo, lo que demuestra que el efecto inhibitorio presentado en la germinación de las semillas de *Medicago sativa* disminuye después de ser aplicado un tratamiento con estos dos consorcios utilizados.

Tabla 19: Respuesta Biológica determinada en plántulas de *Medicago sativa* expuestas a los residuos del colorante rojo escarlata 604 en el tratamiento de 100 mgL<sup>-1</sup>.

Parámetro	Consortio 1		Consortio 2	
	Sin sacarosa	Con sacarosa	Sin sacarosa	Con sacarosa
$\bar{x}$ de radícula (cm)	3.29	3.64	3.15	3.90
GRS (%)	77.78%	77.78%	88.89%	88.89%
CRR (%)	72.89%	80.62%	68.71%	86.35%
IG	56.70	62.70	61.96	76.76

En la Tabla 20 se muestran los resultados del colorante verde ultramar 667 con el tratamiento de concentración inicial de  $50 \text{ mgL}^{-1}$  donde se observa que la GRS de menor valor fue el C2 sin sacarosa con 77.78%, mientras que el C1 con y sin sacarosa tuvo 88.89% y el C2 con sacarosa fue de 88.89%. El CRR presenta valores mayores en el C1 con 82.12% y 97.18% en el tratamiento de sin sacarosa y con sacarosa, respectivamente; mientras que el C2 presentó valores de 72.77% y 68.07% en el tratamiento de sin sacarosa y con sacarosa, respectivamente. El comportamiento de los resultados del CRR son similares al IG pues C1 con sacarosa tiene un IG de 86.39, seguido de C1 sin sacarosa con 72.99, C2 con sacarosa con 60.51 y C2 sin sacarosa con 56.60. De acuerdo con los resultados mostrados en las Tablas 15 y 20 se puede observar que la germinación se ve menos afectada después del tratamiento con los consorcios denominados C1 y C2.

Tabla 20: Respuesta Biológica determinada en plántulas de *Medicago sativa* expuestas a los residuos del colorante verde ultramar 667 en el tratamiento de  $50 \text{ mgL}^{-1}$

Parámetro	Consortio 1		Consortio 2	
	Sin sacarosa	Con sacarosa	Sin sacarosa	Con sacarosa
$\bar{x}$ de radícula (cm)	3.71	4.39	3.28	3.07
GRS (%)	88.89%	88.89%	77.78%	88.89%
CRR (%)	82.12%	97.18%	72.77%	68.07%
IG	72.99	86.39	56.60	60.51

En los residuos del colorante verde ultramar 667 en el tratamiento de  $100 \text{ mgL}^{-1}$  mostrados en la Tabla 21, el GRS es de valores mayores a los obtenidos en el colorante sin tratamiento previo (Tabla 15), teniendo que para el C1 el GRS es de 77.78% y 88.89% para el tratamiento sin y con sacarosa y para C2 el GRS es de 88.89% y 77.78% para el tratamiento sin y con sacarosa. El CRR de igual manera es significativamente mayor en C1 con y sin sacarosa con 98.26% y 87.07%, respectivamente y para C2 es de 83.45% y 79.07% sin y con sacarosa, respectivamente en comparación con el colorante sin tratamiento, por lo que se puede decir que mejoro el crecimiento de la radícula. En última instancia, el IG de mayor valor fue el presentado por C1 con sacarosa con 87.35, seguido de C2 sin sacarosa sin 74.17, C1 sin sacarosa con 67.72 y el de menor valor es C2 con sacarosa con 61.50.

Tabla 21: Respuesta Biológica determinada en plántulas de *Medicago sativa* expuestas a los residuos del colorante verde ultramar 667 en el tratamiento de  $100 \text{ mgL}^{-1}$

Parámetro	Consortio 1		Consortio 2	
	Sin sacarosa	Con sacarosa	Sin sacarosa	Con sacarosa
$\bar{x}$ de radícula (cm)	3.93	4.43	3.76	3.57
GRS (%)	77.78	88.89	88.89	77.78
CRR (%)	87.07	98.26	83.45	79.07
IG	67.72	87.35	74.17	61.50

## DISCUSIÓN

### Biodegradación de colorantes

El uso de consorcios microbianos para la degradación de colorantes ha demostrado ser ventajoso en comparación al empleo de cepas individuales debido a que, cada una de las cepas que conforman al consorcio, atacan a las moléculas del colorante en diferentes posiciones, lo cual da lugar a la formación de distintos metabolitos secundarios que por lo regular son fracciones de bajo peso molecular, además de que existe un mecanismo sinérgico inductivo entre las cepas presentes (Kumar *et al.*, 2018).

Como se observa en las tablas 3-8, la degradación de los colorantes textiles fue mayor cuando se utilizó sacarosa (3 g/L) como fuente de carbono, con excepción del colorante rojo escarlata a 50 mgL<sup>-1</sup>, en donde los porcentajes más altos de degradación fueron con los consorcios sin sacarosa. Por lo tanto, el uso de una fuente de carbono como cosustrato, favorece la degradación de los colorantes, lo cual coincide con lo reportado por Shah y Bera (2021). De igual manera, se observa que, de los consorcios formados, el consorcio C2 conformado por las cepas: *Escherichia coli* M2N, *Pseudomonas putida* B44, *Enterobacter sp.* N16, *Salmonella sp.* MC188 y *Enterobacter sp.* K131, con sacarosa, mostró en su mayoría porcentajes de degradación más altos en comparación con el consorcio C1 constituido por las cepas: *Escherichia coli* M6A, *Pseudomonas putida* B03, *Enterobacter sp.* N9, *Serratia sp.* K120 y *Enterobacter sp.* K131.

La degradación del colorante azul marino 606 a 50 mgL<sup>-1</sup> (tabla 3) mostro porcentajes más altos con los consorcios C1+Sacarosa y C2+Sacarosa, 89.00105% y 88.71555%, respectivamente. De igual manera, cuando la concentración del colorante fue de 100 mgL<sup>-1</sup> (tabla 4), los mayores porcentajes de degradación fueron con los mismos consorcios, en este caso, alcanzando valores del 83.54065% y 83.8921%, respectivamente. Cabe mencionar que, de los colorantes utilizados en este trabajo, el colorante azul marino 606 fue el que obtuvo los porcentajes de degradación más altos. Lalnunhlimi y Krishnaswamy (2016), tuvieron una observación similar en su estudio, en donde utilizaron un consorcio microbiano formado por: *Bacillus flexus* cepa NBN2, *Bacillus cereus* cepa AGP-03, *Bacillus cytotoxicus* NVH 391-98 Y *Bacillus sp* L10. Analizaron la decoloración de los tintes textiles mixtos Direct Blue 151 y Direct Red 31 en una concentración de 200 mgL<sup>-1</sup> complementados con distintas fuentes de carbono entre las cuales, la sacarosa a una concentración del 1% fue la que mostró mejores resultados, esta tuvo un efecto positivo en el crecimiento del consorcio y la decoloración de los tintes textiles mencionados, puesto que, después de 5 días de tratamiento la degradación de los colorantes fue del 90.62%.

El colorante rojo escarlata 604 a 50 mgL<sup>-1</sup> (tabla 5) tuvo un mayor porcentaje de degradación con los consorcios C1 y C2 sin sacarosa, alcanzando valores del 82.53245% y 81.39715% de degradación, respectivamente. Por otra parte, cuando se trabajó con el colorante a 100 mgL<sup>-1</sup> (tabla 6), los consorcios C1 y C2 con sacarosa fueron los que mostraron mejores resultados, teniendo un porcentaje de degradación del 38.50405% y 41.0999%. Estos resultados difieren con lo reportado por Shah y Bera (2021), en donde analizaron 4 consorcios distintos pero, se centraron en la utilización y optimización del consorcio bacteriano SPB-4 formado por las cepas *Bacillus sp.*, *Stenotrophomonas sp.k*, *Pseudomonas sp.* y *alcaligenes sp.*, para observar la eficacia que tiene para degradar el colorante Rojo Reactivo 3 en una concentración de 30 mgL<sup>-1</sup>, mismo que fue complementado con diversas fuentes de carbono, entre ellas la sacarosa a 10 mgL<sup>-1</sup>. Dicho ensayo tuvo una duración de 120 h y al finalizar el tratamiento se alcanzó un porcentaje de degradación del 71%.

En el caso del colorante verde ultramar 667 a 50 mgL<sup>-1</sup> (tabla 7), los porcentajes de degradación más altos fueron con los consorcios C1+Sacarosa y C2+Sacarosa, alcanzando una degradación del 70.1191% y 79.01335%, respectivamente. De igual manera, cuando el colorante se trabajó a 100 mgL<sup>-1</sup> (tabla 8), los mismos consorcios mostraron los valores de degradación más altos, siendo estos del 43.7413% y 70.36605%. Estos resultados difieren con lo reportado por Das y Mishra (2017), en donde investigaron la eficacia de un nuevo consorcio formado por las cepas bacterianas *Zobellella taiwanensis* AT 1-3 y *Bacillus pumilus* HKG212. Y, gracias a una serie de modificaciones en parámetros como: temperatura, incubación, concentración de extracto de levadura y pH, alcanzaron un porcentaje de degradación del 97% en 24 h. Además de que se observó que el consorcio es eficiente en la degradación del colorante en concentraciones que van de 25 mgL<sup>-1</sup> a 1500 mgL<sup>-1</sup>.

Como se ha mencionado con anterioridad, el empleo de consorcios bacterianos tiene múltiples ventajas que hacen factible y eficiente su aplicación como tratamiento de colorantes textiles. Este trabajo denota la efectividad de estos en la degradación de tres colorantes diferentes. Sin embargo, no se debe descartar que la utilización de otros agentes de degradación también ha mostrado altos porcentajes de degradación, pero a su vez muestran algunas limitaciones. En este estudio se logró biodegradar el colorante azul marino 606 en un porcentaje mayor al 80% utilizando el consorcio C1 y C2, actuando estos mejor cuando se adicionaron con sacarosa (tabla 3 y 4).

Esto es coincidente con lo observado por Vantamuri & Kaliwal (2017) pero, a diferencia de este trabajo, emplearon el hongo *Marasmius* sp. BBKAV79 como agente de degradación para el tratamiento del colorante Reactive Blue 171 en una concentración de 50 mgL<sup>-1</sup> y, posterior a las 24 h de incubación a 40 °C se alcanzó una degradación del 100%. Si bien el porcentaje de degradación fue mayor en dicho estudio, es importante considerar que existen algunas limitaciones del tratamiento fúngico para biodegradar colorantes, ya que su aplicación real aún es poco factible principalmente por la dificultad para seleccionar especies que sean capaces de crecer, desarrollarse y mantenerse activos en las aguas residuales textiles debido a las condiciones variables y duras que estas presentan (Vantamuri & Kaliwal 2017).

Otros agentes de biodegradación que se encuentran bajo estudio son las plantas, si se habla específicamente de las plantas acuáticas se tiene que las especies *E. crassipes* y *P. stratiotes* han logrado la degradación exitosa de un 99% en periodos de 120 h a 192 h de un grupo de colorantes textiles que incluyen a los colorantes: CI Direct Blue 201 (DB 201), Cibacron Blue FR (CB FR), Cibacron Gold Yellow RK (CGY), Vat Green FFB (VG) y Moxilon Blue GRL (MBG) (Ekanayake, *et al.*, 2021), aunque estas especies son catalogadas como especies exóticas invasoras lo que conlleva a una limitación con el tratamiento, y supone una ventaja del tratamiento propuesto en este estudio en sistemas a largo plazo.

#### Cinética de biodegradación

Nuestros resultados coinciden con la degradación del colorante Remazol azul marino (RNB) con una concentración inicial de 25-100 mgL<sup>-1</sup> por el consorcio MA12C realizada en una celda de combustible microbiana que se ajustaba mejor al modelo de primer orden (Das & Mishra, 2019). De igual forma la cepa DH5α *E. coli* de manera asilada ha sido probada en la degradación de 15 colorantes textiles ácidos y básicos usados de manera comercial y se obtuvo en el comportamiento que la degradación dependía de la concentración de colorante, por lo que se puede decir que es un comportamiento similar al obtenido por los consorcios C1 y C2 (Cerboneschi *et al.*, 2015). Por último, nuestros resultados también se asemejan al estudio realizado por Wanyonyi *et al.* (2017), donde se describe la degradación por la especie bacteriana *Bacillus cereus* del colorante textil verde malaquita y esta corresponde al primer orden de reacción.

#### Toxicidad de productos de biodegradación

En el estudio de Shah *et al.* (2016), se probaron semillas de *Vigna radiata* para ver el efecto de varios colorantes textiles como violeta brillante remazol 5R (RBV5R), rojo reactivo 195 (RR195), azul reactivo 28 (RB28), azul reactivo 5 (RB5), rojo directo 81 (DR81) que en un principio inhibía la germinación y disminuía la longitud de la radícula, pero al ser expuestas a los productos biotransformados obtenidos después de los tratamientos con el consorcio VIE6 produjeron raíces de una longitud mucho mayor y porcentajes de germinación de hasta 60% más altos. En los resultados obtenidos en el presente estudio, el rojo escarlata fue el que tuvo un mayor incremento en la germinación en el colorante sin tratamiento y los residuos ya tratados con un 33.33% que ya muestra un incremento significativo.

Por otra parte Ogunlaja *et al.* (2020), realizaron pruebas de toxicidad por germinación con semillas de caupí (*Vigna unguiculata*) donde fueron expuestas durante 7 días y posteriormente se hizo la medición de radículas para ver si los residuos del colorante azul de metileno después del tratamiento biológico eran tóxicos, donde se demostró que el tratamiento con *A. pittii* destoxificó parte de los metabolitos producidos en el proceso y pues presentó longitud en la radícula de 6.06 cm aunque el crecimiento de la radícula no fue el mismo que con agua (10.68 cm) fue mucho mayor al colorante sin tratamiento previo (0); este comportamiento en el crecimiento de la radícula coincide con nuestros resultados para los tres colorantes utilizados.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que los consorcios bacterianos C1 y C2 propuestos en este trabajo logran biodegradar los colorantes antraquinónicos azul marino 606 ( $10.9989 \text{ mgL}^{-1}$  y  $16.1079 \text{ mgL}^{-1}$ ), rojo escarlata 604 ( $17.46755 \text{ mgL}^{-1}$  y  $58.9001 \text{ mgL}^{-1}$ ) y verde ultramar 667 ( $20.9866 \text{ mgL}^{-1}$  y  $29.6339 \text{ mgL}^{-1}$ ) en concentraciones iniciales de 50 y  $100 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. Mostrando así buenos porcentajes de degradación al finalizar el tratamiento. Además, el consorcio C2 con y sin sacarosa fue el que mostró mejores resultados en los ensayos realizados. Así mismo, la prueba de toxicidad realizada con las semillas de *Medicago sativa* indica que el tratamiento aplicado con los consorcios C1 y C2 con y sin sacarosa durante 5 días, es eficiente y no tiene un impacto negativo significativo en la germinación de semillas, por lo cual, no hay presencia de metabolitos secundarios tóxicos, lo que indica que esta agua se puede utilizar como sistema de riego. En futuras investigaciones se espera profundizar en los métodos que utiliza el consorcio para degradar los colorantes, así como las interacciones de las cepas que forman los consorcios a largo plazo.

## REFERENCIAS

- Cerboneschi, M., Corsi, M., Bianchini, R., Bonnani, M. & Tegli, S. (2015). Decolorization of acid and basic dyes: understanding the metabolic degradation and cell-induced adsorption/precipitation by *Escherichia coli*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, *99*, 8235–8245. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6648-4>
- 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/10.1016/j.jece.2016.10.005>
- Das, A. & Mishra, S. (2019). Complete biodegradation of azo dye in an integrated microbial fuel cell-aerobic system using novel bacterial consortium. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* *16*, 1069–1078. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1703-1>
- Ekanayake, M.S., Udayanga, D., Wijesekara, I. *et al.* (2021). Phytoremediation of synthetic textile dyes: biosorption and enzymatic degradation involved in efficient dye decolorization by *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms and *Pistia stratiotes* L.. *Environ Sci Pollut Res* *28*, 20476–20486. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11699-8>
- Gita, S., Shukla, S. P., Saharan, N., Prakash, C. & Deshmukhe, G. (2019). Toxic Effects of Selected Textile Dyes on Elemental Composition, Photosynthetic Pigments, Protein Content and Growth of a Freshwater Chlorophycean Alga *Chlorella vulgaris*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *102* (6), 795–801. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02599-w>
- Gita, S., Shukla, S.P., Deshmukhe, G. Choudhury, T.G, Saharan, N. & Singh, A.K. (2021). Toxicity Evaluation of Six Textile Dyes on Growth, Metabolism and Elemental Composition (C, H, N, S) of Microalgae *Spirulina platensis*: The Environmental Consequences. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, *106*, 302–309. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-03074-7>
- Kumar, M. A., Baskaralingam, P., Aathika, A. R. S., & Sivanesan, S. (2018). *Role of Bacterial Consortia in Bioremediation of Textile Recalcitrant Compounds BT - Waste Bioremediation* (S. J. Varjani, E. Gnansounou, B. Gurunathan, D. Pant, & Z. A. Zakaria (eds.); pp. 165–183). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4_8)
- Lalnunhlimi, S. & Krishnaswamy, V. (2016). Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial consortium. *Brazilian Journal of Microbiology*, *47* (1), 39–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bjm.2015.11.013>

- Maqbool, Z., Hussain, S., Ahmad, T., Nadeem, H., Imran, M., Khalid, A., *et al.* (2016). Use of RSM modeling for optimizing decolorization of simulated textile wastewater by *Pseudomonas aeruginosa* strain ZM130 capable of simultaneous removal of reactive dyes and hexavalent chromium. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, *23*, 11224–11239. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6275-3>
- 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>
- Moazzem, S., Crossin, E., Daver, F. & Wang, L. (2022). Environmental impact of apparel supply chain and textile products. *Environment, Development and Sustainability*, *24* (8), 9757–9775. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01873-4>
- Moorthy, A. K., Shukla, S. P., Govindarajan, R. B., Kumar, K. & Bharti, V. S. (2022). Application of Microalgal Physiological Response as Biomarker for Evaluating the Toxicity of the Textile Dye Alizarin Red S. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *109* (2), 401–408. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03525-3>
- Ogunlaja, A., Nwankwo, I.N., Omaliko, M.E. & Olukanni, O.D. (2020). Biodegradation of Methylene Blue as an Evidence of Synthetic Dyes Mineralization during Textile Effluent Biotreatment by *Acinetobacter pittii*. *Environ. Process*, *7*, 931–947. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00443-6>
- Onder, A., Ilgin, P., Ozay, H. & Ozay, O. (2022). Preparation of composite hydrogels containing fly ash as low-cost adsorbent material and its use in dye adsorption. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19* (8), 7031–7048. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03622-6>
- Pieczynska, A., Ossowski, T., Bogdanowicz R. & Siedlecka, E. (2019). Electrochemical degradation of textile dyes in a flow reactor: effect of operating conditions and dyes chemical structure. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, *16*, 929–942. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1704-0>
- Rodríguez Romero, A.J., Robles Salazar, C.A., Ruíz Picos, R.A., López López, E., Sedeño Díaz, J.E. & Rodríguez Dorantes A. (2014). Índices de germinación y elongación radical de *Lactuca sativa* en el biomonitorio de la calidad del agua del río chalma. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, *30* (3), 307-316.
- Sánchez-Cerón, B., Allende-Valera, G., Mendoza-Hernández, J.C. & Pérez-Osorio, G. (2022). Biodegradación De Colorantes Textiles Por *Escherichia coli*. *International Multilingual Journal of Science and Technology*, *7* (7), 2528-9810
- Santana, R.M. da R., Charamba, L.C.V., do Nascimento, G.E., de Oliveira, J.G.C., Sales, D.C.S., Duarte, M.M.M., *et al.* (2019). Degradation of Textile Dyes Employing Advanced Oxidative Processes: Kinetic, Equilibrium Modeling, and Toxicity Study of Seeds and Bacteria. *Water Air & Soil Pollut.*, *230*, 136. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4178-x>
- Saroj, S., Dubey, S., Agarwal, P., Prasad, R. & Singh, R. P. (2015). Evaluation of the efficacy of a fungal consortium for degradation of azo dyes and simulated textile dye effluents. *Sustain. Water Resour. Manag.*, *1*, 233–243. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0027-2>
- Shafqat, M., Khalid, A., Mahmood, T., Siddique, M.T., Han, J.-I. & Habteselassie, M.Y. (2017). Evaluation of bacteria isolated from textile wastewater and rhizosphere to simultaneously degrade azo dyes and promote plant growth.

*Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92 (10), 2760–2768.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jctb.5357>

Shah, B., Patel, A. & Madamwar, D. (2016). Kinetic Modeling and Community Dynamics of Microaerophilic Treatment of Textile Dyes Containing Effluent by Consortium VIE6. *Environ. Process*, 3, 397–411.  
<https://doi.org/10.1007/s40710-016-0156-0>

Shah, M.P. & Bera, S.P. (2021). Microbial treatment of textile dye Reactive Red 3 by a newly developed bacterial consortium. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 6 (3), 62. <https://doi.org/10.1007/s41204-021-00156-7>

Vantamuri, A.B. & Kaliwal, B.B. (2017). Decolourization and biodegradation of Navy blue HER (Reactive Blue 171) dye from *Marasmius* sp. BBKAV79. *3 Biotech*, 7(1), 48. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0673-1>

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/10.1016/j.egypro.2017.07.044>

