

Empleo de la biorremediación en el tratamiento de aguas contaminadas por colorantes textiles

Use of bioremediation in the treatment of water contaminated by textile dyestuffs

Rodrigo Andrés Sarria Villa*¹ y José Antonio Gallo Corredor²
Departamento de Química, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación, Grupo de Investigación en Química Analítica Ambiental (GIQA), Universidad del Cauca, Colombia

Resumen. La presencia de colorantes textiles industriales en el agua ha presentado un gran problema ambiental en su proceso de tratamiento por el alto volumen de residuos con presencia de sustancias colorantes descargadas a los medios acuosos, el método de manejo de estas aguas residuales por alternativas convencionales es costoso y en ciertos casos no es tan eficiente, por esto, la biotecnología ofrece alternativas para su manejo. Existe un gran número de organismos que son utilizados durante estos procesos en mecanismos como: biosorción, biodegradación aerobia y anaerobia y la producción de enzimas que catalizan la decoloración, principalmente la utilización de hongos PB (de pudrición blanca). En ocasiones se han implementado microorganismos de ambientes contaminados, que ya hayan alcanzado una adaptación al medio y de esta manera alcanzar mejores resultados en el tratamiento de aguas con presencia de colorantes textiles.

Palabras Claves. Biorremediación; textiles; procesos de oxidación; hongos ligninolíticos.

Abstract. The presence of industrial textile dyes in water has presented a great environmental problem in its treatment process due to the high volume of waste with the presence of coloring substances in the aqueous media, the method of handling these wastewaters by conventional alternatives is expensive and in certain cases is not so efficient, therefore, biotechnology offers alternatives for its management. There are a large number of organisms that are used during these processes in mechanisms such as: biosorption, aerobic and anaerobic biodegradation and the production of enzymes that catalyze decolorization, mainly the use of PB (white rot) fungi. Sometimes microorganisms from contaminated environments have been implemented, which have already reached an adaptation to the environment and thus achieve better results in the treatment of water with the presence of textile dyes.

Keywords. Bioremediation; textiles; oxidation processes; ligninolytic fungi.

Como citar. R. A. Sarria Villa y J. A. Gallo Corredor, Empleo de la biorremediación en el tratamiento de aguas contaminadas por colorantes textiles. *Jou. Cie. Ing.*, vol. 17, no. 1, pp. 17-23, 2025. doi:10.46571/JCI.2025.1.2

Recibido: 04/01/2025

Revisado: 22/02/2025

Aceptado: 25/03/2025

1. Introducción

La industria textil y de la moda mueve cerca de 1.7 trillones de dólares y crece de 6 a 7.5 % anual generando mas de 300 millones de empleos a lo largo de la cadena de valor textil. En las últimas dos décadas, la producción de textiles se ha duplicado debido al incremento de la población global. La industria textil involucra un complejo sistema de producción de hilo, fabricación, coloración, impresión y obtención de diferentes productos. Un sustancial numero de entradas son necesarias en cada segmento incluyendo materias primas, agua, sustancias químicas y energía. Consecuentemente, altas emisiones de residuos en términos de agua residual y gases de efecto invernadero ejercen presión sobre el medio ambiente y riesgos significativos para la salud pública. La industria textil recibe gran cantidad de criticas debido al impacto ambiental durante la producción y el uso final de los productos de moda.

El impacto ambiental negativo del procesamiento de textiles involucra el consumo excesivo de agua y descarga de aguas residuales caracterizada por presencia excesiva de compuestos orgánicos y agentes colorantes, baja biodegradabilidad y alta salinidad. Se estima que el consumo de agua en fábricas de textiles varía entre 28 L/Kg a 285 L/Kg y estudios realizados en países como Bangladesh indican que por 1.8 millones de toneladas métricas de textil fabricado se generaron en 2016 cerca de 217 millones de m³ de agua residual [1].

El alto consumo de agua y el empleo de sustancias químicas sitúan a la industria textil como una de las actividades mas contaminantes del mundo generando altas emisiones de carbono. Los colorantes pueden ser definidos como sustancias que tienen la capacidad de impregnar color en la fibra, sin que se vea afectado por la luz, agua y otros compuestos como jabones. Además, las sustancias químicas usadas están relacionadas con compuestos químicos tóxicos, cromóforos de alto peso molecular. Los colorantes azoicos, compuestos tipo azo son importantes debido a la utilización en la industria, principalmente la textil, para la tinción de la ropa [2]. Los azocompuestos representan cerca de las dos terceras partes de todos los colorantes sintéticos. Su formula química es R-N=N-R', donde -N=N- representa el grupo azo y los R y R' representan grupos aril y alquilo. En la figura 1 se presenta la estructura del azobenceno [3].

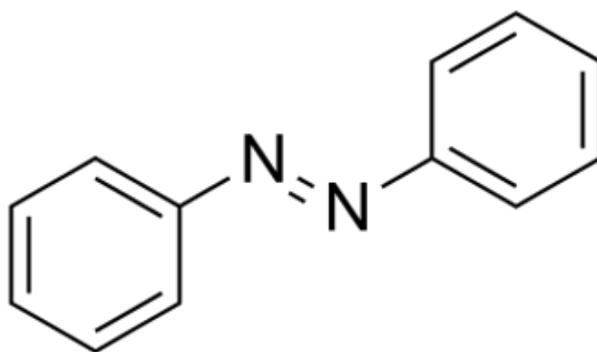


Figura 1: Estructura química del azobenceno.

Típicamente, la cantidad de sustancias químicas usadas en la fabricación de textiles varía desde el 10 % sobre el 100 % de lo fabricado [4]. Entre las sustancias químicas usadas en textiles se encuentran los colorantes, sales, agentes activadores de superficie, blanqueadores, solventes y fabricantes [5]. La industria textil emplea cerca de 8000 sustancias químicas para procesar 400 billones de metros cuadrados de textil fabricado. El índice de color internacional lista cerca de 27000 productos coloreadores individuales bajo 13000 nombres genéricos, de los cuales muchos son tóxicos y persistentes. Por otro lado, de 1000 sustancias químicas empleadas para elaborar sustancias a ser usadas en la industria textil, 900 de ellas presentan riesgos de peligrosidad [6].

La gran mayoría de las sustancias químicas empleadas en la elaboración de textiles terminan en las aguas residuales. La lista incluye arilaminas, alquilfenoles (AP), alquilfenoles etoxilados (APEOs), clorobenzenos, clorotoluenos, retardantes de llama, perfluorados (PFCs), metales pesados, entre otros [7]. Los colorantes y pigmentos están diseñados para resistir la biodegradación y presentan alta estabilidad a la luz, temperatura, agua, detergentes y otras sustancias químicas. Normalmente el agua residual proveniente de la industria textil presenta color y las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales presentan dificultades para la eliminación de color.

Aunque se sugiere el uso de plantas de aguas residuales con tratamiento biológico para aguas residuales textiles, la presencia de metales pesados dificulta la remoción del color (H&M, 2019), lo cual genera un afluente estéticamente no placentero que bloquea la luz solar, reduce el nivel de oxígeno y causa sobrepoblación de algas [8]. Un estudio indicó que el tiempo de vida media de un hidrolizado reactivo de un colorante Azul 19 puede llegar a los 47 años a pH 7 y 25°C [9]. El impacto de esta alta contaminación con diferentes sustancias químicas incluyendo a los colorantes y metales pesados es múltiple. El agua de los ríos y canales es empleada para la irrigación de cultivos de vegetales y frutas.

El efecto sobre la salud es significativo a través del uso de agua en actividades domésticas y de cultivos o a través de la ingesta de alimentos o agua potable. Muchos colorantes azo presentan actividad carcinogénica y mutagénica, y pueden provocar reacciones alérgicas.

Generalmente, la toxicidad de los azocompuestos aumenta con el incremento de los anillos bencénicos en su estructura. La carcinogenicidad de los colorantes azo depende directamente de la estructura de la molécula y del mecanismo de degradación. Los productos de degradación de los colorantes azo son en su mayoría aminas aromáticas con estructuras diferentes y estas pueden tener actividades carcinogénicas [10].

Aunque el impacto de las aguas residuales de la industria textil sobre la salud pública es ampliamente desconocido, se debe poner atención en estrategias de reúso de aguas residuales, recuperación de colorantes y pigmentos, soda caustica, sales, entre otros [11].

Durante el proceso de producción textil se eliminan gran cantidad de aguas residuales a los afluentes cercanos, las cuales al acumularse en lagos y bahías generan gran problema ambiental, y estético, provocan una disminución en la luminosidad e interfieren en los procesos fotosintéticos de plantas y otros organismos.

De igual manera se presenta una disminución en el contenido de oxígeno disponible favoreciendo procesos de eutrofización, afectando así los ecosistemas de estas corrientes. Para tratar este tipo de problemas se han optado por métodos convencionales, como lo son las membranas de absorción, procesos oxidativos, procesos fisicoquímicos. A pesar de que algunos de estos procesos son eficaces en la remoción del colorante, presentan desventajas en los altos costos operacionales que implican, la cantidad de energía suministrada o la cantidad de reactivo y la generación de nuevos residuos.

Una de las alternativas que se ha puesto en práctica es la biodegradación del colorante, esta se lleva a cabo mediante distintos procesos, en la utilización de cultivos mixtos de bacterias, que contengan dos grupos generales de especies, uno que no participe en el proceso de remoción del colorante, pero que establezca el consorcio microbiano, junto con la segunda especie la cual si estará dentro del proceso de degradación.

Los tratamientos biológicos tanto aerobios como anaerobios o mixtos son considerados como efectivos para la remoción de sustancias tóxicas y del exceso de materia orgánica presente en el medio, para este proceso se han utilizado diferentes tipos de microorganismos, tales como bacterias, algas, levaduras y hongos [1].

2. Métodos de tratamiento

Más de diez mil tipos de pigmentos son usados en la industria, como la textil, papelera, cosmética y alimentos entre otros, aproximadamente se estima que del 2 al 50% de estos compuestos se desechan a las aguas y se consideran como contaminantes persistentes. Los colorantes están formados por un grupo responsable del color cromóforos, los grupos cromóforos más comunes son: los Azo (-N=N-), carbonilo (C=O), metilo (-CH₃), nitro y grupos quinoides. Se ha demostrado que ciertos colorantes azo pueden ser carcinogénicos y mutagénicos, además, que sus productos de degradación pueden resultar más tóxicos [12–15]. Dentro del proceso de biorremediación están contenidos gran variedad de procesos como la biosorción, biodegradación (aerobia y anaerobia) y métodos enzimáticos.

2.1. Biosorción

Uno de los métodos novedosos, para la remoción del colorante es la biosorción, en materiales como aserrín, carbón activado, suelos, compostas, lodos activados, comunidades vegetales. Al proceso que utiliza biomasa se le conoce como biosorción, en este proceso, la remoción se alcanza por la saturación, seguido de la biosorción del colorante, en la biomasa inactiva, dicha acumulación no ocurre en mecanismos metabólicos, como en la bioacumulación con células vivas. En los últimos años se ha ampliado la utilización de biomasa muerta o derivados, ya que elimina la toxicidad y además es muy factible en términos económicos [16].

2.2. Biodegradación

Existe una amplia variedad de microorganismos que tienen la capacidad de romper y degradar los enlaces tipo azo, los actinomicetos presentan mayor habilidad para degradar estos compuestos, por la capacidad de producir enzimas ligninolíticas. La decoloración de estos compuestos se puede llevar de manera aerobia o anaerobia, dependiendo del tipo de bacteria que lo lleve a cabo, otros estudios han demostrado que algunas cepas de *aeromonas sp bacillus subtilis Proetus mirabilis* y *Pseudomonas luteola* [17–20] presentan cualidades degradantes. La degradación también se puede presentar en completa mineralización de colorantes de tipo azo utilizando consorcios microbianos en condiciones aerobias, anaerobias o en condiciones anóxicas. La biodegradación es una técnica que se ve afectada por varios factores y de ello depende la velocidad para adquirir mejores resultados o una mayor eficiencia en estos. Tales como el pH, la temperatura, los nutrientes, así como la especificidad del sustrato. Una alternativa contenida en la biodegradación, con la que se han obtenido resultados es el tratamiento fúngico de amplia satisfacción, siendo uno de los principales los hongos de putrefacción blanca PB, son los organismos más estudiados en la degradación de compuestos tipo azo, debido a que son capaces de degradar sustratos complejos a través de un sistema enzimático no específico [21].

2.3. Métodos enzimáticos

Las células vivas son consideradas como reactores de decoloración en miniatura, esta decoloración puede ser por la retención física del colorante en la biomasa o en la transformación bioquímica del colorante a través del metabolismo celular. Algunas de las principales enzimas que más se utilizan en la degradación son lacasas, peroxidadas que generalmente se producen por hongos cuya función principal es degradar la lignina. Se ha reportado la decoloración, uno de los principales representantes de esta alternativa son los hongos de pudrición blanca (PB), estos tienen la capacidad de degradar sustancias como dioxinas, hidrocarburos policíclicos aromáticos, plaguicidas clorados y organofosforados, entre otras [1].

2.4. Genética aplicada a la degradación de colorantes

Los microorganismos empleados en la remoción de colorantes se pueden obtener de diferentes partes donde ya se hayan presentado este tipo de problemas de contaminación por colorantes.

Cuyas cepas ya se han adaptado al entorno y poder provechar los beneficios de su presencia, de esta manera se pueden obtener cepas con cierto tipo de hibridación genética que refuerzan la capacidad de degradar estos componentes más rápido y de igual manera estudiar cómo se pueden modificar genéticamente otros microorganismos. Esta metodología permite acortar los tiempos que se permite para adaptar un cultivo apropiado y luego aislar las cepas [19, 22]. Esta es una gran alternativa para aplicarse al tratamiento de aguas residuales, ya que permite el desarrollo de tecnologías la caracterización de nuevos genomas y de nuevas vías metabólicas, la identificación de mecanismos biológicos de resistencia a compuestos contaminantes y al descubrimiento de nuevas enzimas y biopolímeros [23].

3. Análisis

La industria textil desecha cientos de sustancias químicas no solo tipo colorantes, sino que también una gran cantidad de otro tipo de moléculas que pueden causar contaminación de medios acuosos. Las sustancias tipo azo pueden ser descargadas a las fuentes hídricas y afectar a organismos acuáticos, flora, animales y a la especie humana. Se han planteado diferentes alternativas para el tratamiento de este tipo de compuestos, obteniendo diferentes resultados, formación de sustancias secundarias, sustancias difíciles de desechar, muchos de los cuales generan gastos superiores tanto en energía como en reactivos dependiendo de la técnica empleada. La metodología de biorremediación ha sido una buena alternativa para mitigar este tipo de problemáticas, alcanzando porcentajes de remoción entre el 60 y el 90 %, generando nuevos campos de estudio y dando paso a una nueva proyección de emplear la genética a la solución de problemas ambientales [1]. En la figura 2 se presenta un posible esquema de degradación enzimática de compuestos azo, donde actúan las enzimas azoreductasas, lacasas y peroxidasas sobre el grupo cromóforo azo.

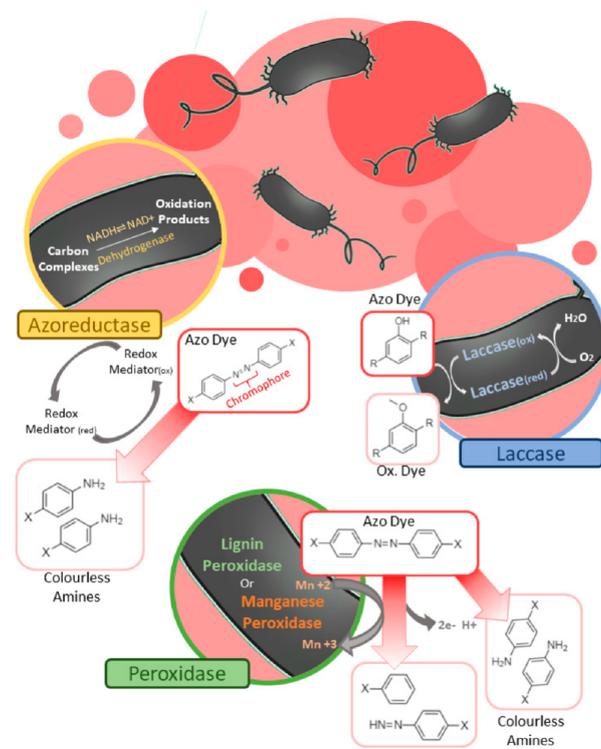


Figura 2: Representación esquemática de mecanismos de degradación enzimática de colorantes [1]

El mecanismo de degradación enzimática de sustancias químicas colorantes tipo azo incluye

una etapa inicial de decoloración, que incluye la reducción del enlace azo a un grupo cromóforo, esta etapa puede ocurrir extra o intracelularmente e involucra la transferencia de cuatro electrones en dos etapas, donde en cada etapa, dos electrones son transferidos desde el colorante al aceptor final de electrones, conduciendo a su decoloración. Algunos grupos de enzimas que ya han sido identificadas por su capacidad en la realización de esta reducción son las azoreductasas y las lacasas. Estos dos tipos de enzimas son las más direccionadas en la literatura con estas reacciones de decoloración [24, 25].

4. Conclusiones

La eliminación de los colorantes en la industria textil, representa un gran reto ambiental. La industria textil consume gran cantidad de agua por lo que es importante hallar mecanismos para el reciclaje de estas aguas. Se han desarrollado cepas aisladas de entornos contaminados, que por adaptación presentan una mayor eficiencia en la capacidad de biodegradación de compuestos azo. Se ha conseguido identificar enzimas involucradas en procesos de biodegradación de colorantes y desarrollar técnicas empleando este tipo de alternativas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Química de la Universidad del Cauca, Colombia, Sur América por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Santana Pinheiro, L. R., Gradíssimo, D. G., Xavier, L. P., Santos, A. V. (2022). Degradation of Azo Dyes: Bacterial Potential for Bioremediation. *Sustainability*, 14(3), 1510.
- [2] Uddin MA, Begum MS, Ashraf M, Azad AK, Adhikary AC, Hossain MS (2023) Water and chemical consumption in the textile processing industry of Bangladesh. *PLOS Sustain Transform* 2(7): e0000072. <https://doi.org/10.1371/journal.pstr.0000072>.
- [3] Gičević, A., Hindija, L., Karačić, A. (2020). Toxicity of Azo Dyes in Pharmaceutical Industry. In: Badnjevic, A., Škrbić, R., Gurbeta Pokvić, L. (eds) *CMBEBIH 2019. CMBEBIH 2019. IFMBE Proceedings*, vol 73. Springer, Cham.
- [4] Ozturk E, Yetis U, Dilek FB, Demirer GN. A chemical substitution study for a wet processing textile mill in Turkey. *J Clean Prod.* 2009 Jan 1;17(2):239–47.
- [5] Parisi ML, Fatarella E, Spinelli D, Pogni R, Basosi R. Environmental impact assessment of an eco-efficient production for coloured textiles. *J Clean Prod.* 2015 Dec 1;108(PartA):514–24.
- [6] Bluesign. the blue way—the way to sustainability of textile products [Internet]. 2021 [cited 2024 Nov 15]. Available from:.
- [7] Zero discharge of hazardous chemicals (ZDHC). MRSL V2.0 [Internet]. 2020 [cited 2024 Nov 10]. Available from:.
- [8] Choudhury AKR. Sustainable chemical technologies for textile production. In: *Sustainable Fibres and Textiles*. Woodhead Publishing: 2017. p. 267–322.
- [9] Firmino PIM, da Silva MER, Cervantes FJ, dos Santos AB. Colour removal of dyes from synthetic and real textile wastewaters in one- and two-stage anaerobic systems. *Bioresour Technol.* 2010 Oct;101(20):7773–9. pmid:20542688.
- [10] Šuleková, M., Smrčová, M., Hudák, A., Heželová, M., Fedorová, M.: Organic colouring agents in the pharmaceutical industry. *Folia Vet.* 61(3), 32–46 (2017).
- [11] Cemek, M., Büyükkuroğlu, M.E., Sertkaya, F., Alpdağtaş, S., Hazini, A., Önül, A., et al.: Effects of food colour additives on antioxidant functions and bioelement contents of liver, kidney and brain tissues in rats. *J. Food Nutr.* 2(10), 686–691 (2014).
- [12] Brown MA, De Vito SC (1993) Predicting azo dye toxicity. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 23: 249-324.
- [13] Ramsay JA, Nguyen T (2002) Decoloration of textile dyes by *Trametes versicolor* and its effect on dye toxicity. *Biotechnol. Lett.* 24: 1757-1761.
- [14] Giordano A, Grilli S, De Florio L, Mattioli D (2005) Effect of selected textile effluents on activated sludge nitrification process. *J. Environ. Sci. Health A. Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.* 40: 1997-2007.
- [15] Gavril M, Hodson PV (2007) Investigation of the Toxicity of the Products of Decoloration of Amaranth by *Trametes versicolor*. *J. Environ. Qual.* 36: 1591-1598.

- [16] Cortazar-Martínez, A, González-Ramírez, CA, Coronel-Olivares, C, Escalante-Lozada, JA, Castro-Rosas, J, Villagómez-Ibarra, JR. (2012). Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil. *Universidad y ciencia*, 28(2), 187-199. Recuperado en 25 de noviembre de 2024, de .
- [17] Horitsu H, Takada M, Idaka E, Tomoyeda M, Ogawa T (1977) Degradation of p-aminoazobenzene by *Bacillus subtilis*. *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 4: 217-224.
- [18] Chen KC, Huang WT, Wu Y, Houg JY (1999) Microbial decolorization of azo dyes by *Proteus mirabilis*. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 23: 686-690.
- [19] Chang JS, Kuo TS, Chao YP, Ho JY, Lin PJ (2000) Azo dye decolorization with a mutant *Escherichia coli* strain. *Biotechnol. Lett.* 22: 807-812.
- [20] Hayase N, Kouno K, Ushio K (2000) Isolation and characterization of *Aeromonas* sp. B-5 capable of decolorizing various dyes. *J. Biosci. Bioeng.* 90: 570-573.
- [21] Knapp JS, Vantoch-Wood EJ, Zhang F (2001) Use of wood-rotting fungi for the decolorization of dyes in and industrial effluent. En *Fungi in Bioremediation* (Editor Gadd GM) Cambridge University Press. 242-304.
- [22] Chang JS, Lin YC (2001) Decolorization kinetics of a recombinant *Escherichia coli* strain harboring azo-dye-decolorizing determinants from *Rhodococcus* sp. *Biotechnol. Lett.* 23: 631-636.
- [23] Escalante-Lozada A, Gosset-Lagarda G, Martínez-Jiménez A, Bolívar-Zapata F (2004) Diversidad bacteriana del suelo: Métodos de estudio no dependientes del cultivo microbiano e implicaciones biotecnológicas. *Agrociencia.* 38: 583-592.
- [24] Saratale, R.G.; Saratale, G.D.; Chang, J.S.; Govindwar, S.P. Bacterial Decolorization and Degradation of Azo Dyes: A Review. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2011, 42, 138–157.
- [25] Singh, R.L.; Singh, P.K.; Singh, R.P. Enzymatic Decolorization and Degradation of Azo Dyes—A Review. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2015, 104, 21–31.

