

Artículo científico

Análisis de la capacidad adsorbente de residuos agroindustriales en la remoción de colorantes

Ing. Roberto Antonio Santos Amaya¹

Resumen

La investigación consistió en analizar la capacidad bioadsorbente de escamas de pescado, olote y brácteas de maíz en la remoción de los colorantes FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40 de soluciones sintéticas. Estos materiales, considerados residuos agroindustriales, pueden constituir un tratamiento alternativo para la remoción de colorantes reduciendo así la contaminación del medioambiente, ya que al ser retenidos en la superficie de una matriz sólida se evita su dispersión en cauces de agua.

Las materias primas fueron tratadas y caracterizadas en cuanto a su humedad, y las soluciones preparadas a 50 ppm de colorantes fueron sometidas a ensayos de adsorción en lecho fijo, modificando las variables: tamaño de partícula de los residuos y pH de las soluciones colorantes; para ello, se construyó un módulo de adsorción que permitiera estandarizar las condiciones del experimento. Para calcular la diferencia de color ΔE^*ab , se midieron las coordenadas del espacio de color CIELAB de soluciones estándar de colorantes y muestras de filtrados, fueron necesarias la construcción de una cabina de luz y la aplicación para teléfono móvil "Colorimeter", garantizando un ambiente controlado y objetividad en los datos numéricos.

Los datos se sometieron a Análisis de Varianza (ANOVA), utilizando el software IBM SPSS Statistics 22.0, aplicado a tres tipos de diseños experimentales: diseño factorial 2^k, diseño completamente al azar y diseño de bloques completamente al azar. Con esta investigación, se comprobó estadísticamente que, al contrastar los tres residuos agroindustriales y los dos colorantes en estudio, se observaron diferencias significativas entre las medias de la diferencia de color estándar-filtrado, por lo que se determinó que el mejor residuo agroindustrial como adsorbente fueron las escamas de pescado; en segundo lugar, las brácteas de maíz y, por último, el olote, demostrándose que la capacidad bioadsorbente es similar para los residuos derivados del maíz.

Palabras clave

Bioadsorción; Remoción de colorantes; Residuos agroindustriales; Color

Abstract

The research work consisted of analyzing the bio-adsorbent capacity of fish scales, cob and corn bracts in the removal of the FD&C Blue No. 1 and FD&C Red No. 40 dyes from synthetic solutions. These materials, considered agro-industrial wastes, may constitute an alternative treatment for the removal of dyes, thus reducing environmental pollution, since being retained on the surface of a solid matrix avoids their dispersion in waterways.

The raw materials were treated and characterized in terms of their humidity, and the solutions prepared at 50 ppm of dyes, were subjected to fixed bed adsorption tests, with the modified variables being: particle size of the wastes and pH of the dye solutions; for this, an adsorption module was built to allow standardize conditions of the experiment. For calculating the color difference E^*ab , it was measured the CIELAB color space coordinates for standard dye solutions and filtered samples, a light booth was built as well as a smartphone application "Colorimeter" was used to guarantee a controlled environment and objectivity of numerical data.

The data was submitted to an Analysis of Variance (ANOVA), using the IBM SPSS Statistics 22.0 software, applied to three types of experimental designs: 2^k factorial design, completely randomized design and a randomized complete block design. With this research work, it was statistically verified that, when comparing the three agro-industrial wastes and the two dyes under study, significant differences were observed between the average values of the color difference of standard-filtered solutions, for which it was determined that the best agro-industrial waste as adsorbent was fish scales; secondly, the corn bracts and, finally, the cob, showing that the bio-adsorbent capacity is similar for residues derived from corn.

Keywords

Bioadsorption; Dyes removal; Agro-industrial wastes; Color

¹ Universidad Internacional Iberoamericana (UNINI) y Universidad Europea del Atlántico (UNEATLANTICO), Tesista para optar al grado de Maestro en Gestión y Auditorías Ambientales.

Introducción

Hay muchas definiciones de color, pero podemos decir que es “radiación electromagnética (luz) reflejada o transmitida por una materia (objeto) y percibida e interpretada por el hombre (observador)” (Datacolor, s.f., p. 01). Poco a poco se ha visto la necesidad de estandarizar el color de los objetos, por ejemplo, en el campo del control de calidad en la producción industrial y artes visuales, con el intento de asignar números para representar las coordenadas en un espacio de color (métrica del color) con innumerables aplicaciones.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de El Salvador, realiza el monitoreo permanente de la calidad y cantidad de agua en 122 sitios de muestreo en 55 ríos distribuidos en el territorio nacional, según el Informe de la Calidad del Agua de los Ríos El Salvador / 2012-2013. Uno de los parámetros de calidad fuera de norma en los sitios evaluados fue el color aparente, con valores de hasta 3350 unidades de Platino Cobalto, siendo lo máximo permitido de 20 a 150 unidades de Platino Cobalto, de acuerdo al Decreto No. 51 de la Normativa de Agua Cruda para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento (MARN, 2013, p. 3, 4, 84). En cierta medida puede inferirse que, como producto de las actividades humanas en zonas industriales, se generan efluentes con presencia de sustancias colorantes que, sin un adecuado tratamiento, se descargan a los ríos y lagos ocasionando su deterioro.

Los colorantes sintéticos alimenticios y cosméticos tales como el FD&C Azul No. 1

y FD&C Rojo No. 40, pueden provocar un impacto ambiental como contaminantes del agua afectando la biota acuática (procesos fotosintéticos) y un claro efecto estético negativo, según puede inferirse del artículo de Figueroa et al. (2015). Además, se ha comprobado que el FD&C Rojo No. 40 cuando está presente en altas concentraciones, uno de sus productos de degradación causa cáncer de vejiga en los animales (Sanders, 2012, citado por Letona, 2014).

En el caso de la investigación, se buscó evaluar el poder adsorbente de las escamas de pescado, olote y brácteas de maíz en cuanto a colorantes como una forma de dar valor agregado al desecho agroindustrial que de otra forma puede ser descartado sin ningún aprovechamiento y que, en grandes cantidades, por ser materia orgánica puede descomponerse, generando malos olores, proliferación de plagas (moscas y roedores) con el consiguiente peligro sanitario asociado; además, estos residuos son quemados, sobre todo en las áreas rurales, aunando más a la contaminación atmosférica.

Se han realizado estudios de adsorbentes no convencionales (bioadsorbentes) en la búsqueda de materiales naturales renovables, asequibles y abundantes localmente, tales como cáscaras de mango y naranja, tusa o dermis de la cebolla, constituyendo alternativas al carbón activado de uso común para este propósito, pero que es de alto costo y de difícil regeneración (McDougall, 1991, citado por Valladares-Cisneros et al., 2017).

Se pretendieron evaluar las condiciones (pH y tamaño de partícula) adecuadas conducentes a una mejor adsorción de los colorantes estudiados así como cuál de los

residuos fue más efectivo en esta propiedad; para ello se determinaron las coordenadas de color CIELAB utilizando una aplicación para teléfono móvil mediante la captura de fotografías en un ambiente controlado (cabinas de luz) para obtener resultados reproducibles con el menor error experimental asociado, que permitan el cálculo de la diferencia de color entre una solución estándar y cada una de las muestras luego de ser sometidas a adsorción en lecho fijo. Podría ser útil para futuras investigaciones prometedoras y más avanzadas que permitan su utilización como sorbente de colorantes de aguas residuales industriales. Por lo anterior, se planteó la siguiente pregunta: ¿Existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes?

La investigación tuvo como objetivo general:

Analizar la capacidad bioadsorbente de escamas de pescado, olote y brácteas de maíz en la remoción de colorantes de soluciones sintéticas.

En concordancia con el objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la influencia de las variables, tamaño de partícula y pH, en la reducción del color por parte de los materiales bioadsorbentes.
- Evaluar la efectividad en la remoción de colorantes mediante la determinación de coordenadas del espacio de color.
- Evidenciar, mediante análisis estadístico, si existe diferencia significativa en la capacidad adsorbente de los residuos agroindustriales considerados.

Materiales y métodos

1. Descripción

Por el tipo de estudio, la investigación tuvo un enfoque cuantitativo, se establecieron una serie de hipótesis de trabajo en relación a la interacción de las variables en estudio, para comprobar la capacidad bioadsorbente de tres residuos agroindustriales (escamas de pescado, olote y brácteas de maíz) en contacto con soluciones sintéticas de dos colorantes (FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40). A partir de las soluciones estándar de colorantes y muestras de filtrados, se obtuvieron las coordenadas del espacio de color CIELAB, por triplicado, mediante una aplicación de teléfono móvil, para el cálculo posterior de la diferencia de color ΔE^*_{ab} . Estos datos se sometieron a Análisis de Varianza (ANOVA) utilizando un software especializado.

Por el tipo de investigación, se desarrolló un diseño experimental en contexto de laboratorio, se establecieron una serie de variables independientes sujetas a manipulación y sus respectivas variables dependientes, cuantificadas mediante el cálculo de la diferencia de color entre soluciones estándar de colorantes y muestras de filtrados. Se crearon procedimientos unificados y específicos para la preparación (tratamiento) y caracterización de los adsorbentes, preparación de los reactivos para ajuste de pH, preparación de las soluciones sintéticas de los adsorbatos y los ensayos de bioadsorción. Hubo la necesidad de construir un módulo para adsorción en lecho fijo que permitiera controlar las condiciones del experimento en la obtención de los filtrados, así también la construcción de

una cabina de luz, para la determinación de las coordenadas del espacio de color en condiciones reproducibles con la mínima influencia de agentes externos (ambientales).

Variables

En la Tabla 1 se especifican las variables en estudio.

Tabla 1 Variables consideradas en la investigación

Clasificación	Tipo	Variable	Subdivisión	Valores
Independiente	Cualitativa	Tipo de adsorbente.	Policotómica	<ul style="list-style-type: none"> • Escamas de pescado • Olote • Brácteas de maíz
		Tipo de adsorbato.	Dicotómica	<ul style="list-style-type: none"> • FD&C Azul No. 1 • FD&C Rojo No. 40
	Cuantitativa	Tamaño de partícula del adsorbente.	Continua	<ul style="list-style-type: none"> • Menor a 1 mm • Mayor a 1 mm pero menor a 3 mm.
		Potencial de hidrógeno (pH) de las soluciones.	Continua	<ul style="list-style-type: none"> • 3 • 8
Dependiente	Cualitativa	Capacidad adsorbente de los residuos agroindustriales.	Policotómica	<ul style="list-style-type: none"> • Nula • Baja • Media • Alta • Total
		Luminosidad del color.	Policotómica	<ul style="list-style-type: none"> • Igual que la solución estándar. • Ligero • Pálido • Muy pálido • Blanco

Nota: Elaboración propia.

Muestra

Para cada residuo agroindustrial, se obtuvieron veinticuatro muestras de soluciones debido a que el ensayo se realizó por triplicado, resultando un total de setenta y dos muestras de filtrado.

Instrumento de medición

Aplicación móvil para Android “Colorimeter” versión 5.5.1 desarrollada por Research Lab Tools, Brasil para la determinación de las coordenadas del espacio de color

CIELAB. “Colorimeter” es una aplicación para teléfono móvil de colorímetro portátil, que permite obtener los parámetros de colores como CIELAB, Chroma, Hue°, RGB y espectros visibles (400 nm a 700 nm) en tiempo real (Research Lab Tools, 2015).

Técnica de recolección de datos

Observación experimental para obtener resultados de carácter objetivo utilizando la aplicación de teléfono móvil.

Técnica de procesamiento de datos

Programa IBM SPSS Statistics 22.0 para el Análisis de Varianza (ANOVA).

2. Metodología de campo

Preparación de los bioadsorbentes.

- **Adquisición de las materias primas:** las escamas de pescado frescas, únicamente mantenidas en refrigeración para su conservación, fueron donadas por una empresa dedicada al procesamiento de pescados y mariscos, ubicada en el municipio de San Salvador, departamento de San Salvador. El olote y las brácteas de maíz frescos fueron donados por una empresa dedicada al procesamiento del maíz para la elaboración de productos nostálgicos, ubicada en el municipio de Soyapango, departamento de San Salvador. Véase la Figura 1.
- **Pesaje de las materias primas:** se determinó la masa requerida de las materias primas para la preparación del material adsorbente, mediante una báscula digital de cocina.
- **Reducción de tamaño de las materias primas (solamente para olote y brácteas de maíz):** se utilizó un cuchillo de acero inoxidable y una tabla plástica para picar alimentos, los objetivos fueron aumentar el área superficial facilitando el análisis de humedad, optimizar los enjuagues posteriores y acelerar el secado solar.
- **Enjuague:** se utilizó agua de grifo a una temperatura de 50 °C con una duración de 3 minutos por cada uno de los dos enjuagues, se realizó manualmente aplicando frotación con el objetivo de reducir, mediante dilución, la materia orgánica o inorgánica superficial de las materias primas que pudieran interferir con los resultados de la investigación.
- **Escurrido (solamente para escamas de pescado y brácteas de maíz):** se exprimieron manualmente durante 5 segundos, con el objetivo de reducir el contenido de humedad que pudo absorberse durante los enjuagues.
- **Reducción de humedad (solamente para olote):** se utilizaron hojas de papel toalla absorbente con un tiempo de contacto de 2 minutos, con el objetivo de disminuir el contenido de humedad que pudo absorberse durante los enjuagues.
- **Secado solar:** las materias primas se colocaron uniformemente en bandejas de 1 yd² y se expusieron a la luz solar por un periodo de 7 días consecutivos, a una temperatura promedio de 40 °C y 31 % de humedad relativa del aire atmosférico. Los objetivos fueron reducir en mayor medida la humedad contenida en las materias primas, retrasando su deterioro por acción de microorganismos o enzimas, así como facilitar la reducción de tamaño posterior.
- **Pesaje de los productos secos:** se determinó la masa de los productos luego del secado solar, mediante una báscula digital de cocina.
- **Reducción de tamaño de los productos secos:** se realizó tanto la trituración (1 mm < partícula < 3 mm) como la molturación (partícula < 1 mm) utilizando un molino manual para granos (solamente para olote) y un molino manual para carne.

- **Tamizado:** para el tamaño de partícula < 1 mm se utilizó un colador para cocina con luz de malla de 1 mm, y para 1 mm < tamaño de partícula < 3 mm se utilizó un trozo de zaranda galvanizada con luz de malla de 3 mm. Véase la Figura 2.
- **Almacenamiento:** en bolsas plásticas color negro, para protegerlos de la luz y humedad ambiental.

Figura 1. Adquisición de las materias primas



Nota: Fotografías tomadas por el investigador.

Se muestran las escamas de pescado, olote y brácteas de maíz frescos.

Figura 2. Productos secos como material bioadsorbente



Nota: Fotografías tomadas por el investigador.

Se muestran las escamas de pescado, olote y brácteas de maíz secos con tamaño de partícula < 1 mm.

Construcción del módulo para adsorción en lecho fijo.

Se tomó en cuenta lo expresado en el artículo “Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo” bajo la autoría de José Carriazo, Martha Saavedra y Manuel Molina (Carriazo et al., 2010). Para la estructura se utilizaron tubos, codos y tees de PVC, las dimensiones del módulo terminado fueron 66 cm de alto, 66 cm de largo y 25 cm de profundidad. Para las unidades de adsorción de lecho fijo se utilizaron trozos de manguera plástica transparente de 40 cm de longitud y de 1/2 pulg de diámetro interno, varillas de madera, correas de amarre, fibra de vidrio, cedazo plástico de luz de malla de 1 mm y bandas de goma; las mangueras, que actuaron como columnas, se sujetaron al módulo con ayuda de hilo nylon, clips metálicos niquelados y anillos galvanizados. Véase la Figura 3.

Figura 3. Módulo para adsorción en lecho fijo



Nota: Fotografía tomada por el investigador.

Se muestra la estructura y las seis unidades de adsorción (columnas).

Construcción de la cabina de luz.

Se tomó en cuenta lo expresado en el Tra-

bajo fin de Máster “Diseño de un sistema de visión por ordenador para la caracterización del color del tomate (*Solanum lycopersicum* L.)” bajo la autoría de Laura López (López, 2017). Se utilizaron cuatro varillas roscadas galvanizadas de 50 cm de longitud de 1/2 pulg de diámetro, dos tablas de 50 cm x 50 cm de plywood de pino de 3/4 pulg, tuercas mariposa galvanizadas, arandelas planas galvanizadas, dos luminarias spot canope base GU10 de una luz, dos focos LED base GU10 de 5.5 W, 350 lm, 6500 K (luz de día), un interruptor superficial de una vía, tela negra, entre otros materiales. Véase la Figura 4.

Figura 4. Cabina de luz



Nota: Fotografía tomada por el investigador.

3. Metodología de laboratorio.

Caracterización de los bioadsorbentes

- Análisis de humedad de las materias primas y de los productos secos: se determinó la humedad de las escamas de pescado, olote y brácteas de maíz, en

base húmeda y en base seca, por triplicado, utilizando el analizador de humedad RADWAG® de la serie MAC 50/WH, programado con perfil de secado estándar (120 °C) y en modo de terminación de secado automática (cambio de masa por 1 mg/durante 60 s). Véase la Figura 5.

Figura 5. Analizador de humedad en funcionamiento



Nota: Fotografías tomadas por el investigador.

- Preparación de las soluciones ácidas y alcalinas estándar de los colorantes: según el pH del agua destilada utilizada, se ajustó a un valor de pH de 3 unidades adicionando alícuotas de ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N para soluciones ácidas, y para soluciones alcalinas se ajustó a un valor de pH de 8 unidades

adicionando alícuotas de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N. Para cada uno de los colorantes en estudio, se prepararon 1000 ml de solución a una concentración de colorante de 0.005 %m/v que equivale a 50 ppm mediante una dilución de 10 ml de la solución comprada. Véase la Figura 6.

Figura 6. Soluciones estándar de los colorantes FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40



Nota: Fotografías tomadas por el investigador.

Ensayos de bioadsorción.

- Obtención de los filtrados: se colocaron 20 ml del residuo agroindustrial en estudio de tamaño de partícula < 1 mm en cada una de las seis mangueras plásticas (columnas de adsorción en lecho fijo), se vertieron 40 ml de solución estándar

(50 ppm) ácida (pH = 3) de un colorante en las primeras tres columnas, y se vertieron 40 ml de solución estándar (50 ppm) alcalina (pH = 8) del mismo colorante en las siguientes tres columnas. Se realizó el mismo procedimiento para 1 mm < tamaño de partícula < 3 mm, para el otro colorante en estudio y el resto de residuos agroindustriales. Véase la Figura 7.

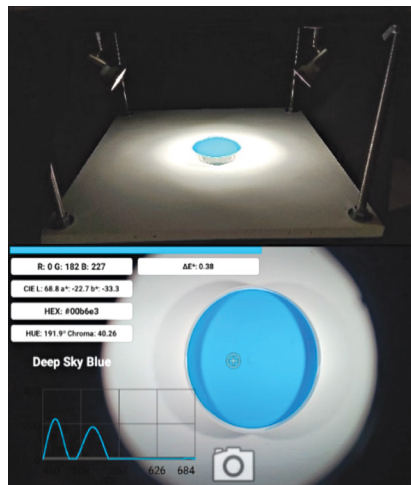
Figura 7. Filtrados obtenidos de las soluciones colorantes FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40



Nota: Fotografías tomadas por el investigador.

- Obtención de las coordenadas del espacio de color de las soluciones estándar de colorantes y de los filtrados: se colocó el teléfono móvil en la parte superior de la cabina, se verificó que el lente de la cámara estuviera sobre el agujero. Se ajustó la tabla superior de la cabina a una altura de 27 cm de la base, con ello se pudo verificar que la imagen del teléfono móvil estaba dentro del campo visual, centrada y nítida. Se ajustaron las dos luminarias de tal manera que se encontraran a un ángulo de 45° con respecto al lente de la cámara, para evitar así la reflexión especular (brillo). Se colocaron alícuotas de soluciones estándar de colorantes y filtrados en una tapadera plástica blanca que actuó como portamuestra. La medición se realizó por triplicado. Utilizando la aplicación “Colorimeter”, se obtuvieron las coordenadas del espacio de color CIELAB y se calculó la diferencia de color ΔE^*_{ab} entre las soluciones estándar y cada muestra de filtrado. Véase la Figura 8.

Figura 8. Obtención de las coordenadas del espacio de color CIELAB de los filtrados



Nota: Fotografías tomadas por el investigador.

Se aprecia la muestra de filtrado dentro de la cabina de luz y la pantalla de resultados en la aplicación “Colorimeter”.

Konica Minolta Sensing, Inc. (2007) enfatiza que en el espacio de color ΔE^*_{ab} , la diferencia de color puede ser expresada como ΔE^*_{ab} , usando la fórmula:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Donde

- ΔL^* = diferencia en el valor de claridad/obscuridad.

- Δa^* = diferencia en el eje rojo/verde.

- Δb^* = diferencia en el eje amarillo/azul.

X-Rite (2002, p. 15)

4. Metodología estadística

Se aplicó Análisis de Varianza (ANOVA) a los promedios de las diferencias de color ΔE^*_{ab} , utilizando 3 tipos de diseños experimentales:

- Diseño factorial 2^k , donde k representa a los factores (tamaño de partícula y pH), cada uno con 2 niveles (bajo y alto), realizado para cada colorante (FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40) y por cada

residuo agroindustrial (escamas de pescado, olote y brácteas de maíz), resultando así 6 análisis estadísticos. El objetivo fue evaluar la interacción de los niveles de los factores.

- Diseño completamente al azar, se realizaron 2 análisis estadísticos, uno por cada colorante. El objetivo fue establecer si existía diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales por cada uno de los colorantes estudiados.
- Diseño de bloques completamente al azar, un único análisis estadístico, siendo los bloques cada colorante y los tratamientos cada uno de los residuos agroindustriales. El objetivo fue comprobar si existía diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.

Resultados

La Tabla 2, muestra la caracterización de los residuos agroindustriales como humedad en base húmeda y en base seca, antes y después del secado, previo a los ensayos de bioadsorción.

Tabla 2. Análisis de humedad de los productos frescos y secos

Residuo agroindustrial	Producto fresco		Producto seco	
	Humedad promedio en base húmeda (%)	Humedad promedio en base seca (%)	Humedad promedio en base húmeda (%)	Humedad promedio en base seca (%)
Escamas de pescado	55.890	126.709	11.043	12.413
Olote	80.049	402.114	6.601	7.068
Brácteas de maíz	72.988	270.266	8.450	9.230

Nota: Elaboración propia.

Las Tablas 3, 4 y 5, muestran como un consolidado, los promedios de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados, así como la diferencia de color ΔE^*ab promedio de las tres repeticiones del ensayo para cada uno de los residuos agroindustriales. Se tomó en cuenta la siguiente codificación:


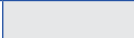










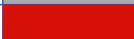



Letra1 Número1 Letra2 Número2
donde:

- **Letra 1:** tipo de residuo agroindustrial. “E” significa escamas de pescado, “O”

significa olote, “B” significa brácteas de maíz.

- **Número 1:** tamaño de partícula del residuo. “1” significa tamaño de partícula < 1 mm, “3” significa 1 mm < tamaño de partícula < 3 mm.
- **Letra 2:** tipo de colorante. “A” significa FD&C Azul No. 1, “R” significa FD&C Rojo No. 40.
- **Número 2:** pH de la solución colorante. “3” significa pH = 3 unidades, “8” significa pH = 8 unidades.


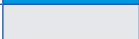














Tabla 3. Promedio de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados y diferencia de color (ΔE^*ab) para escamas de pescado

Código de la muestra	Tipo de solución	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	Imagen del color	ΔE^*ab^1
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1		51.4
E1A3	filtrado	+84.0	+0.0	-0.0		
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2		54.4
E1A8	filtrado	+81.7	+0.0	-0.0		
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1		20.2
E3A3	filtrado	+68.7	-22.5	-33.4		
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2		17.6
E3A8	filtrado	+66.5	-16.5	-39.5		
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8		88.2
E1R3	filtrado	+84.8	+0.0	-0.0		
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7		87.9
E1R8	filtrado	+83.4	+0.0	-0.0		
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8		15.3
E3R3	filtrado	+46.3	+63.6	+59.3		
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7		11.3
E3R8	filtrado	+43.1	+63.8	+56.7		

Nota: Elaboración propia.

1: ΔE^*ab constituye el promedio de ΔE^*ab entre patrón y filtrado para cada una de las tres repeticiones consideradas según tamaño de partícula y pH.











Tabla 4. Promedio de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados y diferencia de color (ΔE^*ab) para olote

Código de la muestra	Tipo de solución	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	Imagen del color	ΔE^*ab^1
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1		54.9
O1A3	filtrado	+78.6	-3.5	+6.9		
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2		31.4
O1A8	filtrado	+62.8	-24.7	-26.0		
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1		22.5
O3A3	filtrado	+68.0	-24.1	-30.8		
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2		20.1
O3A8	filtrado	+64.8	-18.2	-36.2		
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8		28.5
O1R3	filtrado	+59.7	+42.4	+37.9		
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7		17.3
O1R8	filtrado	+48.3	+64.1	+60.9		
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8		5.0
O3R3	filtrado	+40.9	+61.1	+50.7		
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7		4.0
O3R8	filtrado	+41.3	+60.6	+49.3		

Nota: Elaboración propia.

1: ΔE^*ab constituye el promedio de ΔE^*ab entre patrón y filtrado para cada una de las tres repeticiones consideradas según tamaño de partícula y pH.

Tabla 5. Promedio de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados y diferencia de color (ΔE^*ab) para brácteas de maíz

Código de la muestra	Tipo de solución	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	Imagen del color	ΔE^*ab^1
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1		57.4
B1A3	filtrado	+76.7	-5.4	+10.4		
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2		42.3
B1A8	filtrado	+62.3	-30.9	-16.8		
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1		23.8
B3A3	filtrado	+75.8	-23.7	-37.1		
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2		21.2
B3A8	filtrado	+70.4	-18.8	-39.4		
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8		17.6
B1R3	filtrado	+55.0	+52.6	+48.2		

Código de la muestra	Tipo de solución	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	Imagen del color	ΔE^*ab^1
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7		16.0
B1R8	filtrado	+47.1	+64.3	+60.0		
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8		5.7
B3R3	filtrado	+39.8	+60.1	+50.8		
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7		4.1
B3R8	filtrado	+37.3	+58.5	+46.8		

Nota: Elaboración propia.

1: ΔE^*ab constituye el promedio de ΔE^*ab entre patrón y filtrado para cada una de las tres repeticiones consideradas según tamaño de partícula y pH.

A continuación, se muestran los datos estadísticos, en tablas y figuras, obtenidos mediante el programa IBM SPSS Statistics 22.0 para el diseño de bloques completamente al azar.

Las hipótesis planteadas fueron:

- **Hipótesis nula (H_0):** No existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Sí existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.

La Tabla 6 declara los factores inter-sujetos de los residuos agroindustriales y los colorantes con su respectiva etiqueta de valor.

Tabla 6. Factores inter-sujetos de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes

		Etiqueta de valor	N
Residuo agroindustrial	1	Escamas de pescado	24
	2	Olote	24
	3	Brácteas de maíz	24
Colorante	1	Azul 1	36
	2	Rojo 40	36

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

La Tabla 7 muestra los estadísticos descriptivos: media y desviación estándar de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los colorantes FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40.

Tabla 7. Descriptivos de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	Mínimo	Máximo
Escamas de pescado	24	43.283	30.7055	6.2677	8.4	88.9
Olote	24	22.958	15.7560	3.2162	.8	55.2
Brácteas de maíz	24	23.508	17.4689	3.5658	1.2	57.6
Total	72	29.917	23.9862	2.8268	.8	88.9

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

La Tabla 8 muestra las pruebas de efectos inter-sujetos considerando los residuos agroindustriales (tratamientos) al interactuar con los colorantes (bloques).

Tabla 8. Pruebas de efectos inter-sujetos de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes Variable dependiente: Diferencia de color

ORIGEN	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo	72561.076 ^a	4	18140.269	37.691	.000
Residuo agroindustrial	6435.403	2	3217.701	6.686	.002
Colorante	1685.772	1	1685.772	3.503	.066
Error	32727.696	68	481.290		
Total	105288.772	72			

a. R al cuadrado = .689 (R al cuadrado ajustada = .671)
 Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

La Tabla 9 muestra las diferencias de medias de la diferencia de color (ΔE^*_{ab}) comparando los residuos agroindustriales entre sí como pares al interactuar con los dos colorantes, se acompaña del valor p (Sig.) para cada una de estas combinaciones.

Tabla 9. Comparaciones múltiples de los residuos agroindustriales según la Diferencia Mínima Significativa (DMS) al interactuar con los dos colorantes Variable dependiente: Diferencia de color

(I) Residuo agroindustrial	(J) Residuo agroindustrial	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95 %	
					Límite inferior	Límite superior
Escamas de pescado	Olote	20.325*	6.3330	.002	7.687	32.962
	Brácteas de maíz	19.775*	6.3330	.003	7.137	32.412
Olote	Escamas de pescado	-20.325*	6.3330	.002	-32.962	-7.687
	Brácteas de maíz	-.550	6.3330	.931	-13.187	12.087
Brácteas de maíz	Escamas de pescado	-19.775*	6.3330	.003	-32.412	-7.137
	Olote	.550	6.3330	.931	-12.087	13.187

Se basa en las medias observadas.
 El término de error es la media cuadrática(Error) = 481.290.
 *. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.
 Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Decisión

F observado (F_o), se obtiene de la prueba.

F crítico (F_c), se obtiene de tablas de distribución F .

$F_c = F_{\alpha}(v_1, v_2) = F_{0.05}(2, 68) = 3.14$, donde:

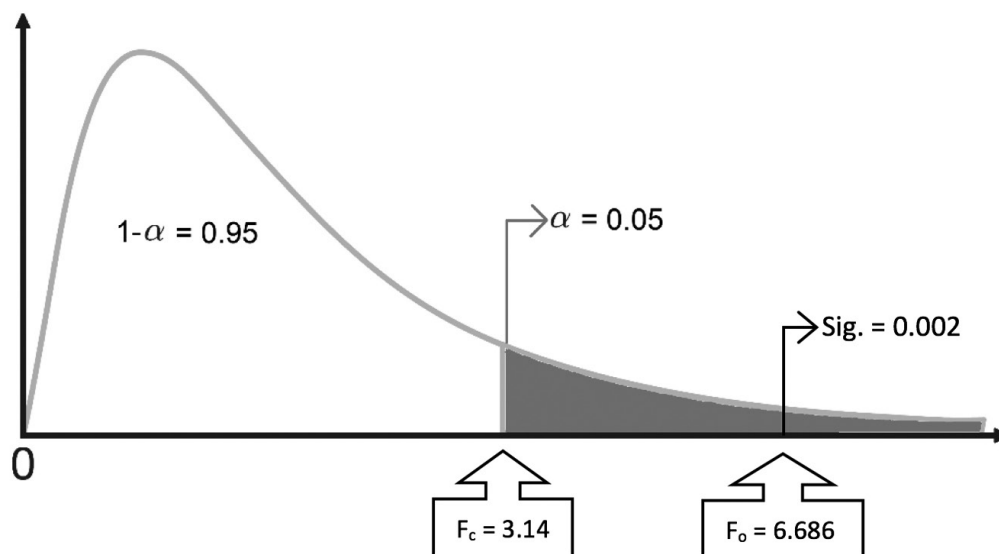
α : nivel de significación (Error Tipo I, es la probabilidad de rechazar H_0 , siendo H_0 cierta).

v_1 : grados de libertad del numerador (tratamientos: residuos agroindustriales).

v_2 : grados de libertad del denominador (el error).

La Figura 9 representa, en la distribución F , cada uno de los valores requeridos que permitió tomar la decisión con respecto a las hipótesis planteadas, para los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.

Figura 9. Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes



Nota: Elaboración propia.

Como $F_o > F_c$, es decir $6.686 > 3.14$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1). En términos del valor p de la prueba, la decisión quedó así: siendo $\alpha > \text{Sig.}$ (valor p), es decir $0.05 > 0.002$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1).

Conclusión

A un nivel de significación del 0.05, sí existe diferencia significativa entre los pro-

medios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.

Discusión

Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab).

La Tabla 10 muestra la discusión de la diferencia de color entre estándares y filtrados tomando en cuenta cada residuo agroindustrial.

Tabla 10. Discusión de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándares y filtrados

Residuo agroindustrial	Diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándares y filtrados
Escamas de pescado	<ul style="list-style-type: none"> Según los datos obtenidos y para ambos colorantes, la diferencia de color es más pronunciada para tamaños de partícula menor a 1 mm y la influencia del pH fue mínima.
Olote	<ul style="list-style-type: none"> Para ambos colorantes, la diferencia de color es más pronunciada para tamaños de partícula menor a 1 mm y con aparente influencia del pH ácido.
Brácteas de maíz	<ul style="list-style-type: none"> Para el colorante FD&C Azul No. 1, la diferencia de color es más pronunciada para tamaños de partícula menor a 1 mm y con aparente influencia del pH ácido. Para el colorante FD&C Rojo No. 40, la diferencia de color es más pronunciada para tamaños de partícula menor a 1 mm y la influencia del pH fue mínima.

Nota: Elaboración propia.

Diseño de bloques completamente al azar

La Tabla 11 muestra la discusión de los resultados del diseño de bloques completa-

mente al azar sobre las diferencias de color de los residuos agroindustriales, al interactuar con los dos colorantes.

Tabla 11. Discusión sobre el diseño de bloques completamente al azar

Tipo de residuo \ Tipo de colorante	<ul style="list-style-type: none"> FD&C Azul No. 1 FD&C Rojo No. 40
<ul style="list-style-type: none"> Escamas de pescado Olote Brácteas de maíz 	<ul style="list-style-type: none"> Las diferencias de los promedios de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre el estándar y filtrado son estadísticamente significativas tomando en cuenta ambos colorantes, siendo estas diferencias más notables entre las escamas de pescado y olote, así como entre las escamas de pescado y brácteas de maíz. Puede notarse que, para estas comparaciones, el intervalo de confianza no incluyó al cero, es decir, los promedios no son iguales. En base a lo anterior, puede determinarse que el mejor residuo agroindustrial por su alta capacidad adsorbente son las escamas de pescado (43.283 en promedio); en segundo lugar, las brácteas de maíz (23.508 en promedio) y, por último, el olote (22.958 en promedio), presentando estos últimos una capacidad adsorbente media muy similar.

Nota: Elaboración propia.

Conclusiones

- Para los tres residuos agroindustriales, se observaron filtrados más pálidos que sus correspondientes estándares, a un tamaño de partícula menor a 1 mm. Para el

colorante FD&C Azul No. 1 en los tres residuos agroindustriales, la coordenada b^* (dirección del amarillo o azul) de los filtrados, indicó que fueron menos azules que sus correspondientes estándares, siendo el efecto más pronunciado con

tamaño de partícula menor a 1 mm. Para el colorante FD&C Rojo No. 40, la coordenada a^* (dirección del rojo o verde) de los filtrados, no indicó claramente que fueran menos rojos que sus correspondientes estándares, para un tamaño de partícula menor a 1 mm.

- Para los tres residuos agroindustriales, el tamaño de partícula ejerció influencia en las medias de la diferencia de color entre estándares y filtrados para los colorantes FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40, siendo superior para el tamaño de partícula menor a 1 mm (valor más bajo).
- En cuanto a la variable pH, se comprobó que, para escamas de pescado y ambos colorantes, así como para brácteas de maíz y colorante FD&C Rojo No. 40 no ejerció influencia en las medias de la diferencia de color de las muestras; pero en el caso del olote y ambos colorantes, así como para brácteas de maíz y colorante FD&C Azul No. 1 sí ejerció influencia sobre todo a valor bajo (pH = 3).
- Se comprobó estadísticamente que, para los tres residuos agroindustriales, el tamaño de partícula y pH interactuaron entre sí ejerciendo influencia en los valores de las medias de la diferencia de color de las muestras para el colorante FD&C Azul No. 1, pero no hubo interacción de los factores para el colorante FD&C Rojo No. 40.
- Para el colorante FD&C Azul No. 1, las medias de la diferencia de color entre estándares y filtrados no fueron significativas en los tres residuos agroindustriales; en cambio, para el colorante

FD&C Rojo No. 40 se comprobó que las medias fueron significativas para los pares: escamas de pescado-olote y escamas de pescado-brácteas de maíz, siendo las escamas de pescado el mejor residuo agroindustrial como adsorbente para este último colorante. Puede inferirse que la diferencia pudo estar relacionada con la estructura química de los colorantes y su afinidad con los adsorbentes, siendo el FD&C Azul No. 1 perteneciente a la familia de los triarilmetanos y el FD&C Rojo No. 40 perteneciente a la familia de los azocompuestos.

- Al contrastar los tres residuos agroindustriales y los dos colorantes en estudio, se observaron diferencias significativas entre las medias de la diferencia de color estándar-filtrado, por lo que se determinó que el mejor residuo agroindustrial como adsorbente fueron las escamas de pescado (ΔE^{*ab} , promedio = 43.283); en segundo lugar, las brácteas de maíz (ΔE^{*ab} , promedio = 23.508) y, por último, el olote (ΔE^{*ab} , promedio = 22.958), demostrándose que la capacidad bioadsorbente es similar para los residuos derivados del maíz.

Referencias

CARRIAZO, J., Saavedra, M., y Molina, M. (2010). Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. *Educación Química*, 21(3), 224-229. [http://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30087-9](http://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30087-9)

DATACOLOR (ED.) (S.F.). Principios de la gestión del color. En Datacolor, *El triplete* (pp. 1-2). <https://bit.ly/3yPB5Vr>

FIGUEROA, D., Moreno, A., y Hormaza, A. (2015). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 105-120. <https://doi.org/10.22395/rium.v14n26a7>

KONICA MINOLTA Sensing, Inc. (ED.) (2007). *Precise Color Communication*. <https://bit.ly/3ibTmGD>

LETONA, M. (2014). *Implementación de un método de cuantificación de los colorantes artificiales FD&C amarillo No.5 (tartrazina), FD&C rojo No.3 (eritrosina), FD&C rojo No.40 (rojo allura), FD&C amarillo No.6 (amarillo ocaso), FD&C azul No.1 (azul brillante) en el área de fisicoquímico de alimentos del Laboratorio Nacional de Salud (LNS)* [Informe de Tesis, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://bit.ly/3uBI7K3>

LÓPEZ, L. (2017). *Diseño de un sistema de visión por ordenador para la caracterización del color*

del tomate (Solanum lycopersicum L.) [Trabajo fin de Máster, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://bit.ly/3fZDHHN>

MARN (ED.) (2013). *Informe de la calidad del agua de los ríos El Salvador / 2012-2013*. <https://bit.ly/3yOxPtw>

RESEARCH LAB TOOLS (ED.) (2015). *Lab tools apps*. <https://bit.ly/3fYCdxr>

VALLADARES-CISNEROS, M., Valerio, C., de la Cruz, P., y Melgoza, R. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 55-73. <https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>

X-RITE (ED.) (2002). *Guía para Entender la Comunicación del Color*. <https://bit.ly/3wOVCrE>