



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIONES QUÍMICAS

**“Remoción de colorantes textiles (Índigo Carmín y Rojo
Disperso-82) de agua utilizando el olote de maíz”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN DISEÑO MOLECULAR Y NANOQUÍMICA

PRESENTA:

CARLO BARUCH SANTOS FLORES

DIRECTOR DE TESIS

DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA

CUERNAVACA, MORELOS

DICIEMBRE, 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS



Control Escolar de Licenciatura

VOTOS DE APROBATORIOS

Secretaria ejecutiva del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

P r e s e n t e .

Por medio de la presente le informamos que después de revisar la versión escrita de la tesis que realizó el C. **SANTOS FLORES CARLO BARUCH** con número de matrícula **20144010872** cuyo título es:

“Remoción de colorantes textiles (Índigo Carmín y Rojo Disperso-82) de agua utilizando el olote de maíz”

Consideramos que **SI** reúne los méritos que son necesarios para continuar los trámites para obtener el título de **LICENCIADO EN DISEÑO MOLECULAR Y NANOQUÍMICA**.

Cuernavaca, Mor a 03 de noviembre del 2021

Atentamente
Por una universidad culta

Se adiciona página con la e-firma UAEM de los siguientes:

DR. JORGE ANTONIO GUERRERO ÁLVAREZ
DRA. MARIA LUISA GARCÍA BETANCOURT
DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA
DR. MARIO ALFONSO MURILLO TOVAR
DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ

PRESIDENTE
SECRETARIO
VOCAL
PRIMER SUPLENTE
SEGUNDO SUPLENTE



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JORGE ANTONIO GUERRERO ALVAREZ | Fecha:2021-11-03 12:53:59 | Firmante

jQ7pVHzYSReqWUJVwYlq9dt0W2h0xcjXOvgbBYqSB9RPY2H99O3y16eGukali5XJXz/lqPoEuK2HG8FSyysFCDfrJclzt+/LeHhVXg37wLJdckAf7bp8mT5Q9PriH+hLupiQh8Uifc9V+vflc+xZHEBK4pK34wB6NxTcleM97CYMjenij2tF2AN1Dae/ehlyAoKl+zqNT/QW1GX+WiiPv88wcQDI63qopExYqoAdvci8Y87nE7Ny1TnOoQpnTtUz5eLDem3x/MuKr49y57QeKMKs4yqo3UMaeswTIS1ssoMY2puybiAl7YUecTq4LaDsRT7vpMeQlkbRRN77SQ==

MARIO ALFONSO MURILLO TOVAR | Fecha:2021-11-03 12:59:19 | Firmante

beLsd1ON06gynpzMVyEowUbak+wFNk+gff7TdAFXLpCG+gAVuMGPy4CnF8VJ7KocYJJPuQc4gqI+UoyYTKQ3HAUE6nnQyGZnJGtFNggLIB7mX1lhOKsN+llfgaZ+zVD6e31/nWKsXwVk0c+Gz0zCfpvmZT1MHI+B6Vca031eX7tKM+OXkZA7hIdeeX7LKr9YUH9ft32c2futUdCpxM7ju/Nkl8oqG1CTFXUIZiS+5rsor7PMqesS02QP/T7mJWd5MeGMq9f/RivrPwMyf0CDCsVfSZJHvzOrZiuH4qSd7UG9CnRevO51QyuuDvW2rsAVmvrVK5XuJQSExoW+9Kg==

HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA | Fecha:2021-11-03 13:03:23 | Firmante

GafNUpteKSc9RKRyI7FMHwRkoPYvMRJPIf73IIIBC1JsE52IHJCN8pr0Wf/SkDaC1S6OQGRgsM1EtK2qh/wVUBcCvzPLjcEgKJRrcY7AZIH55ob8ArBPKSsGUcUiwojGeci7dobGd9YDwGjP3dsBIG19J4aKd6JgaPgl08fyEszAjnT/NgPbfm70w2xmxzBjfyw0GRPQADm4fK7rJdBbfhZokR5UjBdLfKrfCi8b2y6ABdmog1AA08xT66nC1MRmNwiRrMzcxRkK0JkkMGJLrKvGvEviA08iAofUElGzJlffw8S41fLB7HMJ62d8eTHYHsl8yzlCvr+xryjtEJrYA==

JOSEFINA VERGARA SANCHEZ | Fecha:2021-11-03 13:11:47 | Firmante

mUv07xnEASaLepmc3fBP4EekV+XC5//B3h2EwKgoN8eZydsd8ca+YNdvsJ/2JxYUWzPkcN.Jioe/V86hTM3PKFrelUYQNX33dfMrpgpng0xmD8Bvd8SagGeND+bc6PrLJMN5iYoRaGUxJ8+nnoJn0FBjgHKfGfAnSlyyw8nNK3u9Cd1e+Kzx8qgyx5xnagu3rG21uTEuZZU115EY/QxrtBcoLTXb6/s5AzoimRbpRydAA6qy4trwy6GxJfFn3f2Ow9f8D0Q0a8d6DKAIDOF31qp0DsX/+yWeMcLlkShvA7bwlKBuYPWHgyWrzqC7qGYvhNHhUyW6wQ/9C0YOf8wBg==

MARIA LUISA GARCIA BETANCOURT | Fecha:2021-11-04 13:13:39 | Firmante

debwEPwtW5Fh9xRkppoZIDAQFFXEJDY/60LQmSnoNwjkR1H60ms/0FGdGlcOo/IQ3uskLI+u4PMjNF/NnWcpt0F/+wU2MH0eu52o8mYLFt5q5lc7PF+nBXf7N8dg/HMtIjKTGJUKZ/H4Njo2D2DFnXZ6+nKzECdyfFGA6NKO4F+be3hSrl32E8l2syP+E91FPzA0jUocwlgdKNrmjUa3Ne87ZGniAx93XP0Ux06TNoZsmLx1MfwDTeOeXhk+ouV/DXoz1N6BUHmzOdYXnmFn7jkeq1jLJr/qh8QbXxa8X+dZLpE9Vqagao/XDpzNtmMlI/pSel5cOYmdp8xUq6w==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



shZpTE0tw

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/0gGh8EeJ3SjBbMg2fKQmTJ8EmVAuQqMa>



I. AGRADECIMIENTOS

El siguiente trabajo fue posible gracias al apoyo de la instituciones y personas que cito a continuación:

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), por su formación profesional y humana.

Al grupo de investigación de Química Analítica Ambiental que radica en el laboratorio 313 dentro del Centro de Investigaciones Químicas (CIQ), por brindarme su apoyo, tiempo y espacio de trabajo para realizar mis experimentos sin ningún problema y poder concluir con ellos.

Al Centro de Investigaciones Químicas por cubrir todos mis análisis y experimentos realizados en esta tesis y al CIICAP por dejarme realizar mis estudios de caracterización de mi fibra.

A mi asesor el Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña que fue quien me apoyó en todo momento dentro del laboratorio para poder concluir exitosamente este trabajo. Al igual que a mis sinodales la Dra. Ma. Luisa García Betancourt, el Dr. Jorge Antonio Guerrero Álvarez, que me apoyaron con sus observaciones para realizar correctamente esta tesis y sacar adelante este trabajo. Y agradezco al Dr. Mario Alfonso Murillo Tovar y a la Dra. Josefina Vergara Sánchez, por su ayuda y pertenecer a mi jurado revisor de tesis.

A los profesores investigadores y técnicos de laboratorio, que me enseñaron los conocimientos necesarios a través de la licenciatura para poder salir adelante y cumplir mis objetivos.

A mi padre Carlos Alberto Santos Islas, madre Laura Flores Mendoza, hermana Laura Arantza Santos Flores y mi familia por su amor, cariño y apoyo incondicional a través de todos estos años de estudio, permitiendo que saliera adelante en cada etapa de mi vida además de ayudarme a salir de los peores momentos que vive un estudiante.

A mi mejor amigo Oscar Bautista y a Ivonne Bustamante que a través del tiempo fueron una clave importante para no perder mis objetivos que me había planteado desde el inicio, por su amistad, ayuda y consideración.

II. RESUMEN

En este trabajo se evaluó la remoción de dos diferentes colorantes textiles, Rojo Disperso-82 (RD82) e Índigo Carmín (IC), al igual que la mezcla entre ellos, mediante el uso de Olote. Una de las principales propiedades del RD82 es que es un compuesto azoderivado, es decir, que contienen en su estructura el enlace $-N=N-$, por lo tanto, este colorante tiene una facilidad de síntesis y una amplia variabilidad. Se caracteriza por ser uno de los colorantes sintéticos más utilizados. Entretanto, el IC es un colorante ácido formado por una mezcla disódica del ácido 3,3'-dioxo-2,2'-bisindolilideno-5,5'-disulfónico y la sal disódica del ácido 3,3'-dioxo-2,2'-bisindolilideno-5,7'-disulfónico. El uso de colorantes textiles produce un gran impacto ambiental, dado que su aplicación se utiliza grandes volúmenes de agua. La composición de los efluentes con colorantes es muy variable, ya que, se tiene que tomar en cuenta las categorías de producción.

En este trabajo se centró en la capacidad de remoción de colorantes por medio del olote de maíz (proceso de adsorción) ya que es una técnica de bajo costo y alta eficacia, variando el pH hasta obtener las mejores eficiencias de remoción. Para las pruebas de remoción se realizaron empleando 2 g de olote de maíz en 50 mL con una concentración de 50 ppm de los colorantes con agitación constante por 4 h, variando el pH en un rango de 2 a 10. Los mayores porcentajes de remoción se presentaron a pH 2, para el RD82 68.70 %, mientras que para el IC estuvieron cercanas al 80.30 % y para la mezcla de ambos se obtuvo un 57.99 %. Estos resultados indican que los porcentajes de remoción son buenos, tomando en cuenta la literatura previamente revisada, donde se reportan porcentajes de remoción en un intervalo de 60 al 90 % en colorantes textiles con el método de adsorción, por lo que, se ubica el IC dentro de la media y por debajo el RD82 y mezcla. Además de que al olote no se le hizo ningún tratamiento químico. Cabe mencionar que la remoción se cuantificó por medio de la espectroscopía de ultravioleta-visible.

Finalmente se evaluó el proceso de adsorción que mejor explique la interacción entre los colorantes y la fibra de olote, los resultados indicaron que el modelo que mejor explicó la adsorción fue el de pseudo-primer orden, lo que sugiere que tanto fisisorción como quimisorción, intervienen en la remoción de dichas sustancias.

INDICE

I.	AGRADECIMIENTOS	I
II.	RESUMEN.....	II
	INDICE.....	III
	INDICE DE FIGURAS	V
III.	ABREVIATURAS.....	IX
1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	ANTECEDENTES.	2
2.1	El maíz en México.....	2
2.2	Uso del maíz en México.	3
2.3	El olote de maíz en México.	4
2.4	Caracterización del olote por Infrarrojo (IR).	6
2.5	El olote de maíz como material bio-adsorbente.....	10
2.6	Industria textil en México.	11
2.7	Los colorantes en México.....	13
2.8	Colorantes dispersos.	17
2.9	Colorante Índigo Carmín (IC).	17
3	MARCO TEÓRICO.....	18
3.1	Colorantes.....	18
3.2	Colorantes azo.....	19
3.3	Colorante Índigo.....	20
3.4	Espectroscopía Infrarroja (IR).	21
3.5	Microscopía electrónica de barrido (SEM).	26
3.6	Espectroscopía de ultravioleta-visible (UV-vis).....	27
3.7	Análisis elemental.....	30
3.8	Porosidad.....	31
3.9	Cinética de Adsorción.....	37

3.9.1	Modelos Cinéticos.....	37
3.9.1.1	Modelo de pseudo-primer orden.....	38
3.9.1.2	Modelo de pseudo-segundo orden.....	39
3.9.1.3	Modelo de Elovich.....	39
4	JUSTIFICACIÓN.....	41
5	HIPÓTESIS.....	41
6	OBJETIVOS.....	42
7	METODOLOGÍA.....	43
7.1	Tratamiento del olote.....	43
7.2	Caracterización por medio de SEM, IR y Análisis elemental.....	44
7.2	Remoción de colorantes textiles “Índigo Carmín (IC), Rojo Disperso-82 (RD82) y mezcla (IC y RD82).....	44
7.3	Cinética de adsorción.....	47
8	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
8.1	Técnica de Infrarrojo (IR).....	48
8.2	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	50
8.3	Análisis elemental.....	52
8.4	Barrido espectral de colorantes textiles IC, RD82 y mezcla.....	53
8.5	Remoción de colorantes.....	57
8.6	Cinética de adsorción.....	65
9	CONCLUSIONES.....	68
10	PERSPECTIVAS.....	70
11	BIBLIOGRAFÍA.....	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 El espectro FTIR de los tres componentes típicos de la biomasa (Yang et al., 2007, p. 1786).....	6
Figura 2 Espectro del olote de maíz (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1290).	8
Figura 3 Espectro IR del olote de maíz (García Albornate et al., 2015).	8
Figura 4 “Estructuras químicas con representación de grupos cromóforos y auxocromos (Gupta & Suhas, 2009).....	18
Figura 5 Reacción de diazotación (Sanz Tejedor, 2011).	19
Figura 6 Reacción de copulación (Sanz Tejedor, 2011).....	19
Figura 7 Estructura del colorante “Rojo Disperso-82” (Lee et al., 2014).....	20
Figura 8 Primera síntesis del Índigo (Balfoue-Paul,1998).....	20
Figura 9 Estructura del Índigo Carmín (Slokar and Le Marechal, 1998).....	21
Figura 10 Tipos de vibraciones moleculares (+) movimiento del plano hacia el lector, (-) movimiento del plano alejándose del lector (Skoog et al., 2008).....	23
Figura 11 Ejemplo de vibraciones simétricas y asimétricas del dióxido de carbono (Skoog et al., 2008).....	23
Figura 12 Modos de vibración por alguna afectación (Skoog et al., 2008).....	24
Figura 13 Transiciones electrónicas y espectros de los átomos (Owen T.,2000)	27
Figura 14 Pérdidas por reflexión y dispersión con una solución que está en un recipiente típico de vidrio. Las pérdidas por reflexión se presentan en todos los límites que separan los diversos materiales. En este ejemplo, la luz atraviesa las superficies de contacto aire-vidrio, vidrio-solución, solución-vidrio y vidrio-aire (Skoog et al., 2008).....	28
Figura 15 La radiación de la potencia radiante inicial P_0 es atenuada y se transforma en energía transmitida P mediante una solución que contiene c moles por litro de solución absorbente con una longitud de trayectoria de b centímetros (Skoog et al., 2008).	29
Figura 16 Equipo del FE-SEM CIICAP-UAEM.....	31
Figura 17 Ejemplo de porosidad intrapartícula, Interpartícula, poros irregulares, poros vesícula de perlita (Anicua Sánchez et al., 2009).	32
Figura18 Ejemplo de alta (izquierda) y baja (derecha) porosidad. Las formas negras representan sólidos y azul representa espacios porosos (Muhye, 2020).....	32
Figura 19 Ejemplo de una porosidad efectiva e inefectiva en materiales (Muhye, 2020). 33	
Figura 20 Factores que afectan a la formación y evolución del poro (Joardder et al., 2016 pp.26).....	33
Figura 21 Técnica de adsorción física de un gas y equipo (ATRIA, 2021).....	34

Figura 22 Efecto de la dosis de bioadsorbente y estructura porosa del olote de maíz por SEM (Rabbani, 2017 & Ojedokun & Bello, 2017, p. 1285).....	36
Figura 23 Efecto del pH en la remoción del R40, AB y Mezcla R40-AB (Villada & Hormaza, 2015).....	36
Figura 24 Etapas de adsorción desde un punto de vista cinético.	37
Figura 25 Ejemplo gráfico obtenido en modelo de pseudo-primer orden.	38
Figura 26 Ejemplo gráfico obtenido en modelo de pseudo-segundo orden.....	39
Figura 27 Ejemplo gráfico obtenido en modelo de Elovich.	40
Figura 28 Olote desgranado / Obtención de olote.	43
Figura 29 Olote cortado en trozos pequeños.....	43
Figura 30 Olote triturado.....	43
Figura 31 Olote recolectado en la caja petri.	44
Figura 32 Estufa Luzeren modelo DHG9030 A.	44
Figura 33 Ejemplo de solución RD82 durante la agitación de 4 h.	45
Figura 34 RD82, IC y Blanco (agua desionizada).	46
Figura 35 Espectro de IR del olote de maíz.....	48
Figura 36 Micrografías del Olote de Maíz (a) 100 μm (b) 200 μm (c) 50 μm	50
Figura 37 Micrografía Olote de maíz Mag 500x (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1285).	51
Figura 38 Gráfica de análisis elemental del olote de maíz.....	52
Figura 39 Barrido espectral del RD82.....	53
Figura 40 Barrido espectral del I.C.....	54
Figura 41 Barrido espectral del I.C. en la literatura de 400 nm-700 nm (Thermo Scientific,2019).	54
Figura 42 Barrido espectral de mezcla (IC y RD82).	55
Figura 43 Barrido espectral del IC, RD82 y Mezcla.....	56
Figura 44 Porcentaje de remoción del RD82.....	58
Figura 45 Porcentaje de remoción del IC.....	58
Figura 46 Porcentaje de remoción de la mezcla.....	59
Figura 47 Proceso de remoción del RD82.	59
Figura 48 Proceso de remoción del IC.....	59
Figura 49 Proceso de remoción de la mezcla.....	59
Figura 50 Reutilización del bioadsorbente.....	61
Figura 51 Índigo Carmín. leucoíndigo carmín.	62

Figura 52 Ejemplo de posible interacción entre los grupos funcionales de la fibra y el colorante leucoíndigo carmín.	62
Figura 53 Interacción del RD82 con el HCl.	63
Figura 54 Reducción de un colorante azoico (Ferreira R.,2005).	63
Figura 55 Posible interacción entre los grupos funcionales del olote y el colorante RD82.	64
Figura 56 Pseudo primer orden del RD82.	66
Figura 57 Pseudo-primer orden del IC.	67
Figura 58 Pseudo-primer orden de la mezcla.	67
Tabla 1 Cuadro de alimentos y preparaciones culinarias y tradicionales preparados con maíz (Ortega-Paczka, 2003).	3
Tabla 2 Cuadro de Comparación de la composición química del olote (%) del presente estudio con datos reportados con otros autores (Córdoba et. al, 2013).	5
Tabla 3 “Absorción en IR para grupos funcionales característicos presentes en la estructura química de las fibras dietéticas” (Salas A., et. al., 2008).	7
Tabla 4 Comparación de bandas en IR obtenidas en mi estudio con otros estudios (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1290).	9
Tabla 5 Aplicaciones de procesos químicos/físicos para la eliminación de color.	10
Tabla 6.- Porcentaje de fijación de color según el proceso de teñido y el tipo de colorante. (Aranda M., 2018).	15
Tabla 7 Características típicas de los efluentes principales procesos que constituyen la industria textil.	16
Tabla 8 Propiedades generales del índigo carmín.	21
Tabla 9 Absorciones IR características de algunos grupos funcionales (Skoog et al., 2008).	25
Tabla 10 Cromóforos seleccionados y sus máximos de absorbancia (Owen T.,2000).	30
Tabla 11 Soluciones a diferentes pH para efectuar la remoción.	45
Tabla 12 Análisis de bandas características del Olote.	48
Tabla 13 Componentes típicos de la biomasa (Yang et al., 2007, p. 1786).	49
Tabla 14 Comparación de bandas en IR obtenidas en este estudio (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1290).	49
Tabla 15 Porcentajes contenidos totales presentes en la fibra olote de maíz.	52
Tabla 16 Barrido del RD82.	53

Tabla 17 Barrido del IC	54
Tabla 18 Barrido Mezcla	55
Tabla 19 Porcentajes de remoción de colorantes	57
Tabla 20 Relación de carbono / nitrógeno de algunos materiales orgánicos (USDA, 2011).	60
Tabla 21 Parámetros cinéticos de pseudo-primer orden.	66
Ec. 1 Energía potencial total de una molécula (Owen T.,2000).....	27
Ec. 2 Diferencia de energía entre los diferentes estados. (Owen T., 2000)	27
Ec 3 y 4 , P y P_0 se refiere a P= Potencial de la radiación transmitida.....	28
Ec.5 La ley de Beer (Skoog et al., 2008).	29
Ec.6 Velocidad de adsorción.....	38
Ec.7 Ecuación de velocidad de adsorción integrada.....	27
Ec.8 De pseudo-segundo orden.	39
Ec.9 De pseudo segundo orden integrada.	39
Ec.10 Modelo de Elovich.....	39
Ec.11 Modelo de Elovich simplificado.	40
Ec. 12 Preparación de la solución de RD82.....	46
Ec. 13 Preparación de la solución IC 50ppm.	46
Ec.14 Preparación de soluciones 100ppm RD82 e IC.....	46
Ec. 15 Dilución química.....	47
Ec.16 Factor de dilución.....	47
Ec. 17 Porcentaje de remoción.....	57
Ec.18 Ecuación de Lagergren.....	65
Ec.19 Ecuación de pseudo-segundo orden.....	65
Ec.20 Ecuación del modelo de Elovich.....	65

III.ABREVIATURAS

%R	Porcentaje de remoción.
A_f	Absorbancia final.
A_o	Absorbancia inicial.
Aprox.	Aproximadamente.
C₁	Concentración uno.
C₂	Concentración dos.
CIICAP	Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.
CIQ	Centro de Investigaciones Químicas.
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua.
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles.
EDS	Detector de energía dispersiva.
IC	Índigo Carmín.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
IR	Espectroscopía Infrarroja.
RD82	Rojo disperso-82.
SAGARPA	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
SEM	Microscopía electrónica de barrido.
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
UAEM	Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
UV-vis	Ultravioleta-visible.
V₁	Volumen uno.
V₂	Volumen dos.
ε	Coefficiente de extinción molar.
λ_{máx.}	Longitud Máxima
π	Pi.

1 INTRODUCCIÓN.

La industria agrícola y todas las industrias de transformación que se derivan de ella generan grandes cantidades de residuos agroindustriales. Estos se pueden definir como todos aquellos materiales con contenido orgánico que se generan a partir de un proceso agrícola, su procesamiento o su comercialización. México es uno de los países más agricultores que aporta alimento en el mundo, entre los que destacan: el maíz, frijol, chiles, tomates, calabazas, aguacate y cacao. El maíz es uno de los principales y más representativos, se emplea principalmente en la elaboración de la tortilla representando más del 20 % en el gasto en alimentos a nivel nacional considerándose la base de supervivencia de los mexicanos, su producción se divide en blanco y amarillo; solo de octubre del 2016 a septiembre del 2017 se cosecharon 23,142,203 Ton de maíz blanco, y 8,071,840 Ton de maíz amarillo (INEGI,2017) y se estima que, por cada tonelada de maíz, se obtienen 170 kg de olote (CIMMYT,1995); es decir, 4 millones de Ton aproximadamente en un año convirtiéndose en un problema para los agricultores, sin embargo, una de las principales acciones para tratar dicho problema es reducirlo a cenizas, lo que genera una gran cantidad de gases de efecto invernadero y compuestos altamente tóxicos para la salud de los seres humanos.

Por otro lado, la industria textil ha tenido un papel importante en las actividades de la sociedad organizada, además de figurar entre las industrias más antiguas, tuvo un papel protagónico en la revolución industrial y ha sido una de las actividades industriales críticas para la economía de países en desarrollo. La industria textil en México data de 1830 hasta la fecha, abriendo paso a la generación de aguas contaminadas con colorantes (efluentes), por distintos procesos como es el teñido y estampado de fibras naturales, por ejemplo, algodón, lana, entre otras; ya que, se sabe que la industria textil es una de las principales fuentes de contaminantes para el agua a nivel mundial debido al volumen y composición de sus efluentes, los cuales son caracterizados por ser típicamente calientes, alcalinos y coloreados (Kumar et al., 2007; Srinivasan y Viraraghavan, 2010), además, los principales contaminantes presentes en estas agua residuales son compuestos químicos que implican altos valores de demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos, aceites minerales, compuestos orgánicos y metales pesados, lo que ha contribuido de manera significativa al deterioro de una gran cantidad de cuerpos de agua (Kaushik y Malik, 2009).

2 ANTECEDENTES.

2.1 El maíz en México.

La planta de maíz es de porte robusto con tallo simple, erecto; puede alcanzar los 4 m de altura, no tiene ramificaciones ni entrenudos, pero sí una médula esponjosa. El maíz se encuentra en forma de mazorca: el grano es cariósido de forma aplastada. Su alto contenido en carbohidratos y proteínas lo hacen el cereal ideal para todos los días (SAGARPA, 2016)

En México, existen 59 clases diferentes de maíz, de acuerdo con la clasificación más reciente basada en sus características morfológicas e isoenzimáticas (Sánchez et al., 2000) que representa un porcentaje significativo de las 220 a 300 clases existentes en el continente americano (Kato et al., 2009).

La dieta de una población particular precede en la memoria colectiva, y no solo comprende la ingesta de alimentos sino también expresa relaciones socioeconómicas y un simbolismo cultural. Existen testimonios del maíz (restos arqueológicos y manuscritos como el códice Florentino o el Mendocino) que permiten concluir que se trataba de uno de los componentes de la dieta mesoamericana desde el Preclásico Medio (1200-400 a.C.) (López, 2007; Taube, 1989). Sin embargo, diferentes restos arqueológicos indican, que el maíz fue ganando popularidad poco a poco, ya que existían otras plantas que predominaron en la dieta de los pobladores, (Ortega-Paczka, 2003).

La riqueza de la gastronomía indígena basada en el maíz fue asentada en testimonios fehacientes de los conquistadores y cronistas, desde Hernán Cortés y Bernal Díaz del Castillo, hasta Fray Bernardino de Sahagún quienes expresaron pruebas del alto grado de desarrollo cultural de los antiguos mexicanos, así como de la diversidad existente, ya en esos días, del maíz (Echeverría y Arroyo, 2000).

El mestizaje se dio a raíz de la “conquista española”, la cual una de sus principales manifestaciones, fue enriquecer la dieta prehispánica con ingredientes de la cocina hispano/árabe y viceversa, sin embargo, la cocina indígena predominó en el mestizaje alimentario, ya que el maíz sigue siendo el ingrediente fundamental y la aportación más significativa. En promedio, un mexicano recibe diariamente del maíz 1022 Kcal y 26.3 g de proteína (FAOSTAT, 2009) lo que puede representar 50 % de la ingesta diaria de una

persona adulta, si se toma como base una dieta de 2000 kcal y 56 g de proteína (Serna Saldívar y Amaya-Guerra, 2008).

2.2 Uso del maíz en México.

El uso más común hoy en día del maíz en México es la tortilla, la cual representa 20.9 % del gasto total en alimentos y es considerada como la base de la supervivencia del pueblo mexicano, sin embargo, se tienen relatos y escritos que indican que desde la conquista española (entre 1519 y 1521) ya predominaba en la dieta mesoamericana (Paredes-López et al., 2009).

Otro tipo de alimentos a base de maíz en México se muestra en la Tabla 1 (Ortega-Paczka, 2003)

Tabla 1 Cuadro de alimentos y preparaciones culinarias y tradicionales preparados con maíz (Ortega-Paczka, 2003).

Cuadro de alimentos y preparaciones culinarias y tradicionales preparados con maíz	
Tipo de preparación	Ejemplos de alimentos y preparaciones culinarias
Tortillas, antojitos, botanas y similares	Tortillas, totopos istmeños, tlayudas, chilaquiles, enchiladas, enfrijoladas, entomatadas, tacos, tostadas, quesadillas, garapaches, panuchos, papatzules, enjococadas, chopas de perico, chalupas, gorditas, molotes, peneques, sopes, tlacoyos o tlatloyos, salbutes, palomitas, totopos, nachos, frituras, otros.
Elotes y sopas	Elote, cuitlacoche, esquites, pozoles y menudos, chacales, chicales, huachales, chochoyotes, sopas, otros
Tamales y similares	Tamal. De elote y de nixtamal. Dulces y salados. Con y sin relleno. De cazuela. Joroch. Nacatamales, kehil hua, buuilil hua, zacahuil, pibipollo, tobi holoch, colados, chanchamitos, pictes de elote, uchepos, corundas, agrios, colados, con frijoles, de garbanzo, de cacahuate, de tortilla, de tismiche, de ceniza, de chaya, de juacane, de chipilín, de frutas (piña, coco, naranja, almendra, avellanas, ciruela pasa guayaba), otros.
Pinoles, dulces y repostería	Pinole, tascalate, “alfajores”, batarete yaqui, ponteduro, burritos de maíz, manjar de maíz azul, “maría gorda”, melcocha, memenshas, tepopoztes, pemoles, totopos de huetamo, boronitas, coricos, buñuelos, gorditas tradicionales, de cuajada, de piloncillo, de maíz cacahuacintle, gondoques de pabellón, galletas de Zacazonapan, pan de maíz, pan de elote, tortas de maíz, turuletes de maíz, tlaxcales, toqueras de elote, otros.
Atoles	Atole: blanco, nuevo, agrio, usua, champurrado, chileatole, cuatole, nicuatole, malarrabia, tanchucuá, nixteme, de pinole, de frijol, de cacahuate, de avellana, de frutas, de chiles, de pepita, de aguamiel, de coyol, de grano, común de sabores varios (chocolate, vainilla, etc.), otros.
Bebidas	Pozol, chorote, tesgüino (teshuino o tejuino), yorique, chicha, chilote, elisquiate, menjengue, piznate, otros.

Cabe destacar que la producción de maíz se divide en blanco y amarillo. El maíz blanco representa 86.94 % de la producción y se destina principalmente al consumo humano; esa producción satisface la totalidad del consumo nacional. Mientras que el maíz amarillo se destina a la industria o la fabricación de alimentos balanceados para la producción pecuaria. Esa producción satisface solo 24 % de los requerimientos nacionales. (SAGARPA, 2016)

En estados como Tamaulipas y Nuevo León hay zonas con gran potencial de producción de las 7.76 millones de hectáreas de maíz grano sembradas en 2016, el 75.59 % de la superficie no están mecanizadas, sin embargo, gran parte del territorio nacional es propicio para la producción de maíz.

En el Estado de Morelos se producen 105,564 Ton por 7,179 área sembrada (Ha), dando un rendimiento de 9.90 tonelada por hectárea (Ton/Ha) según la estimación del servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP, 2004) y se dice que, por cada tonelada de maíz, se obtienen 170 kg de olote (CIMMYT,1995). Por lo tanto, solo en el Estado de Morelos se obtiene un total de 12,077.14 Ton de olote de maíz.

2.3 El olote de maíz en México.

Los subproductos agroindustriales son los residuos sólidos originados en la actividad agraria, siendo una alternativa para alimentar al ganado en épocas de escasez, situaciones que se presentan cada año durante el invierno y los períodos de sequía. La melaza (subproducto derivado de la industria azucarera proveniente de la caña) puede ser un buen alimento, tanto en engorda en potrero (pastoreo) como en corrales, siempre y cuando los otros componentes de la ración suplan los requerimientos de proteína, puesto que la melaza sola no es un buen alimento para la engorda de los animales (E.N.A.& I.N.I.A., 1962) (De Alba J., 1950), sin embargo, estudios demuestran que la melaza contiene, aproximadamente, el 75 % del valor del maíz a igual peso (Barnett, et.al. 1923), por lo que, sustituyendo el maíz por melaza en raciones de engorda se pueden obtener aumentos satisfactorios. El olote molido es una fuente de fibra barata en las regiones maiceras y es un buen compuesto para absorber la melaza en las mezclas de los productos que integran la ración (E.N.A.& I.N.I.A., 1962) (C. Carrera, et.al. 1963).

De acuerdo con el *“plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas primera etapa: Diagnóstico nacional”* octubre del 2015 (SAGARPA, 2015), La cantidad anual de subproductos derivados de las actividades agrícolas oscila alrededor de 45 millones de toneladas de materia seca para los diez principales cultivos (maíz, sorgo, trigo, frijol, arroz,

cebada, soya, algodón, cártamo y ajonjolí); el rastrojo y olote de maíz (25,500,000 toneladas), las pajas de sorgo (6,600,000 toneladas) y de trigo (4,500,000 toneladas) representan poco más del 81 % de los residuos de cultivos.

El olote de maíz es un material con alto contenido en Xilanas, es un residuo o subproducto agrícola que se “*genera en grandes cantidades en el proceso de separación del grano de la mazorca*”, por lo tanto, se podría decir que se trata de un residuo agroindustrial proveniente de la industria agrícola junto con todas las industrias de transformación que se derivan de ella.

Los residuos usualmente se suelen desechar de diversas maneras, por esparcimiento sobre la tierra, por incineración al aire libre o mezclado con otros compuestos en la alimentación ganadera como forraje, generando ganancias muy bajas o nulas (SAGARPA 2010). Sin embargo, la incineración de este producto puede llegar a crear compuestos indeseados que afectan directamente a los seres vivos y al medio ambiente.

Un estudio realizado por la Universidad de Guadalajara en México llamado “Caracterización y valoración química del olote: degradación hidrotérmica bajo condiciones subcríticas”. Revela las propiedades del Olote (Tabla 2).

Tabla 2 Cuadro de Comparación de la composición química del olote (%) del presente estudio con datos reportados con otros autores (Córdoba et. al, 2013).

Composición química del olote (%) del estudio con datos reportados con otros autores (Córdoba et. al, 2013)				
Componentes (%)	Olote*	Referencias		
		(Garrote et. al, 2007)	(Rivas et. al, 2004)	(Thompson,1995)
Hemicelulosas	33.6	31.1	39.0	33.7-41.2
Celulosa	45 50	34.3	34.3	30.0-41.7
Lignina Klason	15.8	18.8	14.4	4.5-15.9
Cenizas	2.0	No reporta		No reporta

* Reportado en este estudio.

2.4 Caracterización del olote por Infrarrojo (IR).

Un estudio hecho por la Universidad Tecnológica de Nayang en 2006, determinó las bandas pertenecientes a la celulosa, hemicelulosa y lignina, utilizando un espectrómetro de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) y polvo de KBr para su análisis, obteniendo así el siguiente espectro (Figura 1) (Yang et al., 2007, p. 1786).

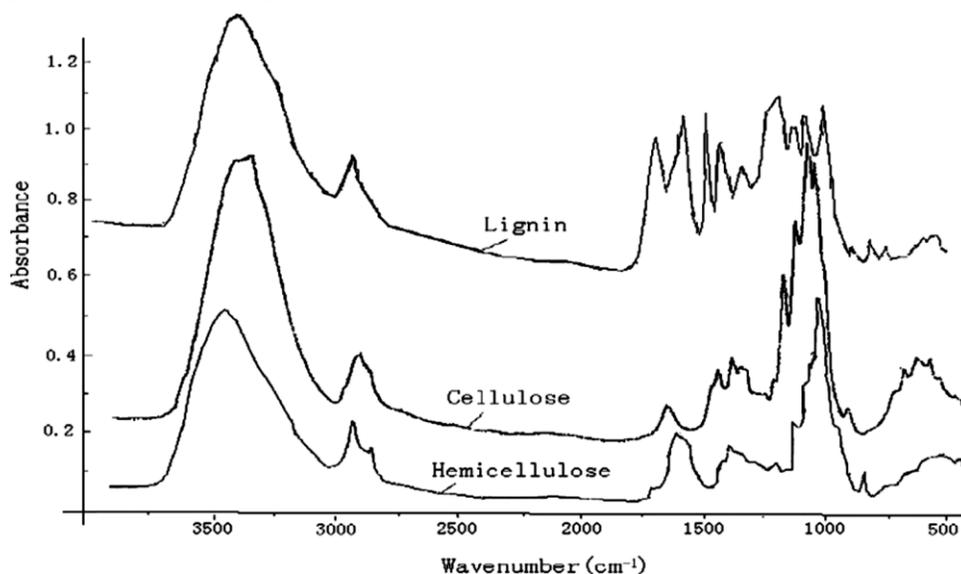


Figura 1 El espectro FTIR de los tres componentes típicos de la biomasa (Yang et al., 2007, p. 1786).

Se demostró que los tres componentes de la biomasa están constituidos principalmente en alquenos, ésteres, anillos aromáticos, cetonas y alcoholes, en conjunto de grupos funcionales que contienen oxígeno como por ejemplo OH (3400- 3200 cm⁻¹), C=O (1765-1600 cm⁻¹), C-O-C (1270 cm⁻¹) y C-O-(H) (1060 -1000 cm⁻¹), etc. (Yang et al., 2007, p. 1786)

En conclusión, se notaron diferencias en los diferentes espectros de IR, teniendo una mayor absorbancia de OH y C-O en la celulosa, mientras que la hemicelulosa contenía compuestos C=O más altos (Yang et al., 2007, p. 1786).

Entretanto en un trabajo de investigación sobre el níspero común realizado por Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú (Salas A., et. al. 2008) permitió demostrar la importancia del fruto como fuente de fibra dietética, obteniendo 8.44 % de pectina, 7.68 % de celulosa, 4.98 % de hemicelulosa y 0.62 % de lignina; la caracterización por IR permitió la identificación de grupos funcionales característico de cada fibra, por ejemplo, el estiramiento en 1750 cm⁻¹ para el grupo de C=O. En la siguiente tabla se muestra más específicamente cada banda relacionada con cada fibra natural.

En la siguiente Tabla 3 se muestra la “Absorción en IR para grupos funcionales característicos presentes en la estructura química de las fibras dietéticas” (Salas A., et. al. 2008).

Tabla 3 “Absorción en IR para grupos funcionales característicos presentes en la estructura química de las fibras dietéticas” (Salas A., et. al., 2008).

Absorción en IR para grupos funcionales característicos presentes en la estructura química de las fibras dietéticas (Salas A. et. al. 2008)			
Fibra dietética	Grupo funcional	Estiramiento	Posición de la absorción (cm⁻¹)
Pectina	Alcoholes	O-H	3383.0
	Alcanos	CH	2921.0
		CH ₂	1425.3
	Éteres	C-O-C	1111.0
	Ácidos carboxílicos	O-H	3383.0
C=O		1740.3	
Celulosa	Alcoholes	O-H	3452.0
	Alcanos	CH	2921.2
		CH ₂	1142.0
		CH ₃	1380.0
	Éteres	C-O-C	1111.0
Ácidos carboxílicos	O-H	3452.0	
	C=O	1717.0	
Hemicelulosa	Alcoholes	O-H	3415.7
	Ácidos carboxílicos	O-H	3452.7
		C=O	1102.8
	Alcanos	CH ₂	1442.0
	Éteres	C-O-C	1102.8
	Grupo carboxílico y sus derivados	OH	3415.7
C=O		1740.3	
Lignina	Alcoholes	O-H	3411.6
	Alcanos	CH	2917.1
	Aromático	C=C	3056.1
	Éteres	C-O-C	1503.3
	Ácidos carboxílicos y sus derivados.	O-H	1278.5
		C-O	3411.6
C=O		1715.8	

Por su parte, en un estudio realizado por el departamento de química pura y aplicada (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1289) de Nigeria, se estudió al olote de maíz como posible materia adsorbente de colorante congo rojo, obtuvieron resultados similares a los obtenidos en nuestro estudio (Figura 2).

En las Figuras 2 y 3 se muestra los espectros obtenidos y podemos observar que se tratan de bandas similares a las que obtuve en mi estudio (Tabla 4).

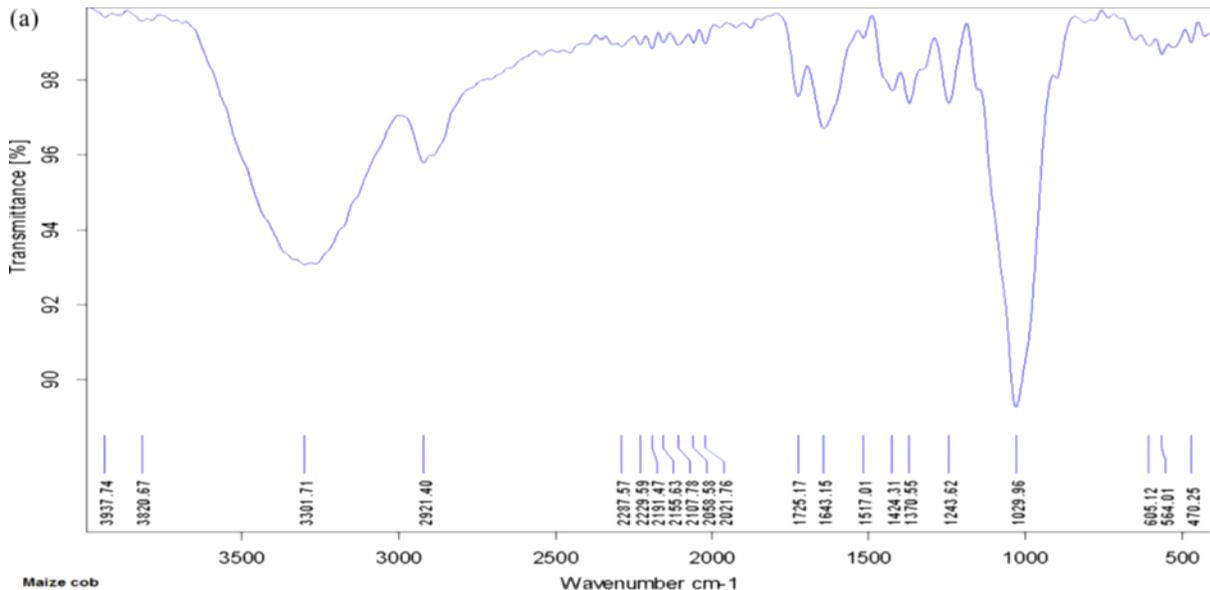


Figura 2 Espectro del olote de maíz (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1290).

Otro estudio reportado por el Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad de Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Tamaulipas y la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México, se analizó al olote de maíz para la adsorción de Pb(II), el cual se caracterizó por espectroscopía infrarroja (Figura 3) para obtener las diferentes bandas típicas, que corresponden a grupos funcionales pertenecientes a azúcares, que están asociadas con las señales características de la celulosa, lignina y hemicelulosa (Tabla 4) (Samanta et al, 2012, Oliveira et al, 2010):

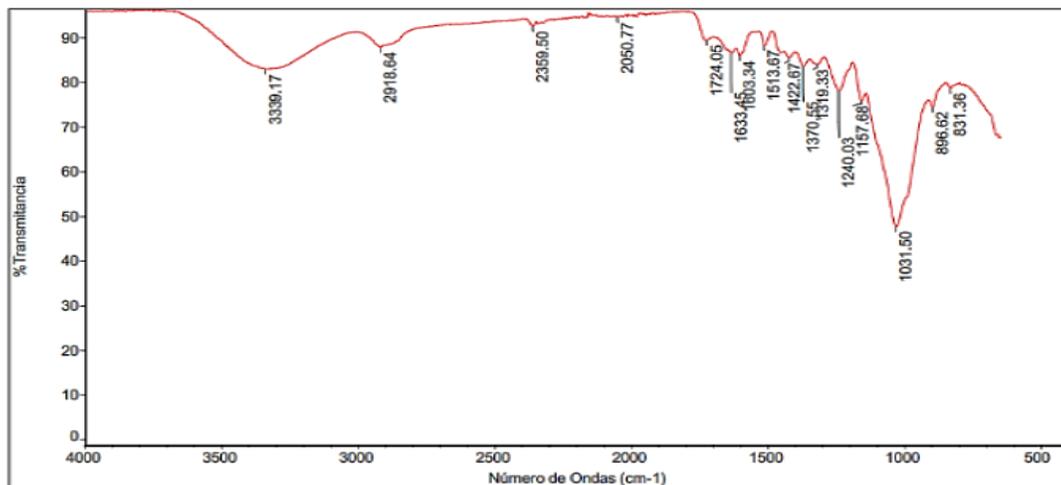


Figura 3 Espectro IR del olote de maíz (García Albortante et al., 2015).

En la siguiente Tabla 4, se muestran una comparación de bandas en IR obtenidas en mi estudio vs otros estudios reportados en la literatura.

Tabla 4 Comparación de bandas en IR obtenidas en mi estudio con otros estudios (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1290).

BANDAS OBTENIDAS	BANDAS DE COMPARACIÓN (García Albortante et al., 2015)	BANDAS DE COMPARACIÓN (Ojedokun & Bello, 2016, p. 1290)	BANDAS CARACTERISTICAS DE HEMICELULOSA, CELULOSA Y LIGNINA EN OLOTE (García Albortante et al., 2015)	Asignación de bandas IR
3309.25 cm⁻¹	3339.17 cm ⁻¹	3301.71 cm ⁻¹	Correspondiente a celulosa.	-OH estiramiento de los grupos hidroxilo.
2923.17 cm⁻¹	2918.64 cm ⁻¹	2921.40 cm ⁻¹	Correspondiente a hemicelulosa.	-CH estiramiento.
1635.36 cm⁻¹	1633.45 cm ⁻¹	1643.15 cm ⁻¹	Correspondiente a la lignina.	-C=O estiramiento.
1031.77 cm⁻¹	1031.50 cm ⁻¹	1029.96 cm ⁻¹	Correspondiente a celulosa.	Los grupos de C-O se estiran en los grupos de éster, de éter.

2.5 El olote de maíz como material bio-adsorbente.

A lo largo del tiempo, se ha demostrado que el olote de maíz es un material con muchas aplicaciones, una de ellas importante de este material es la adsorción de especies químicas como metales, colorantes, aceites, aguas residuales, entre otros. Un estudio publicado por la Universidad de Ulster en Gran Bretaña (Robinson, T. et. al.2002), reportó una eficiencia de remoción del 92 % de un efluente artificial (preparado por ellos), mezclando 5 colorantes diferentes (amarillo cibacrón C-2R, rojo cibacrón C-2G, azul cibacrón C-R, negro remazol B y rojo remazol RB) en agua desionizada variando su concentración de 50 ppm a 200 ppm (50 ppm, 100 ppm, 150 ppm, 200 ppm), utilizando el olote de maíz como bio-adsorbente en concentraciones de 1 g, 2g y 5 g sin variar el pH en agitación por 48 h, midiendo así la decoloración del efluente por medio de un espectrofotómetro de UV-Vis. Tomando como conclusión que la mayor remoción se efectuó a una concentración de 50 ppm, con 2 g de olote en periodos cortos (3 a 4 h aprox.) mientras que, en periodos largos con 1 g (48 h).

En la Tabla 5 (Collivignarelli et al., 2019) se muestra otros diferentes métodos químicos/físicos que son utilizados para el tratamiento de efluentes, los cuales se basan en el cambio de pH del efluente para obtener porcentajes altos de remoción y diferentes periodos de agitación.

Tabla 5 Aplicaciones de procesos químicos/físicos para la eliminación de color.									
Proceso químico/físico.									
Proceso	Origen Industrial	Tipo	Colorante	Condiciones de operación			Porcentaje de remoción (%)	Referencias	
				pH	t _r (min).	Otros			
Coagulación/ Floculación	Colorante/textiles	Sintético	Rojo congo	6	30	Co= 500 mg/L	80-90	Vijayaraghavan et al. (2017)	
			Azul directo	4	30	Co= 500 mg/L	79-90		
	Textil	Sintético	Azul brillante	8-9	65	C _{floculante} = 1-6mL / 100mL Cloruro de polialuminio= 70 mg/L	75-76		Sun et al. (2017)
			Rojo ácido 119	1-6	65	Co= 100-200 mg/L	82-89		Butani and Mane (2017)
	Colorante/textiles	Sintético	Violeta de metilo	11-12	52-172	C _{coagulante} = 20-40 mg/L C _{floculante} = 2.5-40 mg/L	98		Golob et al. (2005)
Textil	Real	Varios	6-8	77	C _{coagulante} = 300-400 mg/L	99	Mane and Babu (2011)		

	Colorante/ textiles	Sintético	Rojo congo Rojo ácido 398	4-5	57	Co= 100 mg/L C _{coagulante} =100- 120 mg/L	60-80	Zonoozi et al. (2008)
Adsorción	Textil	Sintético	Violeta de metilo Basic Blue	-	30	Adsorbente= perlite	-	Crini (2006)
	Textil	Real	Varios	3	150	Adsorbente= Aserrín de caoba Co= 50-100 mg/L	65-70	Malik (2004)
	Colorante/ textiles	Sintético	Rojo congo	6.5- 7	-	Carbón activado= 1g/L	80-90	Purkait et al. (2007)
	Colorante/ textiles	Real	Varios	10	120	Carbón activado= 2.5g/L	88	Popuri et al. (2016)
Filtración	Textil	Real	Varios	7.5- 9.5	-	UF; Presión= 2 bar	90	Erkanlı et al. (2017)
	Textil	Sintético	Direct-15	7	15	UF; Co= 5-20 mg/L	40-80	Ahmad et al. (2017)
	Comida	Real	Varios	11	30	Nanofiltración (NF)	81 COD=80	Jang et al. (2018)
	Fábrica de papel	Real	Varios	-	-	Ultrafiltración (UF) Nanofiltración (NF)	93-98 99-100	Pokhrel and Viraraghavan (2004)

- *t_r*: Tiempo de reacción
- *C_o*: Concentración inicial del colorante.
- *UF*: Ultrafiltración.
- *NF*: Nanofiltración.

2.6 Industria textil en México.

La industria textil en México comenzó a partir de 1830, para el año 1837 se habían construido 4 fábricas de hilado en Puebla con 8000 husos (instrumento) y en 1844 existían 47 fábricas por todo el país con 113,813 husos. Anteriormente se tejía mediante técnicas artesanales, lo cual daba como resultado una baja productividad que caracterizaba a la industria mexicana, además de que existían 18,422,932 husos parados por falta de algodón y 5 fábricas habían cerrado en Puebla. (Arroyo L., et. al., 2010).

En 1845 se fabricaban un total de 1,641,182 telas de manta comercializadas a 5 pesos reales cada una, obteniendo un ingreso bruto de 4, 606, 625 pesos. El costo por salarios por unidad era de 2.20 pesos y otros gastos e impuestos adicionales sumaban 1.35 pesos. El total de pagos salariales era de sólo 1,520, 600 pesos y 865, 595 por otros gastos. La

mayoría de la maquinaria textil era importada de los Estados Unidos, Inglaterra y Francia; utilizaban energía hidráulica, relativamente barata para mover la maquinaria, pero supeditada a los ciclos de lluvias que eran irregulares, afectando al ritmo de producción industrial (Arroyo L., et.al.2010).

Durante el periodo que comprende de 1850 a 1870 la expansión de la industria en México no fue tan notable, pero contribuyó al incremento de pequeñas y medianas empresas, además, se consolidó la economía mercantil y abrió paso a la expansión del capitalismo mexicano como un sistema productivo dominante, impulsado básicamente por la burguesía nacional y extranjera; promoviendo la modernización de los talleres textiles. En los veinte años del periodo de 1850-1870, la inversión textil creció hasta llegar a ser de entre veinte a veinticinco millones de pesos, constituyendo el 25 % de la inversión total en industria. (Arroyo L., et.al.2010).

Al final del periodo (aprox.1873) se tenía una inversión de 150 mil husos, movido por 11,790 trabajadores, de los cuales 2,011 eran mujeres y 2,474 eran niños, además trabajan 32 mil tejedores, dando como total una ocupación laboral de 43 mil empleos provenientes de la industria textil (Argüello, 1989).

Desde el punto de vista económico puede argumentarse que la historia moderna en México inicia a principios de la década de los cuarenta, en la que el gobierno se encarga de impulsar la economía capitalista, construyendo innumerables obras de inversión, por lo que, la industria textil aprovechó las ventajas que el gobierno desarrolló para disminuir costos de producción directos e indirectos. El crecimiento anual de la industria textil fue del 4.8 % durante 1970 a 1976, mientras que en el periodo de 1976-1981 el crecimiento fue del 6.1 %, cabe aclarar que la industria textil fue uno de los sectores más dinámicos en cuanto a crecimiento. (Arroyo L., et.al.2010).

La contribución del sector textil y del vestido al comercio exterior comienza a partir de los años setenta, por lo que, de 1970-1978, las exportaciones de textiles aumentaron un 20.5% anualmente, sin embargo, de 1978-1980 hubo un descenso promedio del 32.2 % (Cárcamo, 1991); esto fue a causa por el incremento en los incentivos hacia la industria petrolera y el crecimiento de la espiral inflacionaria, provocando así baja competitividad en la industria textil y del vestido. Por otro lado, en las décadas de los 80s y 90s se implementaron empresas dedicadas al ensamble de prendas de vestir (maquiladoras), usando insumos de

los Estados Unidos de América (EUA) y aumentando la cantidad de divisas. La devaluación del peso en 1993 y 1994 junto con la iniciativa del caribe que daba acceso preferencial de los países latinoamericanos, contribuyeron a que México fuera más atractivo en cuanto al abasto internacional de prendas de vestir.

La creación y ubicación de maquiladoras cerca de la frontera norte, redujo costos de logística, facilitando el acceso al mercado estadounidense. La actividad exportadora del sector textil favoreció la creación de empleos, en 1990 se reportaban 42,231 trabajadores laborando en el sector, cifra que se incrementó en diez años hasta 265,935; sin embargo, la falta de desarrollo tecnológico y de coordinación del sector provocó que al inicio del nuevo siglo la industria mexicana perdiera competitividad frente a países del este de Europa y de Asia, principalmente China. Durante el período de 2001 a 2007, la tasa de exportación de prendas de vestir mexicanas decreció aproximadamente un 11 % por año en tanto que la tasa de exportaciones de prendas fabricadas en China seguía aumentando (Ramírez, 2010).

Por lo tanto, se concluye que el desempeño de este sector está íntimamente relacionado con la historia económica del país en el sentido de que los esfuerzos para la recuperación económica, industrialización y apertura de fronteras para el comercio internacional han determinado los avances de esta industria.

2.7 Los colorantes en México.

En México los primeros criterios sobre calidad del agua se establecieron desde 1989; sin embargo, no eran de cumplimiento jurídico obligatorio; por ello la calidad del agua se convirtió en un problema, ya que el continuo crecimiento de la población humana, así como el desarrollo industrial, agrícola y comercial demandaron cada vez mayor cantidad de dicho recurso, lo que provocó una sobreexplotación y la generación de agua residual (Harada, 2008); solamente en áreas urbanas se generan 228.7 m³/s de agua residual, esto indica que en el país se generan 7.21 km³/año de agua residual proveniente de las ciudades, mientras que 6.67 km³/año de otras fuentes, como pueden ser las descargas de agua residual provenientes de las industrias. Las cuales únicamente tiene cobertura de tratamiento un 36 % de aguas residuales municipales y un 15 % de industriales (SEMARNAT-CONAGUA,2015)

Por lo tanto, el Programa Nacional Hídrico 2007-2012 (CONAGUA) reconoció el problema, y uno de sus objetivos es mejorar aspectos sobre la contaminación del agua; por lo que

considera la necesidad de modificar criterios como, por ejemplo: "Información sobre toxicidad de pesticidas, uso del agua y entornos de la industria", entre otros. (Moeller Chávez, et al., 2013)

Los aportes de contaminantes del sector industrial están concentrados en un número limitado de actividades entre las que destaca la industria textil. En el 2003 cerca de 2,500 establecimientos textiles generaron 0.7 m³/s de aguas residuales y produjeron 14 mil Ton de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno). (INEGI, 2011).

La composición de los efluentes generados en esta industria es muy variable, de acuerdo con la categoría de producción (Zeybek, et al., 2007). El agua residual de este sector es típicamente alcalina y presenta concentraciones de DBO₅ que pueden variar de 700 a 2000 mg/L y una demanda química de oxígeno (DQO), de aproximadamente de 2 a 5 veces el valor de DBO₅ (Kaushik y Malik, 2009)

Para el 2010 en México se produjeron 122,422 toneladas de fibras químicas para uso textil. De ellas el 85.8 % corresponden a fibras sintéticas, principalmente, poliéster filamentado textil, poliéster fibra corta y nylon filamentado textil. Para este mismo año se reportó que sumaban 14,950 los establecimientos del sector textil y del vestido, dado un incremento casi del 600 % en tan solo 7 años en México (INEGI, 2011). Existen comercialmente más de 100,000 colorantes en todo el mundo y se producen más de 700,000 Ton de colorantes anuales en todo el mundo (Supaca, et al., 2004).

Cabe resaltar que la presencia de colorante en agua residual se debe particularmente durante el teñido de telas o hilos, el colorante no es fijado completamente y genera residuos que varía del 12 % al 30 % dependiendo del tipo de colorante en la tabla siguiente se muestran algunos procesos de teñido con sus respectivos grados de fijación (Zhang, et al., 1999) (Tabla 6).

Tabla 6.- Porcentaje de fijación de color según el proceso de teñido y el tipo de colorante. (Aranda M., 2018)

Porcentaje de fijación de color según el proceso de teñido y el tipo de colorante		
Tipo de tinte	Proceso	Grado de fijación (%)
Disperso	C	88 - 99
Disperso	P	91 - 99
Directo	B	64 - 96
Reactivo de lana	B	90 - 97
Reactivo de algodón	B	55 - 80
Reactivo general	B	60
Reactivo general	P	70 - 95
Tina	C	70 - 80
Tina	P	60 - 90
Azufre	C	65 - 95
Azufre	P	85 - 95
Ácido – uno SO₃ - grupo	B	85 - 93
Ácido ≥ 1 SO₃ - grupos	B	85 - 98
Básico (Catiónico)	B	96 - 100
Azoico (naftol)	C	76 - 89
Azoico (naftol)	P	80 - 91
Complejo metálico	B	82 - 98
Pigmento	C	*100
Pigmento	P	*100

* C = Teñido Proceso Continuo, P = Estampado, B = Teñido por lote.

La problemática de los efluentes textiles no sólo está asociada a la presencia de colorantes, en la industria textil es bastante notable el consumo elevado de agua 150-350 L/Kg de fibra, la fijación variable de los colorantes y la presencia de auxiliares químicos tóxicos que conducen a una serie de problemas operativos en los sistemas de tratamiento (IPPC, 2003, Schönberger y Schäfer, 2002, Sponza, 2006)

En la Tabla 7 se presentan las características típicas de efluentes de los principales procesos que constituyen la industria textil como son el lavado, descruce, blanqueado, mercerizado, teñido e impresión (World Bank Group, 2011).

Tabla 7 Características típicas de los efluentes principales procesos que constituyen la industria textil.

PROCESO	CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DEL EFLUENTE
LAVADO	En el proceso de la fibra (especialmente lana), se utiliza agua caliente para remover, sólidos, grasas, etc. El efluente es altamente alcalino y aporta concentraciones significativas de DBO ₅ y DQO, desinfectantes, insecticidas, aceites, grasas, pectinas, cera, lubricantes y solventes gastados.
DESCRUDE	Los efluentes en este proceso pueden generar concentraciones significativas de materia orgánica y sólidos. Las cargas de DBO ₅ y DQO oscilan entre el 35 y 50 % de carga total y las concentraciones de DQO pueden llegar a ser de 20,000 mg/L
BLANQUEADO	Se utiliza agentes blanqueadores como el peróxido. Sin embargo, los que están a base de cloro pueden producir halógenos orgánicos y causa concentraciones de halógenos absorbibles (AOX) en particular trihalometanos
MERCERIZADO	Los efluentes generados en este proceso son altamente alcalinos por el tratamiento que se le realiza a la fibra (algodón), ya que pasa por una solución de sosa caustica y un tratamiento de lavado de agua caliente.
TEÑIDO	El teñido presenta una amplia coloración en los efluentes, esto se debe a los pigmentos, metales (Cobre, zinc, cromo, cobalto y níquel), aminas, agentes químicos como auxiliares en la formulación del colorante (agentes espumantes y dispersantes) y en el proceso de teñido. Los efluentes se caracterizan por tener una alta concentración de DQO y bajas concentraciones de DBO ₅ habitualmente por encima de 5000 mg/L. Las concentraciones de sal pueden variar entre 2000 y 3000 mg/L.
IMPRESIÓN	El agua residual en este proceso está constituida principalmente por pigmentos, resinas y antiespumantes; esto a su vez genera grandes concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COV)

2.8 Colorantes dispersos.

El desarrollo de las técnicas mecánicas de dispersión se ha desarrollado desde 1920 por ejemplo la molienda con “bolas acuosa y uso de los agentes más efectivos de dispersión” produjeron dispersiones concentradas, por lo tanto, este colorante se vendía en pasta (Medina et al., 2012).

En la actualidad la elección de “agentes dispersantes adecuados” les permite secarse, formando polvos redispersables con partículas de tamaño más pequeñas que las pastas (Medina et al., 2012).

Se utilizan para la elaboración de fibras de poliéster, acetato y poliamidas. La solidez del color a la luz es generalmente buena, mientras la solidez al lavado depende de la estructura de la fibra a la cual se aplica la tintura. Debido a su facilidad de síntesis y a su variabilidad, se caracterizan por ser los más importantes, perteneciendo este grupo casi la mitad de los colorantes sintéticos (Aranda, 2018).

2.9 Colorante Índigo Carmín (IC).

El Índigo carmín (IC), el colorante ácido “Saxon Blue”, fue inventado por Johann Christian Barth en 1743. El colorante Índigo carmín se utiliza ampliamente como un medio de contraste por la industria textil, en particular para productos de mezclilla. La fracción significativa del índigo restante durante el proceso de coloración es descargada en el ambiente por cientos de las fábricas de teñido (Slokar y Le Marechal 1998; Vautier et al. 2001).

El IC es un colorante sintético de color azul, es uno de los más antiguos y de gran importancia, pero a su vez, uno de los más tóxicos (Hu Y., et.al.,2016). En la coloración de fibras celulósicas los tintes índigos y tintes sulfurosos representan una gran parte del mercado mundial, el índigo ocupa un 7 %, representando cerca de las 120 mil toneladas de tintes usados anualmente (Quintero L., et.al., 2010)

Este colorante pertenece al grupo de los tintes tina, los cuales, en el proceso de teñido, entre el 5 y el 20 % permanecen sin fijarse (O'Neill, et.al., 1999)

3 MARCO TEÓRICO.

3.1 Colorantes.

Como se mencionó anteriormente, cada tipo de colorante presenta características físicas, químicas y biológicas diferentes, que les atribuyen características recalcitrantes y efectos tóxicos para el ambiente. (O' Neill, et al., 1999). Por lo que la principal fuente de contaminación en los efluentes textiles está constituida por la presencia de colorantes “azo”, que son difíciles de degradar en sistemas de tratamiento convencional (Aranda M. 2018).

Se pueden clasificar según su composición química (Radical-azo, antraquinona, sulfuro, índigo, ftalcianina) o según su comportamiento en los procesos de teñido. La mayoría de los colorantes utilizados en la industria textil son solubles. Los más claros son los tintes “azo” (70-80 %) y componen la mayor parte de los pigmentos en el mercado, seguidos por los ftalcianinas (Aranda M. 2018).

Las moléculas de los colorantes se componen de dos grupos clave: los grupos *cromóforos*, responsables de producir el color, y los grupos *auxocromo* (Figura 4), que hacen que la molécula sea soluble en agua (formando puentes de hidrogeno) y proporcione una mayor afinidad a las fibras, por ejemplo (Gupta & Suhas, 2009).

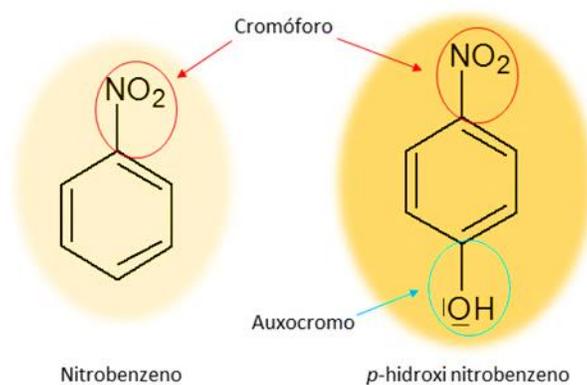


Figura 4 “Estructuras químicas con representación de grupos cromóforos y auxocromos (Gupta & Suhas, 2009).

Sin embargo, también los auxocromos aumentan la movilidad de los electrones de los sistemas comofóricos y así mueve la banda de absorción principal de longitudes de onda cortas a largas, produciendo color.

3.2 Colorantes azo.

Los colorantes de dispersión tienen componentes orgánicos los cuales no son solubles en agua, pero pueden ser dispersados en el agua con la ayuda de auxiliares específicos (AFIRM GROUP, & Sedlak, D., 2015). Los colorantes “azo-amino” son solubles temporalmente por la introducción de grupos ácidos sulfónicos solubilizados lentamente en el baño de tintura, las bases libres insolubles empiezan a ser absorbidas por la fibra. Estas tintaciones fueron en algunos casos posteriormente disociadas y desarrolladas con fenoles o aminas libres de grupos ácido sulfónico (Medina et al., 2012).

Para la preparación de colorantes azoicos se utiliza siempre una amina aromática que por reacción con ácido nitroso (preparado in situ desde NaNO_2 y HCl) da lugar a un compuesto dinitrogenado llamado sal de diazonio. Esta reacción recibe el nombre de diazotación (Figura 5) (Sanz Tejedor, 2011).

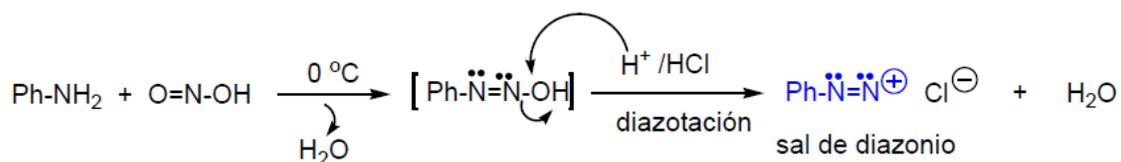


Figura 5 Reacción de diazotación (Sanz Tejedor, 2011).

Las sales de diazonio aromáticas son compuestos estables que actúan como electrófilos débiles, y dan reacciones de Sustitución Electrófila Aromática frente a fenoles y arilaminas. El proceso, que transcurre en frío y con rapidez, recibe el nombre de “copulación”. La “copulación” de fenoles se hace a pH ligeramente básico y la de aminas a pH ligeramente ácido. La sustitución se produce preferentemente en “para” salvo que esta posición esté ocupada (Figura 6) (Sanz Tejedor, 2011).

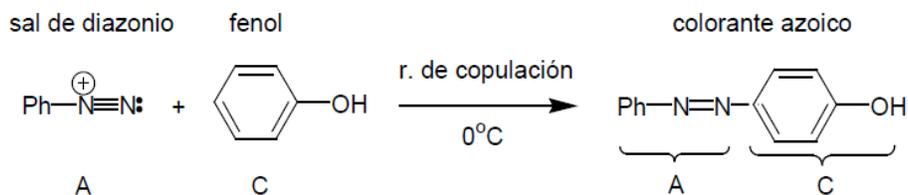


Figura 6 Reacción de copulación (Sanz Tejedor, 2011).

El Rojo Disperso-82 (RD82), es un compuesto azo-derivado, quiere decir que contienen en su estructura el enlace $-\text{N}=\text{N}-$ (Figura 7) (Aranda M., 2018).

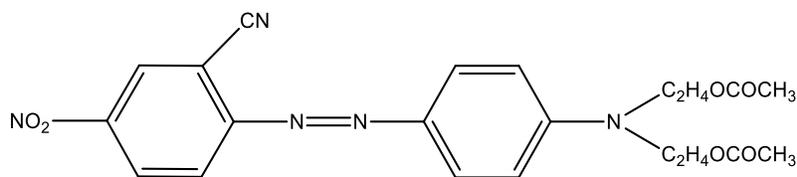


Figura 7 Estructura del colorante “Rojo Disperso-82” (Lee et al., 2014).

En los colorantes dispersos deben estar presentes uno o más grupos polares $-NH_2$, $-OH$, NHR , $-NR_1R_2$, $-NHCH_3$, etc. Actúa como auxocromo y aumenta la sustentividad de los tintes dispersos no-iónicos para fibras sintéticas. La linealidad de la molécula aumenta la sustentividad. Por ejemplo: el rojo disperso, tanto para fibras celulósicas como para sintéticas (Velarde & González, 1996).

Los colorantes dispersos pueden tener efecto de tipo alérgico, pueden causar sensibilidad, irritación en la piel, pueden suscitarse problemas respiratorios y nasales; picazón en los ojos.

3.3 Colorante Índigo.

Se produce esencialmente una mezcla de la sal disódica del ácido 3,3'-dioxo-2,2'-bisindolilideno-5,5'-disulfónico y la sal disódica del ácido 3,3'-dioxo-2,2'-bisindolilideno-5,7'-disulfónico y colorantes subsidiarios, junto con cloruro de sodio y/o sulfato de sodio como principales componentes incoloros (ANMAT & INAME, 2003). La primera síntesis que se realizó de índigo fue a partir de o-nitrobenzaldehído, acetona, en una mezcla de hidróxido de sodio, hidróxido de bario y amonio (Figura 8), (Balfour-Paul, 1998)

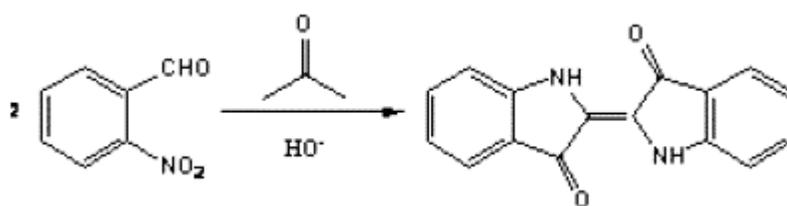


Figura 8 Primera síntesis del Índigo (Balfoue-Paul,1998).

Como es bien sabido, la coloración intensa de moléculas orgánicas es debido al sistema de conjugación π . La ruptura del sistema de conjugación π de estos compuestos resultaran en productos decolorados (Figura 9) (Slokar and Le Marechal 1998).

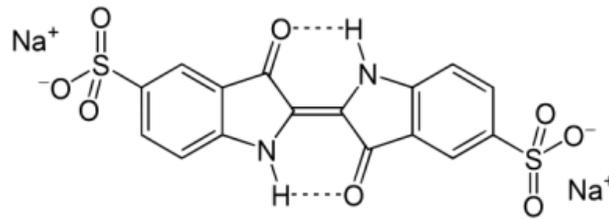


Figura 9 Estructura del Índigo Carmín (Slokar and Le Marechal, 1998).

Las propiedades del IC son las siguientes (Tabla 8) (Méndez, H. et. al, 2010)

Tabla 8 Propiedades generales del índigo carmín

Propiedades del Índigo Carmín	
Nombre sistemático (IUPAC)	3,3'-dioxo-2,2'-bi-indolilideno-5,5'-disulfonato disódico.
Apariencia.	Polvo fino color púrpura.
Masa molar.	466.36 g/mol
Punto de fusión.	>300 K
Solubilidad en agua.	10 g/L (25 °C)

El índigo (indigotina, azul índigo) forma cristales azules con brillo cobrizo, que se disuelven fácilmente en acetona hirviendo o ácido acético, así como en anilina caliente, y subliman en vacío. El índigo se debe de solubilizar en agua antes de utilizarlo en la industria del teñido.

Dicho colorante tiene una persistencia en el ambiente, sus oxidaciones y reducciones parciales pueden generar productos secundarios tóxicos, además de ser resistente a la acción de agentes químicos, luz, calor y es poco degradable. A lo largo de los últimos años, investigadores han desarrollado nuevos y diferentes métodos para su remoción entre los que se destacan la adsorción, degradación fotoelectrocatalítica, electrocoagulación, filtración, intercambio iónico, procesos electroquímicos tales como oxidación electroquímica, reducción electroquímica, entre otros (Méndez, H. et. al, 2010 & Vasco, P. et. al., 2014)

Se han reportado efectos nocivos del IC en la salud del hombre a través de la ingesta, contacto con la piel y ojos; el consumo de este colorante puede ser fatal, ya que es cancerígeno, provocando toxicidad aguda, hipertensión, enfermedades cardiovasculares, gastrointestinal, irritaciones y efectos respiratorios (Sood, S. et. al., 2015)

3.4 Espectroscopía Infrarroja (IR).

La espectroscopía vibracional fue una de las primeras técnicas espectroscópicas que encontró un uso extendido, en particular la espectroscopía de absorción infrarroja (IR) que recibe su nombre de la región del espectro electromagnético implicado. Los espectros de

absorción, emisión y reflexión en el infrarrojo se pueden explicar por los distintos cambios energéticos vibracionales y rotacionales en la molécula (Skoog et al., 2008).

La radiación infrarroja no tiene la suficiente energía para producir la clase de transiciones electrónicas que se encuentra en las radiaciones ultravioleta-visible, por lo que, se limita a especies moleculares que tienen una pequeña diferencia de energía entre los estados vibracionales y rotacionales, por lo tanto, una molécula debe sufrir un cambio neto en el momento dipolar cuando vibra o gira; por ejemplo:

La distribución de la carga alrededor de una molécula como el ácido clorhídrico no es simétrica porque el cloro posee una densidad electrónica mayor que el hidrógeno. Por tanto, el ácido clorhídrico posee un momento dipolar significativo, explicando que cuando una molécula de ácido clorhídrico vibra, se produce una fluctuación regular en su momento dipolar. De manera análoga, la rotación de las moléculas asimétricas alrededor de sus centros de masa produce fluctuaciones periódicas en el momento dipolar permitiendo la interacción con el campo de radiación. Por otro lado, cuando se trata de especies homonucleares como N_2 , O_2 o Cl_2 el momento dipolar no sufre un cambio durante la vibración o la rotación, por consiguiente, este tipo de compuesto no absorbe radiación infrarroja.

La energía necesaria para producir un cambio en los niveles de rotación es muy pequeña $\nu \leq 100 \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda > 100 \mu\text{m}$), como los niveles rotacionales están cuantizados, la absorción en líquidos y sólidos producen choques e interacciones intramoleculares causando así, ensanchamiento de líneas originando un espectro continuo, sin embargo, la rotación sigue siendo muy restringida por lo que las líneas discretas-rotacionales desaparecen y sólo quedan bandas vibracionales algo ensanchadas. Por otro lado, en moléculas sencillas (diatómicas o triatómicas) se pueden definir el número y la naturaleza de las diferentes vibraciones que existen, mientras que, en moléculas poliatómicas, es difícil, si no imposible hacer un análisis de esa clase. En la siguiente Figura 10 se muestra los diferentes tipos de vibraciones moleculares (Skoog et al., 2008).

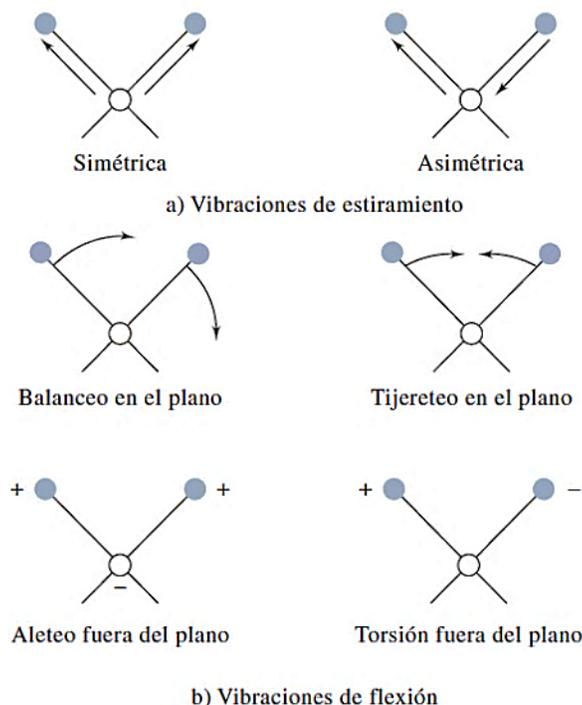


Figura 10 Tipos de vibraciones moleculares (+) movimiento del plano hacia el lector, (-) movimiento del plano alejándose del lector (Skoog et al., 2008).

La energía de una vibración y, por consiguiente, la longitud de onda del correspondiente máximo de absorción, podrían ser afectadas por osciladores en la molécula o estos acoplados a ellos. Algunos factores que influye:

1. Ocurre un acoplamiento entre las vibraciones de estiramiento, sólo cuando existe un átomo en común.
2. La interacción entre las vibraciones de flexión, por un enlace en común entre los grupos que vibran.
3. Acoplamiento entre una vibración de flexión y estiramiento.
4. Se observa muy poca interacción entre grupos separados por dos o más enlaces.
5. El acoplamiento requiere que las vibraciones sean de especies con una misma simetría, como se muestra en la siguiente imagen (Figura 11) (Skoog et al., 2008).

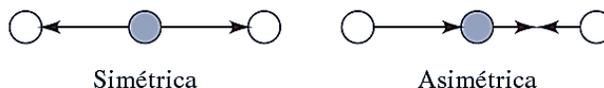


Figura 11 Ejemplo de vibraciones simétricas y asimétricas del dióxido de carbono (Skoog et al., 2008).

Como se observa en la figura anterior la vibración simétrica no genera algún cambio en el momento dipolar, porque los átomos de oxígenos se mueven alejándose o acercándose simultáneamente al átomo del carbono (central), por lo tanto, la vibración simétrica no se puede observar en el infrarrojo. En la vibración asimétrica, un oxígeno se aleja del átomo de carbono a la vez que este se acerca al otro oxígeno, por lo que, hay un cambio periódico en la distribución de carga que produce un cambio en el momento dipolar, lo cual da como resultado una absorción.

Sin embargo, existen otros modos de vibración que puede tener una molécula, como pueden ser, el tijereteo, tensión simétrica, tensión asimétrica, entre otros. (Figura 12) (Skoog et al., 2008).

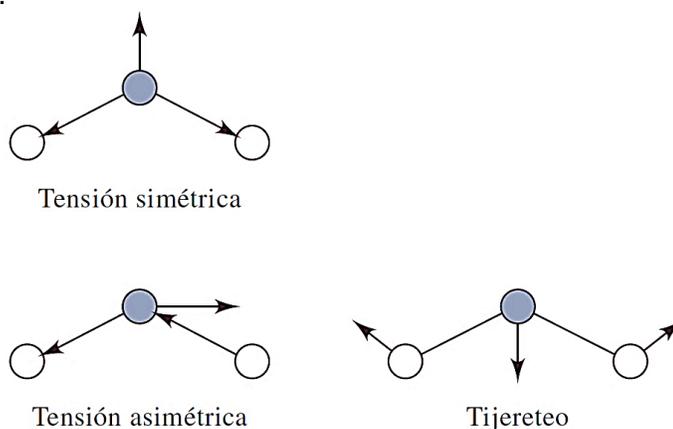


Figura 12 Modos de vibración por alguna afectación (Skoog et al., 2008).

La región del IR se encuentra en un intervalo de 12800 cm^{-1} - 10 cm^{-1} por lo que se puede dividir en tres zonas:

- IR cercano: 12800 cm^{-1} - 4000 cm^{-1}
- IR medio: 4000 cm^{-1} - 400 cm^{-1}
- IR lejano: 400 cm^{-1} - 10 cm^{-1} .

En la zona del espectro electromagnético IR con longitudes de onda del infrarrojo medio (entre 4000 y 1300 cm^{-1}) se suelen observar una serie de bandas de absorción provocadas por las vibraciones entre únicamente dos átomos de la molécula. Estas vibraciones derivan de grupos que contienen hidrógeno o de grupos con dobles o triples enlaces aislados.

En la zona del espectro electromagnético IR con longitudes de onda comprendidas entre 1300 y 400 cm^{-1} (infrarrojo lejano), la asignación de las bandas de absorción a vibraciones moleculares es más difícil de realizar, debido a que cada una de ellas está generada por absorciones individuales sumadas (multiplicidad de las bandas). Es la denominada zona de

la huella dactilar (flexión de enlaces CH, CO, CN, CC, etc.) ("Técnicas - Espectroscopia Infrarroja - Caracterización de Materiales Cristalinos", 2006)

En la Tabla 9 se muestra algunos de los grupos funcionales principales junto con su absorción e intensidad. Dos de los grupos más fáciles de identificar a la hora de leer un espectro de IR, es del alcohol (-OH) y amina (-NH) ya que se caracterizan por estar en la región del IR medio (entre 3650 cm^{-1} y 3300 cm^{-1}) teniendo una intensidad fuerte y amplia (-OH) y media (-NH).

Tabla 9 Absorciones IR características de algunos grupos funcionales (Skoog et al., 2008).		
Grupo funcional	Absorción (cm^{-1})	Intensidad
Alcano		
C-H	2850-2960	Media
Alqueno		
=C-H	3020-3100	Media
C=C	1640-1680	Media
Alquino		
\equiv C-H	3300	Fuerte
C \equiv C	2100-2260	Media
Halogenuro de alquilo		
C-Cl	600-800	Fuerte
C-Br	500-600	Fuerte
Alcohol		
O-H	3400-3650	Fuerte, amplia
C-O	1050-1150	Fuerte
Areno		
C-H	3030	Débil
Anillo aromático	1660-2000	Débil
	1450-1600	Media
Amina		
N-H	3300-3500	Media
C-N	1030-1230	Media
Compuesto carbonilo		
C=O	1670-1780	Fuerte
Aldehído	1730	Fuerte
Cetona	1715	Fuerte
Éster	1735	Fuerte
Amida	1690	Fuerte
Ácido carboxílico	1710	Fuerte
Ácido carboxílico		
O-H	2500-3100	Fuerte, amplia
Nitrilo		
C \equiv N	2210-2260	Media
Nitro		
NO ₂	1540	Fuerte

3.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Lo primero que debemos saber es que, la composición química de un sólido depende de su interior. Los métodos espectroscópicos para superficies proporcionan información química tanto cualitativa como cuantitativa sobre la superficie de un sólido, (SEDICI, 2019).

El principio de la espectroscopía consiste en que una muestra sólida es irradiada por un haz primario de fotones, electrones, iones o moléculas neutras. Enseguida el impacto de ese haz genera otro haz secundario, que también está formado por fotones, electrones, moléculas o iones de la superficie del sólido; posteriormente el espectrofotómetro por medio de una dispersión, de evaporación por bombardeo o de emisión, detecta el haz secundario provocando así diversos métodos espectroscópicos (SEDICI, 2019).

El microscopio electrónico de barrido, conocido así por sus siglas en el inglés SEM (Scanning Electron Microscopy), utiliza electrones en vez de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de su objeto. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra y la observación y caracterización superficial de sólidos (Universidad de Burgos, 2018).

El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar (CONACYT, 2019):

- El detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image) (CONACYT, 2019).
- El detector de electrones retro dispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image) (CONACYT, 2019).
- Un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diverso análisis semicuantitativo y de distribución de elementos en superficies (CONACYT, 2019).

Las principales ventajas del SEM son la alta resolución (~1 nm), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras. La preparación de las muestras es relativamente sencilla las principales características son: Tener una muestra sólida conductora, en caso contrario, la muestra es

recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el “oro” para darle propiedades conductoras a la muestra (CONACYT, 2019).

3.6 Espectroscopía de ultravioleta-visible (UV-vis).

Cuando la radiación interacciona con la materia, pueden ocurrir varios procesos como reflexión, dispersión, absorbanza, fluorescencia/fosforescencia (absorción y reemisión) y una reacción fotoquímica (absorbancia y rotura de enlaces). En general, cuando se miden espectros UV visible, sólo es deseable que ocurra la **absorbancia** (Owen T.,2000).

La energía potencial total (E_{total}) de una molécula, generalmente se representa como la suma de sus energías electrónica, vibracional y rotacional (Ec. 1) (Owen T.,2000)

$$E_{total} = E_{electrónica} + E_{vibracional} + E_{rotacional} \quad \text{Ec. 1}$$

La cantidad de energía que una molécula posee en cada forma no es un continuo, sino una serie de niveles o estados discretos. Las diferencias de energía entre los diferentes estados siguen el orden (Ec.2) (Owen T.,2000):

$$E_{electrónica} > E_{vibracional} > E_{rotacional} \quad \text{Ec. 2}$$

En algunas moléculas y átomos, los fotones de luz UV y visible tienen suficiente energía para causar transiciones entre los diferentes niveles. La longitud de onda de la luz absorbida es aquella que tiene la energía requerida para mover un electrón desde un orbital en estado basal (inferior) a un estado excitado (superior) (Figura 13) (Owen T.,2000).

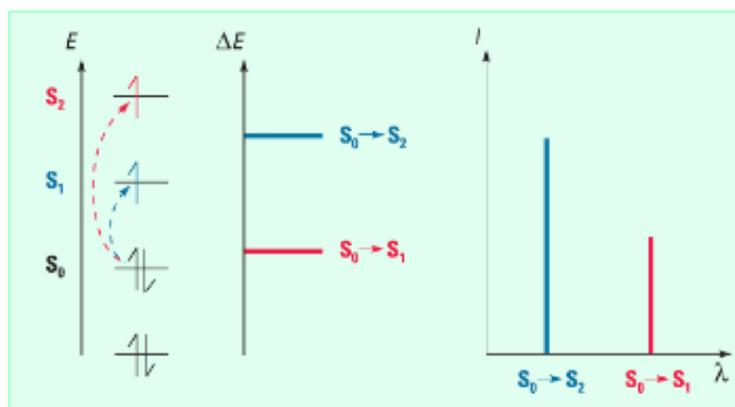


Figura 13 Transiciones electrónicas y espectros de los átomos (Owen T.,2000)

La espectroscopia por absorción molecular en las regiones ultravioleta y visible de espectro se usa ampliamente en la determinación cuantitativa de una gran cantidad de especies

inorgánicas, orgánicas y biológicas. Se basa en la medición de la transmitancia “*T*” o de la absorbancia “*A*” de soluciones que están en celdas transparentes que tienen una longitud de trayectoria de “*b*” (cm) (Skoog et al., 2008).

Por lo regular, la transmitancia y la absorbancia no pueden medirse en el laboratorio porque la solución del analito debe estar en un recipiente o cubeta transparente (Skoog et al., 2008). Como se muestra en la Figura 14, la **reflexión** se presenta en las dos interfases **aire/pared** del recipiente y en las dos interfases **pared/solución** (Skoog et al., 2008).

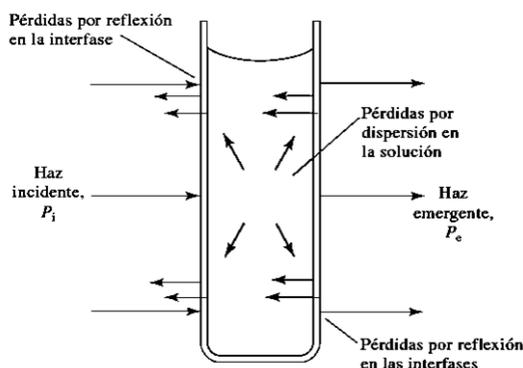


Figura 14 Pérdidas por reflexión y dispersión con una solución que está en un recipiente típico de vidrio. Las pérdidas por reflexión se presentan en todos los límites que separan los diversos materiales. En este ejemplo, la luz atraviesa las superficies de contacto aire-vidrio, vidrio-solución, solución-vidrio y vidrio-aire (Skoog et al., 2008).

Además, la “*atenuación del haz*” puede ocurrir como consecuencia de la dispersión causada por moléculas grandes y, a veces, porque lo absorben las paredes del recipiente. Por lo que, para compensar ese efecto, la potencia del haz transmitido por la solución del analito se compara con la potencia del haz transmitido por una celda idéntica que contiene sólo solvente (blanco).

Por lo tanto, transmitancia y absorbancia experimentales se aproximan de manera notable a la transmitancia y absorbancia verdaderas, mediante las siguientes ecuaciones (Ec. 3 y 4) [*P*=potencial de la radiación transmitida y *P0*= Potencia de radiación incidente] (Skoog et al., 2008)

$$T = \frac{P_{\text{solución}}}{P_{\text{solvente}}} \approx \frac{P}{P_0} \quad \text{Ec. 3}$$

$$A = \log \frac{P_{\text{solvente}}}{P_{\text{solución}}} \approx \log \frac{P_0}{P} \quad \text{Ec. 4}$$

Normalmente, la concentración de un analito absorbente se relaciona en forma lineal con la absorbancia según la ley de Beer. Esta ley expresa la relación entre absorbancia de luz monocromática (de longitud de onda fija) y concentración de un cromóforo en solución:

$$A = -\log T = \log \frac{P_0}{P} = \epsilon bc \quad \text{Ec. 5}$$

“La absorbancia de una solución es directamente proporcional a su concentración.”

El razonamiento de esta relación es el siguiente:

Considere el bloque de material absorbente (sólido, líquido o gas) que se muestra en la Figura 15 (Skoog et al., 2008):

- Un haz de radiación monocromático paralelo de potencia P_0 choca de forma perpendicular contra la superficie del bloque.
- Después de atravesar una longitud b de material, que contiene n átomos, iones o moléculas absorbentes, su potencia disminuye hasta un valor P como resultado de la absorción.
- Por último, depende de ϵ , una constante de proporcionalidad, denominada **coeficiente de extinción molar**, que es específica de cada cromóforo

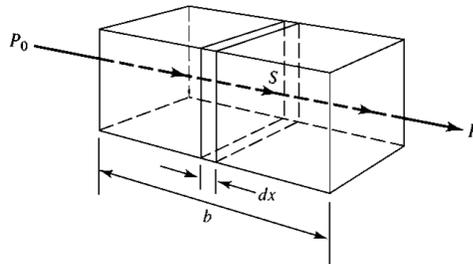


Figura 15 La radiación de la potencia radiante inicial P_0 es atenuada y se transforma en energía transmitida P mediante una solución que contiene c moles por litro de solución absorbente con una longitud de trayectoria de b centímetros (Skoog et al., 2008).

Considere ahora una sección transversal del bloque con área S y espesor infinitesimal dx . Esta sección contiene dn partículas absorbentes; es posible imaginar, asociada con cada partícula, una superficie en la cual tendrá lugar la captura del fotón (Skoog et al., 2008).

Es decir, si un fotón alcanza por casualidad una de estas áreas, de inmediato tendrá lugar la absorción. El área total proyectada de estas superficies de captura dentro de la sección

se designa como dS ; la relación entre el área de captura y el área total es entonces dS/S (Skoog et al., 2008).

En un promedio estadístico, esta relación representa la probabilidad de capturar fotones dentro de la sección.

La región UV se define como el rango de longitudes de onda de 195 a 400 nm. Es una región de energía muy alta. Provoca daño al ojo humano, así como quemadura común. Los compuestos con dobles enlaces aislados, triples enlaces, enlaces peptídicos, sistemas aromáticos, grupos carbonilos y otros heteroátomos tienen su máxima absorbancia en la región UV, por lo que ésta es muy importante para la determinación cualitativa y cuantitativa de compuestos orgánicos (Tabla 10) (Owen T.,2000).

Tabla 10 Cromóforos seleccionados y sus máximos de absorbancia (Owen T.,2000).

Cromóforos seleccionados y sus máximos de absorbancia (nm).			
Carboxilos	RCOOH	Ácido acético	204
Amida	RCONH ₂	Acetamida	208
Etileno	RCH=CHR	Etileno	193
Acetileno	RC=CR	Acetileno	173
Nitrilo	RC=N	Acetonitrilo	<160
Nitro	RNO ₂	Nitrometano	271

Un barrido espectral como su nombre lo dice, se obtiene trabajando con una misma solución de colorante (de concentración conocida) y midiendo los valores de absorbancias correspondientes a distintas longitudes de onda seleccionadas dentro de un determinado rango de trabajo.

3.7 Análisis elemental.

El análisis elemental es una técnica que proporciona el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre presente en un amplio rango de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica tanto sólidas como líquidas.

Se desarrolla en dos etapas:

- **Análisis elemental cualitativo:** si se propone determinar cuáles son los elementos que constituye la sustancia orgánica o la sustancia de estudio.
- **Análisis elemental cuantitativo:** si se propone determinar la proporción en que se hallan combinados dichos elementos en la sustancia.

La técnica está basada en la completa e instantánea oxidación de la muestra mediante una combustión con oxígeno puro a una temperatura aproximada de 1000°C. Los diferentes productos de combustión CO₂, H₂O y N₂, son transportados mediante el gas portador (He) a través de un tubo de reducción y después selectivamente separados en columnas específicas para ser luego desorbidos térmicamente.

Finalmente, los gases pasan de forma separada por un detector de conductividad térmica que proporciona una señal proporcional a la concentración de cada uno de los componentes individuales de la mezcla (Universidad de Alicante, 2012). Ejemplo de un equipo FE-SEM (Figura 16)



Figura 16 Equipo del FE-SEM CIICAP-UAEM.

3.8 Porosidad.

La porosidad se define como la relación entre los espacios libres, ocupados en un material y el volumen total del mismo, por lo que, es la capacidad que tienen determinados materiales de absorber o dejar pasar a través de sí ciertas sustancias en fase líquida o gaseosa, por medio de espacios vacíos presentes en su estructura (Joardder et al., 2016 & Muhye, 2020).

Por otra parte, los materiales porosos tienen gran impacto en aplicaciones tecnológicas que involucran transferencia de masa tales como adsorción, catálisis, inmovilización de sustancias, debido a sus características porosas inter- e intrapartícula (Figura 17). Las técnicas convencionales para determinar las características de porosidad de estos materiales son la adsorción de nitrógeno y la intrusión de mercurio, las cuales requieren tiempos de análisis muy largos, procesos de activación a altos vacíos y temperaturas que pueden causar cambios en las características de la muestra (Urrego et al., 2007).

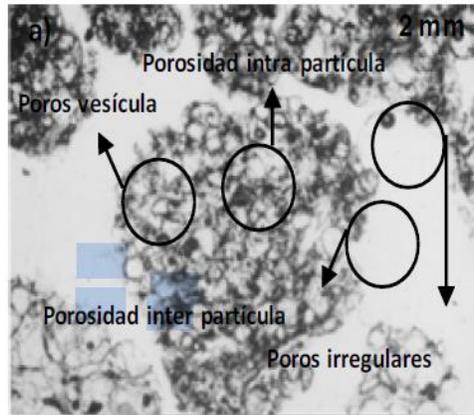


Figura 17 Ejemplo de porosidad intrapartícula, Interpartícula, poros irregulares, poros vesícula de perlita (Anicua Sánchez et al., 2009).

En función del tamaño de los poros, los poros de los materiales porosos pueden clasificarse en macroporos, microporos y mesoporos (Joardder et al., 2016).

- Los microporos tienen una anchura de 2 nm.
- Los macroporos tienen una anchura de 50 nm.
- Los mesoporos tienen una anchura entre 2 nm y 50 nm.

En términos de porosidad, los materiales pueden dividirse en dos grupos, materiales porosos y materiales capilares-porosos. Esta clasificación se basa principalmente en los tamaños de los poros. Los materiales porosos se definen como aquellos que tienen un diámetro de poro mayor o igual a 10^{-7} m, mientras que materiales con diámetros de poros inferiores a 10^{-7} m se denominan materiales capilares-poroso. La mayoría de los derivados de comida se consideran como materiales capilares-porosos (Joardder et al., 2016).

Una característica de los materiales porosos se puede dar por una alta o baja porosidad (Figura 18), además de poder tener una porosidad efectiva o inefectiva (Figura 19).

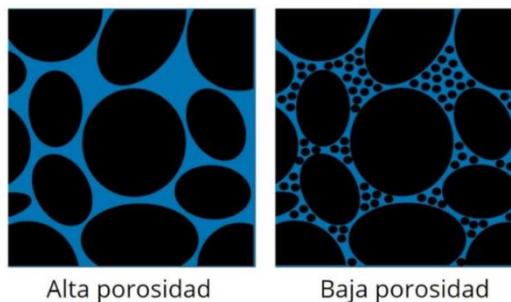


Figura18 Ejemplo de alta (izquierda) y baja (derecha) porosidad. Las formas negras representan sólidos y azul representa espacios porosos (Muhye, 2020).

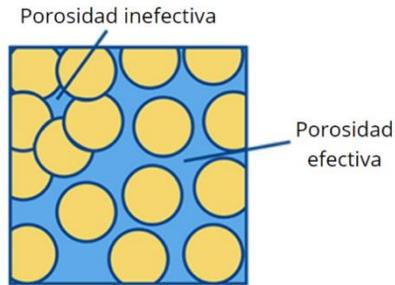


Figura 19 Ejemplo de una porosidad efectiva e inefectiva en materiales (Muhye, 2020).

Sin embargo, dentro de la literatura hay escasez en la investigación sobre las características de los poros en los derivados de comida, ya que los métodos y las condiciones de secado afectan a la porosidad del producto final, por lo que, podrían tener una alta o baja porosidad (Joardder et al., 2016).

En general, la porosidad depende directamente del contenido inicial de agua, la temperatura, la presión, la humedad relativa, la velocidad del aire, la radiación electromagnética, el tamaño de la muestra, la composición y la microestructura inicial junto con las propiedades viscoelásticas del biomaterial, como se muestra en la Figura 20 (Joardder et al., 2016 pp.25).



Figura 20 Factores que afectan a la formación y evolución del poro (Joardder et al., 2016 pp.26).

Sin embargo, el parámetro que caracteriza en general a la porosidad de un material está relacionado con su estructura. Por lo tanto, las técnicas de análisis que nos permiten evaluar la porosidad de un material son aquellas que nos permiten estudiar su superficie, la distribución de capas de su estructura o la permeabilidad frente a diferentes elementos. A continuación, veremos las técnicas en general más importantes:

TECNICAS MICROSCOPICAS:

Nos ofrecen información de la superficie de los materiales con alta resolución, pudiendo distinguir detalles superficiales del orden de nanómetros. Las más utilizadas son (ATRIA, 2021):

- **SEM y TEM:** Ambas técnicas nos permiten observar la superficie de una muestra mediante la interacción de un haz de electrones. Además, nos permiten realizar el análisis de la composición de las superficies (ATRIA, 2021).
- **FIB-SEM:** Esta técnica es de gran utilidad, ya que el haz de iones genera una apertura precisa en la superficie de la muestra, permitiéndonos observar mediante SEM la distribución de capas de su interior (ATRIA, 2021).
- **Microscopía confocal, perfilómetro y AFM:** Estas técnicas son considerada una de las más útiles para el análisis de la porosidad ya que permiten obtener información acerca de la topografía y rugosidad superficial, permitiéndonos obtener perfiles de áreas nanométricas de la superficie del material (ATRIA, 2021).

TÉCNICAS DE ADSORCIÓN FÍSICA DE UN GAS:

Se inyecta un gas en la muestra (generalmente nitrógeno o dióxido de carbono) a una temperatura constante, determinando mediante métodos gravimétricos o volumétricos, la isoterma de adsorción, es decir la cantidad de gas que ha sido capaz de adsorber el material (Figura 21). Por lo tanto, mediante el análisis de la isoterma de adsorción de un material se puede determinar su área superficial y el volumen y la distribución de tamaño de poros. Dependiendo del gas utilizado se puede obtener información de poros de diferentes tamaños. Cuando se utiliza nitrógeno se pueden determinar poros de 3.5 a 400 nanómetros, mientras que el uso de dióxido de carbono nos da información de la microporosidad (ATRIA, 2021).

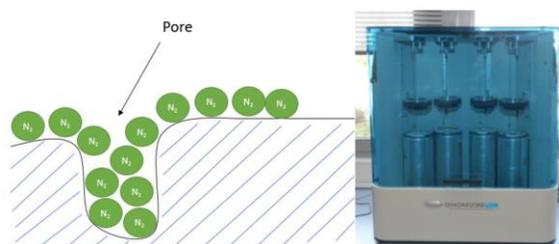


Figura 21 Técnica de adsorción física de un gas y equipo (ATRIA, 2021).

POROSIMETRÍA DE MERCURIO:

Esta técnica se basa en la intrusión de mercurio en la estructura porosa de un material mediante la aplicación de presión isostática. La técnica se fundamenta en la ecuación de Washburn. Dicha ecuación relaciona la presión aplicada con el diámetro del poro en el que se introduce el mercurio. La porosimetría de mercurio permite obtener información de poros de tamaño de 900 micras hasta 4 nanómetros de diámetro (ATRIA, 2021).

PICNOMETRÍA DE HELIO:

La picnometría de helio es una técnica que permite determinar el peso específico o la densidad aparente de un material mediante el desplazamiento de volumen. En esta técnica, el gas helio se expande a una celda de volumen conocido, ocupada por la muestra a analizar dentro de esa celda, determinando la densidad aparente del material. Mediante esta medida podemos conocer la porosidad del material (ATRIA, 2021).

TERMOPOROMETRÍA:

La termoporometría es un método calorimétrico mediante el cual se puede determinar el tamaño de poro basado en la depresión del punto de fusión o cristalización de un líquido confiando en un poro utilizando como equipo para la medición un Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC). Esta técnica ha sido utilizada durante las dos últimas décadas para la caracterización de sólidos porosos con estructura desorganizada (Urrego et al., 2007).

Para determinar distribuciones de tamaño de poro debe conocerse a priori la dependencia de la temperatura de fusión y/o congelación del líquido "prueba" con parámetros físicos tales como tensión superficial, ángulo de contacto, calor de fusión, y densidad. Así el trabajo experimental recurre a menudo al uso de materiales de referencia que han sido caracterizados cuidadosamente por otros métodos, tales como intrusión de mercurio o adsorción de nitrógeno (Urrego et al., 2007).

Un estudio realizado por el Departamento de Química de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Irán (Rabbani, 2017), Teherán, utilizó la biomasa residual de maíz (olote) para su preparación como bioadsorbente ecológico para la remoción de naranja de metilo (MO), variando sus concentraciones. Cabe destacar que el MO es un colorante azoderivado ácido, utilizado como indicador de pH (3.1 - 4.4).

Por otro lado, la eficiencia de remoción del colorante aumentó drásticamente con el aumento de la dosis de bioadsorbente (Figura 22), esto se debió a los sitios de adsorción disponibles en el bioadsorbente (estructura columnar porosa) y el tiempo de contacto (Rabbani, 2017).

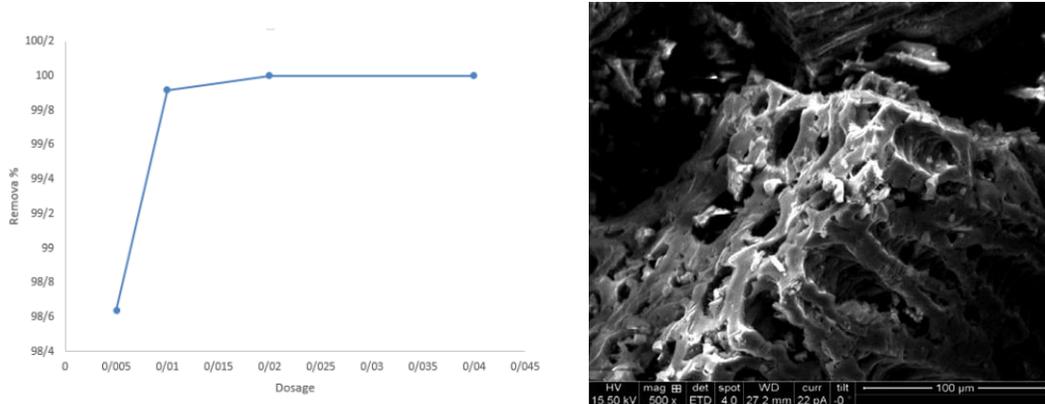


Figura 22 Efecto de la dosis de bioadsorbente y estructura porosa del olote de maíz por SEM (Rabbani, 2017 & Ojedokun & Bello, 2017, p. 1285).

En otro estudio donde se analizó la remoción del azul brillante (AB) y rojo 40 (R40) (clasificados como aniónicos y con propiedades ácidas) mediante espectrofotometría de derivadas, por la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, se evaluó la adsorción de la mezcla de colorantes sobre corteza de coco, considerando las variables pH, concentración inicial de los colorantes, dosificación de adsorbente y temperatura (Villada & Hormaza, 2015).

Bajo las mejores condiciones, se alcanzó una remoción máxima del 76,5% para la mezcla de R40 y AB a pH ácido (pH = 2.0) (Figura 23), dosificación de 20 g/L, concentraciones iniciales de 10 mg/L con un tiempo de contacto de 4 h entre la fibra y los colorantes a una temperatura de 55 °C.

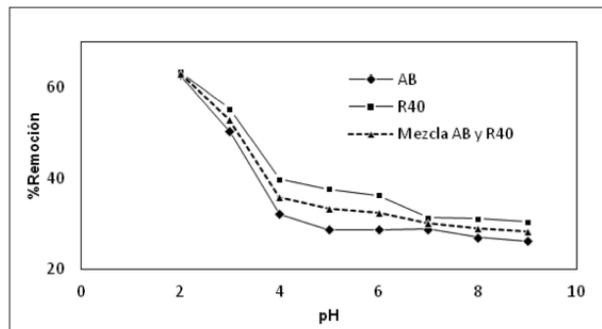


Figura 23 Efecto del pH en la remoción del R40, AB y Mezcla R40-AB (Villada & Hormaza, 2015).

3.9 Cinética de Adsorción.

Debido al carácter superficial de la adsorción, los adsorbentes comúnmente utilizados en la práctica son sólidos porosos que poseen una elevada superficie específica, disponiendo así de una elevada capacidad de adsorción, por lo que, en el proceso de adsorción pueden intervenir diversas etapas consecutivas, por ejemplo (Figura 24) (García Asenjo, 2014):

- *Difusión externa* del adsorbato que va desde el seno de la disolución hasta la superficie externa de las partículas de adsorbente.
- *Difusión interna*, debido a que la superficie externa expuesta por las partículas tiende a ser menor al 1% del total, el adsorbato migra a través de la superficie porosa del sólido (adsorbente) hasta los centros activos de adsorción.
- Y la *adsorción* de las moléculas sobre la superficie de los poros internos del adsorbente (etapa de adsorción).

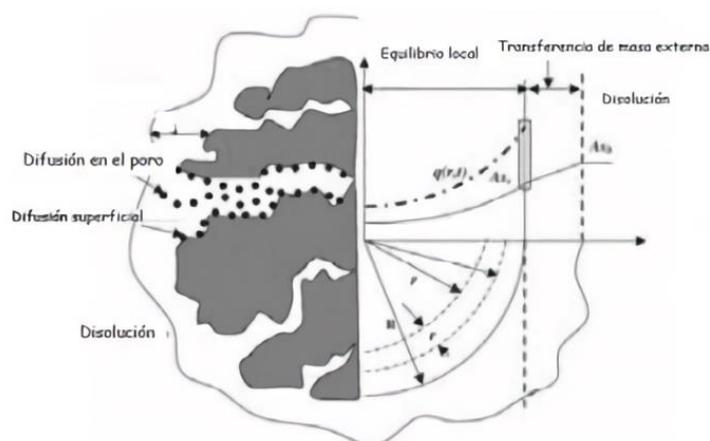


Figura 24 Etapas de adsorción desde un punto de vista cinético.

Desde el punto de vista cinético, la etapa de adsorción es la más rápida de todas ya que se alcanza el equilibrio de forma inmediata, de modo que la cantidad de soluto adsorbido sobre la superficie del poro se considera en equilibrio con la concentración del soluto en disolución (García Asenjo, 2014).

3.9.1 Modelos Cinéticos.

Existen numerosos modelos ampliamente utilizados para analizar la cinética de los procesos de adsorción, algunos de los cuales destacan por su sencillez en la aplicación y su fácil interpretación. A continuación, se hace una breve descripción de los más empleados a la hora de realizar estudios cinéticos (García Asenjo, 2014).

3.9.1.1 Modelo de pseudo-primer orden.

Este modelo considera que la fuerza impulsora es la diferencia entre la concentración del soluto adsorbido en el equilibrio y la concentración del soluto adsorbido a un tiempo determinado, de modo que la velocidad de adsorción (Ec.6) viene determinada por la siguiente ecuación.

$$\frac{dq}{dt} = K_1 (q_e - q_t) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde K_1 (min^{-1}) es la velocidad de pseudo-primer orden, q_e y q_t ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) se corresponden a la cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio y en un tiempo "t", respectivamente. Integrando la ecuación (6) donde $q_t = 0$, $q_t = q_t$ cuando $t = t$, se obtiene la siguiente ecuación (Ec.7):

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad \text{Ec. 7}$$

De esta forma, representando los valores de $\ln(q_e - q_t)$ vs a t , se puede obtener el valor de la constante de la velocidad del proceso de adsorción k_1 y la concentración del soluto en el equilibrio (q_e) a partir de la pendiente y la ordenada (García Asenjo, 2014) (Figura 25).

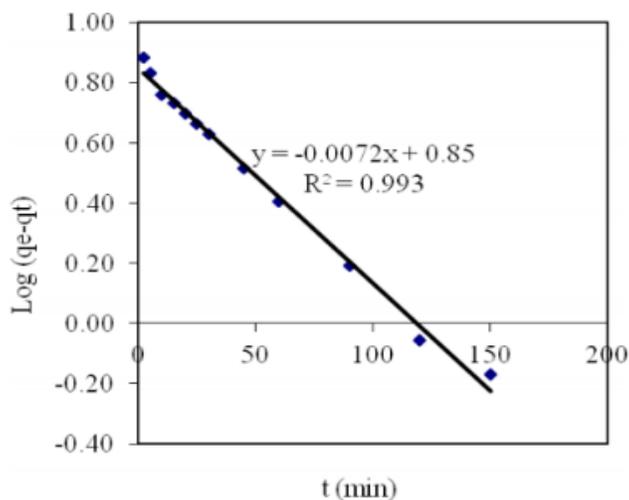


Figura 25 Ejemplo gráfico obtenido en modelo de pseudo-primer orden.

3.9.1.2 Modelo de pseudo-segundo orden.

Este modelo asume que la capacidad de adsorción es proporcional al número de centros activos del adsorbente y que la velocidad de adsorción se encuentra controlada por adsorción química (quimisorción). La ecuación de este modelo se muestra a continuación.

$$\frac{dq}{dt} = K_2 (q_e - q_t)^2 \quad \text{Ec. 8}$$

Donde k_2 ($\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\text{ min}^{-1}$) es la constante de velocidad de pseudo-segundo orden. Integrando la ecuación tenemos que:

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \text{Ec. 9}$$

Si se representa t/q_t vs a "t" se puede obtener, a partir de la pendiente y de la ordenada en el origen, los valores de q_e y k_2 , respectivamente (García Asenjo, 2014) (Figura 26).

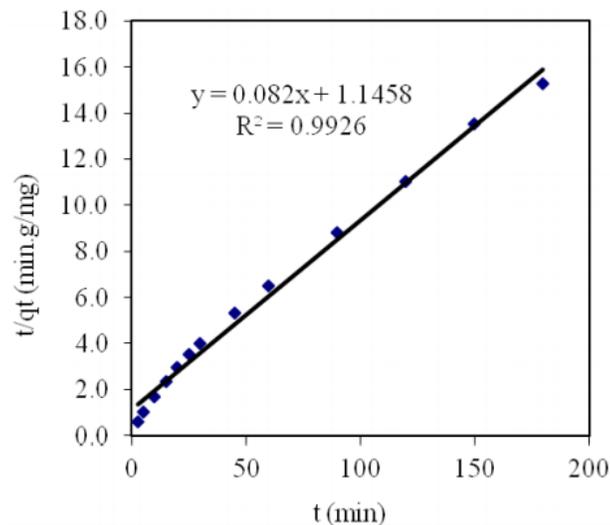


Figura 26 Ejemplo gráfico obtenido en modelo de pseudo-segundo orden.

3.9.1.3 Modelo de Elovich

Este modelo es utilizado generalmente para determinar cinéticas de quimisorción de gases sobre sólidos, aunque también es adecuado para describir la cinética de adsorción de contaminantes en disoluciones acuosas. La ecuación de Elovich (Ec.10) generalmente se expresa como:

$$\frac{dq_t}{dt} = \alpha \exp(-\beta' q_t) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde α y β' son parámetros de la ecuación de velocidad de Elovich; α ($\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) es la velocidad inicial de adsorción y β' ($\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$) es la constante de desorción, la cual se relaciona con el número de centros activos de adsorción disponibles.

Sin embargo, en 1980 se introdujo una forma más simplificada de esta ecuación, asumiendo que $\alpha\beta't \gg 1$, por lo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$q_t = \frac{1}{\beta'} \ln(\alpha\beta') + \frac{1}{\beta'} \ln t \quad \text{Ec. 11}$$

Ambos parámetros se pueden obtener por regresión lineal de la representación gráfica de q_t vs a tiempo (García Asenjo, 2014) (Figura 27).

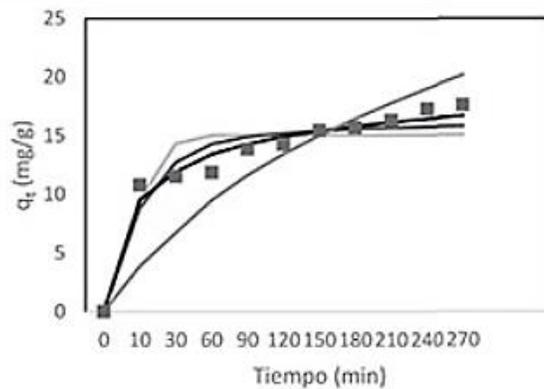


Figura 27 Ejemplo gráfico obtenido en modelo de Elovich.

En resumen, durante el proceso de adsorción se produce una acumulación del soluto en la superficie del material sólido adsorbente, que va acompañada de una disminución de la concentración del adsorbato en la disolución. Por lo tanto, la velocidad de adsorción irá disminuyendo mientras que, la velocidad de desorción irá aumentando, sin embargo, llegará un momento en que las velocidades se igualen y ya no se produzca más acumulación en la superficie, por lo que a este momento se le conoce como “equilibrio de adsorción”.

4 JUSTIFICACIÓN.

Ante la situación actual que vive el planeta de la creciente contaminación de suelo, agua y aire, ha surgido en la comunidad científica una inminente preocupación en la búsqueda de nuevas estrategias de remediación de las matrices ambientales, desde una óptica sustentable. En este sentido, el aprovechamiento de los residuos agroindustriales, para la remoción de colorantes en cuerpos de agua, descargados por industrias textiles, se constituye en una alternativa sustentable, considerando que dichos residuos en general no tienen una disposición final adecuada, dado que en la mayoría de casos son depositados en rellenos sanitarios y en muchas ocasiones son incinerados liberando compuestos que afectan al medio ambiente y a la salud, como son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), entre otros. Por otro lado, los colorantes textiles generan un gran impacto ambiental, ya que, en las plantas de tratamiento convencionales son difícilmente eliminados, por su alta resistencia a la degradación microbiana y toxicidad, además de que en su aplicación se utilizan grandes volúmenes de agua, por lo tanto, en las últimas décadas se han implementado diversas tecnologías para la remoción de colorantes de cuerpos de agua, tales como la adsorción, la degradación foto-electrocatalítica, la electrocoagulación, filtración, intercambio iónico, procesos electroquímicos (oxidación electroquímica y reducción electroquímica), entre otros.

En este trabajo de investigación se optó por la adsorción de colorantes (IC y RD82) utilizando olote de maíz, ya que es un residuo agroindustrial abundante en el estado de Morelos y posee una estructura columnar porosa, la cual es ideal para retener este tipo de compuestos, a comparación de otro tipo de residuos agroindustriales que tienen una morfología superficial poco porosa, como es el caso del bagazo de caña.

5 HIPÓTESIS.

Mediante el uso del olote (fibra natural) se podrán adsorber de manera eficiente colorantes textiles presentes en agua.

6 OBJETIVOS.

Remover colorantes textiles (Índigo Carmín y Rojo Disperso-82) de aguas mediante el uso de olote de maíz.

Objetivos específicos:

- ❖ Caracterización de la fibra.
- ❖ Optimización de la cantidad de fibra a utilizar.
- ❖ Optimización de las condiciones para la remoción de colorante.
- ❖ Evaluación de la remoción de colorante en muestras de agua.
- ❖ Determinación de la cinética de remoción.

7 METODOLOGÍA.

7.1 Tratamiento del olote.

Durante el tratamiento del olote de maíz, se desgranó el elote de maíz para la obtención del olote (Figura 28), el cual se cortó en trozos pequeños estando aun fresco (Figura 29).



Figura 28 Elote desgranado / Obtención de olote.



Figura 29 Olote cortado en trozos pequeños.

Basándome en la literatura se dejaron secar los trozos de olote a temperatura ambiente para quitar la mayor cantidad de humedad posible y evitar un cambio en la estructura del olote por último se trituro en un molinillo eléctrico (Figura 30) para obtener una mayor capacidad de adsorción y se pesó en una balanza granataria.



Figura 30 Olote triturado.

7.2 Caracterización por medio de SEM, IR y Análisis elemental.

En este paso, se tomó una porción de 500 mg del olote de maíz ya molido previamente, para cada análisis y se depositó en un vidrio de reloj, el cual, se metió en una estufa “Luzeren modelo DHG9030 A” a 80 °C por 1 hora para eliminar los restos de humedad (H₂O) que pudiera tener el olote, por lo que es importante no tener humedad en los resultados de los distintos métodos de caracterización, ya que, podría tardar en hacer vacío y dar probablemente resultados erróneos. Al finalizar se sacó de la estufa y se guardó en una caja Petri (Figura 31), la cual se llevó a los distintos equipos (SEM, FT-IR y análisis elemental), para su caracterización.



Figura 31 Olote recolectado en la caja petri.



Figura 32 Estufa Luzeren modelo DHG9030 A.

7.2 Remoción de colorantes textiles “Índigo Carmín (IC), Rojo Disperso-82 (RD82) y mezcla (IC y RD82).

Antes de comenzar con la remoción de los colorantes y mezcla de ambos, se hizo un *barrido espectral*. Esto con el fin de conocer la máxima absorción de cada colorante y de la mezcla ($\lambda_{m\acute{a}x.}$). Una vez establecidas las longitudes de onda óptimas para cada colorante, se procedió a la remoción de los colorantes en disoluciones acuosas mediante el uso de las fibras de olote.

En los experimentos se probaron diferentes pH (ver Tabla 11), con un tiempo de contacto de 4 h entre la fibra y el colorante, esto con la finalidad de poder evaluar sus diferentes absorbancias en el espectrofotómetro y así obtener los porcentajes de remoción. (Villada & Hormaza, 2015). A su vez, se realizaron dos disoluciones las cuales sirvieron para modificar el pH de las disoluciones con colorante. La primera fue con ácido clorhídrico (HCl) a 1.0 M (probar a pH ácidos) y la segunda con hidróxido de sodio (NaOH) 1.0 M (probar a pH básicos).

Para la remoción, se prepararon 9 disoluciones de 50 mL a una concentración de 50 ppm, de cada colorante y una mezcla 1:1 entre ellos, a las cuales se les varió el pH como está descrito en la Tabla 11.

Tabla 11 Soluciones a diferentes pH para efectuar la remoción.

<i>Número de solución de colorante / 50 mL / 50 ppm</i>	pH
1	10
2	9
3	8
4	7
5	6
6	5
7	4
8	3
9	2

A todos los experimentos de remoción se les adicionaron 2 g de olote de maíz molido basándose en la literatura (indicando que en periodos cortos ocurre una mayor remoción, Robinson, T. et.al.2002 de colorantes), y se agitaron por 4 h; cada una (Figura 33).



Figura 33 Ejemplo de solución RD82 durante la agitación de 4 h.

Una vez terminado el periodo de agitación de 4 h (propuesto en la literatura, donde se hayo una mayor remoción en colorantes con propiedades ácidas, Villada & Hormaza, 2015), cada muestra se filtró y se puso en celdas de plástico para la medición de la absorbancia, teniendo presente un blanco de agua desionizada (Figura 34).

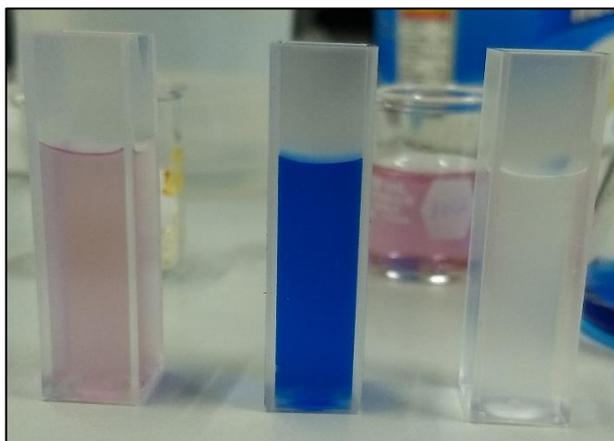


Figura 34 RD82, IC y Blanco (agua desionizada).

CÁLCULOS:

Para poder realizar las soluciones en la parte del “barrido espectral” y “% de remoción” se emplearon los siguientes cálculos:

- ❖ Para la solución del RD82, se tomaron 2.5 mg del colorante y se disolvieron en 50 mL de agua desionizada para obtener una concentración final de 50 ppm.

$$\left(\frac{50\text{mg}}{1\text{L}}\right)\left(\frac{1\text{L}}{1000\text{mL}}\right) = \left(0.05\frac{\text{mg}}{\text{mL}}\right) (50\text{mL}) = 2.5 \text{ mg de RD82} \quad \text{Ec. 12}$$

- ❖ Para la solución del IC, de igual manera se tomó 2.5mg de colorante y se disolvió en 50mL para obtener una concentración de 50 ppm.

$$\left(\frac{50\text{mg}}{1\text{L}}\right)\left(\frac{1\text{L}}{1000\text{mL}}\right) = \left(0.05\frac{\text{mg}}{\text{mL}}\right) (50\text{mL}) = 2.5 \text{ mg de IC} \quad \text{Ec. 13}$$

- ❖ Para el caso de la mezcla (IC & RD82), se realizaron los siguientes pasos:

1. Inicialmente se preparó una solución de 100 ppm de RD82 en 50 mL y otra solución de IC de 100 ppm en 50 mL ambas.

$$\left(\frac{100\text{mg}}{1\text{L}}\right)\left(\frac{1\text{L}}{1000\text{mL}}\right) = \left(0.1\frac{\text{mg}}{\text{mL}}\right) (50\text{mL}) = 5 \text{ mg de IC y RD82} \quad \text{Ec. 14}$$

Se pesaron 5mg de cada colorante (RD82 e IC) y se disolvieron en 50 mL (por separado)

2. Posteriormente se tomaron 25 mL de cada solución y se mezclaron, en un vaso de precipitado
3. Como producto final se obtuvo una disolución de 50 mL con una concentración de 50 ppm. Esto se explica con la ayuda de la ecuación de “dilución química” (Ec. 15), ya que tenemos en principio una concentración de 100 ppm (C_1), junto con un volumen inicial de 25 mL (V_1) por cada colorante, que al mezclarlos obtenemos un volumen final de 50 mL (V_2), lo que si se despeja la fórmula siguiente queda como:

$$(C_1) (V_1) = (C_2) (V_2) \quad \text{Ec. 15}$$

$$C_2 = \left(\frac{(C_1)(V_1)}{(V_2)} \right) \quad \text{Ec. 15.1}$$

$$C_2 = \left(\frac{(100 \text{ ppm})(25 \text{ mL})}{(50 \text{ mL})} \right) = 50 \text{ ppm.} \quad \text{Ec. 15.2}$$

Al final la solución de mezcla de colorantes tiene una concentración de 50 ppm.

7.3 Cinética de adsorción.

Para la cinética de adsorción, se realizó los siguientes pasos:

- 1) Para realizar la cinética de adsorción, se utilizó previamente el pH óptimo de remoción (pH 2) junto con el tiempo determinado de agitación (4 h) y la cantidad de 2 g de olote.
- 2) Cada 20 min. se tomaron 3 mL de la solución y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro, así hasta a completar el periodo de agitación.
- 3) La absorbancia final se calculó por una corrección de factor de dilución (Ec.16), como se muestra a continuación:

$$(Abs. Obtenida) \left(\frac{50 \text{ mL}}{50 \text{ mL}} \right); (Abs. Obtenida) \left(\frac{47 \text{ mL}}{50 \text{ mL}} \right); (Abs. Obtenida) \left(\frac{44 \text{ mL}}{50 \text{ mL}} \right) \quad \text{Ec. 16}$$

8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

8.1 Técnica de Infrarrojo (IR).

El espectro de infrarrojo del olote se muestra en la Figura 35, el cual se puede analizar de la siguiente manera (Tabla 12):

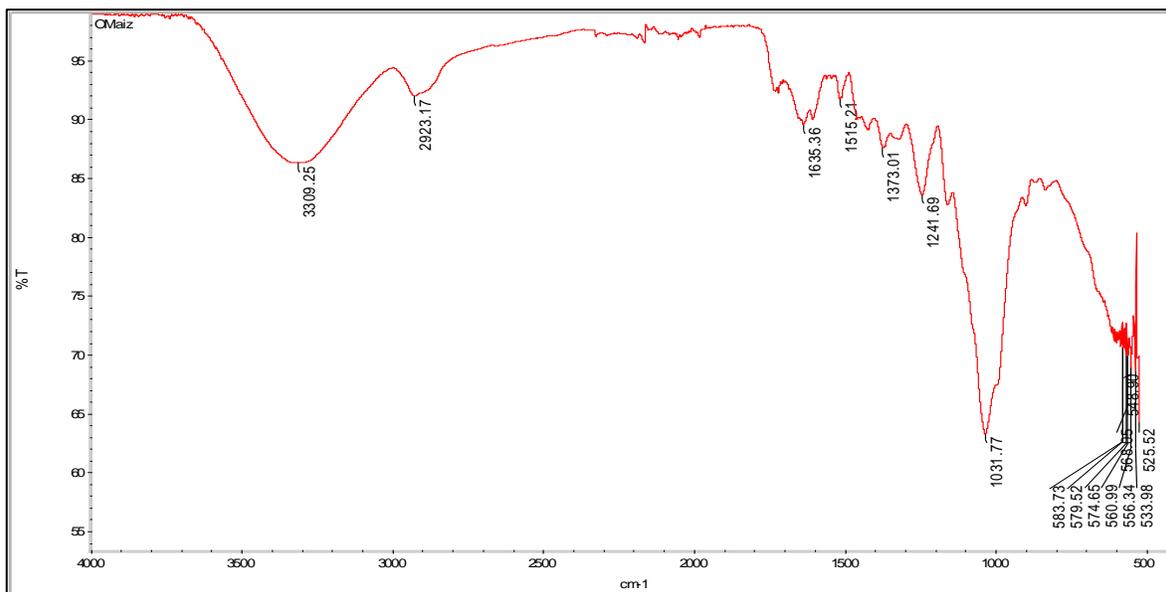


Figura 35 Espectro de IR del olote de maíz.

Tabla 12 Análisis de bandas características del Olote.

Análisis de bandas características del Olote.		
BANDA	ANÁLISIS	REFERENCIA
3309.25 cm ⁻¹	Corresponde a grupos -OH enlazado por puentes de hidrogeno de manera intermolecular	IR Spectrum Table & Chart, 2018
2923.17 cm ⁻¹	Característica de un estiramiento entre C-H	IR Spectrum Table & Chart, 2018
1635.36 cm ⁻¹	Estiramiento C=C insaturado monosustituido o un C=O conjugado	IR Spectrum Table & Chart, 2018
1031.77 cm ⁻¹	C-O estiramiento y C-O deformación, formación de compuestos como éteres y etanol (C-OH).	IR Spectrum Table & Chart, 2018
1000cm ⁻¹ – 400cm ⁻¹	Corresponden a la denominada huella dactilar (flexión de enlaces CH, CO, CN, CC, etc.).	IR Spectrum Table & Chart, 2018

Esto sugiere que los tres componentes de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina), se encuentran en la fibra ya que, están constituidos principalmente en alquenos, ésteres, anillos aromáticos, cetonas y alcoholes, en conjunto de grupos funcionales que contienen oxígeno (Tabla 13) (Yang et al., 2007, p. 1786).

Tabla 13 Componentes típicos de la biomasa (Yang et al., 2007, p. 1786).

BANDAS DE BIOMASA (Yang et al., 2007, p. 1786).	Asignación de bandas IR
3400-3200 cm⁻¹	-OH estiramiento de los grupos hidroxilo
1765-1600 cm⁻¹	-C=O estiramiento
1270 cm⁻¹	Los grupos de C-O se estiran en los grupos de éster, de éter
1060-1000 cm⁻¹	Estiramientos del grupo C-O-(H), formación de etanol.

Como era de esperarse con base en la literatura, se puede sugerir que dichas interacciones ya descritas anteriormente y además algunas bandas características, indican la posible presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina.

En la Tabla 14 se muestra una comparación entre las bandas obtenidas en nuestro estudio y las bandas reportadas en la literatura. Las pequeñas variaciones que se presentan se deben a que son diferentes especies de maíz al igual que el posible error aleatorio en la medición (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1290 y García Albortante et al., 2015).

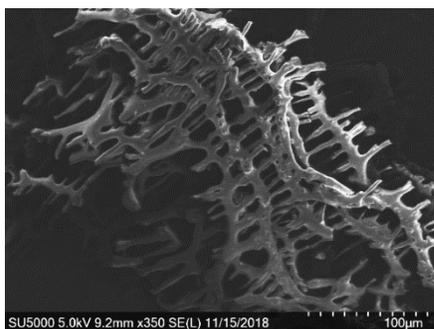
Tabla 14 Comparación de bandas en IR obtenidas en este estudio (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1290).

BANDAS OBTENIDAS	BANDAS DE COMPARACIÓN (García Albortante et al., 2015)	BANDAS DE COMPARACIÓN (Ojedokun & Bello, 2016, p. 1290)	BANDAS CARACTERÍSTICAS DE HEMICELULOSA, CELULOSA Y LIGNINA EN OLOTE. (García Albortante et al., 2015)	Asignación de bandas IR
3309.25 cm⁻¹	3339.17 cm ⁻¹	3301.71 cm ⁻¹	Correspondiente a celulosa.	-OH estiramiento de los grupos hidroxilo.
2923.17 cm⁻¹	2918.64 cm ⁻¹	2921.40 cm ⁻¹	Correspondiente a hemicelulosa.	-CH estiramiento.
1635.36 cm⁻¹	1633.45 cm ⁻¹	1643.15 cm ⁻¹	Correspondiente a la lignina.	-C=O estiramiento.
1031.77 cm⁻¹	1031.50 cm ⁻¹	1029.96 cm ⁻¹	Correspondiente a celulosa.	Los grupos de C-O se estiran en los grupos de éster, de éter.

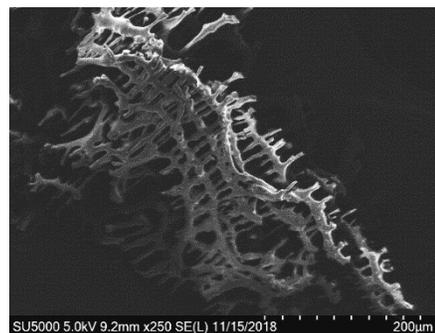
8.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM).

En este estudio se estudió la morfología del olote utilizando el equipo “*Hitachi SU5000 Field Emission SEM*” por parte del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (CIICAP-UAEM).

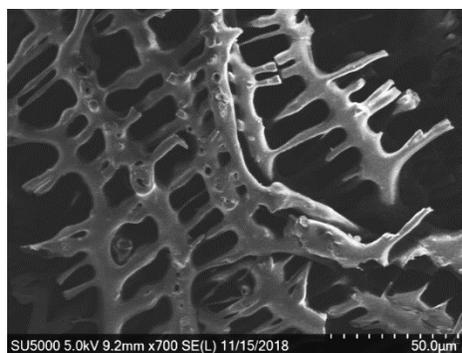
En estas micrografías se pudo observar que la fibra del olote es irregular, contiene distintas cavidades similares a una estructura columnar porosa (Liu et al., 2017). En la Figura **36a** se observa una micrografía a 100 μm , en la Figura **36b** una micrografía a 200 μm y en la Figura **36c** a 50 μm .



(36a)



(36b)



(36c)

Figura 36 Micrografías del Olote de Maíz (a) 100 μm (b) 200 μm (c) 50 μm .

En la Figura 37, se muestra la micrografía de olote de maíz obtenida mediante la técnica de SEM por el departamento de química pura y aplicada de Nigeria (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1285).

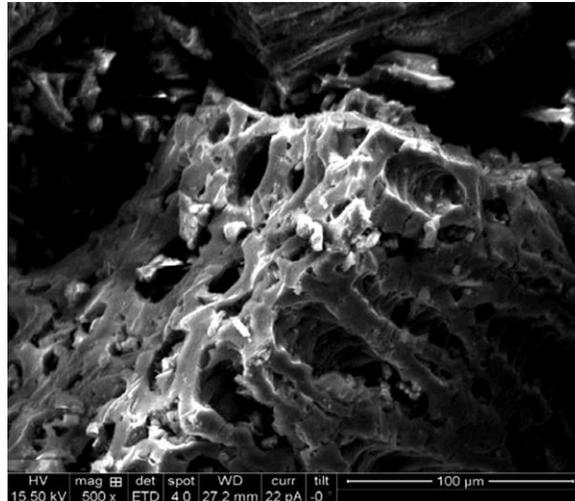


Figura 37 Micrografía Olote de maíz Mag 500x (Ojedokun & Bello, 2017, p. 1285).

Dicha morfología es similar a la observada en nuestro estudio, la cual propicia el proceso de adsorción sobre su superficie, donde la fibra del olote posee una gran área disponible para adsorber moléculas de colorante.

8.3 Análisis elemental.

En la Figura 38, se puede observar la gráfica de análisis elemental del olote maíz, la cual nos indica la presencia carbono (C), oxígeno (O), cloro (Cl), potasio (K), silicio (Si) y fósforo (P).

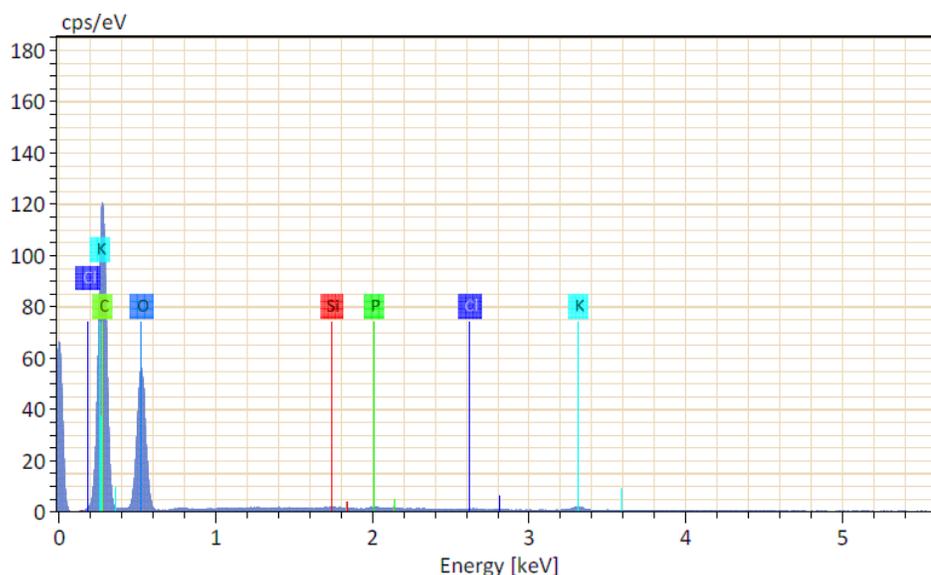


Figura 38 Gráfica de análisis elemental del olote de maíz.

En la Tabla 15 se puede observar que, el olote está compuesto principalmente por carbono y oxígeno (59.76 % y 39.94 %), y en menor proporción de potasio, silicio, fósforo y cloro, esto se debe a los grupos funcionales que contienen los diferentes componentes de la fibra como es la *Hemicelulosa*, *celulosa* y *lignina*, ya que, presentan una composición a base de carbono (C) y oxígeno (O); estos resultados son congruentes con lo reportado en estudios similares (Pinto et al., 2012).

Tabla 15 Porcentajes contenidos totales presentes en la fibra olote de maíz.

Porcentajes contenidos totales presentes en la fibra olote de maíz.			
Elemento	Masa (%)	Masa norm. (%)	Átomo (%)
Carbón	59.76	52.5	59.76
Oxígeno	46.74	46.74	39.94
Potasio	0.45	0.45	0.16
Silicio	0.11	0.11	0.05
Fósforo	0.09	0.09	0.04
Cloro	0.11	0.11	0.04
Suma	100	100	100

8.4 Barrido espectral de colorantes textiles IC, RD82 y mezcla.

Para el RD82 se obtuvo lo siguiente:

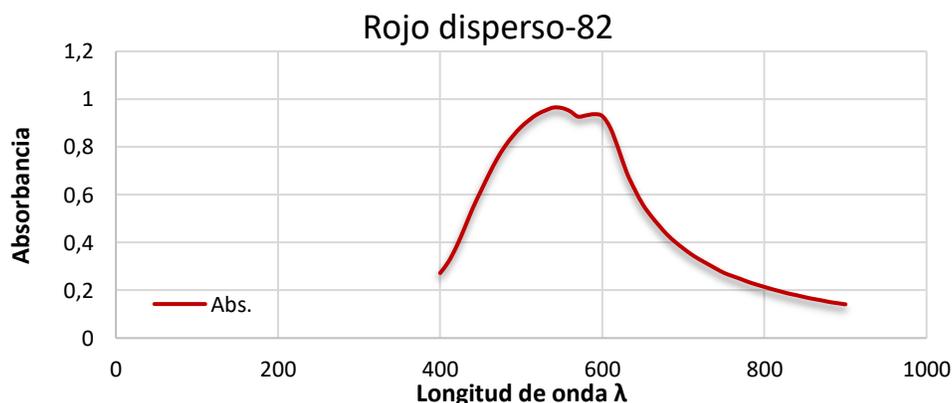
Con el fin de determinar la longitud de onda a la cual el RD82 presenta su mayor absorción en el espectro visible, se realizó un barrido UV-vis, Tabla 16, (400 nm-900 nm).

En la Figura 39 se presenta el barrido espectral que se obtuvo del RD82, observando dos picos máximos de absorción en 540 nm (0.965) y 590 nm (0.937)., sin embargo, se utilizó el pico de mayor absorción (λ máx.= 540 nm) para realizar la remoción del RD82.

Para este análisis se utilizó una disolución con una concentración de 50 ppm de colorante rojo disperso 82 (colorante textil).

Tabla 16 Barrido del RD82.

λ	Abs.	650	0.559
400	0.272	660	0.512
410	0.318	670	0.471
420	0.382	680	0.433
430	0.46	690	0.402
440	0.542	700	0.375
450	0.614	710	0.35
460	0.684	720	0.329
470	0.749	730	0.31
480	0.803	740	0.291
490	0.847	750	0.273
500	0.884	760	0.26
510	0.913	770	0.248
520	0.937	780	0.235
530	0.953	790	0.224
540	0.965	800	0.214
550	0.963	810	0.204
560	0.95	820	0.195
570	0.927	830	0.186
580	0.932	840	0.179
590	0.937	850	0.171
600	0.929	860	0.164
610	0.879	870	0.158
620	0.791	880	0.151
630	0.694	890	0.146
640	0.622	900	0.141



Para el índigo carmín (**IC**) se muestra lo siguiente:

De igual manera, en este estudio se realizó un barrido UV-vis (500 nm-700 nm) (Tabla 17), para determinar el máximo de absorción del índigo carmín (Figura 40). Cabe resaltar que la máxima absorción reportada en la literatura del índigo carmín es de 610 nm (Figura 41), que coincide exactamente con este barrido espectral (Thermo Scientific, 2019).

Para este análisis se utilizó una di solución con una concentración de 50ppm del colorante índigo carmín (colorante textil).

Tabla 17 Barrido del IC

λ	Abs.
500	0.192
510	0.246
520	0.323
530	0.439
540	0.579
550	0.77
560	0.948
570	1.099
580	1.211
590	1.334
600	1.481
610	1.543
620	1.473
630	1.286
640	1.02
650	0.693
660	0.409
670	0.221
680	0.11
690	0.052
700	0.026

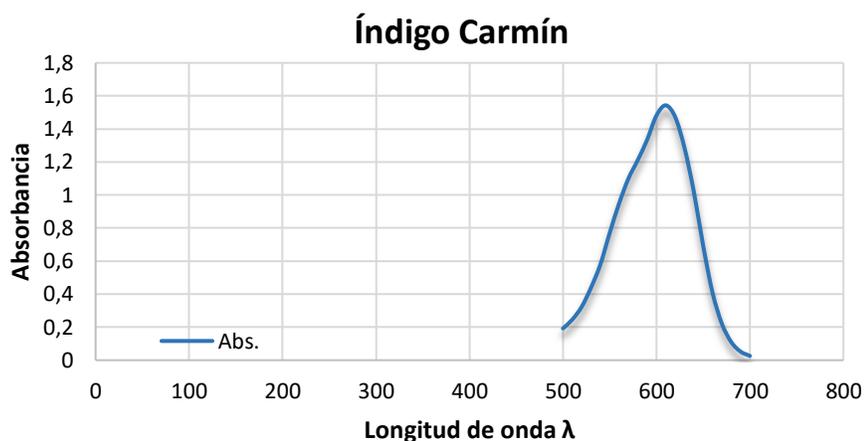


Figura 40 Barrido espectral del I.C.

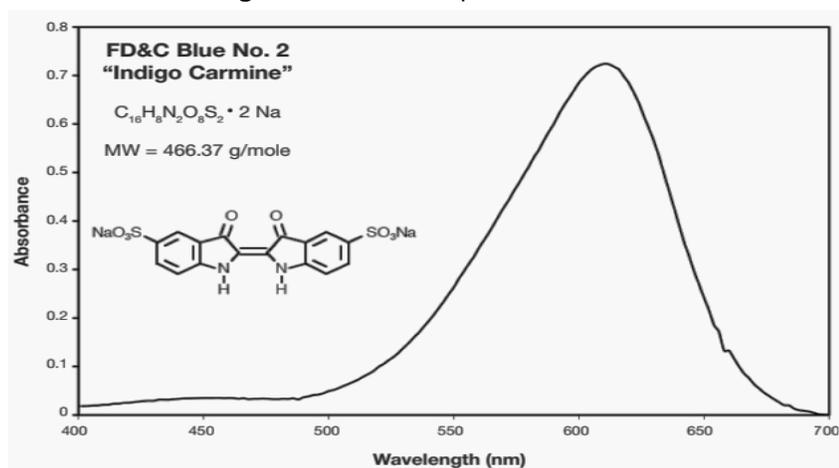


Figura 41 Barrido espectral del I.C. en la literatura de 400 nm-700 nm (Thermo Scientific,2019).

Para la mezcla **(IC y R82)** se obtuvo lo siguiente:

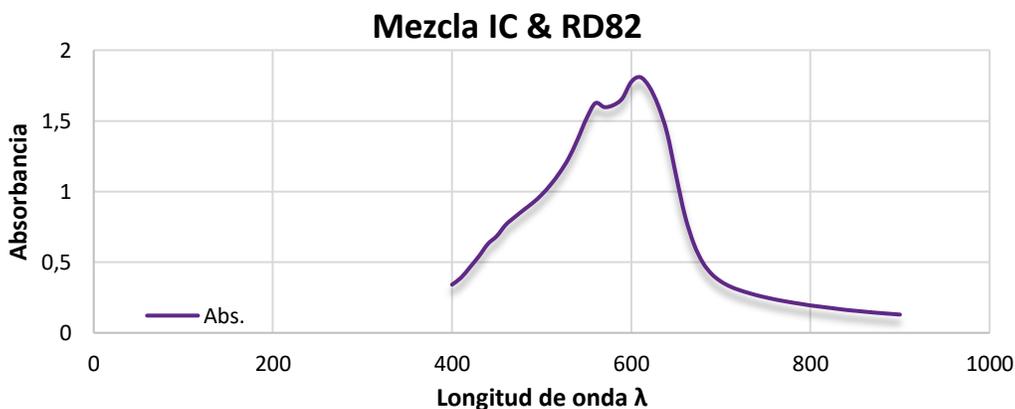
De igual forma se realizó barrido UV-vis (Figura 42), para determinar los picos máximos de absorción (Tabla 18) y se obtuvo lo siguiente:

Dos picos máximos de absorción uno en 560 nm (1.625) y en 610 nm (1.809), sin embargo, a la hora de analizar la remoción de esta mezcla de colorantes se optó por el pico máximo de la mezcla (610 nm).

Para realizar este análisis se utilizó una disolución de la mezcla de ambos colorantes textiles (IC y RD82) de 50 mL con una concentración de 50 ppm para observar cómo se comportaría una muestra en la vida real.

Tabla 18 Barrido Mezcla

λ	Abs.	650	1.115
400	0.341	660	0.829
410	0.39	670	0.628
420	0.464	680	0.496
430	0.542	690	0.415
440	0.629	700	0.364
450	0.685	710	0.329
460	0.765	720	0.304
470	0.819	730	0.284
480	0.87	740	0.266
490	0.919	750	0.251
500	0.977	760	0.237
510	1.048	770	0.225
520	1.132	780	0.214
530	1.233	790	0.204
540	1.366	800	0.194
550	1.515	810	0.186
560	1.625	820	0.178
570	1.597	830	0.17
580	1.611	840	0.162
590	1.658	850	0.156
600	1.775	860	0.15
610	1.809	870	0.144
620	1.743	880	0.139
630	1.61	890	0.134
640	1.415	900	0.129



Es importante destacar que las cantidades de los colorantes se seleccionaron, teniendo en cuenta las concentraciones reportadas en otros estudios y que han demostrado tienen un impacto negativo en los cuerpos de agua (Wong & Yu, 1999). Es por ello, que en los análisis de anteriores y siguientes, se optó por una concentración de 50 ppm para cada análisis correspondiente.

Como se sabe, los problemas de contaminación por colorantes en la vida real se dan en mezclas complejas variando dos o más colorantes al mismo tiempo, por lo que en la Figura 43 nos muestra cómo afecta considerablemente la mezcla de colorantes en comparación de cada colorante por separado.

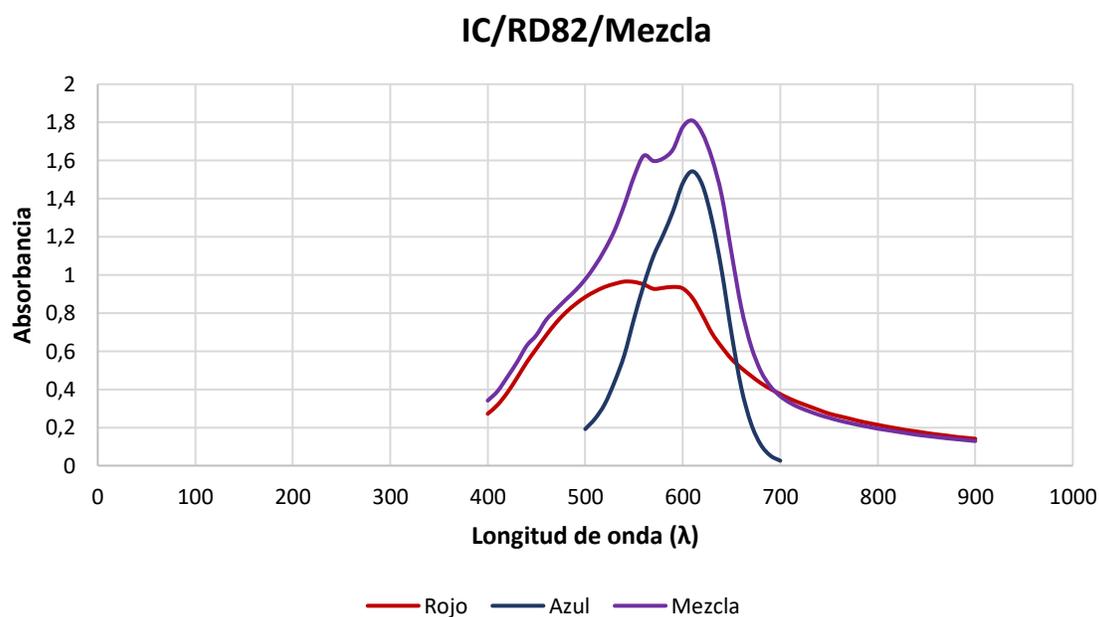


Figura 43 Barrido espectral del IC, RD82 y Mezcla.

8.5 Remoción de colorantes.

El porcentaje de remoción (%R) en un contaminante se calcula mediante la diferencia de concentración antes y después del proceso de adsorción (Ec. 17) (Echavarría et. al. 2011).

$$\%R = \left(\frac{A_o - A_f}{A_o} \right) * 100 \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

%R: Porcentaje de remoción.

A_o: Absorbancia inicial

A_f: Absorbancia final

En la Tabla 19 se muestra los porcentajes de remoción obtenidos por cada colorante y mezcla:

Tabla 19 Porcentajes de remoción de colorantes.

% REMOCIÓN			
pH	IC λmáx.610 nm	RD82 λmáx. 540 nm	Mezcla λmáx.610 nm
10	42.51	0	2.38
9	43.49	0	14.59
8	47.57	0	17.58
7	52.62	19.79	22.55
6	60.53	20.21	31.95
5	62.09	25.60	33.94
4	66.95	29.12	43.61
3	68.76	46.94	50.14
2	80.30	68.70	57.99

Los resultados revelan que el mayor porcentaje de remoción a una concentración de 50 ppm en ambos colorantes y mezcla se da en el pH más ácido (pH 2), teniendo que para el RD82 el porcentaje de remoción fue de un 68.70 % (Figura 44), para el IC fue de 80.30 % (Figura 45) y para la mezcla el % de remoción fue de 57.99 % (Figura 46).

En las Figuras 47, 48, 49 se muestran los distintos procesos de remoción en los colorantes y mezcla.

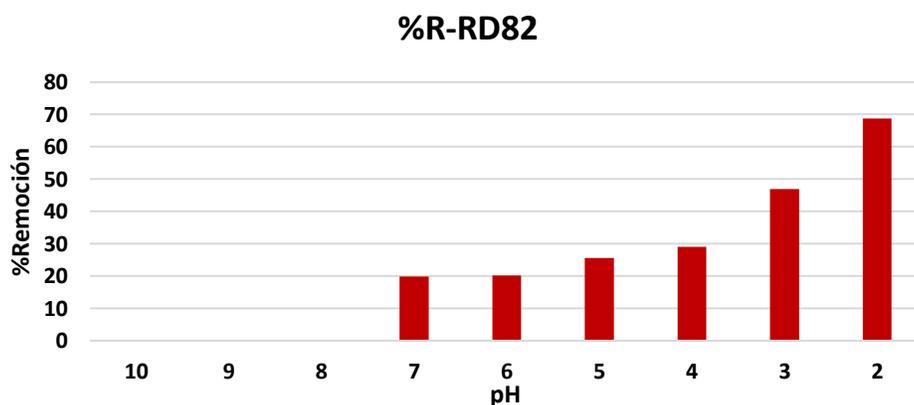


Figura 44 Porcentaje de remoción del RD82.

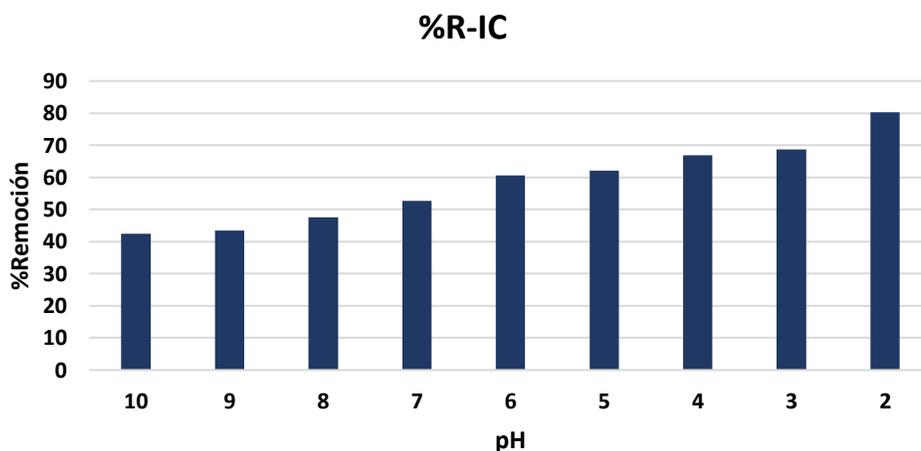


Figura 45 Porcentaje de remoción del IC.

%R-Mezcla (IC & RD82)

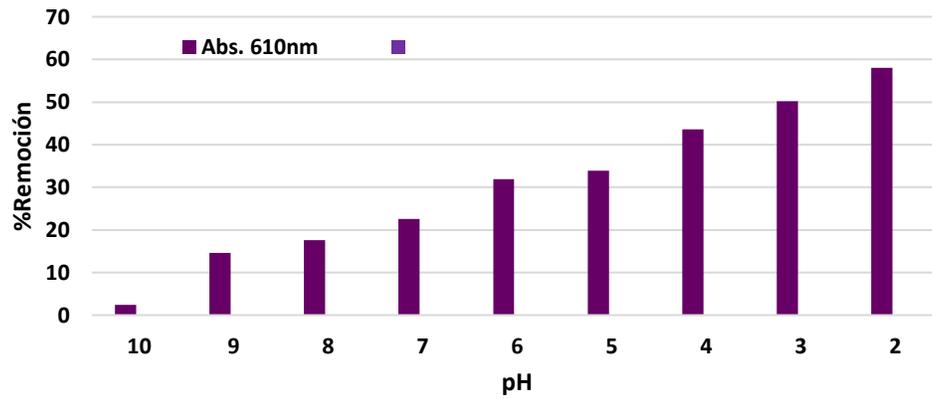


Figura 46 Porcentaje de remoción de la mezcla.

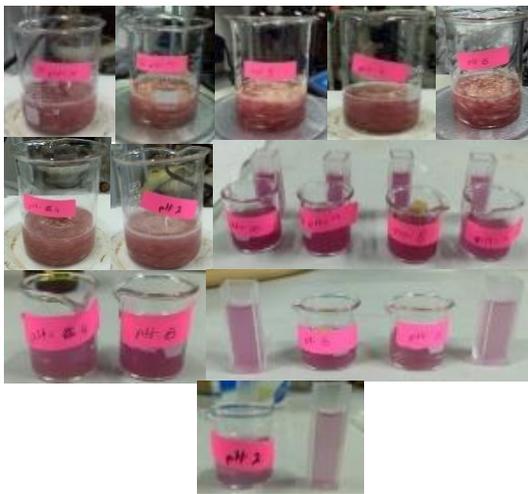


Figura 47 Proceso de remoción del RD82.



Figura 48 Proceso de remoción del IC.

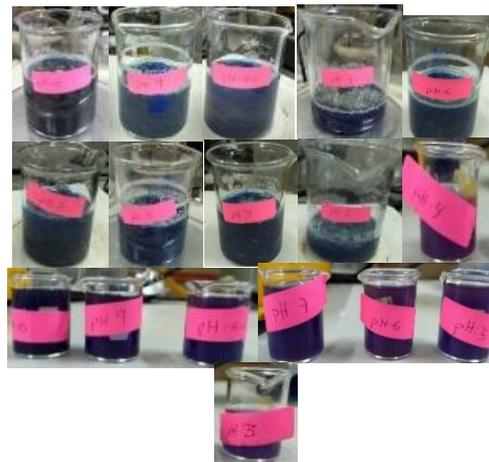
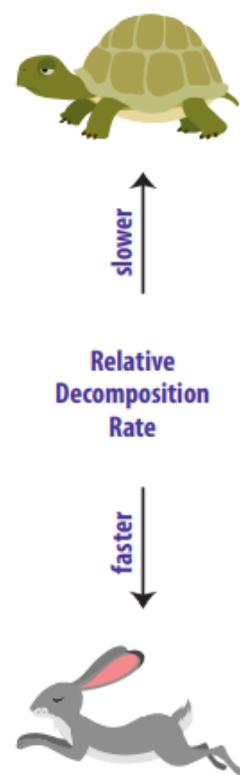


Figura 49 Proceso de remoción de la mezcla.

Las principales tecnologías para el tratamiento físico de efluentes contaminados por la presencia de colorantes y pigmentos en el medio acuoso se relacionan estrechamente con los procesos de **adsorción**, los sistemas de filtración y las resinas de intercambio iónico, ya que son, versátiles y económicos por su fácil operación y diseño simple. Los materiales reportados en la literatura para una efectiva remoción de colorantes se enfocan principalmente en residuos agroindustriales, ya que se producen en grandes cantidades y son baratos de conseguir. Por otro lado, dichos residuos presentan por lo general altos valores de carbono y nitrógeno (C/N) (Tabla 20), por lo que, su degradación natural es lenta y se emplean técnicas como el compostaje para mitigar la contaminación ambiental, sin embargo, el rango óptimo para el compostaje es de 25:1 - 30:1, una relación mayor a 30:1 se traduce en un proceso lento y con baja disponibilidad de N, el cual es necesario para que los hongos se desarrollen. Por el contrario, una relación menor a 25:1 indica un mayor contenido de N disponible, lo que provoca la producción en exceso de N inorgánico, que puede perderse por volatilización en forma de amonio o por lixiviación en forma de nitrato (Méndez-Matías et al., 2018).

Tabla 20 Relación de carbono / nitrógeno de algunos materiales orgánicos (USDA, 2011).

Material	Relación C:N
Rastrojo de centeno.	82:1
Rastrojo de trigo.	80:1
Rastrojo de avena.	70:1
Maíz.	57:1
Centeno (antesis).	37:1
Rastrojo de leguminosas.	29:1
Centeno (vegetativo).	26:1
Fardo de alfalfa maduro.	25:1
Dieta microbiana ideal.	24:1
Fardo de leguminosas.	17:1
Estiércol.	17:1
Fardo de alfalfa joven.	13:1
Vicia Villosa (vegetativa).	11:1
Microorganismos.	8:1



La decoloración por adsorción está influenciada por algunos factores fisicoquímicos como interacciones tinte-adsorbente, área superficial de adsorbente, tamaño de partícula, temperatura, pH, y tiempo de contacto. De acuerdo con la literatura existe una influencia significativa del pH sobre las cinéticas de adsorción. Las condiciones acidas en general, favorecen la remoción de grupos de colorantes ácidos, directos, reactivos y dispersos, mientras que los medios alcalinos, incrementan la remoción de colorantes básicos (Barrios et al. 2015). La mayor eficiencia de remoción de ambos colorantes se presentó a pH ácidos (pH = 2); en el caso del RD82 (% R 68.7) fue más evidente, en parte porque presenta un Pka igual a 1.49, entretanto para el IC que presenta un Pka de 12.9, la eficiencia de remoción fue más homogénea; es decir los cambios en el pH no muestran cambios abruptos entre un nivel de pH a otro; pero de igual forma presentó el mayor porcentaje de remoción a pH 2 (80.3 %)

Un estudio reportado por Nigam, Armour, Banat, Singh & Marchant en el año 2000, se utilizó el olote de maíz para remover colorantes de tipo remazol (Azul marino remazol, rojo remazol, amarillo oro remazol, azul remazol, azul turquesa remazol, negro remazol) y cibacrón (Rojo cibacrón, naranja cibacrón), efectuando una remoción de colorantes de hasta un 70 ± 75 %, para niveles de concentración de 500 mg/L (ppm).

Por otra parte, la reutilización del adsorbente es importante para su viabilidad económica y su aplicabilidad. En otro estudio reportado por el departamento de química, de la Universidad de Ciencia y Tecnología en Tehran por Rabbani, M. (2017), titulado “Preparación del bioadsorbente a base de mazorca de maíz como adsorbente eficaz”, se estudió la desorción de naranja de metilo (MO), una vez realizada su adsorción. Los estudios se llevaron a cabo utilizando una disolución de agua destilada y etanol, realizando 4 ciclos de adsorción de colorante con la misma dosis de olote (Figura 50), en la cual, muestra altos valores de remoción aun en el cuarto ciclo.

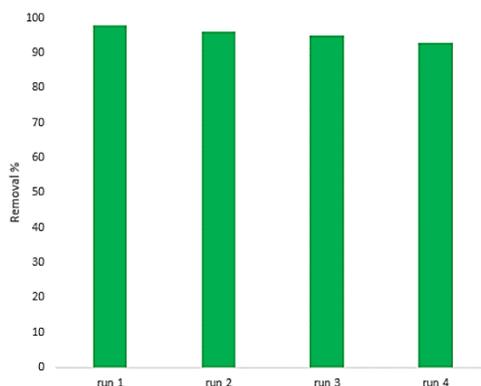


Figura 50 Reutilización del bioadsorbente.

Cuando el IC entra en contacto con el ácido añadido en la solución (HCl) se produce una posible reacción de reducción creando el compuesto leucoíndigo carmín (Figura 51), al igual que una protonación en el oxígeno del ion sulfonato, que en conjunto con los diferentes grupos funcionales que tiene la fibra (-OH, C=O, C-C, C-OH, C-O, C=C, etc.) en especial el oxígeno (O) del grupo hidroxilo de la fibra, puede interactuar con los hidrógenos (H) de los grupos sulfonato, amino e hidroxilo del colorante en la forma leucoíndigo carmín. El colorante se une a la fibra principalmente mediante puentes de hidrógeno por lo que el oxígeno del grupo hidroxilo de la fibra, actúa como un aceptor de enlace de hidrógeno interactuando con aquellos grupos que tienen un hidrogeno deficiente en electrones; de acuerdo con esta descripción, el oxígeno tiene una interacción más fuerte con el hidrogeno de la amina secundaria al ser más estable porque los carbonos compensan la perdida de densidad electrónica del nitrógeno (azul). Con respecto a lo mencionado anteriormente, con el hidroxilo tiene una interacción moderada (roja) y con el sulfonato débil (verde) (Figura 52).

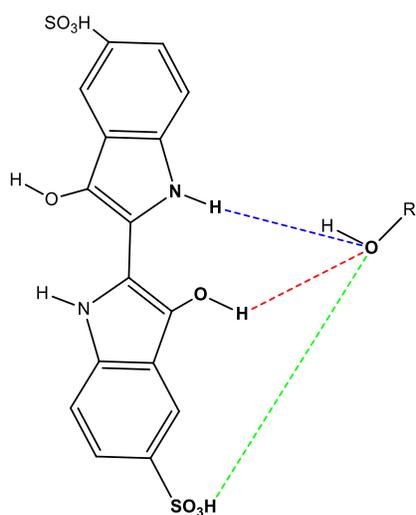
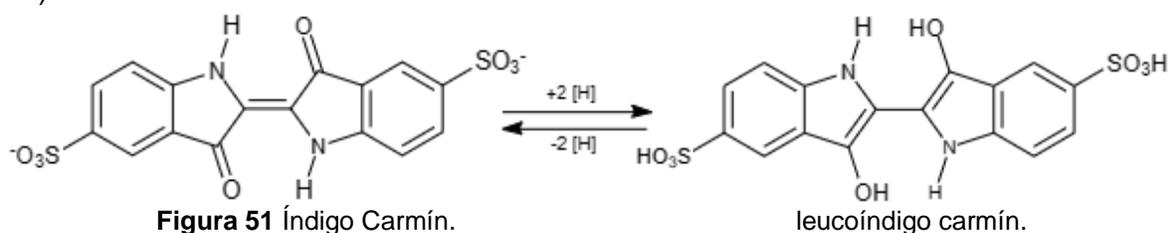


Figura 52 Ejemplo de posible interacción entre los grupos funcionales de la fibra y el colorante leucoíndigo carmín.

Mientras tanto para el RD82, puede existir una posible interacción entre los electrones de valencia de uno de los nitrógenos (N) del enlace azo (-N=N-) y el HCl añadido (Figura 53). Sin embargo, no se puede hablar sobre una posible reducción como se vio con el IC, ya que al reducirse puede ocurrir una degradación dando como resultados aminas aromáticas (Figura 54) (Ferreira R.,2005). Por otro lado, los grupos funcionales del olote puede interactuar de la siguiente manera, la amina terciaria puede interactuar con el hidrogeno del grupo hidroxilo(-OH), la amina secundaria interactúa con los oxígenos formando puentes de hidrogeno con los grupos hidroxilo (-OH), carbonilo (-C=O), éter (C-O-C), mientras que el N⁺ del compuesto nitro (NO₂⁻) puede reaccionar con el H del -OH. De manera en general la molécula del RD82 puede reaccionar con los grupos hidroxilos, carbonilos y éteres que conforman la molécula del olote.

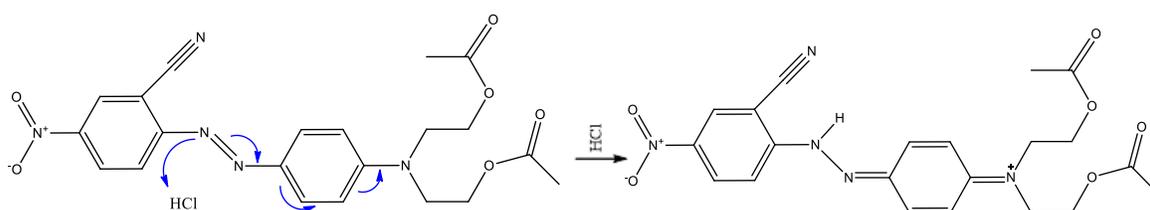


Figura 53 Interacción del RD82 con el HCl.

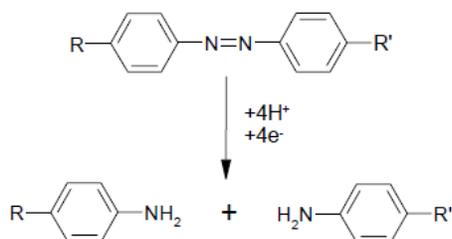


Figura 54 Reducción de un colorante azoico (Ferreira R.,2005).

Debido a que las principales interacciones entre el colorante y la fibra del olote son puentes de hidrógeno y tomando en cuenta que en la estructura del colorante hay dos aceptores de hidrogeno (amina terciaria y compuesto nitro) y un donador de hidrógeno (amina secundaria) existe una mayor interacción con el grupo hidroxilo de la fibra, ya que actúa tanto como donador y aceptor de hidrógeno interactuando con los tres diferentes grupos del colorante, teniendo una mayor interacción con la amina porque puede generarse un enlace de hidrogeno tanto del H del OH al N de la amina (azul y rosa) como del O del OH a los H de la amina (verde). Para el caso del carbonilo y éter solo interactúan con la amina (gris y morada) por lo que su fuerza de interacción es similar, pero moderada (Figura 55).

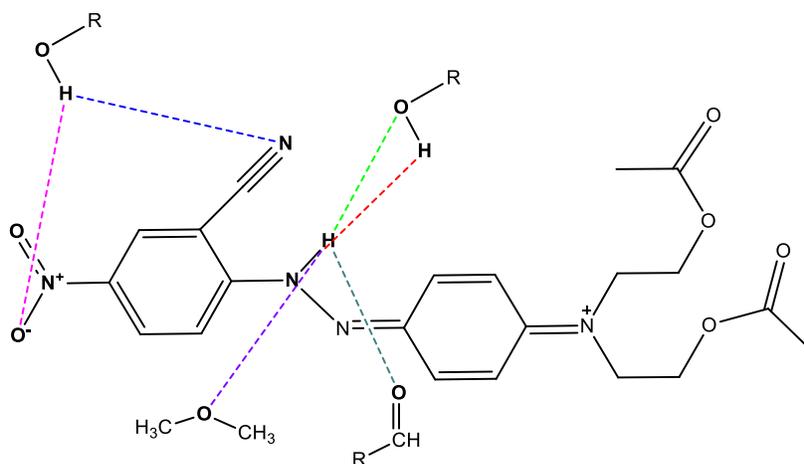


Figura 55 Posible interacción entre los grupos funcionales del olote y el colorante RD82.

Cabe aclarar que, las interacciones previamente dichas solo son posibles predicciones con lo que podría suceder al mezclar el HCl, la fibra del olote y los colorantes (RD82 e IC), en medio acuoso. Ya que actualmente se desconoce la estructura del Olote.

8.6 Cinética de adsorción.

Para evaluar el sistema de adsorción que caracteriza el proceso de remoción, se evaluaron diversos modelos cinéticos pseudo primer orden, pseudo segundo orden y el modelo de Elovich.

Para el modelo de pseudo-primer orden, se utilizó la ecuación de Lagergren (Ec. 18), ya que es la más ampliamente aplicada y fue la primera ecuación de velocidad para la sorción de los sistemas líquido-sólido basado en la capacidad sólida.

$$\ln\left(1 - \frac{q_t}{q_e}\right) = -k_1 t \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

q_e y q_t = Es la cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente en el tiempo (mg g^{-1}).

K_1 = Constante de velocidad de pseudo primer orden (s^{-1})

El modelo de pseudo-segundo orden, fue desarrollado por Ho y McKay en 1999 y está representado por la siguiente ecuación (Ec. 19).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 (q_e)^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

K_2 = Es la constante de velocidad de pseudo segundo orden ($\text{g mg}^{-1} \text{s}^{-1}$)

Y por último el modelo de Elovich (Ec. 20), se aplica generalmente para procesos de quimisorción, este modelo supone que los sitios activos del biosorbente son heterogéneos y por ello exhiben diferentes energías de activación, basándose en un mecanismo de reacción de pseudo segundo orden.

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln(t) \quad \text{Ec. 20}$$

De acuerdo con los resultados obtenidos de coeficiente de determinación, los datos experimentales se ajustan mejor al modelo de pseudo-primer orden con valores de R^2 mayores en comparación con los otros dos modelos. Los parámetros cinéticos se muestran en la Tabla 21, cabe recalcar que K_1 y q_e se obtiene de las ecuaciones de la recta de los gráficos:

Tabla 21 Parámetros cinéticos de pseudo-primer orden.

COLORANTE	R^2 (Pseudo-primer orden).	R^2 (Pseudo-segundo orden).	R^2 (Modelo de Elovich)	K_1	q_e
RD82	0.7849	0.7489	0.6092	-0.00593894	4.33
IC	0.9092	0.7690	0.8610	-0.010290866	4.41
Mezcla	0.9447	0.8374	0.8344	-0.007140341	4.25

A continuación, se muestran los comportamientos para cada una de las cinéticas Figuras 56, 57 y 58.

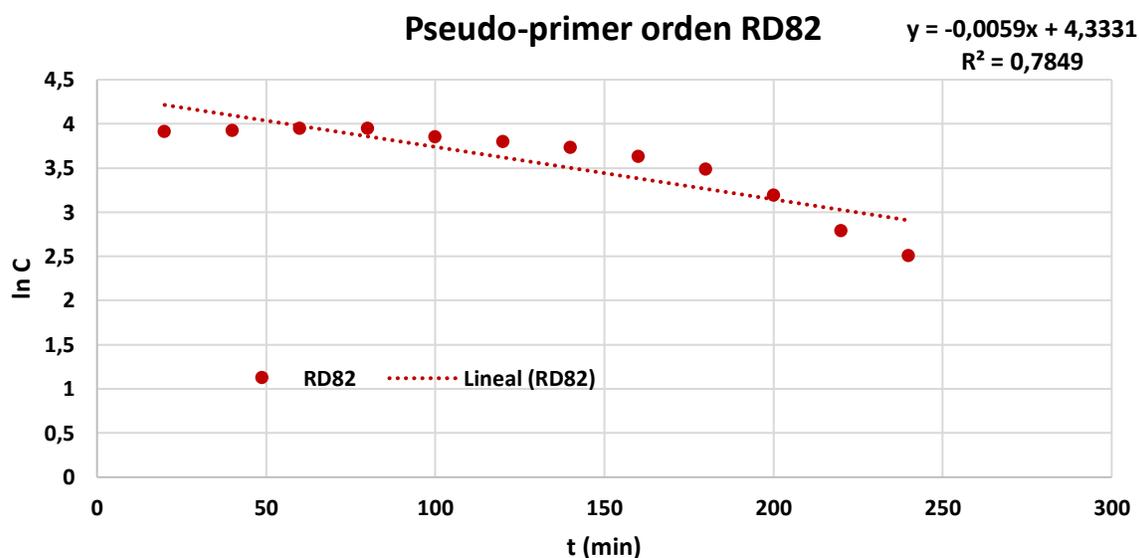


Figura 56 Pseudo primer orden del RD82.

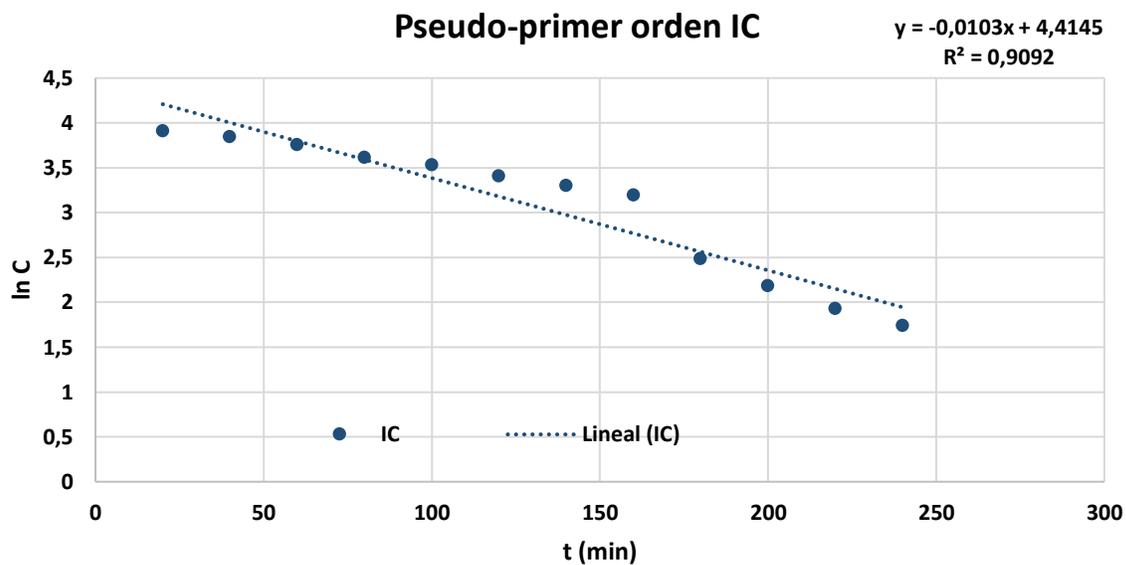


Figura 57 Pseudo-primer orden del IC.

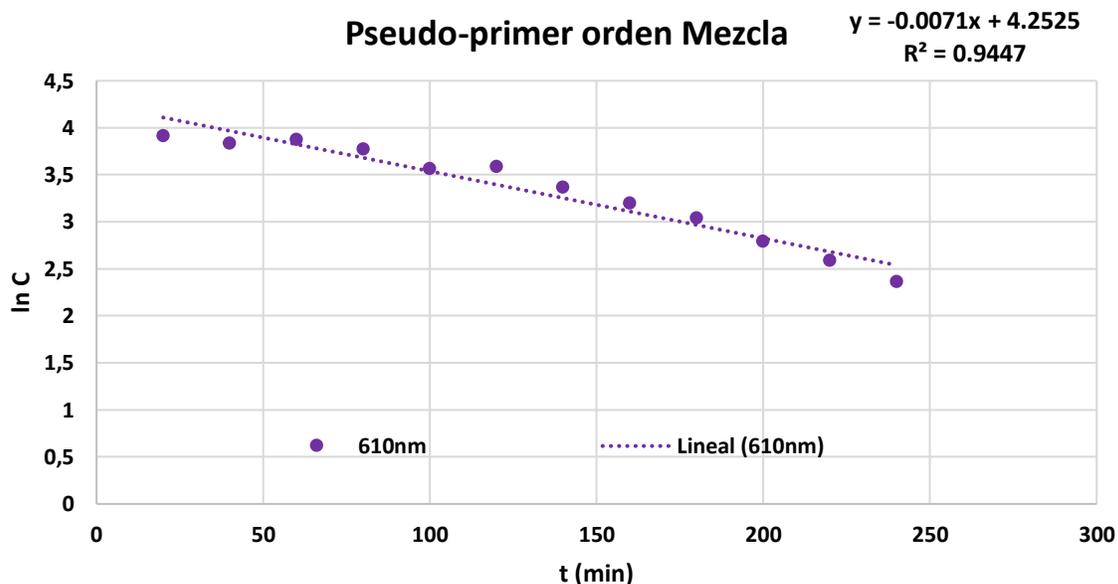


Figura 58 Pseudo-primer orden de la mezcla.

El modelo de pseudo primer orden está más relacionado a una fisisorción, esto quiere decir que presenta interacciones van der Waals, dispersión o interacción dipolo-dipolo (puentes de hidrógeno), entre el olote de maíz y el colorante basándose en la literatura (Fatombi et al., 2019 & Ketema & Worku, 2020), sin embargo, no se le puede atribuir solo a un fenómeno ya que coexiste tanto la fisisorción como la quimisorción en el proceso de adsorción.

9 CONCLUSIONES.

En el espectro de IR, se sugiere la existencia de celulosa, hemicelulosa y la lignina por sus bandas características de los distintos grupos funcionales, como es la banda 3309.25 cm^{-1} que corresponde al grupo -OH, 1635.36 cm^{-1} al grupo de carbonilo(C=O) y por supuesto a la banda en 1031.77 cm^{-1} que corresponde al enlace glicosídico (C-O-C) que son las más fuertes en el espectro, sin embargo, se sabe que la espectroscopía infrarroja no es única a la hora de elucidar una estructura química de una molécula, por lo que es necesario emplear otras técnicas espectroscópicas y espectrométricas (como espectrometría de masas, RMN, etc.).

Mediante el análisis SEM, se puede observar que las micrografías presentes determinan una estructura superficial con poros o cavidades del olote de maíz, con base en, la literatura puede llegar a ser susceptible en la adsorción de compuestos orgánicos e inorgánicos, por sus diferentes grupos funcionales que presenta la fibra, la cual emplea fuerzas intermoleculares para la retención de diferentes compuestos.

Para los barridos espectrales que se realizaron de cada colorante y mezcla, se puede observar que para el IC se obtuvo la mayor absorbancia (λ máx.) en 610 nm que concuerda con la literatura, respecto al RD82 que obtuvo la mayor absorbancia (λ máx.) en 540 nm y para la mezcla entre ambos colorantes se obtuvo que la mayor absorbancia (λ máx.) en 610 nm. Actualmente no hay mucho estudio respecto al RD82 y la mezcla entre el IC y RD82, por lo que, este estudio servirá para futuras investigaciones.

Respecto al estudio de la remoción, se obtuvo que para el pH donde ocurre el mayor porcentaje es de 2, obteniendo así para el IC un 80.30 % a una concentración de 50 ppm, para el RD82 68.70 % a una concentración de 50 ppm y para la mezcla un 57.99 % teniendo una concentración de 50 ppm. Se puede argumentar que los porcentajes son buenos, tomando en cuenta la literatura previamente revisada, donde se reportan porcentajes de remoción en un intervalo de 60 al 90 % en colorantes textiles con el método de adsorción, por lo que, se ubica el IC dentro de la media y por debajo el RD82 y mezcla.

La velocidad de adsorción de los colorantes textiles (RD82, IC y su mezcla) responde a una cinética de pseudo-primer orden, lo que sugiere en principio un proceso de fisisorción en la remoción de los colorantes, sin embargo, no se le puede atribuir solo a un fenómeno ya que coexiste tanto la fisisorción como la quimisorción en el proceso de adsorción.

Por último, este estudio demostró que el IC, RD82 y su mezcla pueden ser removido de una manera satisfactoria, ya que entra dentro del intervalo de remoción propuesto en la literatura para este tipo de colorantes, tomando en cuenta su concentración del colorante, el tiempo de contacto, la dosis del olote y el cambio de pH en las disoluciones. Esto sin tomar en consideración que al olote de maíz no recibió ningún tratamiento químico, que pudiera posiblemente aumentar la eficacia de remoción.

10 PERSPECTIVAS

- Se requiere seguir estudiando sobre las propiedades del olote de maíz para fortalecer su alternativa como material adsorbente además es un material físicamente duro y rígido, por lo que, podría utilizarse para otro tipo de proyecto, que incluya por ejemplo un bio-aislamiento térmico.
- Se podría mejorar la eficiencia de remoción del olote, si se siguiera algún tratamiento químico previo, al igual que un tamizado para efectuar mejor la remoción
- Otro aspecto que se debe considerar es ¿Cómo poder reutilizar el olote de maíz? Una vez implementado para remover colorantes en relación con este tipo de colorantes, ¿Qué proceso químico puedes implementar?, por lo tanto, se necesitan estudios de desorción utilizando el olote de maíz.
- Por último, considerar su aplicación para implementarlo en alguna zona rural y/o urbana, como una especie de “filtro” para favorecer a la sociedad. Ya que el olote de maíz es de bajo costo por ser un residuo agroindustrial. Por lo que también, se pueden implementar otros tipos residuos agroindustriales, para esta aplicación.

11 BIBLIOGRAFÍA.

AFIRM GROUP, & Sedlak, D. (2015). Documento / Manual de Química. AFIRM GROUP. Recuperado 25 de marzo de 2018, de <https://www.afirm-group.com/wp-content/uploads/2013/07/Apendice-F-Manual-de-Guia-Quimica.pdf>

Anicua Sánchez, R., Gutiérrez Castorena, M. C., Sánchez García, P., Ortiz Solorio, C., Volke Halle, V., & Rubiños Panta, J. E. (2009). PARTICULE SIZE AND MICROMORPHOLOGICAL RELATION ON PHYSICAL PROPERTIES OF PERLITE AND ZEOLITE. *Agricultura Técnica en México*, 35(Num. 2), 149–150pp.

ANMAT, & INAME. (2003, 12 junio). FARMACOPEA. Recuperado 5 junio, 2019, de http://www.anmat.gov.ar/webanmat/fna/flip_pages/Farmacopea_Vol_I/files/assets/basic-html/page7.html

Aranda M., H. (2018, junio). Estudio de la cinética de degradación de los colorantes negro ácido 52 y rojo disperso 82 mediante el proceso foto-Fenton. [Tesis]. Recuperado 4 junio, 2019, de <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/438/AAMHZC09T.pdf?sequence=1&isAllo wed=y>

Argüello, G., (1989), "El primer medio siglo de vida independiente (1824-1867)", en Semo, E., (coordinador) (1989), México, un pueblo en la historia. Campesinos y hacendados, generales y letrados, Tomo 2, 1770-1875), México, Alianza Editorial, (312 pp.).

Arroyo López, María del Pilar Ester, & Cárcamo Solís, María de Lourdes (2010). La evolución histórica e importancia económica del sector textil y del vestido en México, *Economía y Sociedad*, ISSN: 1870-414, disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=510/51015546004>"

ATRIA. (2021, 27 mayo). ¿Cómo medir la porosidad de los materiales? ATRIA Innovation. <https://www.atriainnovation.com/como-medir-la-porosidad-de-los-materiales/>

Barnett, E. y C. J., Goodell. 1923. Preliminary reports at experiments with feed-ing steers, using cottonseed meal and molasses. Mississippi Agricultural Experiment Station, Circular 48. 12 pp

Barrios-Ziolo, L. F., Gaviria-Restrepo, L. F., Agudelo, E. A., & Cardona Gallo, S. A. (2015). TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTES Y PIGMENTOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES. *DYNA*, 82(191), 118–126. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n191.42924>

Cárcamo, María de Lourdes, (1991), El impacto de la inflación en el ahorro interno de la industria textil y del vestido en México, 1982-199, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México: Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón. México, D.F. (236 pp.) De la Torre Villar, E. y R. Navarro, (2002), Historia de México, México: ed. Mc Graw Hill, segunda edición, 549 pp.

C. Carrera, H. Muñoz y L. Solares (1963), Centro Nacional de Investigaciones Pecuarias,

S.A.G., México, D. F. Tec. Pec. en México. 1:34-37

CIMMYT (1995). Manejo de los ensayos e informes de los datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz, México DF, ISBN: 970-648-045-5, 20 p.

Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Carnevale Miino, M., & Damiani, S. (2019). Treatments for color removal from wastewater: State of the art. *Journal of Environmental Management*, 236, 727–745. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.094>

CONACYT. (2019). Microscopia Electronica de Barrido - CIMAV Unidad Monterrey. Centro de Investigación en Materiales Avanzados. <http://rmt.y.cimav.edu.mx/sem/>

Córdoba, Jhon Alexander, Salcedo, Eduardo, Rodríguez, Ramón, Zamora, Juan Francisco, Manríquez, Ricardo, Contreras, Héctor, Robledo, Jorge, & Delgado, Ezequiel. (2013). Caracterización y valoración química del olote: degradación hidrotérmica bajo condiciones subcríticas. *Revista latinoamericana de química*, 41(3), 171-184. Recuperado en 11 de noviembre

de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-59432013000300004&lng=es&tlng=es.

De Alba, J. 1950. Alimentación del Ganado en la América Latina. Prensa Médica Mexicana. México. 313 pp.

Echeverría M E, L E Arroyo (2000) Recetario del Maíz. Cocina Indígena y Popular. Consejo Nacional para las Culturas y las Artes (CONACULTA). D.F., México. 441 p.

E.N.A., I.N.I.A. (1962), Conservación y mejoramiento de los forrajes en la región húmeda del Golfo de México. Trabajo sin publicar presentado en el II Symposium de Investigación Agrícola. Chapingo, Edo. de México.

FAOSTAT (2009) Food Supply. Crops Primary Equivalent. Data Base. Consultado el 7 de mayo de 2019. Disponible en: <http://faostat3.fao.org/home/index.html#DOWNLOAD> (mayo 2013).

Fatombi, J. K., Idohou, E. A., Osseni, S. A., Agani, I., Neumeyer, D., Verelst, M., Mauricot, R., & Aminou, T. (2019). Adsorption of Indigo Carmine from Aqueous Solution by Chitosan and Chitosan/Activated Carbon Composite: Kinetics, Isotherms and Thermodynamics Studies. *Fibers and Polymers*, 20(9), 1820–1832. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-1107-y>

Ferreira Ramalho, P. A. da C. (2005). *Degradation of dyes with microorganisms Studies with ascomycete yeasts* (Tesis de doctorado). UNIVERSIDADE DO MINHO, Braga. Recuperado de: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/3335/1/PDF%20Tese.pdf>

García Albortante, J., Barranco Barreto, H., Barceló Quintal, D. I., Salazar Peláez, M. L., López Chucken, U. J., & Hernández Moreno, A. (2015). EFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN LA ADSORCIÓN DE Pb (II) UTILIZANDO OLOTE DE MAÍZ. *AMICA*, 2, 01–04. <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/165.pdf>

García Asenjo, N. (2014, junio). Una nueva generación de carbones activados de altas prestaciones para aplicaciones medioambientales [Tesis]. Recuperado 1 diciembre, 2019, de https://digital.csic.es/bitstream/10261/103330/1/Tesis_Natalia%20García%20Asenjo.pdf

Garrote, G., Falqué, e., Domínguez, H. & Parajó, J. C. (2007). Autohydrolysis of agricultural residues: study of reaction byproducts. *Bio-resorce. Technol*, 98, 1951–1957.

Gupta, V. K. & Suhas, 2009. Application of low-cost adsorbents for dye removal. A review. *Journal of Environmental Management*, pp. 90: 2313-2342..

Harada, Y., 2008. Normas oficiales para calidad del agua. México, D. F., s.n., p.32

Hu, Y., Chen, X., Liu, Z., Wang, G., y Liao, S. (2016). Activated carbon doped with biogenic manganese oxides for the removal of indigo carmine. *Journal of Environmental Management*. 166. P.p. 512 – 518.

Infosiap.siap.gob.mx. (2004). Cierre de la producción agrícola por cultivo. [online] Available at: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/cultivo/index.jsp [Accessed 11 Nov 2018].

INEGI. (2011). La industria textil y del vestido en México; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Encuesta Nacional Agropecuaria 2017. Recuperado 7 noviembre, 2019, de <https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2017/>

IPPC. (2003). Reference document on best available techniques for the textile industry. Integrated Pollution Prevention and Control. European Commission

IR Spectrum Table & Chart. (2018). Recuperado 11 diciembre, 2018, de <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/biology/ir-spectrum-table.html>

Joardder, M. U., Karim, A., Kumar, C., & Brown, R. J. (2016). Porosity: Establishing the relationship between drying parameters and dried food quality. *SpringerBriefs in Food, Health, and Nutrition*, 01–31. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23045-0>

Kato T A, C Mapes, L M Mera, J A Serratos, R A Bye (2009) Origen y Diversificación del Maíz: Una Revisión Analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad. Editorial Impresora Apolo, S.A. de C.V. D.F., México. 116 p

Kaushik, P., Malik, A. (2009). Fungal dye decolorization: Recent advances and future potential *Environmental International*. 35 127--141

Ketema, A., & Worku, A. (2020). Review on Intermolecular Forces between Dyes Used for Polyester Dyeing and Polyester Fiber. *Journal of Chemistry*, 2020, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2020/6628404>

Lee, M., Ho, C., Lin, H., Wang, P., & Lu, J. (2014). Solubility of Disperse Red 82 and modified Disperse Yellow 119 in supercritical carbon dioxide or nitrous oxide with ethanol as a cosolvent. *The Journal of Supercritical Fluids*, 95, 258–264. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.08.023>

Liu, L., Li, H., Lazzaretto, A., Manente, G., Tong, C., Liu, Q., & Li, N. (2017). The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 912–932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.140>

López M (2007) Antiguas Representaciones del Maíz. CONACULTA/Archivo General de la Nación. D.F., México. 89 p

Medina, A., Muñoz, M., Hernández, R., Mendoza, E., & Román, L. (2012, 15 octubre). COLORANTES DISPERSOS. Recuperado 5 junio, 2019, de <https://prezi.com/b-sl7vwgg5ci/colorantes-dispersos/>

Méndez, H. J. E. (2010). Decoloración de índigo carmín por medio de una estrategia basada en el cultivo sólido de *Fomes sp. EUM1*. (Tesis maestría). Universidad Autónoma Metropolitana, Distrito Federal, México

Méndez-Matías, A., Robles, C., Ruiz-Vega, J., & Castañeda-Hidalgo, E. (2018). Compostaje de residuos agroindustriales inoculados con hongos lignocelulósicos y modificación de la relación C/N. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 271–272. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1070>

Moeller Chávez, G. E., Sandoval Yoal, L. & Mijaylova Nacheva, P., 2013. Evaluación de diferentes procesos de tratamiento para la remoción de colorantes sintéticos utilizados en la industria textil., s.l.: IMTA Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua.

Muhye, A. (2020, 30 septiembre). Porosidad química: características, tipos y ejemplos. Lifeder. <https://www.lifeder.com/porosidad-quimica/>

Nigam, P., Armour, G., Banat, I., Singh, D., & Marchant, R. (2000). Physical removal of textile dyes from effluents and solid-state fermentation of dye-adsorbed agricultural residues. *Bioresource Technology*, 72(3), 219–226. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(99\)00123-6](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(99)00123-6)

Ojedokun, A. T., & Bello, O. S. (2017). Liquid phase adsorption of Congo red dye on functionalized corn cobs. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 38(9), 1285-1294. <https://doi.org/10.1080/01932691.2016.1234384>

Oliveira, E. E., Silva A, A. E., Nagashima, T. J., Salgado, G. M. C., Aguiar, L. M., Rodrigues, M. H., Batista, A. I., Bayer, M. P., Ricardo, M. P. S. N., Gomes, O. A. Tabosa, E. E. S. (2010). Xylan from corn cobs, a promising polymer for drug delivery: Production and characterization. *Bioresource Technology*, 101, 5402-5406.

O'Neill, C., Freda, R., Hawkes, D., Lourenco, N., & Pinheiro, H. (1999). Colour in textile effluents - sources, measurement, discharge consents and simulation: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1009–1018.

Ortega-Corona A, M J Guerrero-Herrera, O Cota-Agramont, R E Preciado-Ortíz (2011) Situación actual de los maíces nativos y sus parientes silvestres en México. In: Amplitud, Mejoramiento, Usos y Riesgos de la Diversidad Genética de Maíz en México. R E Preciado-Ortíz, S Montes-Hernández (eds). Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. Chapingo, Estado de México, México. pp:15-41

Ortega-Paczka R (2003) La diversidad del maíz en México. In: Sin Maíz No Hay País. G Esteva, C Marielle (eds). Culturas Populares de México. D.F., México. pp:123-154.

Osorio Echavarría, Juliana, Vidal Benavides, Ana Isabel, & Quintero Díaz, Juan Carlos. (2011). Decoloración de aguas residuales textiles utilizando el hongo ligninolítico anamorfo R1 de *Bjerkandera* sp. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (57), 85-93. Retrieved October 29, 2019, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302011000100010&lng=en&tlng=es

Owen, T. (2000). *Fundamentos de la espectroscopía Uv-vis moderna; conceptos básicos*. Agilent Technologies. (5980-1397ES). P.p. 2-130.

Paredes-López O, F Guevara-Lara, L A Bello-Pérez (2009) La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Ciencias* 92-93:60-70

Pineda, N. (2010). *Microscopia Electrónica de Barrido - CIMAV Unidad Monterrey*. Recuperado 14 diciembre, 2018, de <http://mty.cimav.edu.mx/sem/>

Pinto, J., Cruz, D., Paiva, A., Pereira, S., Fernandes, L., & Varum, H. (2012). Characterization of corn cob as a possible raw building material. *Construction and Building Materials*, 34, 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.014>.

Quintero, L., y Cardona, S. (2010). Tecnologías para la decoloración de tintes índigo e índigo carmín. *Dyna*, 77 (162). P.p. 371 – 386.

Rabbani, M. (2017). Preparation of corn cob based bioadsorbent as an effective adsorbent. *Proceedings of The 21st International Electronic Conference on Synthetic Organic Chemistry*, 01–07. <https://doi.org/10.3390/ecsoc-21-04816>

Ramírez, C. H., (2010), "Nuevos desafíos de México: China como monopolista de la industria textil y de la confección." Universidad de las Américas Puebla. Disponible en línea: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lri/barrios_m_md/capitulo0.pdf. Recuperado por última vez 06/009/19.

Rivas, B., Moldes, A. B., Domínguez, J. M. & Parajó, j. c. (2004). Lactic acid production from corn cobs by simultaneous saccharification and fermentation: a mathematical interpretation. *Enzyme Microb. Technol*, 34, 627–634.

Robinson, T., Chandran, B., & Nigam, P. (2002). Removal of dyes from an artificial textile dye effluent by two agricultural waste residues, corncob and barley husk. *Environment International*, 28(1–2), 29–33. [https://doi.org/10.1016/s0160-4120\(01\)00131-3](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(01)00131-3)

SAGARPA (2010). Consultado en 2019. <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Aprovechamiento%20de%20esquuilmos.pdf>

SAGARPA. (2015). Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas primera etapa: diagnóstico nacional. Recuperado 3 septiembre, 2019, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346963/Manejo_de_Residuos_Reporte_Ejecutivo.pdf

SAGARPA. (2016). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Recuperado 31 agosto, 2019, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256429/B_sico-Ma_z_Grano_Blanco_y_Amarillo.pdf

Salas A., Y., Carrasco C., Mercedes, Lazo B., A, Cardeña C., R., & Obregón L., C. (2008). Obtención y caracterización fisicoquímica y funcional de las fibras dietéticas del níspero común (*Mespilus germanica*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 74(4), 269-281. Recuperado en 13 de diciembre de 2018, de: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2008000400007

Samanta, A. K., Seniana, S., Kolte, A. P., Sridhara, M., Sampatha, K. T., Jayapala, N., Devia, A. (2012). Production and in vitro evaluation of xylooligosaccharides generated from corn cobs. *Food Bioproduction Process*, 90, 466-474.

Sánchez J J, M M Goodman, C W Stuber (2000) Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Econ.c Bot*- 54:43-59

Sanz Tejedor, A. (2011). *Química Orgánica Industrial*. Recuperado 5 junio, 2019, de <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-11.php>

SEDICI. (2019). *Técnicas de Caracterización. Conceptos Generales. Técnicas de Caracterización*. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2681/IV_-_T%C3%A9nicas_de_caracterizaci%C3%B3n_Conceptos_generales.pdf?sequence=8&isAllowed=y

SEMARNAT-CONAGUA. (2015). *Estadísticas del agua en México*, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, México, D.F., México

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. (2008). *Principio de Análisis Instrumental* (6ª ed.). D.F., México: CENGAGE Learning.

Sood, S., Kumar, S., Umar, A., Kaur, A., Kumar, M. S., y Kumar, K. S. (2015). TiO₂ quantum dots for the photocatalytic degradation of indigo carmine dye. *Journal of Alloys and Compounds*. 650. P.p. 193 – 198.

Sponza, D.T. (2006). Toxicity studies in a chemical dye production industry in Turkey. *Journal of Hazardous Materials*. A138: 438---447.

Supaca, N. et al., 2004. Microbial decolorization of reactive azo dyes in a sequential anaerobic-aerobic system. *Chemical Engineering Journal*. , pp. 99(2): 169-176..

Taube K (1989) The maize tamale in Classic maya diet, epigraphy and art. *Amer. Antiquity* 54:13-51.

Técnicas - Espectroscopia Infrarroja - Caracterización de Materiales Cristalinos. (2006, 28 septiembre). Recuperado 14 diciembre, 2018, de <http://www.ehu.es/imacris/PIE06/web/IR.htm>

Thermo Scientific. (2019). Food Dyes and Beer's Law. Recuperado 18 octubre, 2019, de <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Scientific-Resources/FL53099-food-dyes-beers-law-qc-lesson-plan.pdf>

THOMPSON, N. S. (1995). Hemicellulose. In: KIRK-OTHMER (ed.) *Encycl. Chem. Technol.* New York: John Wiley & Sons.

Universidad de Burgos. (2018). Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Universidad de Burgos (UBU). <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido-meb>

Universidad de Alicante. (2012). ANÁLISIS ELEMENTAL. Servicios Técnicos de Investigación. Recuperado 6 junio, 2019, de <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/analisis-elemental.html>

Urrego, S., Bernal, C., Mesa, M., López, B., & Sierra, L. (2007). Caracterización de materiales sólidos porosos mediante termoporometría. *Scientia Et Technica*, 1(36). <https://doi.org/10.22517/23447214.4945>

USDA. (2011). Carbon to Nitrogen Ratios in Cropping Systems. Natural Resources Conservation Service. Recuperado noviembre de 2020, de <http://cultivosdeservicios.agro.uba.ar/wp-content/uploads/2019/04/stelprdb1166766.pdf>

Vasco, P. A., y Betancur, M. V. (2014). Estudio de la cinética de adsorción de índigo carmín en piezas abrasivas. *Revista de investigaciones aplicadas*. 08 (02). P.p. 131 – 139.

Velarde, E., & González, A. (1996, diciembre). EL COLOR Y SU CONSTITUCION QUIMICA. *Revista de Química*, pp. 239–241.

Villada, Y., & Hormaza, A. (2015). Simultaneous analysis of the removal of brilliant blue and red 40 through spectrophotometric derivative. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(1), 38–58. <https://doi.org/10.14482/inde.33.1.5526>

Wong, Y & Yu, J. (1999). Laccase-catalyzed decolorization of synthetic dyes. *Water Research*, 33(16), 3512–3520. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(99\)00066-4](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(99)00066-4)

Y.M. Slokar y A. Majcen Le Marechal, *Dyes Pigments* 37 (1998)

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>

Zhang, F., Knapp, S. & Tapley, N., 1999. Decolourization of cotton bleaching effluent with woodrotting fungus. *Water Reserch*; 33 (4), pp. 919-928.

Zeybek, Z., Yuce, C.S., Alioglu, F., Alpbaz, M. (2007). Determination of optimum operating conditions for industrial dye wastewater treatment using adaptive heuristic criticism pH control. *Journal of Environmental Management*. 85: 404--414.