



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOVIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

FACULTAD DE QUIMICA-FARMACIA.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA-QUIMICA.

Trabajo de Diploma

Título: *Evaluación del comportamiento de mezclas de residuos forestales e industriales en la remoción de color de aguas residuales.*

Autor: Vanira Vazquez Moya.

Tutores: Isabel Cabrera Estrada.

Iván L. Rodríguez Rico.

Curso: 2012-2013.

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



Dedicatoria

*A mis padres que siempre han creído en mí y me han dado
fuerzas para seguir adelante.*

*A mi abuela que le daré la satisfacción de tener una nieta
ingeniera.*

Agradecimientos:

A mis padres por son las personas responsables de todo lo que soy y por siempre estar ahí apoyándome en los momentos de tristeza y de alegría.

A mi hermano por su presencia en mi vida.

A mi familia por su preocupación por mis estudios.

A mi novio Yuri por apoyarme y motivarme cuando más lo he necesitado a lo largo de la carrera aunque hoy esté lejos.

A Maritza, así como a Made y Lidiel por sus atenciones.

A Lian Manuel por ser una motivación en mi vida.

A todos mis compañeros de aula por tantos momentos que hemos compartido desde el estudio hasta las fiestas y en especial a Lilian que ha estado conmigo en cada celebración así como en cada problema.

A todos los profesores que me han aportado su granito de arena en mi formación como ingeniera.

A la profesoras Pastora, Inés y Anita por colaborar de forma decisiva en la realización de la tesis.

A mi tutora Isabel por su incesable ayuda con la realización del trabajo, por brindarme su apoyo, su amistad, su solidaridad en cada uno de los momentos difíciles por los que atravesé durante todo este tiempo.

Resumen.

El presente trabajo ha sido realizado a causa de la presencia de colorantes en los residuales del Combinado Textil "Desembarco del Granma", ubicado en la Carretera a Camajuaní km 2¹/₂ Santa Clara, provincia Villa Clara. En el trabajo se identificaron los tipos de contaminación, las características principales de los colorantes y tintes más usados en la industria textil y en especial el impacto ambiental que provocan. Se propuso la biosorción como alternativa al tratamiento puesto en práctica actualmente en la fábrica. Se evaluó el empleo de biosorbentes para la remoción de color de aguas residuales, se realizaron experimentos con el azul de metileno y aserrín de pino y mezclas de este último con bagazo de caña, alcanzándose para ambos casos remociones superiores al 90. Se ajustaron los datos experimentales a un modelo cinético de pseudo-segundo orden, además se hicieron estudios termodinámicos y de equilibrio que indican el comportamiento del proceso, describiendo el proceso exotérmico y espontáneo. A las mejores condiciones de trabajo alcanzadas para las soluciones ideales se realizaron corridas experimentales para aguas reales. Fueron identificadas las etapas principales de un proceso para la remoción de color a escala industrial, también se determinó la cantidad de adsorbente a utilizar y la capacidad de los equipos, mediante los balances de materiales, se estimaron los costos de inversión, los costos de operación y los costos totales de producción.

Abstract.

The present work has been carried out because of the presence of coloring in the residual of the Textile Industry "Desembarco del Granma", located in the Highway to Camajuaní km 21/2 Santa Clara, county Villa Clara. In the work the types of contamination, the main characteristics of the colorings and tints were identified more used in the textile industry and especially the environmental impact that they cause. The biosorption was proposed as a good alternative to the treatment that is carried out in the factory. The biosorbents employment was evaluated for the removal of color of residual waters, they were carried out experiments with the methylen blue and pine sawdust and mixtures of this last one with cane bagasse, reaching stops both cases superior removals at the 90. The experimental data were adjusted a kinetic model of pseudo-second order, thermodynamic studies were also made and of balance that they indicate the behavior of the process, describing the process exothermical and spontaneous. To the best work conditions reached for the ideal solutions they were carried out experimental races for real waters. The main stages of a process were identified for the color removal to industrial scale, the quantity of adsorbents was also determined to use and the capacity of the equipment, by means of the balances of materials, they were considered the investment costs, the operation costs and the total costs of production.

Índice.

	Pág.
Introducción	1
Capítulo 1	
1.1. Contaminación del Medio Ambiente.	4
1.1.1. Contaminación de las aguas y la Industria Química.	5
1.1.2. Contaminación de las aguas residuales con efluentes textiles.	8
1.2. Los Colorantes.	10
1.2.1 Clasificación de los colorantes.	10
1.3. Métodos Tradicionales de Tratamientos para aguas residuales contaminadas con colorantes.	12
1.4. Impacto Ambiental.	15
1.5. Colorante Azul de Metileno.	16
1.6. Colorantes más empleados en la Industria Textil.	17
1.7. Proceso de Biosorción.	18
1.8. Biosorbentes.	20
1.9. Residuos Forestales.	21
1.10. Equilibrio del proceso.	24
1.11. Estudio Cinético.	26
Conclusiones parciales:	28
Capítulo 2	
2.1 Caracterización del biosorbente.	29
2.2. Disponibilidad del residuo aserrín.	32
2.3. Estudio Experimental.	33
2.3.1. Sistema formado por disolución acuosa de azul de metileno y aserrín de pino.	33
2.3.2. Estudio Cinético.	36
2.3.3. Estudio termodinámico del proceso.	42
2.3.4. Mezclas aserrín de pino y bagazo de caña de azúcar.	45
2.3.5. Estudio cinético de las mezclas 75% aserrín y 25% bagazo.	47
Conclusiones parciales:	51
Capítulo 3	
3.1 Características generales de colorantes empleados en la textilera de Santa Clara.	
3.2 Aguas reales.	53
3.3. Propuesta de tratamiento e inversión requerida. Diseño preliminar.	56
3.3.1. Definición de las etapas fundamentales del proceso de tratamiento del efluente.	56
3.3.2. Balances de materiales para determinar la capacidad de los equipos.	57
3.3.3. Propuesta del esquema tecnológico.	58
3.3.4. Determinación de las capacidades de los equipos.	59
3.4. Análisis económico.	62
3.5- Externalidades	65
Conclusiones parciales:	66
Conclusiones	67
Recomendaciones	68
Bibliografía	
Anexos	

Introducción.

A lo largo de la historia la calidad del agua potable ha sido un factor determinante del bienestar humano. Al paso de los años ha ocurrido un aumento considerable del vertimiento de aguas residuales en medios naturales, la mayor preocupante es la presencia potencial de contaminantes químicos en dichas aguas, éstos pueden ser orgánicos e inorgánicos, debido sobre todo a la actividad humana.

La Comunidad Científica Internacional reconoce que la situación de los residuos es un problema global que requiere una atención urgente. La contaminación por colorantes es uno de estos problemas y por ello que sea importante la toma de conciencia y la búsqueda de alternativas para su solución.

El vertimiento de las aguas residuales coloreadas provocan graves consecuencias, además del problema estético el principal problema que representan los colorantes es la absorción y reflexión de la luz solar que penetra en los cuerpos de agua y que interfiere con el crecimiento de bacterias, reduciendo la capacidad de éstas para lograr la biodegradación de los contaminantes o impurezas del agua y afectan la fotosíntesis de las plantas acuáticas. El color en los efluentes puede afectar de varias maneras: los colorantes causan efectos agudos y/o crónicos sobre los organismos expuestos a los mismos, dependiendo del tiempo de exposición y la concentración del colorante.

Debido a que es importante la eliminación de estos contaminantes de los efluentes, los métodos utilizados para este proceso no deben formar productos secundarios tóxicos, no deben ser costosos, deben ser fáciles de manipular y además no provocar alteraciones ecológicas

En la búsqueda de soluciones tecnológicas que propicien la descontaminación de dichos residuales, la biosorción ha sido especialmente considerada por resultar una vía ecológicamente sostenible y económicamente sustentable. El material biosorbente que se emplee define la factibilidad del proyecto que se proponga. En tal sentido otros autores han utilizado el bagazo de caña de azúcar, el cual aunque es renovable es un residuo con múltiples aplicaciones. Por tal motivo se necesita ampliar la gama de materiales biosorbentes como una alternativa que permite el uso racional de los residuos disponibles.

Problema de Investigación Científico:

Presencia de color en las aguas residuales textiles, de la Textilera Desembarco del Granma.

Introducción.

Hipótesis:

Si el aserrín de madera de pino natural o mezclado con el bagazo de caña de azúcar puede emplearse como biosorbente para reducir o eliminar el color en disoluciones coloreadas, se podrá proponer un sistema de tratamiento de biosorción para aguas residuales contaminadas con sustancias colorantes.

Objetivo General:

Evaluar la factibilidad del empleo del aserrín de madera de pino natural o mezclado con el bagazo de caña de azúcar como biosorbente en la remoción de color.

Objetivos:

- ✓ Caracterizar el aserrín de madera de *Pinus caribaea*.
- ✓ Evaluar la utilización de aserrín de madera de *Pinus caribaea* natural y mezclas de este con bagazo en la remoción de color en aguas simuladas a escala de laboratorio.
- ✓ Realizar corridas experimentales en discontinuo para comprobar la remoción de color en aguas residuales reales
- ✓ Definir las etapas y operaciones de una sección de una planta de tratamiento de aguas residuales, donde la biosorción sea la etapa fundamental en la remoción de color
- ✓ Valorar el impacto económico ambiental de la propuesta.

Tareas a desarrollar:

- ✓ Revisar la literatura sobre impactos en aguas residuales de colorantes y demás sustancias químicas procedentes de descargues textiles así como vías para mejorar su calidad.
- ✓ Caracterizar al aserrín de pino mediante ensayos de laboratorio.
- ✓ Determinar los por cientos de remoción, los parámetros termodinámicos y cinéticos del proceso de remoción de color para aguas simuladas usando como biosorbente aserrín de pino mediante estudios en discontinuos a nivel de laboratorio.
- ✓ Determinar los por cientos de remoción, y parámetros del proceso de remoción de color para aguas simuladas usando como biosorbente mezclas de aserrín de pino y bagazo.
- ✓ Aplicar el tratamiento de biosorción con las mejores condiciones obtenidas a muestras de aguas residuales para medir la efectividad a nivel de laboratorio.

Introducción.

- ✓ Elaborar un esquema lógico de tratamiento que contemple las etapas y operaciones de una sección de una planta de tratamiento de aguas residuales, donde la biosorción sea la etapa fundamental en la remoción de color
- ✓ Exponer una valoración de los criterios económicos y ambientales que avalan la importancia del estudio realizado.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

1.1. Contaminación del Medio Ambiente.

El Medio Ambiente es un sistema complejo y dinámico de interrelaciones ecológicas, socioeconómicas y culturales que evoluciona a través del proceso histórico de la sociedad, abarcando la naturaleza, la sociedad, lo creado por la propia humanidad y como elemento de gran importancia las relaciones sociales y culturales, de aquí la importancia de su cuidado y preservación para hacer posible la vida en el planeta.

A lo largo de la historia de la humanidad se ha ido deteriorando como resultado a las indisciplinas sociales, ya que por muchos años nunca se pensó en los efectos secundarios de las grandes industrias, emisiones de gases a la atmósfera, vertimiento de residuos tanto sólidos como líquidos a medios naturales.

Con la aparición en los 90 del concepto de Desarrollo Sostenible y de la Agenda 21 en la Cumbre de la Tierra en 1992, Río de Janeiro, Brasil, se dirigen los trabajos en un enfoque integral de globalización, introduciéndose un sistema de conceptos, como el de actuación responsable, las auditorias, las evaluaciones ambientales y la gestión integrada de estos problemas. (León, 1999)

Cuba desarrolla importantes acciones para lograr una sociedad con una cultura general integral acorde con sus principios y realidades, lo que presupone trabajar de manera dirigida y sobre bases científico-técnicas, en temas medulares que permitan una adecuada comprensión de los problemas que se presentan en la cotidianidad relacionados con calidad y medio ambiente de los procesos de producción y servicios. (Reyes, 2007)

De esta manera, un elemento que marca la diferencia y caracteriza la visión de Cuba sobre este tema, apunta a las ventajas que el socialismo como sistema ofrece para el desarrollo de una política ambiental efectiva, en particular por el papel decisivo del estado y las ventajas de una economía planificada, con capacidad para proyectar de forma armónica y a largo plazo, el uso de los recursos. Su concepción ético-social, el entorno social solidario que engendra y la integralidad conceptual en el funcionamiento del gobierno, así como las ventajas que ofrece la propiedad social, repercuten de modo positivo en la protección del medio ambiente y en el uso sostenible de los recursos naturales. No obstante, al igual que en otros países, existen determinados problemas ambientales, que se han identificado como: contaminación, degradación de los suelos, deforestación, pérdida de la diversidad biológica y carencia de agua. (CIGEA, 2007)

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

El medio ambiente puede ser contaminado de diversas maneras, de las cuales todas son dañinas en mayor o menor grado. Los tipos de contaminación que existen son:

- Contaminación atmosférica.
- Contaminación de las aguas.
- Contaminación del suelo.

((<http://www.monografías.com/trabajos34/contaminaciónambiental/contaminación-ambiental.html>)

1.1.1. Contaminación de las aguas y la Industria Química.

El agua es la sustancia que está más ampliamente distribuida sobre la superficie terrestre y en los tejidos de los organismos vivos. En los ríos, océanos, nubes y casquetes polares, así como en nuestros líquidos corporales, es el medio en el que se cumple la mayoría de las transformaciones fisicoquímicas, en particular las de importancia biológica.

La relativa escasez de este fluido vital (agua), y su importancia determinante para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, motivan que el agua sea uno de los principales objetivos de protección ambiental de la sociedad moderna. A modo de ejemplo, cabe destacar que en el mundo existen más de 1.200 millones de seres humanos que no tienen acceso directo a agua potable, y más del 20% de los peces de agua dulce están en peligro de extinción. En la actualidad, en todos los países las regulaciones de control ambiental establecen límites a las descargas de residuos líquidos que son vertidos en los cuerpos de agua; además, fijan estándares de calidad de agua de acuerdo a su potencial de uso. (Zaror, 2000)

La contaminación de ríos y arroyos por contaminantes químicos se ha convertido en uno de los problemas ambientales más graves del siglo XX. La contaminación se divide en dos grandes grupos: la contaminación puntual y la no puntual. La primera procede de fuentes identificables, como fábricas, refinerías o desagües. La no puntual es aquella cuyo origen no puede identificarse con precisión, como las escorrentías de la agricultura o la minería, las filtraciones de fosas sépticas o depuradoras. Cada año mueren unos 10 millones de personas en el mundo por beber agua contaminada. (<http://www.monografías.com>)

El 72% de las aguas superficiales del mundo están contaminadas por vertidos urbanos e industriales. La mitad de las enfermedades infecciosas dependen del agua para su transmisión y lo hacen en aguas insalubres. Esta agua a veces son las únicas disponibles para el consumo. El agua contaminada con agentes infecciosos mata a 25 millones de personas al año.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

El contenido de sustancias extrañas en el agua procede, en mínima parte, de la atmósfera, y en su gran mayoría de la tierra. Las aguas superficiales son las que se contaminan con más facilidad, a causa de su mayor exposición a las fuentes habituales de contaminación. Las aguas subterráneas sufren una filtración que será mayor o menor según la calidad del terreno que atraviesan en su descenso y el grosor de la capa filtrante. Así, el agua será más pura cuando atraviese gruesas capas de tierra fina, arenosa, que cuando se filtra a través de terrenos fisurados o agrietados. Pero el agua subterránea puede también arrastrar sustancias extrañas que encuentra en los terrenos por los que atraviesa, así como microorganismos provenientes de la superficie de la tierra o de pozos negros (Sistema de disposición de excretas que no cumple los requisitos sanitarios para evitar la contaminación de las aguas de los mantos subterráneos) u otro origen.

Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), el agua está contaminada cuando su composición se haya alterada de modo que no reúna las condiciones necesarias para ser utilizada beneficiosamente en el consumo del humano y de los animales.

El origen de la contaminación de las aguas, puede resumirse en estos dos grandes grupos según:(Alami, 2010)

- ✓ por aguas provenientes de fenómenos naturales (erosión, etc.).
- ✓ por aguas residuales de las actividades humanas (albañales domésticos, residuales industriales, actividades agrícolas, etc.).

Normalmente las fuentes de contaminación natural son muy dispersas y no provocan altas concentraciones de polución, excepto en algunos lugares muy concretos. La contaminación de origen humano, en cambio, se concentra en zonas concretas y, para la mayor parte de los contaminantes, es mucho más peligrosa que la natural.

El uso doméstico e industrial de agua deriva en la generación de residuos líquidos, cuya composición y volumen dependen del tipo de uso, de la naturaleza de los procesos, del nivel tecnológico, de los materiales utilizados y de la gestión de producción. Los residuos líquidos derivados de la actividad doméstica, están constituidos principalmente por las aguas generadas por las actividades de lavado (ropa, utensilios, alimentos, personas) y las aguas sanitarias (fecales). Los residuos líquidos de origen industrial provienen fundamentalmente de aguas de enfriamiento, aguas de procesos, aguas de lavado de equipos y aguas servidas. Constituyen un enorme volumen y los efluentes de una planta de tamaño mediano pueden equivaler en volumen a los generados por una gran ciudad.(Cotton, 1995)

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

Según el tipo de industria y de los procesos que en ellas se realizan son las diferentes características de los residuales generados y con ello viene dado el grado de contaminación a la naturaleza. Normalmente en los países desarrollados muchas industrias poseen eficaces sistemas de tratamientos de las aguas, sobre todo las que producen contaminantes más peligrosos, como son los metales tóxicos.

En la tabla 1.1 se muestran los principales productos contaminantes de las aguas en los diferentes tipos de industrias.

Tabla 1.1. Principales sustancias contaminantes en los diferentes sectores

Sector industrial	Principales sustancias contaminantes
Construcción	Sólidos en suspensión, metales, pH
Minería	Sólidos en suspensión, metales pesados, materia orgánica, pH, cianuros.
Energía	Calor, hidrocarburos y productos químicos.
Textil y piel	Cromo, taninos, tensoactivos, sulfuros, colorantes, grasa, disolventes orgánicos, ácido acético y fórmico, sólidos en suspensión
Automoción	Aceites lubricantes, pinturas y aguas residuales.
Navales	Petróleo, productos químicos, disolventes y pigmentos.
Siderurgia	Cascarillas, aceites, metales disueltos, emulsiones, sosa y ácidos.
Química inorgánica	Hg, P, F, Mn, Mo, Pb, Ag, Se, Zn, NH ₃ , HSO ₄ , Cianuros, nitritos, fluoruros, etc.
Química orgánica	Organohalogenados, organosilícicos, Compuestos cancerígenos y otros que afectan el balance de O ₂
Fertilizantes	Nitratos y fosfatos.
Pastas y Papel	Sólidos en suspensión y otros que afectan el balance de O ₂ .
Plaguicidas	Organohalogenados, organofosforados, compuestos cancerígenos, biocidas, etc.
Fibras químicas	Aceites minerales y otros que afectan el balance de O ₂ .
Pinturas, Barnices y tintas	Compuestos organoestámicos, compuestos de Zn, Cr, Se, Mo, Ti, Sn, Ba, Co, etc.

Numerosas industrias generan efluentes que descargan en el ambiente cantidades sustanciales de una gran variedad de contaminantes inorgánicos y orgánicos, tornándose en un serio problema ambiental debido a su potencial toxicidad para los organismos, y en muchos casos, para los seres humanos. En particular, las industrias textiles distribuidas en todo el

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

mundo, generan grandes volúmenes de agua de descarte durante sus operaciones, que contienen colorantes disueltos y otros productos como agentes dispersantes, sales, emulsificantes y metales pesados. Los colorantes son generalmente tóxicos o carcinogénicos, o derivan de carcinógenos conocidos, y su descarga en los cursos de agua como desechos industriales resulta en condiciones anóxicas para los ecosistemas acuáticos, debido a la reducción de la concentración de oxígeno disuelto.(Kahaled, 2009)

La Directiva 91/271/CEE de la Unión Europea sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas, aprobada en mayo de 1991, urge a los estados miembros a tomar las medidas para lograr que todas las aguas residuales sean adecuadamente recogidas y sometidas a tratamientos secundarios o equivalentes antes de ser vertidas. Marca diversos objetivos, dependiendo del tamaño de las poblaciones, que se deben cumplir entre el año 1995 y el 2005. También exigía a los estados miembros la identificación de las llamadas áreas sensibles las sujetas a eutrofización y las que se van a dedicar al consumo humano y no cumplen las condiciones de las anteriores directivas europeas antes de 1993.

1.1.2 Contaminación de las aguas residuales con efluentes textiles.

La contaminación que ha existido en los últimos años en el agua debido a productos químicos como fertilizantes, pesticidas y colorantes entre otros representan una problemática de la industria textil, alimenticia, de cosméticos, etc., ya que estas generan grandes volúmenes de aguas residuales con altas concentraciones de colorantes. Estos colorantes, disueltos en las aguas residuales, cuyo efecto no sólo se refleja en el cuerpo receptor final, al interferir en los procesos de la vida acuática impidiendo el libre paso de la luz, sino que, afecta también de manera perjudicial la operación de plantas de tratamiento de aguas residuales de tipo municipal.

La industria textil convencional utiliza grandes cantidades de agua y productos químicos en sus procesos. Esto supone un grave problema ambiental, debido a que pocas son las industrias que se encargan de depurar sus aguas residuales, vertiéndose directamente sin tratar a los ríos y convirtiéndolos en macabras sopas químicas, llenas de tintes sintéticos y otros tóxicos. Los tintes y colorantes sintéticos están diseñados para resistir la acción de la luz, agua y productos químicos en los tejidos, sin embargo, estas propiedades son precisamente las que impiden su biodegradación en el medio ambiente (Prasetyo, 1992). Estos tóxicos pueden ser disruptores hormonales, afectar al sistema reproductor e incluso ser carcinogénicos. Se incorporan a la cadena alimentaria y se filtran a los suelos y acuíferos subterráneos. Según las últimas

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

investigaciones, hasta un 70% de los ríos, lagos y embalses de China están contaminados. (<http://opcionbio.es/blog/es/2012/04/24/contaminación-de-la-industria-textil-%C2%BFhay-soluciones/>)

La Industria Textil se encuentra dentro del grupo industrial que mayor contaminación provoca al Medio Ambiente debido al gran consumo de agua y de productos químicos, los cuales son usados en dependencia del tipo de fibras a teñir, de aquí que sus residuales sean altamente contaminantes. Anualmente en el mundo son producidos más de 10000 tipos de colorantes y pigmentos y usados en las plantas de teñido e impresión.

Los efluentes de un proceso textil generalmente presentan altas temperaturas y pH, además de alta concentración de materia orgánica, materia no-biodegradable, sustancias tóxicas como los surfactantes, detergentes, jabones y alcalinidad., cuando estos efluentes se descargan sin el debido tratamiento, se pueden observar diferencias en la coloración original del cuerpo de agua y la formación de espumas en su superficie; esto se origina por los tintes y tensoactivos, respectivamente. La espuma reduce la proporción de oxígeno transmitido a través de la superficie del medio acuático y limita la capacidad autodepuradora de la corriente (Karunanandaa, 1992). La descarga de compuestos fácilmente biodegradables en grandes cantidades ocasiona la disminución del oxígeno disuelto en el agua y extingue la vida acuática directamente, o hace a los peces más susceptibles a los efectos tóxicos de otras sustancias. Algunos compuestos afectan indirectamente a los peces y en mayor grado a los invertebrados acuáticos que componen su cadena alimenticia. Los tóxicos y metales pesados en pequeñas concentraciones pueden acumularse en los tejidos de estos animales o incrementar el nivel tóxico del agua en los ríos, sus efectos se ven a largo plazo, pero igualmente son dañinos.(Vilchez, 2005)

Es importante mencionar que muchas de las grandes industrias generadoras de estas descargas, en la mayoría de los casos no les proporcionan tratamiento alguno debido a los altos costos en el uso de productos químicos en los sistemas de depuración convencionales, o por que no cuentan con sistemas adecuados de reducción de colorantes. Actualmente se han desarrollado procesos, como la biosorción, que se ha planteado como una alternativa económica.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

1.2. Los Colorantes.

El uso de los colorantes, nació de la necesidad humana de adornar y embellecer la multitud de objetos de uso corriente que lo rodea.

Para que un compuesto coloreado sea aplicado como colorante, requiere que tenga una adecuada estabilidad a la luz, así como la acción oxidante del cloro que contiene el agua de las ciudades. Por otra parte, el compuesto, en caso de ser soluble en agua debe tener afinidad por la fibra que se ha de teñir, a fin de que pueda ser fijado por la fibra de un baño acuoso caliente; en este caso se dice que es un colorante sustantivo. Si el compuesto coloreado es insoluble en agua requiere un proceso especial para que pueda ser aplicado a la fibra.(Fieser, 1968)

1.2.1 Clasificación de los colorantes.

Los colorantes se clasifican de acuerdo a su origen, propiedades químicas y sus aplicaciones. Según su origen los colorantes pueden ser naturales como la hematoxilina, el carmín y la orceína, o sintéticos o artificiales como lo son el azul de metileno, la safranina, el azul de anilina, el naranja G, etc.

De acuerdo a sus propiedades químicas pueden clasificarse en:

- Colorantes ácidos: como por ejemplo la eosina, colorante cargado en forma negativa, se une a componentes celulares cargados positivamente. Estos componentes cargados positivamente se denominan acidófilos, porque tienen afinidad por los colorantes ácidos. Por ejemplo, estos colorantes se unen a grupos amino de las proteínas. Estas proteínas pueden pertenecer al citoesqueleto de la célula o hallarse en la matriz extracelular. Debido al elevado contenido de proteínas del citoplasma la eosina es un excelente colorante citoplasmático. La eosina se une también a las membranas plasmáticas, sin embargo, se desconoce la naturaleza química de esta unión. Las células que presentan un gran desarrollo de membranas (muchas mitocondrias, mucho retículo endoplasmático liso, etc.) son sumamente acidófilas, o sea, se tiñen intensamente con la eosina.
- Colorantes básicos: como por ejemplo el azul de metileno, colorante cargado positivamente, se une a componentes celulares cargados negativamente. Estos componentes cargados negativamente se denominan basófilos, porque tienen afinidad por los colorantes básicos. Por ejemplo, estos colorantes se unen al núcleo y ciertas regiones del citoplasma. Como caso particular, la hematoxilina no tiene carga, para teñir un tejido se la une a un

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

mordiente que junto a la hematoxilina forman una laca. La laca es básica y por lo tanto se une a cargas negativas de la célula o matriz extracelular.

- Colorantes neutros: son colorantes en los que la porción ácida y la básica colorean. Tiñen las partes básicas de una célula de un color y las partes ácidas de otro. Tiñen el núcleo de un color y el citoplasma de otro. Ejemplo el eosinato de azul de metileno.
- Colorantes indiferentes: tiñen aquellas estructuras o sustancias que los disuelven más fácilmente que el líquido en que están preparados. Un ejemplo es el colorante sudan, un colorante de lípidos.

De acuerdo a sus aplicaciones se clasifican en la tabla 1.2. Las aplicaciones de los colorantes son infinitas, desde el vidrio y el esmalte de la cerámica, hasta las artes gráficas, los textiles, las pinturas, los plásticos y los alimentos. En este caso se abordan los colorantes usados para textiles, los cuales se clasifican de acuerdo al tipo de fibra que tiñen y al tipo de proceso aplicado para ello. (Vargas, 2009)

Tabla 1.2. Clasificación de los colorantes según su aplicación

Clase	Características	Tejidos sobre los que pueden ser aplicados
Ácidos	Compuestos solubles en agua. En su mayoría contienen grupos ácido sulfónico (-SO ₃ H) o carboxilo (-COOH)	Lana y seda
Básicos	Compuestos solubles en agua que forman especies catiónicas que contienen grupos aminos (-NH ₃)	Acrílicos, nylon y poliéster
Directos	Compuestos solubles en agua. Se aplican en presencia de electrolitos adicionales (cloruro sódico o sulfato sódico). Se une a la tela por interacciones tales como fuerzas de Van Der Waals y puentes de hidrogeno	Algodón y lino
Dispersos	Compuestos no iónicos insolubles en agua. Para teñir se aplican finamente dispersos en agua sobre fibras hidrofóbicas en las que quedan atrapados.	Nylon , poliéster y acrílicos
Reactivos	Reaccionan en presencia de electrolitos, con la fibra formando enlaces covalentes. Poseen en su estructura grupos derivados de latriclorotriazina	Algodón, nylon y lana
Colorantes	Compuesto que en su forma oxidada son	Algodón, lana

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

de tina	insolubles en agua y que al ser reducidos dan origen a una especie soluble que es usada para teñir .	
Mordientes	Compuestos que forman complejos con metales. La tela es tratada con una solución básica de metales que se precipitan sobre la tela como un hidróxido metálico.	Lana y seda

Tomado de Fundación Polar, 2008 < on line> citado por (Velandia, 2008)

1.3. Métodos Tradicionales de Tratamientos para aguas residuales contaminadas con colorantes.

Variados son los métodos aplicados para el tratamiento a residuales contaminados con desechos de la industria textil, muchos con muy buenos resultados y otros con no tan buenos, lo cierto es que a diario se estudian nuevas alternativas para preservar el cuidado del medio ambiente, los métodos tradicionales para dicho tratamiento son los expuestos en la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Métodos tradicionales de tratamientos para aguas contaminadas con colorantes (Raghavaracha, 1997)

Tipo de método	Método	Ventajas	Desventajas
Físico	Adsorción	Remueve eficientemente varios colorantes. Como alternativa se han usado sílica y recientemente materiales celulósicos obtenidos de residuos agroindustriales (maíz, cebada, etc.) Además de su eficiencia, es una tecnología económicamente atractiva.	Algunos de los materiales utilizados, como el carbón activado, tienen costos elevados y pérdidas en la regeneración. Por otro lado, los materiales menos costosos como las virutas de madera, requieren más tiempo de contacto y generan residuos.
	Filtración por membrana	Se utiliza para remover colorantes que se encuentran en bajas concentraciones. En un sistema resistente a temperatura y ataques	Tienen altos costos. Es muy ineficiente para la remoción de sólidos disueltos, por lo que son necesarios los tratamientos adicionales.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

	Intercambio Iónico	microbianos. Es un método muy efectivo para remover colorantes catiónicos. No hay mucha pérdida en la regeneración de los solventes.	Los solventes orgánicos utilizados son caros. Sólo tienen aplicaciones específicas.
Químico	Electroquímico	Es un proceso relativamente nuevo que tiene una eficiente remoción de colorantes y la degradación de contaminantes sin generar subproductos tóxicos o lodos.	Los costos de la electricidad son altos.
	Oxidación	Es uno de los métodos más usados. Involucra el rompimiento de los anillos aromáticos. La oxidación con el reactivo de Fenton es un método adecuado para el tratamiento de aguas residuales resistentes a un tratamiento biológico, sin embargo se forman lodos. El hipoclorito de sodio al igual que el ozono, son efectivos en el rompimiento de enlaces azo.	El reactivo de Fenton tiene como desventaja la formación de lodos. El uso de hipoclorito de sodio genera subproductos tóxicos y cancerígenos. El ozono no resulta tan eficiente en la oxidación de colorantes dispersos.
	Fotoquímico	Se puede utilizar para degradar moléculas orgánicas en CO ₂ y agua, ya sea lote o en sistema continuo con cortos tiempos de exposición. No generan lodos.	Se pueden generar subproductos como halogenuros, metales, ácidos y aldehídos. Sólo es efectivo si las concentraciones de colorantes son bajas. Presenta altos costos.
	Coagulación	Presenta buena eficiencia de	Se obtienen resultados pobres

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

		remoción, se realiza en un período de tiempo corto y tiene bajos costos de inversión.	con colorantes ácidos y hay un alto costo de disposición por los volúmenes de lodos que resultan de este método.
Biológico	Bio absorción	La biomasa microbiana puede usarse para absorber y remover colorantes de las aguas residuales. El proceso de absorción puede ir acompañado de una biodegradación.	Este método aún está en etapa de investigación, por lo que no se ha utilizado para tratar grandes volúmenes de agua. También ocasiona problemas en cuanto a la disposición de la biomasa con los colorantes adsorbidos. Es necesaria más información fisiológica y genética. Se requiere una larga fase de aclimatación y se representa resistencia a compuestos recalcitrantes.
	Biodegradación	Se han aislado microorganismos con la capacidad de degradar diversos colorantes. Se han utilizado consorcios mixtos en sistemas combinados aeróbicos/anaeróbicos para remover colorantes, así como sistemas con células inmovilizadas.	
	Enzimático	Las preparaciones de lacasas y peroxidadas ofrecen un método para la decoloración de aguas residuales. Requiere tiempos cortos de contacto. Es muy eficiente para ciertos compuestos.	
			Es necesario un mayor análisis sobre los subproductos que se generan, estudios de escalamiento y una evaluación económica para poder aplicarse comercialmente. El aislamiento y purificación de las enzimas es difícil. Las enzimas se ven afectadas por un gran número de variables

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

			presentes en el agua residual.
--	--	--	--------------------------------

1.4. Impacto Ambiental.

Durante los procesos de teñido, se desechan ciertas cantidades de colorantes que son vertidos en las aguas residuales. La presencia de colorantes en el agua no solamente es un problema estético, sino que además interfieren en el proceso fotosintético que realizan algunos organismos, estas aguas presentan alta demanda de oxígeno químico y biológico, debido a sus elevadas concentraciones de colorantes, como por la presencia de productos químicos y tóxicos y por la presencia de sólidos suspendidos presentes (Ramakrishna, 1997, Nigam, 2000, Nigam, 1996). Dentro de los criterios que se deben valorar para dar significación a los impactos se encuentran la importancia ecológica, dentro de ella los efectos en las plantas y hábitat de los animales, las especies raras en peligro de extinción, el poder de recuperación sensibilidad, biodiversidad y capacidad de carga del ecosistema, la importancia social, las normas ambientales, el significado estadístico y la viabilidad de las poblaciones de especies locales.

El principal problema que representan los colorantes es la absorción y reflexión de la luz solar que penetra en los cuerpos de agua y que interfiere con el crecimiento de bacterias, reduciendo la capacidad de éstas para lograr la biodegradación de los contaminantes o impurezas del agua y afectan la fotosíntesis de las plantas acuáticas. El color en los efluentes puede afectar de varias maneras: los colorantes causan efectos agudos y/o crónicos sobre los organismos expuestos a los mismos, dependiendo del tiempo de exposición y la concentración del colorante.

La biodegradación de colorantes se lleva a cabo mediante distintos procesos. Se pueden utilizar cultivos mixtos que contengan dos grupos generales de especies, el primero conformado por organismos que no participan en la degradación del colorante, pero que estabilizan el consorcio microbiano, y un segundo grupo que incluya a las especies involucradas en el rompimiento del grupo funcional de la molécula y la transformación de los productos metabólicos resultantes. Otra manera de llevar a cabo la biodegradación es mediante microorganismos aislados que son capaces de degradar los colorantes. Por último, para llevar a cabo la biodegradación se puede emplear la remediación enzimática.(Kandelbauer, 2005)

Los colorantes comerciales básicos, como el trifenilmetano, fenacina y tiacina causan menor deterioro ambiental por su mayor foto degradación o pérdida del color en solución que los tintes básicos modernos o "modificados" como el Azo, antraquinonoides y otros, que contrariamente

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

pierden más fácilmente el color sobre la fibra que en solución. La fotodegradación óptima de tintes comerciales calculada por (Pearce, 2003) fue de 40% frente a la luz artificial por aproximadamente 200 horas. (Allen, 2005)

Para que la decoloración tenga éxito, los colorantes deben degradarse en productos solubles en agua y/o sin color. Esto significa, en la mayoría de los casos, que el cromóforo de una molécula de tinte debe degradarse en productos que, en la mayoría de los casos, son similares a las sustancias intermedias de los tintes a partir de los cuales se logró la síntesis del colorante. Algunas de éstas son sustancias peligrosas y los residuos del decolorado que las contienen se descargan en la corriente del efluente. Naturalmente el tipo específico de procedimiento de decolorado y la selección del colorante original determinará los productos que terminarán en el efluente. (Ojeda, 2011)

1.5. Colorante Azul de Metileno.

El azul de metileno se denomina técnicamente como cloruro de metiltionina de forma molecular $C_{16} H_{18} Cl N_3 S$ y masa molecular 319,85 g/mol. Esta sustancia tiene forma de cristales o polvo cristalino y presenta un color verde oscuro, con brillo bronceado. Es inodoro y estable al aire. Sus soluciones en agua o en alcohol son de color azul profundo. Es fácilmente soluble en el agua y en cloroformo; también es moderadamente soluble en alcohol. Su punto de fusión es de 100-110 °C.

El azul de metileno (un colorante catiónico), reacciona con aniones orgánicos para formar sales hidrofóbicas de color azul intenso, que pueden extraerse fácilmente con un solvente orgánico y cuantificarse posteriormente por fotometría.

Sus propiedades están vistas a continuación:

- 1.- En Medicina, el azul de metileno se usa como pintura para teñir ciertas partes del cuerpo, antes o durante la cirugía.
- 2.- Su uso principalmente como antiséptico y cicatrizante interno, y muchas veces se usa en las observaciones en el microscopio en las labores en laboratorio.
- 3.- Las soluciones del azul de metileno tanto en agua como en alcohol son de color azul profundo.
- 4.- Estas soluciones pueden combinarse en, agua y cloroformo, también moderadamente en alcohol.
- 5.- Por ser un colorante de contraste se puede teñir cualquier estructura.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

1.6. Colorantes más empleados en la Industria Textil.

En la industria textil existen dos formas de aplicar los colorantes: pintando y tiñendo. En el primer caso se deposita el color sobre la superficie de la prenda o telar, recubriéndolo y ocultando su calidad o su estructura. En el teñido se trata de incorporar el colorante a la masa del material a colorear, conservando en lo posible las cualidades del mismo.

Dentro de los colorantes empleados en la industria textil se encuentran los siguientes:

- ✓ Dispersos: son colorantes que se dispersan muy bien en el medio acuoso, lo cual ayuda a cubrir la totalidad de la fibra y así lograr un teñido muy uniforme. En los textiles es utilizado para el teñido del poliéster.
- ✓ Blancos Ópticos: son compuestos sin color que fluorescen bajo la radiación de la luz ultravioleta, su creación fue para proteger cheques y papel seguridad, posteriormente se aplicó en la industria textil para dar un efecto de blancura en la tela y con ese mismo fin se incorporaron en la industria de productos de limpieza, como son los detergentes y jabones. En la industria textil se usan para el blanqueo óptico de algodón o fibras celulósicas.
- ✓ Cubas: son insolubles en agua y deben ser reducidos a la forma “leuco” durante el proceso de teñido, una vez que ha sido aplicado a la fibra son vueltos a su forma inicial insoluble por medio de agentes oxidantes. Se emplean para tapicería, vestidos, camisas, toallas, sabanas, pañuelos, hilos para bordar y coser. En general para todos los artículos que requieran buena solidez al lavado, luz, frote y cloro, aunque principalmente son utilizados para el teñido y estampado del algodón, tienen excelentes propiedades de resistencia y un rango completo de tonos, son derivados de la antraquinona y del indigoide.
- ✓ Directos: Estos colorantes fueron originalmente diseñados para teñir algodón, se aplican de una forma muy sencilla, algunos colorantes directos tienen usos más amplios que solo teñir el algodón y viscosa, pueden ser usados en papel, piel, lana, seda y nylon, también se pueden usar en el estampado textil.
- ✓ Solventes: Son colorantes completamente insolubles en agua y solubles en medios solventes tales como alcohol, etanol, acetona, aceites, grasas, ceras, parafinas. La resistencia a la luz depende de cada colorante al igual que la resistencia a la temperatura. Sus usos son principalmente en tintas base aceite, lacas, veladoras, velas, cintas de maquinas de escribir.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

- ✓ Al Azufre: Son colorantes que su base principal de fabricación es el azufre, existen varios métodos de aplicación de estos colorantes, tienen muy buena solidez a la luz y al lavado, su principal uso es para teñir algodón.
- ✓ Básicos: Los colorantes básicos, son colorantes que se disuelven en un medio acuoso, son muy brillantes y algunos son fluorescentes, pero tienen muy poca resistencia a la luz. En la industria textil, principalmente se usan en las fibras acrílicas, también tienen aplicación en la industria del papel, así como para fabricar algunos pigmentos y para la industria que procesa la piel.
- ✓ Ácidos: La familia de los colorantes ácidos, se llama así porque en la constitución química del colorante se encuentran moléculas de grupos ácidos. Son colorantes solubles en agua y se aplican generalmente en fibras de lana, seda y nylon. Otros usos importantes son en el teñido de piel, papel y yute.
- ✓ Reactivos: Estos colorantes tienen una buena solidez a la luz y al lavado, principalmente se usan para ser aplicados en algodón o en fibras celulósicas, pueden ser aplicados en lana, nylon y en algunos casos en piel.

1.7. Proceso de Biosorción.

Un método novedoso para la remoción del color de efluentes es la adsorción de las sustancias coloridas en varios materiales como: aserrín, carbón activado, arcillas, suelos, composta, lodos activados, comunidades vegetales, polímeros sintéticos o sales inorgánicas coagulantes. La tecnología de la biosorción más allá de ser viable por su bajo costo presenta además la ventaja de ser ecoamigable en procesos donde otras tecnologías fallan.

Un proceso de biosorción involucra una fase sólida (biosorbente) y una fase líquida (solvente, que es normalmente el agua) que contiene las especies disueltas que van a ser biosorbidas (sorbato, esto es, color). Debido a la gran afinidad del sorbente por las especies del sorbato, éste último es atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos. Este proceso continúa hasta que se establece un equilibrio entre el sorbato disuelto y el sorbato enlazado al sólido.

De manera general la adsorción puede verse de dos formas, física y química.

La adsorción física o adsorción de "van der Waals", es un fenómeno fácilmente reversible, es el resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre moléculas de un sólido y de la sustancia adsorbida.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

La adsorción química o adsorción activada, es el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida. La resistencia de la unión química puede variar considerablemente, pudiendo los compuestos químicos identificables en el sentido usual no tomar realmente forma, pero la fuerza adhesiva es generalmente mucho grande que la encontrada en la adsorción física. Usualmente, es grande el calor liberado durante la adsorción química, el orden del calor de una reacción química. El proceso es frecuentemente irreversible; en la adsorción la sustancia original sufre a menudo un cambio químico. (Treybal, 2002)

Algunas de las principales aplicaciones de la adsorción son las que se enumeran a continuación:

- Purificación de aguas residuales
- Descontaminación de gases
- Eliminación de olores, sabores o colores no deseados por ejemplo en aceites
- Deshumidificación de gasolinás
- Secado de aire
- Ciencia forense (revelado de huellas dactilares)

La biosorción presenta como ventajas fundamentales:

- ✓ Es independiente del crecimiento, no necesita de nutrientes, ni productos metabólicos, no hay inconveniente con la toxicidad.
- ✓ Rápida y eficiente en la remoción de metales y compuestos orgánicos.
- ✓ Los metales y otras sustancias pueden ser recuperados.
- ✓ Menor costo.

Entre los factores que afectan a la adsorción tenemos:

- Temperatura: Este efecto depende del calor de adsorción (cambio de entalpía). Generalmente, cuando la adsorción es de tipo físico, el calor de adsorción es negativo, lo que indica que la reacción es exotérmica y se favorece a bajas temperaturas. Por el contrario, cuando la adsorción es de tipo químico, el calor de adsorción es positivo, indicando que el proceso es endotérmico y se ve favorecido por altas temperaturas.
- Dependencia del pH: La biosorción de cationes suele estar favorecida para valores de pH superiores a 4,5, mientras la adsorción de aniones prefiere un valor bajo de pH entre 1,5 y 4.
- Presencia de otros iones: Para analizar el comportamiento de la biosorción ante la presencia de otros iones se deben tener en cuenta la cantidad de sitios en el material biosorbente, la

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

accesibilidad del sitio, la disponibilidad del sitio y la fuerza de unión entre el sitio y la especie química.

- Solubilidad: Menor solubilidad, mejor adsorción.
- Estructura molecular: Más ramificada, mejor adsorción.
- Peso molecular: Grandes moléculas, mejor adsorción.
- Problemas de difusión interna, pueden alterar la norma.
- Polaridad: Menor polaridad, mejor adsorción.
- Grado de saturación: Insaturados, mejor adsorción.

Tipo de procesos y equipos.

Como ya se ha indicado anteriormente, la biosorción es un proceso de contacto sólido-líquido que conlleva ciclos de sorción y desorción del colorante. Su configuración tecnológica es muy similar a la usada en el intercambio iónico o en las distintas aplicaciones del carbón activo. Así, la solución que contiene el colorante entra en contacto con la fase sólida mediante un sistema de flujo discontinuo, semicontinuo, o continuo. El contacto apropiado entre la solución y la fase sólida puede ser llevado a cabo en contactores de tanque agitado o de flujo continuo, que tienen en común algunas características pero difieren entre sí.

Contacto discontinuo (tanque agitado). El biosorbente granulado o, en este caso de forma más eficiente, pulverizado, se pone en contacto con la disolución que contiene el colorante, manteniéndolo en suspensión mediante agitación en un grado tal que asegure la homogeneidad y la buena transferencia de materia entre las fases sólida y líquida. Para conseguir una buena mezcla en la suspensión se ha de cuidar la geometría del tanque y la agitación, con el objeto de evitar la aparición de efectos indeseables que puedan dañar las partículas sólidas del biosorbente. Por ejemplo, el tanque puede ser equipado con baffles para prevenir la formación de vórtices en la suspensión. El tiempo necesario para retirar los grupos cromóforos deseados dependerá de la cinética del proceso de retención del color.

1.8. Biosorbentes.

Los adsorbentes sólidos se utilizan generalmente en forma granular, los sólidos deben poseer ciertas propiedades de ingeniería que dependen de la aplicación a la que serán sometidos. La naturaleza química del sólido tiene mucho que ver con sus características de adsorción, pero una sola identidad es insuficiente para caracterizar su utilidad.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

En la adsorción gaseosa, la superficie significativa no es en la superficie bruta de las partículas granulares que se utiliza ordinariamente, sino la superficie mucho mayor de los poros internos de las partículas.(Treybal, 2002)

Los adsorbentes más utilizados son: Gel de sílice, Alúmina, Resinas Orgánicas y Carbón activo (granular y polvo). Existen adsorbentes específicos para determinados compuestos, pero el más utilizado es el carbón activo, aunque recientemente se están desarrollando diversos materiales sólidos que mejoran, en ciertas aplicaciones, las propiedades del carbón activo.

En la búsqueda de biosorbentes de carácter renovable y bajo costo, se han utilizando diferentes de origen biológico, estando formados por una biomasa de origen microbiano formada principalmente por algas, bacterias, hongos y levaduras. Éstos se obtienen a partir de los residuos de las industrias de fermentación, medicina, farmacia y productos derivados de algas. Los biosorbentes de origen vegetal están formados por residuos de origen agrícola y forestal, entre ellos destacan cortezas de árboles, restos de vegetales, cereales y frutos. Como parte del resultado de esta búsqueda económica, además se han encontrado biosorbentes como materiales de arcilla (bentonite, kaolinite), basuras agrícolas (la médula del bagazo, el zuro de maíz, la cáscara de arroz, la cáscara del coco), productos desechados industriales (el carbono desechado, el lodo de hidróxido de metales) y otros (el almidón, algodón).(Crini, 2005)

La utilización de bagazo de caña de azúcar, para la remoción de contaminantes ha sido evaluada, mostrando resultados satisfactorios.

1.9. Residuos Forestales.

Los residuos forestales son aquellos que se producen como consecuencia de actividades forestales principalmente destinadas al aprovechamiento de la madera y a prevenir plagas o incendios. Los residuos forestales, pueden proceder por una parte del mantenimiento y mejora de las montañas y masas forestales, cuando se hacen podas, limpiezas, etc. y, por otra, de los residuos resultantes de cortar los troncos de los árboles para hacer productos de madera. Estos trabajos generan unos residuos que es necesario retirar del bosque puesto que constituyen un riesgo muy importante en la propagación de plagas y de incendios forestales. También se incluyen los residuos generados por las industrias forestales. (Alvares, 1999)

Clasificación de los residuos forestales. (Vignote, 1996)

- ✓ Residuos procedentes de la poda de árboles.
- ✓ Residuos procedentes de las industrias forestales.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

- ✓ Residuos generados directamente en las explotaciones forestales, denominados residuos forestales.
- ✓ Residuos generados en aserraderos e industrias de tableros (primera transformación).
- ✓ Residuos generados en industrias de segunda transformación como la industria del mueble, carpinterías, papelerías, etc.
- ✓ Residuos de la limpieza de montes.

Generación

La generación se produce en masas forestales de forma natural (bosques) o en lugares donde se trabaja con la madera (aserraderos). Aunque el follaje que queda en el suelo del bosque aporta ciertos beneficios como reciclaje de nutrientes y protección del suelo contra la erosión, su acumulación excesiva en los bosques puede suscitar problemas como el mayor riesgo de enfermedades e incendios forestales. El aserrín acumulado en el bosque o en los aserraderos constituye un depósito y un foco para la propagación de hongos. (<http://www.buenastareas.com/ensayos/Residuos-Forestales/3100973.html>)

Durante el proceso de elaboración de la madera se genera una cantidad de residuos superior al 30%. Entre estos, de aserrín: 5-8% y de corteza: 10-14%.

El aserrín de pino está conformado por: lignina 27,5%, celulosa 37,7%, hemicelulosa 11.6% y extractables 10.8%. La celulosa es el componente principal de la pared de la célula vegetal. La molécula es una larga y recta cadena formada por varios miles de unidades de Glucosa enlazadas extremo con extremo. Las hemicelulosas están formadas por un grupo muy diverso de polímeros de bajo peso molecular, principalmente Xilosas y Manosas. La lignina es un polímero aromático formado en las plantas por un proceso de polimerización de precursores monoméricos del alcohol cinamílico.

El aserrín tiene poco valor comercial y tradicionalmente ha constituido un problema en lo que se refiere a su disposición final desde un enfoque ambientalista, sin embargo representa una abundante y fácilmente obtenible fuente de biomasa renovable.(Pergassere, 2003)

Otro material con el cual se trabaja en el presente trabajo como biosorbente es el bagazo de caña de azúcar, el cual es un residuo del proceso industrial de obtención de azúcar crudo.

A continuación se muestran las caracterizaciones del bagazo de caña de azúcar.(Alomá, 2006)

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

El bagazo está compuesto de celulosa, hemicelulosa y lignina, como principales polímeros naturales. Presenta además, pequeñas cantidades de otros compuestos clasificados de conjunto como componentes extraños.

La celulosa es el principal componente de la pared celular de todas las plantas, se puede considerar como la molécula orgánica más abundante en la naturaleza. Su forma más pura de presentarse es en el algodón, aunque en otras fuentes fibrosas, como la madera, la celulosa aparece de igual forma.

Su insolubilidad en agua, solventes orgánicos y soluciones alcalinas, así como su resistencia apreciable al efecto de agentes oxidantes, diferencia la celulosa del resto de los componentes químicos de la madera.

El peso molecular promedio de la celulosa de bagazo está en el rango de 150 000 a 350 000. Desde el punto de vista cuantitativo su presencia es semejante a las de todas las maderas, en el orden de 41 % a 44%.

Las hemicelulosas abarcan un conjunto de polisacáridos diferentes cuya composición tienen como características comunes: solubilidad en solventes, reactividad frente a los ácidos y descomposición en azúcares y furfural. Estas propiedades las diferencian, analíticamente, del resto de los componentes químicos del bagazo.

Las hemicelulosas que más abundan en el bagazo son del tipo D-xilanas. Las cadenas poliméricas son cortas, el peso molecular promedio viscosimétrico se encuentra en el rango de 10 000 a 20 000 y la proporción es de 25 % a 27 %.

La lignina es el tercer componente en importancia cuantitativa del bagazo entre 20 % y 22% y representa un conjunto de polímeros amorfos, reticulados de altos pesos moleculares y naturaleza eminentemente fenólica.

El resto de los componentes del bagazo, en conjunto, aportan el 10%. Muestran diferencias importantes con respecto a las maderas: el bajo por ciento de los componentes solubles en solventes orgánicos, los cuales no sobrepasan el 3 %, el contenido de cenizas del orden de 2 % a 3% en bagazo, que si bien es superior al de las maderas, resulta muy inferior al de las pajas que abarcan rangos de 8 % a 15%, por último, los compuestos solubles en agua,

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

constituidos por residuos de sacarosa, otros azúcares y polisacáridos, son relativamente altos en relación con la madera.

En la tabla 1.4 se resumen las características químicas del bagazo de caña de azúcar (Icidca, 1982)

Tabla 1.4. Características químicas del bagazo de caña de azúcar

Análisis (%)	Bagazo Integral	Fibra	Meollo
Celulosa	51,23	52,06	46,23
Pentosanos	24,11	24,79	24,17
Holocelulosa	73,65	78,25	74,59
Lignina	20,67	19,46	21,69
Ceniza	2,6	1,4	5,49
-celulosa	43	45,28	-

Los rangos y promedios más representativos de las propiedades físicas del bagazo (Icidca, 1987) se muestran en la tabla 1.5.

Tabla 1.5. Algunas propiedades físicas de bagazo de caña de azúcar

Humedad	46 % – 45 %
Fibra	43 % – 52 %
Sólidos Solubles	2 % – 6 %

Tomado de (Falcón, 2006)

1.10. Equilibrio del proceso.

Consecuentemente con lo anterior, el proceso de adsorción se basa en la retención sobre la superficie de un sólido de las moléculas en disolución, por acción de fuerzas químicas o físicas. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. Las moléculas absorbidas reciben el nombre de "adsorbato" y el material que las retiene "adsorbente". Cuando la unión es de tipo químico, el proceso es irreversible; si es física, es reversible. Varios han sido los modelos aplicados para describir los diferentes procesos de adsorción, pero sin duda alguna los más utilizados con éxito han sido los de Freundlich y Langmuir.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

La ecuación de Freundlich es aplicable particularmente desde que se hallan en juego pequeñas concentraciones de soluto adsorbible, esta ecuación hace posible la eliminación de cálculos por tanteos para la relación solvente/adsorbente si se puede describir algebraicamente la curva de equilibrio.

El modelo de Langmuir está concebido originalmente para la adsorción de gases sobre carbón activo, admitiendo la formación de una monocapa, este modelo ha sido extrapolado a otros sistemas de adsorción y se han obtenido buenos resultados.

En la tabla 1.6 se presenta una comparación entre los diferentes modelos posibles aplicables con sus ventajas y desventajas. (Maurya, 2010)

Tabla 1.6. Resumen de los modelos de adsorción. Ventajas y desventajas.

Modelo de Isoterma	Grados de libertad	Ecuación	Ventajas y desventajas
Ley de Henry (Isoterma lineal)	1	$Q_e = KC_e$	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil para su uso • Aplicable para bajas concentraciones de sorbente
Lineal con intercepto	2	$Q_e = KC_e + m$	<ul style="list-style-type: none"> • Matemáticamente fácil para usar. • Aplicable para altas concentraciones de sorbente
Isoterma de Langmuir	2	$\left(\frac{C_e}{Q}\right) = \left(\frac{C_e}{Q_m}\right) + \left(\frac{1}{bQ_m}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> • Es también conocida como modelo de monocapa idealizado
Modelo de Freundlich	2	$Q_e = KC_e^{1/n}$	<ul style="list-style-type: none"> • Expresión Simple • Consideración de heterogeneidad de la superficie del adsorbente. • Distribución Exponencial de sitios y su energía
Isoterma BET	2	$Q_e = \frac{bC_e Q_m}{(C_s - C_e) [1 + (b - 1) C_e / C_s]}$	<ul style="list-style-type: none"> • Se asume básicamente que una primera monocapa sirva de sitio para la adsorción de una segunda monocapa.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

Isoterma de Dubinin-Radushkevich	2	$Q_e = Q_c \exp(-B\varepsilon^2)$	<ul style="list-style-type: none"> • Independiente de la temperatura. • Factible para adsorbentes de estructura porosa
Isoterma de Temkin	2	$Q_e = \frac{RT}{b} \ln(AC_e)$	<ul style="list-style-type: none"> • Considera el efecto de interacciones indirectas adsorbato-adsorbente
Combinación Langmuir-Freundlich	3	$Q_e = \frac{bQ_m C_e^{1/n}}{1 + bC_e^{1/n}}$	<ul style="list-style-type: none"> • Introducido por Sips en 1950. • Límite de saturación finito.
Isoterma de Toth	3	$Q_e = \frac{Q_m C_e}{\left(\frac{1}{K_1} + C_e^n\right)^{1/n}}$	<ul style="list-style-type: none"> • Limitaciones sobre la Ley de Henry. • No tiene ventajas especiales.
Isoterma de Radske-Prausnitz	3	$Q_e = \frac{R_1 C_e}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2} [C_e^{(1-R_3)}]\right)}$	
Redlich-Peterson	3	$Q_e = \frac{A_1 C_e}{(1 + B_1 C_e^g)}$	<ul style="list-style-type: none"> • Se aproxima a la ecuación de Freundlich a alta concentración. • Factible para quimisorción irreversible
Isoterma de Shawabkeh and Tutunji.	3	$q_e = q_s (1 - \alpha C_e^\beta)$	<ul style="list-style-type: none"> • Factible para quimisorción irreversible
Ecuación de Unilan		$q = \frac{q_m}{S} \ln \left \frac{1 + d \exp(s) C_e}{1 + d \exp(-s) C_s} \right $	<ul style="list-style-type: none"> • Ecuación empírica. • Basado en la aplicabilidad de la Isoterma Langmuir.
Modelo de tres parámetros	3	$C_e = \frac{Q}{a} \exp(b' Q^\beta)$	<ul style="list-style-type: none"> • Fue derivado sobre la base de la termodinámica de la adsorción.
Weber y Van Vliet	4	$C_e = a_1 Q^{(a_2 Q^{a_3+a_4})}$	<ul style="list-style-type: none"> • Datos de adsorción de hidrocarburos sobre carbón activado.

1.11. Estudio Cinético.

El estudio cinético del proceso de biosorción permite determinar la velocidad a la que los contaminantes, para el caso, los colorantes, son retirados de la fase acuosa. Se han propuesto varios modelos cinéticos para describir el mecanismo, se ha determinado que la cinética del

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

proceso de biosorción ocurre en dos fases una de forma rápida y una donde la velocidad disminuye hasta alcanzar el equilibrio.(Lee, 2003)

El mecanismo cinético es bastante complejo y puede involucrar reacciones químicas entre grupos funcionales del biosorbente y la estructura del colorante, reacciones de intercambio iónico y/o formación de complejos; además hay que tener en cuenta los procesos de transferencia de materia tales como transporte de especies en el seno de la fase líquida, difusión desde la fase líquida hasta la superficie del sólido y difusión en el interior de los macroporos y microporos (Ho, 1998, McKay, 1998)

En términos generales las etapas de la cinética de biosorción, pueden resumirse en:

- Transferencia externa de materia a partir de la solución hasta las proximidades de la superficie externa del sólido biosorbente.
- Transferencia de materia interna o difusión de la sustancia en solución al interior de los poros del sólido biosorbente.
- Biosorción de la sustancia en los centros activos del biosorbente.

Tomado de (Ramos, 2010)

Modelos cinéticos

- ✓ Ecuación de pseudo primer orden (Largegren,1898)

Es uno de los modelos más ampliamente utilizados y puede ser expresado como:

$$\frac{dq}{dt} = K_1(q_e - q_t)$$

Donde q_e y q_t son la capacidad de sorción en el equilibrio y en el tiempo t y K la constante de velocidad en min^{-1}

Integrando la expresión * entre $t=0, q_t=0$ y $t=t, q_t=q_t$, se tiene:

$$\text{Log} \left(\frac{q_e}{q_e - q_t} \right) = \frac{K_1 t}{2,303}$$

Graficando $\text{Log} \left(\frac{q_e}{q_e - q_t} \right)$ Vs t , se puede obtener la pendiente obteniendo el valor de K .

- ✓ Ecuación de pseudo segundo orden.

Es uno de los modelos mas observado en los procesos de biosorción.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.

El modelo de pseudo-segundo orden se basa en la capacidad de sorción en equilibrio que asume que la velocidad de sorción es directamente proporcional al cuadrado de sitios disponibles y se expresa matemáticamente como:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

En donde

q_t es la cantidad de colorante adsorbido (mg/g)

t es el tiempo en (min), q_e capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g),

k es la constante de la ecuación (g/mg-min).

Al graficar t/q_t Vs t , se puede obtener el valor de K

Si el modelo lineal representa un buen ajuste con un coeficiente de correlación

R^2 cercano a uno, el proceso de adsorción puede ser descrito como un proceso de quimisorción. (Ho, 1999)

Conclusiones parciales:

- La industria textil es una gran consumidora de agua y sus efluentes poseen sustancias contaminantes como detergentes, colorantes y otros químicos.
- Los colorantes usados en la industria textil son en su mayoría sintéticos resistentes a la biodegradación e intervienen en el proceso fotosintético de organismos presentes en los medios a los cuales son vertidos.
- Un tratamiento de aguas residuales a destacar es la biosorción, logra la remoción de contaminantes de forma satisfactoria y es menos costoso que otros métodos tradicionales.
- Existen residuos industriales como el bagazo que han sido probado como materiales biosorbentes, pero son utilizados en otros fines mientras que otros residuos forestales como el aserrín de pino no han sido evaluados pudiendo constituir una alternativa para la sustitución del bagazo a fin de disminuir el costo del proceso.

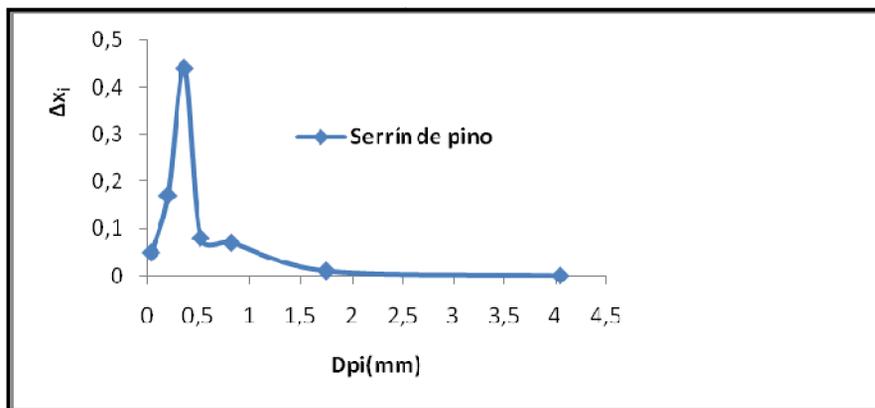
Capítulo 2: Diseño experimental.

La disponibilidad de bagazo para ser utilizado como material biosorbente puede estar limitada por el uso del mismo en otras ramas de la industria como combustible, material de construcción y diversos fines. De ahí que se proceda a evaluar experimentalmente el comportamiento del aserrín de pino (una planta cubana, también renovable) como biosorbente alternativo, así como la combinación del bagazo y el aserrín en mezclas de materiales de bajo costo.

2.1 Caracterización del biosorbente.

Realizando un análisis de las propiedades físicas y químicas de uno de los biosorbentes más utilizados en el trabajo (serrín de pino cubano) obtenemos los siguientes resultados.

- ✓ Análisis granulométrico:



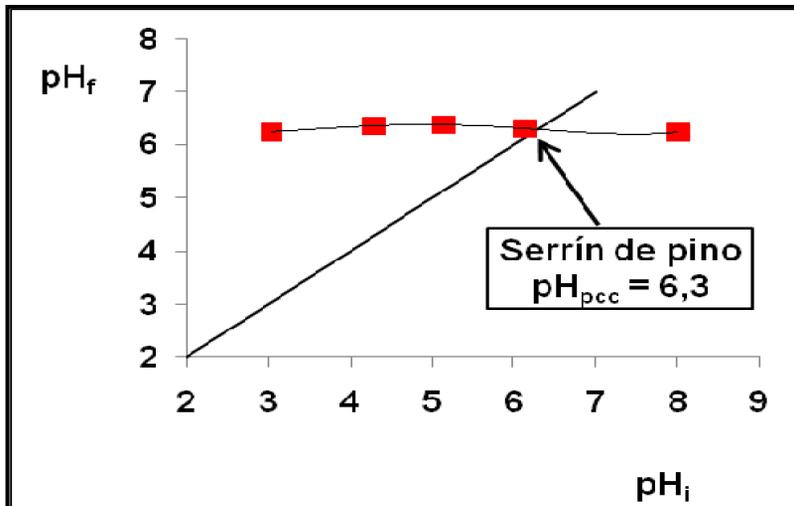
- ✓ Propiedades físicas:

	Serrín de pino
Diámetro de partícula, D _P (mm)	0.315
Densidad real, ρ (kg/m ³)	844,309
Densidad aparente, ρ _{ap} (kg/m ³)	270,00
Porosidad,	0,698
Superficie total, A _P (kg/m ²)	97,952
Superficie específica volumétrica, a _P (m ² /m ³)	1,9710 E6

- ✓ Propiedades químicas:

Punto de carga cero:

- Gráficos del método deriva de pH:



- Gráficos método de titulación de masa:

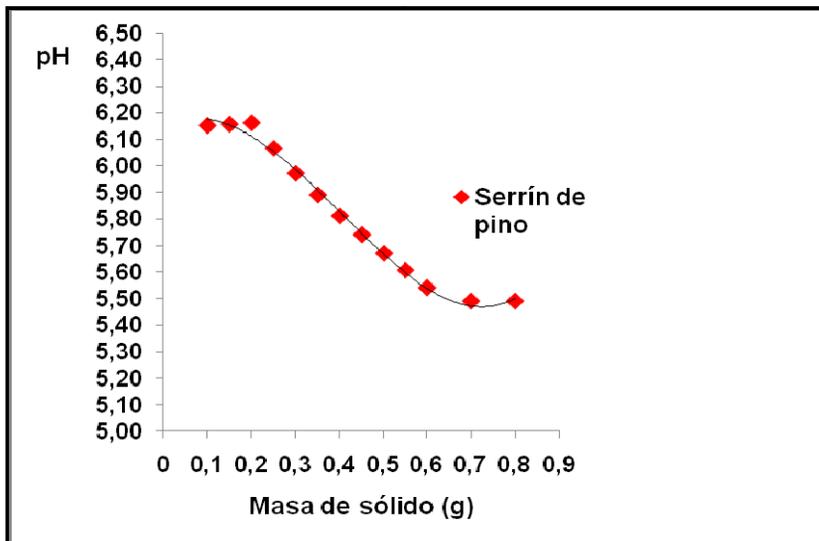


Tabla 2.1. Resumen de pH pcc por ambos métodos

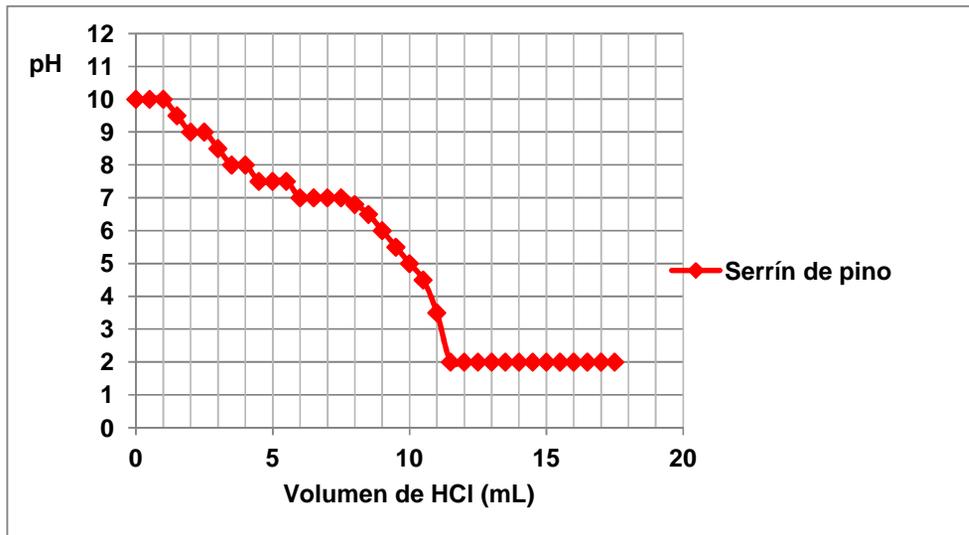
	Titulación de masa	Deriva de pH	Valor Promedio
Serrín de pino	5,49	6,3	5.89

Determinación de la concentración (eq/g) de grupos ácido-base disociados en la superficie de los residuos forestales por el Método de Boehm (Ramos, 2010)

$$\frac{C_{\text{agtitulante}} \cdot (V_T - V_{\text{equivalencia}})}{m_{\text{sólido}}} \cdot 10^{-3} = C_{\text{gruposác-base}} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Capítulo 2: Diseño experimental.

Curvas de titulación para determinar concentración de sitios ácidos:



Curvas de titulación para determinar concentración de sitios básicos:

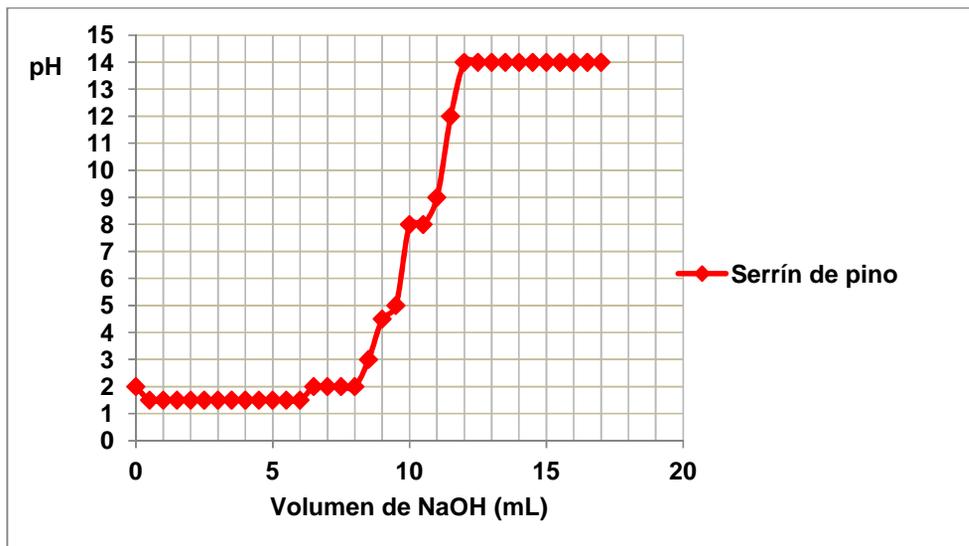


Tabla 2.2. Resumen de concentración de grupos ácido-base (eq/g)

Concentración (eq/g)	Serrín de pino
Grupos ácidos	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Grupos básicos	$0,04 \cdot 10^{-3}$

Las características del biosorbente determinadas indican que posee un pH pcc ácido, por encima de este se facilita la adsorción de especies catiónicas. El aserrín presenta

Capítulo 2: Diseño experimental.

los grupos funcionales característicos de un material lignocelulósico, como puede verse en el anexo 1, en esta figura se pueden apreciar bandas características de la celulosa según las referencias bibliográficas consultadas.

La banda ancha en 3421 cm^{-1} , corresponde a vibraciones de estiramiento asociadas a los enlaces por puentes de hidrógeno intermoleculares. La banda a 2937 cm^{-1} , puede ser asociada a las tensiones carbono – hidrógeno alifáticos, mientras que la banda que se encuentra en 1693 cm^{-1} , puede asignarse en la lignina, al enlace insaturado carbono-carbono, según los criterios encontrados en la bibliografía especializada. (Hishikawa, 1999) La banda en 1510 cm^{-1} , se asigna a las frecuencias de deformación de los grupos CH_2 y la correspondiente a 1269 cm^{-1} , es característica de vibraciones de flexión carbono – hidrógeno. La banda en 1030 cm^{-1} , corresponde a las tensiones carbono – oxígeno (Ali, 2001)

2. 2. Disponibilidad del residuo aserrín.

Se tuvo en cuenta que en Santa Clara existe un aserrío, el único en la provincia de Villa Clara. En la actualidad el aserrín generado no se vende, si no que se le proporciona a las diferentes entidades interesadas como lo son Salud Pública, granjas porcinas, talleres mecánicos y en su mayoría es quemado debido a su acumulación y falta de mercado.

Se realizó un estimado preliminar del residuo generado. Se tomaron los datos de 80 piezas de *Pinus Caribaea* (40 de 4 m y 40 de 3 m), de forma aleatoria en el interior del establecimiento. A las piezas se les midió el diámetro en el extremo inferior y la longitud. Los cálculos realizaron mediante las ecuaciones establecidas. (Egas, 1998)

Para el cálculo de volumen de las piezas (trozas):

$$V_{cc} = e^{(-8,9070 + 0,8135 \cdot \ln Dr + 2,0085 \cdot \ln l + 0,9343 \cdot \ln C)} + (\pi/4) \cdot (Dr/100)^2 \cdot l$$

$$V_{sc} = e^{(-9,2832 + 1,8116 \cdot \ln Dr + 1,2533 \cdot \ln l)}$$

Donde:

Dr: diámetro en el extremo

L: longitud (m)

Vcc: volumen de madera con corteza

Vsc : volumen de madera sin corteza

Cd: conicidad

Capítulo 2: Diseño experimental.

Para el cálculo del porcentaje de aserrín en la línea de grandes y pequeñas dimensiones, respectivamente:

$$\% \text{ aserrín} = 7,5554 - 0,0020 * Dr^2$$

$$\% \text{ aserrín} = 11,8000 - 0,0112 * Dr^2$$

El volumen de aserrín se calculó como sigue:

$$V \text{ aserrín} = V \text{ troza. } \% \text{ aserrín} / 100 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

A partir de las mediciones experimentales se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Resultados experimentales.

Longitud (m)	Dr (m)	% aserrín
4	0,85	7,55
3	0,74	11.7

El volumen total de madera en trozo resultó 12,77 m³/día. Considerando la densidad de la madera verde de *Pinus caribaea* de 976,75 kg/m³ (Guevara, 1998) para llevarlo a unidades de masa serían 12473,0975 kg.

El volumen de aserrín que se obtiene depende de varios factores, como son el diámetro, la longitud, el tipo de sierra, el esquema de corte, la calidad de la troza, los defectos de la madera y otros.

2.3. Estudio Experimental.

2.3.1. Sistema formado por disolución acuosa de azul de metileno y aserrín de pino.

Para la realización de los experimentos se fijaron diferentes parámetros como lo son el diámetro de partícula igual a 0.315 mm debido a que al realizarse el análisis de tamizado se determinó que en este plato es en el que mayor cantidad del aserrín utilizado quedó retenido. Se considera para el trabajo un pH de 7.6 porque en la determinación del pH de carga cero se obtuvo un pH de 5.89, lo cual indica que a valores superiores puede adsorberse con más facilidad los colorantes catiónicos como el azul de metileno.

Se realiza un diseño de experimento del orden de 2³, las variables estudiadas fueron la masa de biosorbente (aserrín), la concentración de la disolución (disolución de azul de metileno) y la temperatura como se muestra en la tabla 2.4.

Capítulo 2: Diseño experimental.

Tabla 2.4. Variables experimentales

	Valor máximo	Valor mínimo
Masa de biosorbente (g)	3	1.5
Concentración de la disolución (mg/L)	30	15
Temperatura (°C)	50	30

Los experimentos son realizados de forma discontinua, el volumen de disolución seleccionado para cada ensayo es de 100mL, tomándose muestras inicialmente cada 5 minutos y luego cada 10 minutos. Se realizaron lecturas de absorbancia en el equipo Espectrofotómetro Génesis a una longitud de ondas () de 660 nm, con el empleo de la curva de calibración (ver anexo 2) realizada en dicho equipo y condiciones se determina el comportamiento de la remoción de color por adsorción en el sistema.

Para una alta concentración de azul de metileno (30 mg/L) y diferentes concentraciones de biosorbente (1.5 g y 3 g de aserrín) y diferentes temperaturas (30°C y 50°C) se obtienen altos porcentos de remoción calculados a partir de la ecuación 2.3.

$$\%R = \frac{Abs_0 - Abs_1}{Abs_0} \cdot 100 \quad \text{Ecuación. 2.3}$$

Para dichas condiciones se obtiene la figura 2.1.

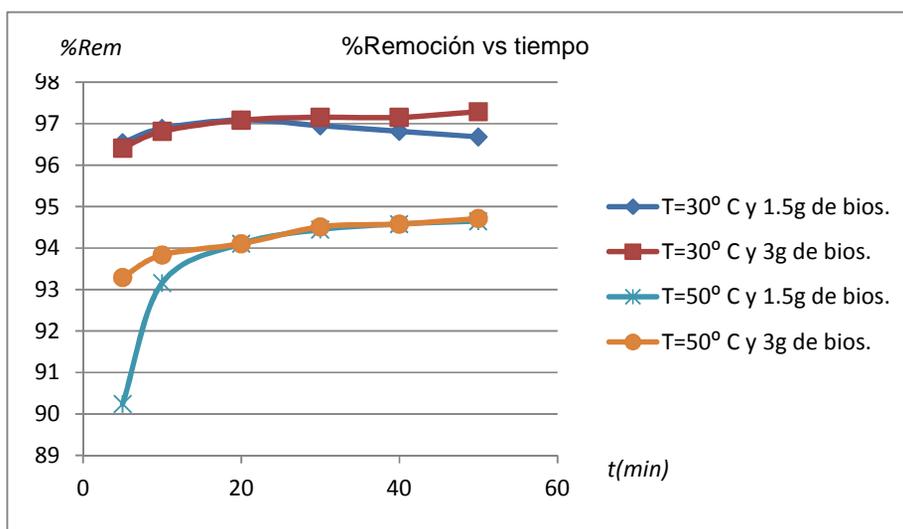


Figura 2.1. Por ciento de remoción contra tiempo para el sistema formado por aserrín de pino como biosorbente y disolución de azul de metileno (alta concentración de colorante)

Capítulo 2: Diseño experimental.

Como se observa en dicho gráfico las mejores condiciones para la remoción de color para altas concentraciones de color son a los 30 °C, es poco notable la disminución del % de remoción cuando se utiliza baja concentración de biosorbente además se observa que ente los 20 y 30 minutos se alcanza el punto de equilibrio para cada uno de los casos.

Para baja concentración de azul de metileno (15 mg/L), la figura 2.2 muestra el comportamiento de la remoción de color en el tiempo para diferentes temperaturas y concentraciones de biosorbente.

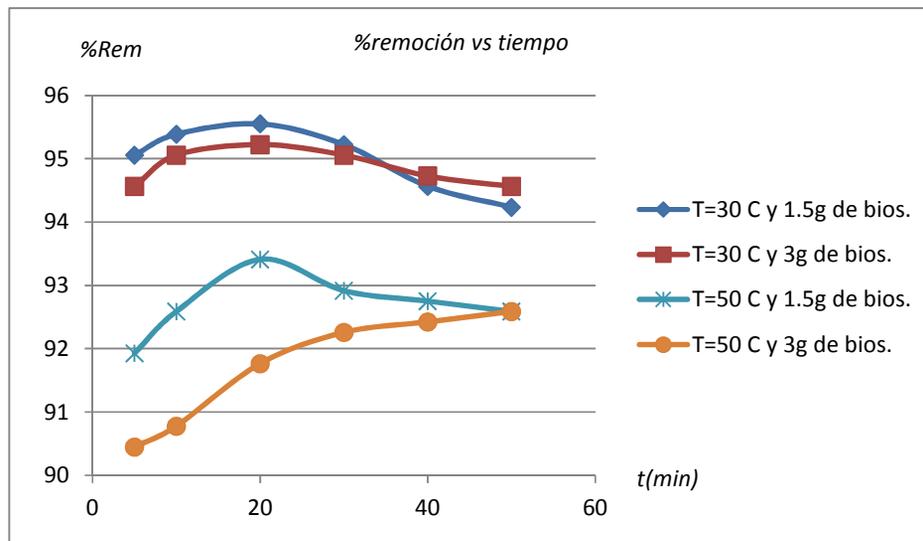


Figura 2.2. Por ciento de remoción contra tiempo para el sistema formado por aserrín de pino como biosorbente y disolución de azul de metileno (baja concentración de colorante)

Para ambos casos de alta y baja concentración de azul de metileno se observa como la temperatura influye negativamente en la remoción, ya que la adsorción física es un proceso exotérmico, por lo que con un aumento de la temperatura solo se puede esperar una disminución del % de remoción de color, es un fenómeno visible que a menor temperatura es más efectiva la remoción por lo que se tienen mejores resultados a la temperatura de 30 °C y la concentración de biosorbente no ejerce una acción significativa en el porcentaje de remoción, estos datos fueron correlacionados con el empleo del statgraphics los resultados de los análisis y el modelo que representa la influencia de las distintas variables sobre el porcentaje de remoción es el siguiente.

$$\% \text{ Remoción} = 97.1741 - 0.0540065 * \text{Conc bios} + 0.120716 * \text{Conc de AM} - 0.144661 * \text{Temperatura} + 0.019016 * \text{tiempo}$$

Los cálculos realizados en Excel para la determinación del % de remoción de color se encuentran expuestos en el anexo 3.

2.3.2. Estudio Cinético.

Los estudios de la cinética de biosorción son importantes en el tratamiento de efluentes, ya que estos proporcionan buena información acerca del mecanismo de la biosorción. Varios son los estudios que refieren los modelos cinéticos de pseudo-primer orden de Lagergen, y pseudo-segundo orden, como los más utilizados para el ajuste de los procesos de adsorción y adicionalmente el modelo cinético de Elovich y el modelo de difusión. (Martín, 2008)

Las tablas de la 2.5 a la 2.13 y figuras de la 2.3 a la 2.11 siguientes muestran los resultados experimentales de biosorción de colorantes sobre el aserrín de pino a las temperaturas de 30 y 50 °C agitadas a 150 rpm, respondiendo a un modelo cinético de pseudo-segundo orden que se expresa como la ecuación 2.4.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 * q_e} + \frac{1}{q_e} * t \quad \text{Ecuación 2.4}$$

En donde

q_t : es la cantidad de colorante adsorbido (mg/g)

t : es el tiempo en (min)

q_e : capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g),

K_2 : es la constante de la ecuación (g/mg-min).

Se grafica t/q contra el tiempo y de la ecuación de la recta se obtienen los parámetros q_e y k

Para $T= 30$ °C y alta concentración de azul de metileno.

Tabla 2.3. Modelo cinético de pseudo-segundo orden para 1.5 g de biosorbente.

t	absorbancia	concentración	volumen (L)	m(biosorbente (g))	Ci-Ct	q	t/q
5	0.051	0.295180723	0.1	1.5	8.584337	0.572289	8.736842
10	0.046	0.265060241	0.1	1.5	8.614458	0.574297	17.41259
20	0.043	0.246987952	0.1	1.5	8.63253	0.575502	34.75227
30	0.045	0.259036145	0.1	1.5	8.620482	0.574699	52.20126
40	0.047	0.271084337	0.1	1.5	8.608434	0.573896	69.69909
50	0.049	0.28313253	0.1	1.5	8.596386	0.573092	87.24597

Capítulo 2: Diseño experimental.

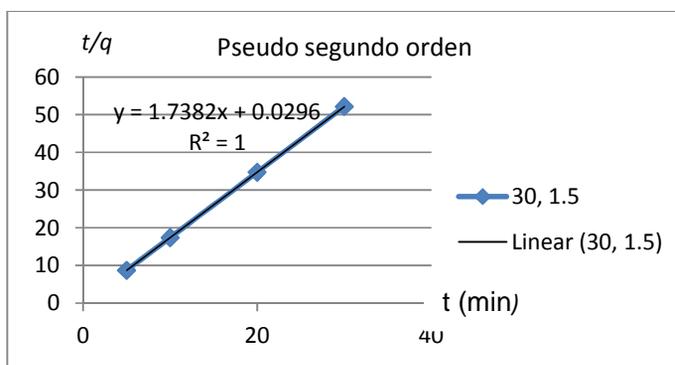


Figura 2.5. Ajuste de los datos experimentales para la obtención de los parámetros cinéticos. Sistema aserrín de pino- disolución de azul de metileno.

Tabla 2.4. Modelo cinético de pseudo-segundo orden para 3 g de biosorbente.

t	absorbancia	concentración	volumen (L)	m(biosorbente (g))	Ci-Ct	q	t/q
5	0.053	0.307228916	0.1	3	8.572289	0.285743	17.49824
10	0.047	0.271084337	0.1	3	8.608434	0.286948	34.84955
20	0.043	0.246987952	0.1	3	8.63253	0.287751	69.50454
30	0.042	0.240963855	0.1	3	8.638554	0.287952	104.1841
40	0.042	0.240963855	0.1	3	8.638554	0.287952	138.9121
50	0.04	0.228915663	0.1	3	8.650602	0.288353	173.3983

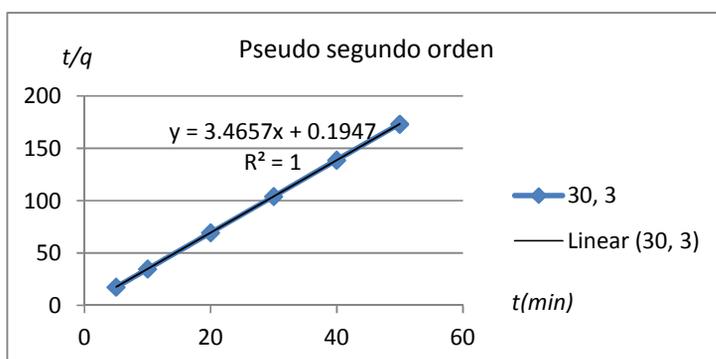


Figura 2.6. Ajuste de los datos experimentales para la obtención de los parámetros cinéticos. Sistema aserrín de pino- disolución de azul de metileno

Para T= 30 °C y baja concentración de azul de metileno.

Tabla 2.5. Modelo cinético de pseudo-segundo orden para 1.5 g de biosorbente.

t	absorbancia	concentración	volumen (L)	m(biosorbente(g))	Ci-Ct	q	t/q
5	0.03	0.168674699	0.1	1.5	8.710843	0.580723	8.609959
10	0.028	0.156626506	0.1	1.5	8.722892	0.581526	17.19613
20	0.027	0.15060241	0.1	1.5	8.728916	0.581928	34.36853
30	0.029	0.162650602	0.1	1.5	8.716867	0.581124	51.62405
40	0.033	0.186746988	0.1	1.5	8.692771	0.579518	69.02287
50	0.035	0.198795181	0.1	1.5	8.680723	0.578715	86.39833

Capítulo 2: Diseño experimental.

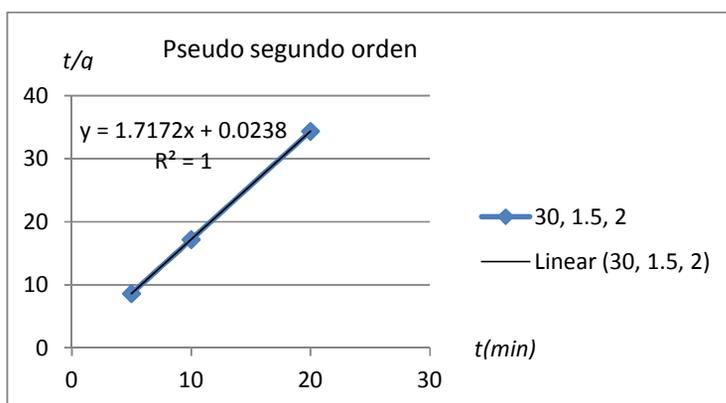


Figura 2.7. Ajuste de los datos experimentales para la obtención de los parámetros cinéticos. Sistema aserrín de pino- disolución de azul de metileno.

Tabla 2.6. Modelo cinético de pseudo-segundo orden para 3 g de biosorbente.

t	absorbancia	concentración	volumen (L)	m(biosorbente (g))	Ci-Ct	q	t/q
5	0.033	0.186746988	0.1	3	8.692771	0.289759	17.25572
10	0.03	0.168674699	0.1	3	8.710843	0.290361	34.43983
20	0.029	0.162650602	0.1	3	8.716867	0.290562	68.83207
30	0.03	0.168674699	0.1	3	8.710843	0.290361	103.3195
40	0.032	0.180722892	0.1	3	8.698795	0.28996	137.9501
50	0.033	0.186746988	0.1	3	8.692771	0.289759	172.5572

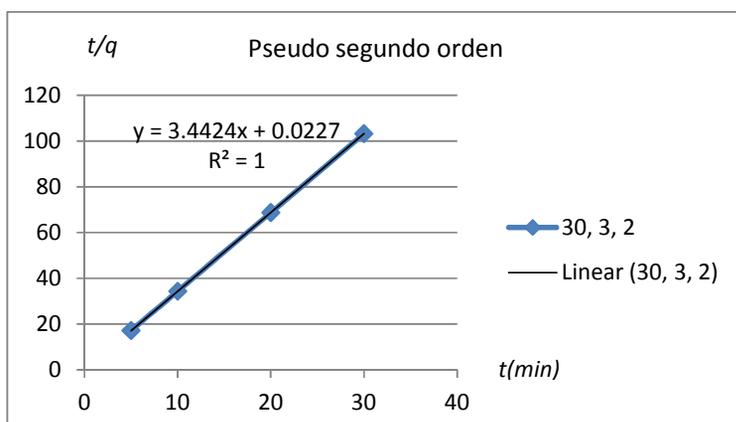


Figura 2.8. Ajuste de los datos experimentales para la obtención de los parámetros cinéticos. Sistema aserrín de pino- disolución de azul de metileno.

Para T= 50°C y alta concentración de azul de metileno.

Tabla 2.7. Modelo cinético de pseudo-segundo orden para 1.5 g de biosorbente.

t	absorbancia	concentración	volumen (L)	m(biosorbente (g))	Ci-Ct	q	t/q
5	0.144	0.855421687	0.1	1.5	8.024096	0.53494	9.346847
10	0.101	0.596385542	0.1	1.5	8.283133	0.552209	18.10909

Capítulo 2: Diseño experimental.

20	0.087	0.512048193	0.1	1.5	8.36747	0.557831	35.85313
30	0.082	0.481927711	0.1	1.5	8.39759	0.559839	53.5868
40	0.08	0.469879518	0.1	1.5	8.409639	0.560643	71.3467
50	0.079	0.463855422	0.1	1.5	8.415663	0.561044	89.11954

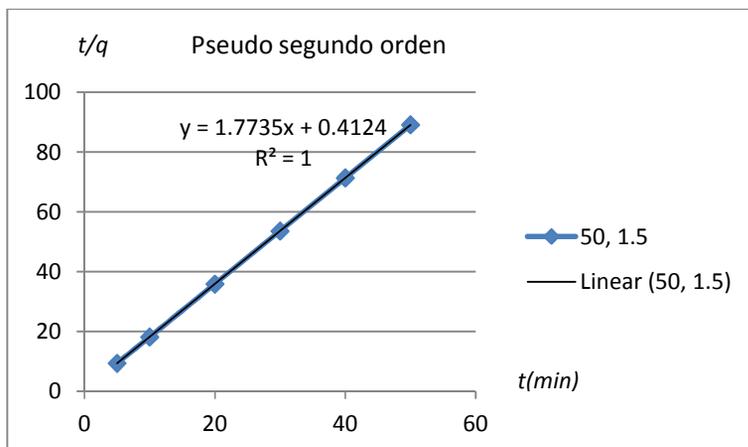


Figura 2.9. Ajuste de los datos experimentales para la obtención de los parámetros cinéticos. Sistema aserrín de pino- disolución de azul de metileno.

Tabla 2.8. Modelo cinético de pseudo-segundo orden para 3 g de biosorbente.

t	absorbancia	concentración	volumen (L)	m(biosorbente (g))	Ci-Ct	q	t/q
5	0.099	0.584337349	0.1	3	8.295181	0.276506	18.08279
10	0.091	0.536144578	0.1	3	8.343373	0.278112	35.95668
20	0.087	0.512048193	0.1	3	8.36747	0.278916	71.70626
30	0.081	0.475903614	0.1	3	8.403614	0.28012	107.0968
40	0.08	0.469879518	0.1	3	8.409639	0.280321	142.6934
50	0.078	0.457831325	0.1	3	8.421687	0.280723	178.1116

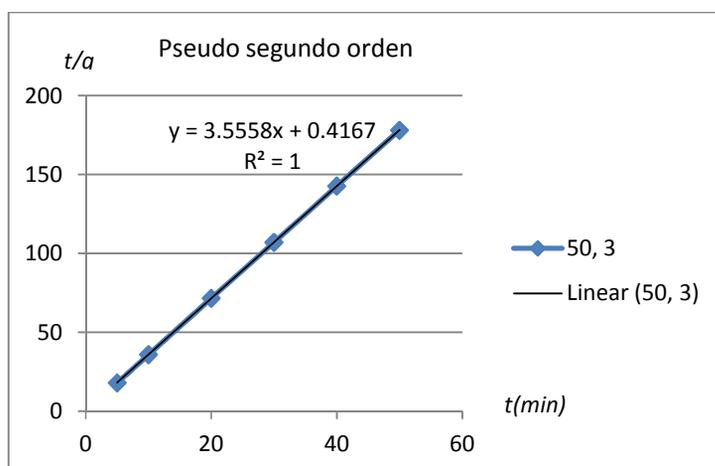


Figura 2.10. Ajuste de los datos experimentales para la obtención de los parámetros cinéticos. Sistema aserrín de pino- disolución de azul de metileno.

Capítulo 2: Diseño experimental.

Para $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y baja concentración de azul de metileno

Tabla 2.9. Modelo cinético de pseudo-segundo orden para 1.5 g de biosorbente.

t	absorbancia	concentración	volumen (L)	m(biosorbente (g))	C_i-C_t	q	t/q
5	0.049	0.28313253	0.1	1.5	8.596386	0.573092	8.724597
10	0.045	0.259036145	0.1	1.5	8.620482	0.574699	17.40042
20	0.04	0.228915663	0.1	1.5	8.650602	0.576707	34.67967
30	0.043	0.246987952	0.1	1.5	8.63253	0.575502	52.1284
40	0.044	0.253012048	0.1	1.5	8.626506	0.5751	69.55307
50	0.045	0.259036145	0.1	1.5	8.620482	0.574699	87.0021

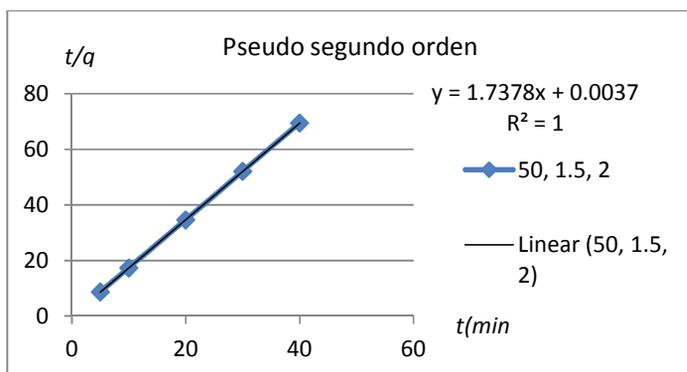


Figura 2.11. Ajuste de los datos experimentales para la obtención de los parámetros cinéticos. Sistema aserrín de pino- disolución de azul de metileno.

Tabla 2.10. Modelo cinético de pseudo-segundo orden para 3 g de biosorbente.

t	absorbancia	concentración	volumen (L)	m(biosorbente (g))	C_i-C_t	q	t/q
5	0.058	0.337349398	0.1	3	8.542169	0.284739	17.55994
10	0.056	0.325301205	0.1	3	8.554217	0.285141	35.07042
20	0.05	0.289156627	0.1	3	8.590361	0.286345	69.84572
30	0.047	0.271084337	0.1	3	8.608434	0.286948	104.5486
40	0.046	0.265060241	0.1	3	8.614458	0.287149	139.3007
50	0.045	0.259036145	0.1	3	8.620482	0.287349	174.0042

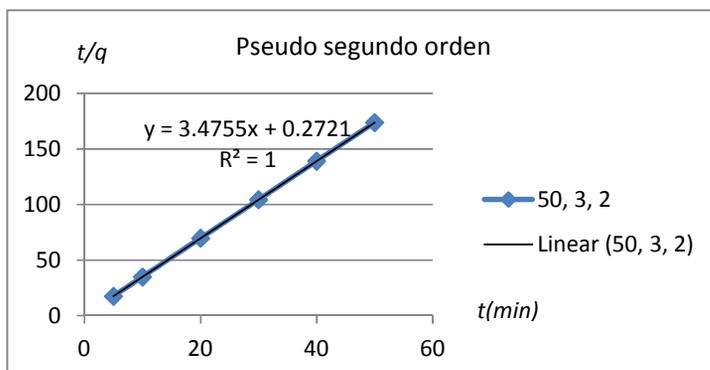


Figura 2.11. Ajuste de los datos experimentales para la obtención de los parámetros cinéticos. Sistema aserrín de pino- disolución de azul de metileno.

Capítulo 2: Diseño experimental.

Tabla 2.11. Valores de la constante de velocidad específica para cada caso

	k	q _e
T=30 °C, alta conc. de azul de metileno y 1.5 g de bios.	104.16	0.575
T=30 °C, alta conc. de azul de metileno y 3 g de bios.	61.88	0.288
T=50 °C, alta conc. de azul de metileno y 1.5 g de bios.	128.17	0.584
T=50 °C, alta conc. de azul de metileno y 3 g de bios.	538.51	0.291
T=30 °C, baja conc. de azul de metileno y 1.5 g de bios.	7.63	0.564
T=30 °C, baja conc. de azul de metileno y 3 g de bios.	30.37	0.281
T=50 °C, baja conc. de azul de metileno y 1.5 g de bios.	105.72	0.575
T=50 °C, baja conc. de azul de metileno y 3 g de bios.	44.39	0.287

Como se observa en cada uno de los casos el valor estadístico de R^2 son buenos, ya que el coeficiente de correlación es 1 por tanto la biosorción para colorantes se ajusta a este modelo de pseudo-segundo orden.

Determinando la energía de activación para el modelo de pseudo-segundo orden se aplica la ecuación de Arrhenius ecuación 2.5

$$k = A * e^{-Ea/RT} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Aplicando logaritmos para linealizar la ecuación se obtiene la ecuación 2.6

$$\log k = \log A - \frac{Ea}{2.3RT} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

se grafica log k contra la temperatura para determinar los valores de Ea (energía de activación) como se muestra en el anexo 4, cuyos resultados están en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Valores de la energía de activación

	Ea (J)
Alta concentración de azul de metileno y 1.5 g de biosorbente	1.089
Alta concentración de azul de metileno y 3 g de biosorbente	0.305
Baja concentración de azul de metileno y 1.5 g de biosorbente	-0.841
Baja concentración de azul de metileno y 3 g de biosorbente	1.032

Los valores bajos de la energía de activación sugieren que la unión de las especies químicas presentes en la disolución con la superficie del sólido son del tipo físico.

Capítulo 2: Diseño experimental.

2.3.3. Estudio termodinámico del proceso.

Para llevar a cabo el estudio termodinámico de proceso se consideró el valor de la constante universal de los gases (R) 8.314 J/molK, las temperaturas de 30 °C (303 K) y 50 °C (323 K) y se graficaron G° contra la temperatura para obtener los valores de H° y S° .

Para obtener G° se utiliza la ecuación 2.7

$$G^\circ = -R T \ln K^l c \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$K^l c$ se calcula de la ecuación 2.8

$$K^l c = \frac{C_{ad} e}{C_e} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

De graficar G° contra T se observan las figuras 2.12 y 2.13, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.13.

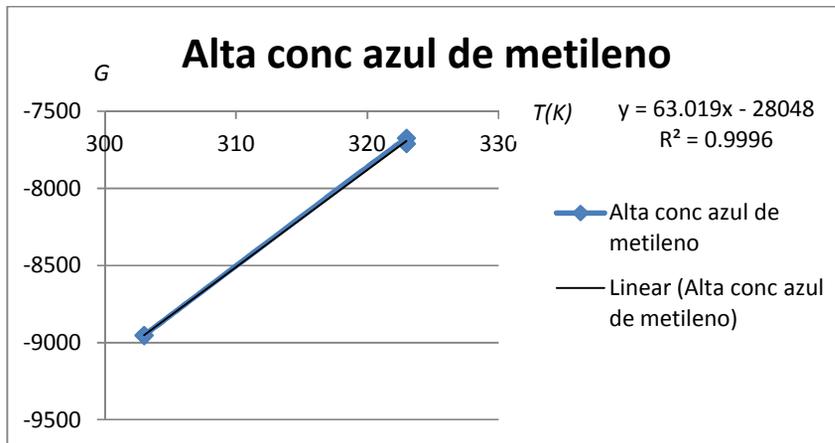


Figura 2.12. Parámetros termodinámicos correspondientes a disoluciones de alta concentración de azul de metileno.

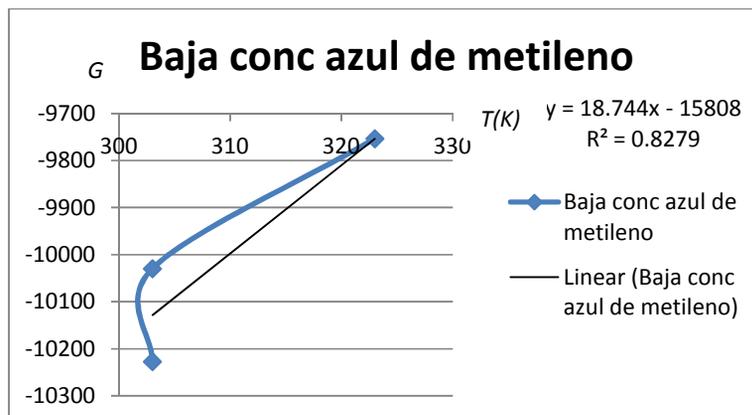


Figura 2.13. Parámetros termodinámicos correspondientes a disoluciones de baja concentración de azul de metileno.

Capítulo 2: Diseño experimental.

Tabla 2.13. Parámetros termodinámicos evaluados para el sistema aserrín de pino-disolución acuosa de azul de metileno

	H° (J)	S°(J/K)
Alta Concentración de azul de metileno	-28048	63.01
Baja concentración de azul de metileno	-15808	18.74

Los valores de la variación de energía libre obtenidos (menores que cero) indican que el proceso de adsorción del colorante sobre el aserrín es espontáneo en las condiciones de temperatura y presión estudiadas. Valores negativos de la variación de entalpía corroboran que el proceso es exotérmico por lo que ocurre de forma favorable a bajas temperaturas. Los valores de la variación de entropía son relativamente pequeños, aunque son positivos (por lo cual existe un aumento del desorden en el sistema desde el punto de vista termodinámico).

De acuerdo a los estudios realizados se determina que a los 20 minutos se alcanza el equilibrio en la remoción por lo que se procede a buscar la influencia que tiene la concentración de colorante en la solución y el ajuste a los modelos tradicionales de Freundlich y Langmuir por ser los más utilizados en la literatura para dichos procesos de adsorción de color en soluciones de bajas concentraciones.

Modelo de Freundlich.

Los datos procesados en excell aparecen en el anexo 5, en la figura 2.14 se observa el comportamiento del sistema a 30 °C, como se mostró anteriormente este proceso no se ve favorecido con los aumentos de la temperatura (estamos en presencia de una reacción exotérmica), por lo que no valdría la pena aplicar el modelo para temperaturas superiores.

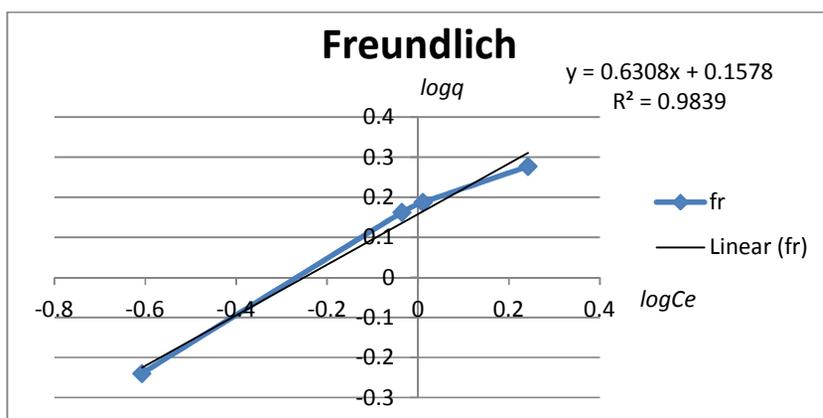


Figura 2.14 Modelo de Freundlich para la adsorción de azul de metileno utilizando como biosorbente aserrín de pino a T=30 °C.

Ecuación de Freundlich.

$$\log q = \log kf + \frac{1}{n} \log Ce \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Del gráfico de la figura 2.14 se obtienen los parámetros de la ecuación 2.9 como se observa en la tabla 2.14, el valor de k se obtiene aplicando antilogaritmo al intercepto, y el valor de n se obtiene con el inverso de la pendiente.

n	K	R ²
1.5852	1.435	0.983

Tabla 2.14. Parámetros de la ecuación de Freundlich.

En correspondencia con los valores reportados en la tabla 2.14 la capacidad del aserrín de pino para adsorber el colorante empleado a la temperatura de 30 °C resulta adecuada, ya que se obtiene un valor de $n > 1$ lo que indica que es factible el proceso, no siendo así para los casos donde la temperatura es superior a los 30 °C, por lo que no tienen sentido ser analizados. Esto corrobora el hecho del carácter exotérmico del proceso, es decir que se ve favorecido a bajas temperaturas, cuestión que se ha tratado por (Treybal, 2002).

Modelo de Langmuir.

También fue evaluado el proceso para la isoterma de Langmuir, planteada en la ecuación 2.10

$$\left(\frac{Ce}{Q}\right) = \left(\frac{1}{b * Qm}\right) + \left(\frac{Ce}{Qm}\right) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde un gráfico de $1/Ce$ versus $1/q$, proporciona una línea recta con pendiente $1/bQ_m$ e intercepto $1/Q_m$.

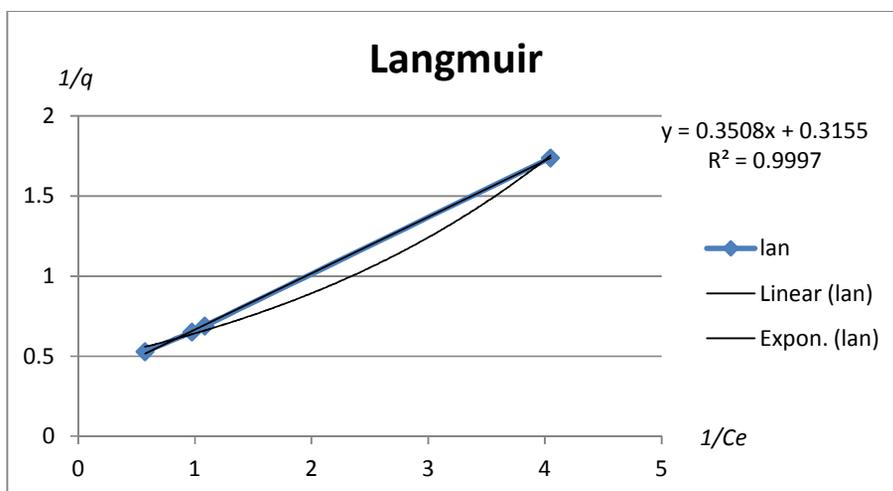


Figura 2.15. Modelo de Langmuir para la adsorción de azul de metileno utilizando como biosorbente aserrín de pino a T=30 °C.

Del gráfico de la figura 2.15 se determinan los parámetros de la ecuación de Langmuir observados en la tabla 2.15.

$Q_{\text{máx}}(\text{mg/g})$	b	R^2
3.17	0.901	0.999

Tabla 2.15. Parámetros del modelo de Langmuir.

Según (Shan, 2009) los rasgos esenciales de la isoterma de Langmuir puede expresarse como un factor adimensional o parámetro de equilibrio K_R .

$$K_R = \frac{1}{1 + b C_0} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

C_0 : concentración inicial de colorante en la disolución (mg/L).

b : constante de equilibrio de la isoterma de Langmuir (L/mg).

Sustituyendo en la ecuación 2.11 se obtiene el valor de $K_R = 0.035$ según (Shan, 2009) los valores de $0 < K_R < 1$ son favorable para el proceso de adsorción.

2.3.4. Mezclas aserrín de pino y bagazo de caña de azúcar.

En estudios anteriores se ha demostrado el poder que tiene el bagazo para la adsorción por lo que en este caso se ha probado con mezclas de bagazo y aserrín en las diferentes proporciones para una masa total de biosorbente de 1.5 g a las temperaturas de 30 °C y 50 °C con agitación de 150 rpm y durante los mismos intervalos de tiempo. Ver los cálculos en el anexo 6, los resultados se muestran a continuación en las figuras 2.16 y 2.17 del % de remoción contra el tiempo.

Capítulo 2: Diseño experimental.

Para la temperatura de 30 °C.

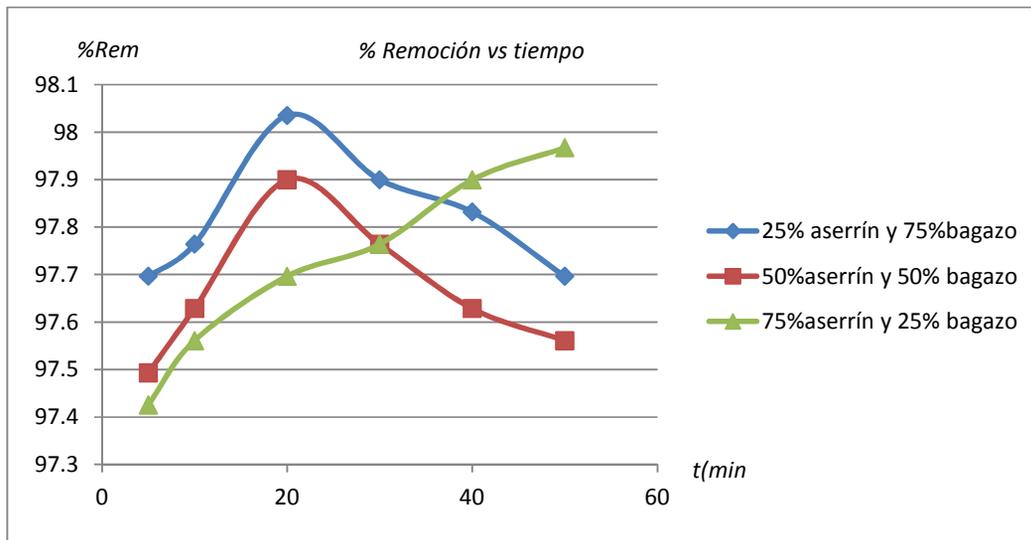


Figura 2.16. Dependencia de la remoción en el tiempo a 30 °C.

Para la temperatura de 50 °C.

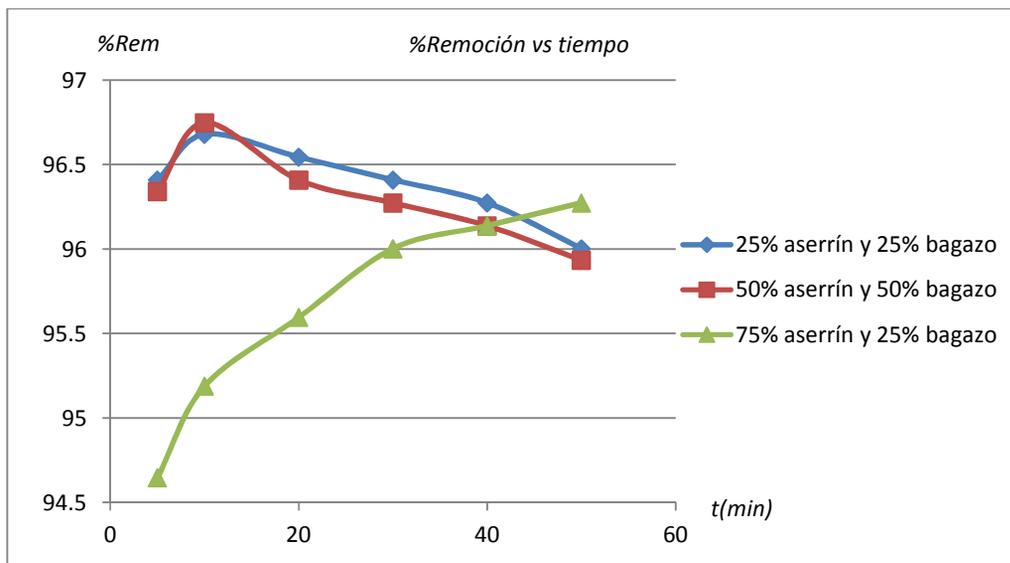


Figura 2.17. Dependencia de la remoción en el tiempo a 50 °C.

Los datos se ajustaron por un modelo estadístico del cual se obtiene la ecuación de ajuste siguiente:

$$\% \text{ remoción} = 100.498 - 0.00846883 * \% \text{ aserrín} - 0.0811126 * \text{Temperatura C} + 0.00358243 * \text{tiempo}$$

Capítulo 2: Diseño experimental.

La figura 2.18 es el resultado de un análisis de varianza en Statgraphics que muestra que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los % de remoción cuando varían las proporciones de aserrín entre 75 y 25% en la muestra.

Con el objetivo de la sustitución de mayor cantidad de bagazo se procesan las muestras a un menor porcentaje de bagazo siendo 75% aserrín y 25% de bagazo.

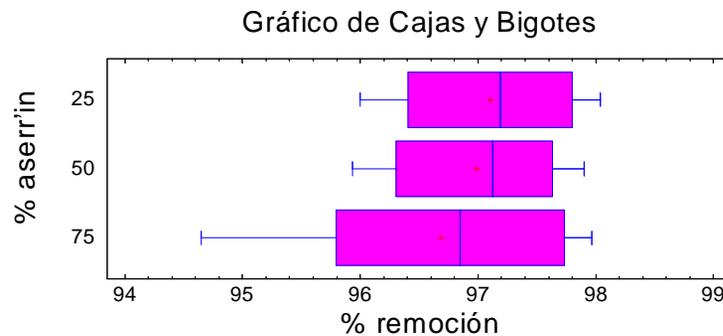


Figura 2.18. Comportamiento del porcentaje de remoción para diferentes porcentajes de aserrín en la mezcla.

2.3.5. Estudio cinético de las mezclas 75% aserrín y 25% bagazo.

Como plantea la bibliografía gran parte de los procesos de adsorción se ven ajustados a los modelos cinéticos de pseudo-primer orden (ecuación 2.12) y pseudo-segundo orden (ecuación 2.4) por lo que en este trabajo son estudiados.

$$\log\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right) = \frac{k_1 t}{2.303} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde q_e y q_t son la capacidad de sorción en el equilibrio y en el tiempo t y k la constante de velocidad en min^{-1} .

Considerando un modelo de pseudo-primer orden a partir de los datos experimentales se obtienen los resultados vistos en el anexo 7 y las figuras 2.19 y 2.20 responde a graficar $\log q_e/q_e - q_t$ contra el tiempo.

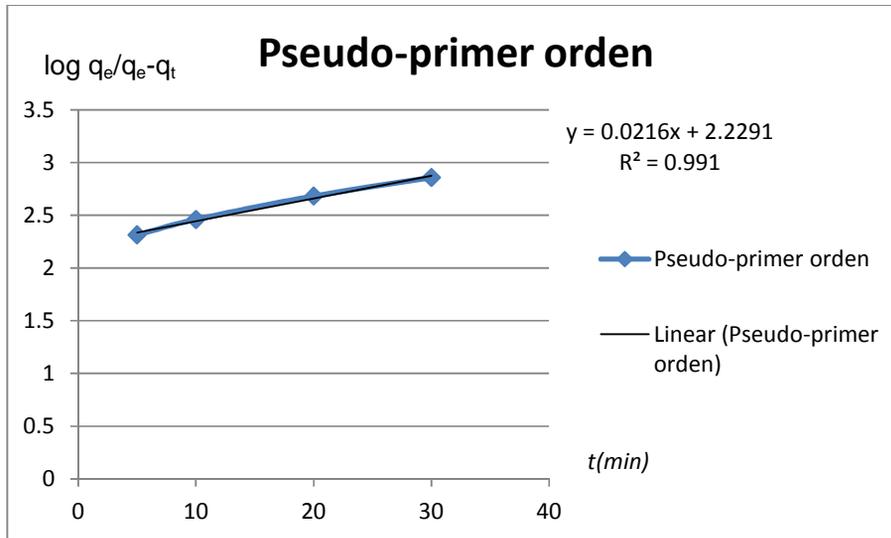


Figura 2.19. Modelo de pseudo-primer orden para T=30 °C.

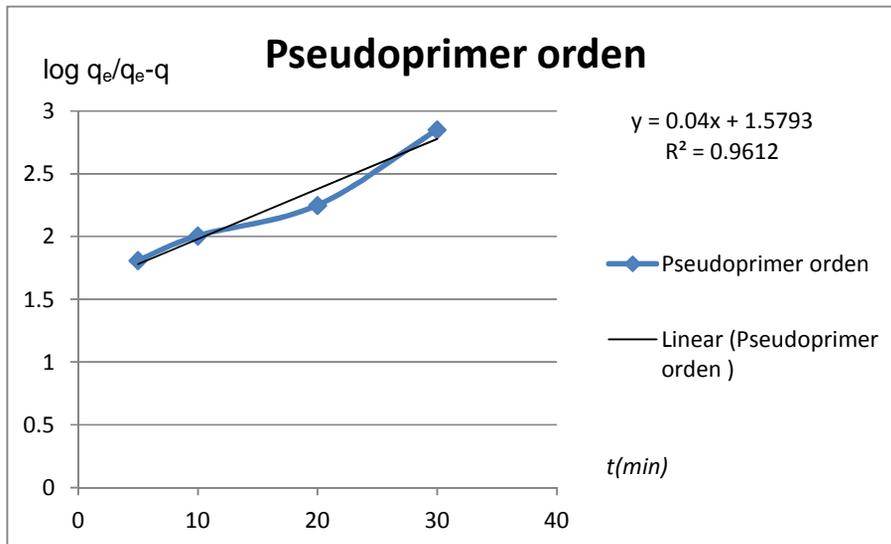


Figura 2.20 Modelo de pseudo-primer orden para T=50 °C.

Ajustando estas mezclas a un modelo de pseudo-segundo orden se obtienen los resultados vistos en el anexo 7 y las figuras 2.21 y 2.22 son muestra de graficar q_e-q_t contra el tiempo:

Capítulo 2: Diseño experimental.

Para la temperatura de 30 °C.

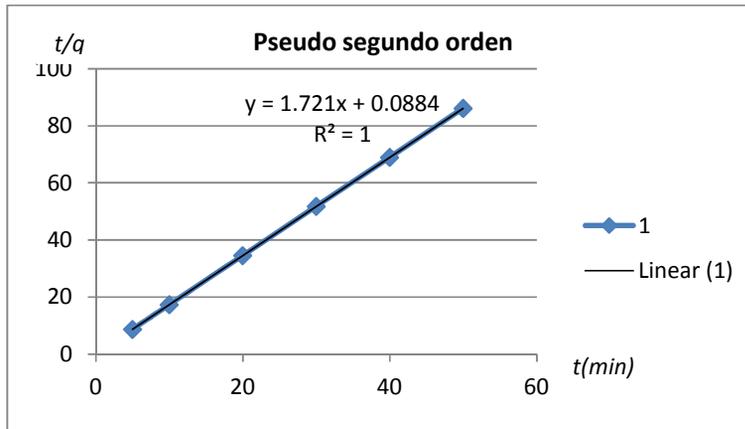


Figura 2.21. Modelo de pseudo-segundo orden para la temperatura de 30 °C.

Para la temperatura de 50 °C.

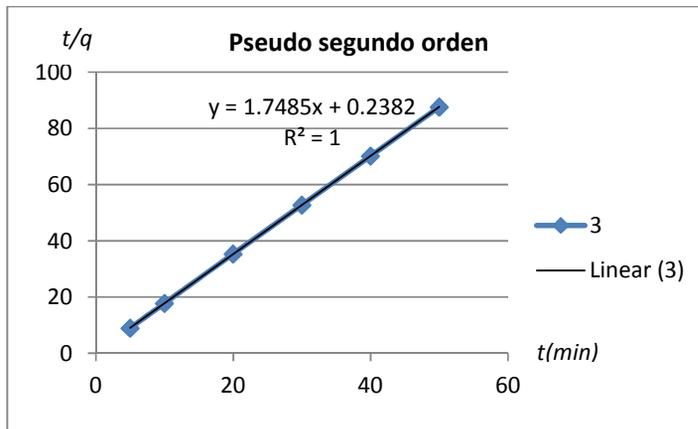


Figura 2.21. Modelo de pseudo-segundo orden para la temperatura de 50 °C.

En las tablas 2.16 y 2.17 se observan los valores de la constante de velocidad específica y el valor de la adsorción aparente en el equilibrio para ambos modelos en cada caso.

Tabla 2.16. Valores de la constante de velocidad específica y adsorción aparente para pseudo-primero orden.

	k	q _e	R ²
T=30 °C, 75% aserrín y 25% bagazo.	0.0483	47.61	0.991
T=50 °C, 75% aserrín y 25% bagazo.	0.092	25	0.9612

Capítulo 2: Diseño experimental.

Tabla 2.17. Valores de la constante de velocidad específica y adsorción aparente para pseudo-segundo orden.

	k	q _e	R ²
T=30 °C, 75% aserrín y 25% bagazo.	33.65	0.58	1
T=50 °C, 75% aserrín y 25% bagazo.	12.83	0.57	1

Para el caso de las mezclas de bagazo y aserrín también se ajustan al modelo cinético de pseudo-segundo orden con mejores resultados que para pseudo-primero orden obteniendo valores estadísticos de R² para el primer caso iguales a la unidad, lo cual coincide con lo reportado por numerosos autores para los procesos de biosorción de colorantes empleando diversos biosorbentes, el valor de la constante de velocidad específica resulta mayor a la temperatura de 30 °C que para 50 °C lo cual puede atribuirse a la formación (por quimisorción) de compuestos intermedios inestables que interfieren en el mecanismo de la reacción retardando su desarrollo.

Para determinar la energía de activación para el modelo de pseudo-segundo orden se aplica la ecuación de Arrhenius (ecuación 2.5) obteniéndose un valor de energía de activación igual a 0.38 J.

Realizando un estudio termodinámico de las mezclas 75% aserrín y 25% bagazo se establecen las mismas condiciones que cuando se trabaja con aserrín solamente de graficar G° contra T (figura 2.22), el H° se obtiene del intercepto de la ecuación de ajuste lineal y S° como la pendiente según la figura obtienen un valor de H°=-26778J y S° = 55.88 J/K.

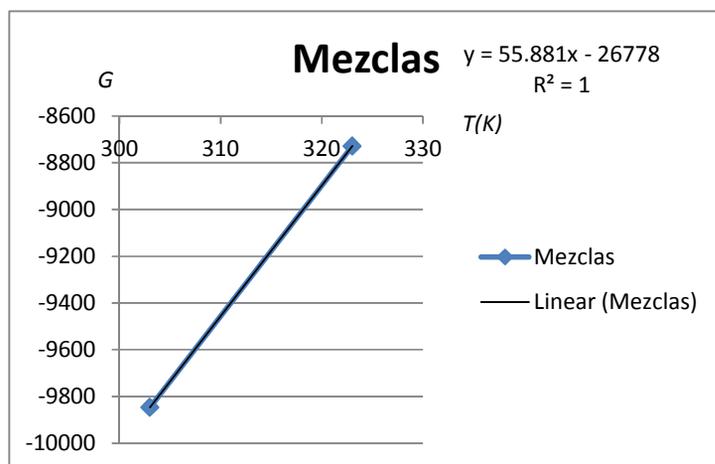


Figura 2.22. Parámetros termodinámicos para mezclas de 75% aserrín y 25% bagazo.

Capítulo 2: Diseño experimental.

Los valores de la variación de energía libre obtenidos (menores que cero) indican que el proceso de adsorción del colorante sobre la mezcla formada por 75% de aserrín y 25% de bagazo es espontáneo en las condiciones de temperatura y presión estudiadas. Valores negativos de la variación de entalpía corroboran que el proceso es exotérmico por lo que ocurre de forma favorable a bajas temperaturas. Los valores de la variación de entropía son relativamente pequeños, aunque son positivos (por lo cual existe un aumento del desorden en el sistema desde el punto de vista termodinámico).

❖ Comportamiento de la remoción de color al trabajar con aserrín de pino y mezclas de este con bagazo de caña.

La figura 2.23 muestra para las condiciones de alta concentración de azul de metileno, una masa de biosorbente de 1.5 y las temperaturas de 30 y 50 °C que en todos los casos se obtienen por cientos de remoción significativos superiores al 90%. Se destaca el hecho que la mezcla formada por un 75% de aserrín y un 25% de bagazo ofrece los mejores resultados para dichas condiciones.

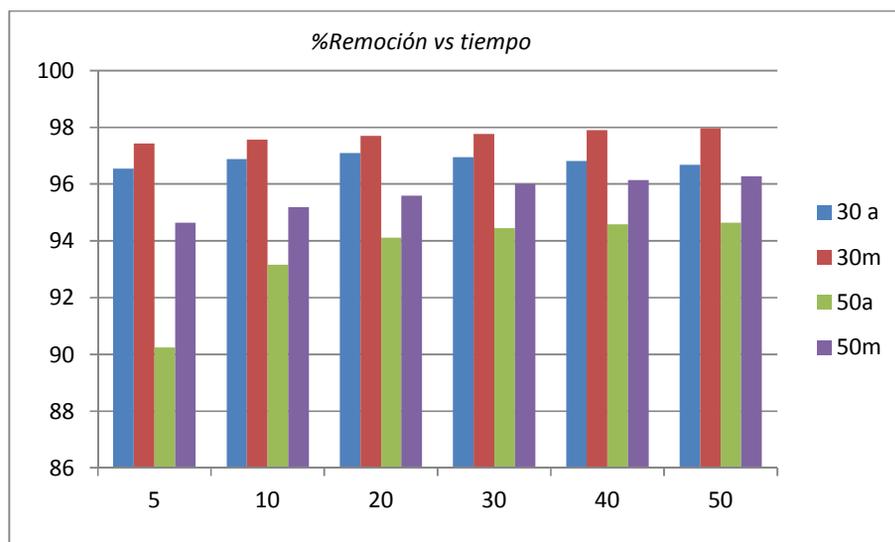


Figura 2.23. Comparación de la remoción para las diferentes condiciones de temperatura y biosorbente.

Conclusiones parciales.

- ✓ Se determinaron las propiedades físicas y químicas del aserrín de pino dentro de la cual está el pH de punto de carga cero igual a 5.89.
- ✓ Se calcularon los por cientos de remoción de color para temperaturas diferentes demostrando que a menor temperatura mayores por cientos de remoción, alcanzando el equilibrio a los 20 minutos.

Capítulo 2: Diseño experimental.

- ✓ Se ajustó el proceso de adsorción de color a un modelo de pseudo segundo orden.
- ✓ Los bajos valores de energía de activación indican que tiene predominio la adsorción física, aunque en la naturaleza del proceso no es un fenómeno netamente físico, sino que tiene interacciones químicas.
- ✓ Se determinaron los parámetros termodinámicos demostrando la espontaneidad del proceso y su ocurrencia de forma exotérmica.
- ✓ Se aplicaron los modelos de Freundlich y Langmuir, observándose para ambos casos buenos resultados de R^2 , pero se ajusta más cercanamente al modelo de Langmuir, los parámetros obtenidos indican buena capacidad y afinidad de la biomasa por moléculas en solución obteniéndose un Q_{\max} de 3.17 mg/g.
- ✓ Se calculó los porcentos de remoción para mezclas de aserrín y bagazo obteniéndose mejores resultados para las mezclas con 75% aserrín y 25% bagazo a una temperatura de 30 °C.

Capítulo 3:

3.1 Características generales de colorantes empleados en la textilera de Santa Clara.

En la fábrica se trabaja fundamentalmente con dos líneas de colorantes: Tri-TEX y Blantex, ambos son materiales de la industria textil, la línea Blantex sus productos son un líquido viscoso de composición química ftalocianina de cobre, presentan un pH entre 8 y 9, tienen un poder cubriente calificado de bueno y buena solubilidad en agua, su aplicación es para el estampado textil.

Con la implicación de estos colorantes así como de otras sustancias como los detergentes, sustancias suavizantes entre otras están compuestas las aguas muestreadas y presentadas en este capítulo.

3.2 Aguas reales.

Considerando el estudio realizado en el capítulo anterior para la remoción de color por adsorción para aguas coloreadas preparadas en laboratorio se efectúan los experimentos pero para aguas reales las cuales son tomadas a la entrada de la planta de tratamiento presente en la fábrica y presentan un pH cerca del neutro (7.6), el cual no es modificado para la realización de los experimentos, los cuales se efectuaron en discontinuo se tomaron solamente las condiciones que muestran mejores resultados para el caso de las aguas ideales o aguas preparadas, se realizaron tres corridas con agitación de 150 rpm con temperatura de 30 °C, a las concentraciones de 1.5 g de aserrín, 3 g de aserrín y una mezcla de composición 75% aserrín y 25% bagazo por un rango de tiempo de 50 minutos tomando muestras cada 10 minutos para observar el comportamiento de la remoción de color en el tiempo.

Para determinar los por cientos de remoción a una temperatura de 30 °C y 1.5 y 3 g de aserrín y la mezcla de 75% aserrín y 25 % bagazo en una muestra de 100 mL de agua real se utiliza la ecuación 2.3. Para dichas condiciones se obtienen las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 en las cuales se relacionan el por ciento de remoción con el tiempo.

Capítulo 3:

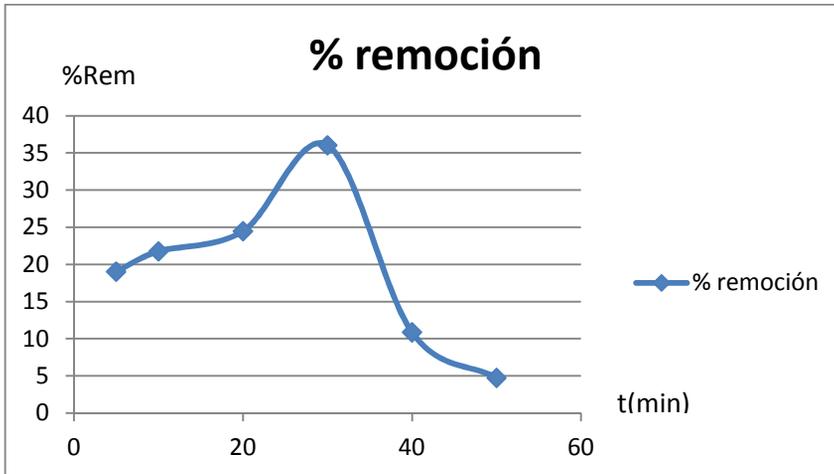


Figura 3.1 Por ciento de remoción contra tiempo a 30 °C y 1.5 g de aserrín.

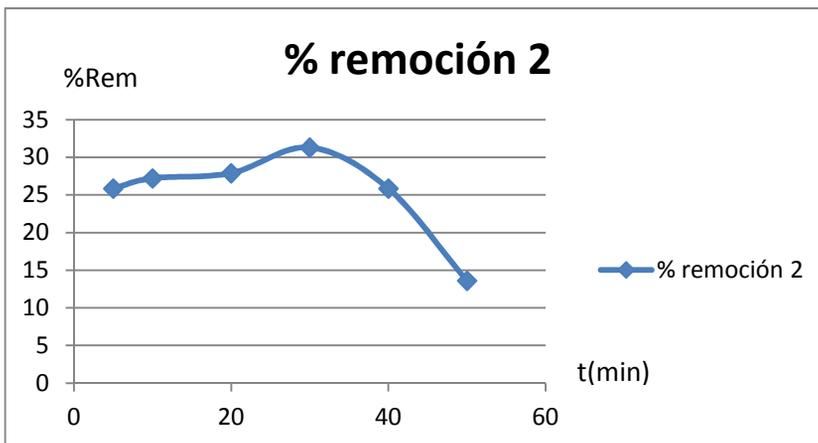


Figura 3.2 Por ciento de remoción contra tiempo a 30 °C y 3 g de aserrín.

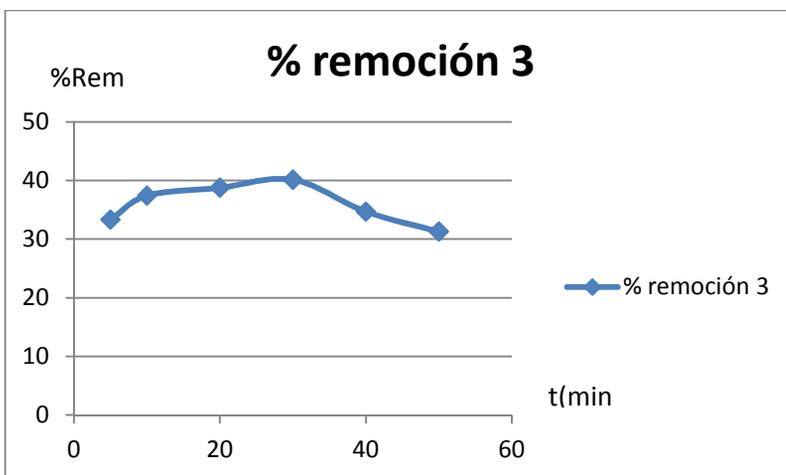


Figura 3.3 Por ciento de remoción contra tiempo a 30 °C y mezcla de 75% aserrín y 25% bagazo.

Capítulo 3:

Como se muestra en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 los por cientos de remoción de color en las aguas residuales industriales utilizando aserrín de pino y mezcla de este con bagazo de caña no son altos debido a que se está en presencia de un sistema multi-componentes, afectados por la presencia de otras sustancias que compiten con el colorante por los sitios activos aserrín o de la mezcla en cada caso.

Aplicando los modelos de pseudo-segundo orden para el caso de aguas reales igual que para las ideales se obtienen las figuras 3.4, 3.5 y 3.6, en la tabla 3.1 se resumen los valores de la constante cinética de velocidad y la capacidad de sorción en el equilibrio.

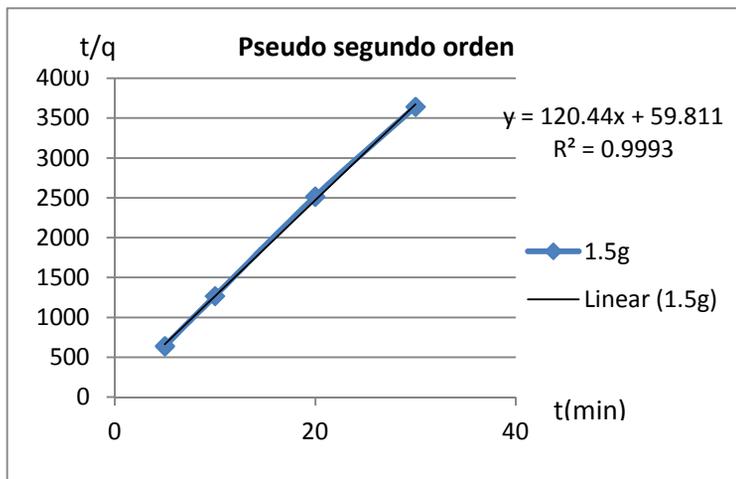


Figura 3.4. Modelo de pseudo-segundo orden para aguas reales a 30 °C y 1.5 g de aserrín.

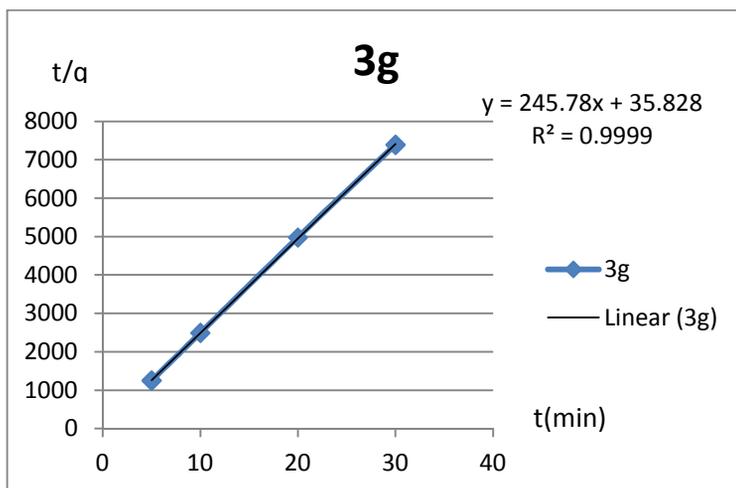


Figura 3.5. Modelo de pseudo-segundo orden para aguas reales a 30 °C y 3 g de aserrín.

Capítulo 3:

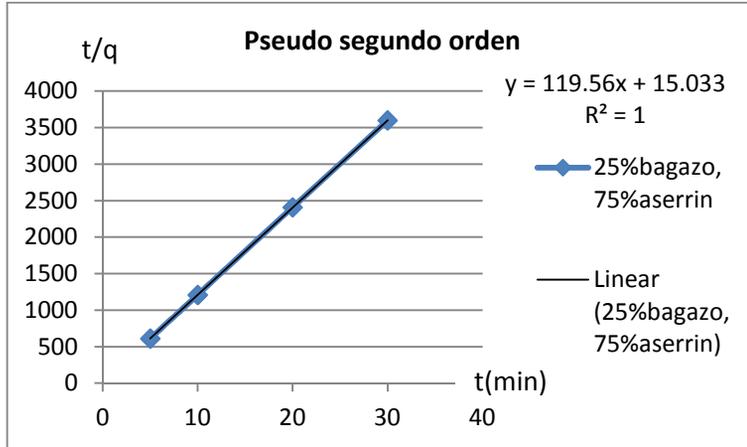


Figura 3.6. Modelo de pseudo-segundo orden para aguas reales a 30 °C y mezclas de 75% aserrín y 25% bagazo.

Tabla 3.1. Valores de la constante de velocidad específica para cada caso.

	k(g/mgmin)	q _e (mg/g)
T=30 °C, aguas reales y 1.5 g de aserrín.	242.37	8.3x10 ⁻³
T=30 °C, aguas reales y 3 g de aserrín.	1685.32	4.07x10 ⁻³
T=30 °C, aguas reales y 75% aserrín y 25% bagazo.	950.12	8.3x10 ⁻³

Los valores que se obtienen de adsorción aparente (q_e) son menores que para aguas simuladas con azul de metileno (a las mismas condiciones de trabajo) debido a la complejidad del agua tratada en cuanto a su composición, lo cual hace que sea posible la ocurrencia de reacciones químicas entre las especies presentes y esto dificulte las etapas correspondientes a la adsorción y a la difusión según (Volesky, 2003)

3.3. Propuesta de tratamiento e inversión requerida. Diseño preliminar.

3.3.1. Definición de las etapas fundamentales del proceso de tratamiento del efluente.

A partir de los estudios experimentales realizados en el capítulo 2 se han dejado establecidas las principales variables a considerar (concentración de colorantes en las aguas residuales a tratar y el pH de las mismas que debe ser superior al pH del punto de carga cero) y los parámetros fijo a controlar (T de 30 °C y masa de aserrín o proporción de bagazo y aserrín como biosorbentes (masa total 15 g por litro de disolución). El sistema de tratamiento propuesto emplea como materia prima el aserrín de pino, el cual es tamizado para obtener el tamaño de partícula de 0.315 mm, el mismo se incorpora a un tanque agitado al cual es bombeada la disolución coloreada a tratar, se mantienen en agitación de 150 rpm, posteriormente es filtrada

Capítulo 3:

para obtener una solución de baja concentración de color, resaltando como operación fundamental la adsorción.

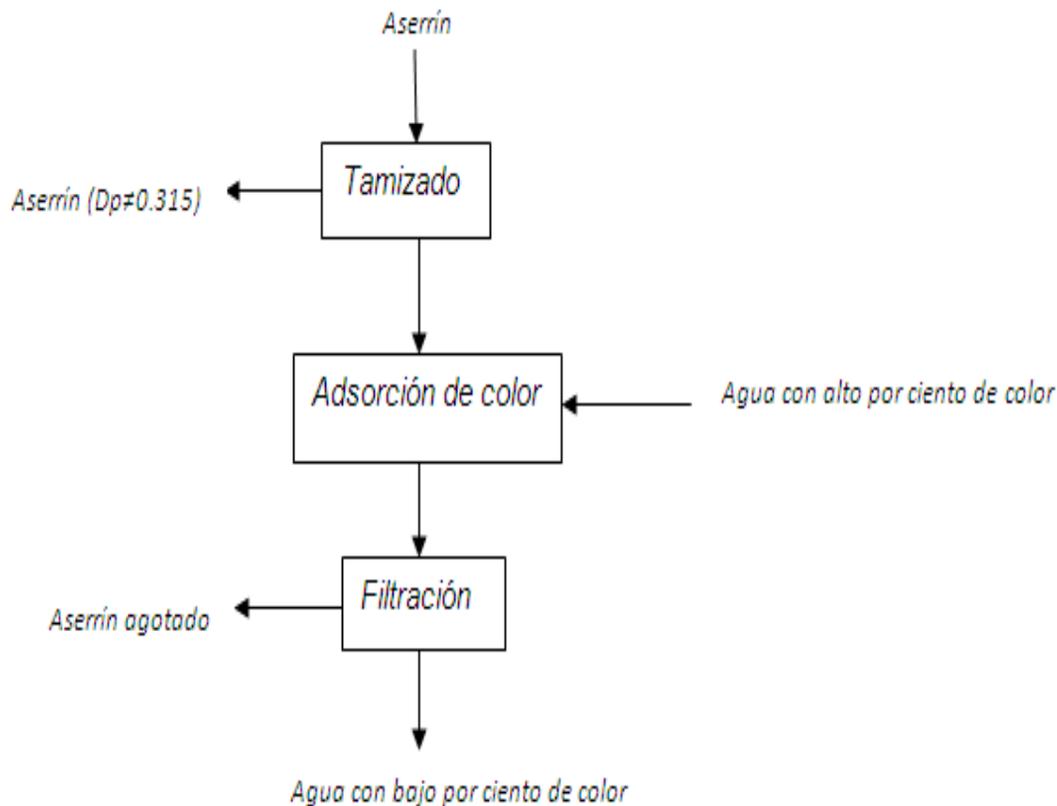


Figura 3.7 Etapas del tratamiento para agua residual.

3.3.2. Balances de materiales para determinar la capacidad de los equipos.

G_s : Masa de sustancia no adsorbida (g de solvente)

y_0 : Concentración inicial de soluto (g soluto/g de solvente)

y_1 : Concentración final del soluto (g soluto/g de solvente)

L_s : Masa de sólido libre de adsorbente (g de adsorbente)

x_0 : Concentración inicial de soluto en el adsorbente (g soluto/g adsorbente)

x_1 : Concentración final del soluto en el adsorbente (g soluto/g adsorbente)

En estudios realizados a escala de laboratorio para 100 g de agua residual se trabajó con los valores de:

$G_s = 99.9$ g de solvente

Capítulo 3:

$y_1 = 0.0006$ g soluto/g solvente 60% y_0

$y_0 = 0.0010$ g soluto/g solvente

$x_0 = 0$ g soluto/g adsorbente

$$Gs(y_0 - y_1) = Ls(x_1 - x_0) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$\frac{Ls}{Gs} = \frac{y_0 - y_1}{x_1 - x_0} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Aplicando la ecuación de Freundlich según la nomenclatura de Treybal

$$y^* = k \cdot x_1^n \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Despejando x_1 de la ecuación 3.3 y sustituyéndola en la ecuación 3.2 se obtiene:

$$\frac{Ls}{Gs} = \frac{y_0 - y_1}{\left(\frac{y_1}{m}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad \text{Ecuación 3.4} \quad \begin{array}{l} \text{Según el modelo de Freundlich} \\ n = 8.42 \\ kf = 2.41 \end{array}$$

Sustituyendo los valores de y_0 , y_1 , n y m :

$$\frac{Ls}{Gs} = 0.0011 \quad 100 \text{ m}^3 = 100000 \text{ kg}$$

Para 100 m^3 de agua residual coloreada se necesitan 110 kg de biosorbente.

3.3.3. Propuesta del esquema tecnológico.

Tomando en consideración que la textilera trabaja 8 horas al día, con un flujo de agua residual estimado de $100 \text{ m}^3/\text{d}$ se propone un sistema discontinuo para lo cual el escalado resulta factible a partir de la información obtenida a escala de laboratorio. De acuerdo con los datos obtenidos el tiempo de contacto del aserrín con la solución debe ser de 40 minutos, y teniendo en cuenta que la operación es discontinua, por lo que tiene un tiempo de llenado y de descarga, se proponen 2 tanques agitados para facilitar la continuidad del proceso, 2 filtros y una criba.

En la figura siguiente se muestra el diagrama de flujo de la instalación

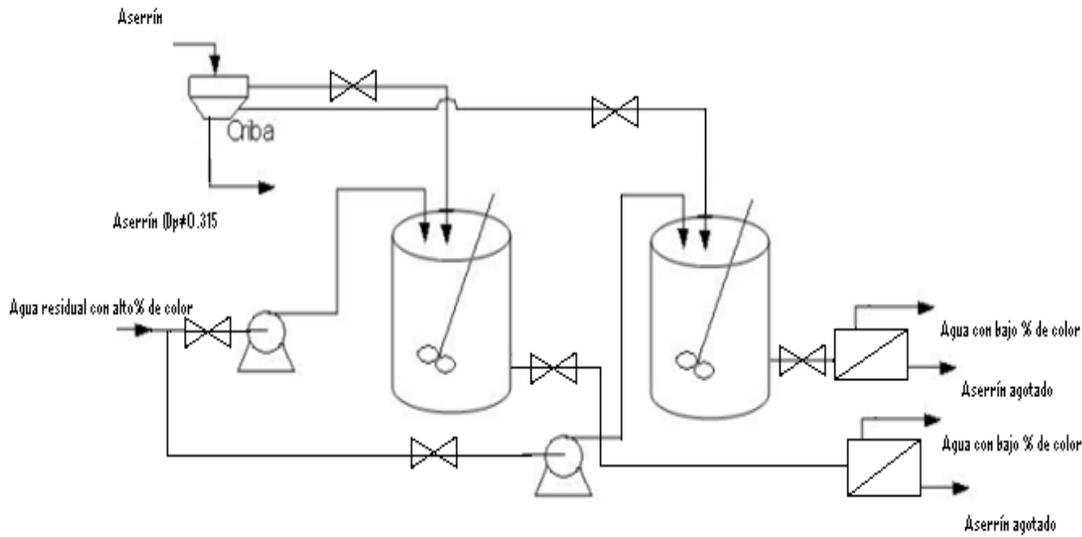


Figura 3.8 Esquema tecnológico.

3.3.4. Determinación de las capacidades de los equipos.

- ✓ Las cribas vibratorias de inercia son de gran uso industrialmente, tienen gran capacidad y poco gasto energético. Un ejemplo de su empleo lo es en la industria azucarera para la obtención del bagacillo con el fin de usarlo como sustancia auxiliar en la filtración de la cachaza son utilizadas cribas vibratorias de un sólo tamiz. (Rosabal, 2006)

Considerando el análisis granulométrico del aserrín realizado en el capítulo anterior para el tamaño de partícula utilizado se tiene un porcentaje de retención del 45%.

Datos	Ecuaciones	Resultados
Capacidad del tamiz (Q_m) = 0,244 t/h Capacidad específica media del tamiz (q) = 3 m ³ /h m ² Diámetro de las aberturas de los agujeros (D_p) = 0,32 mm. Densidad aparente del material (ρ_a) = 270 kg/m ³ . Constante (k) = $0.88 \cdot 10^{-3}$, t/kg	$A = \frac{Q_m}{Kq \rho_a}$	Área total de tamizado (A) = 1.02 m ²

Capítulo 3:

✓ Tanque agitado de adsorción.

Datos	Ecuaciones	Resultados
Masa de sustancia no adsorbida (Gs)=100000/2 kg de solvente = 50000 kg de solvente	$V = \frac{F}{\rho}$	V=50.2 m ³ /h d=2.65 m
Concentración inicial de soluto (y _o)=0.0010 g soluto/g solvente	$V = Ab \bullet h$	h=3.18 m
Concentración final de soluto (y ₁)=0.0006 g soluto/g solvente (agua residual) = 996 kg/m ³	$Ab = \frac{\pi \bullet d^2}{4}$ h = 1.2d	A = 5.51 m ²

✓ Mezcladores de paleta.

Datos	Ecuaciones	Resultados
Diámetro del tanque = 2.65 m	d = 0,66*D (diámetro del agitador)	d = 1.74 m
Altura del tanque (H) = 3.18 m		b = 0.17 m
Velocidad de rotación del agitador (n)=150 rpm	b/d =0,1 (ancho de La paleta)	

✓ Bomba.

$$H = Z + \frac{P}{g} + \frac{v^2}{2g} + h_P \quad (\text{Rosabal, 1998})$$

$$h_p = h_t + h_{acc}$$

$$h_p = (f \times L/D + \sum k) \times v^2/2g$$

$$f = \quad Re = \left(\frac{\rho \times D \times v}{\mu} \right) = \frac{997 \times 0.23 \times 2}{0.8 \times 10^{-3}} = 573275$$

$$\frac{e}{D} = \frac{0.125}{230} = 5.4 \times 10^{-4}$$

Capítulo 3:

$$f = 0.17$$

$$100 \text{ m}^3/\text{h} = 0.027 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v = 2 \text{ m/s}$$

$$Q = A \cdot v$$

$$A = Q/v = 0.027/2$$

$$A = 0.013\text{m}^2$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$D = \sqrt{(0.013 \times 4) / \pi} = 0.13$$

$$h_p = (0.17 \times 54 / 0.13 + 5.81) \times \frac{2^2}{2 \times 10}$$

$$h_p = 9.14$$

$$H = Z + h_p$$

$$H = 27\text{m} + 9.14$$

$$H = 36.14 \text{ m}$$

Accesorios	$\sum k$
4 codos 90°	4 x 0.75 = 3
2 válvulas	2 x 0.17 = 0.34
Entrada	0.5
Salida	1
	$\sum = 5.81$

$$H = (f \times L/D + \sum k) \times \frac{Q^2}{2 \times 10 \times A^5}$$

$$H = 27 + 54.43 \times Q$$

Suponiendo eficiencia 85%

$$N = \frac{\rho \times g \times H \times Q}{1000 \times \eta}$$

$$N = \frac{997 \times 10 \times 36.14 \times 0.083}{1000 \times 85/100}$$

$$N = 35.18 \text{ kw}$$

Capítulo 3:

Seleccionamos una bomba del tipo Electrobomba Centrífuga Sobre bancada Normalizada DIN 24255, serie: 2 ND 100 (2.900 rpm), diseñada para un flujo de 120 m³/h.

$$H = 38.5\text{m}$$

$$N = 45\text{kw}$$

$$N = 45\text{kw/h} \times 1825 = 64203.5\text{kw/h}$$

3.4. Análisis económico.

Una vez realizado el diseño de los equipos fundamentales de la planta de tratamiento de agua residual para la remoción de color, se efectuó su análisis económico, sobre la base del cálculo del costo de inversión, el costo de producción, la ganancia y los indicadores de rentabilidad.

Para la estimación de los índices de costos se consultaron diferentes ediciones de la revista Revista Chemical Engineering como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Índices de costos.

Año	Índices de costos	Referencias
1990	357.6	Revista. Chemical Engineering. 1991
2007	525.4	Revista. Chemical Engineering. 2007
2010	566.2	Revista. Chemical Engineering. 2010
2012	585.7	Revista. Chemical Engineering. 2012

Para la estimación de los costos orinales del equipamiento propuesto se consideraron los propuestos por la figura (Peters, 1991) y se actualizaron con el índice de costo actual con la ecuación 3.5 como se muestra en la tabla 3.3.

$$Costo_{Actual} = Costo_{Original} \cdot \frac{\text{Índice}_{actual}}{\text{Índice}_{original}} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Tabla 3.3 Costos del equipamiento.

Equipos	costo original (\$)
2 Tanques Agitados	7800
Criba vibratoria	12900
2 Filtro prensa	1600

Capítulo 3:

bomba centrífuga	3400
Accesorios	62
motor de la bomba 0,5 Kw	100
tanque almacenamiento.	3500
tanque de recepción.	1300
costo total del equipamiento	30682
Costo total actual del equipamiento	50253

Costo Total de la Inversión.

Costo Total de Inversión (CTI)

CTI = Costo Fijo de Inversión (CFI) + Inversión de Trabajo (I_{Trabajo})

CTI = CFI + I_{Trabajo}

$I_{\text{Trabajo}} = 15\% \text{ CTI}$

CFI = $C_{\text{Directos}} + C_{\text{Indirectos}} + \text{Derecho de contrato} + \text{Contingencia}$

- Costos directos. **CA=50253**
- ✓ Instalación = 39% CA = 15075.9
- ✓ Instrumentación = 28% CA = 14070.84
- ✓ Instalaciones eléctricas = 10% CA = 5025.3
- ✓ Edificaciones = 22% CA = 1105.56
- ✓ Movimiento de terreno = 10% CA = 5025.3
- ✓ Facilidades de servicio (Inst) = 55% CA = 27639.15
- ✓ Tierras = 6% CA = 3015.18

Costos directos = 70957.23

- Costos indirectos.
- ✓ Ingeniería y supervisión = 32% CA = 16080.96
- ✓ Gastos de construcción = 34% CA = 17086.02

Costos indirectos = 33166.98

Capítulo 3:

$$CD + CI = 104123.98$$

- Otros aspectos.
- ✓ Derecho de contrato = 5% (CD + CI) = 5206.19
- ✓ Contingencia = 10% (CD + CI) = 10412.39

$$CFI = 119742.79$$

$$CTI = 140873.87$$

Costo Total de Producción.

$$CTP = \text{Costo de fabricación (C}_{\text{Fabricación}}) + \text{Gastos Generales (GG)}$$

$$CTP = C_{\text{Fabricación}} + GG$$

$$C_{\text{Fabricación}} = \text{Costos directos (CD)} + \text{Cargos Fijos } C_{\text{Fijos}} + \text{Costos Indirectos (CI)}$$

$$C_{\text{Fabricación}} = CD + C_{\text{Fijos}} + CI$$

$Depreciación = \frac{CFI - VR}{Vd}$ donde VR es el valor residual que se asume igual a cero y Vd es la vida útil igual a 20 años.

- Costos directos.
- ✓ Materia prima = 10 % CTP
- ✓ Mano de obra = 10 %CTP
- ✓ Supervisión = 15 % Mano de obra
- ✓ Requerimientos = 20 %CTP
- ✓ Mantenimiento y reparación = 2 %CFI
- ✓ Suministro = 0,5 % CFI

$$CD = 2993.56 + 0,415 CTP$$

- Cargos fijos.
- ✓ Depreciación = \$ 5987.14
- ✓ Impuestos = 1 %CFI = \$ 1197.43
- ✓ Seguros = 0,4 % CFI = \$ 478.97

$$C_{\text{Fijos}} = 7663.54$$

Capítulo 3:

- Costos indirectos = 5% CTP

$$CI = 0,05 \text{ CTP}$$

Cálculo del costo de fabricación.

- ✓ Costos Directos = 2993.56 + 0,415 CTP
- ✓ Cargos Fijos = 7663.54
- ✓ Costos indirectos = 0,05 CTP

$$C_{\text{Fabricación}} = 10657.1 + 0,465 \text{ CTP}$$

Gastos generales.

- ✓ Administrativos = 2 % CTP
- ✓ Distribución y ventas = 2 % CTP
- ✓ Investigación y desarrollo = 5 % CTP

$$GG = 0,09 \text{ CTP}$$

$$CTP = C_{\text{Fabricación}} + GG$$

$$CTP = 10657.1 + 0,465 \text{ CTP} + 0,09 \text{ CTP}$$

$$CTP = \$ 23948.53/\text{año}$$

Ecuaciones tomadas de (Portuondo, 1995)

3.5- Externalidades

Las externalidades es una estimación de costo por los daños no ocasionados, al disminuir la concentración de los contaminantes (colorantes) en las aguas se evitan numerosas enfermedades que pueden afectar a las personas, que reside en los lugares próximos a la instalación, y están propensas a que las fuentes de agua potable se contaminen con los residuales así como se evita la afectación a la flora y la fauna presentes en las corrientes de agua en las que se vierte este residual. En la actualidad los colorantes son sintetizados, incluso a partir de sustancias que pueden afectar seriamente a las personas, además tiene un efecto económico negativo, ya que se incrementan los gastos por tratamiento médico, en los que se incluye la compra de medicamentos, además se debe tener en cuenta que una persona enferma en edad laboral, estará incapacitada para realizar cualquier actividad productiva, dejando de aportar a la sociedad, y a sus ingresos personales.

Entre los daños evitados a la entidad pueden considerarse el que ocasionaría el pago de multas por afectación al manto freático y a la biota.

Capítulo 3:

Conclusiones parciales:

- Se determinó los por cientos de remoción de color para el caso de aguas reales obteniéndose resultados de hasta un 40% para mezclas de 75% aserrín y 25% bagazo.
- Se ajustó a un modelo de pseudo-segundo orden alcanzando valores de R^2 altos.
- Se determinó que para tratar 100 m^3 de agua residual se necesitan 110 kg de biosorbente.
- Se determinó el costo de adquisición del equipamiento, necesario para completar el tratamiento actual de los residuales con la inclusión de la sección de biosorción. El valor del mismo es de \$ 50253.
- Se realizó un análisis económico determinando un costo total de tratamiento ascendente a \$23948.53/año.

Conclusiones.

- ✓ Se determinó las características físico químicas del aserrín de pino cubano dentro de ellas el pH pcc=5.89, $\rho_{ap}=270 \text{ kg/m}^3$, diámetro de partícula 0.315 mm.
- ✓ Se probó la utilidad del aserrín de pino y mezclas de este con bagazo de caña para la remoción de color alcanzando valores de 97% y para las mezclas hasta de 98%.
- ✓ El proceso de adsorción en el sistema estudiado se ajusta a un modelo de pseudo-segundo orden y presenta características que indican el predominio de la adsorción física.
- ✓ Para la remoción en aguas reales se obtuvo valores cercanos al 40% debido a la presencia de sustancias ajenas que compiten con los colorantes por los sitios activos del biosorbente.
- ✓ Se hizo una propuesta de una sección de una planta para el tratamiento de aguas residuales considerando como etapa fundamental la biosorción con aserrín de pino.
- ✓ Se realizó un análisis de los costos para el tratamiento propuesto los cuales se ven recompensados por los daños evitados al medio ambiente.

Recomendaciones.

- Ampliar este estudio con aguas reales de la Textilera a otras condiciones de trabajo.
- Evaluar el fenómeno de biosorción con mezclas de bagazo y el aserrín con el equipamiento adecuado a escala de planta piloto.

Bibliografía.

1. ALAMI, S. B. D. 2010. Aprovechamiento de hueso de aceituna biosorción de iones metálicos. Universidad de Granada.
2. ALI, M. 2001. *Spectroscopic studies of the ageing of celulosic paper*. Polymer.
3. ALOMÁ, I. 2006. Evaluación de la operación de adsorción de metales pesados empleando columnas rellenas con bagazo de caña químicamente modificado y propuesta de escalado a nivel de planta piloto., Universidad Central Martha Abreu de las Villas.
4. ALVARES, E. 1999. Perspectivas de aprovechamiento del aserrín mediante su transformación hidrolítica y como fuente de Biomasa para diversos fines. Universidad de Pinar del Río.
5. ALLEN, S. J. K., B 2005. Decolourisation of water / wastewater using adsorption.
6. CIGEA 2007. Estrategia Ambiental Nacional.
7. COTTON, W. 1995. Human Impacts on Weather and Climate
8. CRINI, G. 2005. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review Universite de Franche-Comte.
9. EGAS, A. 1998. Consideraciones para el incremento de la eficiencia de la conversión de madera en rollo de *Pinus caribaea* en sierras de bandas., Universidad de Pinar del Río.
10. FALCÓN, M. F. C. 2006. Evaluación del impacto ambiental que provoca la tecnología empleada para la obtención y uso de un biosorbente de metales pesados a partir del bagazo de caña de azúcar activado químicamente., Universidad Central Martha Abreu de las Villas. .
11. FIESER, L. 1968. Química Orgánica Fundamental. Universidad de Harvard.
12. GUEVARA, M. 1998. Estudio preliminar de la densidad de madera verde en bolo de *Pinus caribaea*. Universidad de Pinar del Río.
13. HISHIKAWA, Y. 1999. *Characterization of amorphous domains in celulosic materials using a FTR deuteration monitoring analysis*. Polymer.
14. HO, Y. S. M. G. 1998. Sorption of dye from aqueous solution by peat. Chemical Engineering Journal.
15. HO, Y. S. M. G. 1999. A kinetic study of dye sorption by biosorbent waste product pith. Resources, Conservation and Recycling.
16. ICIDCA, A. 1982. *El almacenamiento del bagazo para la industria de derivados*.
17. ICIDCA, A. 1987. *Hidrólisis y tratamiento químico a los materiales celulosicos*.
18. KAHALED, A. 2009. Treatment of artificial textile dye effluent containing Direct Yellow 12 by orange peel carbon.

Bibliografía.

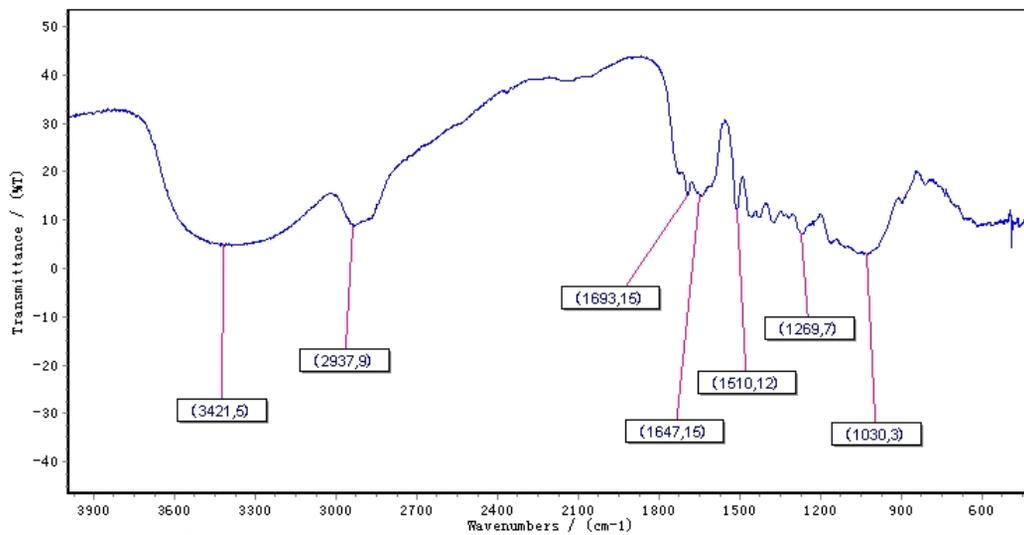
19. KANDELBAUER, A. 2005. Bioremediation for the decolorization of textile dyes a review. *Environmental Chemistry* 269-288.
20. KARUNANANDAA, K. 1992. chemical composition and biodegradability of crop residues colonized by white-rot fungi. *J. Sci. Food Agri.* 60,.
21. LEE, M. Y. H., K. J. 2003. Determination of de efficiency and removal mechanism of cobalt by craff Shell particles. *Journal of chemical techonology.*
22. LEÓN, N. 1999. Sistema de Gestión Ambiental. *Revista Normalización N-1*, 8-11.
23. MARTÍN, M. A. 2008. Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados., Universidad de Granada.
24. MAURYA, N. S. K., A.M. 2010. Biosorptive Color Removal: Applicability of Equilibrium Isotherm Models. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*
25. MCKAY, G. H., Y.S. 1998. A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various. *Process Safety and Environmental Protection.*
26. NIGAM, P. 2000. Solid-state substrate fermentation systems and their applications in biotechnology. *J. Basic Microbiol.* 6.
27. NIGAM, P. B., I.M. 1996. Microbial process of fast decolourization of textile effluent containing azo diazo and reactive dyes. *Process Biochem.*
28. OJEDA, J. R. 2011. Remoción de color en aguas residuales industriales por biosorción con residuos agrícolas e industriales., Universidad Central Martha Abreu de las Villas.
29. Ospina, V. (2008). Evaluación de inductores metálicos y co-sustratos para la remoción de negro reactivo 5 empleando *Pleurotus ostreatus* inmovilizado en fique. Facultad de Ciencias. Bogotá, Pontificia Universidad Javeriana.
30. PEARCE, C. I. 2003. The removal of textile wastewater using whole bacterial.
31. PERGASSERE, G. B. 2003. Influencia de las variables en el proceso orgánico para la delignificación., Univesrsidad de Córdoba.
32. PETERS, M. 1991. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*; 4th edition.
33. PORTUONDO, F. 1995. *Economía de Empresas Industriales.*
34. PRASETYO, I. 1992. Removal of toxic metals from aqueous solutions by biosorption. University Montreal.
35. RAGHAVARACHA, C. 1997. Colour removal from industrial effluents acomparative review of available technologies. . *Chem. Eng. World.*

Bibliografía.

36. RAMAKRISHNA, K. R. 1997. Dye removal using low cost adsorbents. *Water Sci Technol.*
37. RAMOS, J. 2010. Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (caucho) de café. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.
38. REYES, Y. 2007. No hay control sin mediciones de calidad. *Revista Normalización N-1*, 42-47.
39. ROSABAL, J. 1998. *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas*. Tomo I., México., Instituto Politécnico Nacional.
40. ROSABAL, J. 2006. *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. Tomo I., La Habana.
41. RUNPING, H. 2007. Biosorption of methylene blue from aqueous solution by fallen phoenix tree's leaves. *Journal of Hazardous Materials* 141
42. SHAN, H. 2009. Equilibrium Isotherm Studies of Methylene Blue Adsorption onto Activated Carbon Prepared from *Delonix regia* Pods
43. TREYBAL, R. 2002. *Operaciones con Transferencia de Masa*.
44. VARGAS, M. 2009. Evaluación del proceso de biosorción con cáscaras de naranja para la eliminación del colorante comercial Lanasol Navy CE en aguas residuales de la industria textil.
45. VELANDIA, O. 2008. *Fundación Polar*.
46. VIGNOTE, S. 1996. *Tecnología de la madera*.
47. VILCHEZ, R. 2005. Eliminación de metales pesados en aguas mediante sistemas de lechos sumergidos: estudio microbiológico en las biopelículas. *Universidad de Granada*.
48. VOLESKY, B. 2003. *Sorption and Biosorption*, BV Sorbex, Inc., Montreal-St Lambert, Quebec., Canadá.
49. ZANETTI, F. E. 1972. *Desa,kjolikhbd*.
50. ZAROR, C. A. 2000. *Introducción a la Ingeniería Ambiental para la Industria de Procesos*. Universidad de Concepción.Chile.3:31.
51. ([HTTP://WWW.MONOGRAFÍAS.COM/TRABAJOS34/CONTAMINACIÓNAMBIENTAL/CONTAMINACIÓN-AMBIENTAL.HTML](http://www.monografias.com/trabajos34/contaminacionambiental/contaminacion-ambiental.html)).
52. [HTTP://OPCIONBIO.ES/BLOG/ES/2012/04/24/CONTAMINACIÓN-DE-LA-INDUSTRIA-TEXTIL-%C2%BFHAY-SOLUCIONES/](http://opcionbio.es/blog/es/2012/04/24/contaminación-de-la-industria-textil-%C2%BFhay-soluciones/).
53. [HTTP://WWW.BUENASTAREAS.COM/ENSAYOS/RESIDUOS-FORESTALES/3100973.HTML](http://www.buenastareas.com/ensayos/residuos-forestales/3100973.html).
54. [HTTP://WWW.MONOGRAFÍAS.COM](http://www.monografias.com).

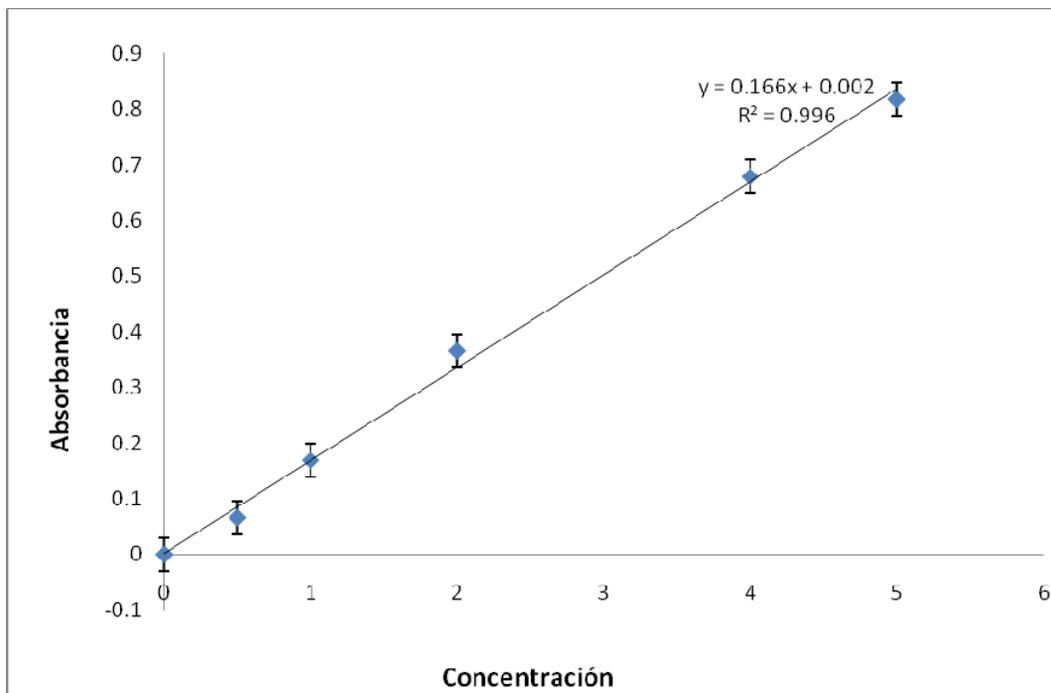
Anexos.

Anexo 1



2013/4/4 2:48 AC2.ASF

Anexo 2.



Anexos.

Anexo 3.

Alta Concentración de azul de Metileno

1.5g/100ml		T=30°C	
Tiempo (min)	Absorbancia	% Remoción	
5	0.051	96.54471545	
10	0.046	96.88346883	
20	0.043	97.08672087	
30	0.045	96.95121951	
40	0.047	96.81571816	
50	0.049	96.6802168	

Baja Concentración de azul de Metileno

1.5g/100ml		T=30°C	
Tiempo (min)	Absorbancia	% Remoción	
5	0.03	95.05766063	
10	0.028	95.38714992	
20	0.027	95.55189456	
30	0.029	95.22240527	
40	0.033	94.56342669	
50	0.035	94.2339374	

3g/100ml		T=30°C	
Tiempo (min)	Absorbancia	% Remoción	
5	0.053	96.40921409	
10	0.047	96.81571816	
20	0.043	97.08672087	
30	0.042	97.15447154	
40	0.042	97.15447154	
50	0.04	97.2899729	

3g/100ml		T=30°C	
Tiempo (min)	Absorbancia	% Remoción	
5	0.033	94.56342669	
10	0.03	95.05766063	
20	0.029	95.22240527	
30	0.03	95.05766063	
40	0.032	94.72817133	
50	0.033	94.56342669	

1.5g/100ml		T=50°C	
Tiempo (min)	Absorbancia	% Remoción	
5	0.144	90.24390244	
10	0.101	93.15718157	
20	0.087	94.10569106	
30	0.082	94.44444444	
40	0.08	94.5799458	
50	0.079	94.64769648	

1.5g/100ml		T=50°C	
Tiempo (min)	Absorbancia	% Remoción	
5	0.049	91.92751236	
10	0.045	92.58649094	
20	0.04	93.41021417	
30	0.043	92.91598023	
40	0.044	92.75123558	
50	0.045	92.58649094	

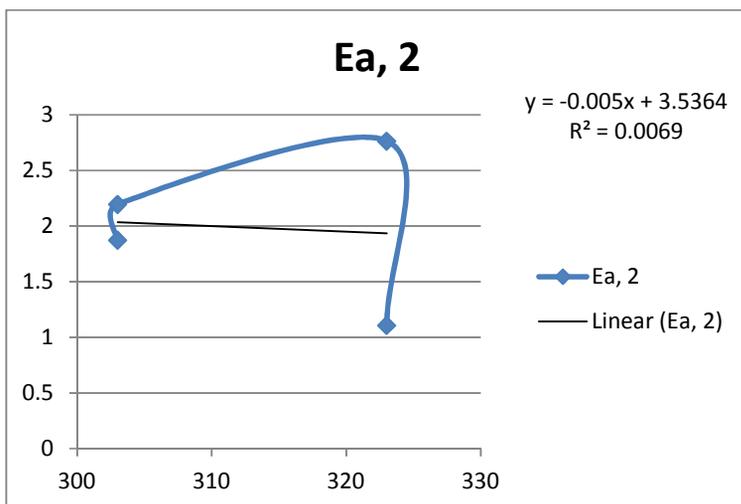
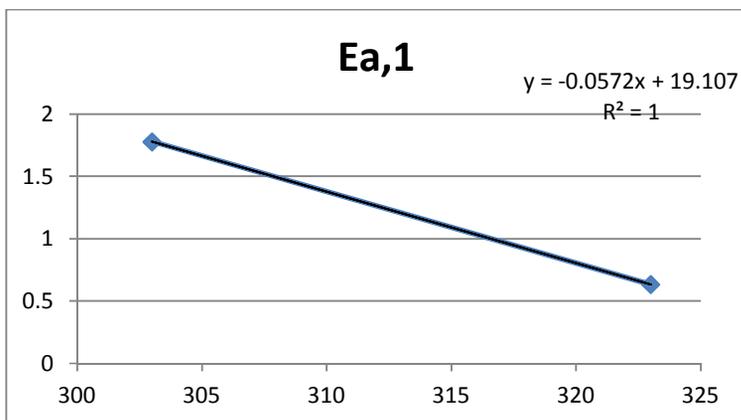
3g/100ml		T=50°C	
Tiempo (min)	Absorbancia	% Remoción	
5	0.099	93.29268293	
10	0.091	93.83468835	
20	0.087	94.10569106	
30	0.081	94.51219512	
40	0.08	94.5799458	
50	0.078	94.71544715	

3g/100ml		T=50°C	
Tiempo (min)	Absorbancia	% Remoción	
5	0.058	90.44481054	
10	0.056	90.77429984	
20	0.05	91.76276771	
30	0.047	92.25700165	
40	0.046	92.42174629	
50	0.045	92.58649094	

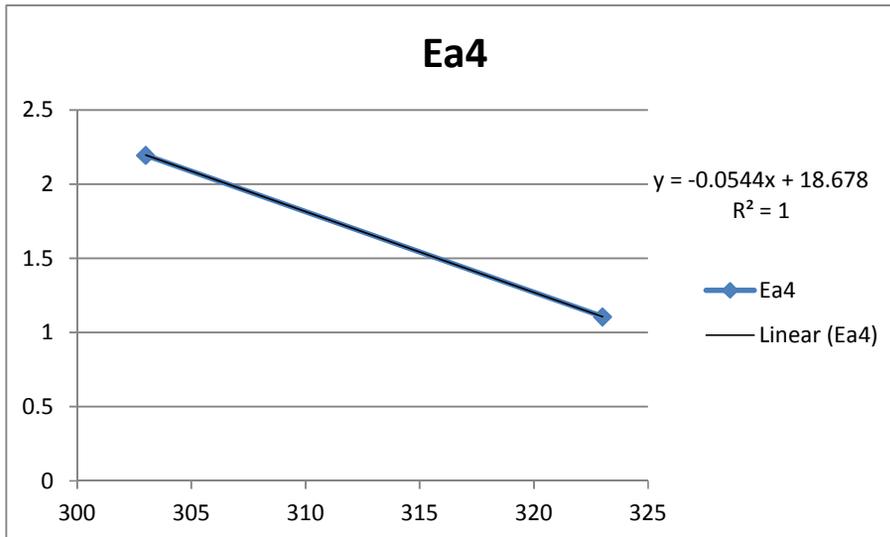
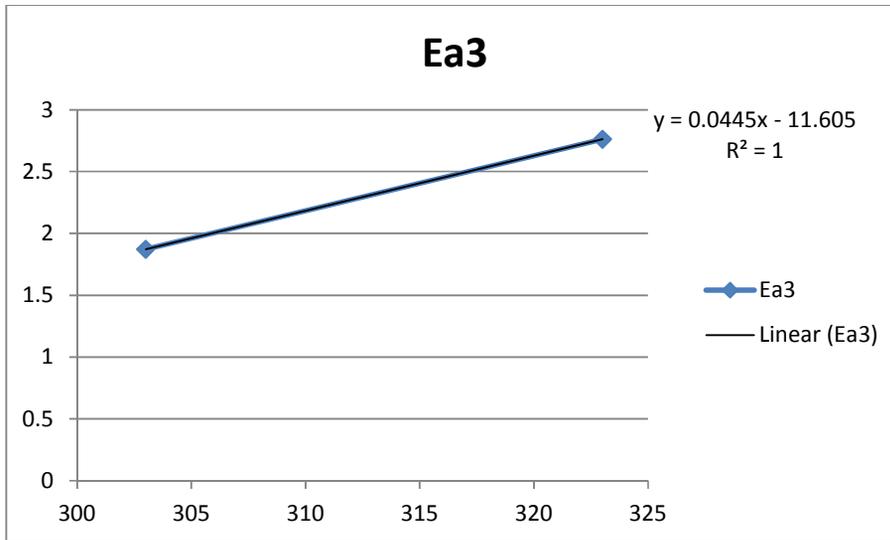
Anexos.

Anexo 4.

T(K)	log k
303	1.777644278
303	1.251881455
323	0.633771346
323	0.931712067
303	1.873041447
303	2.194375567
323	2.762678564
323	1.106360909



Anexos.



Anexo 5.

T30C	t20min	Abs inic	Abs equi.	Co	Ce	Co-Ce	q	logq	log Ce	1/q	1/Ce
		5	0.2919	30.10843	1.746386	28.36205	1.890803	0.276646	0.24214	0.528876	0.572611
		4	0.1722	24.08434	1.025301	23.05904	1.537269	0.18675	0.010851	0.650504	0.975323
		3.77	0.155	22.6988	0.921687	21.77711	1.451807	0.161909	-0.03542	0.688797	1.084967
		1.476	0.043	8.879518	0.246988	8.63253	0.575502	-0.23995	-0.60732	1.737613	4.04878
		0.607	0.03	3.644578	0.168675	3.475904	0.231727	-0.63502	-0.77295	4.315425	5.928571

Anexos.

Anexo 6.

T=30°C

25%aserrín y 75%bagazo			50%aserrín y 50%bagazo			75%aserrín y 25%bagazo		
Tiempo	Absorbancia	% Remoción	Tiempo	Absorbancia	% Remoción	Tiempo	Absorbancia	Remoción %
5	0.034	97.696477	5	0.037	97.4932249	5	0.038	97.4254743
10	0.033	97.7642276	10	0.035	97.6287263	10	0.036	97.5609756
20	0.029	98.0352304	20	0.031	97.899729	20	0.034	97.696477
30	0.031	97.899729	30	0.033	97.7642276	30	0.033	97.7642276
40	0.032	97.8319783	40	0.035	97.6287263	40	0.031	97.899729
50	0.034	97.696477	50	0.036	97.5609756	50	0.03	97.9674797

T=50°C

25%aserrín y 75%bagazo			50%aserrín y 50%bagazo			75%aserrín y 25%bagazo		
mezcla 7			mezcla 8			mezcla 9		
Tiempo	Absorbancia	% Remoción	Tiempo	Absorbancia	% Remoción	Tiempo	Absorbancia	Remoción %
5	0.053	96.4092141	5	0.054	96.3414634	5	0.079	94.6476965
10	0.049	96.6802168	10	0.048	96.7479675	10	0.071	95.1897019
20	0.051	96.5447154	20	0.053	96.4092141	20	0.065	95.596206
30	0.053	96.4092141	30	0.055	96.2737127	30	0.059	96.00271
40	0.055	96.2737127	40	0.057	96.1382114	40	0.057	96.1382114
50	0.059	96.00271	50	0.06	95.9349593	50	0.055	96.2737127

Anexos.

Anexo 7.

75%aserrín y
25%bagazo

Tiempo	Absorbancia	concentración	Ci-Ct	q	t/q	Δt	Δq	$\Delta q/\Delta t$	qe-qt
5	0.038	0.21686747	8.662651	0.57751	8.657858	0	0	0	0.002811
10	0.036	0.204819277	8.674699	0.578313	17.29167	5	1.001391	0.200278164	0.002008
20	0.034	0.192771084	8.686747	0.579116	34.53537	10	1.001389	0.100138889	0.001205
30	0.033	0.186746988	8.692771	0.579518	51.76715	10	1.000693	0.100069348	0.000803
40	0.031	0.174698795	8.704819	0.580321	68.92734	10	1.001386	0.1001386	0
50	0.03	0.168674699	8.710843	0.580723	86.09959	10	1.000692	0.100069204	-0.0004

75%aserrín y
25%bagazo

Tiempo	Absorbancia	concentración	Ci-Ct	q	t/q	Δt	Δq	$\Delta q/\Delta t$	qe-qt
5	0.079	0.463855422	8.415663	0.561044	8.911954	0	0	0	0.008835
10	0.071	0.415662651	8.463855	0.564257	17.72242	5	0.003213	0.00064257	0.005622
20	0.065	0.379518072	8.5	0.566667	35.29412	10	0.00241	0.000240964	0.003213
30	0.059	0.343373494	8.536145	0.569076	52.71701	10	0.00241	0.000240964	0.000803
40	0.057	0.331325301	8.548193	0.56988	70.19027	10	0.000803	8.03213E-05	0
50	0.055	0.319277108	8.560241	0.570683	87.61436	10	0.000803	8.03213E-05	-0.0008