



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO**  
**FACULTAD DE QUIMICA**

**DETERMINACION DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL  
(DESLAVADOS DE MEZCLILLA)**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO**

**PRESENTA**

**ADRIANA DIAZ JIMENEZ**

**SANTIAGO DE QUERETARO, QRO. SEPTIEMBRE 1999.**

No. Adq. H61578

No. Título \_\_\_\_\_

Clas. 628.3

D 542 d

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química  
Carrera de Químico Farmacéutico Biólogo

**DETERMINACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL  
(DESLAVADOS DE MEZCLILLA)**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el título de  
Químico Farmacéutico Biólogo

Presenta:

**ADRIANA DÍAZ JIMÉNEZ**

**SINODALES**

M. C. Adrián Rodríguez García

Director

M. C. Gustavo Pedraza Aboytes

Sinodal Propietario

Q. Alfonso Pérez Buenrostro

Sinodal Propietario

I.B.Q. Carlos Gerardo Zavala Porto

Sinodal Suplente

EL PRESENTE TRABAJO SE REALIZÓ EN EL DEPARTAMENTO DE  
TECNOLOGÍA AMBIENTAL DEL

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA**



**BAJO LA DIRECCIÓN DEL M. C. ADRIÁN RODRÍGUEZ GARCÍA Y  
LA ASESORÍA DEL M. C. GUSTAVO PEDRAZA ABOYTES  
(CENTRO DE ESTUDIOS ACADÉMICOS SOBRE CONTAMINACION  
AMBIENTAL DE LA UAQ)**

## **AGRADECIMIENTOS**

**Gracias Dios, porque aunque muchas veces te sentía muy lejos de mí, no era así en realidad, siempre estabas conmigo, hoy puedo decir sin duda que este logro me lo regalaste tú.**

**Todo lo puedo en Aquél que me fortalece.  
Filipenses 4,13.**

**Con mi más grande Amor, Agradecimiento, Respeto, Admiración y Devoción,  
a los dos seres más importantes de mi vida, mis Padres:**

**José Rosario Díaz Rivera y Ma. del Carmen Andrea Jiménez de Díaz.**

**En Memoria**

**Mi mayor agradecimiento al hombre que siempre ha estado a mi lado, Gracias por tu apoyo, comprensión y participación para que yo lograra terminar esta Tesis, pero sobre todo gracias por el amor que día con día me das.**

**Humberto Eduardo Aguirre Maldonado**

**Gracias a mis Hermanos: Lourdes, Salvador, Luz del Carmen, Rocío y Carlos, quienes siempre tenían una palabra de aliento en los momentos más difíciles, un consejo en los momentos de indecisión y la mayor disposición para ayudarme a lograr mis metas.**

**Gracias a los dos cuñados, quienes han sido mucho más que eso para mí: Juan Carlos García y Gloria Cuellar, quienes supieron ser apoyo cuando más lo necesitaba.**

**Gracias a mis más cercanas compañeras y amigas de la Facultad, Areli Rodríguez, Gaby Ruiz, Bárbara Arriaga y Mariana Gurrión, quienes supieron ser amigas tanto en buenos como en difíciles momentos de mi vida, Gracias por esa amistad desinteresada.**

**Un total agradecimiento al M. C. Adrián Rodríguez García quien siempre tuvo gran paciencia y disposición para realizar conmigo esta Tesis; Gracias por el apoyo brindado, por los conocimientos, experiencias y muy gratos momentos compartidos, Gracias porque además de haber sabido ser Asesor también supo ser Amigo.**

**Mi mayor agradecimiento al M. C. Gustavo Pedraza Aboytes por su apoyo, colaboración, gran disposición y tiempo dedicado a esta Tesis.**

**Un especial agradecimiento al Q. Alfonso Pérez Buenrostro, quien amablemente colaboró en la revisión de esta Tesis y tuvo siempre una gran disposición para conmigo.**

**I.B.Q. Carlos Gerardo Zavala Porto, Gracias por las sugerencias para mejorar mi Tesis.**

**Agradezco el apoyo brindado al Sistema de Investigación Miguel Hidalgo (SIHGO) por el apoyo brindado para la realización de esta Tesis, así como a CIDETEQ.**

**Gracias también a importantes amigos que afortunadamente encontré en mi camino:**

**C. P. Héctor Mendizabal González, por la amistad y apoyo brindados desinteresadamente, pero sobre todo por el apoyo en momentos difíciles, Gracias por haber sabido ser amigo y porque siempre pude contar con usted;**

**I.Q.M. Víctor Vega Reséndiz, por el gran apoyo y conceptos aportados, pero muy en especial Gracias por la amistad, y los momentos en los que me apoyabas para salir adelante de los lapsos difíciles, porque siempre pude contar contigo;**

**M. C. Carlos Estrada Arteaga, Gracias por los conocimientos transmitidos y Gracias por todos esos excelentes momentos de discusión de diferentes tópicos que compartíamos, eres un gran amigo.**

**Q. Yolanda Delgadillo Saldaña, Gracias por el apoyo y cooperación que amablemente siempre me brindaste, por las palabras de aliento que siempre recibí de ti y por dejarme compartir contigo muy agradables momentos.**

**Lic. Laura Alicia Biu Charnichart, Gracias por el cariño, apoyo y amistad que encontré en ti.**

**M. C. Jesús Cárdenas Mijangos, Gracias por los conocimientos compartidos y por el apoyo brindado cuando yo creía que nunca iba a terminar mi Tesis.**

**Gracias también a todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron en la realización de esta Tesis.**

## INDICE GENERAL

Indice General.....	i
Indice de Tablas.....	vi
Indice de Figuras.....	ix
RESUMEN.....	1
I. INTRODUCCION.....	3
I.1.Aspectos Generales.....	3
I.1.1.Generalidades de la Industria Textil.....	3
I.1.2.Procesos de Producción de la Industria de Deslavados de Mezclilla.....	5
I.1.3.Tipos de Corrientes de Descarga en la Industria de Deslavados de Mezclilla.....	8
I.1.4.Importancia del Indigo en la Industria de la Mezclilla.....	8
I.1.5.Clasificación de los Contaminantes en el Agua.....	9
I.1.6.Generalidades de Tratamiento de Aguas Residuales.....	11
I.1.7.Velocidades de las Reacciones Químicas.....	22
I.2.Coagulación y Floculación.....	26
I.2.1.Antecedentes.....	26
I.2.2.Principio Químico.....	26
I.2.3.Coagulación.....	28
I.2.4.Floculación.....	29
I.2.5.Productos Químicos Coagulantes y Floculantes.....	30

I.2.6. Aplicaciones de la Coagulación y Floculación.....	32
I.2.7. Ventajas y Desventajas de la Coagulación – Floculación.....	34
I.3. Método Electroquímico (Electroflotación).....	34
I.3.1. Antecedentes.....	34
I.3.2. Principio Químico.....	35
I.3.3. Electrofloculación/Electroflotación.....	36
I.3.4. Electrofloculación.....	36
I.3.5. Electroflotación.....	37
I.3.6. Ventajas y Desventajas de la Electroflotación.....	39
I.4. Digestión Anaerobia.....	40
I.4.1. Antecedentes.....	40
I.4.2. Digestión Anaerobia.....	41
I.4.3. Mecanismo de la Digestión Anaerobia.....	41
I.4.4. Microbiología de la Digestión Anaerobia.....	44
I.4.5. Procesos de Tratamiento Anaeróbico.....	46
I.4.6. Aclimatación.....	46
I.4.7. Factores Ambientales que afectan la Digestión Anaerobia.....	47
I.4.8. Factores que deben estar en Equilibrio para lograr la Digestión Anaerobia.....	49
I.4.9. Reactores Anaerobios.....	50
I.4.10. Principales Características de Operación del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA).....	51
I.4.11. Ventajas y Desventajas de la Digestión Anaerobia .....	53
I.5. Ozonización.....	53
I.5.1. Antecedentes.....	53
I.5.2. Propiedades del Ozono.....	55
I.5.3. Mecanismo de la Generación de Ozono.....	56

I.5.4.Ventajas y Desventajas del Tratamiento con Ozono.....	58
I.6.Filtración por Carbón Activado.....	58
I.6.1.Antecedentes.....	58
I.6.2.Principio Químico.....	59
I.6.3.Métodos de Fabricación del Carbón Activado.....	59
I.6.4.Principales Aplicaciones del Carbón Activado.....	60
I.6.5.Columnas a Escala para Pruebas Rápidas.....	61
I.6.6.Ventajas y Desventajas del Tratamiento con Carbón Activado.....	61
1.7 Método Taguchi.....	62
II. OBJETIVOS E HIPOTESIS.....	73
II.1.Objetivos.....	73
II.1.1.Objetivo General.....	73
II.1.2.Objetivos Particulares.....	73
II.2.Hipótesis de Trabajo.....	74
III. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	75
III.1.Diseño de los Experimentos de Coagulación – Flocculación y Electroflotación siguiendo la Metodología Taguchi.....	75
III.1.1.Coagulación – Flocculación.....	75
III.1.2.Electroflotación.....	78
a) Electrodo de Aluminio.....	78
b) Electrodo de Hierro.....	81

III.2.Diseño de los Experimentos de Digestión Anaerobia, Ozonización y Filtración por Carbón Activado.....	84
III.2.1.Digestión Anaerobia.....	85
III.2.2.Ozonización.....	85
III.2.3.Filtración por Carbón Activado.....	85
IV. MATERIAL Y METODOS.....	86
IV.1.Condiciones de la Muestra.....	86
IV.2.Curvas de Máxima Absorbancia Espectral.....	86
IV.3.Coagulación – Floculación.....	87
IV.4.Electroflotación.....	89
IV.5.Digestión Anaerobia.....	91
IV.6.Ozonización.....	93
IV.7.Filtración por Carbón Activado.....	94
V. RESULTADOS.....	96
V.1.Caracterización Fisicoquímica de la Muestra de Agua Residual de Deslavados de Mezclilla.....	96
V.1.1.Agua Sucia (Tallado – Descrude).....	96
V.1.2.Agua Semisucia (Enjuague – Suavizado).....	99
V.2.Resultados del Tratamiento por Coagulación – Floculación.....	102
V.3.Resultados del Tratamiento por Electroflotación.....	113
V.3.1.Electrodo de Aluminio.....	113
V.3.2.Electrodo de Hierro.....	123
V.4.Resultados de Digestión Anaerobia.....	132
V.5.Resultados de Ozonización.....	137
V.6.Resultados de Filtración por Carbón Activado.....	141
V.7.Comparación de los Métodos de Tratamiento.....	144

V.8. Resumen de Resultados.....	145
VI. DISCUSION DE RESULTADOS.....	146
VII. CONCLUSIONES.....	150
VIII. RECOMENDACIONES.....	151
VIII.1.Sistema de Tratamiento para la Industria de Deslavados de Mezclilla.....	151
APENDICE I. ASPECTO DE LA MUESTRA INICIAL Y DESPUES DE CADA TRATAMIENTO.....	154
BIBLIOGRAFIA.....	156
ANEXO I. INFORMACION TECNICA DE LOS POLIMEROS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO POR COAGULACION – FLOCULACION.....	160
ANEXO II. INFORMACION TECNICA DEL CARBON ACTIVADO UTILIZADO.....	163
ANEXO III. NORMAS PARA METODOS DE ANALISIS.....	164

## INDICE DE TABLAS

### TABLA

1.1. Condiciones Particulares de Descarga (Deslavados de Mezclilla).....	4
1.2. Tipos de Tratamiento de Aguas Residuales.....	12
1.3. Características de los Polímeros Orgánicos.....	32
1.4. Condiciones Típicas de Operación de un RAFA.....	52
1.5. Solubilidad del Ozono y del Oxígeno en Agua.....	55
1.6. Marco Calidad – Costo.....	63
3.1. Variables incluidas en el Diseño de acuerdo al Método Taguchi para el Tratamiento de Coagulación – Floculación.....	75
3.2. Factores y Niveles que se incluirán en el Diseño de acuerdo a Taguchi en Coagulación – Floculación.....	76
3.3. Arreglo Ortogonal elegido para Coagulación – Floculación.....	77
3.4. Arreglo Ortogonal Ajustado (a utilizar).....	78
3.5. Variables incluidas en el Diseño de acuerdo al Método Taguchi para el Tratamiento de Electroflotación con Aluminio.....	79
3.6. Factores y Niveles que se incluirán en el Diseño de acuerdo a Taguchi en Electroflotación con Aluminio.....	80
3.7. Arreglo Ortogonal elegido para Electroflotación con Aluminio.....	80
3.8. Arreglo Ortogonal a Utilizar.....	81
3.9. Variables incluidas en el Diseño de acuerdo al Método Taguchi para el Tratamiento de Electroflotación con Hierro.....	82
3.10. Factores y Niveles que se incluirán en el Diseño de acuerdo a Taguchi en Electroflotación con Hierro.....	83
3.11. Arreglo Ortogonal elegido para Electroflotación con Hierro .....	83

3.12. Arreglo Ortogonal a Utilizar.....	84
5.1.Resultados de Caracterización Fisicoquímica de la Muestra de Tallado – Descrude.....	96
5.2.Datos de Curva de Máxima Absorbancia Espectral del Agua de Tallado – Descrude.....	97
5.3.Resultados de Caracterización Fisicoquímica de la Muestra de Enjuague – Suavizado.....	99
5.4.Datos de Curva de Máxima Absorbancia Espectral del Agua de Enjuague – Suavizado.....	99
5.5.Resultados del Tratamiento por Coagulación – Floculación.....	102
5.6.Factores y Niveles Incluidos en el Diseño de acuerdo a Taguchi para Coagulación – Floculación.....	103
5.7.Factores, Niveles y Resultados del Tratamiento por Coagulación – Floculación.....	103
5.8.Tabla de Respuesta Promedio de Coagulación – Floculación.....	105
5.9.Interacciones entre Coagulante y Floculante.....	109
5.10.Corridas Experimentales Confirmatorias de Coagulación – Floculación.....	111
5.11.Resultados de la combinación del Campeón Económico en Coagulación – Floculación.....	112
5.12.Resultados del Tratamiento por Electroflotación con Aluminio.....	113
5.13.Factores y Niveles Incluidos en el Diseño de acuerdo a Taguchi para Electroflotación con Aluminio.....	114
5.14.Factores, Niveles y Resultados del Tratamiento por Electroflotación con Aluminio.....	114
5.15.Tabla de Respuesta Promedio de Electroflotación con Aluminio.....	116

5.16. Corridas Experimentales Confirmatorias de Electroflotación con Aluminio.....	120
5.17. Resultados de la combinación del Campeón de Papel en Electroflotación con Aluminio.....	121
5.18. Resultados de la combinación del Campeón Económico en Electroflotación con Aluminio.....	122
5.19. Resultados del Tratamiento por Electroflotación con Hierro.....	123
5.20. Factores y Niveles Incluidos en el Diseño de acuerdo a Taguchi para Electroflotación con Hierro.....	124
5.21. Factores, Niveles y Resultados del Tratamiento por Electroflotación con Hierro.....	124
5.22. Tabla de Respuesta Promedio de Electroflotación con Hierro.....	126
5.23. Corridas Experimentales Confirmatorias de Electroflotación con Hierro.....	130
5.24. Resultados de la Combinación del Campeón Económico en Electroflotación con Hierro.....	131
5.25. Resultados de Digestión Anaerobia.....	132
5.26. Datos de Gráfica de Cinética de Reacción del RAFA.....	134
5.27. Resultados del Tratamiento de Digestión Anaerobia por 1.5 días en el RAFA.....	136
5.28. Resultados del Tratamiento con Ozono.....	138
5.29. Datos de Gráfica de Cinética de Ozonización.....	139
5.30. Resultados del Tratamiento con Carbón Activado.....	141
5.31. Datos de Gráfica del Punto de Saturación del Carbón Activado.....	142
5.32. Comparación de los 5 Métodos Empleados.....	144
5.33. Resumen de Resultados obtenidos en cada uno de los Métodos de Tratamiento.....	145
9.1. Especificaciones del Carbón Activado.....	163

## INDICE DE FIGURAS

### FIGURA

1.1. Coagulación y Floculación.....	27
1.2. Diagrama de Digestión Anaerobia de la Materia Orgánica a Metano.....	43
1.3. Principales Bacterias involucradas en la Digestión Anaerobia.....	45
1.4. Diagrama esquemático de un RAFA.....	52
1.5. Configuración Básica de un Ozonizador.....	57
4.1. Batería de Agitadores para Prueba de Jarras.....	88
4.2. Dispositivo de Laboratorio para Electroflotación.....	90
4.3. Arreglo experimental del RAFA.....	92
4.4. Dispositivo de Laboratorio para Pruebas de Ozonización.....	94
4.5. Columna de Carbón Activado a Nivel Laboratorio.....	95
5.1. Curva de Máxima Absorbancia Espectral del Agua de Tallado – Descrude.....	98
5.2. Curva de Máxima Absorbancia Espectral del Agua de Enjuague – Suavizado.....	101
5.3. Gráfica Factorial para los Promedios de Coagulante.....	106
5.4. Gráfica Factorial para los Promedios de Floculante.....	106
5.5. Gráfica Factorial para los Promedios de pH en Coagulación – Floculación.....	107
5.6. Gráfica Factorial para los Promedios de Corriente Aplicada en Electroflotación con Aluminio.....	117
5.7. Gráfica Factorial para los Promedios de Tiempo de Tratamiento de Electroflotación con Aluminio.....	117

5.8.Gráfica Factorial para los Promedios de pH en Electroflotación con Aluminio.....	118
5.9.Gráfica Factorial para los Promedios de Corriente Aplicada en Electroflotación con Hierro.....	127
5.10.Gráfica Factorial para los Promedios de Tiempo de Tratamiento de Electroflotación con Hierro.....	127
5. 11.Gráfica Factorial para los Promedios de pH en Electroflotación con Hierro.....	128
5.12.Gráfica de Cinética de Reacción y Representación Gráfica del Ajuste de Datos del RAFA.....	135
5.13.Gráfica de Cinética de Reacción y Representación Gráfica del Ajuste de Datos de Ozonización.....	140
5.14.Gráfica del Punto de Saturación del Carbón Activado.....	143
8.1.Diagrama de Bloques del Sistema propuesto para el Tratamiento de Agua Residual de Deslavados de Mezclilla.....	152
8.2.Diagrama de Flujo Esquemático del Sistema de Tratamiento propuesto.....	153

## RESUMEN

Actualmente la Industria del giro Textil tiene costos de operación considerablemente elevados por consumo de agua y paralelamente se ha tenido poco éxito en el desarrollo de métodos de tratamiento de aguas residuales de alta efectividad y a bajo costo, por lo que esta industria requiere urgentemente reducir la carga de contaminantes contenidos en sus descargas con el objeto de poder reutilizarla en sus procesos de producción.

En este trabajo se muestra la comparación de la eficiencia de diferentes métodos de tratamiento empleados y destinados a elevar la calidad del agua residual generada en los procesos de la Industria Textil, específicamente Deslavados de Mezclilla.

El agua residual de dicha Industria se encuentra contaminada por alta DBO, DQO, color, partículas sólidas y disueltas provenientes de los productos químicos utilizados; de donde surge la necesidad de instalar, o bien adecuar una planta de tratamiento de aguas residuales, buscando que su costo sea lo más bajo posible, para ajustarse al presupuesto con el que se cuenta y que además cumpla con las condiciones de tratamiento deseadas.

Se propone un sistema de tratamiento, el cual fue determinado en base a evaluaciones de pruebas experimentales, verificadas con el agua residual proveniente de los procesos de Tallado-Descrude y Enjuague-Suavizado de la Industria de Deslavados de Mezclilla, de tal manera que sea posible su reutilización, o bien sea canalizada al riego de áreas verdes, para lo que se requiere lograr una eliminación de hasta el 100% de color.

Es importante mencionar que parte de este estudio estuvo basado en el método de Ingeniería de Calidad desarrollado por el Dr. G. Taguchi, utilizado para lograr la optimización del Diseño de Experimentos y con ello mejorar tanto los costos como la calidad de los procesos. Dicho método se utilizó como base para el diseño de los experimentos de Coagulación-Floculación y Electroflotación, con el objeto de facilitar la elección de las mejores condiciones de operación que permitieran obtener una mayor reducción de contaminantes, principalmente en los

niveles de DQO y Color en el agua residual. Asimismo se evaluaron otros métodos de depuración para este tipo de efluente, entre los cuales se realizó el arranque de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente y se evaluaron los métodos de Ozonización y Carbón Activado, como otras alternativas para la eliminación de Color y DQO.

Los resultados obtenidos muestran que el tratamiento por Electroflotación utilizando electrodos de Aluminio, es el que permite obtener una mayor calidad en el agua tratada, ya que la eliminación del color es casi al 100%, en cuanto a la eliminación de DQO se obtiene un valor considerablemente importante.

Por otra parte, el tratamiento de Coagulación y Floculación ofrece también una alternativa eficiente, ya que los valores obtenidos en la remoción de Color y DQO, son muy cercanos a los obtenidos en la Electroflotación con Aluminio.

Los métodos de tratamiento de Ozonización y Filtración por Carbón Activado, ofrecen un porcentaje de eliminación de color considerable, mientras que la Digestión Anaerobia, presenta una eliminación poco importante de color.

Se determinó un solo tren de tratamiento para las dos corrientes de descarga que presenta la Industria de Deslavados de Mezclilla, ofreciendo con ello un tratamiento menos costoso.

# **CAPITULO I.**

## **INTRODUCCIÓN**

### **I.1 ASPECTOS GENERALES**

#### **I.1.1 Generalidades de la Industria Textil**

Los efluentes generados por la industria textil representan una fuente potencial contaminante de aguas superficiales y sólo un porcentaje mínimo es tratado, originando problemas ecológicos significativos. En los diferentes procesos de fabricación del sector industrial textil, se generan volúmenes importantes de agua residual con elevada concentración de contaminantes. Entre estos, los colorantes, materia orgánica, temperatura y pH son los más significativos. En términos generales, el agua presenta elevadas cargas de DQO, DBO, SST, colores diversos, pH variable y temperatura alta cuando se realizan los procesos de preparación, teñido y acabado.

De las diversas alternativas de tratamiento destacan: neutralización; coagulación/precipitación; cloración; oxidación química (ozono, peróxido, UV); bio-oxidación (lodos activados, lagunas de estabilización); tratamiento anaerobio; adsorción en carbón activado; ultrafiltración, nanofiltración; entre otras. No obstante que el proceso biológico es relativamente económico, su uso se encuentra restringido a causa de la presencia de compuestos de naturaleza química resistente a la biodegradación. Este problema comúnmente se resuelve empleando un pretratamiento al proceso biológico.

Aun cuando se han usado varios métodos de tratamiento, éstos no han resultado factibles debido a que se combinan los drenajes de distintos procesos y por la variación con el tiempo en composición de sus efluentes, aunado al desconocimiento en aspectos técnicos sobre el mecanismo de degradación de los

residuos de la industria textil. Además, presentan desventajas en cuanto a sus costos de operación y mantenimiento. En consecuencia, las aguas tratadas no cumplen los requerimientos de calidad que marca la normatividad (Condiciones Particulares de Descarga, C.P.D.) y no pueden ser reutilizadas dentro del proceso de producción por presencia del color y materia orgánica (Mendoza y Guerrero, 1997).

En la Tabla 1.1 podemos observar los valores de las Condiciones Particulares de Descarga establecidos para la Industria Textil (Deslavados de Mezclilla) de la que se obtuvieron las muestras utilizadas dentro de este trabajo.

Tabla 1.1. Condiciones Particulares de Descarga (Deslavados de Mezclilla).

PARAMETROS	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES
Conductividad Eléctrica	1100 $\mu$ S/cm
DQO	100 mg/L
pH	6.5 – 8.5
Color	30 UptCo
Al	2 mg/L
Fe	1 mg/L

Gran parte de las industrias Textiles se dedican únicamente a los Deslavados de Mezclilla, y son empresas pequeñas (la capacidad actualmente es de 250,000 prendas por semana) pero con un gasto desorbitado de agua, el factor uso del agua oscila en 1200 a 1600 m<sup>3</sup> cada 24 horas, superior a los 800 m<sup>3</sup> utilizados en otras partes del mundo, por lo que requieren de un sistema de tratamiento efectivo y económico (Rodríguez, 1996).

El origen de los compuestos contaminantes en el Agua Residual Textil son las impurezas naturales extraídas de la fibra y de los procesos químicos, las cuales son removidos de la ropa y descargados como residuos.

Los materiales utilizados en la Industria Textil y de Teñido pueden ser subdivididos dentro de 3 grupos: algodón, lana y fibras sintéticas.

### **I.1.2 Procesos de Producción de la Industria de Deslavados de Mezclilla**

Sin duda alguna es de importancia conocer los procesos detallados de la Industria de Deslavados de Mezclilla, con el objeto de identificar claramente los contaminantes que son generados en cada etapa del proceso.

Las empresas de Deslavados se dedican a procesar todo tipo de prendas de mezclilla, en sus diferentes acabados tales como Stone Wash, Stone Bleach, Suavizados y Teñidos.

#### Descripción de los procesos de producción.

#### **PROCESO: STONE WASH.**

Primera fase: desgome.

Esta fase tiene como objetivo la eliminación del apresto el cual consta fundamentalmente de un recubrimiento de derivados de almidón o féculas y en ocasiones también se utilizan resinas acrílicas o poliamílicas. En este proceso se utilizan humectantes, lubricantes y enzimas de desgome a 60 °C durante veinte minutos.

Segunda fase: tallado.

El propósito de esta fase es provocar un efecto de desgaste sobre la prenda y se realiza mediante el empleo de ácido acético (pH 4.5 a 5) y con enzima de

tallado a 60 °C en un tiempo de 30 a 40 minutos, dependiendo del tipo de acabado que el cliente desee.

Tercera fase: blanqueado.

Este se lleva a cabo en el momento en que se realiza un proceso de Stone Bleach, es decir, se realiza principalmente un clorado con hipoclorito de sodio, a fin de conseguir un efecto de blanqueado mediante un proceso de oxidación-reducción.

Cuarta fase: neutralizado.

Esta operación se realiza normalmente con un producto llamado bisulfito de sodio, el cual neutraliza la acción del cloro.

Quinta fase: lavado.

Normalmente aquí se utiliza un detergente antirredesitante, el cual es muy útil para eliminar la redepositación del índigo en la prenda, así como también un blanqueador óptico para dar un mejor contraste entre los puntos blancos y azules de la tela a 50 °C por un tiempo de diez minutos.

Sexta fase: suavizado.

Durante esta etapa se aplica suavizante para darle un tacto agradable a la prenda.

**PROCESO: SUAVIZADO.**

Primera fase: desgome.

En esta fase el principal objetivo es la eliminación del apresto protector del tejido de mezclilla. Generalmente se utilizan de 6 a 8 litros de agua por kilo de prenda, a una temperatura de 60 °C durante un tiempo de 20 minutos, con humectante al 1.0 % y enzima de desgome al 1.0 %.

Segunda fase: suavizado.

Se llena una máquina con una relación de baño de 1:6, al cual se adiciona ácido acético al 0.3 % y suavizante al 2.0 % por un tiempo de 10 minutos en frío.

## PROCESO DE TEÑIDO.

Primera fase: desgome.

El principal objetivo es la eliminación del apresto protector del tejido de mezclilla. Normalmente se utilizan de 6 a 8 litros de agua por cada kilo de prenda, a una temperatura de 60 °C por un tiempo de 10 minutos con humectante al 1.0 % y enzima de desgome al 1.0 %. Posteriormente se eleva la temperatura a 80 °C y se le adiciona sosa cáustica a razón de 4 gramos por litro en el mismo baño por 10 minutos, transcurridos los cuales se tira el baño.

Segunda fase: neutralizado.

Para neutralizar los residuos de la sosa cáustica que hayan quedado depositados sobre la tela, se adiciona ácido acético al 1.0 % y humectante al 0.5 % en un lapso de tiempo de 5 minutos a 50 °C, así como una relación de baño de 1:6.

Tercera fase: teñido.

Se llena la máquina a una relación de baño de 1:7. Se adiciona humectante y el color requerido en frío durante 5 minutos y se eleva la temperatura hasta 80 °C. Posteriormente se le adicionan de 10 a 50 gramos por litro de sal común, en base a la cantidad de colorante. Se mantiene la temperatura aproximadamente de 30 a 40 minutos, según el tono que se desee (Nemerrow y Dasgupta, 1991).

### **I.1.3 Tipos de Corrientes de Descarga en la Industria de Deslavados de Mezclilla**

De acuerdo a los procesos que se manejan en la Industria de Deslavado de Mezclilla, se encuentran dos tipos de corriente de descarga, las cuales son:

- Agua proveniente de Tallado – Descrude, a la cual se le conoce en dicha industria como el “Agua Sucia”, este tipo de corriente viene contaminada con una alta cantidad de color, apresto, detergente y tiene una gran cantidad de materia orgánica y visualmente se trata de un agua de color azul marino (Ver Apéndice I).
- Agua proveniente de Enjuague – Suavizado, a la cual se le conoce como Agua “Semisucia”, denominada de este modo debido a la poca cantidad de contaminantes, ya que como su nombre lo indica es agua utilizada en el enjuague de las prendas y contiene una mínima cantidad de materia orgánica, además de tratarse de agua ligeramente azul (Ver Apéndice I) (Rodríguez, 1996).

### **I.1.4 Importancia del Índigo en la Industria de la Mezclilla**

El índigo es un colorante natural, y uno de los principales colorantes utilizados en el mundo, por lo que requirió ser fabricado por medio de una ruta sintética.

La estructura del índigo fue determinado en 1880 por A. Von Bayer y se realizó una síntesis comercial de este colorante, por K. Heumann en 1890.

A mediados de 1970 alcanzó novedosas proporciones su demanda ya que se utilizaba en la fabricación de pantalones de mezclilla (“blue jeans”),

recientemente se estima que la demanda industrial a nivel mundial es de 13,000 toneladas métricas por año.

El índigo ahora es un producto sintético pero originalmente era un colorante natural obtenido de una hoja llamada "indigofera tinctoria", que es una leguminosa, extensamente distribuida en Asia, Africa, y América, el colorante se encuentra contenido solamente en la hoja de dicha planta; el desarrollo de este colorante comenzó en la India, tiempo antes de que Levi Strauss inventara los pantalones de mezclilla.

El índigo es el colorante más antiguo utilizado por el hombre, su método de preparación está descrito en los antiguos escritos en Sánscrito; las Tumbas Egipcias tiene en su interior momias envueltas en ropas teñidas con índigo. El nombre mismo es derivado del nombre medieval "indicum", una palabra en latín.

Este colorante no solamente fue usado para teñir fibras de prendas de vestir, ha sido usado desde la antigüedad en pinturas y cosméticos (Wiley, 1990).

### **1.1.5 Clasificación de los Contaminantes en el Agua**

El agua es el solvente universal, es utilizada en muchos y muy variados procesos y luego descargada, transportando materiales suspendidos, flotantes y disueltos. Como resultado del crecimiento y la expansión de las industrias, la asimilación por procesos naturales para las corrientes y lagos no puede darse abasto con el incremento de la contaminación.

Las corrientes pueden ser afectadas por 3 tipos de contaminantes: (1) químicos, (2) físicos y (3) biológicos.

Los contaminantes químicos comprenden compuestos orgánicos como inorgánicos (ambos tóxicos). El aspecto fundamental resultante de la contaminación por compuestos orgánicos, es la disminución de oxígeno como resultante de la utilización del existente en el proceso de degradación biológica de dichos compuestos. En el caso de la contaminación derivada de la presencia de compuestos inorgánicos, el resultado más importante es su posible efecto tóxico, más que la disminución en oxígeno. Sin embargo, hay casos en los cuales los compuestos inorgánicos presentan una demanda de oxígeno, contribuyendo a la disminución del mismo. Los sulfitos y los nitritos, por ejemplo, toman oxígeno para oxidarse a sulfatos y nitratos.

Los iones de metales pesados, tóxicos para los seres humanos, son importantes contaminantes de este grupo. Se presentan en las aguas residuales industriales resultado de las operaciones de tratamiento de superficies, así como de las industrias de fabricación de pigmentos y pinturas. Incluyen mercurio, arsénico, cobre, zinc, níquel, cromo, plomo, cadmio. Su presencia, aun en pequeñas cantidades (concentraciones mínimas detectables), pueden causar serios problemas.

Algunos contaminantes físicos incluyen (1) cambios térmicos (contaminación térmica). Es el caso de aguas procedentes de plantas industriales, relativamente calientes después de haber sido utilizadas en los intercambiadores (enfriadores); (2) el color (por ejemplo, los licores negros que se descargan procedentes de las plantas de fabricación de pasta química); (3) turbidez (originada por la descarga de aguas que contienen sólidos en suspensión); (4) espumas [detergentes tales como sulfonato de alquilbenceno (SAB) constituyen una causa importante de formación de espumas]; y (5) radiactividad.

Los contaminantes biológicos son los responsables de la transmisión de enfermedades en las aguas de abastecimiento y está causada por la introducción de microorganismos, algas, hongos, bacterias y virus.

## **I.1.6 Generalidades de Tratamiento de Aguas Residuales**

### **Niveles de Tratamiento de Aguas Residuales**

El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente. La Tabla 1.2 presenta una clasificación convencional de los procesos de tratamiento de aguas residuales más utilizados.

El tratamiento preliminar consiste en remover de las aguas residuales los sólidos flotantes o suspendidos de tamaño relativamente grande.

El tratamiento primario se refiere a la remoción de la mayor parte de los sólidos en suspensión contenidos en las aguas residuales.

El tratamiento secundario agrupa procesos capaces de eliminar de los efluentes primarios, los sólidos que aún contiene, entre ellos están los tratamientos biológicos convencionales. En cuanto al tratamiento terciario su objetivo fundamental es la eliminación de contaminantes (sustancias suspendidas y disueltas) que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales.

Tabla 1.2. Tipos de Tratamiento de Aguas Residuales.

Tratamiento Preliminar
Cribado o desbrozo
Desarenación
Igualación y Homogeneización
Neutralización
Tratamiento Primario
Preaireación
Separación de grasas y aceites
Sedimentación
Coagulación y Floculación
Flotación
Tratamiento secundario
Lodos activados
Filtros biológicos (percoladores)
Discos biológicos
Tratamiento anaerobio
Tratamiento terciario o "avanzado"
Microtamizado
Filtración (lecho de arena, antracita, diatomeas...)
Adsorción (carbón activado)
Intercambio iónico
Ósmosis inversa
Electrodialisis
Cloración y ozonización

Se han desarrollado procesos de tratamiento físicos, químicos y biológicos para la depuración de aguas residuales. Para escoger el proceso más apropiado para cada caso en particular, es necesario considerar una serie de condiciones, entre ellas, se pueden mencionar las siguientes:

- a) Características del agua residual cruda: DBO, DQO, materia en suspensión, pH, sustancias tóxicas.
- b) Calidad del efluente de salida requerido (especificaciones del agua tratada).
- c) Costos relativos.
- d) Compatibilidad de un proceso de tratamiento con etapas anteriores o posteriores.

### Tratamientos Preliminares

#### Cribado.-

También llamado desbrozo, se emplea para la reducción de sólidos en suspensión de tamaños distintos, para lo cual se utilizan las cribas o rejillas. La distancia o las aberturas de las rejillas dependen del objeto de las mismas. Las materias sólidas recogidas se suelen clasificar en finos y gruesos.

Las rejillas de finos tienen aberturas de 5 mm o menos. Generalmente están fabricadas de malla metálica de acero, o en base a placas o chapas de acero perforado y se usan muchas veces en lugar de tanques de sedimentación. Las rejillas o cribas de gruesos tienen aberturas que pueden oscilar entre los 4 y 8 o 9 cm. Se usan como elementos de protección para evitar que sólidos de grandes dimensiones dañen las bombas y otros equipos mecánicos (Ramalho, 1991).

#### Desarenación.-

La desarenación se emplea para remover gravillas, arenas, cenizas y otros materiales inorgánicos presentes en las aguas residuales. La desarenación se ubica generalmente después del cribado y antes de la sedimentación primaria. Con

esta operación se busca remover partículas de un tamaño igual o mayor a 0.21 mm.

#### Igualación y Homogeneización.-

Los flujos de agua a una planta de tratamiento están sujetos a fluctuaciones temporales, tanto en cantidad como en calidad.

El objetivo de la igualación cuya denominación más correcta es de regularización, es el de reducir las variaciones bruscas del gasto y entregar un gasto más o menos constante a una unidad de tratamiento.

El objetivo de la homogeneización es el de reducir variaciones bruscas en la concentración de un contaminante del agua residual con el fin de entregar una concentración más uniforme a una unidad de tratamiento.

#### Neutralización.-

El tratamiento de neutralización se utiliza normalmente en los siguientes casos que se presentan en la depuración de aguas residuales:

1. Antes de la descarga de aguas residuales en un medio receptor.
2. Antes de la descarga de aguas residuales industriales al alcantarillado municipal.
3. Antes del tratamiento químico o biológico. Para los tratamientos biológicos, el pH del sistema se mantiene en un intervalo comprendido entre 6.5 y 8.5 para asegurar una actividad biológica óptima.

Existen varios métodos para lograr la neutralización, los más usuales son:

- Mezclar aguas residuales ácidas y alcalinas con el fin de obtener un pH lo más próximo a la neutralidad (7.0).
- Mezclar las aguas residuales ácidas con una suspensión (lechada) de cal concentrada.

- Agregar a las aguas residuales ácidas soluciones concentradas de hidróxido de sodio (NaOH) o de carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).
- Difundir en las aguas residuales alcalinas dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
- Agregar ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) a las aguas residuales alcalinas.

## Tratamientos Primarios

### Preaireación.-

La aireación de las aguas residuales previo al sedimentador primario se utiliza para llevar a cabo uno o más de los siguientes objetivos:

- Control de olores
- Oxidación de impurezas inorgánicas
- Separación de grasas y remoción de arenas
- Prevención de la septicidad
- Floculación de sólidos
- Mantener el oxígeno disuelto en los tanques de tratamiento primario en flujo lento
- Incrementar la remoción de DBO y SS.

### Remoción de grasas y aceites.-

La remoción de grasas y aceites puede llevarse a cabo en tanques desnatadores o tanques de aireación.

- Tanques desnatadores: En un tanque desnatador el material flotante se remueve y el agua fluye hacia fuera de la unidad por la salida, la cual, se encuentra sumergida en el lado opuesto del influente a una elevación menor para mejorar la flotación de las grasas y aceites o sustancias flotantes.
- Tanques de aireación: En los sistemas de flotación con aire a presión, la separación se logra introduciendo burbujas de aire en la fase líquida. El aceite flota por efecto de las diminutas burbujas de aire y se separa como natas de la superficie del tanque por medios mecánicos (Rodríguez, 1996).

## Sedimentación.-

La sedimentación se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de las mismas.

La eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran.

En algunos casos, la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual. La sedimentación puede producirse en una o varias etapas o en varios de los puntos del proceso de tratamiento. En una planta típica de lodos activados, la sedimentación se utiliza en tres de las fases de tratamiento: 1) En los desarenadores, en los cuales la materia inorgánica (arena, a veces) se elimina del agua residual; 2) en los clarificadores o sedimentadores primarios, que preceden al reactor biológico, y en el cual los sólidos (orgánicos y otros) se separan; 3) en los clarificadores o sedimentadores secundarios, que siguen al reactor biológico, en los cuales los lodos del biológico se separan del efluente tratado (Ramalho, 1991).

## Coagulación y Floculación.-

Los procesos de coagulación y floculación se emplean para extraer del agua aquellos sólidos que no puedan asentar con facilidad, una parte considerable de estos sólidos pueden ser coloides (Rodríguez, 1996).

## Flotación.-

La flotación es un proceso para separar sólidos de baja densidad o partículas líquidas de una fase líquida. La separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas. La fase líquida se somete a un proceso de presurización para alcanzar una presión de funcionamiento que oscila entre 2 y 4 atm., en presencia de suficiente aire para conseguir la saturación en aire del agua. Luego este líquido saturado de aire se somete a un proceso de despresurización llevándolo hasta la presión atmosférica por paso a través de una válvula reductora de presión. En esta situación, y debido a

la despresurización se forman pequeñas burbujas de aire que se desprenden de la solución. Los sólidos en suspensión o las partículas líquidas (por ej.: aceites o petróleo) flotan, debido a que estas pequeñas burbujas asociándose a los mismos, les obligan a elevarse hacia la superficie. Los sólidos en suspensión concentrados pueden separarse de la superficie por sistemas mecánicos.

En el campo de los tratamientos de aguas residuales, la flotación se usa para los siguientes objetivos: 1) separación de grasas, aceites, fibras, y otros sólidos de baja densidad, de las aguas residuales; 2) espesado de los lodos procedentes de los procesos de lodos activos; 3) el espesamiento de los lodos floculados químicamente resultantes de los tratamientos de coagulación química (Ramalho, 1991).

### Tratamientos Secundarios

Lodos activados.-

El principio básico del proceso consiste en que las aguas residuales se pongan en contacto con una población microbiana mixta, en forma de suspensión floculenta en un sistema aireado y agitado. La materia en suspensión y la coloidal de las aguas residuales se elimina rápidamente por adsorción y aglomeración en los flóculos microbianos. Esta materia y los nutrientes disueltos se descomponen luego más lentamente por metabolismo microbiano a sustancias simples como anhídrido carbónico, agua y materia nueva celular. Una vez que se alcanza el grado de tratamiento que se desea, la masa microbiana floculenta conocida como "lodo", se separa del agua residual por asentamiento y el sobrenadante resulta entonces el agua residual tratada (Rodríguez, 1996).

El examen microscópico de este "lodo" revela que está formado por una población heterogénea de microorganismos, que cambian continuamente en función de las variaciones de la composición de las aguas residuales y de las condiciones ambientales. Los microorganismos presentes son bacterias

unicelulares, hongos, algas y protozoos. De éstos las bacterias son probablemente las más importantes, encontrándose en todos los tipos de procesos de tratamiento biológico (Ramalho, 1991).

#### Filtros Rociadores.-

Los filtros rociadores, o filtros biológicos, son un proceso de tratamiento biológico de aguas residuales, de tipo aerobio, basado en el uso de un medio fijo que sirve de soporte para el desarrollo de los microorganismos que llevarán a cabo la estabilización de la materia orgánica.

El lecho del filtro generalmente es circular, distribuyéndose el agua residual, por encima del lecho. Cada filtro posee un sistema de desagüe inferior con el objeto de recoger el líquido tratado y los sólidos biológicos que se hayan separado del medio (Rodríguez, 1996).

#### Discos Biológicos.-

El proceso de biodiscos consiste en un conjunto de discos no muy separados, normalmente fabricados de poliestireno o polietileno, con diámetros comprendidos entre 3 - 4 m (Ramalho, 1991) sujetos a una flecha horizontal rotatoria. Los discos se poseionan dentro de tanques, de tal forma que quede el 40% sumergido. Rotan lentamente (de 1 a 2 r.p.m.) teniendo contacto con el agua residual y con la atmósfera al mismo tiempo. Los microorganismos, crecen en la superficie de los discos y metabolizan el sustrato orgánico del agua residual (Rodríguez, 1996).

#### Digestión Anaerobia.-

La digestión anaeróbica se realiza en tres etapas. Primero, los compuestos de alto peso molecular, como las proteínas y los polisacáridos, son descompuestos en sustancias solubles de bajo peso molecular, como los aminoácidos y los azúcares. Esto se conoce a veces como la fase de "licuefacción". En segundo lugar, los nutrientes orgánicos son convertidos en ácidos grasos inferiores en una

fase de "fermentación ácida", que baja el pH del sistema. Finalmente, en la etapa de "fermentación del metano" o "metanogénica" los ácidos orgánicos son convertidos en metano, anhídrido carbónico y una pequeña cantidad de hidrógeno.

El equilibrio entre las fases de producción de ácidos y de producción de metano es importante. Los organismos productores de metano son muy sensibles a los bajos niveles de pH, y si el pH cae por debajo de su nivel de tolerancia de aproximadamente 6.2, cesa la producción de metano. Los ácidos orgánicos producidos por las fases previas, se acumulan y dan por resultado lodos con un desagradable olor agrio. Es la susceptibilidad de los organismos metanogénicos a la inhibición la que le ha dado al proceso de digestión anaeróbica su reputación de inestabilidad. Microbiológicamente, la situación es análoga a la de la nitrificación en el proceso de lodos activados.

Los organismos metanogénicos no sólo crecen muy lentamente sino que son susceptibles a la inhibición por un gran número de sustancias que se encuentran usualmente en aguas residuales. Por tanto, para mantener una población de organismos metanogénicos en el sistema y asegurar que ocurra la producción de metano, el tiempo de residencia de la biomasa en el sistema debe ser suficientemente prolongado para impedir que sea "lavada" fuera del sistema. El término "tiempo de residencia de los lodos" con respecto a la población microbiana activa en un digestor anaeróbico es algo ambiguo, ya que el término "lodos" representa generalmente también los substratos.

Sin embargo, es el tiempo de residencia de los organismos metanogénicos el que constituye el parámetro clave (Winkler, 1994).

## Tratamientos Terciarios

### Eliminación de Sólidos en Suspensión.-

Los sólidos en suspensión que no han sido eliminados en las operaciones convencionales de tratamiento primario y secundario pueden constituir una parte importante de la DBO de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Se dispone de los siguientes procesos para la eliminación de estos sólidos en suspensión: (1) microtamizado, (2) filtración.

### Adsorción en Carbón Activo.-

La adsorción es un proceso en el cual las moléculas de un fluido se adhieren a la superficie de un sólido con que tiene contacto. Es por esto que a la adsorción siempre se le asocia con una purificación.

Como la adsorción es un fenómeno de superficie, la principal característica de un adsorbente es tener un área superficial grande. El carbón activado, tiene la propiedad de adsorber principalmente sustancias orgánicas, aunque también algunas sustancias inorgánicas, como cloro, yodo y algunos metales pesados.

### Intercambio Iónico.-

El Intercambio iónico es un proceso en que los iones que se mantienen unidos a grupos funcionales sobre la superficie de un sólido por fuerzas electrostáticas se intercambian por iones de una especie diferente en disolución.

Este procedimiento ha llegado a ser notablemente importante en el campo del tratamiento de las aguas residuales.

### Ósmosis Inversa.-

En el tratamiento de las aguas residuales mediante ósmosis inversa, el afluente contaminado se pone en contacto con una membrana adecuada a una presión superior a la presión osmótica de la solución. Bajo estas circunstancias, el

agua con una cantidad muy pequeña de contaminantes pasa a través de la membrana. Los contaminantes disueltos se concentran en el compartimento del agua residual.. Este concentrado, que posiblemente sea una pequeña fracción del volumen total de agua residual a tratar, se descarga. Se obtiene agua purificada en el otro compartimento.

#### Electrodiálisis.-

La electrodiálisis es un método prometedor en la eliminación de nutrientes inorgánicos (fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales y, por ello, una posible etapa final en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Los componentes básicos de una celda de electrodiálisis son una serie de membranas hechas de resina de intercambio iónico. Estas membranas son permeables sólo a las especies iónicas y son relativamente selectivas de un tipo específico de iones.

#### Procesos de Oxidación Química.-

##### (1). Cloración

La cloración es un proceso muy usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas. Algunos efluentes industriales que normalmente se cloran antes de su descarga a las aguas receptoras son los procedentes de las plantas de azúcar de caña, de azúcar de remolacha, de centrales lecheras, de las fábricas de pasta y papel, de las plantas textiles, de las de curtido, de las petroquímicas, de las farmacéuticas, y de las de acabado superficial de los metales.

Los principales objetivos de la cloración son :

- Desinfección
- Reducción de la DBO
- Eliminación o reducción de colores y olores

- Oxidación de iones metálicos
- Oxidación de cianuros a productos inocuos.

## (2). Ozonización

La oxidación química con ozono es un método efectivo para tratar las aguas residuales, basándose en los siguientes factores:

- El ozono reacciona fácilmente con los productos orgánicos no saturados presentes en las aguas residuales.
- La tendencia a la formación de espuma de las aguas residuales se reduce después del tratamiento con ozono.
- La ruptura de los anillos y la oxidación parcial de los productos aromáticos deja a las aguas residuales más susceptibles de tratamiento convencional biológico.
- El ozono presente en el efluente se convierte rápidamente a oxígeno una vez que ha servido a sus fines. Este oxígeno es beneficioso para las corrientes receptoras y ayuda a mantener la vida acuática. Por el contrario, el cloro permanece en el efluente y se convierte en contaminante (Ramalho, 1991).

### **I.1.7 Velocidades de las Reacciones Químicas**

Hay dos razones principales para estudiar las velocidades de las reacciones. La primera es la importancia práctica de poder predecir la rapidez con la que una mezcla de reacción se aproxima al equilibrio. Esta velocidad podría depender de variables controladas, como la presión, la temperatura, la presencia de un catalizador. Se podría optimizar la velocidad mediante una elección apropiada de las condiciones. La segunda razón es que con el estudio de las velocidades de reacción se consigue una comprensión de los mecanismos de las reacciones, es decir el análisis de una reacción en una secuencia de etapas elementales. Una etapa de reacción elemental puede ser una colisión reactiva en una reacción en

fase de gas o un encuentro reactivo en disolución, y no está relacionada necesariamente con la estequiometría de la reacción global.

## CINETICA QUIMICA.

La cinética química es el estudio de la velocidad y del mecanismo por medio de los cuales una especie química se transforma en otra. La velocidad es la masa, en moles, de un producto formado o de un reactante consumido por unidad de tiempo. El mecanismo es la secuencia de eventos químicos individuales cuyo resultado global produce la reacción observada.

La velocidad de una reacción química puede variar desde un valor tendiente a infinito hasta esencialmente cero. En las reacciones iónicas, tales como las que se verifican en las reacciones de combustión a altas temperaturas, la velocidad es extremadamente rápida. La velocidad de combinación de hidrógeno y oxígeno en ausencia de un catalizador a temperatura ambiente, es inconmensurablemente lenta. La mayor parte de las reacciones industriales se verifican a velocidades situadas entre estos extremos, y éstos son los casos para los cuales se requiere aplicar los datos cinéticos para determinar los tamaños del equipo de reacción. Es especialmente importante conocer la forma en que la velocidad cambia con los parámetros de operación, siendo los más importantes la temperatura, la presión y la composición de la mezcla reaccionante.

## DETERMINACION DE LA LEY DE VELOCIDAD.

Los datos cinéticos primarios son las concentraciones de las sustancias a distintos tiempos. Hay diversos modos de obtener la ley de velocidad a partir de estos datos.

En el método de velocidades iniciales, la velocidad se mide al comienzo de la reacción para varias concentraciones iniciales de reactivos diferentes. Después

el método considera que la ley de velocidad para una reacción entre A y B es supuestamente

$$V_A = K [A]^a [B]^b, \quad V_A = - d [A] / dt,$$

Entonces su velocidad inicial ( $V_{A,0}$ ) está dada por los valores iniciales de las concentraciones  $[A]_0$  y  $[B]_0$  como

$$V_{A,0} = K [A]_0^a [B]_0^b.$$

Tomando logaritmos:

$$\log V_{A,0} = \log K + a \log [A]_0 + b \log [B]_0$$

Por tanto, una representación de logaritmo de la velocidad inicial del cambio de la concentración en función del logaritmo de la concentración inicial de A (manteniendo constante  $[B]_0$ ) debe ser una línea recta con pendiente a. Igualmente, el orden con respecto a B se puede determinar representando  $\log V_{A,0}$  en función de  $\log [B]_0$  manteniendo  $[A]_0$  constante.

Reacciones de orden cero.

El orden cero significa que la velocidad es independiente de la concentración, puede presentarse en dos situaciones: cuando la velocidad es intrínsecamente independiente de la concentración y cuando la especie es de tal manera abundante que su concentración es prácticamente constante durante la reacción. En este último caso, es imposible detectar la dependencia de la velocidad con respecto a la concentración, y prevalece un orden cero aparente.

$$- d[A] / dt = k$$

Integrando desde una condición inicial  $[A] = [A]_0$ , se obtiene

$$[A] - [A]_0 = -k t$$

Reacciones de primer orden.

La ley de velocidad de primer orden para la desaparición de un reactivo A es

$$- d[A]/dt = K[A],$$

la cual se reordena a

$$(1/[A]) d[A] = -K dt,$$

que se puede integrar directamente. Dado que inicialmente (a  $t=0$ ) la concentración de A es  $[A]_0$  y a un tiempo posterior  $t$  es  $[A]_t$ , la solución se puede expresar:

$$\ln [A]_t / [A]_0 = -Kt,$$

ésta solución indica que si se representa  $\ln [A]_t / [A]_0$  en función de  $t$ , la reacción de primer orden dará una línea recta. Si la representación es lineal, entonces la reacción es de primer orden y el valor de  $K$  se puede obtener a partir de la pendiente (la pendiente es  $-K$ ).

Reacciones de segundo orden.

En el caso de una reacción de segundo orden con respecto a A, la ley de velocidad es

$$d[A] / dt = - K [A]^2,$$

y al integrar y reordenar esta expresión:

$$1 / [A]_t - 1 / [A]_0 = kt$$

esta expresión indica que para comprobar si una reacción es de orden dos hay que representar  $1 / [A]_t$  en función de  $t$  y observar si se obtiene una línea recta. Si es así, la reacción es de orden dos con respecto a  $A$  y la pendiente de la recta es igual a la constante de velocidad (Smith, 1986).

## **I.2 COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN**

### **I.2.1 Antecedentes**

La Coagulación Química es uno de los principales métodos que se han utilizado en la eliminación de DBO y color en las aguas residuales de la Industria Textil (Nemerrow y Dasgupta, 1991).

Datos experimentales muestran que cerca del 80 – 90 % del color del agua residual textil puede ser eliminado mediante el método de Coagulación-Floculación (Tunay, 1996), es por ello que se considera un método efectivo y económicamente viable para la eliminación de color en aguas residuales de esta industria (Churchley, 1994).

### **I.2.2 Principio Químico**

Los procesos de coagulación y floculación se emplean para extraer del agua los sólidos que en ella se encuentran suspendidos siempre que su rapidez natural de asentamiento sea demasiado baja para proporcionar clarificación efectiva.

El agua cruda sucia contiene material suspendido, tanto sólidos que pueden asentarse como partículas lo bastante grandes que se asientan en reposo, o

sólidos dispersados que no se asentarán con facilidad. Una parte considerable de estos sólidos que no se asientan pueden ser coloides. Cada partícula se encuentra estabilizada por cargas eléctricas negativas sobre su superficie, haciendo que repela las partículas vecinas, como se repelen mutuamente dos polos magnéticos. Ya que esto impide el choque de las partículas y que formen así masas mayores, llamados flóculos, las partículas no se asientan. La coagulación desestabiliza estos coloides al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados. Esto se logra, por lo general, añadiendo coagulantes químicos y aplicando energía de mezclado. La Figura 1.1 muestra como estas sustancias químicas cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. Estos flóculos, inicialmente pequeños, crean al juntarse, aglomerados mayores que son capaces de asentarse. El proceso de desestabilización es la coagulación (neutralización de la carga); la etapa de formación de flóculos es la floculación.

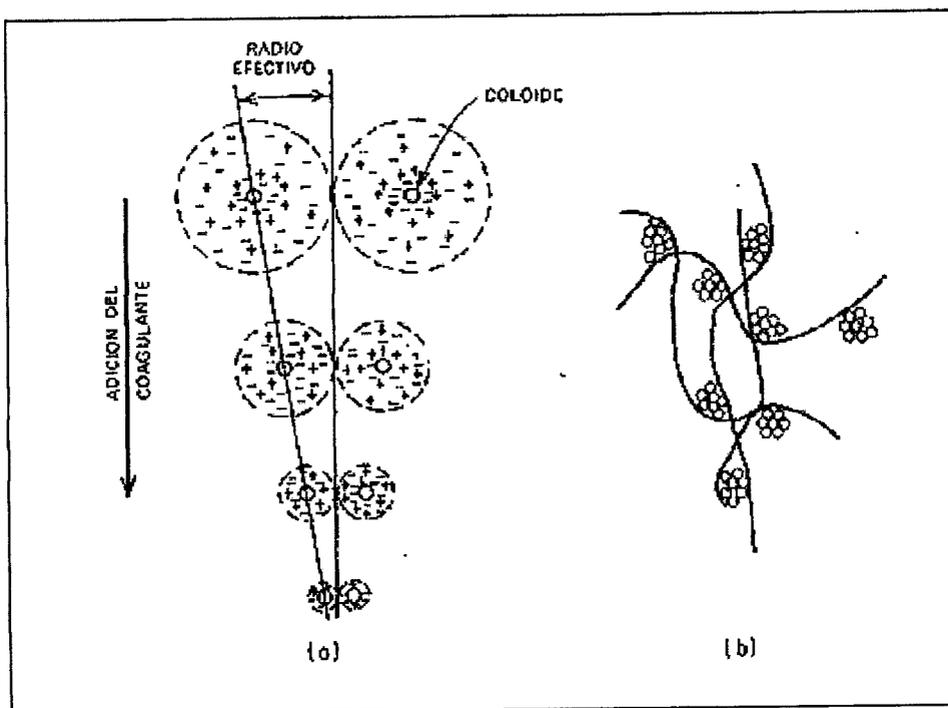


Figura 1.1. (a) Coagulación: La adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la "nube" que rodea los coloides de modo que

pueden aglomerarse. (b) Floculación: El producto químico floculante tiende un puente entre las partículas coloidales aglomeradas para formar flóculos más grandes fácilmente asentables.

### **1.2.3 Coagulación**

Las especies coloidales halladas en agua cruda y en agua de desecho incluyen arcillas, sílice, hierro y otros metales pesados, color y sólidos orgánicos como los residuos de organismos muertos.

Los coloides siempre necesitan coagularse para alcanzar un tamaño efectivo y una rapidez de asentamiento; pero aun partículas mayores, que no son realmente coloidales y que se asentarían si se les diera un tiempo suficiente, requieren de la coagulación para formar un flóculo mayor que se asiente con más rapidez.

Cuando en una planta de tratamiento no se dispone de tiempo suficiente para extraer los sólidos suspendidos, la coagulación y la floculación pueden provocar su crecimiento y asentarse con la suficiente rapidez para superar las limitaciones del diseño de la planta (Kemmer, 1995).

Los coloides se clasifican en hidrofóbicos (adversos al agua) e hidrofílicos (afines al agua). Los coloides hidrofóbicos no reaccionan con el agua; la mayor parte de las cerámicas naturales son hidrofóbicas. Los coloides hidrofílicos reaccionan con el agua; las sustancias que producen el color son hidrofílicas.

Diversas teorías han sido formuladas para describir la partícula coloidal y las fuerzas que la rodean. Prácticamente, todo lo que se necesita para definir el sistema coloidal es la determinación de la naturaleza y la magnitud de la carga de la partícula. La magnitud de la carga de la partícula, determina lo cerca que pueden aproximarse los coloides (Nemerrow y Dasgupta, 1991).

El potencial zeta es una medida de esta fuerza. A medida que disminuye el potencial zeta, las partículas pueden aproximarse cada vez más aumentando la posibilidad de una colisión. En un sistema convencional de clarificación con un pH de 6 a 8, los coagulantes proporcionan las cargas positivas para reducir la magnitud del potencial zeta. La coagulación se presenta de ordinario a un potencial zeta que es aun ligeramente negativo, de manera que por lo general no se requiere que la carga sea neutralizada por completo. Si se añade demasiado coagulante, la superficie de la partícula se cargará positivamente (un potencial zeta positivo), y la partícula volverá a dispersarse.

Las medidas del potencial zeta se han empleado con éxito para controlar las dosis de coagulantes en las plantas. Sin embargo, las lecturas del potencial zeta por sí solas no son confiables para seleccionar el mejor coagulante.

Los resultados obtenidos en la prueba de la jarra continúan siendo los mejores para seleccionar al coagulante.

Para complementar la adición del coagulante se requiere del mezclado para destruir la estabilidad del sistema coloidal. Para que las partículas se aglomeren deben chocar, y el mezclado promueve la colisión. Un mezclado de gran intensidad, que distribuya al coagulante y promueva colisiones rápidas, es de lo más efectivo.

#### **I.2.4 Floculación**

Puede ser que el flóculo formado por la aglomeración de varios coloides no sea lo bastante grande como para asentarse con la rapidez deseada. Un floculante reúne partículas floculadas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individuales en aglomerados. La floculación es estimulada

por un mezclado lento que junta poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos.

### **1.2.5 Productos Químicos Coagulantes y Floculantes**

Históricamente, los coagulantes metálicos (el alumbre y las sales de hierro) han sido los más empleados en la clarificación del agua. Estos productos actúan como coagulantes y floculantes a la vez. Añadidos al agua forman especies cargadas positivamente en el intervalo de pH típico para la clarificación, esto es, de 6 a 7.

Esta reacción de hidrólisis produce aluminio gelatinoso insoluble o hidróxido férrico. Aun cuando inicialmente no haya sólidos suspendidos en el agua, los coagulantes metálicos forman flóculos que enredan a los coloides desestabilizados. Sin embargo, los lodos voluminosos producidos por la adición de coagulantes metálicos crean problemas de disposición, por lo que de ordinario sólo difícilmente pueden desecarse.

Los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH y a la alcalinidad. Si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre y pueden solubilizarse el hierro o el aluminio y generar problemas al usuario del agua.

El desarrollo subsecuente de diversos polímeros orgánicos, denominados polielectrólitos, en la década de 1950–1960, contribuyeron más espectacularmente a la tecnología del tratamiento de aguas.

Los polielectrólitos son grandes moléculas orgánicas solubles en agua, formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en una cadena larga.

De ordinario incorporan en su estructura sitios para intercambio iónico que dan a la molécula una carga iónica. Aquellas que tienen una carga positiva son catiónicas y las que tienen una carga negativa son aniónicas. Estas moléculas reaccionan con el material coloidal en el agua neutralizando la carga o enlazando partículas individuales para formar un precipitado visible e insoluble, esto es, un flóculo.

La naturaleza iónica de los polielectrólitos es sólo un factor que determina el desempeño de estos materiales como coagulantes y floculantes.

Así, como regla general, los polímeros catiónicos son diseñados para trabajar con valores bajos de pH, y los aniónicos con valores altos, ya que a estos valores de pH son más eficientes.

Los polímeros orgánicos superan muchos de los problemas inherentes al uso del alumbre o de las sales de hierro.

Los polímeros orgánicos empleados en el tratamiento del agua pertenecen a dos tipos principales: coagulantes y floculantes. Los coagulantes son moléculas positivamente cargadas de peso molecular relativamente bajo. Los polímeros floculantes tienen pesos moleculares mucho más altos, y proporcionan largos puentes entre los pequeños flóculos para promover el crecimiento de la partícula.

En la Tabla 1.3 se muestran algunas características de los coagulantes y floculantes orgánicos empleados en el tratamiento del agua.

A diferencia de las sales inorgánicas, los polímeros no producen flóculos voluminosos, ni gelatinosos, no afectan el pH, ni su desempeño es sensible al pH del agua tratada.

Tabla 1.3. Características de los Polímeros Orgánicos.

CLASE	INTERVALOS DE PESO MOLECULAR	FORMA Y DISPONIBILIDAD
Coagulantes catiónicos Poliaminas Policuaternarios Poli CDADMA (cloruro de dialil-dimetil amonio) Epi-DMA (epiclorhidrina-dimetilamina)	Abajo de 100 000	Todos disponibles como soluciones acuosas
Floculantes catiónicos Copolímeros de: Acrilamida y DMAEM (dimetil-aminoetil-metacrilato) Acrilamida y CDADMA Aminas Mannich	Arriba de 1 000 000	Polvos o emulsiones
Floculantes no iónicos Poliacrilamidas	Arriba de 1 000 000	Polvos o emulsiones
Floculantes aniónicos Poliacrilatos Copolímeros de acrilamida y Acrilato	Arriba de 1 000 000	Polvos o emulsiones

### 1.2.6 Aplicaciones de la Coagulación y Floculación

Existen dos tipos de pruebas de laboratorio para seleccionar el mejor producto químico y aproximarse a la dosis requerida para la clarificación: (1) la prueba de la jarra y (2) la prueba del cilindro.

Se emplea la prueba de la jarra cuando el contenido de sólidos suspendidos en la corriente que deberá clarificarse es menor que 5000 mg/l aproximadamente y la prueba del cilindro se emplea en corrientes de lodo pesado donde los sólidos suspendidos exceden los 5000 mg/l.

La prueba de la jarra simula los tipos de mezclado y las condiciones de asentamiento que se encuentran en una planta clarificadora. La unidad de laboratorio para efectuar estas pruebas permite que se corran simultáneamente hasta seis pruebas. El probador tiene un motor de velocidad variable que permite controlar la energía del mezclado en las jarras.

Los resultados de la clarificación son sensibles a la dosificación del producto químico, a la energía y a la duración del mezclado. Se añade el coagulante con gran energía para dispersarlo en el agua y promover una mayor frecuencia en las colisiones. Puede ser de corta duración, menor de un minuto. Si es necesario se añade un polímero floculante durante los últimos segundos del mezclado rápido. En el período de mezclado lento que sigue, se forman flóculos hasta que son tan grandes que los esfuerzos cortantes superan finalmente a las fuerzas de enlace, desintegrando el flóculo. Esto limita el tamaño del flóculo. Después de un mezclado lento durante un tiempo óptimo, el cual se encuentra después de repetidas pruebas (de ordinario de 5 a 20 minutos), se dejan asentar las jarras de 5 a 10 minutos.

La prueba del cilindro, diseñada para determinar cuán rápidamente se asientan los sólidos, emplea un cilindro graduado de 500 ml con tapón, cronómetro y equipo para dosificar las sustancias químicas que se evaluarán (Kemmer, 1995).

## **I.2.7 Ventajas y Desventajas de la Coagulación - Floculación como Método de Tratamiento de Agua Residual**

- **Ventajas**
  - Elimina un elevado porcentaje de color y materia orgánica.
  - Bajo Costo.
  - Se requiere muy poca infraestructura.
  - Facilidad en el proceso.
  
- **Desventajas**
  - Producción de lodos elevada.
  - La elevada producción de lodos ocasiona que no se recupere el 100 % del agua tratada (Nemerrow y Dasgupta, 1991).

## **I.3 MÉTODO ELECTROQUÍMICO (ELECTROFLOTACIÓN)**

### **I.3.1 Antecedentes**

El método de electroflotación fue desarrollado originalmente durante los años 60's en la URSS para el tratamiento de aguas de desecho de la industria minera. A partir de entonces su aplicación se ha diversificado en el tratamiento de diferentes tipos de efluentes de aguas de desecho. Así se ha encontrado que la electroflotación puede ser aplicada como un tratamiento primario para aguas de desecho con un alto contenido de materia orgánica.

La electroflotación se presenta como una técnica alternativa, eficiente y económica en el tratamiento de aguas de desecho industrial. El proceso de electroflotación permite la remoción de partículas coloidales, compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos disueltos en la solución, sólidos suspendidos y metales pesados. Este proceso puede ser aplicado a diversas aguas de desecho

industrial tales como: emulsiones agua-aceite, efluentes de la elaboración de detergentes (emulsiones), soluciones que contengan metales pesados, también es de utilidad para remover fosfatos, para desfluoridación y para el tratamiento de aguas de desecho de la industria textil y aguas de desecho urbanas, entre otras (Trejo,1995).

Se ha utilizado el tratamiento de electroflotación en aguas provenientes de la industria textil, este tipo de efluentes tienen la particularidad de ser aguas coloreadas, al aplicar el proceso de electroflotación se logra la remoción del color hasta en un 95%, siendo más eficiente que el tratamiento biológico (Do y Chen, 1994).

### **I.3.2 Principio Químico**

La Electroflotación tiene el mismo principio químico (desestabilización de coloides y su posterior aglomeración) que la Coagulación – Floculación, la diferencia se encuentra en que en la Electroflotación no se requiere agregar floculante, ya que éste es generado in situ por la disolución del ánodo: debido a que la electrooxidación del ánodo genera hidróxido de aluminio  $[Al(OH)_3]$  coloidal, que actúa como coagulante adsorbiendo a las partículas suspendidas en las emulsiones, independientemente de su carga de superficie.

En el proceso de electroflotación también se da la producción de burbujas de hidrógeno generadas en el cátodo producto de la reducción del agua, mismas que tienen la función de arrastrar hacia la superficie los sólidos suspendidos y a las partículas coloidales, ya que al adherirse a ellos disminuye la densidad de los coloides.

### I.3.3 Electrofloculación/Electroflotación

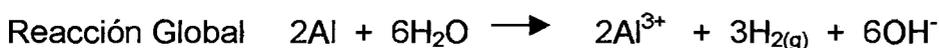
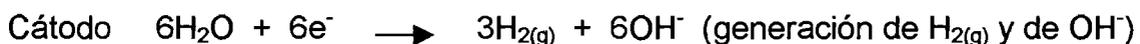
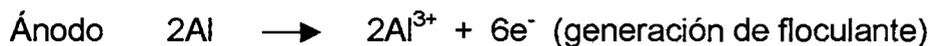
Electrofloculación.- El término electrofloculación se refiere a un proceso electrolítico donde el efluente es electrolíticamente coagulado, sin que se requiera la adición externa de agentes floculantes, ya que éstos son generados in situ por la disolución electroquímica de un ánodo de sacrificio, generalmente de Aluminio o Hierro.

Electroflotación.- la flotación es uno de los procesos determinantes de la separación de fases y rompimiento de emulsiones. En la electroflotación, las burbujas de gas de hidrógeno son generadas in situ por la reducción del medio en el cátodo. Las microburbujas tienen la función de arrastrar hacia la superficie fases hidrofóbicas que pueden ser sólidas o líquidas.

La combinación de los dos procesos: electroflotación y electrofloculación es conocida como Electroflotación.

### I.3.4 Electrofloculación

Las reacciones que ocurren durante el proceso de electroflotación son las siguientes, cuando se utilizan electrodos de Aluminio:



Reacciones que ocurren en el ánodo:

Ánodo: El material de los ánodos generalmente es de hierro (Fe) o aluminio (Al). En condiciones galvanostáticas (corriente constante) el ánodo es disuelto en la solución generando los iones  $Al^{3+}$  o  $Fe^{3+}$ .

La disolución del ánodo de aluminio tiene varios efectos sobre la estabilidad de la especie en solución, ya que la adición de una especie cargada (en este caso  $Al^{3+}$ ) disminuye el potencial zeta de las partículas, reduciendo la energía de repulsión, por lo que la desestabilización de los coloides puede llevarse a cabo.

De igual manera la formación del coloide  $Al(OH)_{3(s)}$  provoca la adsorción de las partículas a través de las fuerzas de Van Der Waals, promoviendo de esta manera la floculación (Trejo, 1995).

### **1.3.5 Electroflotación**

Un sistema de electroflotación consiste en la generación de burbujas por electrólisis del medio. En la electroflotación este proceso se lleva a cabo generando burbujas de hidrógeno producto de la reducción del agua. La producción de burbujas es un paso importante en la electroflotación, ya que se ha encontrado que la eficiencia del proceso depende en gran medida del tamaño de la burbuja.

El tamaño y la velocidad de formación de las burbujas depende de diferentes factores, tales como: el nivel de contaminación en el efluente: ya que la adsorción del surfactante en la interfase gas-solución induce un gradiente de tensión superficial, disminuyendo de esta manera su velocidad de desprendimiento, sin embargo este fenómeno ocurre a concentraciones bajas de surfactante, ya que no se tiene un cubrimiento total de la superficie de la partícula o coloide. Al incrementar la concentración del surfactante se recupera la movilidad

electroforética puesto que ahora la superficie de la burbuja esta completamente cubierta por el surfactante.

También se ha encontrado que el pH tiene una fuerte influencia sobre el signo de la carga en las burbujas. Es decir el potencial zeta de las burbujas puede ser alterado por diferentes factores como son: pH, tiempo del proceso, concentración del surfactante. La eficiencia de la electroflotación depende en gran manera de las características de las microburbujas generadas, por lo que una modificación del potencial zeta en las microburbujas formadas afecta la eficiencia del proceso.

La generación de una gran cantidad de burbujas es determinada por la densidad de corriente aplicada, por el material y estructura del cátodo utilizado.

El diámetro de las burbujas generadas por electroflotación es de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$  y puede variar dependiendo del potencial aplicado (Scott, 1995).

#### Reacciones que Ocurren en el Cátodo

El cátodo puede ser de un material diferente al ánodo, generalmente se utilizan cátodos de acero. La reacción que se lleva a cabo en el cátodo tiene un papel importante en el proceso de electroflotación, ya que de la reducción del medio acuoso, se generan burbujas de gas de hidrógeno ( $\text{H}_{2(g)}$ ) las que tienen la función de arrastrar hacia la superficie a las partículas hidrofóbicas presentes en la solución.

Otro hecho importante, producto de la reducción del medio es la producción de iones  $\text{OH}^-$ . La generación de iones  $\text{OH}^-$  provoca un cambio en el pH de la solución en función del tiempo de duración del proceso, por lo que es posible pasar de un pH ácido en la solución a un pH básico durante el tiempo que se aplica el proceso.

### **1.3.6 Ventajas y Desventajas de la Electroflotación como Método de Tratamiento de Agua Residual**

#### **▪ Ventajas**

- La variación de la densidad de corriente aplicada, el tiempo de aplicación del proceso, el valor del pH inicial y la velocidad de agitación, permiten optimizar el proceso.
- La cantidad de floculante generado puede ser controlado. Los electrodos y la celda puede ser diseñada para aumentar la eficiencia.
- La electroflotación no requiere el uso de polielectrólitos, productos químicos auxiliares ni de sistemas mecánicos sofisticados de filtración.
- El sistema de tratamiento de Electroflotación es pequeño y puede fácilmente integrarse en el proceso existente de tratamiento.
- La cantidad de lodos obtenidos es bastante menor que en el método químico, ya que contienen una menor cantidad de agua. En consecuencia la cantidad de agua recuperada después del tratamiento por electroflotación es mayor que la recuperada en el método de adición de floculantes.
- Menos costoso que los métodos convencionales.
- Se requiere menos Infraestructura.

#### **▪ Desventajas**

- No se aplica a cualquier tipo de agua residual, ya que el agua residual a tratar por electroflotación preferentemente debe ser altamente conductiva, para facilitar el proceso, ya que si no es así deberá utilizarse un electrólito soporte tal como sales ó ácidos, lo cual obviamente aumenta el costo del proceso (Trejo,1995).

## **I.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA**

### **I.4.1 Antecedentes**

Actualmente, el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil, se ha limitado a la utilización de procesos por membrana para la remoción de colorante y su recuperación (principalmente índigo); para poder reutilizar el agua nuevamente en su proceso, tecnología que es muy eficiente pero, su aplicación a nivel industrial en donde se involucran grandes volúmenes de agua lo hace muy costoso, por lo que se han comenzado a realizar estudios cuyo objetivo es eliminar la decoloración de efluentes textiles mediante la utilización de cultivos de microorganismos puros.

Generalmente, la decoloración del agua residual de la industria textil resulta difícil por medio de sistemas biológicos (aerobios y anaerobios), bajo condiciones normales y resultan bastante tóxicos a los sistemas anaerobios. En reciente estudio se demostró que el agua residual textil se puede tratar mediante reactores anaerobios del tipo EGSB (Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos Granular Expandido (EGSB por sus siglas en inglés, Expanded Granular Sludge Blanket), lo cual permite considerar dicho tratamiento como una opción con el propósito de modificar el tren de tratamiento de aguas residuales que actualmente tiene la empresa textil y que no es suficiente pero sí costoso; en dicho estudio se demostró que, empleando un reactor anaerobio del tipo EGSB es factible llevar a cabo el tratamiento de agua residual de la industria textil, ya que los datos obtenidos a nivel laboratorio muestran que se alcanzan eficiencias de remoción en DQO del orden de 61% en la DQO total y en un 40 a 70% en la disminución del color (Ilangoan y Briones, 1997).

## **I.4.2 Digestión Anaerobia**

Se denomina digestión anaerobia a la secuencia de procesos metabólicos que originan la degradación de sustancias orgánicas en ausencia de oxígeno molecular para dar como productos una serie de compuestos cuyo grado de reducción impide su uso posterior por microorganismos anaerobios (Noyola, 1997).

La cantidad de materia orgánica que puede ser tratada en reactores biológicos depende directamente de la cantidad de microorganismos dentro del reactor; así como del grado de contacto entre el sustrato y los microorganismos. Anteriormente, debido al lento crecimiento y a la relativa baja actividad de las bacterias productoras de metano, la digestión anaerobia solo se aplicaba en contados casos, como la digestión de lodos de purga de plantas de tratamiento municipales (Pérez, 1997).

La digestión anaerobia es uno de los primeros sistemas que se utilizaron para el tratamiento de aguas residuales. Actualmente se ha demostrado que son sistemas que soportan aguas fuertemente contaminadas y se ha logrado bajar considerablemente los tiempos de tratamiento hasta hacerlos comparables a los sistemas aerobios. Una de las ventajas de estos sistemas es la baja producción de material celular "lodos" ya que la velocidad de crecimiento celular es más bajo en comparación con los sistemas aerobios, que utilizan 65% de la energía en crecimiento celular, mientras que las anaerobias tan sólo el 10% y el resto para la producción de metano (Rodríguez, 1996).

## **I.4.3 Mecanismo de la digestión anaerobia**

El esquema más ampliamente aceptado de la digestión anaerobia de un sustrato complejo en el que se encuentra materia orgánica en suspensión, es el de

tres etapas propuesto por Mc. Inerney, 1981, y caracterizado de la siguiente manera:

- 1ª. Etapa. Hidrólisis y Acidogénesis.

Hidrólisis de los polímeros por acción de bacterias quimioheterótrofas no metanogénicas y la fermentación o acidogénesis en ácidos grasos volátiles (acético, propiónico, butírico), alcoholes (metanol y etanol),  $H_2$  y  $CO_2$ .

- 2ª. Etapa. Acetogénesis.

Transformación de los productos de la primera etapa en acetato,  $CO_2$ , ácido fórmico y  $H_2$ .

Los principales sustratos de esta etapa son los ácidos grasos volátiles (principalmente propionato y butirato) y también el etanol, que son transformados en productos precursores del metano: acético,  $H_2$ ,  $CO_2$ , además con esto se evita la acumulación de ácidos grasos volátiles que en concentraciones altas puede inhibir la metanogénesis.

A este nivel, existe también una etapa de homoacetogénesis particular que es la producción de acetato a partir de  $H_2O$  y  $CO_2$ .

- 3ª. Etapa. Metanogénesis.

Se realiza principalmente utilizando como sustrato al acetato, o bien al  $H_2$  más  $CO_2$ .

## Etapas de la Digestión Anaerobia

Durante la degradación anaerobia del material orgánico particulado en un digestor anaerobio en estado estable, se ha propuesto que el flujo de sustratos pasa por seis distintos procesos de conversión como se ilustra en la Figura 1.2 :

100% DQO

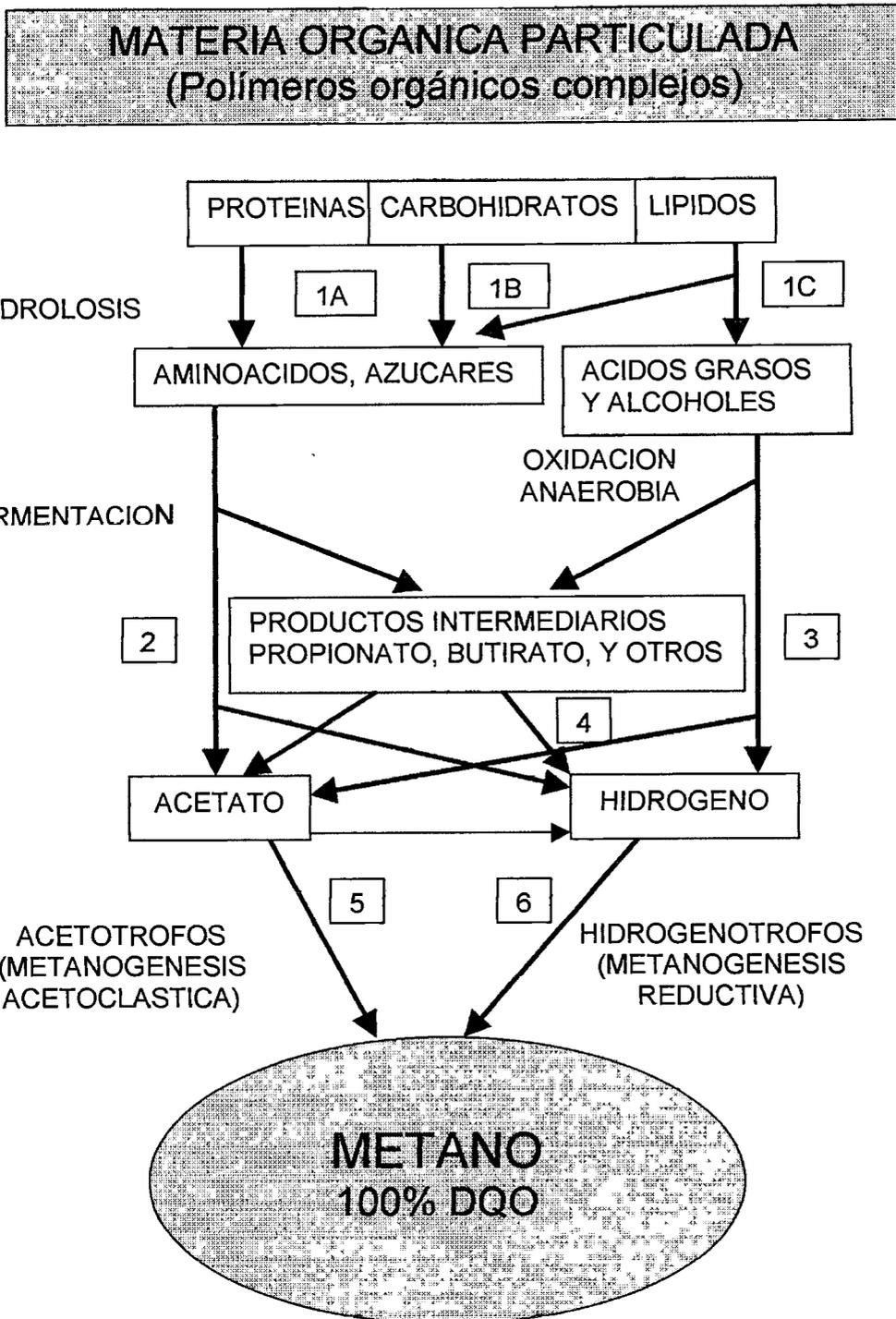


Figura 1.2. Diagrama de la Digestión Anaerobia de la Materia Orgánica particulada a Metano.

- 1) Hidrólisis de biopolímeros (proteínas, carbohidratos y lípidos)
- 2) Fermentación de aminoácidos y lípidos
- 3) Oxidación anaeróbica de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes
- 4) Oxidación anaerobia de productos intermedios como ácidos volátiles (excepto acetato)
- 5) Conversión de acetato a metano
- 6) Conversión de hidrógeno a metano (Noyola, 1997).

#### **I.4.4 Microbiología de la Digestión Anaerobia**

En el proceso de la digestión anaerobia los microorganismos son explotados para reducir la contaminación causada por residuos orgánicos y para producir metano, el cual puede ser utilizado como un combustible.

El número y la clase de microorganismos presentes en los digestores puede depender probablemente del tipo de digestor que se está utilizando, de las condiciones de operación, así como de la composición de los residuos a tratar (Wheatley, 1990).

Recientemente se han realizado estudios de la microbiología de los lodos activados y las bacterias han sido clasificadas dentro de grupos funcionales los siguientes grupos que se indican a continuación en la Figura 1.3 son los que controlan el efecto de la degradación de los residuos orgánicos en el proceso de digestión anaerobia (Moller, 1999).

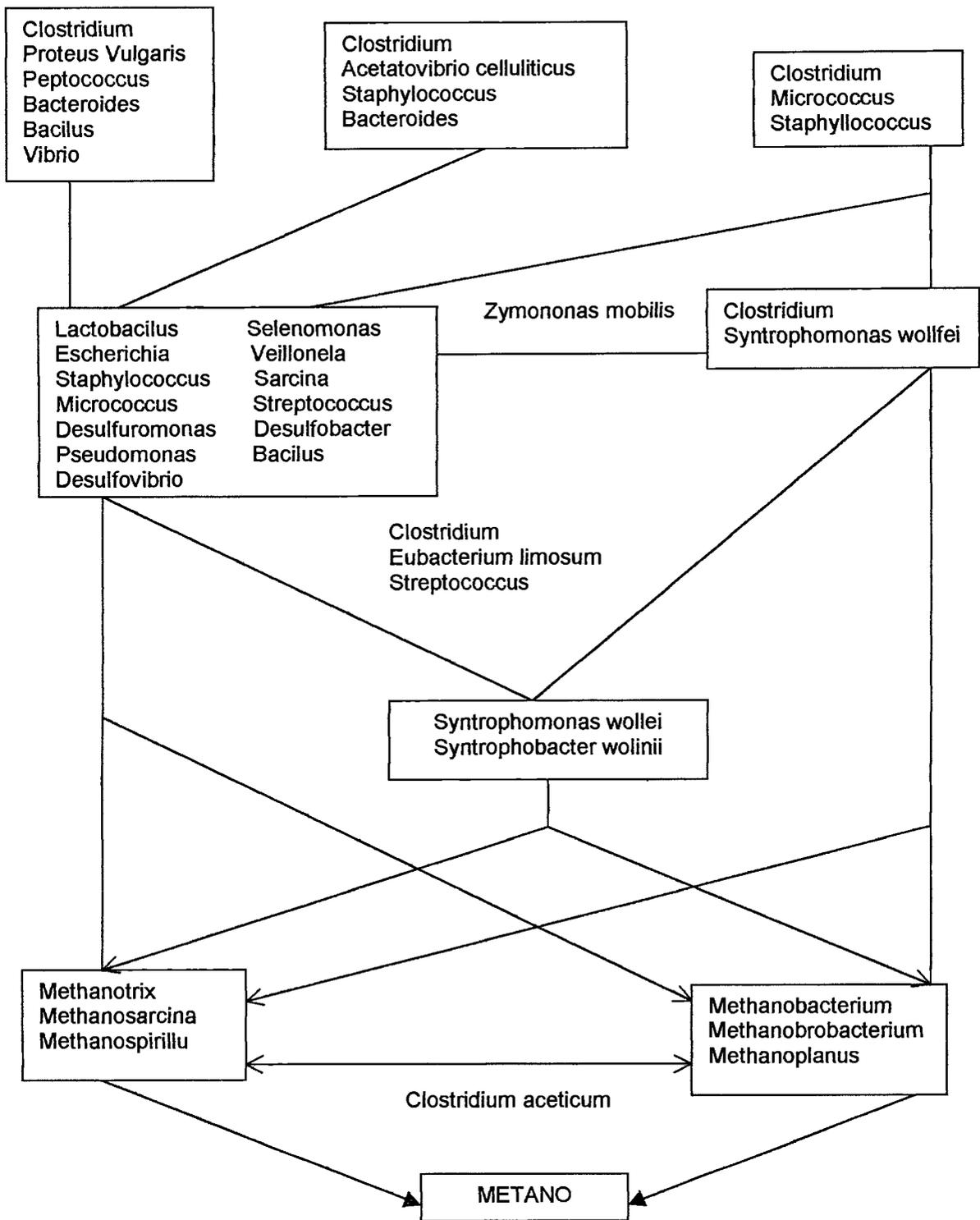


Figura 1.3. Principales Bacterias involucradas, en cada etapa de la Digestión Anaerobia.

#### **I.4.5 Procesos de Tratamiento Anaeróbico**

En la digestión anaeróbica se utilizan tres rangos de temperatura: digestión “psicrófila”, por debajo de 20°C, digestión “mesofílica” entre 20 y 40°C y termofílica por encima de 40°C y hasta aproximadamente 55 °C. Como las tasas de reacción biológica aumentan con la temperatura, la digestión en frío requiere tiempos de retención más largos que los de la digestión mesofílica más usual. Para mantener temperaturas de digestión más elevadas, se utiliza con frecuencia el metano producido o, en procesos industriales, se puede utilizar el calor residual, como el agua de enfriamiento del proceso (Winkler, 1994).

#### **I.4.6 Aclimatación**

En la digestión biológica, las bacterias cultivadas bajo control utilizan la materia orgánica presente en el agua para alimentarse, y hacen de este hecho un proceso útil para remover del agua ciertos materiales orgánicos. Ya que en el proceso intervienen organismos vivos, debe considerarse cada factor que influye sobre el crecimiento y la salud del cultivo, incluyendo un abastecimiento adecuado de alimento, la disponibilidad de nutrientes, un clima templado, y un ambiente relativamente uniforme libre de cambios violentos de temperatura y perturbaciones semejantes.

Al trabajar con agua de desecho que contiene materia orgánica de una planta industrial, es importante aclimatar las bacterias al desecho operando un incubador durante un período aproximado de una semana para obtener organismos que se hayan adaptado a la materia orgánica particular que deba ser digerida.

El proceso de aclimatación resulta de la eliminación de bacterias no eficaces y en la selección de aquellos organismos que tienen la capacidad de digerir materia orgánica que pueda ser realmente tóxica a muchos organismos.

Aunque no se requieren, por lo común, organismos especiales o cepas en los procesos del tratamiento de agua, el método de digestión más adecuado al material orgánico en el agua favorecerá a los organismos que son más efectivos en ese sistema (Ramalho, 1991).

#### **1.4.7 Factores Ambientales que afectan la Digestión**

Los principales factores ambientales que afectan el índice de metanogénesis en un proceso anaerobio incluyen : temperatura, pH, nutrientes y sustancias tóxicas.

Temperatura:

La temperatura de un bioreactor es una de las más importantes influencias sobre la actividad de la biomasa. Una de las temperaturas óptimas identificadas para la fermentación anaerobia es entre 30 y 40 °C, pero las bacterias anaerobias, pueden ser aclimatadas para operar a temperaturas fuera de este rango. Las bacterias metanogénicas pueden ser activadas a temperatura de 8 a 10 °C, pero la actividad de la biomasa y la capacidad de tratamiento anaerobio pueden ser reducidos a 10 y 20 % de los valores obtenidos a 35 °C.

La actividad de biomasa obtenida a temperaturas termófilas son generalmente entre 25 y 50% más altos que las actividades mesófilas (Malina y Pohland, 1992).

Los cambios de temperatura en el rango mesofílico pueden ser tolerados, pero cuando la temperatura desciende, la carga también debe ser disminuida de acuerdo al descenso de la actividad esperada. No es aconsejable incrementar la

temperatura de reactores mesofílicos por encima de 42 °C, ya que a temperaturas más altas ocurre un rápido deterioro de las bacterias (Noyola, 1990). Las bacterias anaerobias son más sensibles a rápidas alteraciones en temperatura. Por lo tanto en los procesos las fluctuaciones deberán de ser conservadas a un mínimo. Los sistemas designados deberán de ser adecuados para prevenir los cambios de temperatura del bioreactor más que 1 °C/día (Bitton, 1994).

pH:

La presencia de ácidos grasos volátiles en la forma no ionizada hace que cuando el pH es inferior a 6.0, una severa inhibición de las bacterias metanogénicas puede ser anticipada. Por otra parte, las bacterias fermentativas son aún activas hasta un pH de 4.5. Cuando la capacidad metanogénica está continuamente sobrecargada y no se añade la base necesaria para neutralizar los ácidos grasos volátiles presentes, el sistema de tratamiento se convertirá en un reactor de acidificación (Malina y Pohland, 1992).

Se recomienda mantener el contenido del reactor en un intervalo de pH entre 7.0 y 7.5. La actividad de las bacterias metanogénicas también disminuye si el pH aumenta por encima de 7.5 (Zickefoose, 1976).

Nutrientes en estado de trazas:

La digestión anaerobia por ser un proceso biológico requiere ciertos nutrientes inorgánicos esenciales para el crecimiento, la mayoría de las aguas no presentan una deficiencia (Ramalho, 1991).

La composición elemental inorgánica de las bacterias contiene micronutrientes esenciales normales, tales como N, P, y S, y algunos micronutrientes, tales como Ni, Fe y Co, están presentes en concentraciones más altas que otros organismos. Esto indica un requerimiento particular de estos micronutrientes por las bacterias metanogénicas (Noyola, 1997).

Finalmente, las poblaciones bacterianas requieren nutrientes además del alimento carbonáceo. Como regla empírica, el sistema requiere aproximadamente 5 partes de nitrógeno como N y una parte de fósforo como P por cada 100 partes de DBO en el agua de desecho. Muchas aguas de desecho, en particular las aguas negras municipales, contienen el nitrógeno requerido, pero las aguas industriales de desecho requerirán nutrientes adicionales, añadidos por lo común como sales de amonio y ácido fosfórico (Ramalho, 1991).

En muchos estudios de tratamiento anaerobio, la causa de malos resultados, aparentemente, fue la ausencia de nutrientes en trazas, entre los cuales hierro, cobalto, níquel y sulfuro han sido probados como nutrientes obligatorios prioritarios; molibdeno, tungsteno (Wolframio) y selenio también se reportan como metales requeridos (Noyola, 1997).

#### **1.4.8 Factores que deben estar en Equilibrio para lograr la Digestión**

En la digestión anaerobia la estabilidad de operación puede perderse por:

- 1) Choque orgánico (causado por un aumento del caudal, o en la concentración del sustrato).
- 2) Introducción de sustancias tóxicas.
- 3) Cambios en la temperatura que afectan a los microorganismos.

De no haber una detección temprana de la pérdida de estabilidad, y una rápida corrección del reactor, se corre el riesgo de que se acidifique. En tal caso, la nueva puesta en marcha del reactor podría ser un proceso tardado y por lo tanto costoso. De ahí la necesidad de utilizar parámetros de monitoreo y estrategias de control adecuados, que mantengan el balance entre las diferentes poblaciones de microorganismos presentes en el sistema. Esto se dificulta por los diferentes requerimientos ambientales y las diferentes tasas de crecimiento de los distintos grupos de microorganismos presentes en el sistema metanogénico (Pérez , 1997).

Por ello para lograr adecuadamente la digestión deben de estar en equilibrio 5 factores : bacterias, alimento, carga, mezcla y medio ambiente. El operador debe de controlar todos estos factores en el digestor:

- Las bacterias (buen inóculo de lodos) deben ser conservadas y suministradas en abundancia.
- El alimento, deberá de ser tan concentrado como sea posible (4 a 8 % de sólidos), y continuamente basto o en cantidades pequeñas y frecuentemente.
- La mezcla deberá de ser continua o casi de esta manera, para proporcionar un contacto de la bacteria con el alimento.
- Tiempo suficiente debe ser proporcionado para permitir una digestión completa. Los digestores deberán de conservarse en operación muy cerca de su máxima capacidad de volumen.
- El medio ambiente deberá de conservarse dentro de un rango extremadamente estrecho (muy pocas fluctuaciones) (Zickefoose, 1976).

#### **I.4.9 Reactores Anaerobios**

Se han desarrollado nuevos tipos de reactores anaerobios los cuales son capaces de extender el tiempo de retención de la población bacteriana y al mismo tiempo reducir el tiempo de retención hidráulica. Estos reactores son los llamados de segunda generación, tales como el filtro anaerobio, que consiste en una columna empacada de flujo ascendente o descendente; posteriormente se desarrolló una variante más eficiente al introducir un soporte tubular ordenando así el empaque. Posteriormente desarrollaron el sistema UASB o reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente, con características de película fija pero sin material de soporte.

También fueron desarrollados los reactores de tercera generación, los cuales contienen microorganismos en forma de biopelícula adherida a un soporte que se expande o fluidifica. Este proceso es controlado por una corriente de recirculación.

El estado actual de la biotecnología para el tratamiento de aguas residuales, señala a los reactores anaerobios de segunda generación como una alternativa atractiva de tratamiento. Esto se debe a que los de primera generación (fosas sépticas, tanques Imhoff, lagunas anaerobias, digestores convencionales y los completamente mezclados), requieren de grandes volúmenes y no todos tienen eficiencias aceptables; por su parte, los de tercera generación se encuentran aún a nivel de desarrollo aunque ya existen instalaciones a escala industrial.

Dentro de los reactores de segunda generación, el reactor anaerobio de lecho de lodos y de flujo ascendente (UASB), parece ser el más atractivo ya que soporta altas cargas orgánicas y requiere menor inversión al no necesitar material de soporte para la fijación de biopelícula. El éxito del proceso UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) se debe a la excelente retención de biomasa, lo cual es debido a los granos que forman el lodo y que está constituido por biopartículas muy activas y densas, lo que confiere al reactor las características de un reactor empacado sin los problemas de taponamiento, ni los elevados costos del empaque convencional. Sin embargo, si el agua residual no favorece la granulación, o pueden presentarse variaciones en ciertos contaminantes que la afecten, el proceso UASB no será aplicable (Pérez, 1997).

#### **1.4.10 Principales Características de Operación del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)**

El RAFA ha sido extensamente aplicado, y sus condiciones típicas de operación se muestran en la Tabla 1.4, este reactor es el más comúnmente utilizado en la industria (se encuentra en el 30 % de las plantas construidas). Su

principio de operación es igual al UASB, con la diferencia de que el RAFA utiliza lodos no granulares.

Tabla 1.4. Condiciones típicas de operación del RAFA.

Carga	2 – 15 kg. de DQO m <sup>3</sup> / día
Tiempo de Retención	8 – 50 hrs
DQO eliminada	70 – 90 %

La Figura 1.4 muestra la configuración de un RAFA (Wheatley, 1990).

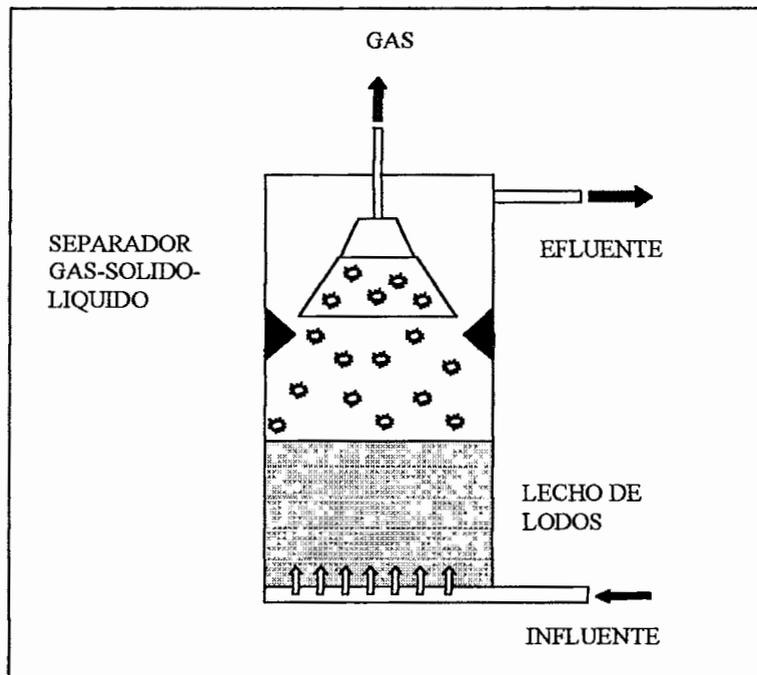


Figura 1.4. Diagrama esquemático de un RAFA.

#### **I.4.11 Ventajas y Desventajas de la Digestión Anaerobia como Método de Tratamiento de Agua Residual**

- **Ventajas**

- Baja producción de sólidos biológicos de desecho.
- Producción de energía en forma de metano.
- Bajo requerimiento de nutrientes.
- No requiere de aireación.
- Pueden aplicarse altas cargas orgánicas .
- La actividad de los lodos anaerobios puede preservarse después de varios meses sin alimentación.
- Bajo costo de operación.

- **Desventajas**

- Las bacterias anaerobias (particularmente las metanogénicas) son muy sensibles a la inhibición por varios compuestos ( $\text{CHCl}_3$ ,  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{CN}^-$  y metales pesados).
- El arranque del proceso es lento si no se dispone de un inóculo.
- El tratamiento anaerobio demanda frecuentemente un postratamiento.
- En México existe poca experiencia sobre el proceso, tanto en sus fundamentos como en su aplicación (Noyola, 1997).

### **I.5 OZONIZACIÓN**

#### **I.5.1 Antecedentes**

Los primeros estudios sobre el uso del ozono como un germicida fueron conducidos por Meritens en 1886 en Francia. Pocos años más tarde (1891), se reportaron sus propiedades bactericidas. En 1893, se construyó la primera planta de ozono tratadora de agua potable en Holanda, actualmente hay cerca de 1,000

plantas de tratamiento de agua para beber en Europa que utilizan ozono (Rice y Browning, 1981).

Pero las aplicaciones del ozono no sólo lo limitan como un desinfectante, sino que también ha sido ampliamente utilizado para la eliminación de sabor y olor, eliminación de color, algas, compuestos orgánicos (fenol, detergentes, pesticidas, y algunos otros), cianuros, sulfuros, hierro, manganeso, turbidez, para causar floculación de microcontaminantes (compuestos orgánicos solubles), y para inactivar virus (Cheremisinoff, 1993).

La ozonización de aguas residuales de la industria textil, destinada principalmente para la eliminación de color, fue reportada en los primeros años de la década de los 70's.

El agua residual producida en los procesos de la industria textil contiene colorantes orgánicos, los cuales no son fácilmente eliminables por tratamiento biológico, de ahí que el tratamiento con ozono comenzó a ser considerado como un método prometedor para la oxidación de estos colorantes y algunos otros compuestos degradables.

Se han realizado estudios con agua residual de la industria textil, que contiene colorantes industriales encontrándose que es una medida muy efectiva en la decoloración de este tipo de agua, independientemente del pH del agua residual (Liakou, 1997).

El ozono generalmente es aplicado para eliminar el color, como parte final del proceso de tratamiento, es decir como un tratamiento terciario. El tratamiento con ozono puede alcanzar porcentajes de remoción de color de hasta un 80% (Rice y Browning, 1981).

## I.5.2 Propiedades del Ozono

El Ozono (con Peso Molecular de 48) es un gas inestable, tiene un punto de ebullición de  $-112\text{ }^{\circ}\text{C}$  (a presión atmosférica). El ozono es parcialmente soluble en agua, más que el oxígeno (ver Tabla 1.5) y tiene un olor característicamente penetrante el cual es realmente detectable a concentraciones tan bajas como 0.01 – 0.05 ppm. El Ozono es el oxidante más poderoso disponible para el uso de tratamiento de aguas residuales, tiene un potencial de oxidación de 2.07 volts en solución alcalina, por lo que debe ser considerado un material peligroso, capaz de oxidar diversos tipos de compuestos orgánicos, incluyendo tejidos del cuerpo humano.

Tabla 1.5. Solubilidad del Ozono y del Oxígeno en Agua.

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Solubilidad del Ozono (mg/L)	Solubilidad del Oxígeno (del aire, mg/L)
0	20	6.9
2	10	6.6
20	8.92	4.3
28	1.5	3.7

En las relativamente bajas concentraciones de ozono que son producidas en el equipo industrial de generación de ozono (1 a 3% en aire; 2 a 6% en oxígeno) no existe riesgo de explosión.

Los generadores comerciales de ozono disponibles no pueden generar concentraciones suficientemente altas de ozono en el aire para ser explosivos. Por otro lado, el ozono es un gas tóxico, exposiciones innecesarias pueden ser perjudiciales para el ser humano.

En solución acuosa, el ozono es relativamente inestable, tiene un tiempo de vida media de alrededor de 20 a 30 minutos en agua destilada a 20 °C.

El ozono es mucho más estable en aire (especialmente en aire frío y seco) que en agua. El tiempo de vida media del ozono en la atmósfera del ambiente ha sido medido por la Agencia de Protección Ambiental de los E.U. y se encontró que es del orden de 12 horas. De esta manera, el ozono puede ser producido a partir de aire seco o de oxígeno.

### **I.5.3 Mecanismo de la Generación de Ozono**

El ozono puede ser producido por una descarga eléctrica en un alimentador de gas que contenga oxígeno o por acción fotoquímica usando luz ultravioleta. Para aplicaciones a gran escala, solamente el método de descarga eléctrica es práctico, ya que el uso de luz ultravioleta produce baja concentración de ozono.

En el método de descarga eléctrica, una corriente alterna es impuesta a través de dos electrodos separados con voltajes entre 5 y 25 V y una porción de oxígeno es convertida a ozono. Describiendo los electrodos, están separados por un dieléctrico (de 1-3 mm de grueso) y un hueco de aire (3mm) como se muestra en la Figura 1.5.

Sólo alrededor del 10% de la energía impuesta es usada para producir el ozono. El mecanismo para la generación de ozono es la excitación y aceleración de electrones dispersos dentro del campo de alto voltaje. La corriente alterna provoca que los electrones sean atraídos primero a uno de los electrodos y luego al otro. Como los electrones alcanzan suficiente velocidad, llegan a ser capaces de desintegrar algunas moléculas de  $O_2$  a átomos libres de oxígeno.

Estos átomos pueden entonces combinarse con moléculas de  $O_2$  para formar  $O_3$ . (Ver Figura 1.5)

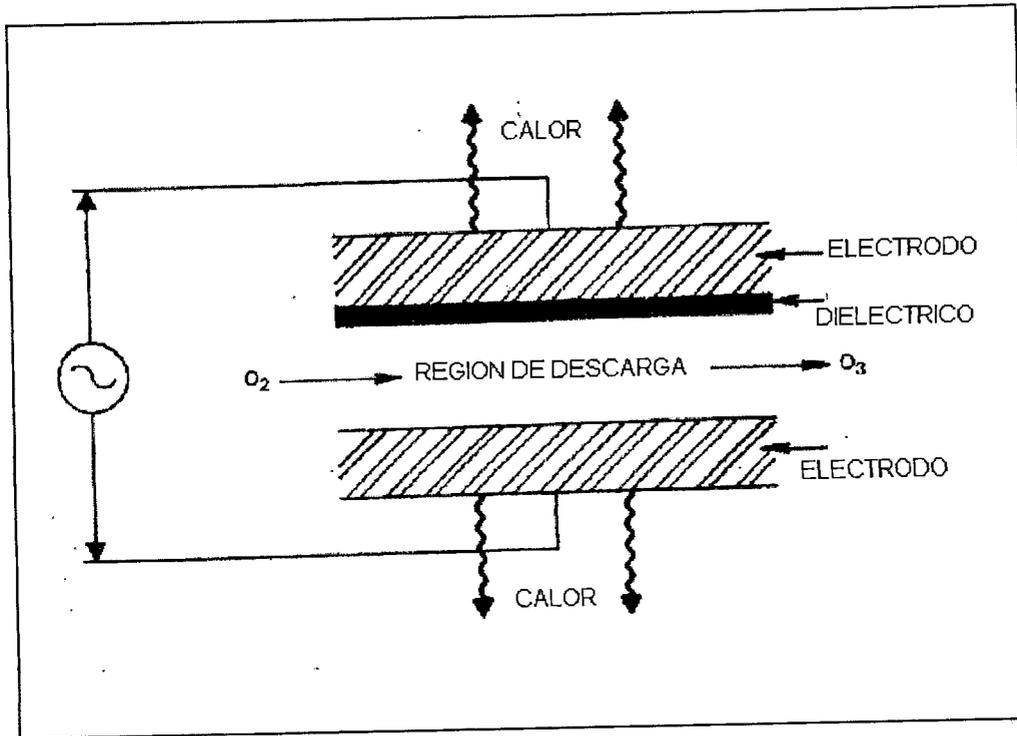
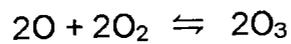
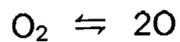


Figura 1.5. Configuración básica de un Ozonizador.

De esta forma el ozono es producido por ruptura de una molécula estable de oxígeno, formando dos átomos de oxígeno, las cuales se pueden combinar con moléculas de oxígeno para formar ozono:



(Cheremisinoff, 1993).

## **I.5.4 Ventajas y Desventajas del Tratamiento con Ozono**

- **Ventajas**
  - No hay producción de lodos.
  - Elevada recuperación del volumen de agua residual.
  
- **Desventajas**
  - Agente oxidante muy poderoso y altamente peligroso.
  - Altos costos del Equipo.
  - Altos costos de Tratamiento (Rice y Browning, 1981).

## **I.6 FILTRACIÓN POR CARBÓN ACTIVADO**

### **I.6.1 Antecedentes**

Como es sabido el agua es consumida en grandes volúmenes por la industria textil para sus diferentes procesos, pero la eliminación de contaminantes de los efluentes resultantes de dichos procesos es problemática, y con la tecnología establecida frecuentemente no es posible reducir adecuadamente las concentraciones de los contaminantes a los niveles deseados, por lo que el proceso de adsorción surge como una de las técnicas de tratamiento más efectivas y económicas (Lambert y Graham, 1997).

Estudios realizados por Meyer en 1992, muestran que en efluentes de plantas textiles puede alcanzarse una eliminación de color de hasta un 80%; sin embargo es importante mencionar que algunos otros estudios han mostrado que la adsorción es generalmente efectiva en la eliminación de color, pero la cantidad requerida de carbón activado para alcanzar un porcentaje significativo en la eliminación de color es alta de acuerdo a estudios realizados por Davis en 1982 (Tunay, 1996).

## **1.6.2 Principio Químico**

### **Adsorción**

La adsorción es la concentración de un soluto en la superficie de un sólido. Este fenómeno tiene lugar cuando se coloca dicha superficie en contacto con una solución. Una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales.

En el interior del sólido, las moléculas están rodeadas totalmente por moléculas similares y por lo tanto sujetas a fuerzas equilibradas. Las moléculas en la superficie están sometidas a fuerzas no equilibradas.

Debido a que estas fuerzas residuales son suficientemente elevadas, pueden atrapar moléculas de un soluto que se halle en contacto con el sólido. Este fenómeno se denomina adsorción física (o de Van der Waals).

El sólido (por ejemplo, carbón activo) se denomina adsorbente y el soluto a adsorber se denomina adsorbato. La capacidad de adsorción es función de la superficie total del adsorbente, ya que cuanto mayor sea esta superficie se dispone de mayor número de fuerzas residuales no equilibradas para la adsorción.

## **1.6.3 Métodos de Fabricación del Carbón Activado**

Preparación de los Carbones Activos.- Los carbones activos se preparan a partir de materias primas carbonosas tales como madera, lignito, carbón y cáscaras de nuez. A la fabricación se le denomina Activación, y consiste en una oxidación lenta que forma poros en el carbón, obteniéndose una estructura muy porosa con grandes áreas superficiales tan elevadas como  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  (Ramalho, 1991).

Existen dos métodos de fabricación:

- Térmica.- Con vapor o  $\text{CO}_2$  a altas temperaturas (800 a 1000 °C)
- Química.- Con ácido fosfórico, cloruro de zinc o algún otro reactivo que deshidrata la madera, antes de que esta sea carbonizada a una temperatura intermedia (400 a 600 °C) (Rodríguez, 1996).

Reactivación de los Carbones Activos.- La gran ventaja del carbón activo como adsorbente descansa en la posibilidad de reactivación (hasta 30 veces o más) sin pérdida apreciable de poder de adsorción. Usualmente la reactivación se lleva a cabo calentando el carbón agotado hasta 930 °C aproximadamente en un atmósfera aire-vapor (reactivación térmica). Esta operación puede realizarse en hornos de hogar múltiple o en hornos rotativos. Los productos orgánicos adsorbidos se queman y el carbón activo se restaura básicamente hasta su capacidad inicial de adsorción (Ramalho, 1991).

#### **1.6.4 Principales Aplicaciones del Carbón Activado Granular**

1. Potabilización de agua: decoloración, deozonización y remoción de sustancias orgánicas en bajas concentraciones (refresqueras, potabilizadoras, fábricas de hielo, equipos de ozonización, etc)
2. Tratamiento de agua para proceso (suavizadores, desmineralizadores, calderas, entre otros.)
3. Tratamiento de aguas residuales: remoción de sustancias orgánicas en concentraciones medias y altas (organismos operadores de sistemas de drenaje, industrias contaminantes entre otros)
4. Tratamiento de aire en general: Deodorización y acondicionamiento de aire (fabricantes de filtros de aire, boquillas de cigarros, campanas de cocina, máscaras contra gases, refrigeradores y aire acondicionado).

5. Recuperación de metales (electroplateado, galvanizado, revelado fotográfico, recuperación de oro).
6. Recuperación de hidrocarburos (tanques de gasolina).
7. Recuperación de solventes (acetona, xileno, hexano, etc).
8. Purificación de gases (hidrógeno, acetileno, bióxido de carbono)
9. Acuarios.

### **1.6.5 Columnas a Escala para Pruebas Rápidas (RSSCT, por sus siglas en inglés, Rapid Short Scale Column Test)**

Son columnas de vidrio, de un diámetro de 1 cm y una altura de 25 cm. Como su nombre lo indica, se utilizan para simular a escala laboratorio, lo que sucederá en la operación real.

Ya que la altura de la cama de carbón es distinta que la del filtro real, se requieren modelos matemáticos para escalar los resultados obtenidos de éstas columnas, en datos que se espera tener a escala industrial.

Estas columnas tienen la gran ventaja de requerir muestras pequeñas del fluido, así como tiempos cortos para obtener resultados.

### **1.6.6 Ventajas y Desventajas del Tratamiento con Carbón Activado**

- **Ventajas**
  - Bajos costos de Tratamiento.
  - Bajos costos de Equipo.
  
- **Desventajas**
  - Se requieren grandes cantidades de carbón activado.

- Inversión en reactivación del carbón activado (Rodríguez, 1996).

## **I.7 METODO TAGUCHI**

El diseño Taguchi es una herramienta del Diseño de experimentos, cuyo propósito es reducir los costos de experimentación, al lograr una máxima calidad cuando se pretende optimizar un proceso, con pocos experimentos.

Se analizan las contribuciones a la calidad realizadas por el Dr. Taguchi para optimizar productos y procesos de manufactura creando diseños robustos al menor costo posible.

Los métodos del Dr. Taguchi son impactantes por el rápido mejoramiento de la calidad, costos y producción. Sin embargo, es un método más bien empírico, que funciona muy bien con pocos factores.

En Japón su metodología es un éxito; en USA, se está aplicando desde 1980 – 1982 (en las compañías Ford, Xerox Y AT Bell Laboratories como pioneros).

La efectividad en el costo y una orientación de mercado son las diferencias más significativas entre la “aproximación de Genichi Taguchi y el diseño de experimentos “tradicional”. Taguchi no trata de descubrir las relaciones de variabilidad causa-efecto, sino de descubrir los niveles de parámetros que eliminan la influencia de las causas de variación. En la mayoría de los casos, las investigaciones se inician usando materiales y partes de bajo costo. Esto también reduce el costo. Lo importante es la optimización, no la identificación de un modelo como en el procedimiento tradicional.

Planteado de esta manera, los Ingenieros de Investigación se liberan de la exploración de modelos matemáticos y las dificultades involucradas en la tradicional

prueba de hipótesis para el análisis de datos. Además de la simplicidad y flexibilidad de diseñar experimentos por medio de los arreglos ortogonales, el descubrimiento de grandes efectos factoriales (factor-parámetro) a través de dichos arreglos conduce a conclusiones que son consistentes y reproducibles.

La Ingeniería de Calidad está basada en la metodología y filosofía del diseño experimental desarrollados por Genichi Taguchi. Su gran ventaja reside en que no se necesita ser experto en diseño de experimentos para aplicarlo y obtener resultados; no se requieren efectuar todos los experimentos que marca el diseño de experimentos tradicional, sino sólo una fracción de ellos, que tienen una característica importantísima: SON REPRODUCIBLES (es decir, no importa que un nivel de una variable cambie, pues estará considerado en el arreglo de experimentos resultante). Para esto hace uso de arreglos fraccionados. Las principales contribuciones de Taguchi se irán explicando más adelante.

### EL METODO TAGUCHI IMPLICA UNA NUEVA MANERA DE PENSAR:

Tabla 1.6. Marco CALIDAD – COSTO.

CALIDAD/COSTO	BAJO	ALTO
BAJA	X	X
ALTA	0	X

“X “ Condiciones no deseables.  
 “0” Alta calidad, bajo costo  
 (Filosofía Taguchi).

El propósito de Taguchi es estar en 0 (alta calidad con bajo costo).

- No representa nuevos conocimientos estadísticos; el método se basa en conceptos económicos
- No se requiere un proceso estable para lograr resultados

- Calidad es la mínima pérdida causada a la sociedad desde el momento en que un producto embarca.
- El consumidor tiene necesidades y expectativas que frecuentemente difieren de las del fabricante. Debemos conocer esas necesidades y fijarnos objetivos en nuestros procesos para reducir la variación, siendo importante saber los costos de la reducción y la variación.

## INTERPRETACIÓN DE PÉRDIDA

- La conformación con las especificaciones no es suficiente, porque se puede caer en los conceptos de que todo lo que cumple es igualmente bueno, y lo que no cumple es igualmente malo. Más bien, la calidad y costos son función de la aproximación al objetivo y la variabilidad; a mayor alejamiento y variabilidad, mayor pérdida.
- La pérdida de calidad es una pérdida financiera. Entre mejor sea la calidad de un producto, menor será la pérdida impartida a la sociedad.
- Hay dos tipos de pérdidas:
  1. La pérdida causada por la variación funcional.
  2. La pérdida causada por los efectos dañinos (tabaco, licor, etc.).

El Control de Calidad concierne a la primera pérdida. EL OBJETIVO DE LA INGENIERÍA DE CALIDAD ES MINIMIZAR LA PERDIDA ASOCIADA CON LA CALIDAD. El objetivo específico de Taguchi fue introducir un método que mejorara la eficiencia en la experimentación, alardeando que los experimentos cuestan dinero y requieren de tiempo. Para este fin desarrolló una serie de técnicas que están relacionadas a la aplicación de los arreglos ortogonales en el diseño de experimentos: gráficas lineales y tablas de interacción.

## ARREGLOS EXPERIMENTALES USANDO ARREGLOS ORTOGONALES

Los arreglos ortogonales son útiles para la colección eficiente de datos. Esta técnica fue mejorada por Taguchi. Los arreglos ortogonales producen resultados en

los que los efectos de variar un parámetro dado pueden ser separados de otros efectos. El término ortogonal significa “balanceado”, “separable” o “no mezclado”.

En el diseño de experimentos convencional, cuando se incrementa el número de parámetros, el número de experimentos se incrementa tan rápidamente que no es factible implementar los diseños, por lo que el análisis de datos frecuentemente se complica. Por la vía Taguchi se puede asignar fácilmente un gran número de variables (con diferentes números de niveles) a un pequeño número de experimentos y, el análisis de datos es bastante simple.

La principal ventaja de los arreglos ortogonales es que, haciendo los experimentos conforme al arreglo, las conclusiones que se obtienen son reproducibles. En dichos experimentos, un efecto consistente de una variable no variará aunque haya variaciones en los niveles de otras variables.

Por estas razones, es recomendable asignar tantas variables como sea posible en un experimento vía Taguchi.

Este ha sido un éxito en Japón: los resultados obtenidos a escala laboratorio o piloto reflejan satisfactoriamente los resultados obtenidos en los actuales procesos de manufactura; es decir, se mantiene una alta posibilidad de reproducir efectos no importando las variaciones que se tengan en los procesos.

**ARREGLOS ORTOGONALES.-** Son ARREGLOS FRACCIONADOS que contiene las mejores combinaciones, cuya principal característica es que son REPRODUCIBLES. Existen bastantes arreglos ortogonales y se eligen dependiendo de los factores y niveles que se tengan. Son flexibles, y por lo tanto no hay que basar el experimento a los arreglos, sino ajustarlos a lo que se tiene (HACER FACIL EL EXPERIMENTO). Son el corazón del método. Veamos su diferencia con los:

## AREGLOS FACTORIALES COMPLETOS

$$a^b$$

a = niveles de los factores;

b = factores.

3 factores/2 niveles:  $2^3 = 8$  (ocho corridas experimentales que cuestan dinero).

7 factores/2 niveles:  $2^7 = 128$

8 factores/2 niveles:  $2^8 = 256$

13 factores/3 niveles:  $3^{13} = 1594323$  (182 años trabajando 24 horas/365 días a 1 hora/experimento).

Por lo tanto, se requieren arreglos fraccionados que deben ser reproducibles (consistentes).

El problema de los experimentos donde se cambia un factor a la vez es ese: no son reproducibles, porque basta que se mueva un segundo factor para "echar a perder" el trabajo.

## SELECCIÓN DE LOS ARREGLOS ORTOGONALES.-

$$L_x (n^f)$$

L = indica que se trata de un arreglo ortogonal (AO)

x = número de corridas experimentales mínima a efectuar

n = número de niveles

f = número de columnas disponibles para asignar factores (o número de factores)

Así:

7 factores/2 niveles (según  $a^b$ , se representa como  $2^7$ ).

En las tablas de arreglos ortogonales se busca el que más se asemeje a  $2^7$  conforme al siguiente procedimiento:

- Se determinan los grados de libertad (df)

$$df = (n-1)$$

df totales = (factores) (n-1); sustituyendo:

- Se busca un arreglo ortogonal con 7 corridas (mínimo) y semejante a  $2^7$ . Los grados de libertad se emplean para seleccionar el arreglo más pequeño posible.

El arreglo encontrado es  $L_8 (2^7)$ : se deben efectuar 8 corridas (en lugar de 128) ya balanceadas y reproducibles.

- No resta más que asignar un factor en cada columna "al gusto", e iniciar los experimentos conforme a los niveles indicados en el arreglo ortogonal.

En un arreglo ortogonal no se deben mezclar factores de control y de ruido; cada uno debe tener su propio arreglo ortogonal.

La diferencia del Método Taguchi con el diseño de experimentos convencional radica en la filosofía de su aplicación: su método es más bien práctico que teórico, es inductivo más que deductivo, está encaminado al mejoramiento de la productividad y los costos más que al cumplimiento del rigor estadístico. Metodológicamente, aplica los arreglos ortogonales (técnicas de experimentación ya conocidas) a sus nuevas técnicas de análisis y las relaciones señal/ruido.

La filosofía de Taguchi radica en reducir costos desde la planeación misma de un proyecto o diseño (experimentos fuera de línea), para que así “nazca” un proceso robusto, en base al objetivo que se tenga. La filosofía también es aplicable en plantas de operación (experimentos en la línea), siendo imprescindible el diagnóstico, predicción, corrección y control del proceso.

Esta metodología pudiera parecer que estuviera en conflicto con los conceptos tradicionales sobre control de calidad; sin embargo, una vez comprendido el método se verá que más bien los está optimizando, (en este método es más importante cumplir un objetivo de calidad que unas especificaciones).

Una de las aplicaciones más importantes de Taguchi es el diseño de un producto/proceso que tenga la mejor calidad, cuyo funcionamiento sea estable; en otras palabras, seleccionar los niveles óptimos de las variables controladas, con el fin de disminuir los efectos de las variables ambientales y condiciones que degraden la estabilidad del desempeño del producto.

La forma tradicional de lograr este objetivo está basada en la filosofía de diseño-prueba-rediseño por no considerar los efectos de todas las combinaciones (al pasar de pruebas piloto a la producción en serie). Taguchi ha optimizado el diseño para hacerlo menos sensitivo a las variaciones sin incrementar el costo.

## FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO O PRODUCTO

Taguchi llama a estas variaciones RUIDO O FACTORES DE ERROR;

Pueden ser de 3 tipos:

- Ruido externo: condiciones ambientales o de operación que pueden cambiar el funcionamiento del proceso o producto.
- Ruido interno o de deteriorización: cambios en las dimensiones o propiedades de materiales debido al tiempo y al uso.

- Variación o ruido entre el producto: variaciones en materiales o productos que tienen la misma especificación.

Los diseños que se desempeñan consistentemente, aún estando presentes estos ruidos, tienen una BUENA CALIDAD FUNCIONAL.

El propósito global de la Ingeniería de Calidad es crear un diseño que sea robusto con respecto a todos los factores de ruido.

Es más importante tener una producción tan cerca como sea posible al objetivo que tener cero defectos.

## INGENIERIA DE CALIDAD

- Involucra el empleo de arreglos ortogonales, la función de pérdida y otras técnicas analíticas (en la etapa de diseño y en la línea).
- OBJETIVO: reducción de costos de ingeniería, manufactura y servicios a través de la optimización del diseño.
- La mejora de calidad se convierte en ganancia en el producto y en el proceso.
- Se refleja en ciclos de desarrollo de productos más costosos, calidad mejorada y reducción de costos.

Las etapas que debe comprender un buen diseño son:

1. Diseño del sistema (innovación).
2. Diseño de parámetros (optimización).
3. Diseño de tolerancia (optimización).

Esta metodología no le da importancia a las especificaciones, porque trabaja en base a objetivos.

La mejor etapa de control es la de diseño del producto para controlar los efectos del ruido externo y por deteriorización (en las etapas de diseño del proceso y en la de producción, el control es imposible).

El control de ruido debido a imperfecciones de manufactura es posible en cualquier etapa, siendo imposible cuando el producto ya está con el cliente.

## METODOLOGIA DE INGENIERIA DE CALIDAD

Su punto de partida es la PLANEACION. Si se hace una selección inadecuada de variables, el análisis no servirá.

Para desarrollarla deben estar involucrados todos los departamentos, sin "olvidar" a los ayudantes y operadores (así se evita la famosa frase: "para que ese proyecto?, con mover este botón se logra lo que ustedes piden").

La metodología es un proceso sistemático; la mayor parte de ésta es conocida, la diferencia radica en la filosofía con que se toma el concepto CALIDAD.

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Debe iniciarse la búsqueda de información (no olvidando la literatura) que continúa durante la tormenta de ideas.

## OBJETIVO

- Que sea numérico (identificar la(s) característica(s) a medir.)
- Que pueda medirse
- Que se pueda medir mediante un método que sea económico

## TORMENTA DE IDEAS

- Es la parte medular del programa, lleva tiempo y requiere creatividad.
- Identificar factores y sus niveles (valores)

- Agrupar los factores en factores de control y factores de ruido.

## CREATIVIDAD

- Si se efectúa una buena planeación, puede tratarse de una solución y ya no requiere efectuar la asignación del experimento.

## ASIGNACIÓN DEL EXPERIMENTO

- Es aplicar las técnicas del Método Taguchi. No se deben forzar los factores a los arreglos ortogonales (el ajuste se efectúa a la inversa).

## EXPERIMENTACION-RECOPIACION DE DATOS

- Se requiere un plan operacional del experimento (PROCEDIMIENTO).

## ANALISIS/INTERPRETACION DE RESULTADOS

- Análisis regular
  1. Podemos obtener efectos principales (promedio) para factores de control, empleando tablas de respuesta, gráficas factoriales y
  2. Estudiar el efecto de las interacciones
- Análisis señal ruido
  1. Se analizan la media y la variabilidad
  2. Se estudia la interacción entre factores de control y de ruido
  3. Señal-ruido es una medida del comportamiento con respecto al ruido y está relacionada con costos.

## OPTIMIZACION-PREDICION

- Hallar la mejor combinación (campeón de papel) del experimento.
- Determinar la mejor combinación económica (campeón económico).
- Predecir si, dentro de los experimentos no realizados, hay otra combinación aun mejor.

## CONFIRMACION

- Correr la mejor combinación encontrada (puede hacerse con el peor y mejor experimento)
- No olvidar llevar registros de las condiciones actuales de operación.
- Si todo sale mal, se debe regresar a la tormenta de ideas para profundizar en el análisis.
- Puede suceder que el proceso esté optimizado y ya no se pueda hacer nada más (sin embargo, en la mayoría de los casos no es así) (Taguchi, 1987).

## **CAPITULO II.**

### **OBJETIVOS E HIPOTESIS**

#### **II.1 OBJETIVOS**

##### **II.1.1 Objetivo General:**

Diseñar una metodología para el manejo de las aguas residuales a nivel industrial, que sea capaz de disminuir los efluentes generados en la industria textil (Deslavados de Mezclilla), mediante el reuso del agua residual tratada en el proceso textil en la misma empresa, minimizando el desperdicio y abatiendo en forma significativa el nivel de contaminación que dicha industria genera, de manera que sea posible brindar una alternativa para disminuir la contaminación ocasionada por los efluentes provenientes del proceso textil, con ahorros significativos en el pago por consumo de agua.

##### **II.1.2 Objetivos Particulares:**

- Comparar la eficiencia de los diferentes métodos de tratamiento (Coagulación-Floculación, Electroflotación, Digestión Anaerobia, Ozonización y Filtración por Carbón Activado) para la remoción de un contaminante particular (DBO, DQO, Color, Sólidos Suspendidos, etc.) presentes en las Aguas Residuales de la Industria de Deslavados de Mezclilla.
- Determinar el proceso de tratamiento más adecuado para cada una de las corrientes de descarga de la Industria de Deslavados de Mezclilla.

- Establecer las bases teóricas confiables para el diseño y construcción de una Planta modular de tratamiento de Aguas Residuales de la Industria de Deslavados de Mezclilla.

## **II. 2 HIPÓTESIS DE TRABAJO**

- Es posible reducir el consumo de agua del giro textil nacional (Deslavados de Mezclilla) hasta en un 50% mediante el tratamiento y reuso del agua residual final.
- Es posible establecer, mediante una serie de pruebas de tratabilidad, un solo tipo de tratamiento para todas las corrientes de agua resultante del proceso textil (Deslavados de Mezclilla), con características diferentes.
- Es posible diseñar un sistema de tratamiento de aguas de la industria textil (Deslavados de Mezclilla) más eficiente y a un costo menor que los sofisticados (y costosos) sistemas que se ofrecen en el mercado.
- Al tratar las aguas de la industria textil (Deslavados de Mezclilla) se abatirá grandemente el problema de contaminación, sin que esto ocasione un problema socioeconómico, además de que habrá un gran ahorro en el consumo de agua mediante el reuso de la misma después del tratamiento, superando las ofertas actuales del mercado de plantas de tratamiento para aguas residuales de la industria textil y permitir así la sana expansión nacional del giro industrial.

## CAPITULO III.

### DISEÑO EXPERIMENTAL

#### III.1 DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN Y ELECTROFLOTACIÓN SIGUIENDO LA METODOLOGÍA TAGUCHI

##### III.1.1 Coagulación – Floculación

Antes de aplicar el Método Taguchi al tratamiento por Coagulación – Floculación, se revisó cual era el problema con este tipo de tratamiento, encontrando que no se conoce cual es la dosis adecuada de los dos químicos que se utilizan en el tratamiento (Coagulante y Floculante), de tal forma que tengan el efecto de sedimentar los lodos a velocidades adecuadas para provocar una máxima eliminación de color en el agua residual. Al no conocer dosis adecuadas trae como consecuencia que se gasten cantidades muy grandes de estos productos químicos, además de que su eficiencia para eliminar el color es muy pobre. Se realizaron pruebas preliminares para seleccionar los polímeros adecuados y el rango de dosis en el que se variarán los factores o variables a considerar en el experimento. En base a todo esto se seleccionaron 3 variables que afectan sin duda alguna la eficiencia del tratamiento, que son las que se incluirán en el Método Taguchi, quedando de la siguiente manera:

Tabla 3.1. Variables incluidas en el Diseño de acuerdo al Método Taguchi para el Tratamiento de Coagulación – Floculación.

Cantidad de coagulante	C
Cantidad de Floculante	F
pH inicial de la Muestra antes del Tratamiento	H

Además, en la bibliografía y en datos provenientes de la Industria de Deslavados de Mezclilla se muestra que los efluentes generados en la misma tienen como principal característica una variación en la composición, por lo que se decidió formular el diseño a 3 diferentes niveles de las variables incluidas.

## APLICACIÓN DEL MÉTODO

### 1. Definición del Problema

Se trata de obtener un porcentaje máximo en la eliminación del color del Agua Residual de Deslavado de Mezclilla.

### 2. Tormenta de Ideas

Consultando la bibliografía y conociendo la problemática actual de la Industria de Deslavado de Mezclilla se encontraron las siguientes condiciones para el tratamiento:

Tabla 3.2. Factores y Niveles que se incluirán en el Diseño de acuerdo a Taguchi en Coagulación – Floculación.

FACTORES		NIVELES		
		(1)	(2)	(3)
Coagulante	(C)	15 mg/L	18 mg/L	21 mg/L
Floculante	(F)	0.046 mg/L	0.05 mg/L	0.054 mg/L
Interacción	(I)			
pH	(H)	5.5	6.5	7.5

### 3. Diseño del Experimento

Número de combinaciones:  $3^3 = 27$  experimentos (arreglo completo)

Arreglo Ortogonal:

Grados de libertad: (factores)  $(n - 1)$

Grados de libertad:  $3(3 - 1) = 6$

Arreglo ortogonal elegido:  $L_9 (3^4)$

Tabla 3.3. El Arreglo Ortogonal elegido para Coagulación – Floculación es:

EXPERIMENTO	C	F	I	H
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Es importante mencionar que la columna de la Interacción (I), no será considerada en el momento de la realización de los experimentos, por no ser un factor tangible, por ello es que se omite en el proceso de experimentación, más sin embargo, esta columna será considerada en la parte de interpretación de resultados, por lo que el Arreglo Ortogonal se ajusta al mostrado en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4. Arreglo Ortogonal a utilizar:

EXPERIMENTO	C	F	H
	1	2	4
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	3
5	2	2	1
6	2	3	2
7	3	1	2
8	3	2	3
9	3	3	1

Es prioritario efectuar el arreglo antes de efectuar el experimento. Una vez diseñado el experimento se procedió a realizar la etapa de experimentación.

### III.1.2 Electroflotación

#### a). Electrodo de Aluminio

Antes de aplicar el Método Taguchi al tratamiento por Electroflotación, se realizaron pruebas preliminares con electrodos de Aluminio, electrodo recomendado en la bibliografía para la eliminación de color en el agua residual de Deslavados de Mezclilla, con el objetivo de tratar de recopilar las mejores condiciones de operación (corriente aplicada, tiempo de tratamiento y pH inicial de la muestra antes del tratamiento) para este tipo de agua en particular, para posteriormente optimizar estas condiciones a través de la aplicación del Método Taguchi; por tanto se seleccionaron 3 variables que afectan sin duda alguna la eficiencia del tratamiento por Electroflotación, que son las que se incluirán en el Método Taguchi, quedando de la siguiente manera:

Tabla 3.5. Variables incluidas en el Diseño de acuerdo al Método Taguchi para el Tratamiento de Electroflotación con Aluminio.

Corriente aplicada	I
Tiempo de tratamiento	T
pH inicial de la Muestra antes del Tratamiento	H

Como se mencionó anteriormente, los efluentes generados en la Industria de Deslavados de Mezclilla tienen como principal característica una variación en la composición, por lo que se decidió formular el diseño a 3 diferentes niveles de las variables incluidas (factores).

## APLICACIÓN DEL MÉTODO

### 1. Definición del Problema

Se trata de obtener un porcentaje máximo en la eliminación del color del Agua Residual de Deslavados de Mezclilla.

### 2. Tormenta de Ideas

Consultando la bibliografía y basándonos en resultados de pruebas preliminares con agua residual de Deslavados de Mezclilla se encontraron las siguientes condiciones para el tratamiento:

Tabla 3.6. Factores y Niveles que se incluirán en el Diseño de acuerdo a Taguchi en Electroflotación con Aluminio.

FACTORES		NIVELES		
		(1)	(2)	(3)
Corriente	(I)	1.3 A	1.4 A	1.5 A
Tiempo	(T)	4.0 min.	4.5 min.	5.0 min.
pH	(H)	5.5	6.5	7.5

### 3. Diseño del Experimento

Número de combinaciones:  $3^3 = 27$  experimentos (arreglo completo)

Arreglo Ortogonal:

Grados de libertad: (factores) (n -1)

Grados de libertad:  $3(3 - 1) = 6$

Arreglo ortogonal elegido:  $L_9 (3^4)$

Tabla 3.7. El Arreglo Ortogonal elegido para Electroflotación con Aluminio es:

EXPERIMENTO	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

El cual se ajusta al mostrado en la Tabla 3.8, debido a que solo estamos manejando 3 factores, que son las 3 variables que intervienen en el experimento.

Tabla 3.8 Arreglo Ortogonal a utilizar:

EXPERIMENTO	I	T	H
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Es prioritario efectuar el arreglo antes de efectuar el experimento. Una vez diseñado el experimento se procedió a realizar la etapa de experimentación.

b). Electrodo de Hierro

Al igual que con el electrodo de Aluminio, antes de aplicar el Método Taguchi al tratamiento por Electroflotación, se realizaron pruebas preliminares con electrodos de Hierro, que es uno de los electrodos recomendados en la bibliografía para la eliminación de color en el agua residual de Deslavados de Mezclilla, con el objetivo de tratar de recopilar las mejores condiciones de operación (corriente aplicada, tiempo de tratamiento y pH inicial de la muestra antes del tratamiento) para este tipo de agua en particular, y posteriormente optimizar estas condiciones a través de la aplicación del Método Taguchi; en base a esto se seleccionaron 3 variables que afectan sin duda alguna la eficiencia del tratamiento por

Electroflotación, que son las que se incluirán en el Método Taguchi, quedando de la siguiente manera:

Tabla 3.9. Variables incluidas en el Diseño de acuerdo al Método Taguchi para el Tratamiento de Electroflotación con Hierro.

Corriente aplicada	I
Tiempo de tratamiento	T
pH inicial de la Muestra antes del Tratamiento	H

Por las mismas razones ya explicadas anteriormente se decidió formular el diseño a 3 diferentes niveles de las variables incluidas (factores).

## APLICACIÓN DEL MÉTODO

### 1. Definición del Problema

Se trata de obtener un porcentaje máximo en la eliminación del color del Agua Residual de Deslavado de Mezclilla.

### 2. Tormenta de Ideas

Con el objetivo de hacer una comparación entre el tratamiento con electrodo de Aluminio y el de Hierro se consideraron las siguientes condiciones para el tratamiento:

Tabla 3.10. Factores y Niveles que se incluirán en el Diseño de acuerdo a Taguchi en Electroflotación con Hierro.

FACTORES		NIVELES		
		(1)	(2)	(3)
Corriente	(I)	1.3 A	1.4 A	1.5 A
Tiempo	(T)	4.0 min.	4.5 min.	5.0 min.
pH	(H)	5.5	6.5	7.5

### 3. Diseño del Experimento

Número de combinaciones:  $3^3 = 27$  experimentos (arreglo completo)

Arreglo Ortogonal:

Grados de libertad: (factores) (n -1)

Grados de libertad:  $3(3 - 1) = 6$

Arreglo ortogonal elegido:  $L_9 (3^4)$

Tabla 3.11. El Arreglo Ortogonal elegido para Electroflotación con Hierro es:

EXPERIMENTO	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

El cual se ajusta al mostrado en la tabla 3.12, debido a que sólo estamos manejando 3 factores.

Tabla 3.12. Arreglo Ortogonal a utilizar:

EXPERIMENTO	I	T	H
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Es prioritario efectuar el arreglo antes de efectuar el experimento. Una vez diseñado el experimento se procedió a realizar la etapa de experimentación.

### III.2 DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA, OZONIZACIÓN Y FILTRACIÓN POR CARBÓN ACTIVADO

El desarrollo de estos experimentos consiste en determinar la cinética de reacción que se presenta en los procesos de Digestión Anaerobia y Ozonización; con lo que respecta al proceso de filtración por Carbón Activado, se requiere determinar el volumen de muestra al cual el carbón contenido en una columna de vidrio se satura, es decir se determinará el punto de saturación del carbón activado con la muestra de deslavados de mezclilla, con el fin de utilizar estos datos para el

diseño de la columna a nivel industrial; así mismo se determinará el porcentaje de eficiencia que cada uno de estos tratamientos puede proporcionar en la eliminación de Color y DQO principalmente, enseguida se especifican algunos otros parámetros a determinar.

### **III.2.1 Digestión Anaerobia**

Se determinará el orden de reacción para la digestión que tiene lugar en el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, para lo cual se monitorearán en el reactor diariamente (durante un período aproximado de 30 días) los siguientes parámetros de control: Color, Conductividad, pH, DQO y el valor de la Absorbancia a 700 nm; asimismo se determinará el porcentaje de eficiencia en la eliminación de Color y DQO que muestra el Reactor a un TRH (Tiempo de Retención Hidráulica) de 1.5 días, tiempo establecido en base a datos mostrados en la bibliografía. (Ilangovan y Briones, 1997)

### **III.2.2 Ozonización**

Se determinará cual es el orden de reacción del proceso de Ozonización con el agua residual de Deslavados de Mezclilla operando el Ozonizador a 10% de su capacidad, con una presión de 15 lbs y un flujo de 20 ft<sup>3</sup>/hr (datos obtenidos del manual de operación del equipo), asimismo se determinará su eficiencia en la eliminación del color del agua residual de Deslavados de Mezclilla para lo que se monitorearán los mismos parámetros que en el tratamiento con Digestión Anaerobia, a diferentes tiempos.

### **III.2.3 Filtración por Carbón Activado**

Se determinará el punto de saturación del Carbón Activado en el proceso de filtración por Carbón Activado del agua residual de Deslavados de Mezclilla, así como el porcentaje de eficiencia en la eliminación de color que puede ofrecer este tratamiento para este tipo de agua residual.

## **CAPITULO IV.**

### **MATERIAL Y MÉTODOS**

#### **IV.1 CONDICIONES DE LA MUESTRA**

Las muestras fueron tomadas de las corrientes de descarga, obtenidas a través de un muestreo compuesto, y se conservaron en un cuarto frío a una temperatura de  $-4^{\circ}\text{C}$ . Cabe mencionar que las muestras iniciales y posteriores a los tratamientos fueron canalizadas al laboratorio para la determinación correspondiente de los parámetros de control establecidos en este trabajo, el cual se encargó de realizar muestreo y mediciones de acuerdo a las Normas que aplican para cada parámetro (Anexo III).

Es importante asegurar siempre una adecuada homogeneización de la muestra antes de iniciar el tratamiento, para asegurar asimismo resultados confiables.

#### **IV.2 CURVAS DE MÁXIMA ABSORBANCIA ESPECTRAL**

Para seleccionar la mejor longitud de onda para las muestras que se evaluaron, es decir la longitud de onda a la cual el espectrofotómetro da el valor más alto de absorbancia, se determina el valor de la absorbancia de la muestra (se toma un alícuota de 50 mL de muestra y se colocó en la celda para su lectura en el espectrofotómetro) cada 50 o cada 100 nm, datos con los cuales se construyó una gráfica (longitud de onda como las abscisas y absorbancia como las ordenadas).

Para facilitar la determinación de la mejor longitud de onda se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las muestras de color amarillo absorben la luz en la región de 400 a 500 nm.
- Las muestras de color rojo absorben la luz en la región de 500 a 600 nm.
- Las muestras de color azul absorben la luz en la región de 600 a 700 nm.

En este caso se comenzó a hacer un barrido espectral en la región de 600 a 700 nm de acuerdo a las consideraciones anteriormente marcadas, ya que nuestras muestras son de color azul.

Una vez seleccionada la mejor longitud de onda para las muestras de Tallado–Descrude y Enjuague–Suavizado, se realizó la caracterización de las muestras, midiendo los parámetros ya mencionados.

### **IV.3 COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN**

Las pruebas de tratabilidad se realizaron en el laboratorio, inicialmente con un volumen de 250 mL de muestra, utilizando una batería de agitadores para Prueba de Jarras, técnica utilizada para conocer las dosis adecuadas de coagulante y floculante mediante la observación de la velocidad de formación de flóculos y su sedimentación.

Las pruebas se realizaron de acuerdo al diseño experimental, utilizando HCl y NaOH al 10% para imponer el pH inicial de la muestra que marca el diseño experimental.

Se utilizaron soluciones de Coagulante al 3% y de Floculante al 0.2% en las dosis indicadas en el diseño experimental, la técnica consiste en agregar inicialmente a la muestra el coagulante y agitar durante 1 minuto a 100 r.p.m., posteriormente se agregó el floculante y se agitó durante 1 minuto a 100 r.p.m. e inmediatamente la velocidad de agitación se disminuyó a 40 r.p.m. durante 1 minuto

y se dejó reposar la muestra durante 5 minutos antes de ser filtrada utilizando papel Whatman Grado 4.

Una vez tratada la muestra y filtrada, se monitorearon los diferentes parámetros de control: Color, Conductividad, pH, DQO y el valor de la Absorbancia a 700 nm, mismos que se monitorearon después de aplicarse todos y cada uno de los diferentes tratamientos.

Una vez elegidas las condiciones óptimas de operación de acuerdo al diseño experimental, se procedió a realizar las corridas confirmatorias con un volumen de 1 L de muestra.

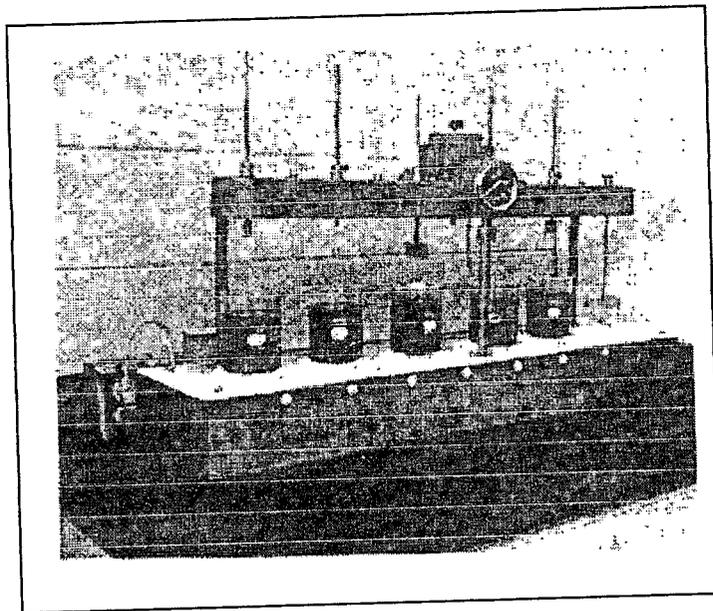


Figura 4.1. Batería de Agitadores para Prueba de Jarras.

#### IV.4 ELECTROFLOTACIÓN

Las pruebas preliminares de tratabilidad se realizaron con alícuotas de la muestra de 250 mL, utilizando una celda de PVC con capacidad de 300 mL y volumen útil de 250 mL, acondicionada con una manguera en la parte inferior para la salida del agua tratada, se utilizaron electrodos de aluminio (cátodo y ánodo) y fierro (cátodo y ánodo) de dimensiones de 50 cm<sup>2</sup> y 56 cm<sup>2</sup> respectivamente, con una separación entre cátodo y ánodo de 7 mm. Las placas de aluminio que se utilizaron para la construcción de los electrodos tienen una pureza del 99%, por otro lado las placas utilizadas para la construcción de los electrodos de fierro son de un Acero 1018.

Se utilizó una fuente de poder SORENSEN DCS 60-50 (0-60 Volts, 0-50 Amperios), un agitador magnético de 1 pulgada con parrilla.

Es importante mencionar que mediante pruebas preliminares se determinó la velocidad de agitación a la que se tiene que trabajar con cada tipo de electrodo; en las pruebas con el electrodo de aluminio se empleó una velocidad de agitación de 600 r.p.m.; en las pruebas con electrodo de fierro se empleó una velocidad de agitación de 400 r.p.m.

Los reactivos utilizados para imponer pH de la muestra a tratar son HCl y NaOH al 10%.

Posteriormente las pruebas finales se realizaron en una celda de vidrio de 1 L de capacidad con un volumen útil de 800 mL provista de una llave de vidrio en la parte inferior que permitía la salida del agua residual ya tratada; para el trabajo en el laboratorio con este volumen de agua se utilizaron electrodos de aluminio de 160 cm<sup>2</sup> y electrodos de fierro de 179 cm<sup>2</sup>, con separación de 7 mm.

Se aplicó el tratamiento de electroflotación a la muestra de acuerdo al Diseño Experimental y posteriormente las muestras ya tratadas fueron filtradas utilizando papel Whatman Grado 4; el seguimiento del efecto de la electroflotación sobre las muestras ya tratadas se realizó monitoreando los parámetros de control.

Una vez elegidas las mejores condiciones de operación de acuerdo al diseño experimental, se procedió a realizar las corridas confirmatorias con un volumen de 1 L de muestra.

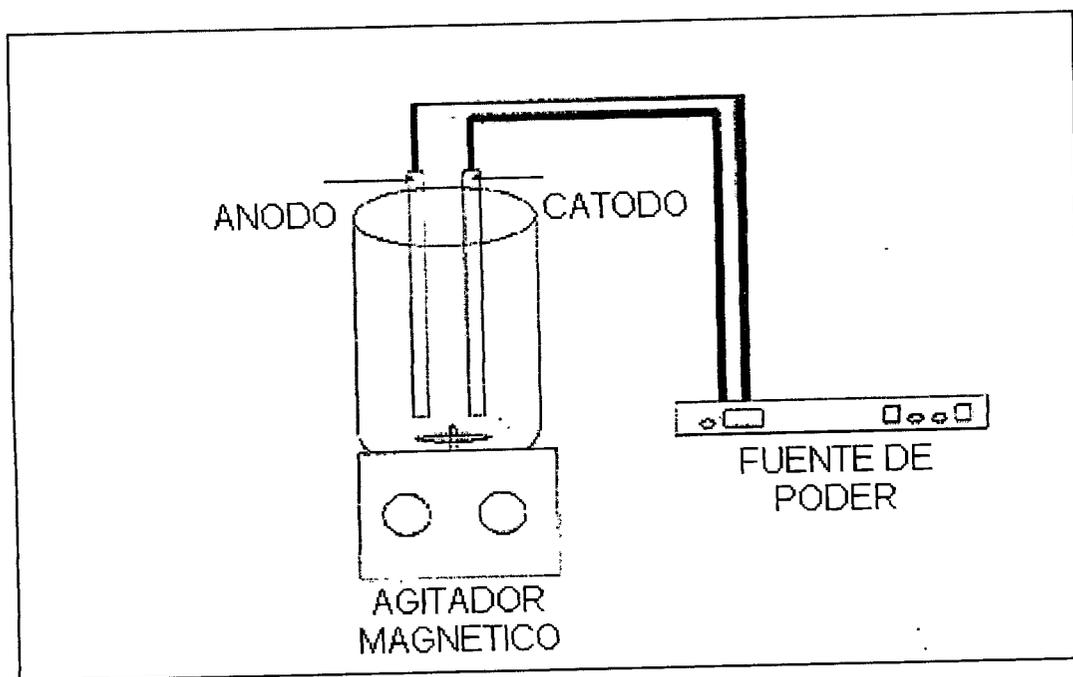


Figura 4.2. Representación de un dispositivo de laboratorio para el proceso de Electroflotación.

## **IV.5 DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La prueba de tratabilidad en laboratorio se realizó en un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, construido de un tubo de acrílico de diámetro interno 13.40 cm, altura de 30 cm lo que representa un volumen total de 4.211 L y útil de 3.158 L, en su parte superior se instaló un deflector (parte interna del reactor) con el propósito de separar las tres fases que se dan en el proceso, sólida-líquida y gaseosa, esto se aprecia esquemáticamente en la Figura 4.3. En la parte superior del reactor se tiene una configuración en forma de cono, a través de la cual sale el agua tratada, esta parte del reactor fue construida de PVC, al igual que el tubo que permite recolectar el agua tratada.

En la parte inferior presenta una configuración en forma plana en donde tiene conectada la manguera de alimentación de agua lo que permitía el contacto con la cama de lodos. La alimentación del agua residual y recirculación del efluente se realizó mediante una bomba peristáltica (bomba rotatoria) marca Cole-Parmer, de 6-600 RPM, provista de manguera Masterflex del No. 16 y un Controlador de Velocidad Masterflex de Cole-Parmer (0-10 r.p.m.). Además el sistema cuenta con una trampa de biogás; para registrar la cantidad de biogás generado a la temperatura de operación. Esta trampa se encuentra conectada a un medidor de flujo donde se registra el volumen de biogás producido durante el día. El reactor opera a, temperatura de  $35 \pm 2$  °C, TRH (Tiempo de Retención Hidráulica) de 1.5 días.

En la parte inferior del tanque se adaptó un soporte (tripié) construido de acrílico de tal manera que pudiera estar perfectamente estable y se eviten derrames, la temperatura se controló a 35 °C, para lo cual se utilizó una incubadora Novatech, que permitió un control de  $\pm 1$  °C asegurándonos con ello una mínima variación en la temperatura.

El agua fue recolectada para su posterior recirculación en un matraz EM con capacidad de 4 L.

El seguimiento del reactor se realizó diariamente por lo que se procedió a recolectar una muestra de agua para monitorear los parámetros de control.

La inoculación del reactor se realizó con lodos anaerobios provenientes de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente que trata efluentes de una fábrica de Casimires, mismos que se mantuvieron en un periodo de aclimatación de 2 meses con el agua residual de Deslavados de Mezclilla. La cantidad de lodos que se adicionó fue del 30% del volumen del reactor. (Ilangovan y Briones, 1997).

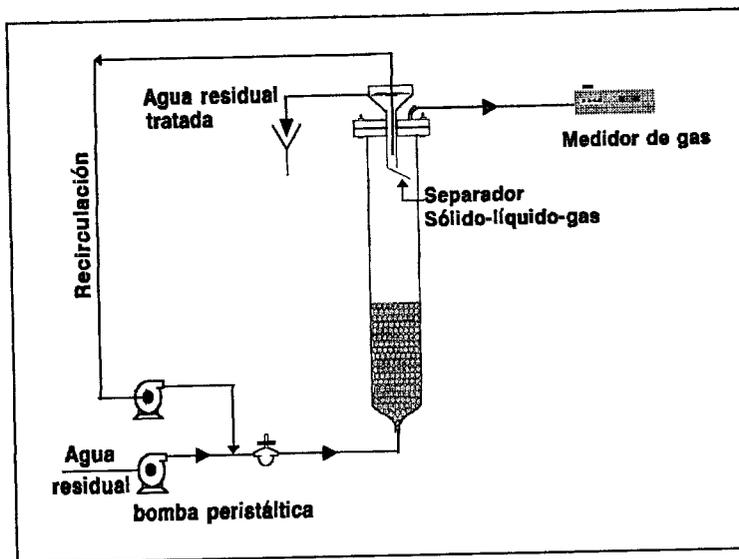


Figura 4.3. Arreglo experimental del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.

## IV.6 OZONIZACIÓN

Para la realización de las pruebas de tratabilidad, se utilizó un Ozonizador PCI modelo GL – 1, un reactor de vidrio de 1 L con tapones de plástico, un difusor de ozono con un tamaño de poro de 170 a 220  $\mu\text{m}$ , 12 mm de diámetro, y una longitud de 250 mm, un tanque de oxígeno de 6  $\text{m}^3$  y mangueras No. 16.

Para asegurar un mayor contacto de la muestra (se utilizó un volumen de muestra de 500 mL) con el ozono se utilizó empaque de acero inoxidable el cual se colocó en el reactor que contenía la muestra.

La muestra fue sometida a diferentes tiempos de ozonización, operando el Ozonizador al 10% de su capacidad a 15 lbs de presión y un flujo de 20  $\text{ft}^3/\text{hr}$ , (a estas condiciones la cantidad de ozono aplicada a la muestra es de 78.819 mg/min.) (Arellano,1997).

A partir de estos datos se determinó la cinética de reacción de la ozonización en el tratamiento de la muestra de agua residual.

Una vez tratadas las muestras fueron filtradas con papel Whatman Grado 4 y posteriormente se midieron los parámetros de control.

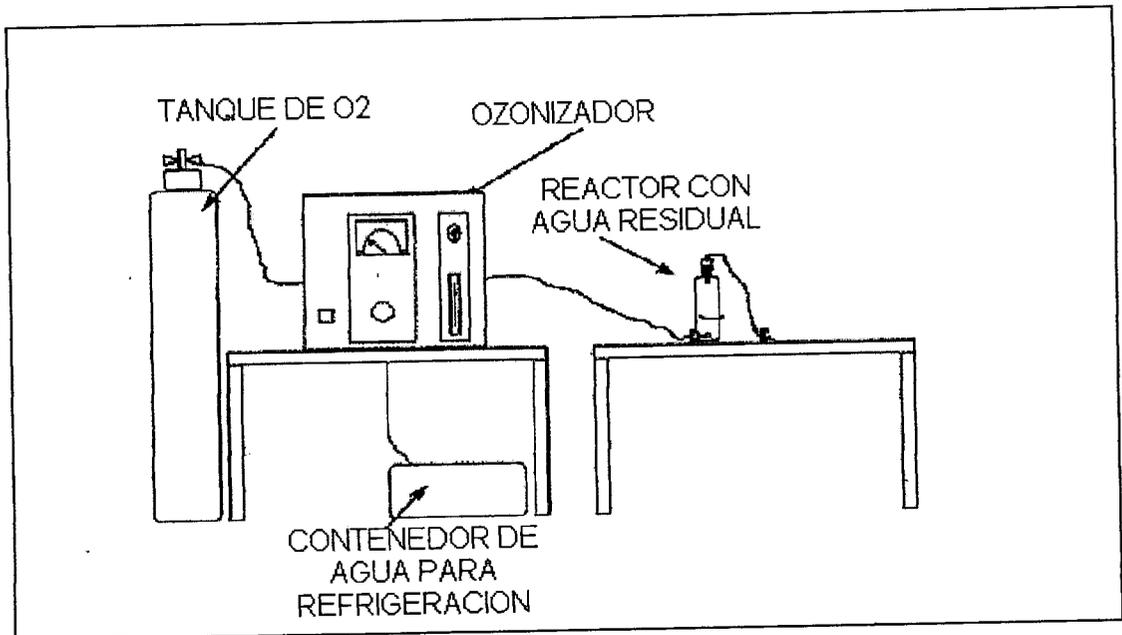


Figura 4.4. Representación de un dispositivo de laboratorio para realizar las pruebas de Ozonización.

#### IV.7 FILTRACIÓN POR CARBÓN ACTIVADO

La prueba de tratabilidad en el laboratorio se llevó a cabo mediante la utilización de una columna a escala para pruebas rápidas (RSSSCT) de vidrio, con un diámetro interno de 3.2 cm y una altura 27.5 cm, su altura útil es de 19 cm, para evitar el derrame del carbón activado o del agua durante el lavado inicial.

Tiene un volumen útil de  $154.2 \text{ cm}^3$ , con capacidad de 56.5 gramos de Carbón Activado; a través de la columna se hizo pasar la muestra de agua a un flujo de  $0.093 \text{ cm}^3/\text{seg}$ , que es un flujo adecuado para el tamaño de columna, además se buscaba que la muestra tuviera el mayor tiempo de contacto con la cama de carbón activado.

Se recolectaron muestras de 10 mL continuamente, en las que se monitoreó Absorbancia, Color y DQO, para poder determinar el volumen al cual el Carbón

Activado se satura con los sólidos disueltos contenidos en la muestra de agua residual.

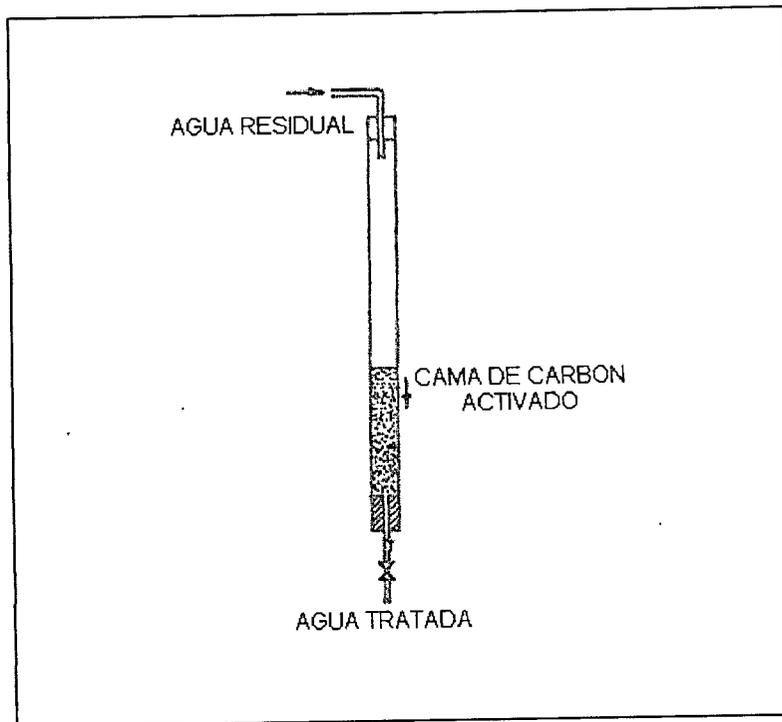


Figura 4.5. Representación de una columna de Carbón Activado a nivel laboratorio.

Es importante mencionar que las pruebas preliminares para los diferentes métodos se llevó a cabo utilizando el equipo para pruebas de campo, posteriormente las pruebas finales de las que se obtuvieron los resultados para el tratamiento estadístico y tablas comparativas, fueron realizadas utilizando las técnicas que marca la normatividad vigente (Normas Mexicanas NMX, Anexo III).

## CAPITULO V.

### RESULTADOS

#### V.1 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE LA MUESTRA DE AGUA RESIDUAL DE DESLAVADOS DE MEZCLILLA

##### V.1.1 Agua Sucia (Tallado – Descrude)

Tabla 5.1. Resultados de la Caracterización Fiscoquímica de la Muestra de Tallado – Descrude.

DETERMINACION	TECNICA	RESULTADOS
Conductividad Eléctrica	Conductimetría	1052 $\mu$ S/cm
DQO	Espectrofotometría	1311 mg/L
pH	Potenciometría	6.50
Color	Espectrofotometría	4075 UPtCo
Al	ICP	0.1 mg/L
Fe	ICP	2 mg/L

Mediante la realización de una Curva de Máxima Absorbancia Espectral, se determinó la mejor longitud de onda para el tipo de muestra (Muestra de Agua Sucia) que se está evaluando, es decir, se determinó la longitud de onda a la cual la muestra da el valor máximo de Absorbancia, misma a la que se evaluará la muestra después de cada uno de los tratamientos.

Tabla 5.2. Datos para la Curva de Máxima Absorbancia Espectral del Agua de Tallado – Descrude.

$\lambda(\text{nm})$	Absorbancia
650	3.550
655	3.601
660	3.687
665	3.721
670	3.729
675	3.900
680	3.909
685	3.970
690	4.002
695	4.024
*700	4.087
705	4.056
710	3.980
715	3.912
720	3.843
725	3.675
730	3.489
735	3.457
740	3.181
745	3.070
750	2.913

Como podemos observar en la gráfica siguiente, el punto máximo de la absorbancia se obtiene a una longitud de onda de 700 nm, a la cual serán realizadas todas las lecturas de absorbancia para dicha muestra.

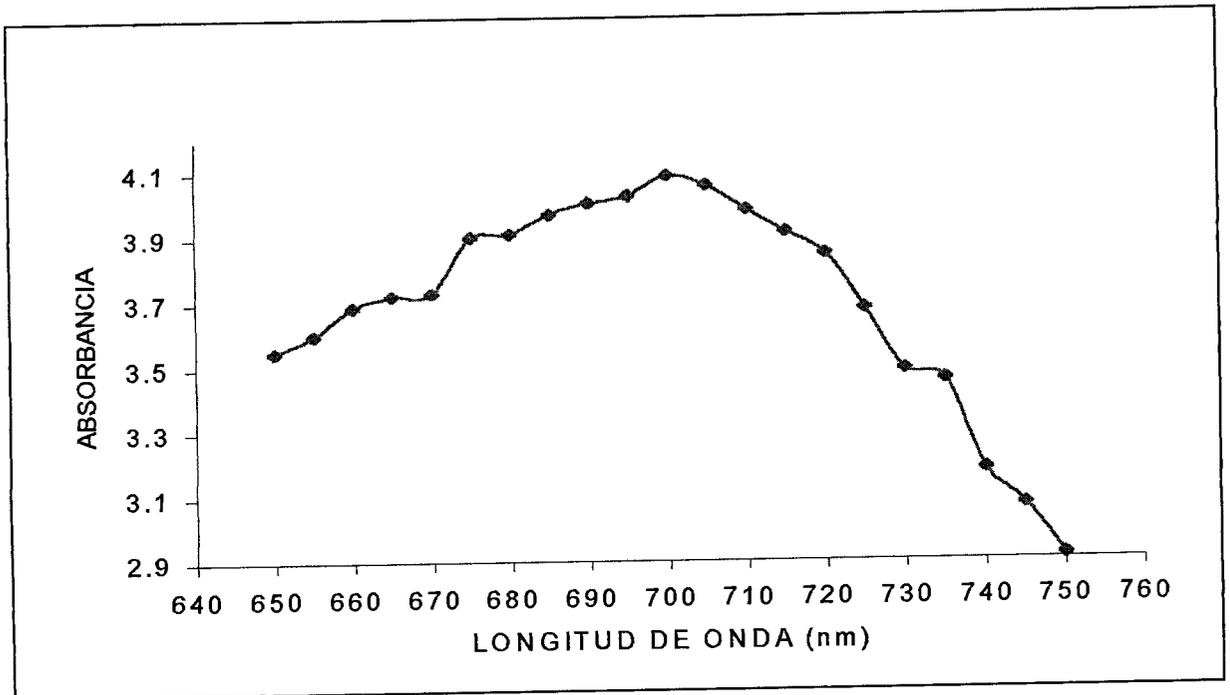


Figura 5.1. Curva de Máxima Absorbancia Espectral del Agua de Tallado - Descruce.

### V.1.2 Agua Semisucia (Enjuague – Suavizado)

Tabla 5.3. Resultados de la Caracterización Fisicoquímica de la Muestra de Enjuague – Suavizado.

DETERMINACIÓN	TECNICA	RESULTADOS
Conductividad Eléctrica	Conductimetría	990 $\mu$ S
DQO	Espectrofotometría	408.5 mg/L
pH	Potenciometría	6.27
Color	Espectrofotometría	423 UPtCo
Al	ICP	> 0.025 mg/L
Fe	ICP	> 0.05 mg/L

Al igual que para el Agua Sucia, mediante la realización de una Curva de Máxima Absorbancia Espectral, se determinó la mejor longitud de onda para el tipo de muestra (Muestra de Agua Semisucia) que se está evaluando, es decir se determinó la longitud de onda a la cual la muestra da el valor máximo de Absorbancia, misma a la que se evaluará la muestra después de cada uno de los tratamientos.

Tabla 5.4. Datos para la Curva de Máxima Absorbancia Espectral del Agua de Enjuague – Suavizado.

$\lambda$ (nm)	Absorbancia
335	0.309
340	0.314

Continuación de la Tabla 5.4.

$\lambda$ (nm)	Absorbancia
345	0.316
350	0.322
355	0.324
360	0.326
*365	0.342
370	0.311
375	0.302
380	0.294
385	0.286
390	0.280
395	0.277
400	0.272

En la gráfica que se muestra a continuación se observa claramente que el valor máximo de absorbancia para el Agua Semisucia se obtiene a una longitud de onda de 365 nm, a la cual se realizarán todas las lecturas de absorbancia para dicha muestra.

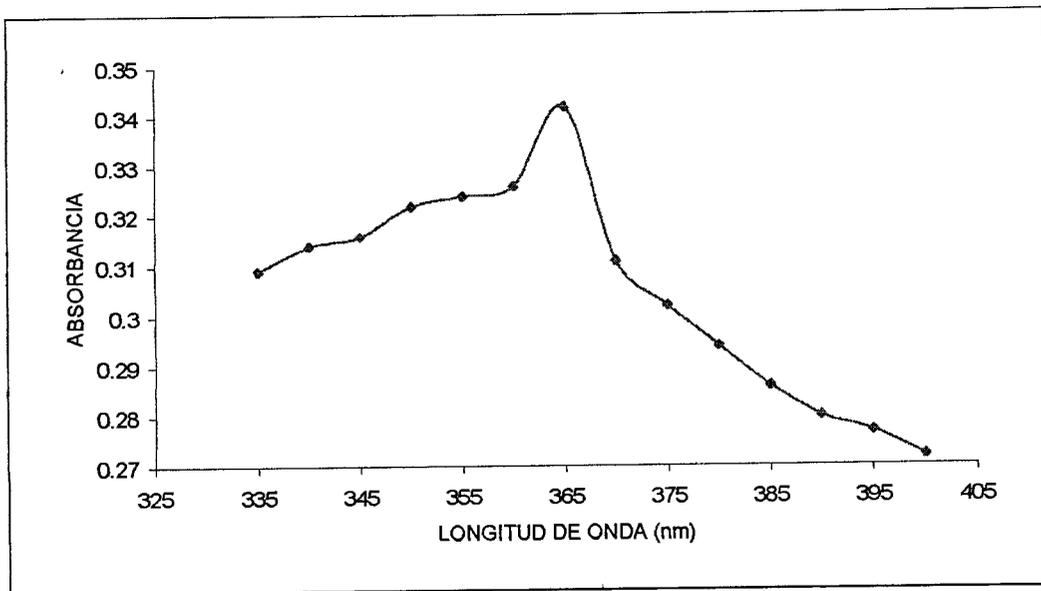


Figura 5.2. Curva de Máxima Absorbancia Espectral del Agua de Enjuague Suavizado.

Es importante mencionar que de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización de las muestras de Tallado – Descrude y, Enjuague – Suavizado, además de la realización de pruebas preliminares con la muestra de Enjuague – Suavizado, se determinó que no es factible realizar el tratamiento de ésta última por separado del tratamiento de la corriente de Tallado – Descrude, ya que resultaría muy costoso y es precisamente esto lo que se pretende evitar.

Esta determinación se tomó, a través de observar que la muestra de Enjuague – Suavizado no se encuentra altamente contaminada en cuanto a color y DQO se refiere, ya que se observa un color ligeramente azul, y su valor de DQO no es tan elevado, por lo que se sugiere llevar a cabo la unión de las dos corrientes en el tanque homogeneizador, y partir de ahí para iniciar el tratamiento, es decir, se realizará el tratamiento posteriormente de la unión de ambas corrientes.

Por lo que todos los resultados mostrados en seguida se tratan de los obtenidos con la mezcla de ambas corrientes.

## V.2 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO POR COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN

La Tabla 5.5 presenta los resultados obtenidos en la parte experimental

Tabla 5.5. Resultados del Tratamiento de Coagulación – Floculación.

Corrida Número	Cantidad de Coagulante (mg/L)	Cantidad de Floculante (mg/L)	pH Inicial de la Muestra antes del Tratamiento	Abs	Color (UPTCo)	%Color Removido	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH Final de la Muestra después del Tratamiento	DQO (mg/L)	% DQO Removida
1	15	0.046	5.5	0.048	97	97.62	1184	5.69	576	56.06
2	15	0.05	6.5	0.015	45	98.90	1089	6.64	590	55.00
3	15	0.054	7.5	0.029	71	98.26	1183	7.53	620	52.71
4	18	0.046	7.5	0.023	62	98.48	1185	7.51	757	42.26
5	18	0.05	5.5	0.116	196	95.19	1197	5.85	569	56.60
6	18	0.054	6.5	0.010	37	99.09	1120	7.04	592	54.84
7	21	0.046	6.5	0.009	32	99.21	1113	6.91	585	55.38
8	21	0.05	7.5	0.018	51	98.75	1191	7.53	585	55.38
9	21	0.054	5.5	0.108	179	95.61	1199	5.83	550	58.05

ANÁLISIS DE DATOS / INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.-

Tabla 5.6. Factores y Niveles Incluidos en el Diseño de acuerdo a Taguchi para Coagulación – Floculación.

FACTORES		NIVELES		
		(1)	(2)	(3)
Coagulante	(C)	15 mg/L	18 mg/L	21 mg/L
Floculante	(F)	0.046 mg/L	0.05 mg/L	0.054 mg/L
Interacción	(I)			
pH	(H)	5.5	6.5	7.5

De acuerdo al Método Taguchi, se elabora una tabla que contenga los factores, niveles y resultados de cada experimento:

Tabla 5.7. Factores, Niveles y Resultados del Tratamiento por Coagulación-Floculación.

EXPERIMENTO	C	F	H	% COLOR REMOVIDO
	1	2	3	
1	1	1	1	97.62
2	1	2	2	98.90
3	1	3	3	98.26
4	2	1	3	98.48
5	2	2	1	95.19
6	2	3	2	99.09
7	3	1	2	99.21
8	3	2	3	98.75
9	3	3	1	95.61

Promedio de Color Removido (CR) : 97.90 %

Es necesario realizar un análisis y pronóstico, para saber si en las combinaciones no consideradas hay un efecto importante, además se realizará un análisis para determinar si la interacción entre el Coagulante y el Floculante es significativa en los resultados.

#### RESPUESTA O EFECTO PROMEDIO.-

Porcentaje promedio de eliminación de color, considerando los niveles 1 de Coagulante (C) :

$$C_1 : (97.62 + 98.90 + 98.26)/3 = 98.26$$

Con los niveles 2 de C:

$$C_2 : (98.48 + 95.19 + 99.09)/3 = 97.59$$

Con los niveles 3 de C:

$$C_3 : (99.21 + 98.75 + 95.61)/3 = 97.86$$

De manera similar se analizan los demás factores:

$$F_1 : (97.62 + 98.48 + 99.21)/3 = 98.44$$

$$F_2 : (98.90 + 95.19 + 98.75)/3 = 97.61$$

$$F_3 : (98.26 + 99.09 + 95.61)/3 = 97.65$$

$$H_1 : (97.62 + 95.19 + 95.61)/3 = 96.14$$

$$H_2 : (98.90 + 99.09 + 99.21)/3 = 99.07$$

$$H_3 : (98.26 + 98.48 + 98.75)/3 = 98.50$$

Dentro del análisis regular se trabaja con tablas de respuesta promedio y gráficas factoriales:

Tabla 5.8. Tabla de Respuesta Promedio de Coagulación - Floculación (Mayor es Mejor).

	C	F	H
1	98.26	98.44	96.14
2	97.59	97.61	99.07
3	97.86	97.65	98.50

Selección de los mejores: C : 98.26

(Mayor es Mejor) F : 98.44

H : 99.07

Teóricamente, existe una combinación de factores que puede producir un porcentaje de remoción de color máximo, dicha combinación está conformada por los niveles que proporcionan los valores mayores en la Tabla de Respuesta Promedio. A este grupo de factores se les denomina Campeón de Papel.

Campeón de Papel: C<sub>1</sub>, F<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>.

A partir de la Tabla de Respuesta Promedio, se elaboran las Gráficas Factoriales, las cuales se muestran en las figuras 5.3 a 5.5.

## GRAFICAS

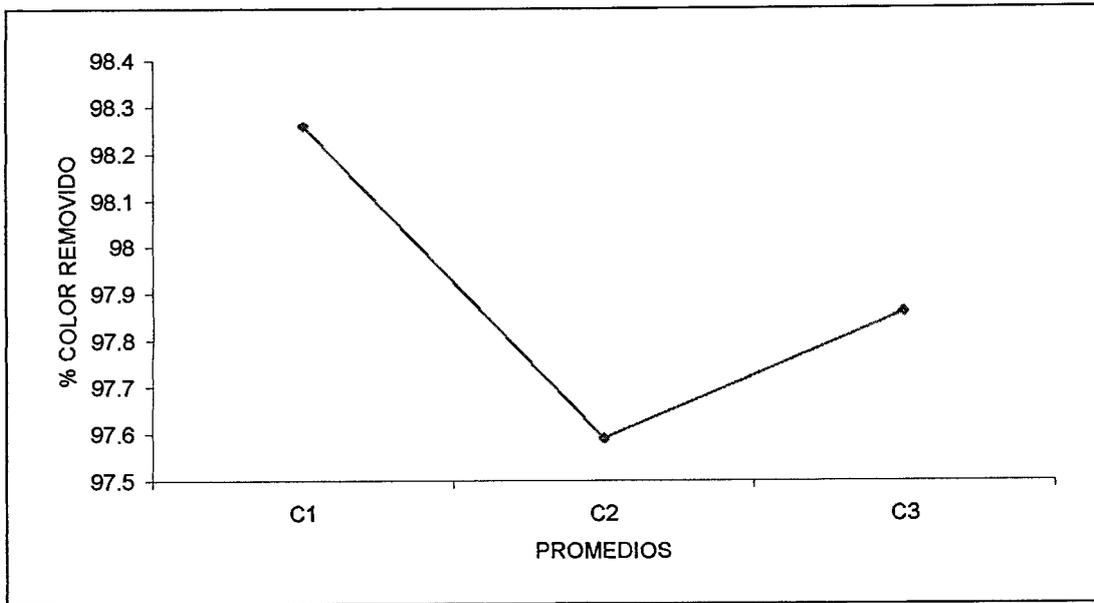


Figura 5.3. Gráfica Factorial para los Promedios de Coagulante.

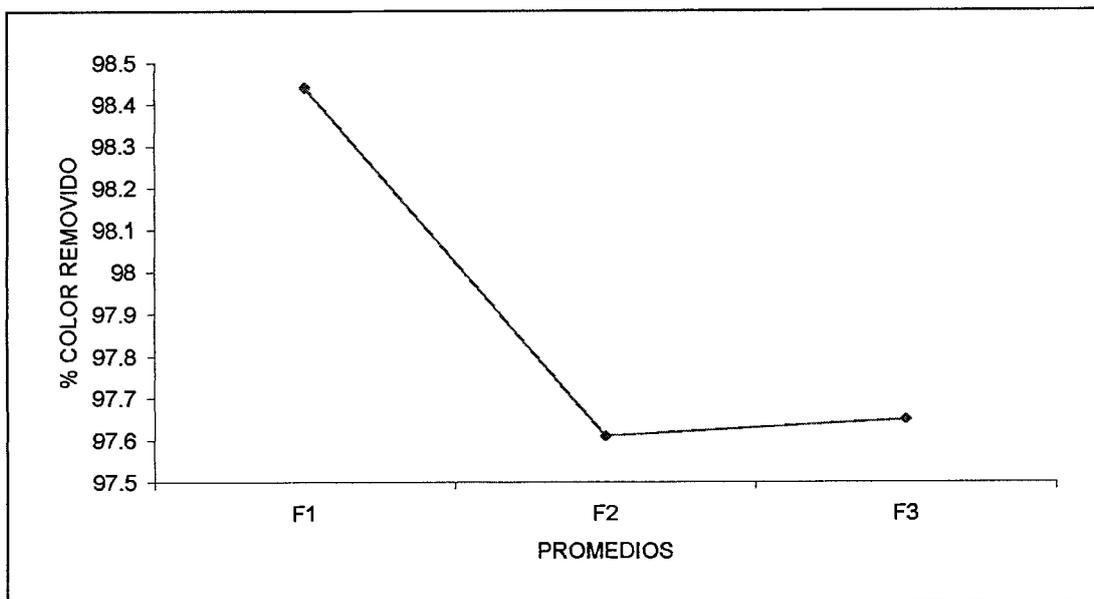


Figura 5.4. Gráfica Factorial para los Promedios de Floculante.

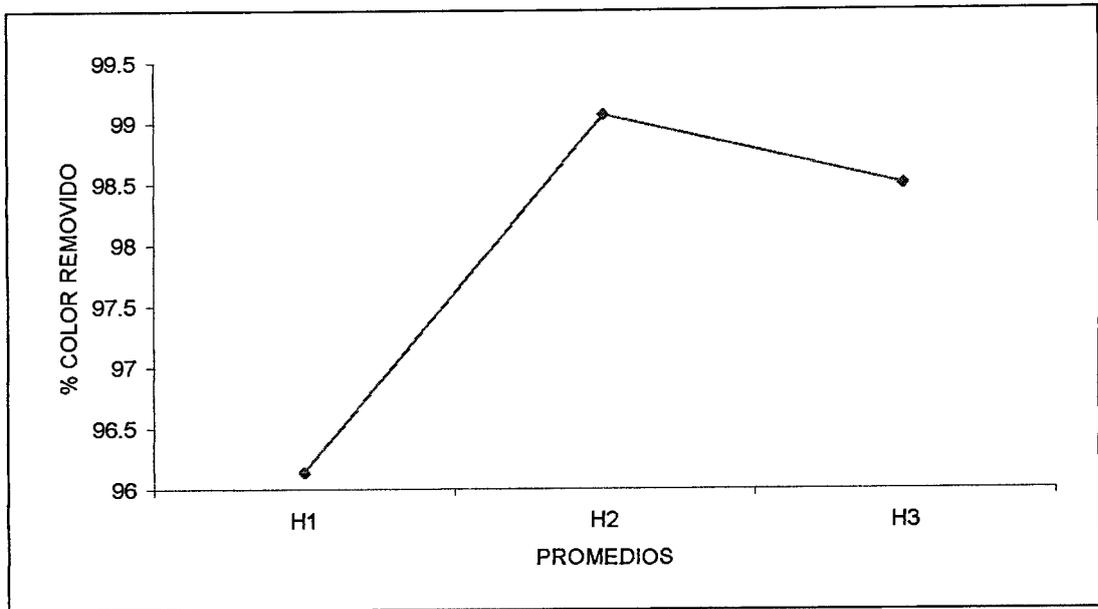


Figura 5.5. Gráfica Factorial para los Promedios de pH en Coagulación - Floculación.

### ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS

- En la gráfica para C, se observa que  $C_1$  es la que proporciona un mayor porcentaje de eliminación de Color en la muestra, además de ser el de menor costo al estar utilizando la más baja cantidad de Coagulante, por lo tanto no se modifica  $C_1$ .
- En la gráfica para F, se observa que  $F_1$  es la que proporciona un mayor porcentaje de eliminación de Color en la muestra, además de ser el de menor costo, ya que es la menor cantidad requerida de Floculante.
- En la gráfica para H, se observa que  $H_2$  es la que proporciona un mayor porcentaje de eliminación de color, además debemos considerar que  $H_2$  tiene

un valor de 6.5, mismo valor de pH que presenta la muestra original, por lo que nos ahorra el gasto que pudiera tenerse en reactivos para modificar el pH.

Por tanto no hay ninguna modificación en el grupo de factores que conforman el Campeón de Papel, por lo que el Campéon Económico, se compone de los mismos factores que el Campeón de Papel.

Campeón Económico: C<sub>1</sub>, F<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>.

## ESTIMACIÓN Y RENDIMIENTO ÓPTIMO PROMEDIO

Predicción.- Comparando el Campeón Económico (en este caso es igual al Campeón de Papel) contra el promedio de Color Removido (CR):

$$\mu_{\text{opt}} = \text{CR} + (C_1 - \text{CR}) + (F_1 - \text{CR}) + (H_2 - \text{CR})$$

$$\mu_{\text{opt}} = 97.90 + (98.26 - 97.90) + (98.44 - 97.90) + (99.07 - 97.90)$$

$$\mu_{\text{opt}} = 99.97 \%$$

Esto quiere decir que se puede esperar una Remoción de Color del 99.97 % al correr la combinación : C<sub>1</sub>, F<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>

## ANÁLISIS DE INTERACCIÓN

Este análisis es para evaluar si es que la interacción entre el Coagulante y el Floculante afecta de manera considerable el porcentaje de color que se elimina en el proceso de Coagulación – Floculación de la muestra de agua residual; se considera esta interacción porque es de gran importancia en la formación de los flóculos, ya que de este fenómeno depende el éxito en la eliminación del color.

En la siguiente tabla podemos ver el porcentaje de remoción de color que se obtiene en cada una de las diferentes interacciones entre C y F (Valores obtenidos de la Tabla 5.7):

Tabla 5.9. Interacciones entre Coagulante y Floculante.

INTERACCIÓN (C X F)	% COLOR REMOVIDO CON LA INTERACCIÓN
C <sub>1</sub> F <sub>1</sub>	97.62
C <sub>1</sub> F <sub>2</sub>	98.90
C <sub>1</sub> F <sub>3</sub>	98.26
C <sub>2</sub> F <sub>1</sub>	98.48
C <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	95.19
C <sub>2</sub> F <sub>3</sub>	99.09
C <sub>3</sub> F <sub>1</sub>	99.21
C <sub>3</sub> F <sub>2</sub>	98.75
C <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	95.61

Los factores significantes son:

C<sub>3</sub> F<sub>1</sub> y H<sub>2</sub>

De la tabla 5.7: Promedio de Color Removido (CR) = 97.90

Ahora se va a medir el efecto que tiene cada factor en el resultado final:

(Valores tomados de la tabla 5.8)

- Efecto de C<sub>3</sub> :

$$\text{Eff } C_3 = (C_3 \text{ promedio} - \text{CR promedio}) = (97.86 - 97.90) = - 0.04$$

- Efecto de  $F_1$

$$\text{Eff } F_1 = (F_1 \text{ promedio} - \text{CR promedio}) = (98.44 - 97.90) = 0.54$$

- Efecto de  $H_2$

$$\text{Eff } H_2 = (H_2 \text{ promedio} - \text{CR promedio}) = (99.07 - 97.90) = 1.17$$

- Efecto de la Interacción  $C_3F_1$

$$\text{Eff } C_3F_1 = (C_3F_1 - \text{CR promedio}) - (\text{Eff } C_3) - (\text{Eff } F_1) - (\text{Eff } H_2)$$

$$\text{Eff } C_3F_1 = (99.21 - 97.90) - (-0.04) - (0.54) - (1.17) = -0.36$$

Y ahora el Pronóstico – Estimación sería :

$$Y_{\text{est}} = \text{CR promedio} + \text{Eff } C_3 + \text{Eff } F_1 + \text{Eff } H_2 + \text{Eff } C_3F_1$$

$$Y_{\text{est}} = 97.90 - 0.04 + 0.54 + 1.17 - 0.36$$

$$Y_{\text{est}} = 99.21$$

Esto significa que fue adecuado haber considerado una columna para la interacción en el momento de diseñar el experimento, ya que la interacción  $C_3F_1$  si tiene significancia sobre el valor del porcentaje de eliminación del color, en este caso el signo negativo nos está representando una disminución del porcentaje de eliminación de color, debido a la interacción.

## CORRIDA EXPERIMENTAL CONFIRMATORIA

Se procedió a realizar las corridas experimentales para confirmar las predicciones previamente hechas en el paso anterior, obteniendo de esta manera, los siguientes resultados:

Tabla 5.10. Corridas Experimentales Confirmatorias de Coagulación-Floculación.

Experimento	NIVELES			% Color Removido
	C	F	H	
Campeón de Papel	1	1	2	99.28
Campeón Económico	1	1	2	99.28
Mejor Anterior (Tabla 5.5)	3	1	2	99.21

Se elige el Campeón Económico o de Papel (para este caso resultaron iguales), ya que aunque en la corrida experimental se obtiene un porcentaje más bajo del esperado, puesto que se esperaba un 99.97% ( $\mu_{opt}$ ) y con el efecto causado por la interacción entre el Coagulante y Floculante esperábamos un 99.21% ( $Y_{est}$ ), mientras que obtuvimos un 99.28%, pero aún así se obtiene un mayor porcentaje de Remoción de Color que en la corrida que se tenía catalogada como Mejor Anterior (Remoción máxima obtenida del Arreglo Ortogonal).

Es importante mencionar que el Campeón Económico nos ofrece un ahorro considerable, ya que en la corrida Mejor Anterior, utilizábamos 21 mg/L de Coagulante para alcanzar una remoción del 99.21 % de Color, mientras que por su parte el Campeón Económico nos proporciona un 99.28% de Remoción de Color con tan sólo 15 mg/L de Coagulante.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la corrida del Campeón Económico, que fue el que se eligió: (Tabla 5.11.)

Tabla 5.11. Resultados obtenidos con la combinación del Campeón Económico en Coagulación - Floculación.

Cantidad de Coagulante (mg/L)	15
Cantidad de Floculante (mg/L)	0.046
pH Inicial de la Muestra antes del Tratamiento	6.5
Absorbancia	0.008
Color (UPtCo)	29
% Color Removido	99.28
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1110
pH Final de la Muestra después del Tratamiento	6.72
DQO (mg/L)	582
% DQO Removida	55.61

## V. 3 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO POR ELECTROFLOTACIÓN

### V.3.1 Electrodo de Aluminio

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la parte de experimentación con Aluminio.

Tabla 5.12. Resultados del Tratamiento por Electroflotación con Aluminio.

Corrida Número.	Densidad de Corriente Aplicada (Amper/cm <sup>2</sup> )	Tiempo de Tratamiento (minutos)	pH Inicial de la Muestra antes del Tratamiento	Abs	Color (UPtCo)	% Color Removido	Conduc (μS/cm)	pH Final de la Muestra después del Tratamiento	Al (mg/L)	DQO (mg/L)	% DQO Removida
1	0.026	4.0	5.5	0.059	52	98.72	941	6.30	0.5	477	63.62
2	0.026	4.5	6.5	0.011	26	99.36	838	7.74	0.55	493	62.40
3	0.026	5.0	7.5	0.021	47	98.85	913	8.31	0.6	523	60.11
4	0.028	4.0	6.5	0.069	58	98.58	822	7.88	0.25	491	62.55
5	0.028	4.5	7.5	0.306	154	96.22	914	8.32	0.35	552	57.89
6	0.028	5.0	5.5	0.004	17	99.58	897	6.62	0.15	467	64.38
7	0.03	4.0	7.5	0.030	55	98.65	860	8.59	0.15	517	60.56
8	0.03	4.5	5.5	0.005	20	99.51	903	6.55	0.35	466	64.45
9	0.03	5.0	6.5	0.004	19	99.53	795	7.74	0.23	443	66.21

## ANÁLISIS DE DATOS / INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.-

Tabla 5.13. Factores y Niveles Incluidos en el Diseño de acuerdo a Taguchi para Electroflotación con Aluminio.

FACTORES		NIVELES		
		(1)	(2)	(3)
Corriente	(I)	1.3 A	1.4 A	1.5 A
Tiempo	(T)	4.0 min.	4.5 min.	5.0 min.
pH	(H)	5.5	6.5	7.5

De acuerdo al Método Taguchi, se elabora una tabla que contenga los factores, niveles y resultados de cada experimento:

Tabla 5.14. Factores, Niveles y Resultados del Tratamiento por Electroflotación con Aluminio.

EXPERIMENTO	I	T	H	% COLOR REMOVIDO
	1	2	3	
1	1	1	1	98.72
2	1	2	2	99.36
3	1	3	3	98.85
4	2	1	2	98.58
5	2	2	3	96.22
6	2	3	1	99.58
7	3	1	3	98.65
8	3	2	1	99.51
9	3	3	2	99.53

Promedio de Color Removido (CR) : 98.78 %

Es necesario realizar un análisis y pronóstico, para saber si en las combinaciones no consideradas hay un efecto importante.

#### RESPUESTA O EFECTO PROMEDIO.-

Porcentaje promedio de eliminación de color, considerando los niveles 1 de la

Corriente aplicada (I) :

$$I_1 : (98.72 + 99.36 + 98.85)/3 = 98.98$$

Con los niveles 2 de I:

$$I_2 : (98.58 + 96.22 + 99.58)/3 = 98.13$$

Con los niveles 3 de I:

$$I_3 : (98.65 + 99.51 + 99.53)/3 = 99.23$$

De manera similar se analizan los demás factores:

$$T_1 : (98.72 + 98.58 + 98.65)/3 = 98.65$$

$$T_2 : (99.36 + 96.22 + 99.51)/3 = 98.36$$

$$T_3 : (98.85 + 99.58 + 99.53)/3 = 99.32$$

$$H_1 : (98.72 + 99.58 + 99.51)/3 = 99.27$$

$$H_2 : (99.36 + 98.58 + 99.53)/3 = 99.16$$

$$H_3 : (98.85 + 96.22 + 98.65)/3 = 97.91$$

Dentro del análisis regular se trabaja con tablas de respuesta promedio y gráficas factoriales:

Tabla 5.15. Tabla de Respuesta Promedio de Electroflotación con Aluminio  
(Mayor Es Mejor).

	I	T	H
1	98.98	98.65	99.27
2	98.13	98.36	99.16
3	99.23	99.32	97.91

Selección de los mejores: I : 99.23

(Mayor es Mejor) T : 99.32

H : 99.27

Teóricamente, existe una combinación de factores que puede producir un porcentaje de remoción de color máximo, dicha combinación está conformada por los niveles que proporcionan los valores mayores en la Tabla de Respuesta Promedio. A este grupo de factores se les denomina Campeón de Papel.

Campeón de Papel: I<sub>3</sub>, T<sub>3</sub>, H<sub>1</sub>.

A partir de la Tabla de Respuesta Promedio, se elaboran las Gráficas Factoriales, las cuales se muestran en las figuras 5.6 a 5.8.

## GRAFICAS

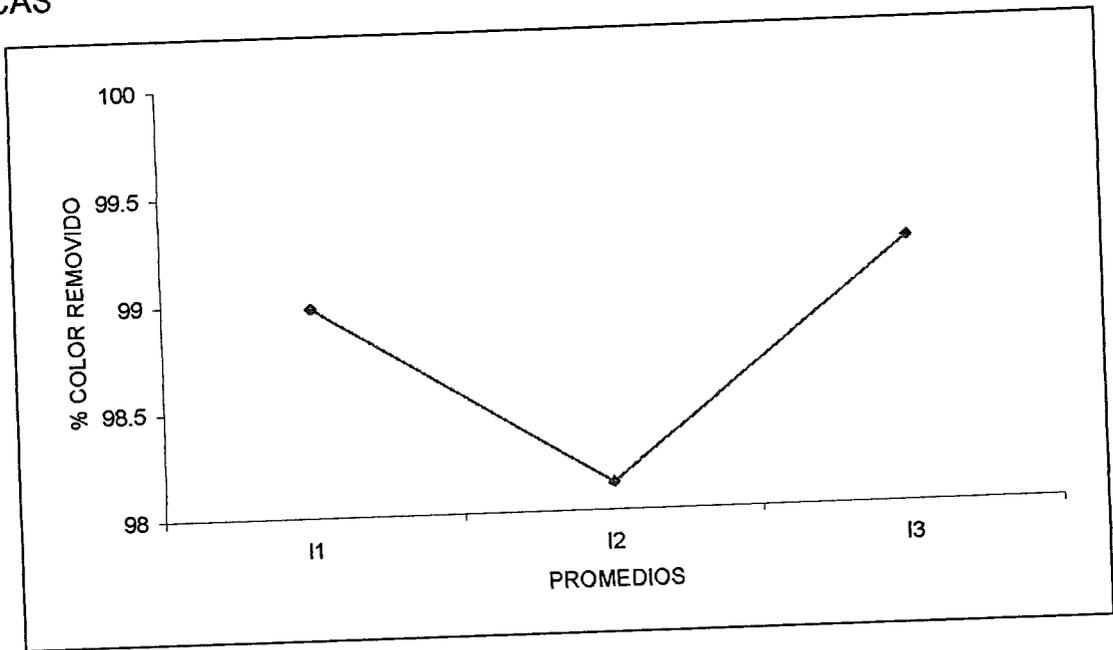


Figura 5.6. Gráfica Factorial para los Promedios de Corriente Aplicada en Electroflotación con Aluminio.

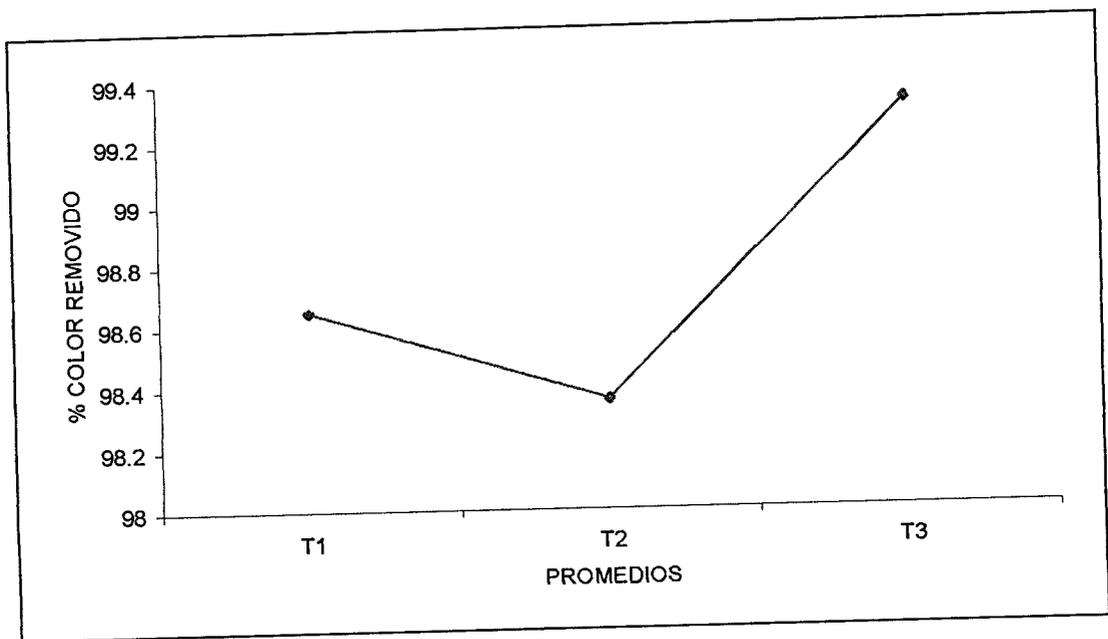


Figura 5.7. Gráfica Factorial para los Promedios de Tiempo de Tratamiento de Electroflotación con Aluminio.

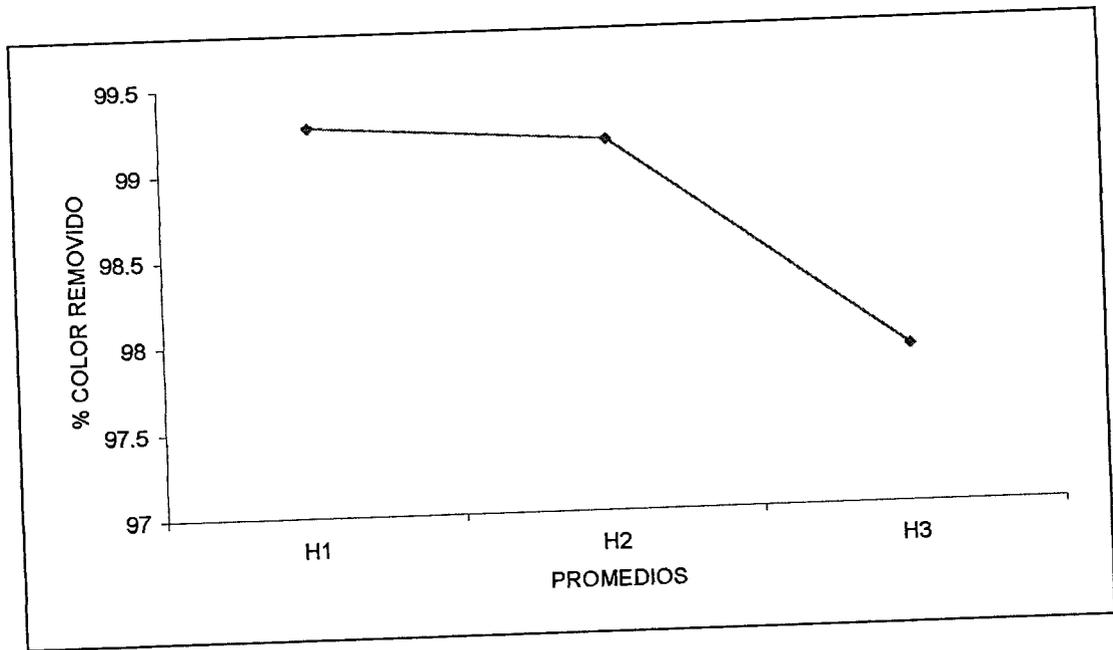


Figura 5.8. Gráfica Factorial para los Promedios de pH en Electroflotación con Aluminio.

### ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS

- En la gráfica para I, se observa que I<sub>3</sub> (99.23) es la que proporciona un mayor porcentaje de eliminación de Color en la muestra, pero la variación con respecto a I<sub>1</sub>(98.98), no es significativa, por lo que puede tomarse el valor de I<sub>1</sub> como máximo, lo cual nos proporciona un ahorro de 0.2 A para cada 250 ml de agua tratada.
- En la gráfica para T, se observa que T<sub>3</sub> es la que proporciona un mayor porcentaje de eliminación de Color en la muestra.
- En la gráfica para H, se observa que H<sub>1</sub> (99.27) es la que proporciona un mayor porcentaje de eliminación de color, sin embargo la variación con respecto a H<sub>2</sub> (99.16), no es significativa, por lo que puede tomarse el valor de H<sub>2</sub> considerando además que H<sub>2</sub> nos ofrece un gran ahorro, ya que la muestra original tiene un pH

de 6.5, y al trabajar con H<sub>2</sub>, nos ahorra un gasto de 0.6 ml de HCl al 10% por cada 250 ml de agua residual tratada.

Con estos valores, se obtiene otro grupo de factores, que también nos pueden proporcionar un alto porcentaje de remoción de color, pero a un costo más bajo. A este grupo de factores se le denomina Campeón Económico.

Campeón Económico: I<sub>1</sub>, T<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>.

### ESTIMACIÓN Y RENDIMIENTO ÓPTIMO PROMEDIO

Predicción.- Comparando el Campeón Económico contra el promedio de Color Removido (CR):

$$\mu_{opt} = CR + (I_1 - CR) + (T_3 - CR) + (H_2 - CR)$$

$$\mu_{opt} = 98.78 + (98.98 - 98.78) + (99.32 - 98.78) + (99.16 - 98.78)$$

$$\mu_{opt} = 99.9 \%$$

Esto quiere decir que se puede esperar una Remoción de Color del 99.9 % al correr la combinación : I<sub>1</sub>, T<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>.

Predicción.- Comparando el Campeón de Papel contra el promedio de Color removido (CR):

$$\mu_{opt} = CR + (I_3 - CR) + (T_3 - CR) + (H_1 - CR)$$

$$\mu_{opt} = 98.78 + (99.23 - 98.78) + (99.32 - 98.78) + (99.27 - 98.78)$$

$$\mu_{opt} = 100 \%$$

Esto quiere decir que se puede esperar una Remoción de Color del 100 % al correr la combinación : I<sub>3</sub>, T<sub>3</sub>, H<sub>1</sub>.

## CORRIDA EXPERIMENTAL CONFIRMATORIA

Se procedió a realizar las corridas experimentales para confirmar las predicciones previamente hechas en el paso anterior, obteniendo de esta manera, los siguientes resultados:

Tabla 5.16. Corridas Experimentales Confirmatorias de Electroflotación con Aluminio.

Experimento	NIVELES			% Color Removido
	I	T	H	
Campeón de Papel	3	3	1	99.75
Campeón Económico	1	3	2	99.56
Mejor Anterior (Tabla 5.12)	2	3	1	99.58

Se elige el Campeón Económico, ya que aunque en la corrida experimental se obtiene un porcentaje más bajo del esperado, puesto que se esperaba un 99.9% y obtuvimos un 99.56%.

Es importante hacer notar que aunque el valor que se obtiene en el Campeón Económico es ligeramente más bajo que el Mejor Anterior, el Campeón Económico nos está proporcionando un ahorro, puesto que casi se obtiene el mismo valor que en la corrida Mejor Anterior, pero ahorrando 0.1 A y 0.6 mL de HCl al 10% por cada 250 mL de agua residual tratada.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la corrida del Campeón de Papel:

Tabla 5.17. Resultados obtenidos con la combinación del Campeón de Papel en Electroflotación con Aluminio.

Densidad de Corriente Aplicada ( $A/cm^2$ )	0.03
Tiempo de Tratamiento (min.)	5.0
pH Inicial de la Muestra antes del Tratamiento	5.5
Absorbancia	0.005
Color (UPtCo)	10
% Color Removido	99.75
Conductividad ( $\mu S/cm$ )	1018
pH Final de la Muestra después del Tratamiento	5.58
DQO (mg/L)	527
% DQO Removida	59.80
Aluminio (mg/L)	0.24

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la corrida del Campeón Económico, que fue el que se eligió:

Tabla 5.18. Resultados obtenidos con la combinación del Campeón Económico en Electroflotación con Aluminio.

Densidad de Corriente Aplicada ( $A/cm^2$ )	0.026
Tiempo de Tratamiento (min.)	5.0
pH Inicial de la Muestra antes del Tratamiento	6.5
Absorbancia	0.006
Color (UPtCo)	18
% Color Removido	99.56
Conductividad ( $\mu S/cm$ )	877
pH Final de la Muestra después del Tratamiento	7.07
DQO (mg/L)	448
% DQO Removida	65.82
Aluminio (mg/L)	0.1

### V.3.2 Electrodo de Hierro

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la parte de experimentación con Hierro.

Tabla 5.19. Resultados del Tratamiento por Electroflotación con Hierro.

Corrida Número	Densidad de Corriente Aplicada (Amper/cm <sup>2</sup> )	Tiempo de Tratamiento (minutos)	pH Inicial de la Muestra antes del Tratamiento	Abs	Color (UPTCo)	% Color Removido	Conduc (μS/cm)	pH Final de la Muestra después del Tratamiento	Fe (mg/L)	DQO (mg/L)	% DQO Removida
1	0.023	4.0	5.5	0.350	950	76.69	1173	6.67	97.0	536	59.12
2	0.023	4.5	6.5	0.178	425	89.57	879	7.09	8.0	505	61.48
3	0.023	5.0	7.5	0.262	358	91.21	988	7.82	2.0	493	62.40
4	0.025	4.0	6.5	0.277	600	85.28	883	7.14	7.0	516	60.64
5	0.025	4.5	7.5	0.291	286	92.98	945	7.57	4.0	492	62.47
6	0.025	5.0	5.5	0.274	575	85.89	1138	6.80	68.0	510	61.10
7	0.027	4.0	7.5	0.444	502	87.68	949	7.59	2.0	513	60.87
8	0.027	4.5	5.5	0.251	750	81.60	1106	6.80	80.0	494	62.32
9	0.027	5.0	6.5	0.295	650	84.04	885	7.09	19.0	518	60.49

## ANÁLISIS DE DATOS / INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.-

Tabla 5.20. Factores y Niveles Incluidos en el Diseño de acuerdo a Taguchi para Electroflotación con Hierro.

FACTORES		NIVELES		
		(1)	(2)	(3)
Corriente	(I)	1.3 A	1.4 A	1.5 A
Tiempo	(T)	4.0 min.	4.5 min.	5.0 min.
pH	(H)	5.5	6.5	7.5

De acuerdo al Método Taguchi, se elabora una tabla que contenga los factores, niveles y resultados de cada experimento:

Tabla 5.21. Factores, Niveles y Resultados del Tratamiento por Electroflotación con Hierro.

EXPERIMENTO	I	T	H	% COLOR REMOVIDO
	1	2	3	
1	1	1	1	76.69
2	1	2	2	89.57
3	1	3	3	91.21
4	2	1	2	85.28
5	2	2	3	92.98
6	2	3	1	85.89
7	3	1	3	87.68
8	3	2	1	81.60
9	3	3	2	84.05

Promedio de Color Removido (CR) : 86.11 %

Es necesario realizar un análisis y pronóstico, para saber si en las combinaciones no consideradas hay un efecto importante.

#### RESPUESTA O EFECTO PROMEDIO.-

Porcentaje promedio de eliminación de color, considerando los niveles 1 de la Corriente aplicada (I) :

$$I_1 : (76.69 + 89.57 + 91.21)/3 = 85.82$$

Con los niveles 2 de I:

$$I_2 : (85.28 + 92.28 + 85.89)/3 = 88.05$$

Con los niveles 3 de I:

$$I_3 : (87.68 + 81.60 + 84.05)/3 = 84.44$$

De manera similar se analizan los demás factores:

$$T_1 : (76.69 + 85.28 + 87.68)/3 = 83.22$$

$$T_2 : (89.57 + 92.98 + 81.60)/3 = 88.05$$

$$T_3 : (91.21 + 85.89 + 84.05)/3 = 87.05$$

$$H_1 : (76.69 + 85.89 + 81.60)/3 = 81.39$$

$$H_2 : (89.57 + 85.28 + 84.05)/3 = 86.3$$

$$H_3 : (91.21 + 92.98 + 87.68)/3 = 90.62$$

Dentro del análisis regular se trabaja con tablas de respuesta promedio y gráficas factoriales:

Tabla 5.22. Tabla de Respuesta Promedio de Electroflotación con Hierro (Mayor Es Mejor).

	I	T	H
1	85.82	83.22	81.39
2	88.05	88.05	86.3
3	84.44	87.05	90.62

Selección de los mejores: I : 88.05

(Mayor es Mejor) T : 88.05

H : 90.62

Teóricamente, existe una combinación de factores que puede producir un porcentaje de remoción de color máximo, dicha combinación está conformada por los niveles que proporcionan los valores mayores en la Tabla de Respuesta Promedio. A este grupo de factores se les denomina Campeón de Papel.

Campeón de Papel: I<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>.

A partir de la Tabla de Respuesta Promedio, se elaboran las Gráficas Factoriales, las cuales se muestran en las figuras 5.9 a 5.11.

## GRAFICAS

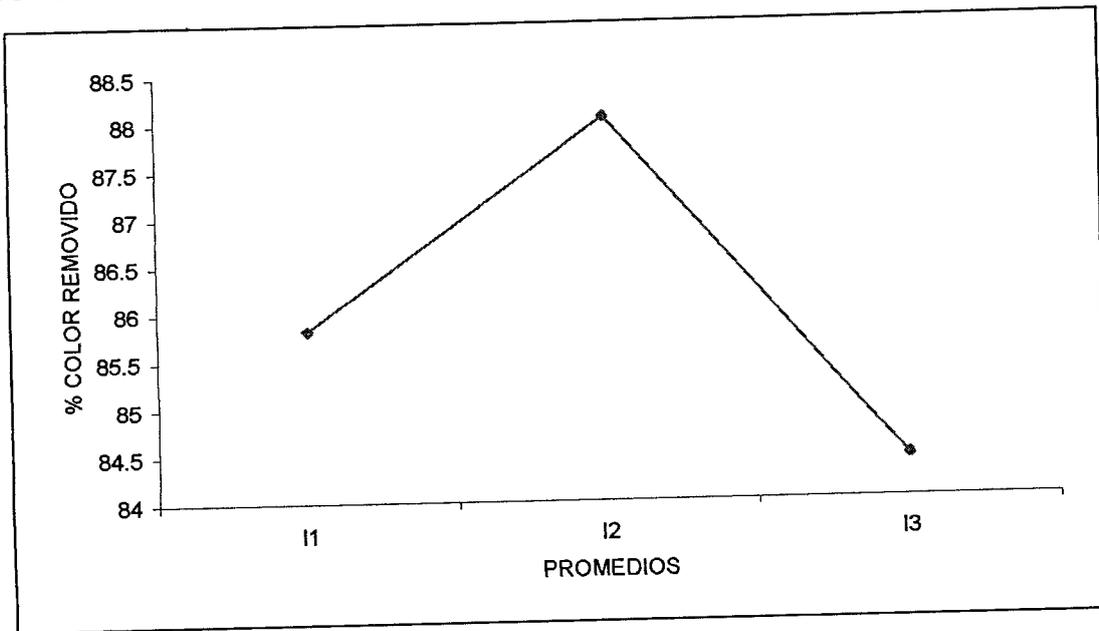


Figura 5.9. Gráfica Factorial para los Promedios de Corriente Aplicada en Electroflotación con Hierro.

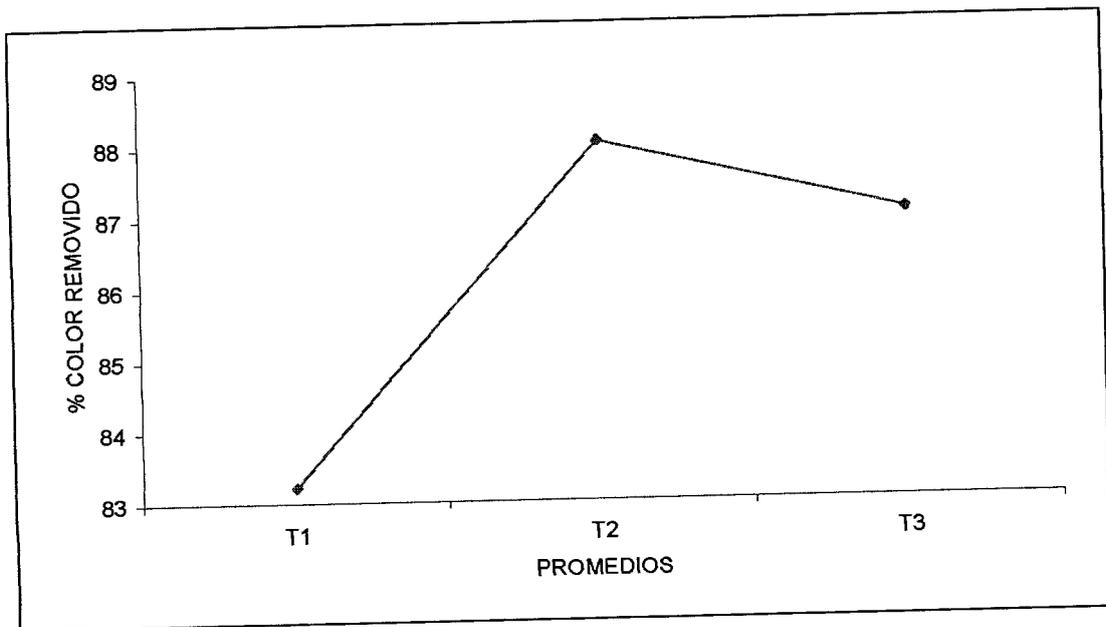


Figura 5.10. Gráfica Factorial para los Promedios de Tiempo de Tratamiento de Electroflotación con Hierro.

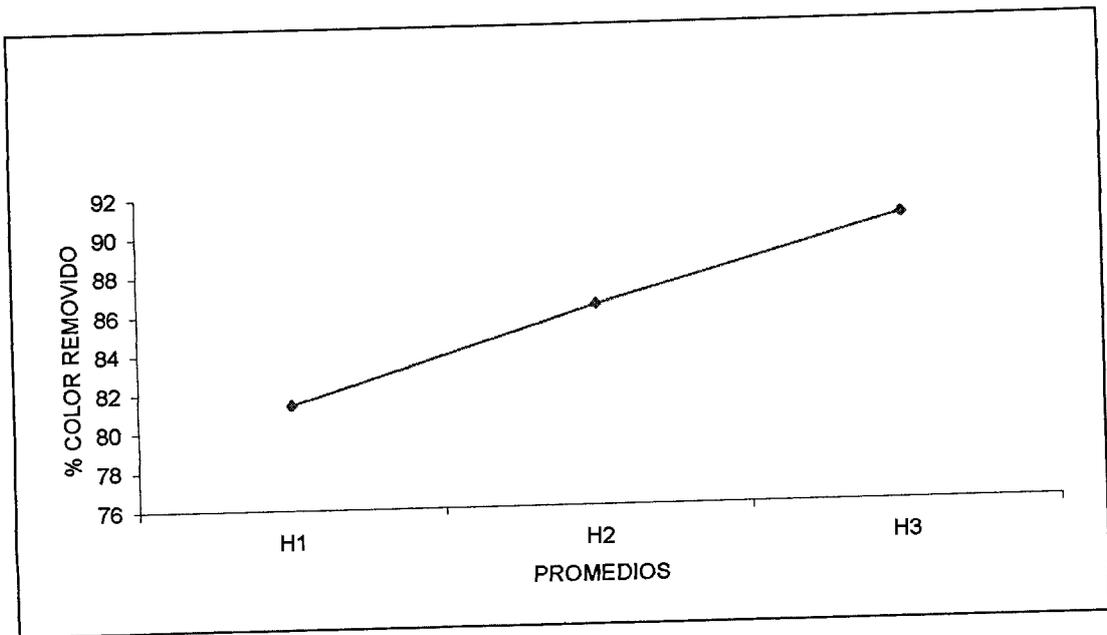


Figura 5.11. Gráfica Factorial para los Promedios de pH en Electroflotación con Hierro.

### ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS

- En la gráfica para I, se observa que  $I_2$  (88.05) es la que proporciona un mayor porcentaje de eliminación de Color en la muestra, los valores de  $I_1$  e  $I_3$  son muy bajos por lo que la elección de  $I_2$  como óptima no se modifica.
- En la gráfica para T, se observa que  $T_2$  es la que proporciona un mayor porcentaje de eliminación de Color en la muestra, con menos tiempo de aplicación. Ya que aunque el resultado con  $T_3$  no varía significativamente con respecto a  $T_2$ , no tiene caso cambiar a  $T_3$ , ya que esto implica un mayor tiempo de aplicación del proceso, incrementando el costo del mismo.
- En la gráfica para H, se observa que  $H_3$  (90.62) es la que proporciona un mayor porcentaje de eliminación de color, por lo tanto no se modifica.

Por tanto no hay ninguna modificación en el grupo de factores que conforman el Campeón de Papel, por lo que el Campéon Económico, se compone de los mismos factores que el Campeón de Papel.

Campeón Económico: I<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>.

#### ESTIMACIÓN Y RENDIMIENTO ÓPTIMO PROMEDIO.-

Predicción.- Comparando el Campeón Económico (en este caso es igual al Campeón de Papel contra el promedio de Color Removido (CR):

$$\mu_{opt} = CR + (I_2 - CR) + (T_2 - CR) + (H_3 - CR)$$

$$\mu_{opt} = 86.11 + (88.05 - 86.11) + (88.05 - 86.11) + (90.62 - 86.11)$$

$$\mu_{opt} = 94.5 \%$$

Esto quiere decir que se puede esperar una Remoción de Color del 94.5 % al correr la combinación : I<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>.

#### CORRIDA EXPERIMENTAL CONFIRMATORIA

Se procedió a realizar las corridas experimentales para confirmar las predicciones previamente hechas en el paso anterior, obteniendo de esta manera, los siguientes resultados:

Tabla 5.23. Corridas Experimentales Confirmatorias de Electroflotación con Hierro.

Experimento	NIVELES			% Color Removido
	I	T	H	
Campeón de Papel	2	2	3	94.67
Campeón Económico	2	2	3	94.67
Mejor Anterior (Tabla 5.19)	2	2	3	92.98

Se elige el Campeón Económico (es igual al Campeón de Papel en este caso), en cuya corrida se obtuvo un 94.67 % de remoción de color, mientras que esperábamos obtener un 94.5%.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la corrida del Campeón Económico, que fue el que se eligió:

Tabla 5.24. Resultados obtenidos con la combinación del Campeón Económico en Electroflotación con Hierro.

Densidad de Corriente Aplicada (A/cm <sup>2</sup> )	0.025
Tiempo de Tratamiento (min.)	4.5
pH Inicial de la Muestra antes del Tratamiento	7.5
Absorbancia	0.281
Color (UPtCo)	217
% Color Removido	94.67
Conductividad (μS/cm)	960
pH Final de la Muestra después del Tratamiento	7.57
DQO (mg/L)	488
% DQO Removida	62.78
Hierro (mg/L)	4.0

## V.4 RESULTADOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la experimentación realizada durante 35 días en los que se estuvo monitoreando la cinética del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, cabe mencionar que en este experimento no se utilizó el Diseño Experimental de Taguchi, debido a que no es aplicable en este caso, ya que no es necesario variar condiciones de operación, puesto que se trabajó con bacterias mesófilas, las cuales deben mantenerse en un rango determinado de temperatura, es decir bajo condiciones controladas y a un Tiempo de Retención Hidráulica determinado.

Tabla 5.25. Resultados obtenidos en el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.

Tiempo (hrs)	Abs	Color (UPTCo)	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	DQO (mg/L)	Volumen de Gas Producido ( $\text{cm}^3$ )
0	4.087	4075	1052	6.50	1311	0
19	3.566	3875	1273	7.23	780	0
43	3.068	3675	1283	7.29	717	0
67	2.953	3475	1314	7.52	652	0
91	2.861	3275	1362	7.83	567	0
115	2.690	2875	1407	7.92	483	0
139	2.483	2675	1455	8.01	430	0
163	2.439	2475	1468	7.87	394	0
187	2.376	2375	1568	7.76	383	0
211	2.271	2275	1624	8.02	372	0
235	2.095	2175	1697	8.01	344	0.1

Continuación Tabla 5.25.

Tiempo (hrs)	Abs	Color (UPtCo)	Conductividad	pH	DQO (mg/L)	Volumen de Gas Producido (cm <sup>3</sup> )
259	2.059	2150	1710	8.16	314	0.1
283	1.920	2050	1742	8.23	305	0.1
307	1.820	1875	1846 $\mu$ S	8.10	289	0.1
331	1.760	1775	1878 $\mu$ S	8.15	286	0.1
355	1.730	1675	1930 $\mu$ S	8.10	275	0.1
379	1.662	1650	1985 $\mu$ S	8.10	272	0.4
403	1.639	1575	1985 $\mu$ S	8.16	270	0.8
427	1.595	1550	1985 $\mu$ S	8.09	268	0.8
451	1.480	1525	2.03 mS	7.97	266	0.8
475	1.357	1425	2.09 mS	7.95	265	1.0
499	1.268	1325	2.32 mS	7.95	262	1.0
570	1.110	1175	2.32 mS	7.95	234	1.2
643	0.843	975	2.47 mS	7.90	230	1.2
713	0.544	825	2.41 mS	7.79	190	0.8
805	0.235	675	2.34 mS	7.86	142	0.4

## CINETICA DEL REACTOR ANAEROBIO

Al graficar los datos correspondientes a la reacción de la digestión anaerobia en el Reactor de Flujo Ascendente podemos deducir que se trata de una reacción de primer orden. Asimismo se muestra la gráfica con el ajuste de datos que nos permite observar la tendencia lineal que muestra dicha gráfica.

Debemos mencionar que se realizó el análisis para determinar si la reacción era de segundo orden, pero el valor de  $r^2$  obtenido es de 0.8401, valor menor que el  $r^2$  que se obtuvo al graficar los datos para la reacción de primer orden, por lo que se concluye que es de primer orden.

Tabla 5.26. Datos para la Construcción de la Gráfica de Cinética de Reacción del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.

TIEMPO (hrs)	$-\ln[\text{COLOR}]_t / [\text{COLOR}]_0$
0	0
19	0.0503
43	0.1033
67	0.1593
91	0.2186
115	0.3488
139	0.4209
163	0.4986
187	0.5399
211	0.5829
235	0.6278
259	0.6394
283	0.6870

Continuación Tabla 5.26

TIEMPO (hrs)	$-\ln[\text{COLOR}]_t / [\text{COLOR}]_0$
307	0.7763
331	0.8311
355	0.8891
379	0.9041
403	0.9506
427	0.9666
451	0.9829
475	1.0507
499	1.1235
570	1.2436
643	1.4302
713	1.5972
805	1.7979

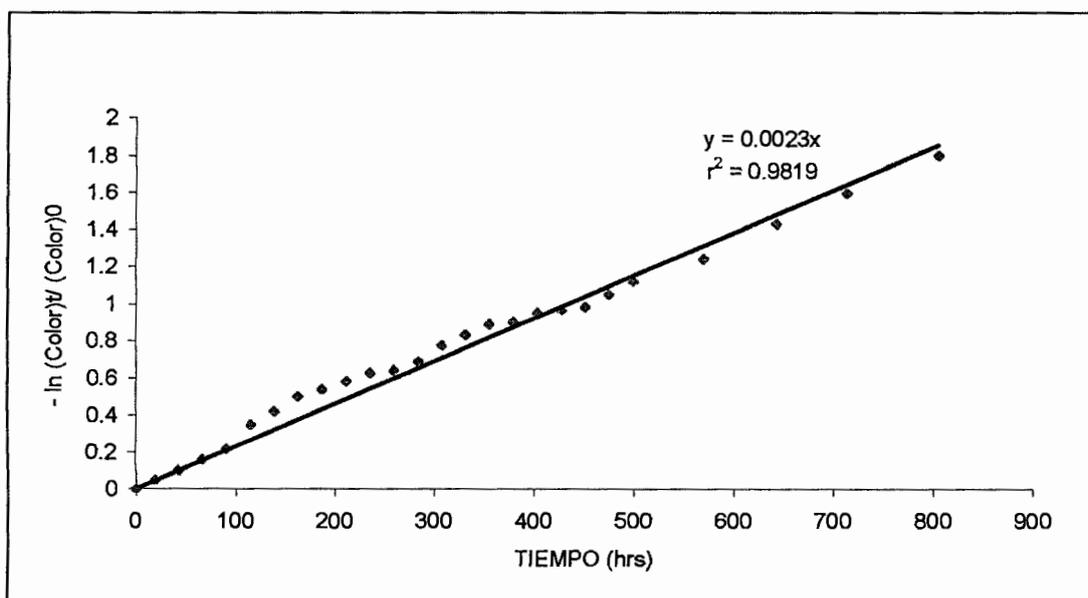


Figura 5.12. Gráfica de Cinética de Reacción y Representación Gráfica del Ajuste de datos del RAFA.

Como parte final del experimento, se cargó nuevamente el reactor con agua residual cruda, con el objetivo de realizar la prueba confirmatoria, y con ello poder calcular el % de eficiencia en la eliminación de Color y DQO que proporcionaba el Reactor en un TRH de 1.5 días.

Tabla 5.27. Resultados obtenidos con Tiempo de Retención Hidráulica de 1.5 días en el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.

Tiempo de Tratamiento (hrs.)	36
Absorbancia	3.065
Color (UPtCo)	2725
% Color Removido	32.46
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1316
PH final después del Tratamiento	7.42
DQO (mg/L)	568
% DQO Removida	56.67
Volumen de Gas Producido ( $\text{cm}^3$ )	1.6

## **V.5 RESULTADOS DE OZONIZACIÓN**

Con los resultados que se muestran a continuación se determinó la cinética de reacción del proceso de Ozonización, mismos que nos permiten observar que este método de tratamiento, requiere grandes tiempos para eliminar Color en el Agua Residual de Deslavados de Mezclilla.

En esta parte no se utilizó el Diseño Experimental de Taguchi, ya que no es posible modificar las condiciones de operación del equipo utilizado, además de que el objetivo de este experimento es determinar la velocidad de reacción o bien hacer el seguimiento de la velocidad del proceso para poder determinar cual es la tendencia con la que se eliminará el color de la muestra.

Tabla 5.28. Resultados obtenidos en la parte experimental con Ozono.

Tiempo de Ozonización (minutos)	Absorbancia	Color (UPTCo)	% Color Removido	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	DQO (mg/L)	% DQO Removida
0	4.087	4075	0	1052	6.50	1311	0
4	2.839	2950	27.61	1051	7.10	979	25.32
8	1.638	2225	45.40	1081	7.13	925	29.44
14	0.700	1500	63.19	1089	7.13	923	29.60
18	0.476	1175	71.17	1105	7.09	909	30.66
22	0.385	910	77.67	1115	7.01	867	33.87
26	0.254	612	84.98	1023	6.94	799	39.05
30	0.194	530	86.99	1079	6.61	798	39.13
40	0.150	353	91.34	1066	7.02	798	39.13
50	0.149	351	91.38	1038	7.10	798	39.13

## CINETICA DE OZONIZACIÓN

Mediante la realización de una gráfica con los siguientes datos, se concluye, que la reacción del proceso de ozonización con la muestra de deslavados de mezclilla, es de segundo orden; (se realizó el análisis para determinar si la reacción era de primer orden, pero el valor de  $r^2$  obtenido es de 0.9145, valor menor que el  $r^2$  obtenido en la gráfica de segundo orden, de ahí que se concluya que la reacción es de segundo orden) también se muestra la gráfica con el ajuste de datos, en la que se observa claramente la tendencia lineal de la gráfica.

Tabla 5.29. Datos para la Construcción de la Gráfica de Cinética de Reacción del Proceso de Ozonización.

TIEMPO (min.)	$1/[COLOR]_t$
0	2.4539E-04
4	3.3898E-04
8	4.4944E-04
14	6.6667E-04
18	8.5106E-04
22	1.0989E-03
26	1.6340E-03
30	1.8868E-03
40	2.8329E-03
50	2.849E-03

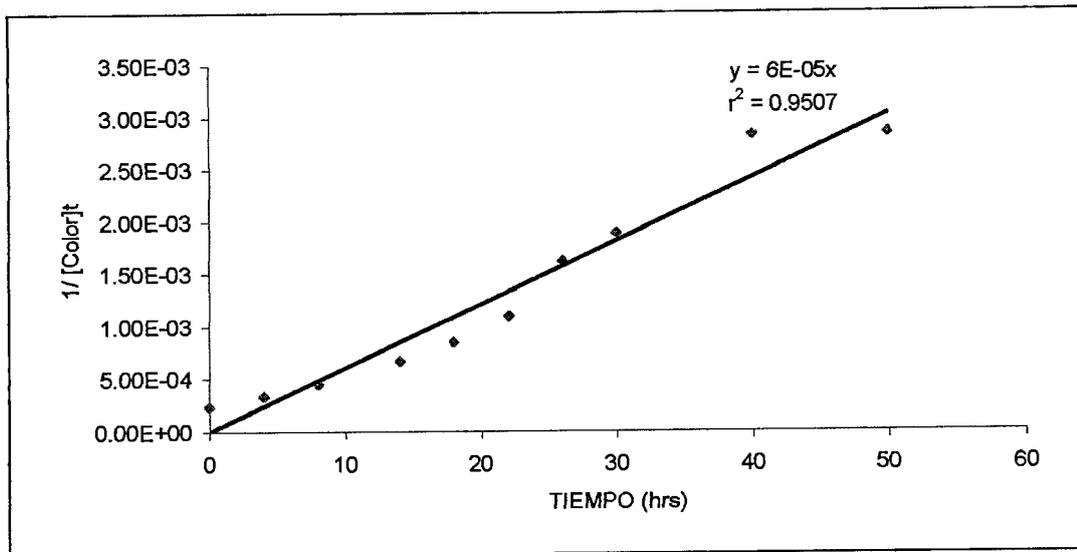


Figura 5.13. Gráfica de Cinética de Reacción y Representación Gráfica del Ajuste de Datos de Ozonización.

## V.6 RESULTADOS DE FILTRACIÓN POR CARBÓN ACTIVADO

En la realización de este experimento no se utilizó el Diseño Experimental de Taguchi, ya que el principal objetivo es determinar el Punto de Saturación que presenta el Carbón Activado con el agua residual de deslavados de mezclilla. El flujo al cual se mantuvo la entrada de agua residual a la columna de Carbón Activado fue de  $0.093 \text{ cm}^3/\text{seg}$

Tabla 5.30. Resultados de la Parte Experimental con Carbón Activado.

VOLUMEN (mL)	ABSORBANCIA	COLOR (UPtCo)	DQO (mg/L)
0	4.087	4075	1311
10	0.075	125	24
20	0.175	250	26
30	0.575	725	66
40	0.825	1125	105
50	1.175	1625	130
60	1.425	1875	134
70	1.550	2125	150
80	1.650	2250	154
90	1.700	2375	156
100	1.825	2400	163
110	1.850	2475	165
120	1.875	2500	166
130	1.925	2625	168
140	1.925	2625	169
150	1.928	2625	169

Al graficar los siguientes resultados obtenidos en la columna de carbón activado, podemos determinar el volumen al cual el carbón activado está saturado con los sólidos adsorbidos, contenidos en la muestra de agua residual de deslavados de mezclilla, lo cual se observa claramente en la Figura 5.14, el punto de saturación es los 130 mL, puesto que el valor de Color se mantiene constante a partir de este volumen.

Tabla 5.31. Datos para la construcción de la Gráfica del Punto de Saturación del Carbón Activado.

VOLUMEN (mL)	COLOR (UPtCo)
10	125
20	250
30	725
40	1125
50	1625
60	1875
70	2125
80	2250
90	2375
100	2400
110	2475
120	2500
130	2625
140	2625
150	2625

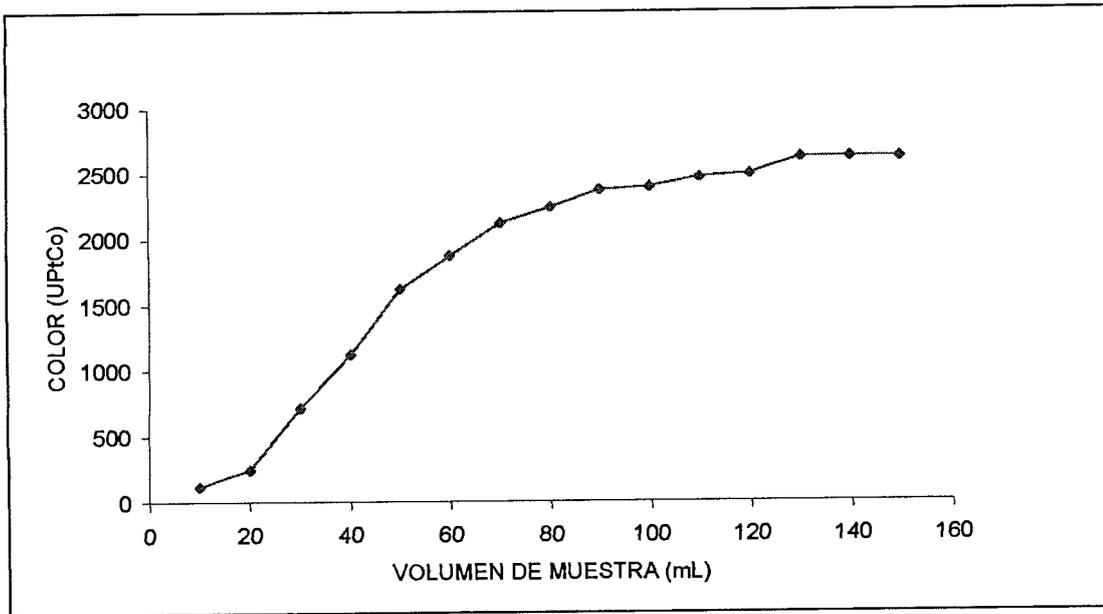


Figura 5.14. Gráfica del Punto de Saturación del Carbón Activado.

Es importante mencionar que aunque los datos obtenidos en la parte de Filtración por Carbón Activado, no fueron realizados mediante técnicas acreditadas, ya que se realizaron únicamente con equipo para pruebas de campo, son sin duda una información que puede ser la base para estudios posteriores, no fue posible realizarla por técnicas acreditadas de acuerdo a las Normas NMX vigentes, debido a que ya se contaba con muy poco volumen de la muestra problema y por ello se realizó con volúmenes mínimos y con una columna pequeña para pruebas rápidas; sin embargo se cumple con el objetivo planteado dentro de este trabajo, ya que lo que se perseguía era la eliminación de los parámetros solicitados por la industria en particular, lo que se logró en base a las necesidades del cliente.

## V.7 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE TRATAMIENTO

Enseguida se muestra la Tabla Comparativa de los 5 Métodos de Tratamiento utilizados en este estudio, en la que encontramos la eficiencia obtenida de cada uno de los métodos en la eliminación del Color y de la DQO, así como el costo aproximado por m<sup>3</sup> de agua tratada. Es importante mencionar que los costos fueron calculados en base al gasto de energía en lo que respecta a los Tratamientos por Electroflotación, Ozonización y Digestión Anaerobia, en tanto que Coagulación – Floculación y Filtración por Carbón Activado se calcularon en base a la cantidad de materiales reactivos.

Tabla 5.32. Comparación de los 5 Métodos Empleados.

METODO	% COLOR REMOVIDO	% DQO REMOVIDA	COSTO / M <sup>3</sup>
Coagulación – Floculación	99.28	55.61	\$ 24.06
Electroflotación con Aluminio	99.56	65.82	\$ 21.41
Electroflotación con Hierro	94.67	62.78	\$ 16.84
Digestión Anaerobia	32.46	56.67	\$ 210.53
Ozonización	91.38	39.13	\$ 3687.54
Carbón Activado	96.93	99.41	\$ 4340.00

## V.8 RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación se muestran resumidos los resultados obtenidos en cada uno de los métodos de tratamiento empleados en este trabajo para la eliminación del color en el agua residual de deslavados de mezclilla.

Tabla 5. 33. Resumen de Resultados obtenidos en cada uno de los Métodos de Tratamiento.

PARÁMETRO	COAGULACIÓN - FLOCULACION	ELECTROFLOTACION		DIGESTION ANAEROBIA	OZONIZACION	FILTRACION POR CARBON ACTIVADO
		Al	Fe			
Absorbancia	0.008	0.006	0.281	3.065	0.149	0.075
Color (UPtCo)	29	18	217	2725	351	125
% Color Removido	99.28	99.56	94.67	32.46	91.38	96.93
Conductividad (μS/cm)	1110	877	960	1316	1038	990
pH Inicial de la Muestra antes del Tratamiento	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
pH Final de la Muestra después del Tratamiento	6.72	7.07	7.57	7.42	7.10	6.5
DQO (mg/L)	582	448	488	568	798	24
% DQO Removida	55.61	65.82	62.78	56.67	39.13	99.41

## **CAPITULO VI.**

### **DISCUSION DE RESULTADOS**

En base a la experimentación realizada con el agua residual proveniente de la Industria de Deslavados de Mezclilla, nos fue posible observar que este tipo de agua residual presenta una gran dificultad para su tratamiento, por tratarse de aguas con una alta coloración (Nemerrow y Dasgupta, 1991). Con los resultados obtenidos se comparó la eficiencia en la eliminación de los parámetros de control considerados más importantes en este trabajo: el color y la DQO (Demanda Química de Oxígeno).

La evaluación realizada a los 5 diferentes Tratamientos arroja resultados en los que claramente observamos que el Método de Electroflotación con electrodo de Aluminio, da resultados altamente satisfactorios, debido a que se obtiene una elevada eliminación del color, alcanzando un porcentaje de remoción de hasta un 99.56%, mucho más alto que el obtenido por tratamiento biológico (Do y Chen, 1994) y con una remoción del 65.82% de DQO; por lo que pudiera pensarse incluso que no se requerirá invertir mucho en el pulimiento.

Por otra parte los resultados del Tratamiento de Electroflotación con electrodo de Hierro, muestran una eliminación del 94.67% del color, lo que hace que el agua se torne de un color azul claro, de tal forma que no se obtiene un agua totalmente transparente como en el caso de la electroflotación con electrodo de Aluminio, y con lo que respecta a la DQO se obtiene una eliminación del 62.78%.

Si bien es cierto que el electrodo de aluminio proporciona mucho mejores resultados que cualquier otro método, ya que se obtiene un agua de excelente calidad, también es cierto que debe de ser considerado su costo, ya que el aluminio que se utiliza en las pruebas es un aluminio con 99% de pureza, haciendo esto que el costo se eleve; mientras que el electrodo de hierro que se utiliza es un acero

1018, es decir está formado de hierro, pero también tiene un porcentaje de aleaciones e impurezas, por lo que este tratamiento resulta un poco menos costoso. Además debemos mencionar que los costos proporcionados en este estudio, no consideran lo correspondiente al material para la construcción de electrodos, es por ello que se obtiene un costo de Electroflotación más bajo que el de Coagulación – Floculación.

Los resultados obtenidos en la Coagulación-Floculación, muestran que se alcanza hasta el 99.28% de remoción de color, con lo que comprobamos su efectividad en el tratamiento de agua de la industria textil (Tunay, 1996) y además presenta una remoción del 55.61% de DQO, lo cual nos permite visualizar a la Coagulación-Floculación como una alternativa eficiente de tratamiento, y económicamente viable (Churchley, 1994), ya que su costo es considerablemente bajo, para la eficiencia que ofrece.

En cuanto a las pruebas realizadas con el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, se obtienen resultados relativamente bajos en la eliminación de Color, ya que al término del TRH de 1.5 días, tiempo recomendado en la bibliografía (Ilangovan y Briones, 1997), muestra solamente una eliminación de color del 32.46%, lo cual puede deberse a que las bacterias contenidas en los lodos con que se inoculó el reactor no estaban aún adecuadamente aclimatadas, más sin embargo, muestra una eliminación de DQO del 56.67%, un valor bastante significativo; sin duda es uno de los métodos de más bajo costo, pero hay que considerar que a nivel industrial tiene la desventaja de requerir un área relativamente grande para llevar a cabo este tipo de tratamiento, pues se requieren grandes reactores por el lento crecimiento de las bacterias metanogénicas, lo que trae consigo altos costos de operación, además de que se requieren operadores con un entrenamiento especializado, y el mantenimiento es difícil por ser sistemas cerrados.

Debemos aclarar que el costo del tratamiento por Digestión Anaerobia, realizado, es más elevado, debido a que se utilizó energía eléctrica al usar una Incubadora para controlar la temperatura del proceso, lo cual no se utilizaría a nivel industrial, ya que en la industria se busca que los tratamientos anaerobios sean autotérmicos, es decir que el propio biogás generado en el digester sea utilizado para el calentamiento del mismo.

En el tratamiento con Ozono, encontramos que alcanza a eliminar hasta un 91.38%, lo que nos hace visualizar a la Ozonización como un método que pudiera ser utilizado en este caso, como un tratamiento secundario, aunque ello implica un aumento del costo por tratarse de una muestra con gran cantidad de colorante, este tratamiento elimina cantidades considerables de color y con la ventaja de no producir lodos residuales, aunque tiene la desventaja de eliminar una muy pequeña cantidad de DQO (39.13%), además de que tiene un costo considerablemente alto y no se obtienen reducciones tan importantes en los parámetros de interés, por lo que se perfila mejor como un método de pulimiento.

Con respecto a la Filtración con Carbón Activado, los resultados muestran una eliminación de un 96.93% de color, con una remoción del 99.41% de DQO, al eliminar gran cantidad de los sólidos contenidos y presentes en la muestra, sin embargo, se requiere una gran cantidad de carbón activado, ya que se observó que 56.5 gramos de carbón activado se saturan con un volumen de agua residual de 130 mL, lo que significa que para tratar 1 m<sup>3</sup> de agua se requieren 434 kg. de carbón. Por lo anterior se sugiere también como un método de pulimiento, superando al ozono en economía.

Después de realizar el análisis de costo - eficiencia de cada uno de los métodos evaluados, podemos concluir que la mejor opción para un tren de tratamiento es la Coagulación - Floculación, con la que se obtiene agua que cumple con los requerimientos especificados en lo referente a Color y que puede reutilizarse en el proceso; aunque debemos mencionar que el valor de DQO es

todavía elevado en comparación con el que exigen las C.P.D. para el giro Textil (Deslavados de Mezclilla), pero por ello es que la Coagulación – Floculación es solo parte de un sistema completo de tratamiento, mismo que se sugiere en este trabajo.

Es importante tomar en cuenta que los resultados obtenidos de costo-eficiencia son a nivel laboratorio, y que hacerlo a escala industrial puede llevar consigo un aumento en los costos.

Actualmente se realizan estudios sobre el Tratamiento de Agua Residual de la Industria Textil por medio de una Celda Electroquímica, esperando que este estudio proporcione más resultados e información y así analizar más ampliamente los costos del tratamiento en su totalidad.

## **CAPITULO VII.**

### **CONCLUSIONES**

Al finalizar este trabajo, podemos concluir que el agua residual de deslavados de mezclilla es una de las más problemáticas en cuanto a su tratamiento, debido a los cambios que pudieran presentarse en los procesos de producción día a día, lo que provoca que existan variaciones en la composición del influente que llega a la planta de tratamiento. Esto puede dificultar el tratamiento ya establecido, pero ello se ve solucionado con un tanque de homogeneización e igualación, no obstante no deja de representar un problema en el tratamiento. Además se trata de un agua residual con una gran cantidad de colorante, lo que dificulta aún más el tratamiento, pero a través de la realización de este trabajo, hemos determinado ya el sistema de tratamiento que no representa un costo tan elevado para la industria de este giro.

La realización de este trabajo nos permite observar más de cerca la necesidad tan apremiante del tratamiento de aguas residuales del giro textil, ya que como hemos visto es una de las industrias que más agua requiere para sus procesos.

Finalmente y con toda seguridad podemos concluir que el control de la contaminación en las corrientes de agua tiene obviamente un valor estético, pero tiene también sólidas razones económicas, ya que el agua es una materia prima esencial para numerosos procesos industriales además de que constituye un vital recurso natural, es por ello que no debe ser considerado el tratamiento del agua residual un desperdicio del dinero, ya que es una necesidad que tiene el objetivo de ahorrar lo más posible tanto los recursos financieros con los que se cuenta como el agua.

## **CAPITULO VIII.**

### **RECOMENDACIONES**

#### **VIII.1 SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA DE DESLAVADOS DE MEZCLILLA**

En la página siguiente se muestra el Sistema de Tratamiento Final determinado en base al desarrollo experimental, que se recomienda para el Agua Residual proveniente de las descargas de la industria de Deslavados de Mezclilla, en el cual se observa claramente cada una de las operaciones necesarias para lograr obtener agua tratada con una calidad adecuada para su reuso en los procesos de esta industria.

# SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA EL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA DE DESLAVADOS DE MEZCLILLA

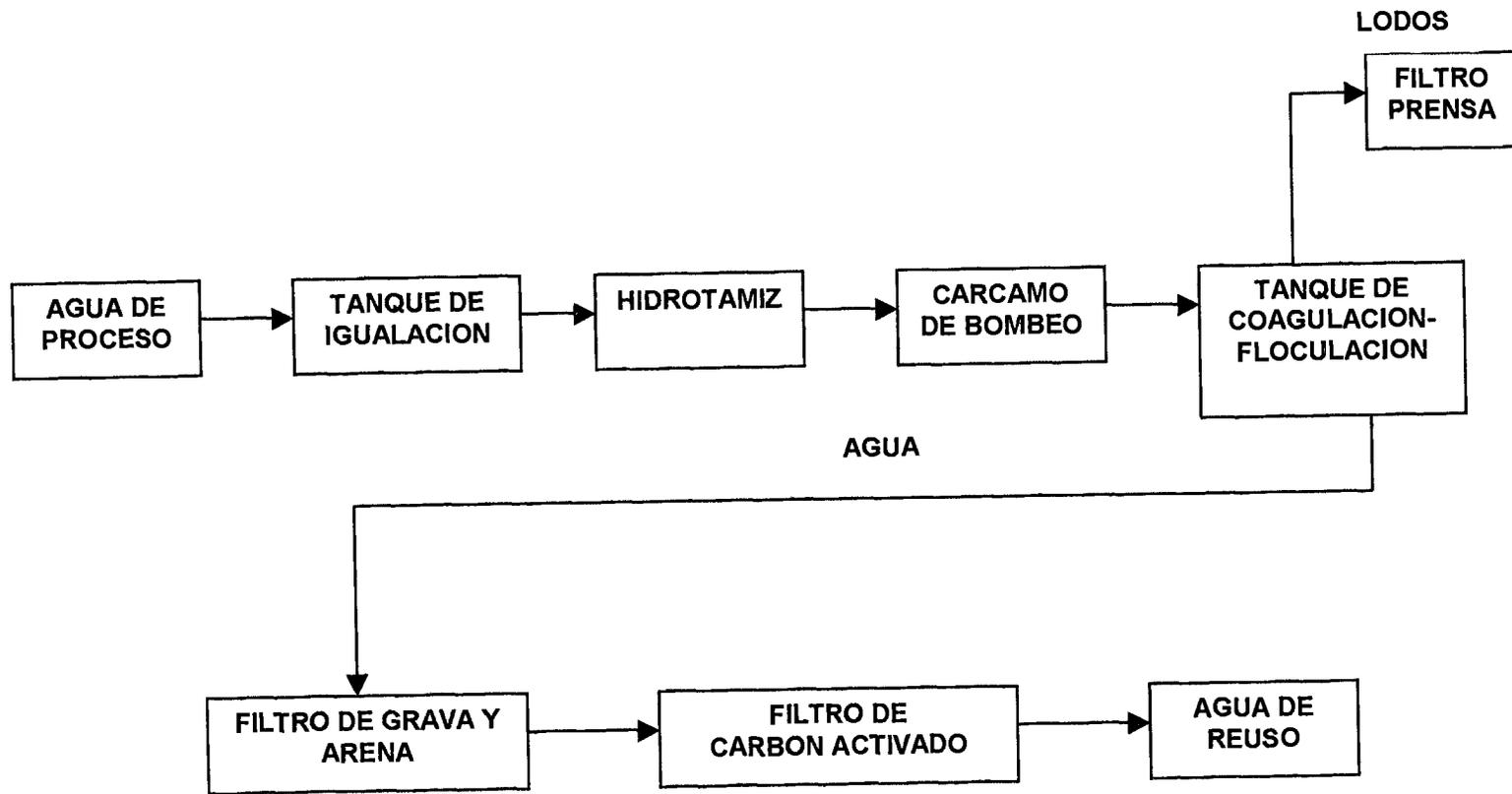


Fig. 8.1. Diagrama de Bloques del Sistema propuesto para el Tratamiento de Agua Residual de Deslavados de Mezclilla.

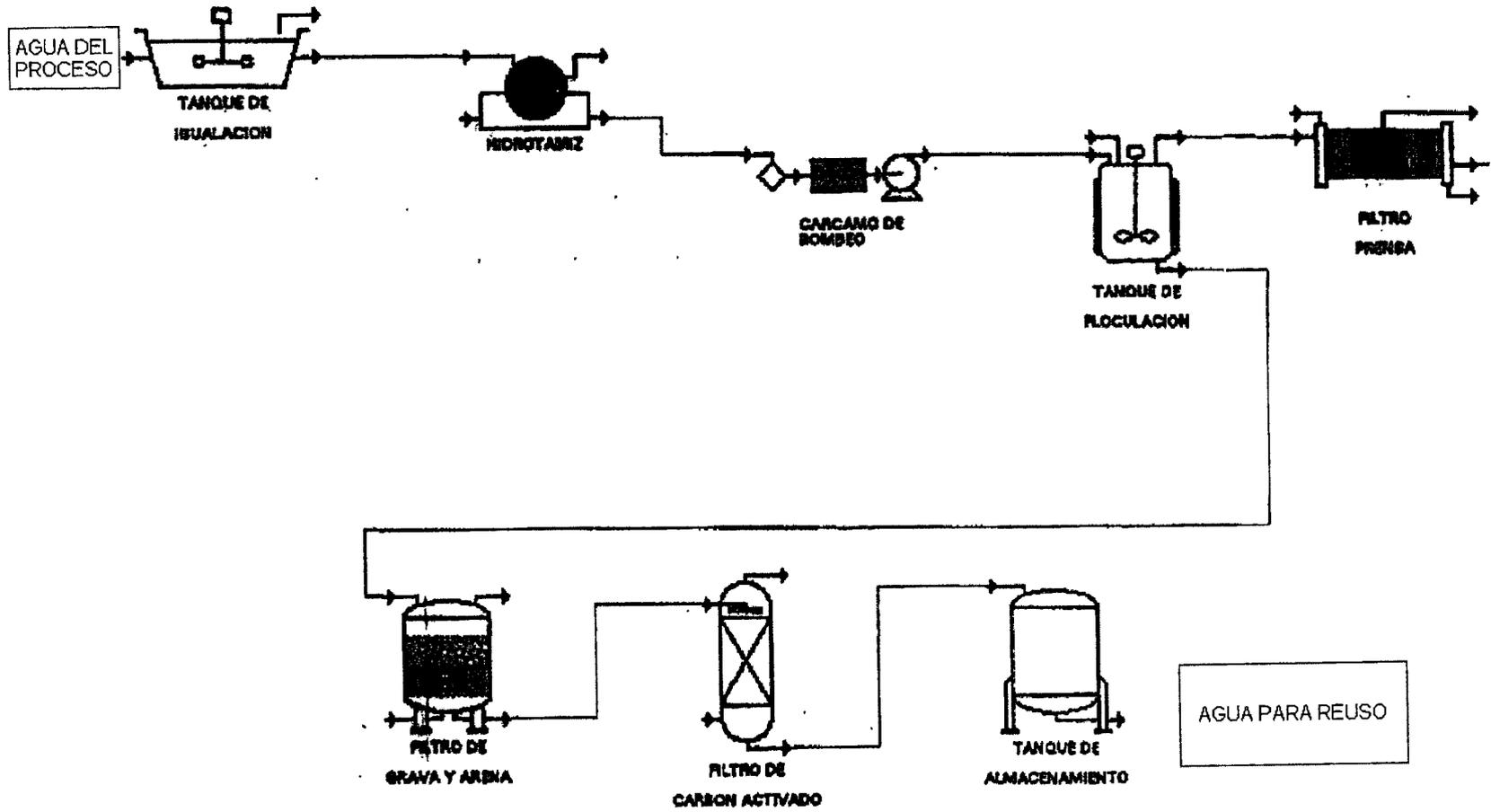
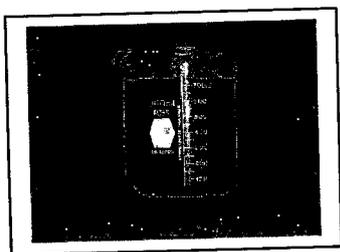
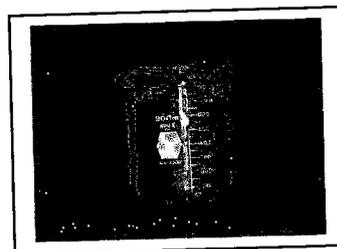


Figura 8.2. Diagrama Esquemático del Sistema de Tratamiento Propuesto.

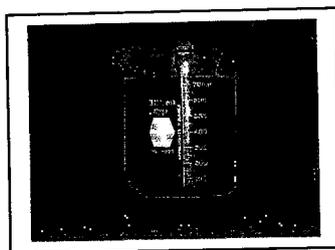
**APENDICE I. ASPECTO DE LA MUESTRA INICIAL Y DESPUES DE CADA TRATAMIENTO.**



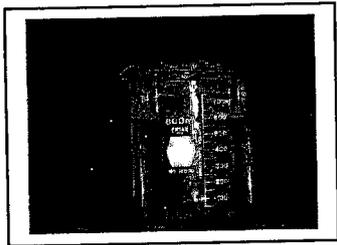
Agua Proveniente  
del Proceso de  
Tallado-Descrude



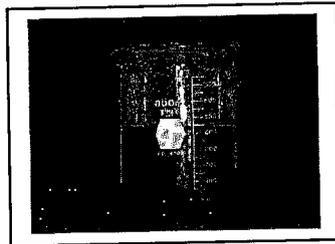
Agua Proveniente  
del Proceso de  
Enjuague-  
Suavizado



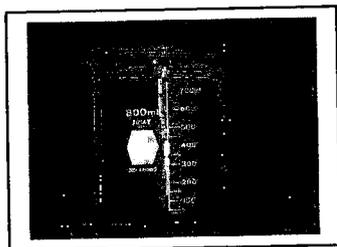
Agua Proveniente  
de la Mezcla de  
ambas corrientes



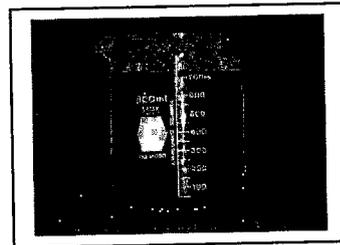
Agua Tratada por  
Electroflotación con  
Aluminio



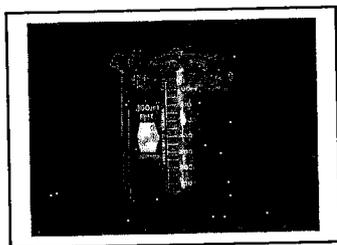
Agua Tratada por  
Electroflotación con  
Hierro



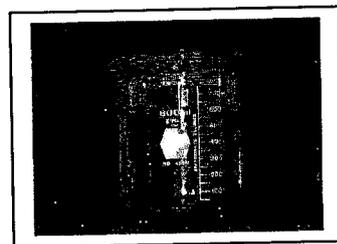
Agua Tratada por  
Ozonización



Agua Tratada por  
Digestión  
Anaerobia



Agua Tratada por  
Carbón Activado



Agua Tratada por  
Coagulación-  
Floculación

## BIBLIOGRAFIA

Arellano, B. V. M. : Eliminación de Cobre y Tratamiento de Soluciones con Cianuros. Querétaro, México: Facultad de Química. Universidad Autónoma de Querétaro; 1997. 128 p. Tesis para Obtener el Título de Químico Metalúrgico.

Bitton, G. : Anaerobic Digestion of Wastewater and Sludge. In : Wastewater Microbiology. (Mitchell, R., ed.) Wiley – Liss, New York, 1994, pp. 235 – 237.

Cheremisinoff, N. P. : Chemical Technologies for Water Desinfection. In: Water Treatment and Waste Recovery: Advanced Technology and Applications. (Hays, M., ed.) Prentice Hall, New Jersey, 1993, pp. 79 – 81, 93 – 94.

Churchley, H. J. : Removal of Dyewaste Colour from Sewage Effluent – The Use of a Full Scale Ozone Plant. Wat. Sci. Tech., 30:275 – 284, 1994.

Do, J. S. y Chen, M. L. : Decolourization of dye – containing solutions by electrocoagulation. J. App. Electroch., 24:785 – 790, 1994.

Eaton, D. A. : ICP. Ozonization. In : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (Clesceri, B., ed.) Joint Board, E. U. A., 1995, pp. 1-37, 2-41 – 2-45, 3-33 – 3-39.

Ilangovan, K. y Briones, R. : Tratamiento Anaerobio del Agua Residual de la Industria Textil mediante un Reactor Tipo EGSB a Escala Laboratorio y Piloto. XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Zacatecas, México. Noviembre 1997. P. 1 – 9.

Kémmer, N. F. : Coagulación y Floculación. En : Manual del Agua: Su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones. (Mc Callion, J., ed.) Mc Graw – Hill , México, 1995, pp. 8.1 – 8.15.

Lambert, S. D. y Graham, N. J. D. : Evaluation of Inorganic Adsorbents for the Removal of Problematic Textile Dyes and Pesticides. *Wat. Sci. Tech.*, 36:173 – 180, 1997.

Liakou, S. : Pretreatment of Azo Dyes Using Ozone. *Wat. Sci Tech.*, 36:155 – 163, 1997.

Malina, J. F. y Pohland, F. G. : Anaerobic Treatment: Fundamental Concepts, Applications and New Horizons. *Anaerobic Treatment of Wastewaters in Suspended Growth and Fixed Film Processes*. In : *Design of Anaerobic Processes for the Treatment of Industrial and Municipal Wastes*. (Eckenfelder, W. W. And Patterson, J. W., eds) Technomic, Pennsylvania, 1992, pp. 8 – 9, 43.

Mendoza, W. y Guerrero, M. : Tratamiento Electroquímico de Aguas Residuales en la Industria Textil. XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Zacatecas, México. Noviembre 1997. P. 212 – 216.

Moller, C.G. : Tratamientos Anaerobios de Lodo Residual. Curso Teórico – Práctico de Tratamiento de Lodos Residuales. Cuernavaca, México. Junio 1999. P. 6.

Nemerow, N. L. y Dasgupta, A. : Removal of Colloidal Solids. The Apparel Industries. In : *Industrial and Hazardous Waste Treatment*. (Nelson, T., ed.) Van Nostrand Reinhold, New York, 1991, pp. 147, 403 – 405.

Noyola, R. A. : Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Primer Diplomado Internacional de Química Ambiental del Agua. México, D. F. 1997. P. 8 – 9, 19 – 21.

Pérez, G. E. : Control Automático de un Reactor Anaerobio Basado en la Relación de Alcalinidades. XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Zacatecas, México. Noviembre 1997. P. 2 – 4.

Ramalho, R. S. : Pretratamientos y Tratamientos Primarios. Tratamiento Secundario: Proceso de lodos Activos. Tratamiento Secundario: Otros Procesos aerobios y anaerobios. Tratamiento Terciario de las Aguas Residuales. En: Tratamiento de Aguas Residuales. (Beltrán, D. y Lora, F., eds.) Reverté, España, 1991, pp. 91 – 92, 146 – 148, 154 – 155, 253 – 254, 412 – 413, 437 – 493, 503 – 504, 585 – 587, 605 – 606, 635 – 637, 641 – 642.

Rice, R. G. y Browning, M. E. : Fundamental Principles of Ozone Technology. Industrial Water and Wastewater Treatment With Ozone. In : Ozone Treatment of Industrial Wastewater. (Renfroe, O. S., ed.) Noyes, New Jersey, 1981, pp. 16 – 21, 273.

Rodríguez, G. A. : Tratamiento de Aguas Residuales. Curso Básico de Tratamiento de Aguas Residuales. Michoacán, México. Agosto 1996. P. 15 – 17, 23 – 26, 29 – 32.

Smith, J. M. : Cinética Química. En : Ingeniería de la Cinética Química. (Eroles, G. A., ed.) Mc Graw – Hill, México, 1986, pp. 26 – 27, 89 – 91.

Scott, K. : The Treatment of Industrial Process Streams and Effluents. In: Electrochemical Processes for Clean Technology. (Royal, S., ed.) Royal, E.U.A., 1995, pp. 214 – 215.

Taguchi, G. : Introduction to Orthogonal Arrays. Linear Graphs and Their Applications. In: System of Experimental Design. (Watanabe, T. L., ed.) Kraus International, New York, 1987, pp. 165 – 207.

Trejo, C. G. : Tratamiento de Aguas de Desecho Industrial por Electroflotación, Qro., México, 1995, 51 p.

Tunay, O. : Color Removal from Textile Wastewaters. *Wat. Sci. Tech.*, 34: 9 – 16, 1996.

Wheatley, A. : The Microbiology and Control of Anaerobic Digestion. *Anaerobic Digestion: Industrial Waste Treatment*. In : *Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology*. (Wheatley, E., ed.) Elsevier, New York, 1990, pp. 44 – 50, 201 – 203.

Wiley, J. : Dyes Natural: Indigoid Dyes. *Kirk Othmer Dialog on Disc*. 3: 308121006 – 308121007, 1994.

Winkler, M. A. : Tratamiento de Lodos y Procesos Anaeróbicos. En : *Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho*. (Winkler, M. A. Y Horwood, E., eds.) Limusa, México, 1994, pp. 316 – 317.

Zickefoose, C. : The Basics Digester Control. In: *Operations Manual Anaerobic Sludge Digestion*. (Bryant, O. J., ed.) Environmental, E.U.A., 1976, pp. 4.11 – 4.14.

## ANEXO I

### INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS POLIMEROS UTILIZADOS EN EL METODO DE TRATAMIENTO POR COAGULACION - FLOCULACION

En las pruebas realizadas con lo que respecta al método de tratamiento de Coagulación y Floculación, se utilizaron dos productos químicos y son los siguientes:

<b>COAGULANTE</b>
-------------------

#### DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Es un polielectrólito catiónico altamente efectivo que puede ser usado en una gran variedad de aplicaciones de clarificación de agua, tales como tratamiento de efluentes municipales, tratamiento de efluentes industriales y aguas de proceso derivadas de ríos o pozos. Es un polímero líquido.

#### VENTAJAS

- Ofrece ahorros económicos significativos puesto que trabaja eficientemente a bajas dosificaciones.
- Coagulación más eficiente que los inorgánicos.
- Efectivo para remover sólidos suspendidos.
- Efectivo en la clarificación de aguas con color.
- Su forma líquida permite una fácil dilución, manejo y dosificación.
- Excelente resistencia al cloro.
- Excelente estabilidad y eficiencia sobre un amplio rango de pH, no necesita adición de químicos para el ajuste del mismo.

- Forma flóculos compactos, facilitando la sedimentación por gravedad, filtración y operaciones de flotación por medio de aire.
- Excelente eficiencia y estabilidad a condiciones normales de temperatura.
- Efectivo rompedor de emulsiones de resina, petróleo, residuos con aceite y otros en corriente de proceso.

## PROPIEDADES TIPICAS

Apariencia:	Líquido claro, color ámbar
Gravedad específica:	1.2 – 1.33 g/mL
Solubilidad:	Soluble en agua

**FLOCULANTE**

## DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Es una poliacrilamida aniónica de alto peso molecular y de media densidad de carga que se presenta en una forma de emulsión agua-aceite de un color blanco opaco de baja viscosidad, trabaja generalmente en un amplio rango de pH.

## USOS PRINCIPALES

Es floculante aniónico, puede trabajar efectivamente como auxiliar del coagulante o agente acondicionador de lodos. Es recomendado para una gran variedad de procesos de separación sólido-líquido tales como clarificación, sedimentación por gravedad, drenado mecánico, etc.

## VENTAJAS

- Polímero aniónico de alto peso molecular y de media densidad de carga.
- Excelente para tratar aguas residuales de industrias papeleras.
- Excelente rendimiento en la minería e industrias afines.
- Muy efectivo en operaciones de clarificación de efluentes municipales e industriales.
- Trabaja efectivamente sobre un amplio rango de pH sin alterar el pH del sistema.
- Efectivo a bajos niveles de dosificación.
- Rápida sedimentación de flóculos formados en aplicaciones de sedimentación por gravedad.
- Mayores velocidades de filtración, lodos de baja humedad en procesos de filtración.
- Significativas ventajas de rendimiento sobre productos de la competencia:
  - Bajas dosificaciones
  - Flocculación más eficiente
  - Sobresaliente desempeño en electroplateado, acabado de metales, operaciones de curtidurías e industrias de carne y aves.

## PROPIEDADES TÍPICAS

Apariencia:	Emulsión blanca-opaca
Densidad:	8.9 lbs/gal
Viscosidad:	400 - 800 cps
Punto de solidificación:	20 °F
Solubilidad:	Soluble en agua

## ANEXO II

### INFORMACION TÉCNICA DEL CARBÓN ACTIVADO UTILIZADO

En la realización de las pruebas de Filtración por Carbón Activado, se utilizó Carbón Activado fabricado a partir de concha de coco, se caracteriza por contener una gran proporción de microporos con el diámetro más adecuado para la eliminación de moléculas pequeñas; este tipo de carbón tiene una alta densidad y dureza, la alta densidad genera una mayor capacidad de adsorción por unidad de volumen.

Tabla 9.1. Especificaciones del Carbón Activado.

Número de Yodo (mg/g min.)	600
Contenido de cenizas (% max.)	5
pH	8.0 – 9.5
Humedad al empacar (% max.)	4
Soluble en Agua (% max.)	3
Densidad aparente (g/cc)	0.65 – 0.70
Dureza (min.)	98
Longitud de Semidecloración (cm max.)	6
Tamaño de Partículas (U.S. std. Sieve)	8 x 30
Mayor que malla 8 (% max.)	5
Mayor que malla 30 (% max.)	5

## ANEXO III

### FICHAS TECNICAS DE NORMAS NMX PARA LOS METODOS DE ANALISIS

**NORMA MEXICANA NMX-AA-93-1984, PROTECCION AL AMBIENTE-  
CONTAMINACION DEL AGUA-DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD  
ELECTRICA**

**Nombre corto:** NX093A84

**Legislación:** Federal

**Fuente:** D.O.F.

**Emite:** SECOFI

**Fecha de publicación:** 14 de diciembre de 1984

**Fecha de entrada en vigor:**

**Nota:** Esta Norma fue modificada de Norma Oficial Mexicana a Norma Mexicana, de acuerdo al Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación de fecha 6 de Noviembre de 1992.

**NORMA MEXICANA NMX-AA-30-1981, ANALISIS DE AGUA.-DETERMINACION  
DE LA DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO. (ESTA NORMA CANCELA LA NOM-  
AA-30-1976), ASI COMO EL AVISO DE LA DECLARATORIA DE VIGENCIA**

**Nombre corto:** NX030A81

**Legislación:**

**Fuente:**

**Emite:** SECOFI

**Fecha de publicación:** 27 de abril de 1981

**Fecha de entrada en vigor:**

**Nota:** Esta Norma se cancela la NOM-AA-30-1976

**Nota:** Esta Norma fue modificada de Norma Oficial Mexicana a Norma Mexicana, de acuerdo al Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación de fecha 6 de Noviembre de 1992.

**NORMA MEXICANA NMX-AA-8-1980, "AGUAS.-DETERMINACION DEL pH"**

**Nombre corto:** NX008A80

**Legislación:** Federal

**Fuente:** D.O.F.

**Emite:** SECOFI

**Fecha de publicación:** 3 de marzo de 1980

**Fecha de entrada en vigor:**

**Nota:** Esta Norma cancela la NOM-AA

**Nota:** Esta Norma fue modificada de Norma Oficial Mexicana a Norma Mexicana, de acuerdo al Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación de fecha 6 de Noviembre de 1992.

**NORMA MEXICANA NMX-AA-45-1981, "ANALISIS DE AGUA-DETERMINACION DE COLOR (ESCALA PLATINO COBALTO)"**

**Nombre corto:** NX045A81

**Legislación:** Federal

**Fuente:** D.O.F.

**Emite:** SECOFI

**Fecha de publicación:** 30 de noviembre de 1981

**Fecha de entrada en vigor:**

**Nota:** Esta Norma cancela la NOM-AA-45-1977

**Nota:** Esta Norma fue modificada de Norma Oficial Mexicana a Norma Mexicana, de acuerdo al Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación de fecha 6 de Noviembre de 1992.