

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

**DIVISION DE GRADUADOS EN INGENIERIA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**ELIMINACION DE COLOR DE UNA AGUA RESIDUAL
POR MEDIO DE LA ADICION DE UNA ARCILLA
Y USANDO $Al_2(SO_4)_3$ COMO COAGULANTE**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL**

JOSE APOLINAR CORTES

MONTERREY, N. L.

MAYO DEL 2000

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY**

**DIVISION DE GRADUADOS EN INGENIERIA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**ELIMINACION DE COLOR DE UNA AGUA RESIDUAL POR MEDIO
DE LA ADICION DE UNA ARCILLA Y USANDO $Al_2(SO_4)_3$ COMO
COAGULANTE**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL**

JOSE APOLINAR CORTES

MONTERREY, N.L.

MAYO DE 2000

AGRADECIMIENTOS

Primero deseo agradecerle a **DIOS** por permitirme vivir y estar en éste maravilloso mundo.

A mi **MADRE Sarita** que me dio la vida, y que a pesar de todas sus limitaciones de conocimientos y económicas siempre me alentó a continuar luchando hasta lograr llegar a la meta, aún y cuando el futuro no se presentaba promisorio. Pero además le reconozco el coraje de haber sido Madre y Padre a la vez.

A mis **Hermanos Jorge y Nina** por que siempre que nos hemos necesitado ahí hemos estado juntos como un pequeño núcleo en contra de las adversidades y con el deseo de vernos cada vez mejor

A todos aquellos que me apoyaron a lo largo de la vida y que siempre creyeron en mí y que mi mayor pesar es no haber estado con ellos cuando partieron de éste mundo. **Don Martín, El Dr. Antunez, El Maestro Anguiano.**

A mi alma Mater el querido **Primitivo y Nacional Colegio de San Nicolás de Hidalgo.**

A mi **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo** que me permitió estudiar e ingresar al mundo del profesionalismo y que sus puertas se mantienen abiertas sin distingo para ofrecer un soporte y una preparación a todo aquel individuo que desee superarse, pero que además me está permitiendo realizar una de las actividades que más amo en la vida, la **INVESTIGACION.**

A mi **ESPOSA Esperanza** y mis **HIJOS Apolinar, Alejandro y Yunuén** por su amor, comprensión y paciencia para conmigo por que en muchos casos el tiempo que les correspondía a ellos, se lo destiné a éste proyecto de terminar mi Maestría.

Un especial reconocimiento profesional se lo hago a la empresa **CRISOBA Industrial planta Morelia** y a su Gerente General el **Ing. Luis Germán Castillo Maciel** por haber permitido y apoyado la realización de las pruebas de éste trabajo de una forma muy entusiasta y siempre con el deseo de impulsar toda iniciativa que permita el beneficio de la Tecnología, sin el deterioro del Medio Ambiente.

Al **Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey** que de una manera muy profesional aborda, toma y colabora con la preparación del recurso humano para el engrandecimiento de nuestro país preparando profesionales de un alto nivel académico, humanístico y social.

RESUMEN

Durante el proceso de la extracción de la celulosa se consume una gran cantidad de agua, que después de ser usada y tratada es vertida a los cuerpos receptores. Sin embargo aún después del tratamiento ésta agua residual lleva un alto grado de pigmentación lo cual la imposibilita de ser reutilizada, además del alto impacto negativo que crea en los ríos y lagos receptores.

Los componentes que generan esta alta pigmentación son la lignina y sus derivados y las hemicelulosas, las cuales por las condiciones que se vierten se comportan como un sistema coloidal muy "difícil" de retirar con el tratamiento de lagunas de oxidación. El comportamiento coloidal es generado por la existencia de carga negativa en éstas moléculas.

La posibilidad de contar con un sistema coloidal inorgánico de tipo arcilloso y que a condiciones de pH menores a 6.6 presenta carga positiva, lo cual permite la adsorción de las moléculas ligninicas sobre la arcilla, acción que provoca que la molécula crezca y se desestabilice parcialmente. Este efecto de crecimiento y neutralización parcial de la carga hace que se retire con una mayor facilidad el complejo coloide - arcilla. El coagulante utilizado para la remoción del complejo formado fue el Sulfato de Aluminio, dando excelentes resultados.

Las pruebas que se realizaron fueron mezclando en diferentes proporciones en volumen las aguas residuales provenientes de la industria de extracción de celulosa y las aguas arcillosas provenientes de la purga de una presa de almacenamiento. A las diferentes mezclas formadas se les realizó la prueba de jarras, con dosificaciones de sulfato aluminio de 20 a 80 ppm.

En las pruebas realizadas se nota una dependencia directa de la capacidad de remoción de color, con las dosis de arcilla y la cantidad de coagulante dosificado. Con respecto a la dependencia de la concentración de arcilla y el coagulante agregado se tiene que, son inversamente proporcionales. A mayor concentración de arcilla en la mezcla formada se disminuye la dosis de coagulante, y viceversa a menores concentraciones de arcilla se necesita incrementar la dosis de coagulante para tener una remoción significativa del color medido como color aparente. En el rango de dosificaciones de coagulante se encontró que aun en bajas concentraciones de arcillas (10% en volumen) a 80 ppm de coagulante se tuvieron muy buenas remociones de color (del orden de 90%). El mecanismo que se presentó para la desestabilización y sedimentación de las moléculas coloidales fue de adsorción y coagulación por barrido.

Indice

| | |
|---|-----------|
| Capítulo 1: Introducción | 1 |
| 1.1 Justificación | 1 |
| 1.2 Definición del problema | 3 |
| 1.3 Objetivo | 6 |
| Capítulo 2: Marco Teórico | 7 |
| 2.1 Características del contaminante principal | 7 |
| 2.1.1 Estructuras básicas de la lignina | 8 |
| 2.1.2 Mecanismo general de desbalance de las cargas de compuestos de lignina | 9 |
| 2.2 Características del material arcilloso | 11 |
| 2.2.1 Formación de las arcillas | 12 |
| 2.2.2 Arcillas residuales y sedimentarias | 12 |
| 2.2.3 Estructuras de los caolines | 12 |
| 2.2.3.1 La capa sílica | 13 |
| 2.2.3.2 La capa gibsita | 14 |
| 2.2.3.3 Condensación de las capas $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{-2}$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$ | 15 |
| 2.2.3.4 Sustitución isomórfica en las arcillas | 18 |
| Capítulo 3: Caracterización de las corrientes | 20 |
| 3.1 Caracterización de las corrientes que confluyen en la planta de tratamiento | 20 |
| 3.2 Inventario de contaminantes y su influencia sobre los parámetros globales | 23 |
| 3.3 Características del componente arcilloso utilizado para la Desestabilización | 25 |
| 3.3.1 Características del material arcilloso | 25 |
| 3.3.2 Disponibilidad del material arcilloso | 27 |
| Capítulo 4: Modelo particular e hipótesis, Metodología y Pruebas realizadas | 28 |
| 4.1 Modelo particular e Hipótesis | 28 |
| 4.2 Metodología y pruebas realizadas | 30 |
| 4.2.1 Caracterización de las corrientes de ARI y AP | 30 |
| 4.2.2 Pruebas exploratorias | 30 |
| 4.2.2.1 Mezcla de arcilla - agua residual | 30 |
| 4.2.2.2 Dosificación de polímero catiónico y aniónico | 31 |
| 4.2.2.3 Dosificación de Sulfato de Aluminio | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.3 Pruebas preliminares | 31 |
| 4.2.4 Pruebas Finales | 33 |
| Capítulo 5: Resultados | 35 |
| 5.1 Caracterizaciones de las aguas residuales a mezclar | 35 |
| 5.2 Pruebas exploratorias | 35 |
| 5.2.1 Mezcla de arcilla - agua residual | 35 |
| 5.2.2 Dosificación de polímero catiónico y aniónico | 36 |
| 5.2.3 Dosificación de Sulfato de Aluminio | 36 |
| 5.3 Pruebas preliminares | 37 |
| 5.4 Pruebas Finales | 43 |
| 5.4.1 Resultados de la primera corrida | 43 |
| 5.4.2 Resultados de la segunda corrida | 50 |
| Capítulo 6: Análisis de Resultados | 58 |
| 6.1 Pruebas exploratorias | 58 |
| 6.1.1 Adición de polímero catiónico y aniónico | 58 |
| 6.1.2 Adición de sulfato de aluminio como coagulante | 59 |
| 6.2 Análisis general de resultados | 60 |
| 6.2.1 Acidificación | 60 |
| 6.2.2 Adición de arcilla | 60 |
| 6.2.3 Adición de coagulante | 61 |
| 6.2.3.1 Color, DQO, turbidez | 62 |
| 6.2.3.2 Conductividad, pH | 64 |
| 6.3 Pruebas preliminares | 64 |
| 6.3.1 Color | 66 |
| 6.3.2 Conductividad | 67 |
| 6.3.3 Turbidez | 68 |
| 6.4 Pruebas Finales | 69 |
| 6.4.1 Análisis de la primera corrida | 70 |
| 6.4.1.1 Color | 70 |
| 6.4.1.2 DQO | 71 |
| 6.4.1.3 pH | 72 |
| 6.4.1.4 Conductividad | 74 |
| 6.4.1.5 Turbidez | 75 |
| 6.4.2 Análisis de la segunda corrida | 76 |
| 6.4.2.1 Color | 76 |
| 6.4.2.2 DQO | 77 |
| 6.4.2.3 pH | 79 |
| 6.4.2.4 Conductividad | 80 |
| 6.4.2.5 Turbidez | 80 |
| 6.4.3 Análisis comparativo de los resultados de las pruebas preliminares y finales | 82 |

| | |
|---|-----------|
| Capítulo 7: Conclusiones y Observaciones | 86 |
| 7.1 Conclusiones | 86 |
| 7.2 Recomendaciones | 87 |
| 7.2.1 Propuesta de tratamiento | 88 |
| Bibliografía: | 90 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Capítulo 1: Introducción | 1 |
| Tabla 1.1 Caracterización de descarga del agua residual | 5 |
| Capítulo 2: Marco Teórico | 7 |
| Tabla 2.1 Grupos funcionales de la lignina | 9 |
| Capítulo 3: Caracterización de las corrientes | 20 |
| Tabla 3.1 Comparación de parámetros característicos de diferentes Arcillas | 25 |
| Capítulo 4: Modelo particular e hipótesis, metodología y Pruebas realizadas | 28 |
| Tabla 4.1 Cuadro sinóptico de pruebas exploratorias | 31 |
| Tabla 4.2 Cuadro sinóptico de pruebas preliminares | 32 |
| Tabla 4.3 Caracterización del clarificado de las pruebas preliminares | 33 |
| Tabla 4.4 Cuadro sinóptico de pruebas finales | 34 |
| Tabla 4.5 Caracterización del clarificado de las pruebas finales | 34 |
| Capítulo 5: Resultados | 35 |
| Tabla 5.1 Caracterización de las aguas residuales | 36 |
| Tabla 5.2 Resultados de la mezcla 90% ARI y 10% AP | 37 |
| Tabla 5.3 Resultados de la mezcla 80% ARI y 20% AP | 38 |
| Tabla 5.4 Resultados de la mezcla 70% ARI y 30% AP | 38 |
| Tabla 5.5 Resultados de la mezcla 60% ARI y 40% AP | 38 |
| Tabla 5.6 Resultados de la mezcla 50% ARI y 50% AP | 39 |
| Tabla 5.7 Resultados de la mezcla 40% ARI y 60% AP | 39 |
| Tabla 5.8 Resultados de la mezcla 90% ARI y 10% AP | 43 |
| Tabla 5.9 Resultados de la mezcla 80% ARI y 20% AP | 44 |
| Tabla 5.10 Resultados de la mezcla 70% ARI y 30% AP | 44 |
| Tabla 5.11 Resultados de la mezcla 60% ARI y 40% AP | 44 |
| Tabla 5.12 Resultados de la mezcla 90% ARI y 10% AP | 51 |
| Tabla 5.13 Resultados de la mezcla 80% ARI y 20% AP | 51 |
| Tabla 5.14 Resultados de la mezcla 70% ARI y 30% AP | 51 |
| Tabla 5.15 Resultados de la mezcla 60% ARI y 40% AP | 52 |
| Capítulo 6: Análisis de resultados | |
| Tabla 6.1 Caracterización de condiciones iniciales | 76 |

| | |
|---|----|
| Tabla 6.2 Valores de DQO de la mezcla 70% ARI | 78 |
| Tabla 6.3 Valores de DQO de la mezcla 60% ARI | 79 |
| Tabla 6.4 Valores de pH a diferentes dosis de coagulante | 79 |
| Tabla 6.5 Conductividad a diferentes dosis de coagulante | 80 |
| Tabla 6.6 Valores de Turbidez (NTU) | 81 |
| Tabla 6.7 Valores de Turbidez (NTU) | 81 |
| Tabla 6.8 Valores de Turbidez (NTU) | 82 |
| Tabla 6.9 Comparación de resultados de la mezcla de 60% ARI, para La primer y segunda corrida | 84 |

Indice de Figuras

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1: Introducción | 1 |
| Fig. 1.1 Diagrama de flujo de producción de celulosa | 4 |
| Capítulo 2: Marco Teórico | 7 |
| Fig. 2.1 Modelo propuesto por Adler | 8 |
| Fig. 2.2 Principales especies precursoras de la lignina | 8 |
| Fig. 2.3 Eter Beta-arilo | 9 |
| Fig. 2.4 Mecanismo general de desbalance de cargas | 10 |
| Fig. 2.5 Tetraedro | 13 |
| Fig. 2.6 Capa tetraédrica sílica (Si ₂ O ₅) ⁻² | 14 |
| Fig. 2.7 Octaedro (Al(OH) ₆) ⁻³ | 14 |
| Fig. 2.8 Capa Gibsita | 15 |
| Fig. 2.9 Combinación de las capas tetraédrica y octaédrica | 16 |
| Fig. 2.10 Acomodo de las capas de caolín | 17 |
| Fig. 2.11 Cristal de arcilla compuesto por capas de caolín | 18 |
| Capítulo 3: Caracterización de las corrientes | 20 |
| Fig. 3.1 Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas | 22 |
| Fig. 3.2 Reacción de pulpeo en medio alcalino | 24 |
| Fig. 3.3 Partículas coloidales del lavado alcalino | 24 |
| Fig. 3.4 Productos de la reacción en medio ácido | 25 |
| Fig. 3.5 Cargas parciales en las arcillas caoliníticas | 26 |
| Fig. 3.6 Dependencia de la carga de la arcilla con respecto al pH | 26 |
| Capítulo 4: Modelo particular e hipótesis, metodología y Pruebas realizadas | 28 |
| Fig. 4.1 Representación de la desestabilización de la partícula Con arcilla | 29 |
| Fig. 4.2 Desestabilización de la partícula con la arcilla y el coagulante | 29 |
| Fig. 4.3 Equipo de prueba de jarras | 30 |
| Capítulo 5: Resultados | 35 |
| Fig. 5.1 Color vs Sulfato de Aluminio | 40 |
| Fig. 5.2 Conductividad vs Sulfato de Aluminio | 41 |
| Fig. 5.3 Turbidez vs Sulfato de Aluminio | 42 |
| Fig. 5.4 Color vs Sulfato de Aluminio | 45 |
| Fig. 5.5 DQO vs Sulfato de Aluminio | 46 |
| Fig. 5.6 pH vs Sulfato de Aluminio | 47 |
| Fig. 5.7 Conductividad vs Sulfato de Aluminio | 48 |

| | | |
|---|---|-----------|
| Fig. 5.8 | Turbidez vs Sulfato de Aluminio | 40 |
| Fig. 5.9 | Color vs Sulfato de Aluminio | 53 |
| Fig. 5.10 | DQO vs Sulfato de Aluminio | 54 |
| Fig. 5.11 | pH vs Sulfato de Aluminio | 55 |
| Fig. 5.12 | conductividad vs Sulfato de Aluminio | 56 |
| Fig. 5.13 | Turbidez vs Sulfato de Aluminio | 57 |
| Capítulo 6: Análisis de resultados | | 58 |
| Fig. 6.1 | Comportamiento de los coloides a diferentes concentraciones De arcilla y dosis de coagulante | 63 |
| Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones | | 86 |
| Fig. 7.1 | Propuesta de tratamiento | 89 |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Justificación.

El agua en el mundo reviste una vital importancia pues se le considera fuente de vida y salud y de acuerdo con el ritmo de crecimiento de la población se le considerará fuente de riqueza. La distribución que tiene en el globo terráqueo es de la siguiente forma; un 94.00% son océanos y mares, un 2 % se encuentra en las capas de hielo y en los glaciares, menos de un 4% se encuentra como agua subterránea y solo el 0.014% se encuentra como agua disponible para consumo y utilización en general, según la Organización Mundial de la Salud (**OMS**, 1996).

La disponibilidad (INEGI 1997) del recurso no es uniforme en todo el planeta, teniéndose países con una alta disponibilidad, con un volumen promedio mayor a 10 mil m³/ persona-año, países con una disponibilidad media con un rango que se encuentra entre 5 y 10 mil m³/ persona-año, países con disponibilidad baja con una fluctuación entre 1 y 5 mil m³/ persona-año y países con disponibilidad muy baja, cuya existencia del recurso es menor a 1 mil m³/ persona-año.

Actualmente México se encuentra ubicado en el nivel medio, sin embargo proyecciones de la Organización Mundial de la Salud indican que a partir del año 2000 nuestro país puede llegar a estar en un nivel bajo.

De igual forma que en el mundo, en nuestro país la distribución del recurso acuífero no es uniforme, teniéndose zonas con superávit en donde la disponibilidad es mayor que la demanda, zonas en equilibrio donde la disponibilidad es aproximadamente igual que la demanda y zonas con déficit en donde la disponibilidad es menor que la demanda. De acuerdo con Lara (1980) Michoacán para el año 2000 se considerará un estado en el punto de equilibrio. Esta proyección nos permite inferir que en años posteriores y considerando solamente el crecimiento poblacional si no se tiene un uso racional del recurso se puede llegar a niveles de déficit lo cual generará problemas de salud, alimentarios, sociales y económicos.

El recurso acuífero se aplica en: consumo humano, uso doméstico y comercial, uso agrícola, uso energético e industrial, etc. En cada uno de los usos antes descritos se generan aguas residuales que van a los cuerpos receptores (ríos, lagos, lagunas y mares). De acuerdo con INEGI (1992) se generaron 115 m³/seg de aguas residuales municipales (solo al 15% se le dio tratamiento), 82 m³/seg de aguas residuales industriales y se vertieron 265 m³/seg de aguas provenientes del riego agrícola. Aun y cuando el volumen generado por las aguas residuales municipales es mucho mayor que el de las aguas residuales industriales, estas últimas pueden presentar niveles y grados contaminación mayores que las municipales, debido a la gran diversidad de los procesos productivos.

Las industrias que se consideran más contaminantes considerando el flujo de aguas residuales y el grado de contaminación son: Azucarera, petrolera, siderúrgica y la de celulosa y papel (INEGI).

Ante el enorme reto que se nos plantea para cuidar nuestros inventarios de agua existentes así como la recuperación y saneamiento de cuencas, ríos y lagos, se debe de plantear un programa de tratamiento para todos los tipos de aguas residuales que se generan. Más en particular para el área industrial el correcto tratamiento de sus aguas residuales industriales tendrá un impacto significativo sobre los siguientes factores:

- a) Re-uso de mayor cantidad de agua
- b) Disminución del consumo de agua y los costos asociados
- c) Mayor disponibilidad de agua para la población
- d) Cumplimiento de la normatividad
- e) Mejor imagen de la empresa.

En los casos en que el agua residual que se va a descargar sea de buena calidad, esta puede ser reutilizada dentro de la empresa para servicios de limpieza, enfriamiento, incendio, proceso, etc. Con el mayor re-uso del agua se

disminuyen los consumos dentro de la empresa y como consecuencia los pagos por éste concepto.

Otro impacto muy importante es que el agua que se deja de consumir en la industria puede ser utilizada en sectores como el urbano, comercial y agrícola y desde el punto de vista legal al dar cumplimiento con las leyes ecológicas y ambientales le evitará sanciones de tipo **administrativo** y **económico**.

Las estrategias que conduzcan a la empresa al desarrollo sustentable le generarán una buena imagen, que le permitirá que sus proyectos de expansión y/o desarrollo no se vean bloqueados o afectados, además de que se contará con la calidad moral y tecnológica para solicitar apoyos para mejoras de su proceso.

De acuerdo con la ubicación de las diferentes plantas de extracción celulosa en el país, éstas se encuentran localizadas en estados los cuales están o estarán en el punto de equilibrio o en condiciones de déficit de disponibilidad/ consumo de agua. Esta expectativa tan delicada nos obliga a innovar sistemas de tratamiento que nos ayuden a disminuir los consumos de agua y mantener nuestros mantos libres de contaminación, de lo contrario el agudizamiento del problema deficitario del recurso obligará a disminuciones de producción y hasta cierre de empresas.

Ante las expectativas anteriormente planteadas ésta investigación en particular aborda el tratamiento de las aguas residuales industriales de una de las empresas que se consideran como una de las más contaminantes "la de Celulosa y Papel" y que estudios realizados han mostrado que se puede recuperar hasta un flujo de 264 litros/segundo de un total de 280 litros/segundo.

1.2 Definición del Problema.

En el proceso de la extracción de celulosa se utiliza madera de pino y de encino como materia prima y sulfato de sodio (Na_2SO_4) como medio de extracción, a este proceso se le denomina proceso Kraft. Después de llevarse a efecto la extracción de la lignina en el digestor se generan dos corrientes (Fig. 1.1):

- a) Una corriente compuesta principalmente por lignina y sus derivados, hemicelulosas, extractables y reactivos de extracción (D. Fengel et al. 1989), la cual es enviada a un tren de evaporación donde se concentra, después de concentrada la solución se manda a una caldera de recuperación como combustible. En la caldera se calcinan los compuestos orgánicos presentes (*lignina y derivados, hemicelulosas y extractables*) y se obtiene energía además de que se recuperan los reactivos de tipo inorgánico que son empleados nuevamente para extracción de la lignina previo acondicionamiento.

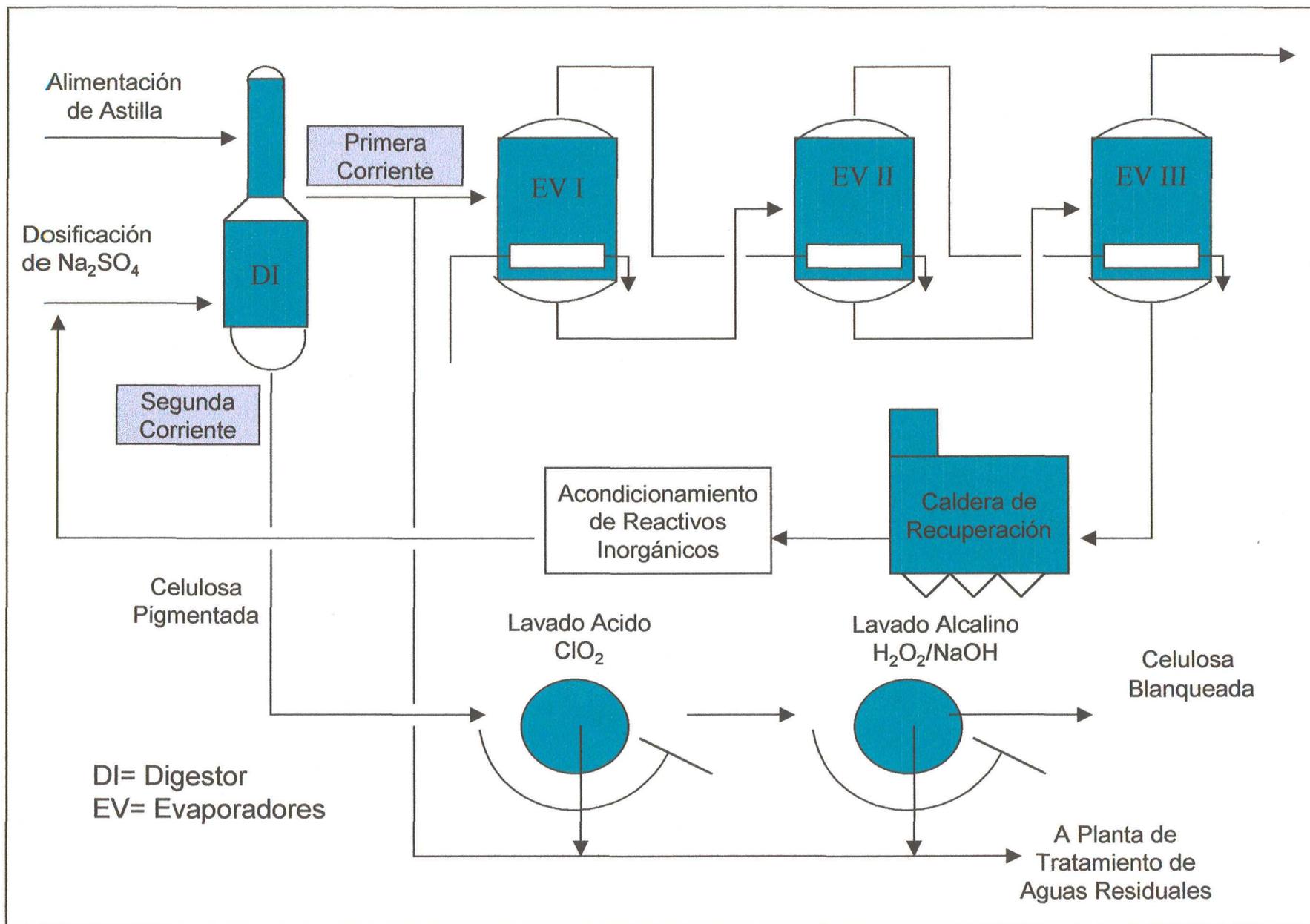


Fig. 1.1 Diagrama de Flujo de Producción de Celulosa

- b) Y una segunda corriente consta principalmente de **celulosa pigmentada**, que pasa por un tren de blanqueo en donde se le elimina el color, en ésta etapa de proceso se genera una corriente líquida altamente coloreada que es enviada a la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria.

De la planta de tratamiento, el agua residual que es vertida a los cuerpos receptores sale con las características mostradas en la tabla 1.1. Al realizar una comparación entre los valores de las descargas de aguas residuales y los límites permitidos por la norma NOM-001-ECOL-1997 (que deroga a la norma anterior utilizada específicamente para los procesos industriales de pulpa y papel), tenemos que los parámetros que no cumplen con la norma son: el **DBO** y los **Sólidos Suspendidos Totales** con las actuales condiciones de tratamiento.

Tabla 1.1 Caracterización de la corriente de descarga del agua residual

| Parámetro | Valores Promedio Medidos | Valores permisibles |
|--------------------|--------------------------|---------------------|
| D.B.O. | 92 ppm | 75 |
| D.Q.O. | 520 ppm | Sin establecer |
| Temperatura | 30 °C | 40°C |
| Grasas y Aceites | 0 ppm | 15 ppm |
| Materia Flotante | Ausente | Ausente |
| Sólidos Sediment. | 0.90 ml/l | 1 ppm |
| Sólidos Susp. Tot. | 80 | 75 |
| Nitrógeno Total | N.C. | 40 |
| Fósforo Total | N.C. | 20 |
| pH | 7.6 | 5-10 |
| Color | 2270 u Pt-Co | Sin establecer |

Ante la problemática que se plantea de posible disminución de la disponibilidad del agua, el ajuste que se da en la normatividad aplicable para las condiciones de ésta industria y el uso que se le va a dar al agua después de ser vertida por la empresa, se deben de realizar nuevos estudios que den las bases para establecer un nuevo sistema de tratamiento que permita alcanzar las metas de la sustentabilidad y el cumplimiento pleno de la norma.

De acuerdo con los valores de DBO, los Sólidos Suspendidos Totales y el flujo de descarga, se dispone hasta el año 2005 para tener el cumplimiento total de la Norma. Los parámetros de la norma que son utilizados para determinar el plazo en el cual se tiene que cumplir son los que comprenden a las descargas de aguas residuales en ríos, para un uso público urbano. El parámetro de color no está considerado, pero debido al tipo de proceso es un indicador visual muy importante del grado de contaminación que se vierte al río, generando un impacto negativo en la población.

Dentro de la industria de celulosa y papel existe otro proceso de extracción de la celulosa, a través del sulfito de sodio (Na_2SO_3) cuyo objetivo es usar un reactivo menos agresivo químicamente; sin embargo como lo menciona Caserio et al. (1974) "al reaccionar la lignina con el azufre se forman compuestos altamente pigmentados lo cual genera desde el punto de vista de color una problemática similar al proceso al Kraft (al sulfato)". De acuerdo con las diferentes tecnologías que se han generado las aguas residuales de la industria papelera se han tratado también por sistemas de bioreacción obteniéndose resultados similares en los parámetros de color y de DBO/DQO con los sistemas de lagunaje.

Actualmente se están desarrollando nuevas tecnologías para romper las estructuras lignínicas por métodos mecánicos y calor, que originan aguas residuales con mejores condiciones de tratabilidad y recuperación de la lignina. Sin embargo debido a los diseños existentes en las plantas en operación, el intentar modificar el proceso requiere de una gran inversión económica y de un paro prolongado de la operación, aspectos que para la empresa no son posibles.

1.3 Objetivo

Evaluar la utilización de la arcilla natural Halloysita 7a, en la remoción de color, DBO Y DQO en aguas residuales altamente pigmentadas provenientes de la industria de Celulosa y Papel.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Características del contaminante principal.

Las corrientes pigmentadas por lignina y derivados, hemicelulosas, extractables y que además tienen una alta conductividad presentan el problema de ser altamente contaminantes y difíciles de tratar. Estos contaminantes y sus interacciones presentan características muy específicas que deben de ser consideradas a la hora de proponer las alternativas de tratamiento.

La lignina es una molécula polimérica y tridimensional que no ha sido perfectamente definida en tamaño y estructura, varios autores han realizado intentos por proponer ésta estructura. Adler (1977) propuso el arreglo mostrado en la fig. 2.1.

También se han propuesto estructuras por computadora en donde se pretende representar de una manera más rigurosa la molécula y el resultado nos muestra una gran complejidad estructural como se muestra en el Apéndice A.

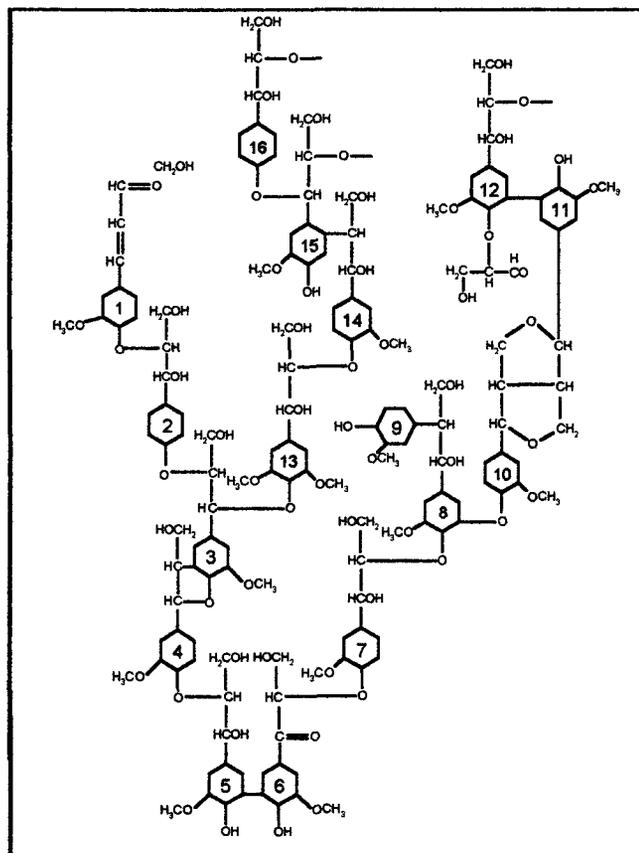


FIGURA 2.1. Modelo propuesto por Adler (1977)

2.1.1 Estructuras Básicas de la Lignina.

Aún y cuando no se ha establecido perfectamente la estructura de la lignina, se han podido definir las estructuras básicas precursoras y formadoras de la cadena polimérica. El alcohol coniferílico (Fig. 2.2-I) es la especie química característica en las especies de las coníferas (**pinos**), el alcohol sinapílico (Fig.2.2-II) es el componente químico característico de las especies latifoliadas (**encinos**). Los pinos y los encinos son tipos de árboles que se usan como materia prima en la extracción de celulosa.

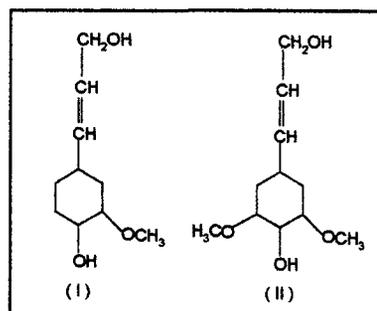


Fig. 2.2 Principales especies precursoras de la lignina

Con base en los compuestos químicos anteriores se han podido determinar los grupos funcionales básicos de la lignina que nos permitirá predecir con elementos más sólidos su comportamiento. Los grupos funcionales se presentan en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Grupos Funcionales de la lignina

| | |
|-----------|-------------------|
| Metoxilo | -OCH ₃ |
| Hidroxilo | OH ⁻ |
| Ester | O-C=O |
| Aldheido | O=C-H |
| Eter | -O- |
| Cetona | C=O |

Cuando la lignina se somete a condiciones de pH básico > 7 se presenta un desbalance en sus cargas de los grupos OH a un radical O⁻. El desbalance de las cargas se puede representar a través de las estructuras del éter Beta-arilo (fig. 2.3) que de acuerdo a su grupo funcional es el éter que más se encuentra en la lignina.

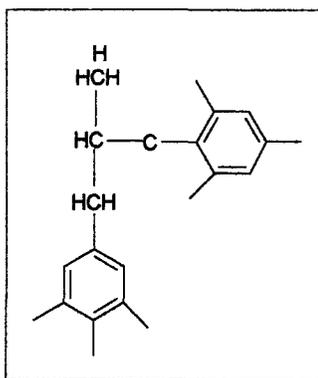


Fig. 2.3 Eter Beta-arilo

2.1.2 Mecanismo General de Desbalance de las Cargas de compuestos de Lignina

El desbalance de las cargas hace que la molécula en solución se estabilice y permanezca en estado coloidal aún en bajas concentraciones. El efecto de

estabilidad no permitirá que la molécula se separe por sí sola. El mecanismo general de reacción del desbalance se presenta en la fig. 2.4.

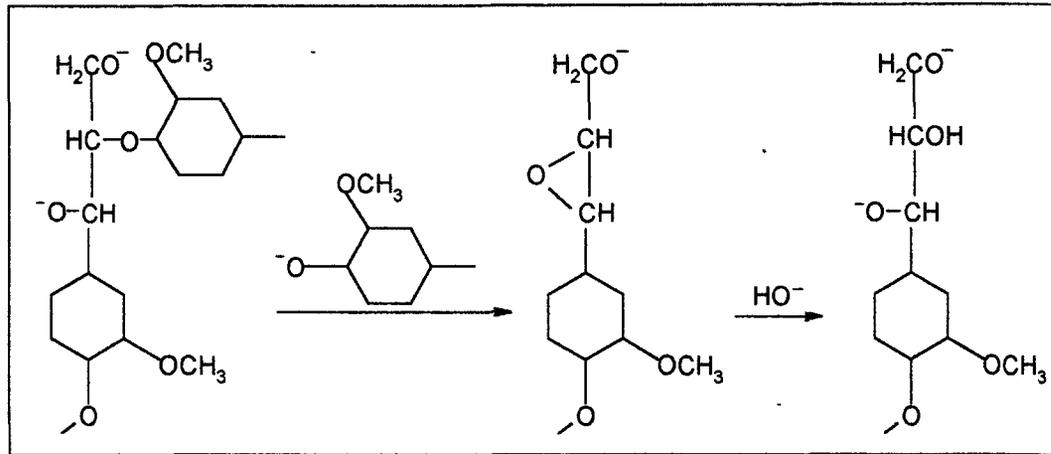


Fig. 2.4 Mecanismo general de desbalance de cargas

De acuerdo a Weber (1979), una de las formas para lograr la desestabilización y separación de una partícula en una corriente, es el incrementar la fuerza iónica de la solución, que permitan comprimir la doble capa electrónica, provocando que las fuerzas de repulsión entre partículas disminuyan. Este efecto permitirá que las partículas crezcan de tamaño y que se puedan sedimentar.

De acuerdo con el tipo de proceso de extracción de la celulosa y la caracterización preliminar del agua residual establecemos que ésta presenta un valor de conductividad de 2000 micromohos/cm en promedio, parámetro que nos indica una gran presencia de iones en solución, que de acuerdo con Weber este efecto debe de ayudar a desestabilizar las partículas de lignina.

La alta concentración y las variaciones de iones en el agua residual pueden inhibir la acción bacteriana de biodegradación, debido a que cuando se tienen estos cambios y se presentan condiciones hipertónicas en las aguas residuales con respecto a la célula, habrá un transporte activo de líquido de la célula hacia el agua por efecto de la diferencia de concentración de las sales. Esta salida de agua origina que el microorganismo no tenga un desarrollo pleno y que baje su actividad biosintética y como consecuencia su acción degradante. En condiciones muy críticas se pueden llegar a tener tan altas concentraciones de iones de sodio (Na^+) en las aguas que provocaría que la célula se **plasmolice** y como consecuencia muera (T. Herrera, 1968). Estudios de biodegradación de la

lignina nos indican que es una molécula con grandes problemas para ser degradada.

En lo que respecta al color la lignina y sus derivados son los principales contribuyentes, debido a que presentan una gran cantidad de grupos cromóforos conjugados, cuya acción es aditiva a incrementar el color dependiendo de la banda de absorción según Dyer (1973). Sin embargo, Caserio et al. (1971) concluyen que los mecanismos de extracción de la celulosa no han sido perfectamente definidos y que la corriente pigmentada producto es debido a reacciones con azufre.

Otra contribución importante en el color se define en el manual de caracterización y análisis de aguas residuales (1986) en el cual se expone que: "En el proceso de descomposición de la lignina se generan **Humatos y ácido húmico** que son componentes que originan color".

Según Haun (1970) las hemicelulosas están constituidas básicamente por 5 tipos de azúcares: tres hexosas, glucosa, manosa y galactosa, dos pentosas, xylosa y arabinosa. Estos azúcares desde el punto de vista de tratamiento, pueden ser biodegradados con facilidad, pues forman parte de los nutrientes de los microorganismos, por lo tanto estos componentes tendrán poco impacto sobre el parámetro de DBO/DQO después del sistema de tratamiento.

Los procesos de tratamiento biológicos de lodos activados se caracterizan por que los microorganismos están soportados en material arcilloso y para poder llevar a efecto las bacterias su degradación en primer instancia los contaminantes deben de ser bio-sorbidos.

Con las condiciones existentes de tratamiento y evaluando las características de los contaminantes y sus interacciones, es necesario hacer más eficiente el tratamiento físico-químico del sistema de tal forma que se pueda retirar lignina y como consecuencia color antes de las lagunas de aireación y estabilización. Una alternativa es el uso de un material de tipo arcilloso que permita la adsorción y desestabilización de las moléculas de lignina, sus derivados y los productos derivados de la descomposición.

2.2. Características del Material Arcilloso.

Las arcillas son compuestos inorgánicos que se forman básicamente de elementos como el aluminio, silicio, oxígeno e hidrógeno, y que además pueden contener cationes. Estos componentes arcillosos tienen una formación en capas que les permite tener una estructura bidimensional de gran tamaño y una limitada estructura tridimensional.

2.2.1. Formación de las arcillas.

En general, las arcillas minerales han sido formadas por la descomposición de rocas ígneas tales como el granito, las cuales se formaron por solidificación de materiales fundidos en el interior de la tierra. El granito es un compuesto con aproximadamente iguales proporciones de: minerales de mica ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$), cuarzo (SiO_2), y feldespato ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$), de éstos minerales, el más inestable a la acción del agua y del aire es el feldespato. De la descomposición o **caolinización** del feldespato en presencia de aire y agua se forman las arcillas Caoliníticas. La potasa y parte de la sílica se disuelven además de que el residuo se recombina con agua dando como resultado la arcilla mineral caolinítica.

La caolinita es un material cristalino y su formación se inicia en forma plana y de estructura hexagonal (W. Ryan, 1986). A pesar de que los cristales de caolinita son muy pequeños (la mayoría de las partículas están en el rango de 1-10 micras) estos se consideran relativamente grandes comparados con otros materiales arcillosos minerales.

El tamaño pequeño, la naturaleza de los cristales y la alta superficie específica, son características particulares que originan muchas de las propiedades importantes de las arcillas minerales. Para la visualización de las estructuras de las partículas, éstas deben de ser observadas al microscopio electrónico.

2.2.2 Arcillas Residuales y Sedimentarias.

Las arcillas una vez formadas de las rocas madres pueden ser depositadas en el lugar de origen o pueden ser transportadas por agua y re-depositadas a cierta distancia de la formación.

Se les denominan arcillas residuales o primarias a las arcillas que se depositan en el lugar de origen. Y cuando viajan transportadas se les denominan sedimentarias o secundarias. Debido al transporte que sufren las arcillas se genera una clasificación natural en donde las arcillas sedimentarias son normalmente más pequeñas que las arcillas residuales.

2.2.3 Estructuras de los Caolines.

La estructura de los Caolines minerales está basado en la combinación o condensación de dos estructuras de capas. Una capa es conocida como capa sílica y está compuesta por átomos de silicio y oxígeno, y la segunda capa es conocida como capa gibsita y está compuesta por átomos de aluminio y grupos hidroxilos.

2.2.3.1 La capa Sílica

Cada silicio está rodeado por cuatro átomos de oxígeno, los oxígenos están en la esquina de un tetraedro regular. En una vista en planta de la molécula, tres oxígenos forman la base de la molécula, en el centro de está colocado el silicio y en la parte superior la molécula de oxígeno. En una vista en elevación del mismo tetraedro se indica la posición del silicio más cercanamente. Ambos detalles se muestran en la figura 2.5a y 2.5b.

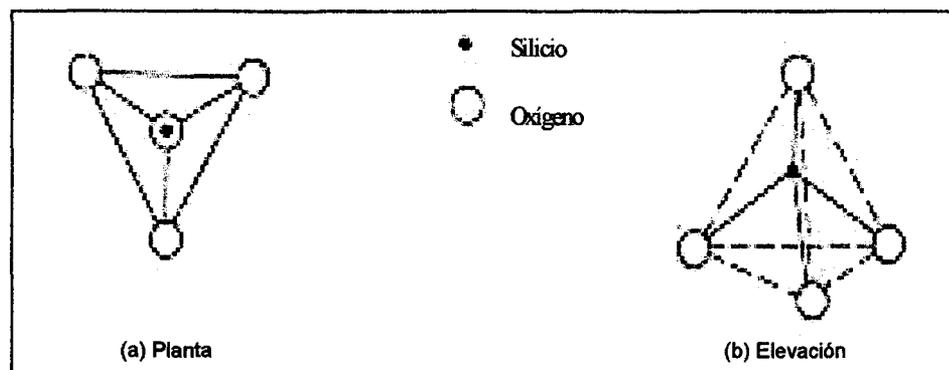


Figura 2.5 (SiO_4) Tetraedro

El silicio tiene 4 valencias positivas y los oxígenos tienen 2 valencias negativas, de tal forma que el tetraedro tiene una carga neta positiva de menos cuatro, (conocido como orthosilicato $(\text{SiO}_4)^{4-}$). La carga puede ser satisfecha por cationes con los cuales puede reaccionar.

En otras estructuras, los tetraedros se unen compartiendo oxígenos y formando largas cadenas u hojas. En las estructuras de las arcillas minerales tres de los cuatro oxígenos en cada tetraedro se están compartiendo con otro tetraedro, dando una hoja continua como se muestra en la figura 2.6.

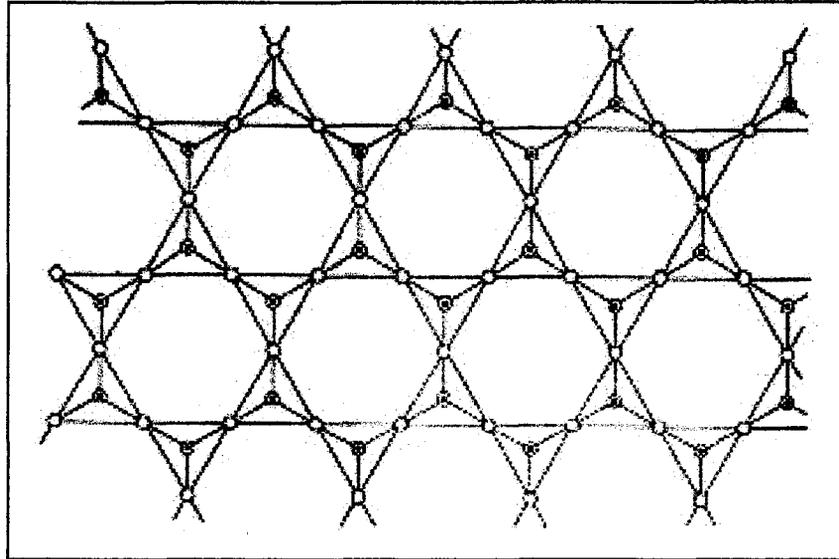


Fig. 2.6 Capa Tetraédrica Sílica $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$

2.2.3.2 La Capa Gipsita

En los minerales de caolín la tetraédrica sílica es unida vía la valencia insatisfecha de oxígeno a la capa de hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$, llamada capa Gipsita. El bloque básico de construcción de la capa gipsita es un átomo de aluminio rodeado por seis grupos hidroxil, los hidroxilos están ubicados en las aristas de un octágono regular como se muestra en la figura 2.7. La capa gipsita es consecuentemente con frecuencia referida como capa octaédrica.

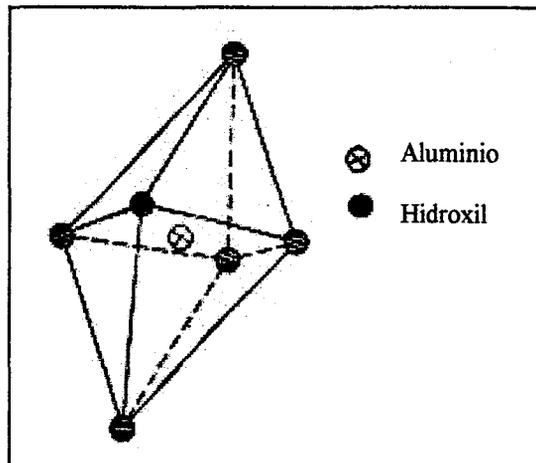


Fig. 2.7 Octaedro $(\text{Al}(\text{OH})_6)^{3-}$

Al igual que la capa sílica tetraédrica, éstos octágonos de $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ pueden también unirse, en este caso cada grupo OH^- está unido por dos aluminios. Cada grupo OH^- recibe la mitad de la valencia de dos aluminios trivalentes, y como el grupo OH^- es monovalente, los grupos hidroxil están satisfechos en valencia y no hay valencias insatisfechas en la estructura como se muestra en la figura 2.8.

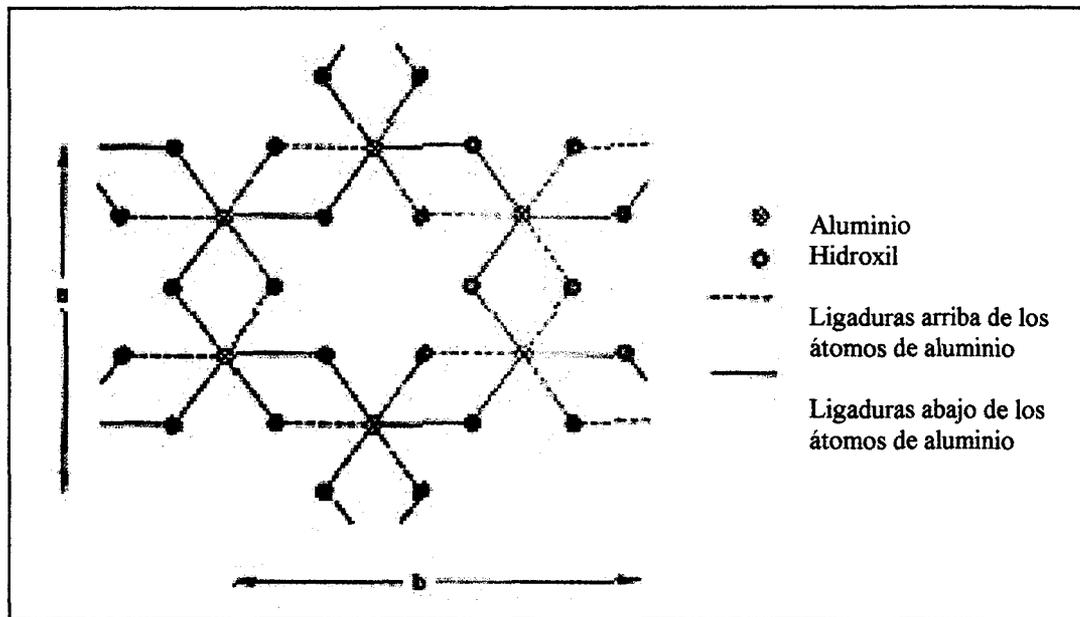


Fig. 2.8 Capa Gibbsita

Cada octágono contiene un átomo de aluminio y una unión de la mitad de 6 grupos hidroxil. Note que la mitad de los grupos hidroxil están entre el plano de los átomos de aluminio y la mitad debajo de él. Igual que la hoja de sílica tetraédrica, la hoja octaédrica de gibsita es capaz de tener una extensión infinita en las direcciones a y b, y el enlace octaedro forma un anillo hexagonal repetido similar a la estructura de la capa tetraédrica.

2.2.3.3 Condensación de las capas $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$

Las dimensiones de los anillos hexagonales en la capa sílica y gibsita son muy similares, y esto hace posible que las dos hojas condensen juntas. Esto ocurre por eliminación de los grupos hidroxil en la estructura gibsita y sus lugares son tomados por las valencias insatisfechas de los oxígenos en la capa sílica. Debido a que los hidroxil en la estructura gibsita recibe la mitad de la valencia distribuida de cada uno de los dos aluminios a los cuales están unidos, y que se

tiene una valencia insatisfecha del oxígeno en la capa sílica, es necesario que por cada valencia insatisfecha de oxígeno se combinen dos átomos de aluminio, recibiendo la mitad de la valencia distribuida de cada uno, como lo hizo el grupo hidroxil. Esto conduce a la neutralidad eléctrica de la partícula $[Al_2(OH)_4(Si_2O_5)^{2-}]$ o a la fórmula estructural de los caolines minerales $Al_2(OH)_4Si_2O_5$. En algunas ocasiones encontramos la siguiente fórmula escrita para las arcillas $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ en donde es necesario hacer notar que las dos moléculas de agua que se representan en la fórmula no es agua molecular y corresponden a grupos hidroxilos reacomodados. Una sección de las dos capas unidad se representa en la figura 2.9

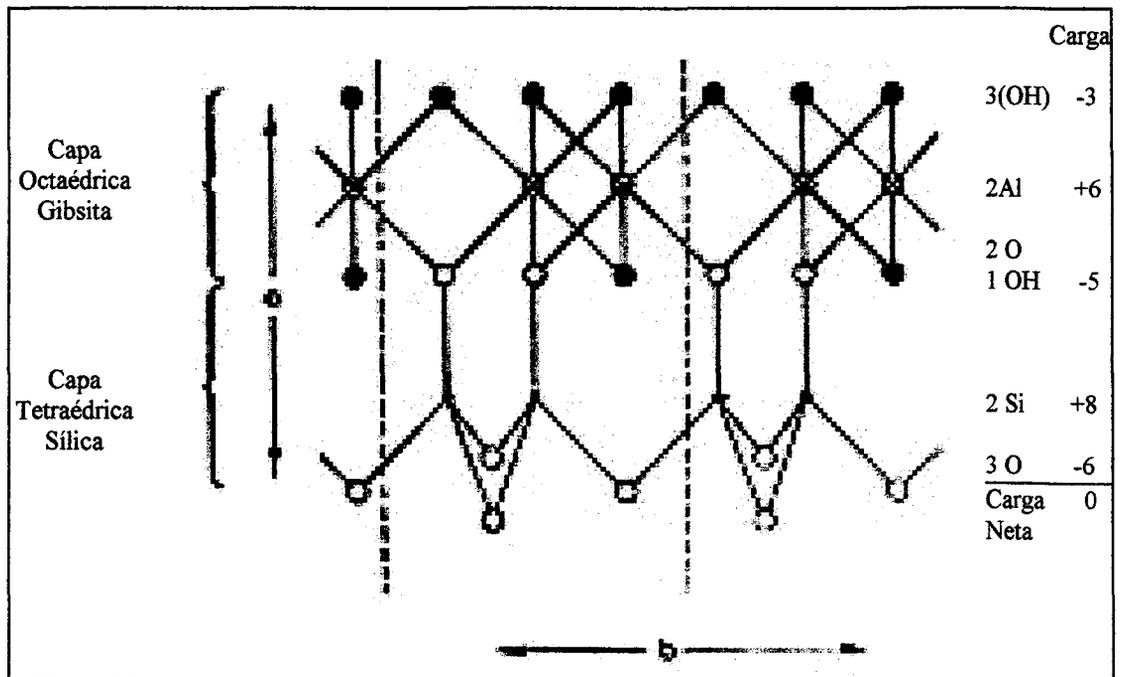


Fig. 2.9 Combinación de las capas tetraédrica y octaédrica.

Todos los minerales de caolín tienen ésta misma estructura básica, la diferencia entre ellos radica en la forma en que ese par de capas está acomodada una sobre otra para formar el cristal. La estructura en la figura 2.9 es eléctricamente neutra por que todas sus valencias están satisfechas. Hay dos tipos de fuerzas las cuales pueden soportar las capas: a) fuerzas atractivas de van der Waals las cuales existen en todas las partículas que se encuentran muy cercanas entre sí; b) ligaduras débiles entre hidrógenos de los grupos hidroxil en la capa gibsitita de una capa caolín y los oxígenos en la capa sílica de la siguiente capa caolín. El hidrógeno aquí actúa como puente, teniendo la misma atracción para ambos oxígenos como se muestra esquemáticamente en la figura 2.10.

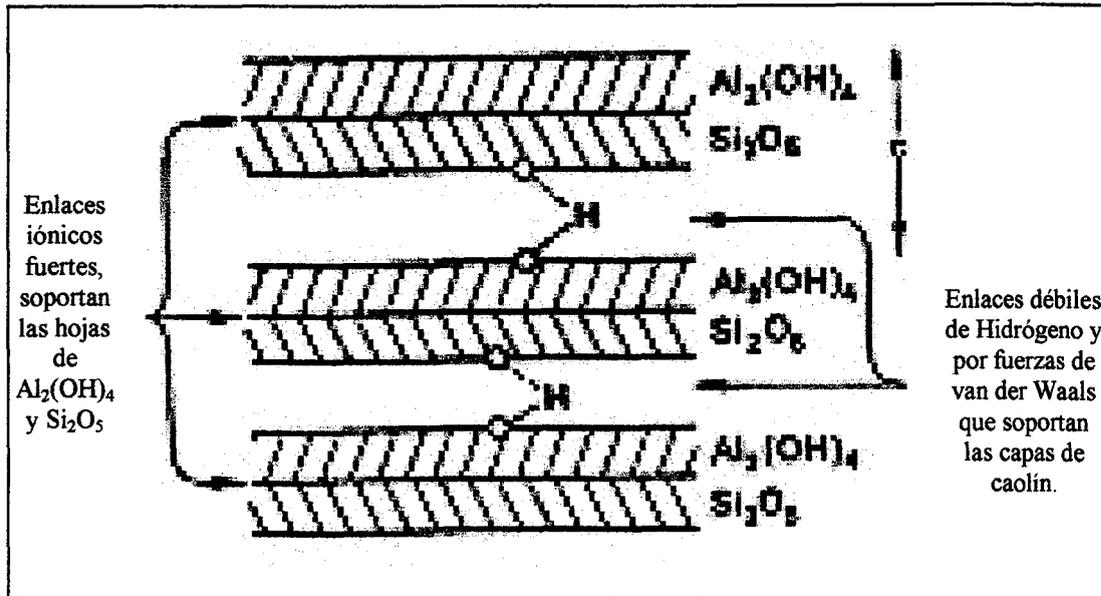


Fig. 2.10 Acomodo de las capas de caolín

Debido a que las ligaduras entre las capas de caolín son débiles, el número de capas las cuales pueden ser colocadas juntas es limitado y los cristales de la arcilla tenderán a ser delgados en la dirección C. Las ligaduras entre la capa octaédrica y tetraédrica en las direcciones a y b son fuertes, así los cristales de la arcilla son anchos y largos pero delgados. Las estructuras hexagonales en ambas capas tetraédrica y octaédrica dan como resultados estructuras hexagonales achatadas. Fig. 2.11

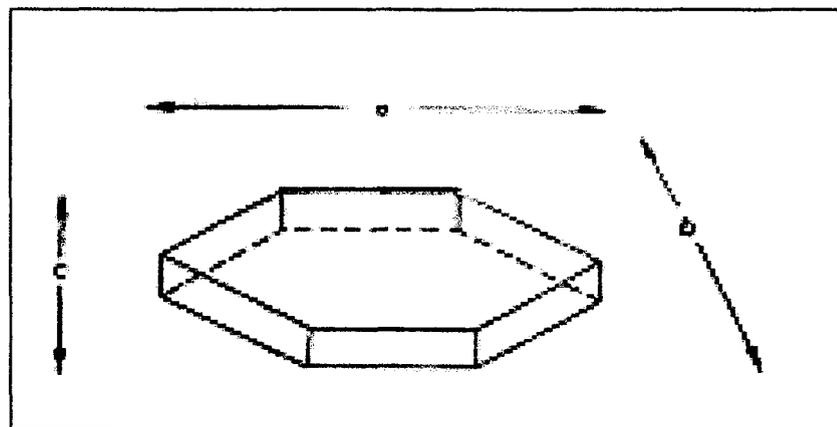


Fig. 2.11 Cristal de arcilla compuesto por capas de Caolín

Aunque las fuerzas entre las capas de caolín son débiles, estas son lo suficientemente fuertes para soportar las capas en las posiciones ya fijadas y dan un espaciamiento basal constante entre los rangos de 7 a 2 Amstrongs ($1 \text{ Amstrong} = 10^{-10}$ metros). El espaciamiento basal es la distancia entre las correspondientes capas de átomos.

Todos los minerales de caolín contienen una capa sílica y una capa de gibsita y son llamados algunas veces uno a uno, o simples capas minerales. Algunos minerales como las montmorilonitas contienen dos capas de sílica combinadas a una capa central, la cual puede ser de gibsita o de estructura similar, estas estructuras son llamadas de doble capa o dos a uno. Todos estos minerales son miembros del grupo del caolín y tienen la forma estructural $\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$. Difieren solamente en la forma en que las capas de caolín son acomodadas sobre la superficie de una sobre otra para formar el cristal.

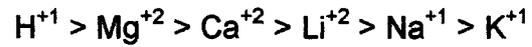
Otro miembro existente del grupo caolín es la forma hidratada de la Halloysita, teniendo una fórmula $\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Estas presentan otra vez un arreglo en el acomodo de las capas pero existiendo moléculas de agua entre las capas de caolín. Aún y cuando las capas de las diferentes arcillas tienen o pueden tener la misma fórmula química, las estructuras cristalográficas varían de acuerdo a los arreglos que toman en el momento de la condensación.

El tamaño del cristal de los minerales del caolín difiere debido a que existe una diferencia entre el acomodo de las capas e influye en la estabilidad de la estructura. La Halloysita tiende a tener arreglos erráticos, lo que hace que se tenga inestabilidad estructural y por tanto produce cristales pequeños. Las arcillas derivadas del caolín muestran una estructura hexagonal, pero en la halloysita hidratada donde el agua entra en las capas la atracción entre éstas es muy pequeña y las capas tienden a rolarse, produciendo cristales en forma tubular.

2.2.3.4 Sustitución Isomórfica en las Arcillas.

La sustitución isomórfica se lleva a cabo en las arcillas cuando los tamaños de los cationes son similares, y se pueden reemplazar uno por otro. Sin embargo estos reemplazamientos dan como resultado un cambio en la composición química. Cuando los cationes intercambiados tienen la misma valencia no existirá un cambio de carga en la molécula. Sin embargo también existe la posibilidad de que las sustituciones se lleven a cabo con cationes en donde los números de valencia sean diferentes, un ejemplo es la sustitución del aluminio trivalente por silicio tetravalente. Debido a la diferencia entre las valencias estos reemplazamientos conducen a un déficit de carga en la estructura y se convierte en una molécula negativamente cargada. La carga es balanceada por adsorción de cationes externos a la estructura arcilla. A lo que se le llama sustitución isomórfica.

La preferencia de los cationes se da de acuerdo al siguiente orden:



En caso de que el catión adsorbido sea un divalente para satisfacer la carga parcialmente negativa generada por la sustitución del Al^{III} por el Si^{IV} , la arcilla solo utilizará una valencia quedando libre la otra para unirse con otra molécula de arcilla o generando una parcial carga positiva en la nueva partícula formada. Un ejemplo de catión divalente es el Ca^{+2} que al ser adsorbido por la arcilla solo una de sus valencias será utilizada para satisfacer la carga negativa quedando libre la otra valencia.

Capítulo 3

Caracterización de Corrientes

3.1 Caracterización de las corrientes que confluyen en la Planta de tratamiento.

En el proceso de la extracción de la celulosa y áreas de recuperación de reactivos se generan diferentes corrientes de aguas residuales que confluyen a la planta de tratamiento de aguas. Estas corrientes tienen diferentes impactos sobre el compósito final que se va a tratar por lo que es necesario definir las perfectamente, una vez que el compósito final entra en la planta de tratamiento es necesario conocer los cambios que sufre la corriente después de cada etapa. Cortés et al. (Apéndice B) realizaron un trabajo de muestreo y caracterización de las corrientes en la planta de tratamiento (Fig. 3.1) dando como resultado el siguiente resumen.

Las cuatro corrientes básicas que contribuyen con carga contaminante y flujo a la planta de tratamiento son:

- a) La corriente proveniente de las unidades de evaporación con un flujo de 2,400 m³/día, una DQO (Demanda Química de Oxígeno) de 1,444 ppm, un contenido de sólidos totales de 350 mg/lit, un pH que fluctúa entre 7.2 y 8, un parámetro de color de 3,500 unidades Pt-Co y con una temperatura promedio de 56°C.
- b) Corriente alcalina proveniente del lavado de la celulosa la cual tiene un flujo de 9,840 m³/día, una DQO de 1,560 ppm, un contenido de sólidos totales de 1380 mg/lit, un pH en el rango de 8 – 9.2, un color de 2,726 unidades Pt-Co y una temperatura promedio de 63°C.
- c) La corriente ácida proveniente de la unidad de blanqueo de la celulosa la cual aporta un flujo de 7,680 m³/día, una DQO de 900 ppm, un contenido de sólidos totales de 1,460 mg/lit un pH promedio de 2.5, un valor en el parámetro de color de 503 unidades Pt-Co y una temperatura de 44°C.
- d) La corriente proveniente del lavado de los gases del horno de cal que aporta un flujo de 4,080 m³/día, una DQO de 494 ppm, un contenido de sólidos sedimentables de 21 ml/lit, un pH de 10.4, una conductividad eléctrica de 1,910 mmohs/cm, un color de 450 unidades Pt-Co y una temperatura de 49°C.

Las corrientes provenientes de los diferentes puntos de la planta confluyen en el tanque de premezclado (**TQE**) donde se unen y homogenizan y acondicionan para ser enviados a la unidad de sedimentación primaria. En el tanque de premezclado el parámetro más importante por controlar es el pH, el cual debe de estar en el rango de la neutralidad para que el sistema de lagunaje trabaje adecuadamente.

Del tanque de premezclado se envía la corriente resultante al equipo de sedimentación primaria (**SEPRI**) en donde se le adiciona un polímero de tipo catiónico a una concentración de 1.5 ppm para eliminar las partículas coloidales. El tiempo de residencia promedio en el equipo es de 8 hrs. A la alimentación del sedimentador primario se tienen las siguientes condiciones; una temperatura de 50°C, una DQO de 1,120 ppm, un pH de 7.2 y unos sólidos sedimentables de 8.8 ml/lit. Los parámetros de DQO, pH y conductividad prácticamente no se ven afectados y mantienen los mismos valores; sin embargo los sólidos sedimentables disminuyen hasta 1.5 ml/lit presentándose una eficiencia de remoción del 83%, y una disminución en la temperatura de 1°C.

El bajo flujo del sedimentador se envía a un filtro rotatorio en donde son separados los sólidos y los filtrados son recirculados al tanque de premezcla.

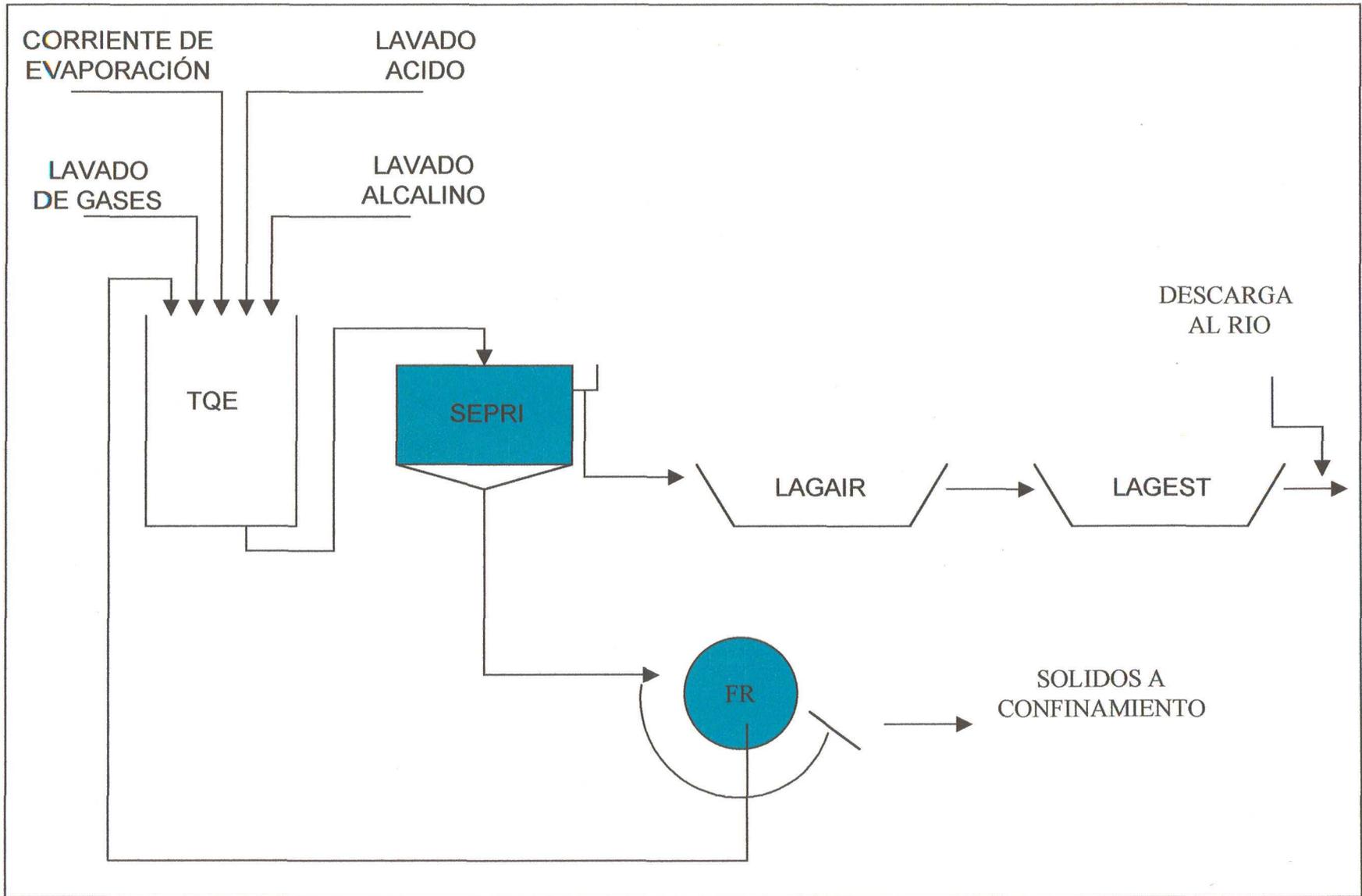


Fig. 3.1 Diagrama de Flujo de la Planta de Tratamiento

El sobreflujo del sedimentador primario es enviado a la laguna de aireación (**LAGAIR**) en donde se lleva a cabo una biodegradación aeróbica. Esta etapa cuenta con un tiempo de residencia promedio de 7 días. La eficiencia de degradación de la laguna es del orden del 41%, teniendo una DQO de descarga de 662 ppm y una disminución en la temperatura de 11.5°C. Los demás parámetros se mantienen sin variaciones apreciables.

De la laguna de aireación la corriente pasa a una laguna de estabilización (**LAGEST**) en donde se continúa la degradación de una manera facultativa. En la superficie y hasta una profundidad pequeña se realiza una degradación aeróbica y en la parte profunda se realiza una degradación anaerobia. El tiempo de residencia que presenta ésta laguna es del orden de los 7 días. Esta etapa muestra una eficiencia de remoción en la DQO del 22%, descargando con un valor de 516 ppm, la disminución en temperatura es de 7.5°C teniendo una salida al cuerpo receptor final de 30°C.

El resumen del grado de contaminación se encuentra representado en los parámetros globales; sin embargo con el fin de establecer las interrelaciones que presentan cada una de las sustancias químicas que se mezclan a la entrada de la planta de tratamiento, se realizó un inventario de contaminantes, su interacción electrostática y su influencia sobre los parámetros de análisis.

3.2 Inventario de Contaminantes y su influencia sobre los parámetros globales.

En el proceso de extracción de la celulosa se utilizan reactivos de sulfato de sodio e hidróxido de sodio para romper la estructura de la lignina y liberar la celulosa. La corriente resultante de éste proceso se manda como ya se mencionó anteriormente a un tren de evaporación en donde se concentra para después calcinarse, pero debido a limitaciones en la capacidad del equipo de calcinación, se tiene que purgar permanentemente una parte de la corriente de extracción. Debido a las reacciones que se llevan a cabo, la corriente contribuye con un pH alcalino, una alta conductividad producto de la disociación de reactivos, un aporte de partículas coloidales (Fig. 3.2) y un alto contenido de color.

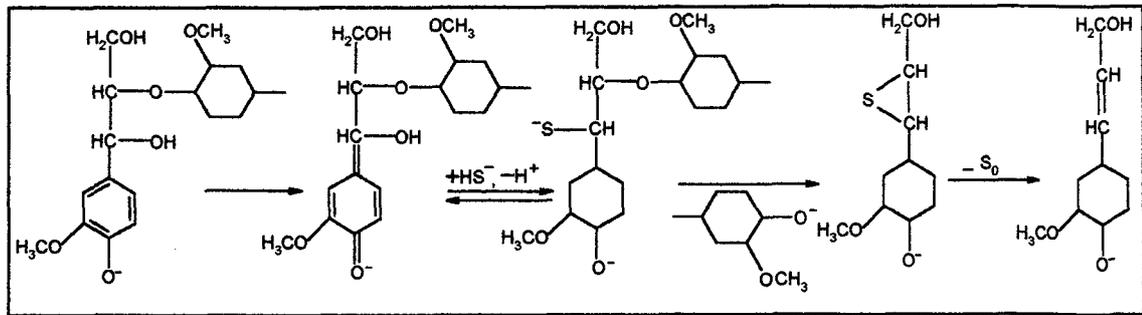


Fig. 3.2 Reacción de pulpeo en medio alcalino

Durante el proceso de blanqueo de la celulosa se realiza un lavado en medio básico con agua oxigenada (H_2O_2) e hidróxido de sodio ($NaOH$) en solución. Estos reactantes remueven el color de la celulosa pero a su vez producen una corriente con un pH alcalino, una alta conductividad por la disociación iónica y un alto contenido de partículas con carga eléctrica (fig. 3.3) que producen el color de la solución resultante.

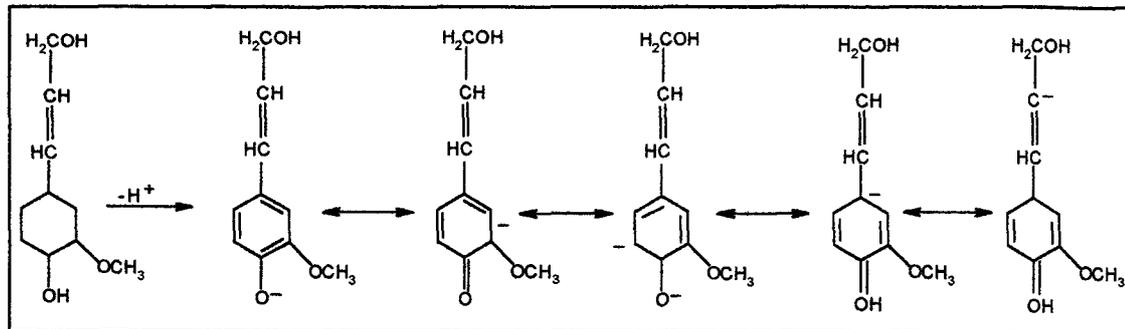


Fig. 3.3 Partículas coloidales del lavado alcalino.

Después del proceso de lavado básico se continúa con una etapa de lavado ácido en donde se agrega dióxido de cloro (ClO_2) en solución. La corriente residual se caracteriza por tener un pH muy ácido producto de la disociación del ClO_2 en ácido clorhídrico (HCl) y H_2O . Los productos de ésta disociación no presentan componentes con carga (fig. 3.4) y por lo tanto no contribuye con partículas coloidales, además de no contribuir con color al sistema.

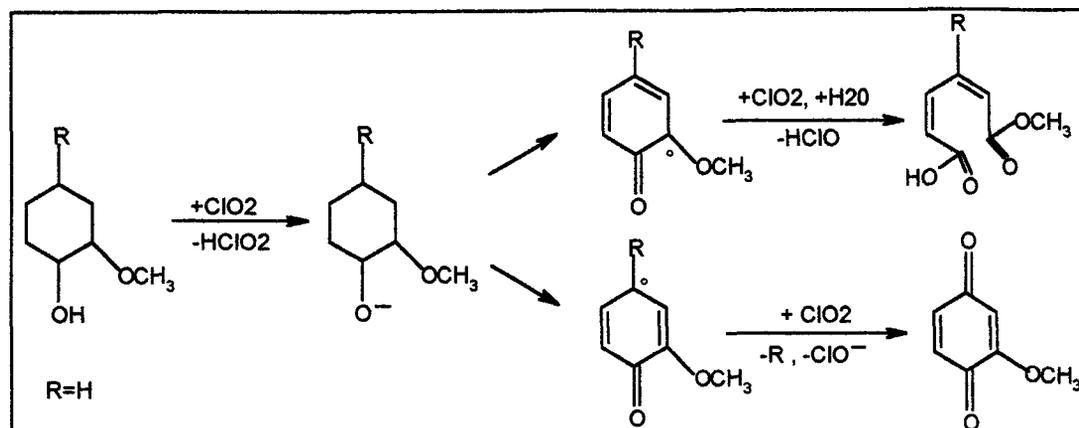


Fig. 3.4 Productos de reacción en medio ácido

3.3 Caracterización del componente arcilloso utilizado para la desestabilización.

3.3.1 Características del material arcilloso.

Las características que muestra ésta arcilla corresponden a un caolín (Apéndice C) con un arreglo 1:1 la cual tiene un crecimiento hacia los ejes a y b. El crecimiento en el eje c es muy limitado debido a que éste se realiza a través de enlaces por puentes de hidrógeno que son débiles (Ryan). Estas características hacen que las estructuras sean aplanadas con una separación basal de 7 amstrongs. (7A). Sin embargo los enlaces de hidrógeno son lo bastante fuertes para impedir que el agua y otros iones penetren entre las estructuras (Cepeda, 1991), lo que hace que las arcillas caoliníticas presenten una limitada sustitución isomórfica y cationes no intercambiables (tabla 3.1).

Tabla 3.1 Comparación de parámetros característicos de diferentes arcillas (Cepeda, 1991)

| Propiedad | Caolinita 1:1 | Illita 2:1 | Montmorilonita 2:1 |
|--|---------------|---|--|
| Sustitución | Ninguna | Sustitución en la capa de Si ⁺⁴ por Al ⁺³ | Sustitución en la hoja de Al ⁺³ por Mg ⁺² o Fe ⁺² |
| Cationes no Intercambiables | Ninguno | K | Mg |
| Capacidad de cambio de bases meq/100 g | 3 - 15 | 15 - 40 | 80 - 100 |
| Capacidad de intercambio de aniones | Elevada | Media | Baja |

Aun y cuando las hojas de los caolines son eléctricamente neutras, existen zonas donde por ruptura de los enlaces se generan cargas parcialmente positivas y negativas (Fig. 3.5) que permiten la quimisorción de iones con carga eléctricamente contraria. La ruptura de los enlaces y el establecimiento de cargas depende del pH al que se encuentre la arcilla, el pH ácido favorece la presencia de cargas positivas, donde la caolinita es capaz de adsorber iones negativos, un ejemplo son las pruebas corridas para adsorción del ion cloro (Fig. 3.6) en donde a pH menor de 6.5 se presentan adsorciones positivas. El punto en donde se presenta el balance de cargas positivas y negativas se encuentra a un pH de 6.6 y a valores mayores la molécula presenta una adsorción negativa (repulsión) de iones cloro.

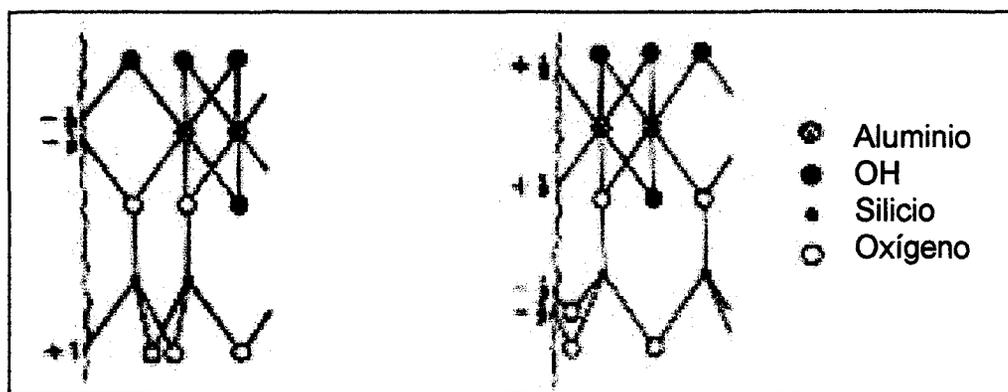


Fig. 3.5 Cargas parciales en las arcillas Caoliníficas

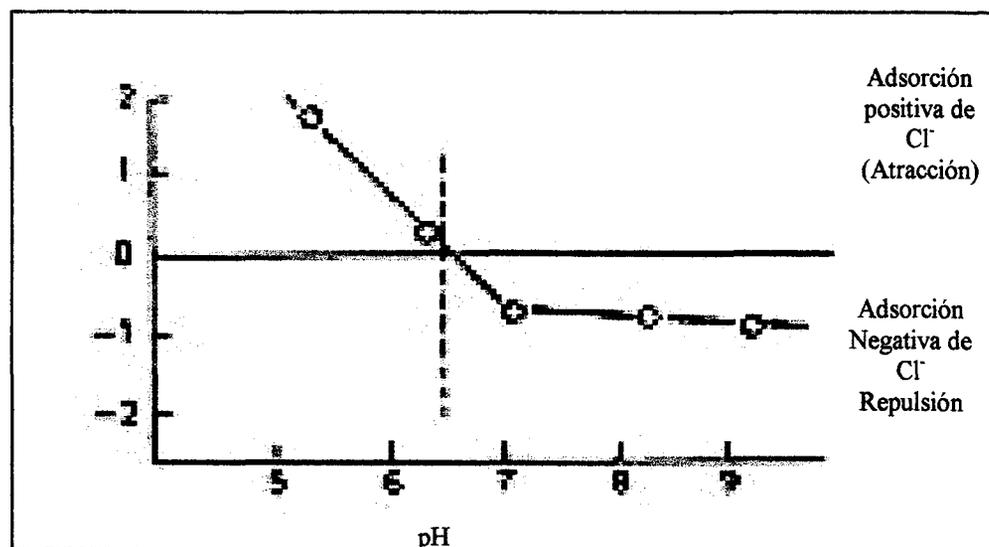


Fig. 3.6 Dependencia de la carga de la arcilla con respecto al pH

3.3.2 Disponibilidad del material arcilloso.

De éste material se tiene una alta disponibilidad debido a que se encuentra en una presa de captación y almacenamiento de agua. La arcilla es arrastrada a la presa por el escurrimiento de las aguas cuando llueve y se encuentra presente junto con el agua almacenada sin que exista una separación natural. Para protección de la presa, constantemente se está purgando y así evitar que se azolve. Esta corriente de purga es la que se puede utilizar como fuente de arcilla.

Capítulo 4

Modelo Particular e Hipótesis, Metodología y Pruebas Realizadas

4.1 Modelo Particular e Hipótesis

De acuerdo con la problemática planteada, en donde se generan aguas residuales con un alto contenido de color y contaminación (evaluada en los parámetros de DBO/DQO), los cuales son coloides que se producen por las reacciones de la lignina en las diferentes etapas de proceso, y aunado con las variaciones en la conductividad y concentraciones del ion Na⁺, que afecta de manera negativa el desarrollo bacteriano, se plantea la siguiente propuesta:

LA ADICION DE MATERIAL ARCILLOSO EN SOLUCION DEL TIPO HALLOYSITA 7a (CON CARGA PARCIALMENTE POSITIVA) A LA CORRIENTE DE AGUA RESIDUAL, PERMITIRA UNA ADSORCION DE LA LIGNINA Y DE LOS COLOIDES SOBRE LA ARCILLA, Y MODIFICARA LAS CONDICIONES ELECTROSTATICAS EXISTENTES EN LA SOLUCION, NEUTRALIZANDO LAS CARGAS DE AMBOS COLOIDES, LO QUE PROVOCARA UN CAMBIO EN EL BALANCE DE LAS FUERZAS DE ATRACCION Y REPULSION.

Provocar la unión de los dos sistemas coloidales, se presupone que se formarán flóculos que pueden ser removidos por sedimentación (Fig. 4.1). En caso de que no haya remoción de los flóculo, debido a que estos no presentan una buena consistencia, será necesaria la adición de un coagulante (alumbre) que barra con los flóculos de arcilla-lignina y arcilla-coloide (Fig. 4.2).

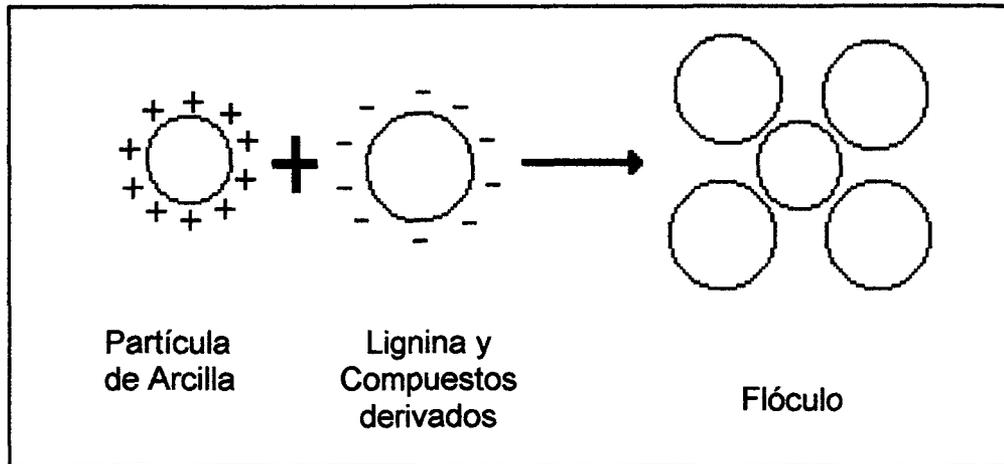


Fig. 4.1 Representación de desestabilización de la partícula con arcilla

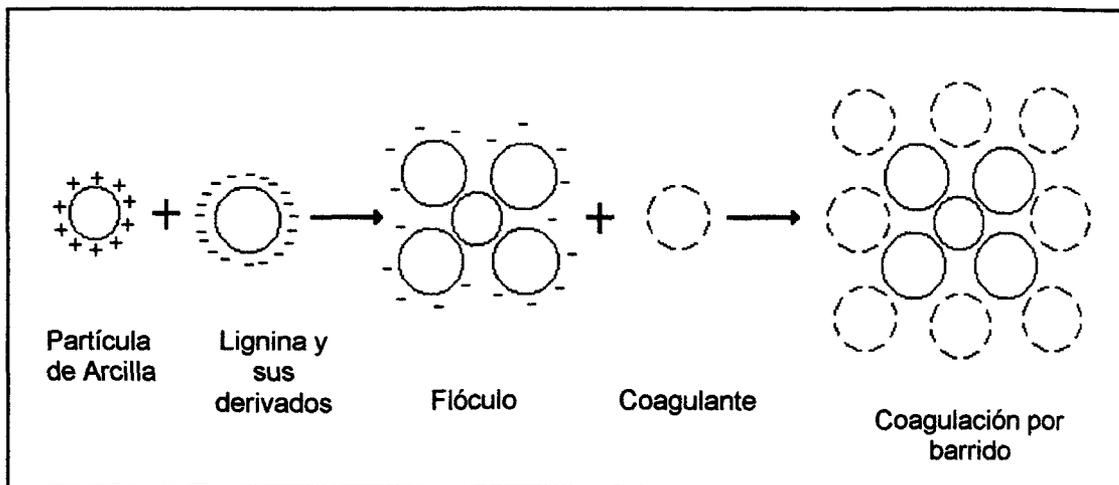


Fig. 4.2 Desestabilización de la partícula con la arcilla y el coagulante

El lograr retirar el color y precipitar la lignina y los coloides tendrá un efecto muy benéfico desde el punto de vista del tratamiento porque eliminará una gran cantidad de DBO/DQO.

La adición del sistema arcilloso es fácil de conseguir y dosificar en cantidades industriales, debido a que existe en ciudades o lugares donde se cuenta con una presa para captación y almacenamiento de agua.

4.2 Metodología y Pruebas realizadas

4.2.1 Caracterización de las corrientes

Las pruebas experimentales se iniciaron con el muestreo y aforo de las corrientes de agua residual industrial (corriente pigmentada) y la purga de la presa (corriente con arcillas). Debido a la variabilidad en las condiciones de operación de la planta y en las concentraciones de arcilla, éste proceso de muestreo se repitió en tres diferentes ocasiones. La muestra del agua residual industrial (ARI) se tomó a la descarga del tanque de premezcla (TQE), mientras que la muestra del agua arcillosa se tomó de la purga de la presa (AP). Los parámetros que se midieron para el ARI y el AP fueron: Color, Turbidez, Temperatura, pH, Conductividad, Sólidos Totales, y en especial para el ARI se midió la DQO. Los resultados de éstos caracterizaciones se reportan en la sección de resultados.

Para determinar el tipo de arcilla que se encuentra en solución en el AP, se tomo una muestra de 20 ml, se llevó a sequedad en un crisol de porcelana y se recolectó el residuo sólido remanente. El residuo se llevó a analizar a un difractómetro de rayos X de barrido completo, marca Siemens, modelo D5000 con tubo de cobre y níquel. El difractograma resultante y la caracterización de la arcilla se reportan en el Apéndice C.

4.2.2. Pruebas Exploratorias

4.2.2.1 Mezcla arcilla - agua residual

Se mezclaron las corrientes de ARI y AP en diferentes concentraciones en volumen, se agitaron durante 3 minutos a 125 r.p.m. en el equipo de prueba de jarras, y se le dejó reposar durante dos horas. El parámetro que se evaluó después de realizar el mezclado fue el color, en la tabla 4.1 se indican las proporciones de las mezclas evaluadas.

Tabla 4.1 Cuadro sinóptico de pruebas exploratorias

| Efluentes | Proporciones a Mezclar |
|--------------------------------|------------------------|
| AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL (ARI) | 90% ARI – 10% AP |
| PURGA DE LA PRESA (AP) | 80% ARI – 20% AP |
| | 70% ARI – 30% AP |
| | 60% ARI – 40% AP |
| | 50% ARI – 50% AP |

4.2.2.2. Dosificación de Polímero catiónico y aniónico.

Ante la posibilidad de que la nueva partícula formada por la unión de la arcilla y los contaminantes lignínicos, ya estuviera desestabilizada por neutralización de la carga y el crecimiento de la partícula, pero que además el floculo encontrado en la prueba de adsorción arcilla-contaminantes no presenta buenas características de sedimentación, se corrieron pruebas por separado de adición de polímero catiónico y aniónico. Cada una de las pruebas se realizaron con una mezcla de 70% ARI y 30% AP, los polímeros utilizados fueron el AR15 que es un polímero catiónico y el AN25 que es un polímero aniónico. Los rangos de dosificación utilizados fueron entre 0.5 y 2 ppm, y el intervalo fue de 0.5 ppm.

4.2.2.3 Dosificación de sulfato de aluminio.

Debido a los resultados negativos obtenidos en las pruebas exploratorias preliminares, se realizó una nueva corrida dosificando sulfato de aluminio. Esta prueba se realizó con una relación en volumen de ARI – AP de 70% y 30% respectivamente y las cantidades que se dosificaron del coagulante fueron para llevar a las soluciones a concentraciones de 60, 80, 100 y 120 ppm. La decisión de utilizar la mezcla de 70%ARI -30% AP se tomó como el punto medio representativo de la gama de muestras, en donde se consideró que existía suficiente cantidad de arcilla para adsorber los iones de lignina.

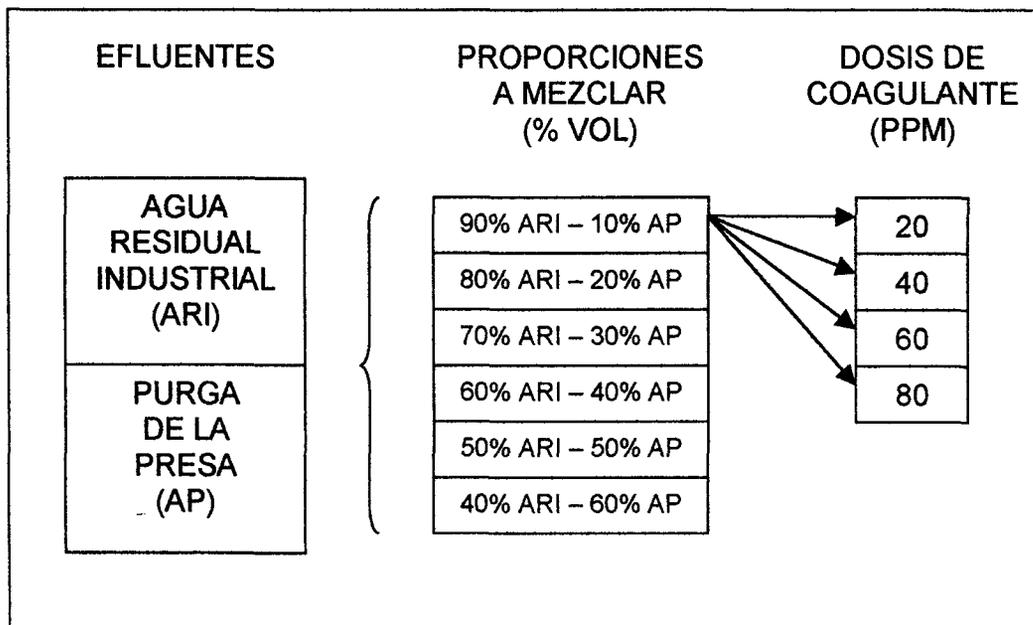
4.2.3 Pruebas preliminares.

Estas pruebas se realizaron con base en la información levantada en las pruebas exploratorias, de donde se obtuvo que es necesaria la dosificación de alumbre para retirar los flocúlos formados. Durante la prueba exploratoria de dosificación de sulfato de aluminio se observó una buena remoción de color; sin embargo el pH final de la solución cayó a valores muy bajos de pH (~ 3.5). Esta situación que se presentó, de disminución en el pH originó la búsqueda de alternativas para lograr la desestabilización de la partícula sin que se presente una disminución en el pH tan drástica. Las premisas que se consideraron para tomar esta decisión fueron tres:

- a) A un pH ácido la arcilla presenta una parcial carga positiva. El pH al cual la arcilla presenta adsorción de iones negativos de cloruros es de 6.4, por lo que escogerá un pH en la solución cercano a este valor (6.1 - 6.3 unidades).
- b) Al bajar el pH de una solución su solubilidad disminuye.
- c) Se puede bajar el pH de la descarga del tanque TQE con realizar modificaciones al proceso, debido a que en las corrientes que confluyen a la planta de tratamiento se tienen diferentes parámetros de pH.

Las pruebas que se corrieron previa acidificación del ARI a un pH de 6.22, se presentan en la tabla 4.2. La adición del coagulante se realizó bajo agitación controlada, teniendo primero un mezclado rápido a 125 r.p.m. durante 3 minutos, después de transcurrido este tiempo se pasó a un mezclado lento a 35 r.p.m. durante 15 minutos, para finalmente dejar la muestra en reposo durante 2 horas. El proceso de agitación controlada se conoce como prueba de jarras.

Tabla 4.2 Cuadro sinóptico para la realización de pruebas preliminares



Después de haberse llevado a cabo la sedimentación de los sólidos, se tomó una muestra del clarificado al que se le realizaron los análisis que se muestran en la tabla 4.3.

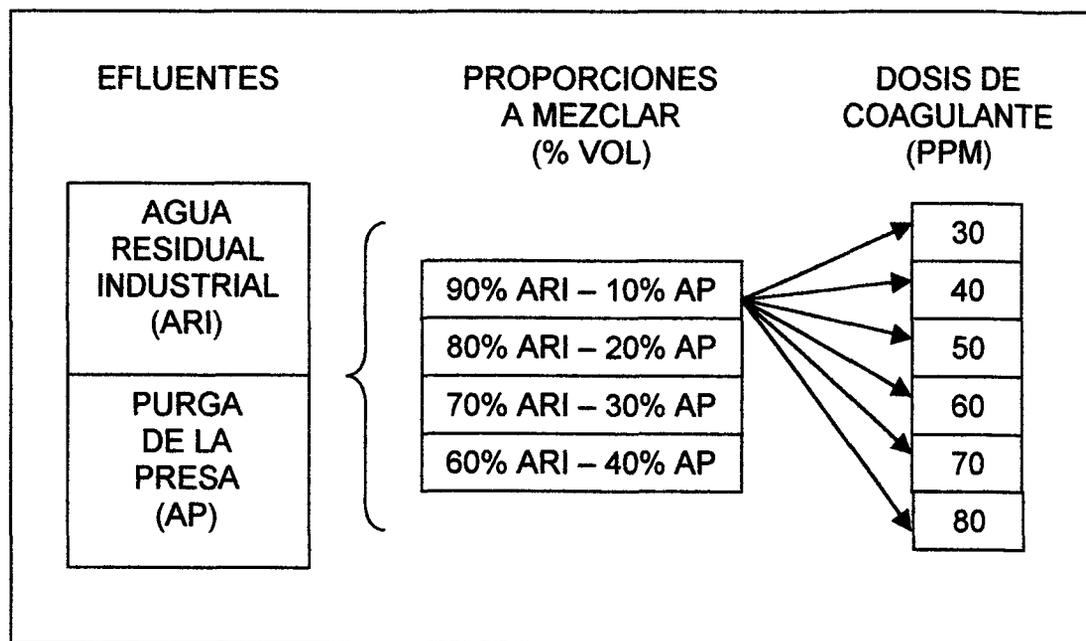
Tabla 4.3. Caracterización del clarificado de las pruebas preliminares

| Parámetro | Norma |
|-----------------|-----------------|
| Color | NMX-AA-045-1981 |
| pH | NMX-AA-008-1980 |
| Conductividad | NMX-AA-093-1984 |
| Sólidos Totales | NMX-AA-034-1981 |

4.2.4 Pruebas Finales

Se realizaron dos corridas finales en diferentes condiciones de operación de la planta, para corroborar la repetibilidad de los resultados. Para la planeación de las pruebas se hicieron varias modificaciones en los rangos de las mezclas a formar y en las concentraciones a dosificar de coagulante (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Cuadro sinóptico de las pruebas finales



Las modificaciones en los rangos de las mezclas obedecen básicamente a las siguientes dos premisas; La primera condición es que al manejar relaciones mayores de 60% ARI y 40% AP los volúmenes de agua residual a manejar dentro de la planta serán muy altos (flujos > a 40000 m³/día) y como consecuencia el costo por los equipos será muy alto. La segunda condición se presenta por el consumo de energía asociado a la operación de la planta, donde al incrementarse el tamaño de los equipos se incrementa el consumo de sistemas de transmisión y bombeo.

En ambos casos de las pruebas se modificó el pH del ARI para mantener condiciones de similitud con las pruebas preliminares, los valores de pH ajustado para la primera y segunda corrida fueron 6.1 y 6.23 respectivamente. La dosificación de coagulante se manejo a partir de 30 hasta 80 ppm con intervalos de dosificación de 10 ppm (tabla 4.4).

Después de haber realizado la dosificación del sulfato de aluminio, corrido la prueba de jarras y esperado a que se sedimentaran los flóculos formados, se tomaron muestras del clarificado y se le realizaron los siguientes análisis (tabla 4.5).

Tabla 4.5 Caracterización del clarificado de las pruebas finales

| Parámetro | Norma |
|-----------------|-----------------|
| Color | NMX-AA-045-1981 |
| DQO | NMX-AA-030-1976 |
| pH | NMX-AA-008-1984 |
| Conductividad | NMX-AA-093-1984 |
| Turbidez | NMX-AA-038-1981 |
| Sólidos Totales | NMX-AA-034-1981 |

Capítulo 5

Resultados

5.1 Resultados de la caracterización de las aguas residuales a mezclar

En la tabla 5.1 se muestran la caracterización de tres diferentes muestreos que se llevaron a efecto en diferentes tiempos, bajo diferentes condiciones de operación de la planta y diferentes concentraciones de arcilla en la purga de la presa. La primera caracterización corresponde a las condiciones iniciales de las pruebas exploratorias, y la segunda y tercera caracterización corresponden respectivamente a la primera y segunda pruebas finales.

5.2 Resultados de las pruebas exploratorias.

5.2.1 Mezclas de Arcilla- Agua Residual Industrial

Después de haberse mezclado las corrientes en las diferentes proporciones en volumen, agitado y dejado en reposo, los sólidos en las mezclas permanecen suspendidos **sin remoción de color.**

Tabla 5.1 Caracterización de las aguas residuales

| | Primera Caracterización | | Segunda Caracterización | | Tercera Caracterización | |
|----------------|----------------------------|------|----------------------------|------|----------------------------|------|
| | ARI | AP | ARI | AP | ARI | AP |
| Color | 2450 | 3050 | 2530 | 3150 | 2230 | 3150 |
| Turbidez | 130 | 450 | 520 | 465 | 380 | 465 |
| Temperatura | 52 | 25 | 43 | 18 | 43 | 18 |
| pH | 7.2 | 6.7 | 8.4 | 7.7 | 8.4 | 7.7 |
| Conductividad | 1960 | 193 | 2190 | 155 | 1760 | 140 |
| Solid. Totales | 1968 | 242 | 2752 | 342 | 1750 | 280 |
| DQO | | | 1121 | | 1013 | |

5.2.2 Dosificación de polímero catiónico y aniónico.

Cuando se agregaron los polímeros catiónicos y aniónicos para observar si la partícula que se formaba por la unión de la lignina, los derivados de la lignina y por la arcilla Halloysita 7a sedimentaba, la mezcla se mantuvo con la misma apariencia y **no se notaron cambios apreciables**, manteniéndose la muestra aún después de la adición de los polímeros con un alto grado de pigmentación.

5.2.3 Dosificación de sulfato de aluminio.

La mezcla que se utilizó para esta corrida fue de 70% ARI y 30% AP, las dosis de coagulante que se le adicionaron fueron de 60, 80, 100 y 120 ppm. Los resultados obtenidos nos indican que es necesario el uso del **coagulante** para que se puedan **barrer y ser removidas** las partículas parcialmente desestabilizadas. De las pruebas que se corrieron, las que mejores resultado dieron fueron aquellas en la que la concentración de coagulante fue igual o mayor a 100 ppm. Aun y cuando se presentó buena remoción de color se observó que el pH final del agua clarificada cayó hasta valores cercanos a 3.5. Condiciones demasiado ácidas para ser descargadas a un cuerpo receptor, o que consumirían una gran cantidad de algún reactivo de carácter básico para neutralizar el efluente.

5.3 Resultados de las pruebas preliminares

Para la realización de la prueba se partió con las siguientes características de los efluentes:

Agua residual Industrial.

| | | |
|--------------------|------------|-----------------|
| Color | 2450 | Pt-Co |
| Turbidez | 130 | NTU |
| Temperatura | 52 | °C |
| pH | 7.2 | Unidades |
| pH ajustado | 6.2 | Unidades |
| Conductividad | 1960 | Micromohs |
| Sólidos Totales | 1968 | ppm |

Agua con arcilla Halloysita 7a.

| | | |
|-----------------|------|-----------|
| Color | 3050 | Pt-Co |
| Turbidez | 450 | NTU |
| Temperatura | 25 | °C |
| pH | 6.7 | Unidades |
| Conductividad | 193 | Micromohs |
| Sólidos Totales | 424 | ppm |

Aún y cuando se tiene que ajustar el pH en el ARI con ácido clorhídrico, esta adición de ácido, no representa un consumo adicional de reactivos, debido a que como se revisó en la caracterización de corrientes que confluyen a la planta de tratamiento, se puede modificar el pH final del TQE, tratando algunas corrientes por separado.

Después de la aplicación del sistema de tratamiento encontramos las siguientes tablas de resultados.

Tabla 5.2 Resultados de la mezcla 90% ARI y 10% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1814 ppm.

| ppm | conductividad | color | Turbidez |
|-----|---------------|-------|----------|
| 0 | 3500 | 2275 | 113 |
| 20 | 3370 | 2600 | 130 |
| 40 | 3530 | 2175 | 140 |
| 60 | 3670 | 1900 | 165 |
| 80 | 3610 | 106 | 2.9 |

Tabla 5.3 Resultados de la mezcla 80% ARI y 20% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1660 ppm.

| ppm | conductividad | color | Turbidez |
|-----|---------------|-------|----------|
| 0 | 3000 | 2300 | 135 |
| 20 | 2940 | 2375 | 148 |
| 40 | 2800 | 2375 | 185 |
| 60 | 2890 | 1000 | 50 |
| 80 | 2890 | 88 | 2.7 |

Tabla 5.4 Resultados de la mezcla 70% ARI y 30% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1505 ppm.

| ppm | conductividad | color | Turbidez |
|-----|---------------|-------|----------|
| 0 | 1717 | 2500 | 163 |
| 20 | 1725 | 2700 | 190 |
| 40 | 1709 | 3100 | 245 |
| 60 | 1941 | 1075 | 85 |
| 80 | 1900 | 83 | 4 |

Tabla 5.5 Resultados de la mezcla 60% ARI y 40% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1350 ppm.

| ppm | conductividad | color | Turbidez |
|-----|---------------|-------|----------|
| 0 | 1590 | 2675 | 193 |
| 20 | 1619 | 2575 | 203 |
| 40 | 1691 | 2375 | 220 |
| 60 | 1736 | 100 | 4.5 |
| 80 | 1815 | 80 | 3.6 |

Tabla 5.6 Resultados de la mezcla 50% ARI y 50% AP, a diferentes concentraciones de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1196 ppm.

| ppm | conductividad | color | Turbidez |
|-----|---------------|-------|----------|
| 0 | 1739 | 2650 | 203 |
| 20 | 1755 | 2775 | 243 |
| 40 | 1582 | 231 | 23 |
| 60 | 1508 | 44 | 3 |
| 80 | 1590 | 68 | 3 |

Tabla 5.7 Resultados de la mezcla 40% ARI y 60% AP, a diferentes concentraciones de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1042 ppm.

| ppm | conductividad | color | Turbidez |
|-----|---------------|-------|----------|
| 0 | 1134 | 2775 | 250 |
| 20 | 1180 | 2975 | 375 |
| 40 | 1140 | 95 | 6 |
| 60 | 1310 | 62 | 5 |
| 80 | 1384 | 66 | 4 |

Se realizaron correlaciones de los parámetros medidos después de haber aplicado el tratamiento, las dosis de coagulante y la relación de porcentaje en volumen de las mezclas formadas. Estas representaciones se ilustran en las figuras 5.1 para el color, figura 5.2 para el pH, y figura 5.3 para la conductividad.

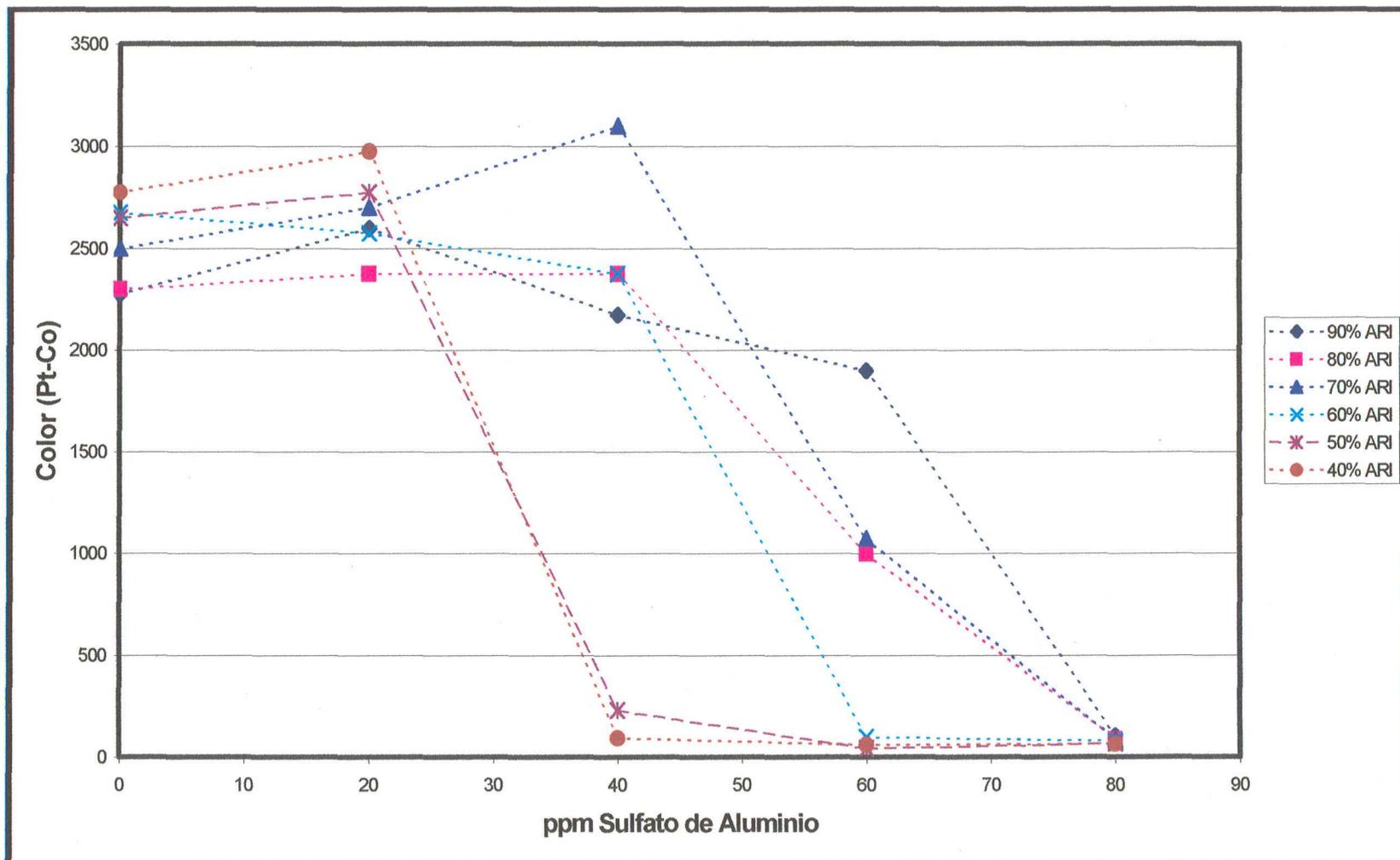


Fig. 5.1 Color vs Sulfato de Aluminio

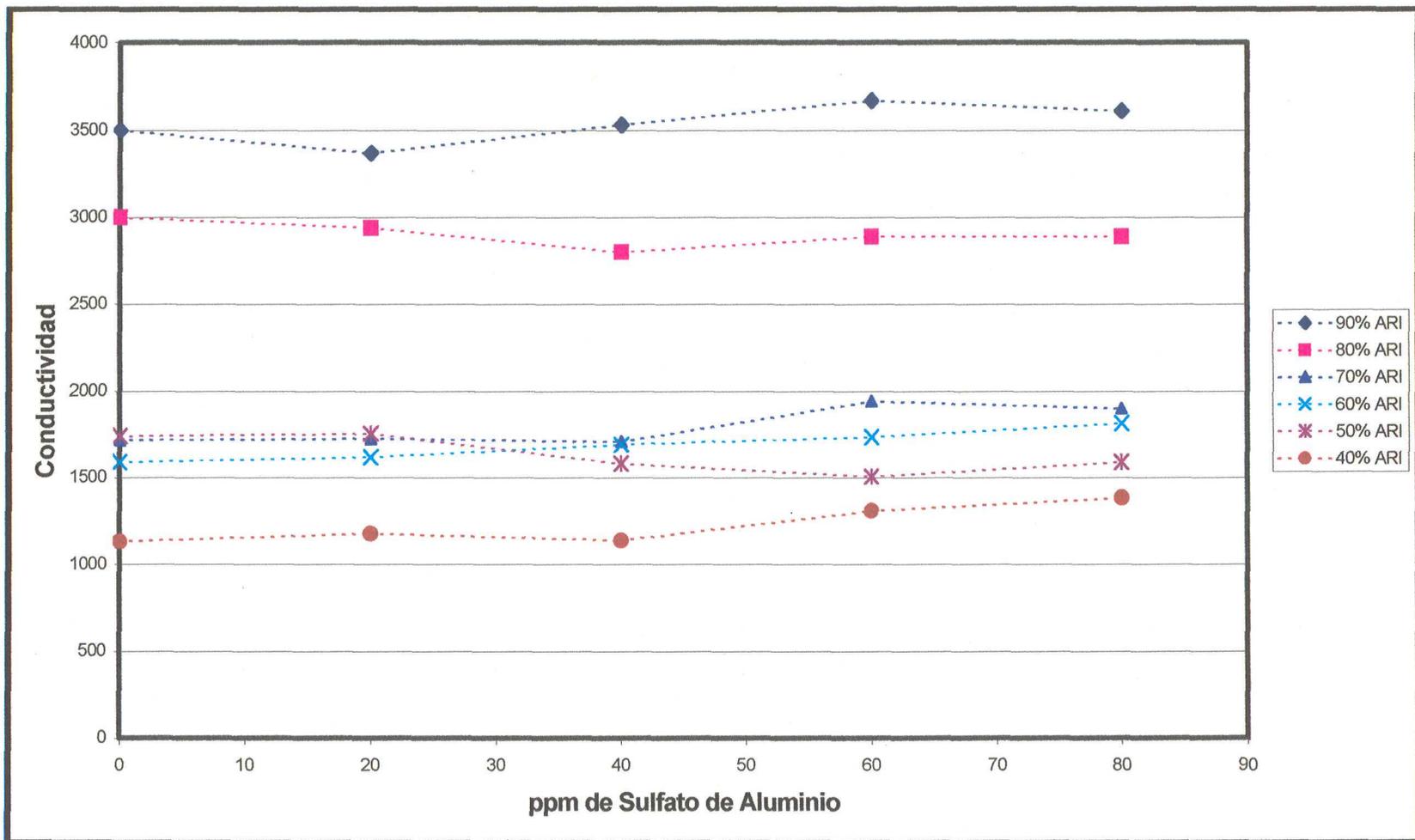


Fig. 5.2 Conductividad vs ppm Sulfato de Aluminio

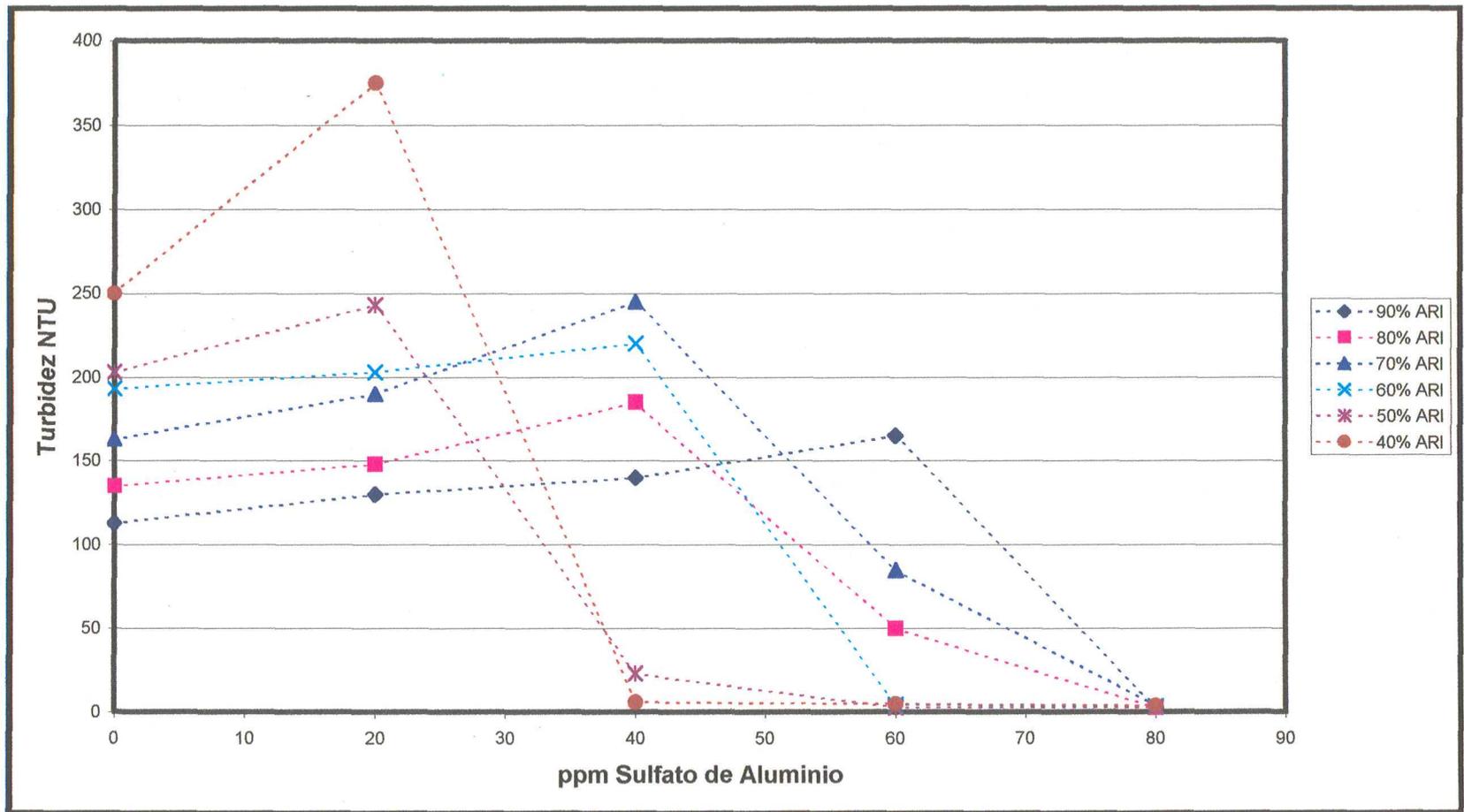


Fig. 5.3 Turbidez vs ppm de Sulfato de Aluminio

5.4 Resultados de las pruebas finales.

Las pruebas finales se realizaron dos veces, en días con condiciones diferentes de operación en la planta.

5.4.1 Resultados de la primera Corrida

Condiciones de operación: Normales.

Características de los efluentes:

Agua residual Industrial.

| | | |
|--------------------|------------|-----------|
| Color | 2530 | Pt-Co |
| Turbidez | 520 | NTU |
| Temperatura | 43 | °C |
| pH | 8.4 | |
| pH ajustado | 6.1 | |
| Conductividad | 2190 | Micromohs |
| DQO | 1121 | ppm |
| Sólidos Totales | 2752 | ppm |

Agua de la presa.

| | | |
|-----------------|------|-----------|
| Color | 3150 | Pt-Co |
| Turbidez | 465 | NTU |
| Temperatura | 18 | °C |
| pH | 7.7 | |
| Conductividad | 155 | Micromohs |
| Sólidos Totales | 342 | ppm |

Las siguientes tablas nos muestran la serie de resultados obtenidos. Asimismo se muestran las correlaciones que presentan las diferentes mezclas formadas, con las diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio y cada una de las variables medidas.

Tabla 5.8 Resultados de la mezcla 90% ARI y 10% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 2511.

| ppm | pH | Conduct. | Color | Turbidez | DQO (ppm) |
|-----|------|----------|-------|----------|-----------|
| 30 | 6.52 | 2540 | 2340 | 460 | 828 |
| 40 | 6.37 | 2550 | 2090 | 460 | 878 |
| 50 | 6.34 | 2600 | 2340 | 460 | 839 |
| 60 | 6.29 | 2660 | 2060 | 430 | 776 |
| 70 | 6.28 | 2710 | 1640 | 310 | 720 |
| 80 | 6.27 | 2730 | 1180 | 230 | 653 |

Tabla 5.9 Resultados de la mezcla 80% ARI y 20% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 2270 ppm.

| ppm | pH | Conduct. | Color | Turbidez | DQO (ppm) |
|-----|------|----------|-------|----------|-----------|
| 30 | 6.48 | 2310 | 2250 | 440 | 730 |
| 40 | 6.49 | 2350 | 2270 | 440 | 783 |
| 50 | 6.51 | 2380 | 2370 | 430 | 736 |
| 60 | 6.43 | 2460 | 1880 | 360 | 732 |
| 70 | 6.42 | 2480 | 960 | 250 | 663 |
| 80 | 6.39 | 2530 | 1040 | 210 | 598 |

Tabla 5.10 Resultados de la mezcla 70% ARI y 30% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 2029ppm.

| ppm | pH | Conduct. | Color | Turbidez | DQO (ppm) |
|-----|------|----------|-------|----------|-----------|
| 30 | 6.67 | 2050 | 2600 | 500 | 693 |
| 40 | 6.46 | 2080 | 2530 | 520 | 626 |
| 50 | 6.45 | 2120 | 2880 | 570 | 640 |
| 60 | 6.44 | 2150 | 1610 | 310 | 527 |
| 70 | 6.3 | 2180 | 910 | 180 | 449 |
| 80 | 6.1 | 2190 | 680 | 100 | 423 |

Tabla 5.11 Resultados de la mezcla 60% ARI y 40% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1788ppm.

| ppm | pH | Conductividad | Color | Turbidez | DQO (ppm) |
|-----|------|---------------|-------|----------|-----------|
| 30 | 6.51 | 1780 | 2400 | 420 | 613 |
| 40 | 6.19 | 1820 | 1900 | 310 | 509 |
| 50 | 5.95 | 1830 | 800 | 130 | 496 |
| 60 | 5.83 | 1840 | 420 | 60 | 400 |
| 70 | 5.75 | 1860 | 620 | 100 | 347 |
| 80 | 5.75 | 1920 | 470 | 90 | 331 |

Se realizaron correlaciones de los parámetros medidos después de haber aplicado el tratamiento, las dosis de coagulante y la relación de porcentaje en volumen de las mezclas formadas. Estas representaciones se ilustran en las figuras 5.4 para el color, figura 5.5 para el DQO, figura 5.6 para el pH, figura 5.7 para la conductividad y figura 5.8 para la Turbidez.

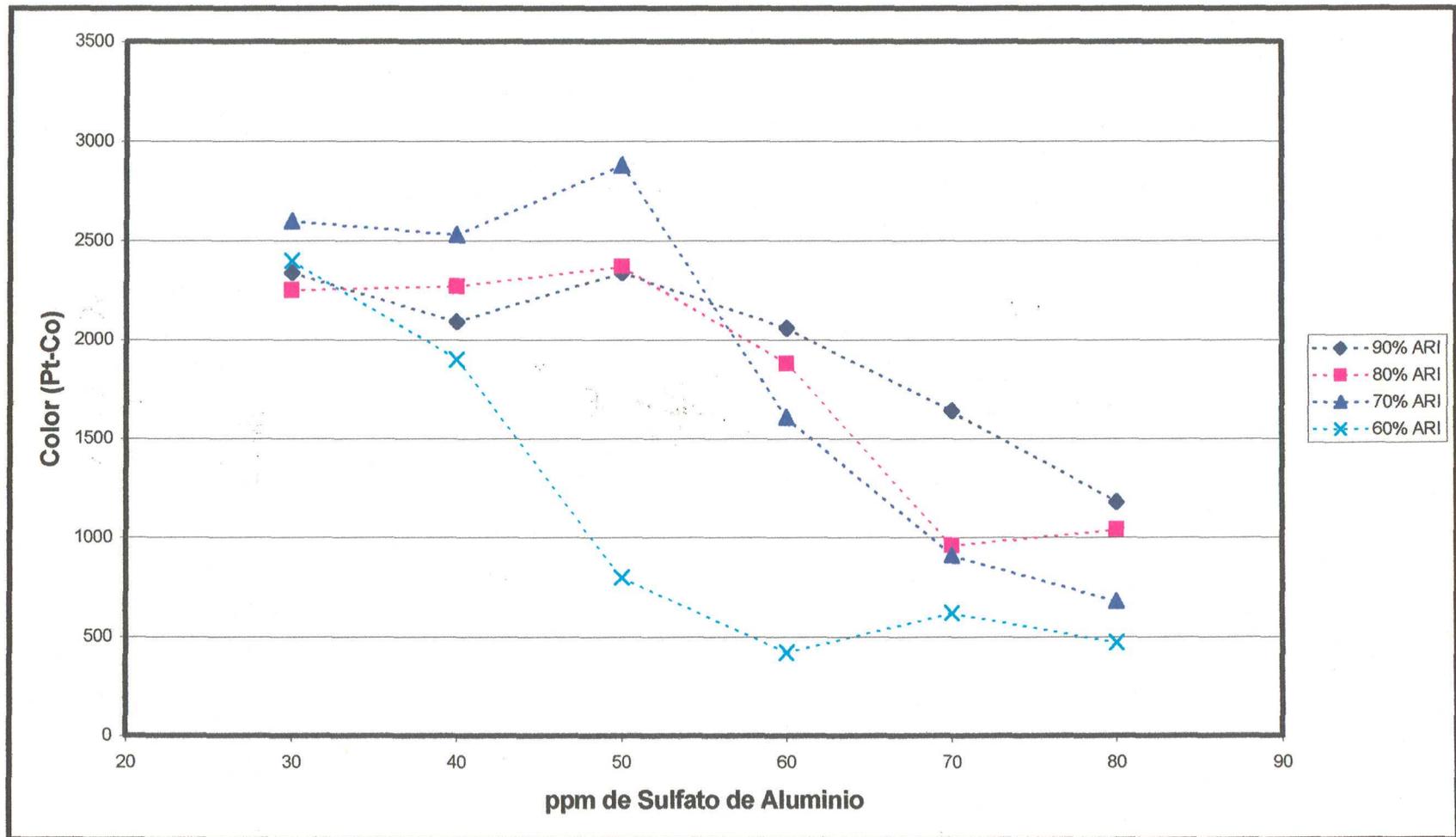


Fig. 5.4 Color vs ppm de Sulfato de aluminio

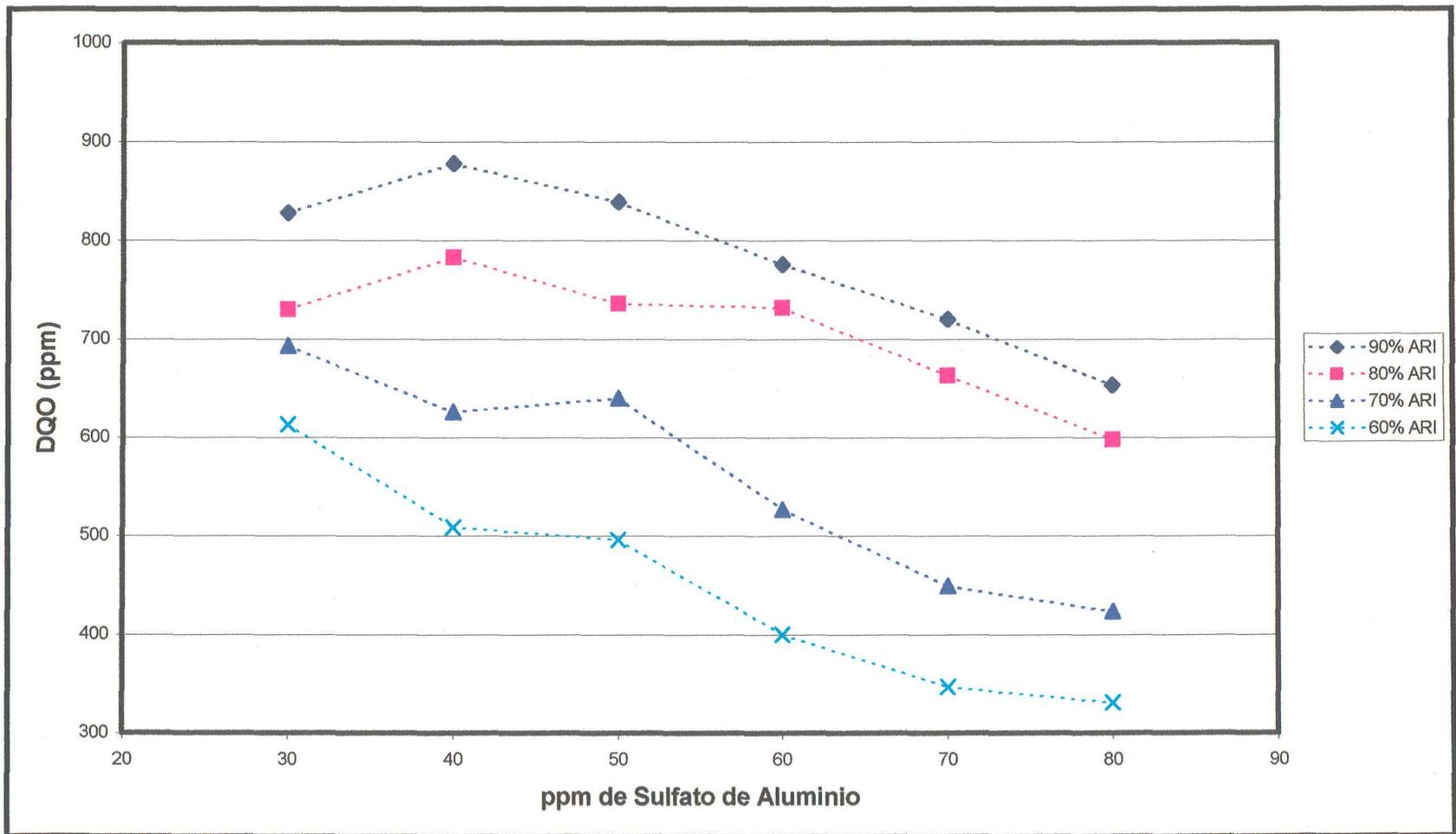


Fig. 5.5 DQO vs ppm Sulfato de Aluminio

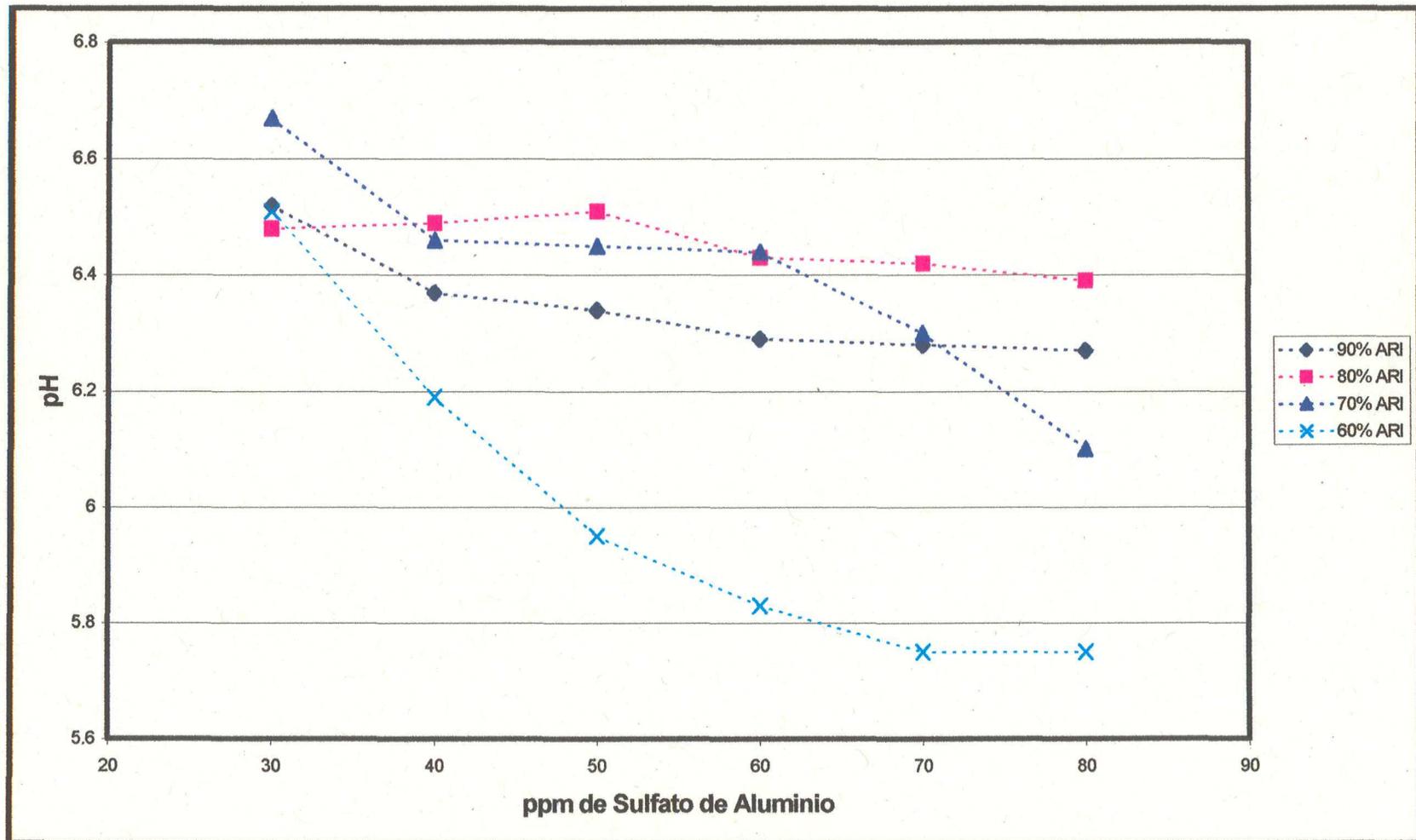


Fig. 5.6 pH vs ppm de Sulfato de Aluminio

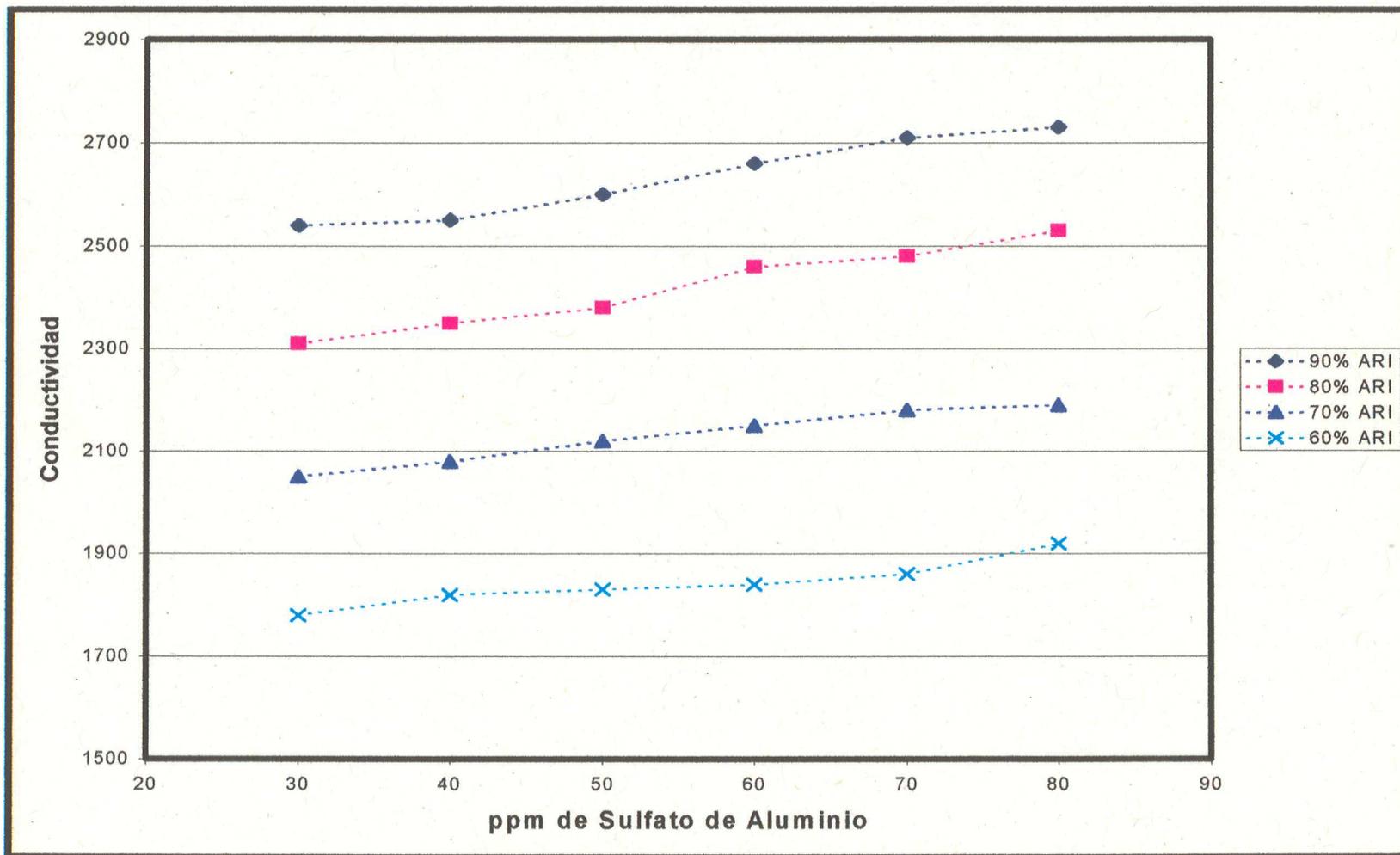


Fig. 5.7 Conductividad vs ppm de Sulfato de Aluminio

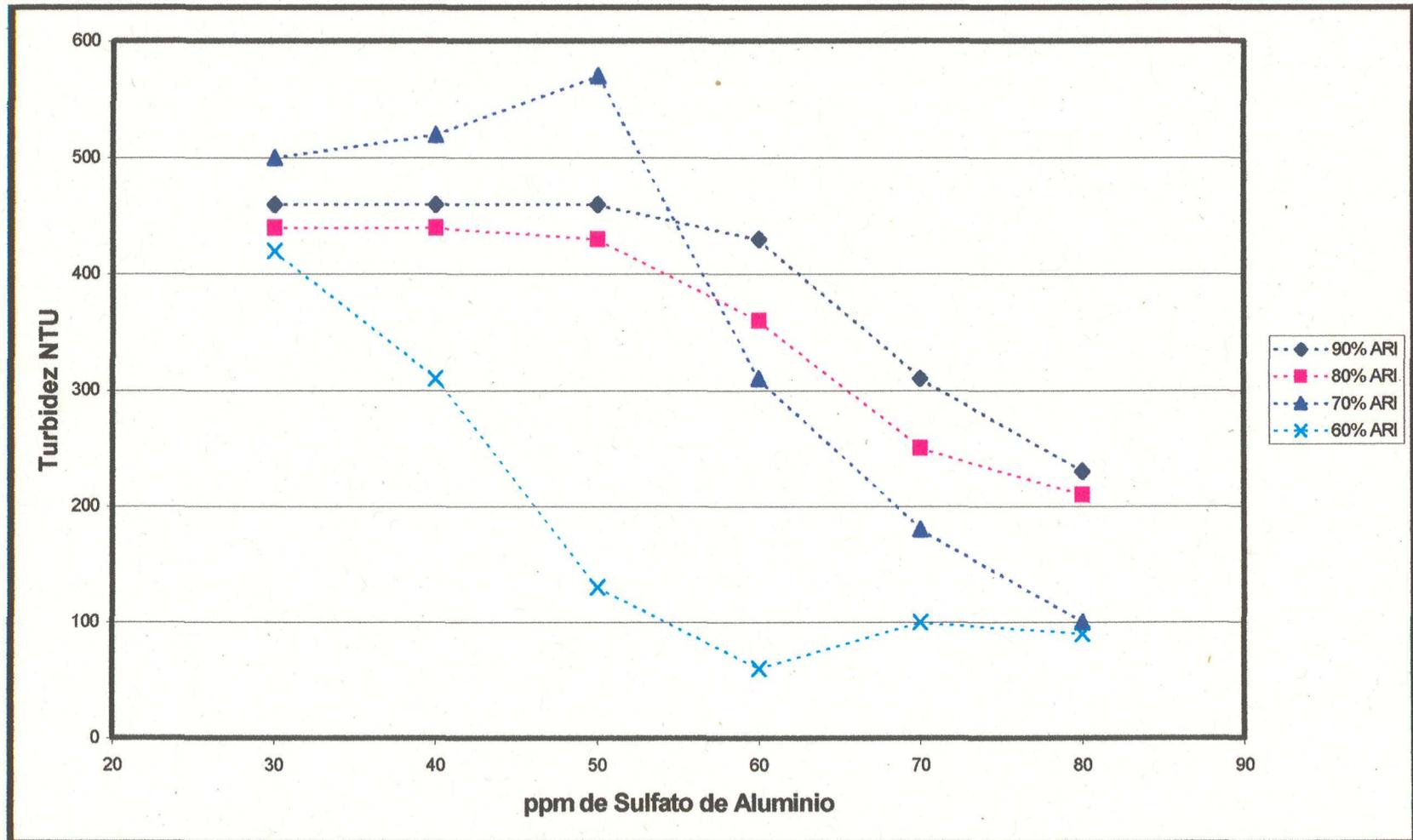


Fig. 5.8 Turbidez vs ppm de Sulfato de Aluminio

5.4.2 Resultados de la segunda corrida

Condiciones de Operación:

Normales en la planta, pero en las aguas residuales que se mandaban al sedimentador primario (SEPRI), aproximadamente el 50% del flujo (2000 m³/día) de la corriente de lavado de gases (Fig. 3.1) del horno se estaba derivando para su neutralización, sin pasar a la planta de tratamiento.

Características de los efluentes:

Agua residual Industrial.

| | | |
|-----------------------|------------|-----------|
| Color | 2230 | Pt-Co |
| Turbidez | 380 | NTU |
| Temperatura | 43 | °C |
| pH | 8.4 | |
| pH acidificado | 6.2 | |
| Conductividad | 1760 | Micromohs |
| DQO | 1013 | ppm |
| Sólidos Totales | 1750 | ppm |

Agua de la presa.

| | | |
|-----------------|------|-----------|
| Color | 3150 | Pt-Co |
| Turbidez | 465 | NTU |
| Temperatura | 18 | °C |
| pH | 7.7 | |
| Conductividad | 140 | Micromohs |
| Sólidos Totales | 280 | ppm |

Horno de cal

| | | |
|-----------------|------|-----|
| Sólidos Totales | 4320 | ppm |
|-----------------|------|-----|

Sedimentos del tratamiento

| | | |
|-----------------|------|-----|
| Sólidos Totales | 5754 | ppm |
|-----------------|------|-----|

Tabla 5.12 Resultados de la mezcla 90% ARI y 10% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1603 ppm.

| ppm | pH | Conductividad | Color | Turbidez | DQO (ppm) |
|-----|------|---------------|-------|----------|-----------|
| 30 | 6.72 | 1660 | 1580 | 300 | 620 |
| 40 | 6.55 | 1660 | 1620 | 320 | 602 |
| 50 | 6.22 | 1680 | 1970 | 360 | 590 |
| 60 | 6.16 | 1720 | 480 | 170 | 409 |
| 70 | 6.04 | 1730 | 300 | 70 | 419 |
| 80 | 5.56 | 1760 | 160 | 40 | 413 |

Tabla 5.13 Resultados de la mezcla 80% ARI y 20% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1456 ppm.

| ppm | pH | Conductividad | Color | Turbidez | DQO (ppm) |
|-----|------|---------------|-------|----------|-----------|
| 30 | 6.62 | 1590 | 1890 | 370 | 530 |
| 40 | 6.55 | 1630 | 1940 | 340 | 536 |
| 50 | 6.41 | 1630 | 1620 | 290 | 528 |
| 60 | 6.29 | 1640 | 440 | 100 | 402 |
| 70 | 6.09 | 1660 | 250 | 60 | 372 |
| 80 | 5.98 | 1670 | 150 | 50 | 351 |

Tabla 5.14 Resultados de la mezcla 70% ARI y 30% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1308 ppm.

| ppm | pH | Conductividad | Color | Turbidez | DQO (ppm) |
|-----|------|---------------|-------|----------|-----------|
| 30 | 6.53 | 1510 | 955 | 255 | 392 |
| 40 | 6.54 | 1550 | 605 | 153 | 333 |
| 50 | 6.44 | 1570 | 225 | 68 | 281 |
| 60 | 6.24 | 1600 | 185 | 60 | 279 |
| 70 | 6 | 1600 | 175 | 60 | 284 |
| 80 | 5.82 | 1600 | 215 | 50 | 276 |

Tabla 5.15 Resultados de la mezcla 60% ARI y 40% AP, a diferentes concentraciones de $Al_2(SO_4)_3$ y un contenido de sólidos totales de 1161 ppm.

| ppm | pH | Conductividad | Color | Turbidez | DQO (ppm) |
|-----|------|---------------|-------|----------|-----------|
| 30 | 6.64 | 1330 | 252 | 260 | 321 |
| 40 | 6.57 | 1380 | 325 | 62 | 267 |
| 50 | 6.41 | 1430 | 152 | 29 | 254 |
| 60 | 6.14 | 1410 | 135 | 26 | 237 |
| 70 | 5.84 | 1440 | 186 | 36 | 231 |
| 80 | 5.64 | 1460 | 252 | 49 | 239 |

Se realizaron correlaciones de los parámetros medidos después de haber aplicado el tratamiento, las dosis de coagulante y la relación de porcentaje en volumen de las mezclas formadas. Estas representaciones se ilustran en las figuras: 5.9 para el color, figura 5.10 para el DQO, figura 5.11 para el pH, 5.12 para la conductividad y figura 5.13 para la Turbidez.

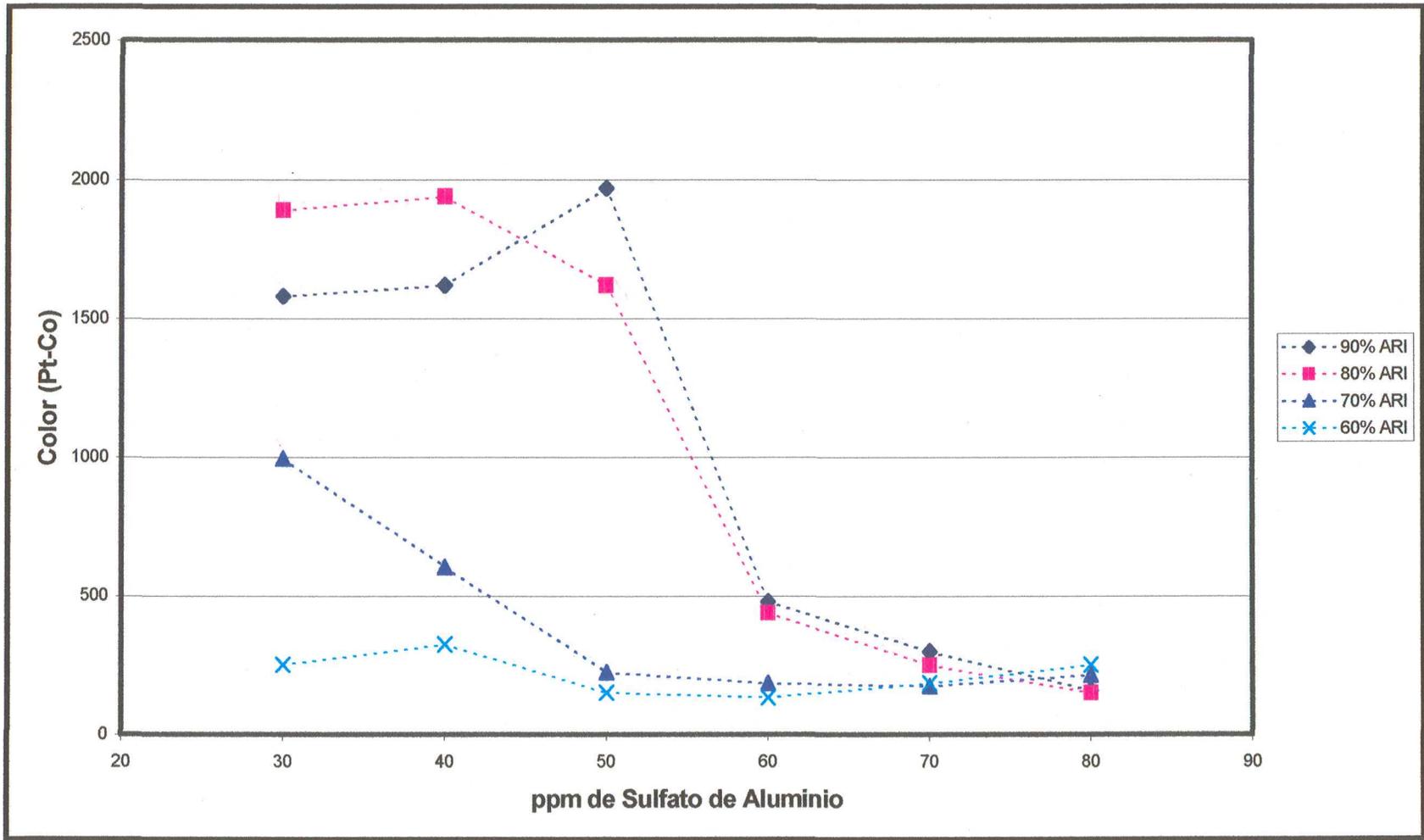


Fig. 5.9 Color vs ppm de Sulfato de Aluminio

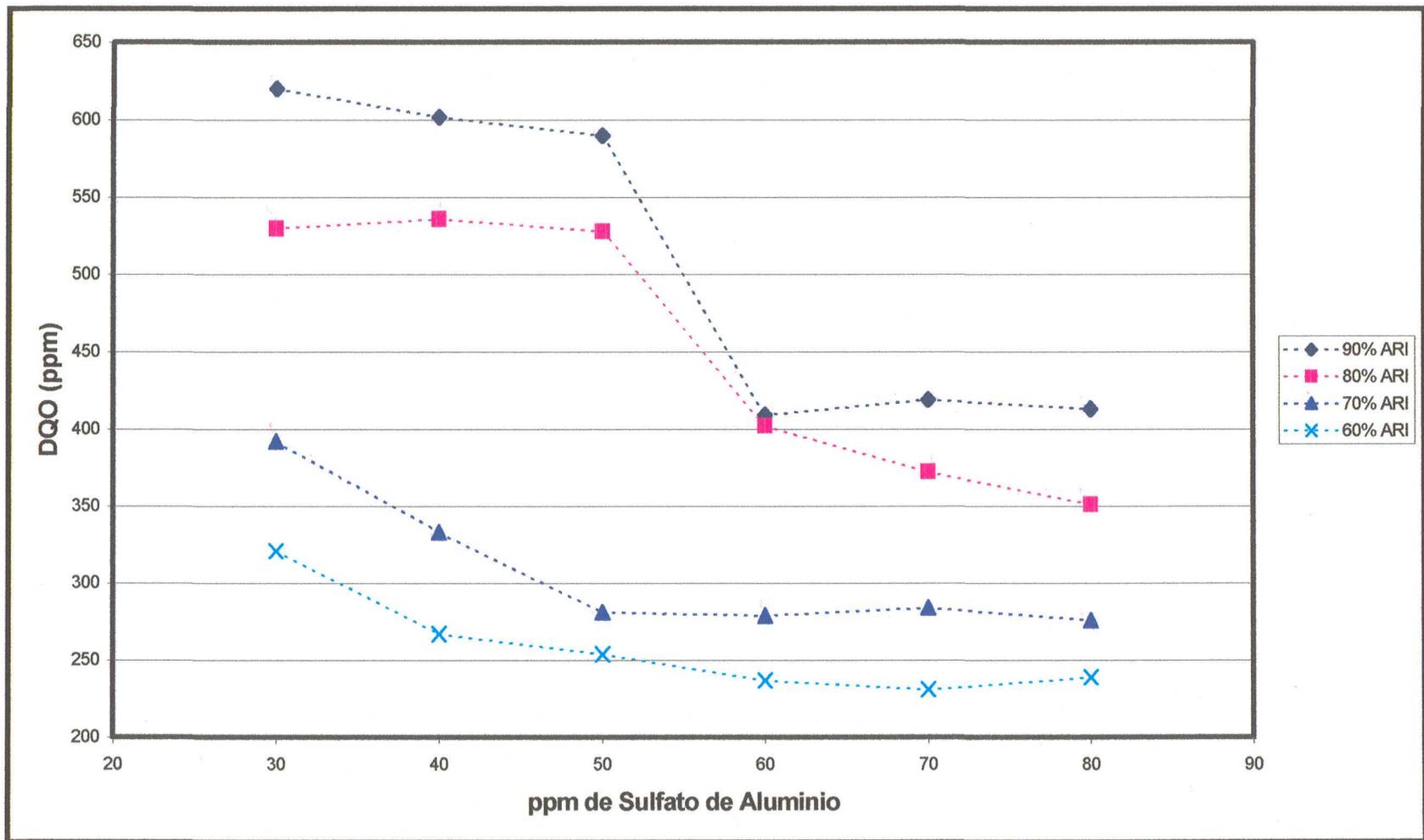


Fig. 5.10 DQO vs ppm de Sulfato de Aluminio

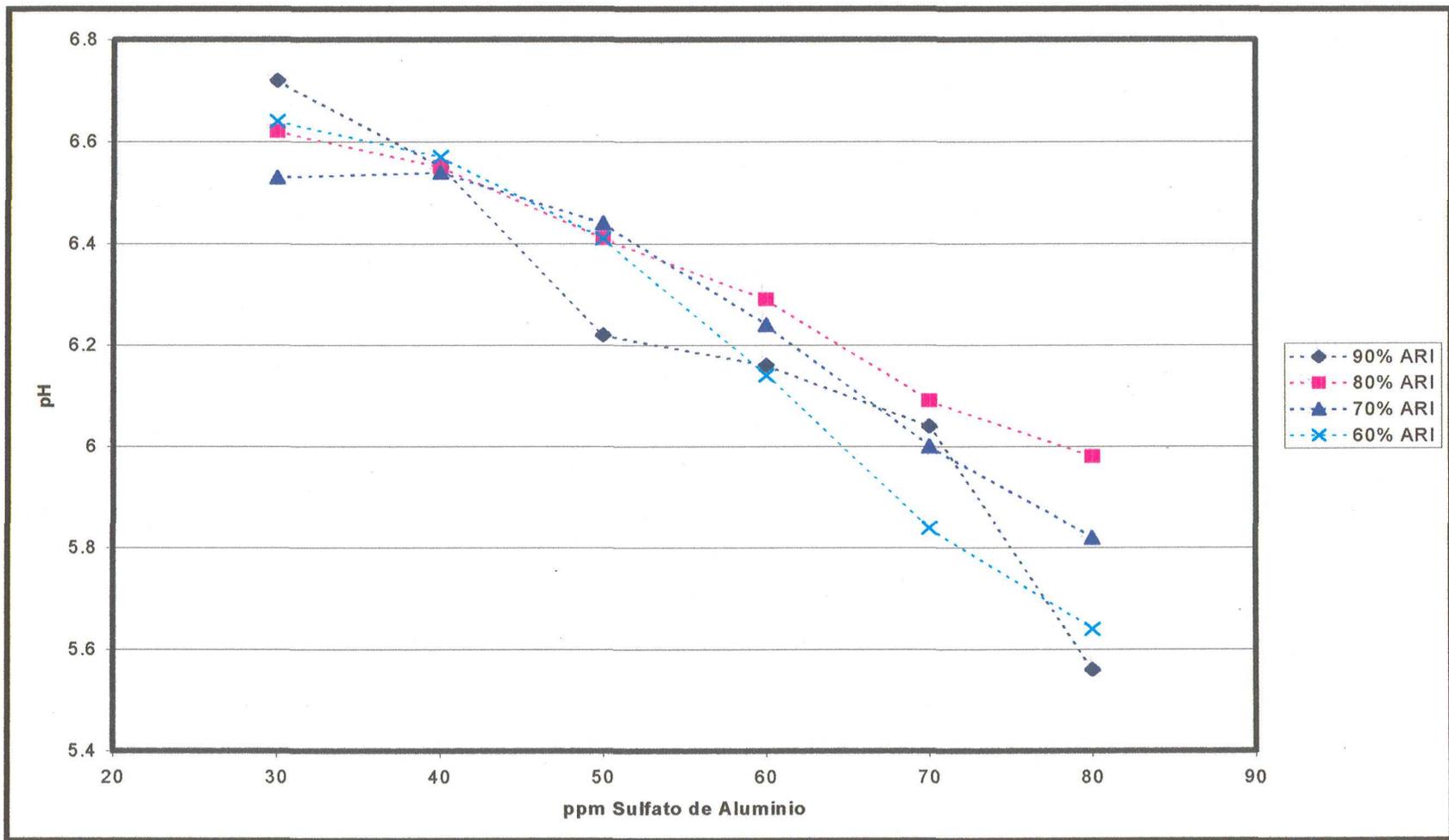


Fig. 5.11 pH vs ppm de Sulfato de Aluminio

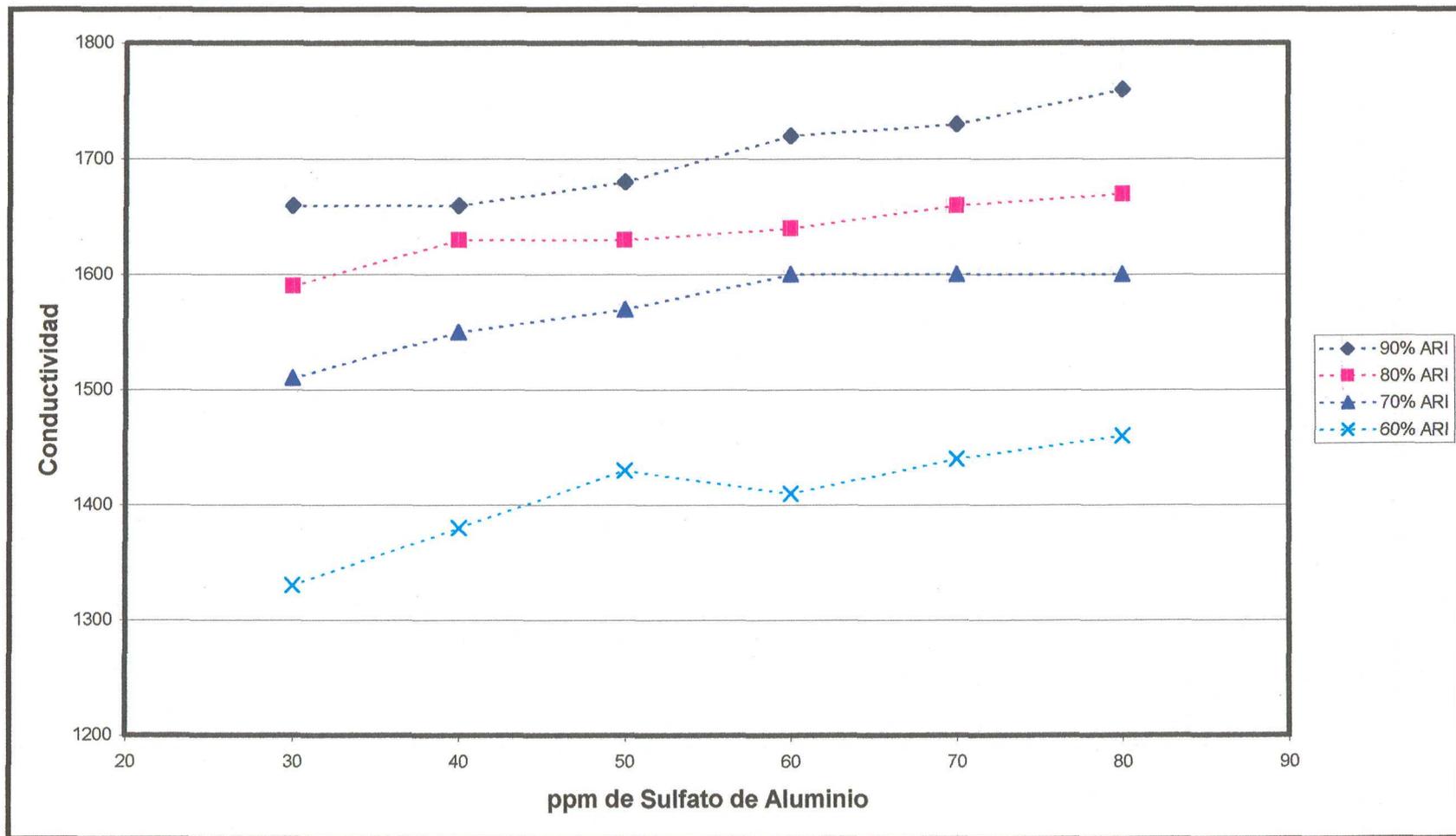


Fig. 5.12 Conductividad vs ppm de Sulfato de Aluminio

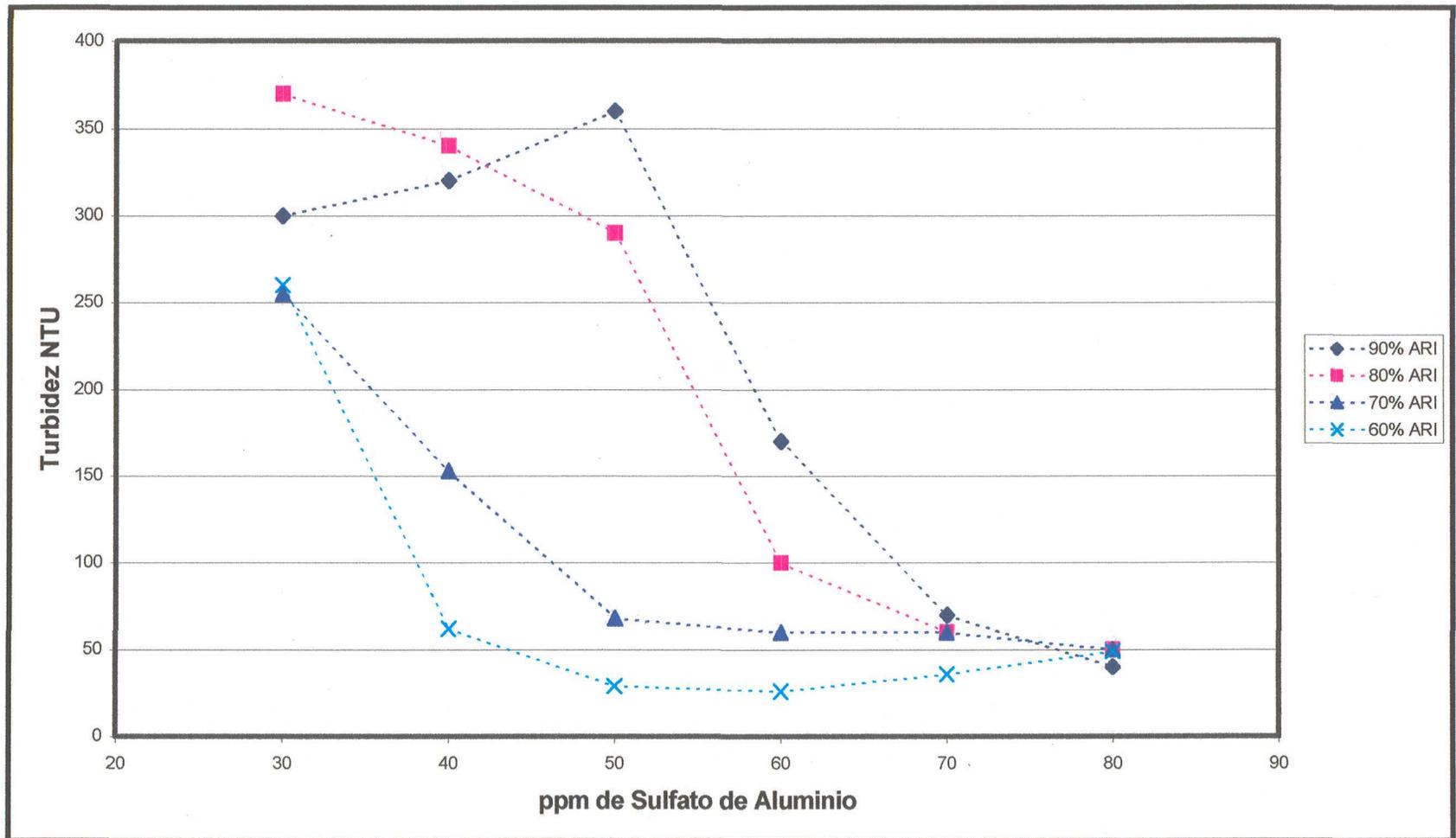


Fig. 5.13 Turbidez vs ppm de Sulfato de Aluminio

Capítulo 6

Análisis de Resultados

6.1 Pruebas Exploratorias

Las pruebas exploratorias que a continuación se describen, se corrieron sin que se les hiciera un análisis cuantitativo a los resultados obtenidos, el análisis que se les aplicó a los resultados fue de forma cualitativa por comparación de color, pero dieron el fundamento para la planeación rigurosa de la investigación.

6.1.1 Adición de polímero catiónico y aniónico

Al promover la unión de las moléculas de arcilla con los coloides producto de las diferentes reacciones de la lignina y con los polímeros catiónico o aniónico, se esperaba una desestabilización y crecimiento de la partícula y por lo tanto su separación. Sin embargo de acuerdo a los resultados obtenidos no existe la separación, la razón por la cual esta separación no se lleva a cabo es que la prueba se corrió a condiciones donde el pH de la corriente de agua residual y la corriente de la purga de la presa se encontraban a un pH alcalino (7.2 y 7.5

respectivamente). Esta condición de pH provoca que la arcilla tenga una carga negativa (Fig. 3.7) y las cargas que presentan los coloides bajo ésta misma condición son de tipo negativo (Fig. 3.2 y Fig. 3.3), la existencia de cargas negativas en ambas partículas hace que se presenten fuerzas de repulsión que impiden su unión y por lo tanto su desestabilización. Para el polímero catiónico su acción de desestabilización es mínima por la gran cantidad de cargas negativas que se tiene que neutralizar y su efecto no es apreciable. El polímero aniónico no tuvo ninguna acción sobre las coloides que conformaron la mezcla, debido a su carga de tipo negativo la cual es similar a las cargas de las moléculas. Debido a las distancias que entre moléculas el efecto de unión por fuerzas de van der Waals es despreciable.

6.1.2. Adición de Sulfato de Aluminio

Esta prueba se corrió bajo las mismas condiciones de pH que la prueba de dosificación de los polímeros catiónicos y aniónicos, la adición de coagulante se llevó a cabo en una mezcla de 70% de ARI y 30% de AP. Los resultados que se obtuvieron, muestran que a dosis menores de 100 ppm el cambio de color no fue notorio y a dosis iguales o mayores a 100 ppm se observó una disminución muy marcado (medición por comparación) en el color de la solución. Estos resultados se deben a las propiedades de la mezcla y del coagulante. El sulfato de aluminio que se adiciona a la mezcla se hidroliza rápidamente, formando moléculas poliméricas de hidróxido de aluminio (Apéndice D), ésta hidrólisis consume alcalinidad del agua lo que provoca que el pH de la mezcla empiece a disminuir, las disminuciones en el pH van a depender de la alcalinidad de la mezcla y de su capacidad amortiguadora. En un inicio el cambio de pH en la mezcla será pequeño, pero al ir consumiéndose la alcalinidad el cambio será más marcado. A la dosificación de 100 ppm de sulfato de aluminio el pH de la mezcla disminuyó hasta valores menores de 6.6 donde la arcilla invirtió su carga a positiva (Fig. 3.7), el efecto de inversión de la carga permitió la adsorción de los coloides de lignina negativos sobre la arcilla, lo que a su vez provoca la neutralización parcial de la carga y el crecimiento del flóculo. La existencia de cargas se presenta aun después de formarse el complejo arcilla-coloides, debido a que no se tiene desestabilización y precipitación del mismo. Por otra parte la especie polimérica de hidróxido de aluminio formada, terminará por desestabilizar la molécula parcialmente cargada e inducirá su sedimentación, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en donde se observa una remoción de color. El inconveniente que se vio en la prueba para valores de dosificación de 100 ppm y 120 ppm de coagulante, es la disminución del pH final hasta valores de 5.5, esto se debió a que a estas dosis se consume la alcalinidad de la mezcla y su capacidad amortiguadora disminuye. La disminución en el pH implica tener una etapa posterior de ajuste que permita elevar el valor a la neutralidad para que las etapas de biodegradación trabajen en condiciones óptimas.

6.2 Análisis General de los resultados

El objetivo de éste análisis general es explicar los comportamientos que se encontraron en los diferentes parámetros (color, DQO, conductividad, pH y turbidez), después de haber realizado las mezclas en diferentes concentraciones de ARI y de AP, y de haberles aplicado a estas mezclas la prueba de jarras a diferentes dosis de coagulante. Cabe hacer la aclaración que éste análisis se realiza, debido a que muchos de los resultados obtenidos en las diferentes mezclas, presentan valores recurrentes, para cada una de las pruebas realizadas, y que los análisis particulares de cada prueba (corrida) se expondrán en la siguiente sección, en donde se considerarán las condiciones específicas a las que se realizó cada prueba.

6.2.1 Acidificación

La etapa de acidificación se realiza con ácido clorhídrico, y tiene como objetivo, llevar el ARI a un valor de pH entre 6 y 6.2, para que a la hora de formar la mezcla con el AP, el pH final de la misma tenga un valor de pH cercano a 6.6. El mantener el pH de la mezcla cercano a las 6.6 unidades, provocará que la arcilla presente cargas positivas en su estructura (Fig. 3.6), y se inicie el proceso de adsorción de los coloides negativos de lignina, en la superficie de la arcilla. La acidificación provoca a su vez efectos sobre las variables de; color, conductividad, DQO, turbidez y solubilidad de la mezcla. El color en la mezcla disminuye, porque las condiciones ácidas desplazan el equilibrio de las reacciones de los coloides de lignina hacia la formación de compuestos con ruptura del anillo cíclico y estados oxidados mayores, que tienen un menor color (Fig. 3.4). La conductividad se ve incrementada por la adición de ácido clorhídrico, debido a que es un compuesto iónico el cual se disocia. La DQO también se ve afectada por la adición del ácido clorhídrico, debido a que al desplazarse el equilibrio a la formación a compuestos con mayores estados de oxidación (Fig. 3.4), se demandará una menor cantidad de oxígeno para oxidarse. La turbidez también disminuye con la acidificación de la mezcla, esta disminución se debe a que al adicionar el ácido clorhídrico, se presenta la disolución de algunos compuestos de silicio, además que el ácido reacciona con los carbonatos y bicarbonatos para formar cloruro de calcio, que tiene un menor impacto sobre la turbidez. La solubilidad de la mezcla también se ve afectada por la acidificación, ya que al disminuir el pH en la mezcla la solubilidad disminuye, éste efecto se considera benéfico para la precipitación de la partícula.

6.2.2 Adición de arcilla

Para que entren en contacto la arcilla halloysita con los coloides negativos de lignina, se formaron mezclas de ARI con AP, al realizarse estas mezclas con diferentes porcentajes en volumen, las mezclas que se forman tienen

características particulares. En las pruebas definitivas las concentraciones que se manejaron fueron de 90%, 80%, 70% y 60% de ARI, la parte complementaria del porcentaje en volumen corresponde al AP. Las características particulares que se presentaron de color, DQO, conductividad, turbidez y pH para cada mezcla se describen a continuación. Después de la formación de las mezclas, se espera que los parámetros finales se encuentren entre los valores iniciales que presenta cada corriente, sin embargo el efecto de acidificación provoca que esto no siempre sea así. Como lo vimos en la sección anterior la acidificación incrementa la conductividad del ARI, y disminuye el color, la DQO, la turbidez y pH. Los datos numéricos que se manejarán a lo largo de éste análisis serán los obtenidos de las pruebas preliminares.

El color en la mezcla aumenta conforme se incrementa la concentración de AP, debido a que el color aparente en el AP (3050), es mayor que el del ARI (2450). Las mezclas que tienen valores de color menor que 2450 unidades de Pt-Co son las 90% y 80% de ARI. Aun y cuando en éstas mezclas de 90% y 80% de ARI se marque el efecto de disminución de color por acidificación, se infiere que las otras mezclas también disminuye el color.

La conductividad en las mezclas formadas es mayor conforme se incrementa la concentración de ARI, debido a que ésta corriente es la que aporta mayor contenido de compuestos iónicos, que son los que impactan directamente sobre éste parámetro. Los valores de conductividad que tiene el ARI y AP son 1960 y 193 micromhos/cm respectivamente. Se esperaría que los valores de conductividad de las mezclas, estuvieran entre los 1960 y 193 micromhos/cm, pero el efecto de la acidificación hace que las mezclas suban su conductividad, siendo el efecto muy marcado en las mezclas de 90% y 80% de ARI, que presentan valores mayores de 1960 micromhos/cm (3500 y 3000 micromhos/cm respectivamente).

La turbidez de las diferentes mezclas formadas aumenta conforme se incrementa la concentración de AP. Los valores iniciales que se tienen de turbidez para las dos corrientes son de 130 NTU para el ARI y 450 NTU para el AP. El efecto de acidificación disminuye la turbidez en las mezclas formadas, este efecto se detecta claramente en la mezcla de 90% de ARI, el valor de turbidez que presenta es de 113 NTU, que es menor que el valor de la corriente de ARI.

6.2.3 Dosificación de coagulante

Después de la formación de las mezclas a las diferentes concentraciones en volumen del ARI y el AP, se procedió a la dosificación de coagulante y la realización de la prueba de jarras. Como se muestra en las figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13 de la sección de resultados, en las mezclas se presentan tendencias generales similares de incremento o disminución de cada parámetro medido (color, DQO, pH, Conductividad y

turbidez) con respecto a la dosis de coagulante. Las condiciones específicas para cada mezcla se analizará en la sección de resultados particulares.

El análisis global se realizará en dos grupos. El primer grupo será para los resultados de color, DQO y turbidez, los cuales presentan tendencias similares, además de presentar dependencia de la DQO y la turbidez de la remoción de color.

6.2.3.1 Color, DQO, Turbidez

El análisis de éste grupo se realizará para cuatro tendencias características que se presentaron. La primera tendencia es a baja concentración de arcilla ($\leq 20\%$ AP) y bajas dosis de coagulante (≤ 50 ppm). La segunda tendencia es a baja concentración de arcilla ($\leq 20\%$ AP) y altas dosis de coagulante (> 50 ppm). La tercera tendencia es a alta concentración de arcilla ($> 20\%$ AP) y bajas dosis de coagulante (≤ 50 ppm). La cuarta tendencia es para alta concentración de arcilla ($> 20\%$ AP) en la mezcla y altas dosis de coagulante (> 50 ppm). En la figura 6.1 se presentan los comportamientos para el color en cada tendencia.

En la primera tendencia se presenta de manera general un incremento en el color. Esto se debe a que el bajo contenido de arcilla adsorbe muy pequeñas cantidades de coloides de lignina, además de que a las bajas dosis de coagulante, una parte de él se disociará y permanecerá en solución, y la otra desestabilizará algunos complejos arcilla-coloide y coloides de lignina. La parte de coagulante que permanece en solución incrementa el color aparente de la mezcla (Fig. 6.1-a). La variación de los resultados en la DQO es mínima, debido a que la cantidad de coloides de lignina sedimentados es pequeña. En algunas dosis de coagulante observamos que la DQO se incrementa, éste efecto puede ser debido a que el complejo arcilla-coloide demanda más oxígeno para su oxidación. La turbidez depende del contenido de arcilla, $\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^- , OH^- , coloide y dosis de coagulante. Al no presentarse remoción en la mezcla el valor de la turbidez se incrementará por efecto de adición del coagulante disociado.

En la segunda tendencia de baja concentración de arcilla y alta dosis de coagulante se presenta una disminución en el color de la mezcla, ésta disminución se debe a que el coagulante desestabiliza mayor cantidad de complejos de arcilla-coloide, y coloides de lignina (Fig. 6.1-b). La DQO disminuye conforme se incrementa la remoción de color. Los niveles de remoción de DQO que se presentan a estas condiciones, no son comparables con las remociones de color, esto se puede deber a que al dosificar el coagulante este consume alcalinidad, que disminuye el pH, la disminución en el pH desplaza el equilibrio a la formación de compuestos no pigmentados los cuales no influyen sobre el color, pero influyen sobre la DQO. El comportamiento que presentan los valores de la turbidez en éste rango,

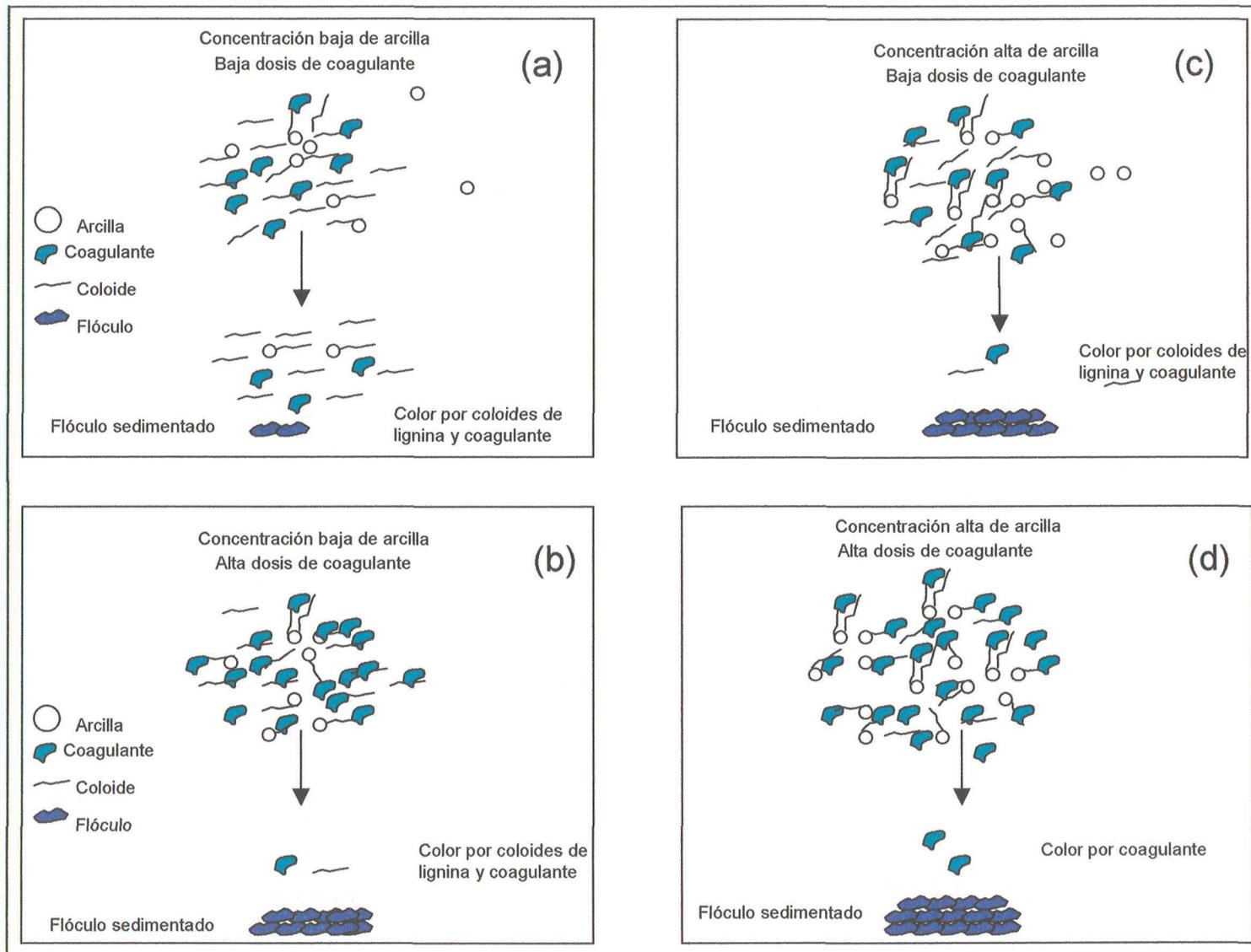


Fig. 6.1 Comportamiento de los coloides a diferentes concentraciones de arcilla y dosis de coagulante

son similares a la remoción de color, por lo que se alcanzan altos niveles de remoción de turbidez.

La tercera tendencia es a alta concentración de arcilla en la mezcla y bajas dosis de coagulante. En éste rango se presenta una alta remoción de color, esto se debe a que al existir mayor cantidad de arcilla en la mezcla, se adsorberán mayor cantidad de coloides en la arcilla, es por esta razón que se requiere de menos cantidad de coagulante para desestabilizar los complejos arcilla-coloides y eliminar mayor cantidad de color (Fig. 6.1-c). Los cambios en el pH debido al consumo de alcalinidad, son muy ligeros. La DQO en ésta tendencia disminuye con un comportamiento similar a la disminución de color, es decir al retirar mayor cantidad de coloides de lignina menor es la DQO que se tiene en la mezcla final. La turbidez disminuye también por efecto de remoción de color y eliminación de los componentes que están impactando sobre éste parámetro.

La cuarta condición se presenta a alta concentración de arcilla en la mezcla y alta dosis de coagulante a la mezcla. En ésta rango se presentan muy altas remociones de color, que se debe al alto contenido de arcilla en la mezcla, que adsorbe grandes cantidades de coloides, además que por las dosis de coagulante adicionado, se terminan de desestabilizar los coloides existentes, logrando removerse la carga coloidal. El color remanente es debido al propio coagulante que se queda disociado. La DQO y la turbidez en ésta tendencia presentan también una alta disminución producto de la carga coloidal que se está retirando. Para la turbidez, al igual que el color se tiene una cantidad remanente que se asume es debida al coagulante dosificado.

6.2.3.2 Conductividad y pH

La conductividad en todas las mezclas se mantuvo con la tendencia a incrementar su valor conforme se dosificó el coagulante excepto en algunos casos de las pruebas preliminares. El incremento en la conductividad es debido a que el coagulante es un compuesto iónico, el cual disocia con la alcalinidad de la mezcla. El producto de la disociación es el ion sulfato que incrementa la conductividad.

El pH de las diferentes mezclas disminuye conforme se incrementa la dosis de coagulante. La disminución se debe a la formación de especies poliméricas de Hidróxido de aluminio, las cuales para formarse consumen alcalinidad de la mezcla y disminuyen los valores de pH.

6.3 Pruebas Preliminares

Las pruebas preliminares se corrieron bajo condiciones de acidificación preliminar del agua residual industrial ARI, llevando el pH a un valor de 6.22. Esta acidificación provocó que el pH final de las diferentes mezclas formadas

disminuyera a valores entre 6.23 para 90% ARI y 6.6 para 40% ARI. Este rango de pH que se manejó en la corrida permite que la carga de la arcilla se mantenga positiva y por lo tanto se lleve a cabo la adsorción de los coloides negativos de lignina. De acuerdo a los resultados, **después de la acidificación y antes de la dosificación del coagulante se encontraron las siguientes características en las diferentes mezclas formadas (desde 90% ARI, hasta 40% ARI).** El color proveniente del agua de la presa (3050 unidades Pt-Co) es mayor que el del agua residual industrial en 600 unidades, y al prepararse las mezclas existe una dependencia directa entre el valor de color y el contenido de arcilla, así para la mezcla de 90% ARI el valor de color es de 2275 unidades Pt-Co y de 2775 unidades Pt-Co para la mezcla de 40% en volumen de ARI (ver Fig. 5.1). Un aspecto importante que se presenta en ésta y en las subsiguientes pruebas, es que al realizar la acidificación previa del agua residual industrial, se generan condiciones que permiten la formación de compuestos menos coloreados (Fig. 3.4), y que impactan disminuyendo el color de la mezcla. Este efecto aunque es para todas las mezclas, se hace muy notorio en las mezclas de 90% ARI y 80% ARI en donde se tienen valores de color de 2275 y 2350 unidades de Pt-Co respectivamente, ya que ambas están por debajo del valor del agua residual industrial antes de la acidificación (2450 unidades Pt-Co).

Los resultados de la conductividad en las diferentes mezclas formadas varían inversamente con las concentraciones de arcilla en la mezcla, esta dependencia inversa es debido a que el ARI (2000 micromhos/cm) tiene una mayor conductividad que el agua de la presa (160 micromhos/cm), para una concentración del 90% de ARI se tiene un valor de conductividad de 3620 micromhos/cm y para una concentración de 40% de ARI se tiene un valor de conductividad de 1134 micromhos/cm (Fig.5.2). Otro efecto que se presenta por la acidificación es el incremento de la conductividad en el ARI y en las diferentes mezclas formadas, el efecto es debido a que el ácido clorhídrico es un compuesto inorgánico el cual se disocia en sus iones, es por esta razón que las mezclas de 90% ARI y 80% ARI presentan valores de 3000 y 3620 micromhos/cm respectivamente, que están por arriba de los 1960 micromhos/cm del agua residual industrial antes de la acidificación.

De las dos aguas residuales las cuales se mezclaron, el agua de la presa tiene un valor de turbidez de 450 NTU, y el agua residual industrial tiene un valor de 320 NTU, al realizar las mezclas los resultados en este parámetro varían directamente al porcentaje en volumen del contenido del agua arcillosa AP que está contenida en la mezcla (Fig. 5.3), para un valor de 90% en volumen de ARI se tienen 113 NTU y para 40% en volumen de ARI se tienen 250 NTU. En éste parámetro también se nota el efecto de la acidificación, debido a que el valor de turbidez de la mezcla de 90% de ARI, es 20 unidades menor que el valor de ARI antes de la acidificación, este efecto puede ser causado por la disolución de algunas moléculas de aluminosilicatos y carbonatos que tienen efecto sobre la turbidez.

6.3.1 Color

Después de la dosificación del sulfato de aluminio y de haber **corrido** la prueba de jarras a las mezclas descritas en la tabla 4.2, se observaron los siguientes comportamientos en las diferentes variables medidas. En la dosis de 20 ppm de coagulante, el color se incrementó para todas las mezclas formadas (Fig. 5.1), el incremento para cada mezcla fue de diferente magnitud, para la mezcla de 40% de ARI se incrementó de 2800 a 2975 unidades de Pt-Co y el incremento para la mezcla de 90% de ARI fue de 2275 a 2600 unidades de Pt-Co. El incremento de color se debe a que la cantidad de coagulante adicionado no es suficiente para desestabilización y precipitación de la partícula, y éste se queda en solución incrementando el color aparente de la mezcla. Un aspecto especial se presentó para la mezcla de 60% ARI en donde en lugar de incrementarse el valor de color como en todas las demás, éste tuvo un ligero descenso de 100 unidades de color Pt-Co, éste comportamiento no tiene una explicación lógica tomando como base los incrementos de las otras mezclas.

En la dosis de 40 ppm se presentaron cuatro condiciones diferentes; Una primera condición se presentó con una disminución muy brusca en el color para las mezclas de 40% ARI y 50% ARI (que son las mezclas con más alto contenido de arcillas), para el 40% de ARI el valor de color disminuyó de 2975 a 95 unidades de color Pt-Co y para la mezcla de 50% de ARI la disminución de color fue de 2775 a 231 unidades de color, este cambio tan drástico en el color se debe a que al existir mayor contenido de arcilla en la mezcla, se dispondrá de mayor cantidad de cargas positivas para adsorber las moléculas de lignina con carga negativa, y las cantidades de coagulante que se necesitan para completar la remoción son bajas. La segunda condición se presentó con una ligera disminución del color en las mezclas de 60% y 90% de ARI, en donde las disminuciones para estas mezclas fueron del orden de 200 y 425 unidades (2575 a 2375 y 2600 a 2175) de Pt-Co respectivamente, en estas mezclas podemos inferir que, al disminuir la cantidad de arcilla y tener una cantidad de coagulante de 40 ppm, muy poca cantidad de flóculos están en condiciones de precipitar y por lo tanto de retirar color. La tercera condición se presentó en la mezcla de 70% de ARI en donde en lugar de tener una disminución se tiene un incremento de 2700 a 3100 unidades Pt-Co en donde se presenta una contradicción con respecto a la mezcla de 90% ARI, porque de acuerdo a la cantidad de arcilla y dosis de coagulante ésta corriente debería de presentar una mejor remoción de color, porque al tener mayor cantidad de arcilla que la mezcla de 90% ARI se desestabilizarán mayor cantidad de coloides de lignina negativos, y por lo tanto debería de presentarse mayor remoción. En la cuarta condición, en la mezcla de 80% ARI el valor de color se mantiene sin variación en 2375 unidades Pt-Co.

Para la dosis de coagulante de 60 ppm todas las mezclas presentaron una disminución del color. Las mezclas de 40% y 50% de ARI presentan una disminución muy ligera, de 33 y 187 unidades (95 a 62 y 231 a 44) de Pt-Co respectivamente, la mezcla de 90% en volumen de ARI presenta una

disminución moderada de 275 unidades (2175 a 1900) de Pt-Co y las demás mezclas tienen una disminución muy drástica; la mezcla de 60% de ARI disminuye de 2375 a 100 unidades de color, la mezcla de 70% en volumen de ARI disminuye de 3100 a 1075 unidades Pt-Co y la mezcla de 80% de ARI disminuye de 2375 a 1000 unidades Pt-Co. En las mezclas en donde se tuvo una variación de más de 1000 unidades de color, se infiere que se está presentando un punto en el cual las relaciones entre arcilla, pH y coagulante presentan condiciones favorables de desestabilización de las partículas coloidales.

Para la dosificación de coagulante de 80 ppm encontramos que todas las mezclas presentan una alta remoción de color, ya que independientemente de los valores iniciales de color y de la dosificación de arcilla, los valores finales están en un rango muy cercano, desde 66 unidades de color para la mezcla de 40% de ARI hasta 106 unidades para la mezcla de 90% ARI.

En un análisis global del comportamiento de color de las diferentes concentraciones en volumen de agua de la presa (AP) contra la dosificación de sulfato de aluminio observamos que, a dosis menores de sulfato de aluminio disminuyeron las mezclas que contenían 60% de AP y 50% de AP (las de mayor concentración de arcilla), el valor al cual obtuvieron esta máxima disminución fue de 40 ppm de coagulante, la mezcla de 60% de AP tuvo un valor final de 95 unidades de Pt-Co y la mezcla de 50% de AP disminuyó hasta un valor de 231 unidades de color. La mezcla de 40% en volumen de agua de la presa disminuyó hasta el valor de 100 unidades de color, a una dosis de coagulante de 60 ppm. En el mismo valor de dosificación de coagulante de 60 ppm se empezaron a apreciar disminuciones de color en las mezclas de 30%, 20% y 10% en volumen de agua de la presa, los valores a los cuales disminuyeron cada una de las mezclas fue de 1075, 1000 y 1900 unidades de Pt-Co respectivamente. Para la dosis de coagulante de 80 ppm estas tres últimas mezclas disminuyeron rápidamente hasta valores de 83, 88 y 106 unidades de Pt-Co respectivamente. De los comportamientos descritos para todas las mezclas deducimos que: La remoción de color tiene una dependencia directa con la cantidad de arcilla en la mezcla, y simultáneamente una razón inversa con la dosificación de sulfato de aluminio, es decir al aumentar la cantidad de arcilla en la mezcla disminuye la cantidad de coagulante a adicionar para tener remociones significativas de color.

6.3.2 Conductividad

El comportamiento del parámetro de conductividad a lo largo de las pruebas realizadas se presenta con ligeras variaciones (Fig. 5.2), estas variaciones en la mayoría de las mezclas aun y cuando son pequeñas tienden a incrementar sus valores de conductividad, sin embargo se presentaron mezclas que su tendencia fueron de disminuir conforme se fue agregando el coagulante. Las mezclas que tuvieron la tendencia a incrementarse conforme se aumentó la dosis de

coagulante fueron las de 90%, 70%, 60% y 40% de ARI. La mezcla de 90% ARI tuvo una variación global de 110 unidades, los valores iniciales y finales de conductividad en micromhos/cm fueron de 3500 y 3610 respectivamente. La mezcla de 70% ARI tuvo un incremento global de 183 unidades, el valor inicial de la mezcla fue de 1717 y el valor final fue de 1900 micromhos/cm. La mezcla de 60% de ARI tuvo un incremento de 225 micromhos/cm, y su valor inicial y final de conductividad en micromhos/cm fueron de 1590 y 1815 respectivamente. La mezcla de 40% ARI de 250 micromhos/cm, y su valor inicial y final de conductividad en micromhos/cm fueron de 1134 y 1384 respectivamente. Las mezclas que presentaron la tendencia de disminuir la conductividad conforme se fue incrementando la dosis de coagulante fueron las de 80% y 50% de ARI, la disminución que presentó la mezcla de 80% ARI fue de 110 micromhs (3000 micromhs valor inicial y 2890 micromhos/cm valor final), la mezcla de 50% ARI disminuyó en la conductividad en 149 micromhos/cm, y su valor inicial y final de conductividad en micromhos/cm fueron de 1739 y 1590 respectivamente. Por las características químicas que tiene el sulfato de aluminio, el cual es una sal se presupone que al agregar el sulfato existirá una disociación que contribuirá para el incremento en la conductividad, condición que se presenta en la mayoría de las pruebas; por las condiciones que presentan las mezclas de 80% y 50% de ARI, en las cuales hay una buena remoción de color, y no se aprecian efectos o disturbios que nos indiquen por que estas dos mezclas disminuyan su conductividad se considerará que en estos casos estos valores se deben a una falla en el equipo de medición o algún error en aplicar la técnica a la hora de hacer la determinación, como lo podremos apreciar mas adelante, en el análisis de las pruebas definitivas.

6.3.3 Turbidez

A continuación se describe el comportamiento de la turbidez para las diferentes mezclas formadas de ARI y AP, y las dosis de coagulante dosificado (Fig.5.3). En la dosificación de 20 ppm de coagulante se observa que todas las mezclas formadas presentan un incremento de la turbidez, éste efecto es debido a que al dosificarse el sulfato de aluminio y no presentarse buenas condiciones de precipitación para el flóculo de arcilla y derivados de la lignina, el coagulante se queda disociado, es por ésta misma razón que se presenta un incremento en el color (Fig. 5.1) de las diferentes mezclas a ésta misma dosis. Los incrementos que se presentaron fueron de 125 NTU para la mezcla de más concentración en agua con arcillas (40% AP) y de 17 NTU para la mezcla de menor contenido de arcillas (10% AP).

Para la dosis de coagulante de 40 ppm se presentaron disminuciones importantes de turbidez en las corrientes de 40 % y 50% de ARI, los valores iniciales que tenían éstas mezclas fueron de 250 y 203 NTU respectivamente, y se alcanzaron valores de 6 y 23 NTU respectivamente, éstas disminuciones van asociadas con la remoción de color (Fig. 5.1) en donde a través de la precipitación de los flóculos se retira también turbidez. Las demás mezclas

mantuvieron su tendencia de incremento, los rangos en los cuales se presentó el incremento fue de 245 NTU para la mezcla de 70% ARI y de 140 NTU para la mezcla de 90% ARI. Para las mezclas de 90%, 80% y 60% en volumen de ARI aun y cuando se presenta una ligera remoción de color (Fig. 5.1) el parámetro de turbidez se sigue incrementando, lo que nos indica que solo una parte de coagulante provoca la precipitación del floculo y el coagulante restante permanece en solución.

El comportamiento que tienen las diferentes mezclas en la dosis de 60 ppm depende nuevamente de la cantidad de arcilla en la mezcla. Para las mezclas de 40% y 50% de ARI la turbidez se mantiene sin variaciones. Las mezclas de 80%, 70% y 60% de ARI presentan disminuciones bruscas que van del orden de 80 (de 135 a 50), 78 (de 163 a 85) y 188.5 (de 193 a 4.5) NTU respectivamente. La mezcla que incrementa su valor es la 90% de ARI alcanzando un valor de 165 NTU, éste efecto se debe a que no hay una remoción importante de color, lo que provoca que parte del coagulante se quede en solución, que provoca un incremento en la turbidez.

En la dosis de 80 ppm de coagulante se presentó que las mezclas de 40%, 50% y 60% de ARI se mantuvieron prácticamente sin cambio con respecto a la dosis de 60 ppm, y la turbidez en las demás corrientes descendieron a valores de entre 3 y 4 NTU. A ésta concentración de coagulante se presentan las condiciones que permiten la eliminación de color y turbidez para las mezclas con menor contenido de arcilla.

6.4 Pruebas Finales

Las pruebas finales se corrieron bajo dos diferentes condiciones de operación de la planta de extracción de celulosa, en la primera prueba la planta se encontraba operando en condiciones normales y todas las corrientes residuales que se generaron fueron enviadas a la planta de tratamiento de aguas residuales. En la segunda corrida se presentaron condiciones especiales de operación, estas consistieron en que una parte de la corriente residual del lavado de los gases del horno de cal, estaba siendo enviada dentro del proceso para neutralización de una corriente ácida. Esta derivación de una parte de la corriente, impacta directamente sobre los parámetros de: conductividad, color, DQO, Sólidos Totales y Turbidez. La segunda corrida presentó disminución en las variables antes descritas en diferentes magnitudes, la conductividad disminuyó de 2190 a 1760 micromhos/cm, el color bajó de 2530 a 2230 unidades Pt-Co, la DQO bajo de 1121 a 1031 ppm, los sólidos disminuyeron de 2752 a 1750 ppm y la turbidez disminuyó de 520 a 380 NTU. Debido a las condiciones en las cuales se llevaron a efecto éstas dos pruebas, cada uno de los resultados se analizarán por separado. Como se mencionó en la tabla 4.4, las mezclas que se prepararon fueron las de 90%, 80%, 70% y 60% de ARI, y las dosis de coagulante se inició a partir de 30 ppm hasta 80 ppm, con intervalos de 10 ppm.

6.4.1 Análisis de la primera corrida

6.4.1.1 Color

El análisis de resultados para el color se presenta en dos grupos, un grupo será considerado por las corrientes que incrementan su color hasta un máximo y a partir de éste punto disminuye conforme se adiciona el coagulante. El otro grupo será el que mantiene la tendencia a disminuir conforme se incrementa la dosis de sulfato de aluminio. Las tendencias se representan en la figura 5.4.

Para el primer grupo tenemos que las corrientes de 90%, 80% y 70% de ARI presentan un incremento en el color conforma se adiciona el coagulante, este efecto es debido a que al no desestabilizarse la partícula y precipitar, el coagulante se queda disociado en la mezcla contribuyendo con el color aparente. El máximo se presenta en todas las mezclas en la dosis de 50 ppm de coagulante, y los valores máximos que se alcanzan son de 2340, 2370 y 2880 unidades de Pt-Co. A partir de éste punto el color tiene una marcada tendencia a disminuir, las mezclas que más disminuyen en su color son las que contienen mayor contenido de arcillas, aspecto que nos indica que la arcilla influye directamente sobre la desestabilización del coloide de lignina, la mezcla de 70% de ARI disminuye 2200 unidades de Pt-Co (de 2880 a 680), la mezcla de 80% de ARI disminuye 1330 unidades de Pt-Co (de 2370 a 1040) y la mezcla de 90% de ARI disminuye 1160 unidades de Pt-Co (de 2340 a 1180).

El segundo grupo lo forma solamente la corriente de 60% de ARI, ésta corriente a partir de 30 ppm de coagulante se mantuvo siempre con una tendencia a disminuir su parámetro de color. Como se mencionó anteriormente la arcilla influye directamente sobre la desestabilización de las partículas coloidales de lignina, y al tener ésta mezcla un mayor contenido de arcillas, las dosis de coagulante que se requieren para lograr remociones importantes son menores, el valor de color mínimo se alcanzó a la dosis de 60 ppm y fue de 420 unidades Pt-Co. La disminución de color en ésta mezcla fue de 1980 unidades de Pt-Co con respecto a la dosis de 30 ppm de sulfato de aluminio. A partir de la dosis de coagulante de 60 ppm, los valores finales de color se mantuvieron con cambios mínimos (620 y 470 unidades Pt-Co para 70 y 80 ppm de coagulante respectivamente), aspecto que nos indica que el coagulante adicionado a éstas dosis no tiene ya un efecto significativo sobre la remoción de color. Este efecto se debe a que los coloides de lignina ya han sido retirados en su totalidad y los efectos de color que aparecen se deben a las dosis del propio coagulante.

Un análisis global del comportamiento de las corrientes nos indica que las corrientes que tienen menor contenido de arcilla, requieren de mayor cantidad de sulfato de aluminio para remover color. En algunos casos estas corrientes tienden a incrementar el color por la dosificación de coagulante, hasta llegar a un máximo y a partir de éste punto conforme se incrementa la dosis de coagulante, se empieza a presentar la remoción. Para ésta primera prueba las mezclas que

presentan el comportamiento de incrementarse son las de 90%, 80%, y 70% de ARI, a partir de éste máximo las remociones mayores se presentan para las mezclas que contienen mayor contenido de arcillas. Una corriente que durante la prueba mantuvo su tendencia a disminuir fue la de 60% de ARI, esta tendencia nos indica que para el rango de 30 a 60 ppm de coagulante, la cantidad de arcilla dosificada permite la adsorción de una gran cantidad de coloides de lignina, y al adicionarse el coagulante se presentan condiciones de pH (6.51 a 5.83) y sustancias poliméricas de hidróxido de aluminio que generan una buena remoción de color. Después de las 60 ppm de coagulante se puede considerar que no existen variaciones considerables en el color para esta mezcla, como se explicó anteriormente, esto se debe a que los coloides de lignina han sido completamente removidos y el color que se presenta es el ocasionado por la turbidez del coagulante.

6.4.1.2 DQO

Para la demanda química de oxígeno (DQO) el formar las mezclas tiene un efecto de dilución, el cual puede ser observado en la Fig. 5.5. El efecto de dilución, es directamente proporcional con el incremento del porcentaje en volumen del agua arcillosa, a mayor porcentaje en volumen de agua arcillosa la DQO final de la mezcla disminuye, aspecto que se puede apreciar en la dosis de 30 ppm de sulfato de aluminio. Para la mezcla de 90% de ARI se tiene una DQO de 828 ppm, para la mezcla de 80% de ARI se tiene una DQO de 730 ppm, para la mezcla de 70% de ARI se tiene una DQO de 693 ppm y para la DQO de 60% se tiene una DQO de 613 ppm. El comportamiento que presentó la DQO en esta corrida se puede analizar en dos grupos:

Un primer grupo lo conforman aquellas mezclas las cuales tuvieron un incremento en el valor de la DQO conforme se fue agregando el coagulante hasta llegar a un máximo (dosis de coagulante de 40 ppm). A partir de este valor se presentó una disminución en el parámetro. Las mezclas que presentaron éste comportamiento fueron las de 90% y 80% de ARI, los valores máximos que se presentaron los fueron 878 y 783 ppm respectivamente. Este efecto se debe a que al no haber remoción de color, el complejo formado por la arcilla y el coloide de lignina probablemente genera alguna interferencia que afecta la medición de la DQO y nos dan resultados de incremento de éste parámetro. A partir del valor de 40 ppm de coagulante se presenta una disminución en la DQO, esta disminución se debió a la precipitación de las moléculas coloidales de lignina, a través de la arcilla y el coagulante. Ambas mezclas mostraron una disminución de DQO conforme se fue dosificando el sulfato de aluminio, las disminuciones que se tuvieron a partir de las 40 ppm fueron de 225 y 185 ppm de DQO para las mezclas de 90% y 80% de ARI respectivamente, y los valores finales a los cuales llegaron fueron de 653 y 598 ppm de DQO respectivamente. Realizando una comparación con la tendencia que presentaron estas mismas mezclas con el color, encontramos que el máximo que presentaron para color fue a una dosificación de 50 ppm de

coagulante y el máximo presentado para la de DQO fue a 40 ppm de coagulante. Esta diferencia en el punto del máximo se explica porque a partir de la dosis de 40 ppm se empieza a remover algunas partículas coloidales de lignina y disminuyen la DQO, pero la dosificación de coagulante tiene mayor impacto sobre el color.

En el segundo grupo, la DQO disminuyó conforme se incrementó la dosis de coagulante. Este efecto de disminución se debe nuevamente al efecto de la arcilla, debido a que mientras más arcilla se mantiene en la mezcla se logra neutralizar mayor cantidad de cargas, por lo que las necesidades de coagulante para lograr la desestabilización y precipitación de los coloides de lignina son menores. La disminución global de la DQO para las dos mezclas tomando como referencia las 30 ppm de coagulante, fueron de 270 ppm de DQO (de 693 a 423 ppm de coagulante) para la mezcla de 70% de ARI y 282 ppm de DQO (de 613 a 331 ppm de coagulante) para la mezcla de 60% de ARI. Para este grupo de mezclas se presentó un caso especial para la mezcla de 70%, ésta mezcla con respecto al color presenta un máximo en 50 ppm de coagulante y en éste mismo punto presenta un ligero incremento en el valor final de la DQO, aspecto que nos indica que en esta dosificación de coagulante se presentan algunas limitaciones para que la partícula pueda precipitar. A partir de éste punto el comportamiento de las mezclas en ambos parámetros de color y DQO es similar, este comportamiento nos indica una relación directa de la cantidad de arcilla y coagulante en la remoción de color y en la remoción de DQO y que además los componentes que están causando la DQO son las partículas coloidales de lignina.

El análisis global de las mezclas para la variable de DQO, nos indica que las mezclas de 90% y 80% de ARI presentan un valor máximo a 40 ppm de coagulante, que es asociado con el complejo que se forma arcilla-coloide, después de este máximo los valores de la DQO empiezan a disminuir. La corriente de 60% de ARI mantiene una tendencia a disminuir en cada una de las dosificaciones de coagulante. La variación en los valores de DQO en las cuales se establecieron las remociones para las diferentes mezclas fueron: para la mezcla de 90 % de ARI de 878 a 653 ppm de DQO, para la mezcla de 80% de ARI de 783 a 598 ppm de DQO, para la mezcla de 70% de ARI de 693 a 423 ppm de DQO y para la mezcla de 60% de ARI de 613 a 331 ppm de DQO. Como se observa en los rangos que se presentaron en las diferentes mezclas, las mezclas que tienen un mayor contenido de arcillas permiten una mayor remoción y alcanzan menores valores de DQO, aun y cuando parten de un valor inicial menor.

6.4.1.3 pH

Para el análisis del pH debemos de considerar que la muestra de ARI se acidifica previamente con ácido clorhídrico a un valor de 6.1 unidades, éste efecto como ya se mencionó en las pruebas preliminares, permite que la arcilla tenga una carga positiva que es la que permite la adsorción de los coloides

negativos de lignina (Fig. 3.7). Los resultados que se obtuvieron de pH, se representan en la figura 5.6 en donde se observan diferentes comportamientos para las mezclas.

Las mezclas de 90% y 80% de ARI presentan a lo largo de las diferentes dosificaciones una tendencia a permanecer en un rango sin grandes variaciones. La mezcla de 90% de ARI presenta inicialmente una disminución de 6.52 a 6.37 unidades en las dosis de coagulante de 30 y 40 ppm respectivamente, a partir de la dosis de 40 ppm las variaciones del pH fueron pequeñas, siendo de 6.37 para 40 ppm de coagulante a 6.27 para 80 ppm de coagulante.

La mezcla de 80% de ARI presenta a lo largo de la prueba una tendencia de permanecer sin grandes variaciones en los valores de pH. Así, para la dosificación de 30 ppm de coagulante se tiene un pH de 6.48 y para la dosis de 80 ppm de coagulante se tiene un valor de pH de 6.39. Estas dos mezclas tienen la tendencia a permanecer sin grandes variaciones debido a la capacidad de amortiguamiento que tiene la mezcla, la cual es producida por los carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos de calcio provenientes del horno de cal, la presencia de los iones puede estar interfiriendo sobre la adsorción de las moléculas coloidales sobre la arcilla, además de impedir cambios en el pH y como consecuencia que la solubilidad de la mezcla se mantenga. Este mismo efecto de amortiguamiento causa que las remociones de color en las mezclas no sean tan grandes (Fig. 3.4).

La mezcla de 70% de ARI presenta un pH de 6.67 a la dosis de 30 ppm, y para las dosis de 40, 50 y 60 ppm de coagulante tiene un pH prácticamente constante de 6.46, 6.45 y 6.44 respectivamente, a las dosis de 70 y 80 ppm de coagulante, se presentan disminuciones más marcadas en el pH, a 70 ppm se tiene un pH de 6.3 y a 80 ppm se tiene un pH de 6.1. Para la mezcla de 70% de ARI en la dosis de 30 ppm por el pH de 6.67 que se presenta pudiera significar que la arcilla tiene una carga negativa lo cual impedirá la adsorción del coloide de lignina y tendrá el efecto de incrementar el color. En las dosis de 40 y 50 ppm de coagulante se presenta un pH de 6.46 y 6.45 (menor a 6.6) y tampoco se tiene una remoción de color, al contrario se incrementa el color como si el coagulante no tuviera ningún efecto. A la dosis de 60 ppm de coagulante se tiene un pH de 6.44 el cual se mantiene con poca variación con respecto al que se tiene a 50 ppm, aun y cuando el pH en éstas dos dosis los valores de pH son muy cercanos, en la dosis de 60 ppm si existe remoción de color (Fig. 5.4). Para las mayores dosis de coagulante el pH continúa disminuyendo, los valores que se obtienen a 70 y 80 ppm de coagulante fueron de 6.3 y 6.1 respectivamente.

Para la mezcla de 60% de ARI se presentó una tendencia de disminuir los valores en tanto se incrementó la dosis de coagulante, el pH que tiene la mezcla a 30 ppm de coagulante fue de 6.51 y hasta la dosis de 60 ppm de coagulante se mantuvo con disminuciones importantes, los valores que se presentaron en las dosis de 40, 50 y 60 ppm de coagulante fueron de 6.19, 5.95 y 5.83. Las

dosis de 70 y 80 ppm de coagulante se mantuvieron sin variaciones importantes y ambas al valor de 5.75. La tendencia que presenta la curva concuerda con las curvas que se tienen para remoción de color (Fig. 5.4) y de DQO (Fig. 5.5), más sin embargo un efecto que se presenta en esta mezcla, es que para las dosis de coagulante manejadas se sobrepasa su capacidad amortiguadora y los valores de pH que se obtienen a partir de la dosis de 50 ppm de coagulante son relativamente bajos (menores a 6).

El análisis global que se tiene para el comportamiento del pH, es que las mezclas con menor contenido de arcillas (90% y 80% de ARI), tienen menores cambios en los valores de pH, este comportamiento es similar al del color y la DQO para estas mismas mezclas. La mezcla de 70% de ARI industrial tuvo variaciones más marcadas en el pH, que son similares a las remociones de color y de DQO, la mezcla de 60% de ARI presentó grandes disminuciones en el pH conforme se incrementó la dosis de coagulante, alcanzando valores de pH menores a 6 unidades. Las tendencias se explican porque la corriente de ARI, que es la que contiene la mayor cantidad de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, conforme se va disminuyendo el porcentaje en volumen de esta muestra en la mezcla, también disminuyen los compuestos inorgánicos descritos, que son los que le dan la capacidad de amortiguamiento y están interfiriendo en la adsorción del coloide de lignina en la arcilla.

6.4.1.4 Conductividad

Para el análisis de la conductividad se deben de considerar los análisis previos que se realizaron en las pruebas preliminares, en donde se describe por qué el efecto de acidificación incrementa la conductividad de la muestra de ARI y como consecuencia, al formar la mezcla también se incrementa la conductividad de ésta. Otro efecto que contribuyó con la conductividad final, es la adición del propio coagulante, el cual se disocia para formar las sustancias poliméricas de hidróxido de aluminio, liberando iones sulfato. La figura 5.7 muestra las tendencias que presentan las diferentes mezclas, en las cuales se observa que las mezclas incrementan su conductividad conforme se aumenta la dosis de coagulante. Para la mezcla de 90% de ARI, se tuvo un valor de 2540 micromhos/cm a dosis de coagulante de 30 ppm, y de 2730 micromhos/cm a dosis de coagulante de 80 ppm. La mezcla de 80% de ARI tuvo un valor de 2310 micromhos/cm a 30 ppm de coagulante y de 2530 micromhos/cm a 80 ppm de coagulante. La mezcla de 70% de ARI tuvo una conductividad de 2050 micromhos a 30 ppm de coagulante y de 2190 micromhos/cm a 80 ppm de coagulante, y la mezcla de 60% de ARI tuvo una conductividad de 1780 micromhos/cm a 30 ppm de coagulante y 1920 a 80 ppm de coagulante. Los valores de conductividad que se presentan en las mezclas, dependen de las concentraciones en volumen de cada una de las corrientes. Así, para la mezcla de 90% de ARI se espera que tenga un valor mayor de conductividad que las otras, esto debido a que el ARI es la corriente que tiene el valor más alto de conductividad (2190).

6.4.1.5 Turbidez

Las tendencias de las curvas de turbidez para diferentes dosificaciones de sulfato de aluminio se presentan en la figura 5.8. Del análisis previo que se realizó en las pruebas preliminares, antes de la dosificación de coagulante tenemos que los efectos de la acidificación tienden a disminuir la turbidez en la mezcla final por disolución de aluminosilicatos, además de la posible reacción con los bicarbonatos e hidróxidos. De las diferentes mezclas formadas, las que presentan una mayor turbidez son las que tienen mayor volumen de ARI, debido a que ésta corriente es la que tiene mayor cantidad de turbidez (520 NTU).

El análisis de la turbidez en ésta corrida se realizará dividiendo las corrientes en grupos de acuerdo a su comportamiento. El primer grupo de corrientes serán las de 90% y 80% de ARI, las cuales presentan una variación mínima en su valor de turbidez para las dosis de 30, 40 y 50 ppm de coagulante. Los valores que tiene la corriente de 90% de ARI son de 460 NTU para las tres dosis, y los valores que tiene la corriente de 80% de ARI son de 440, 440 y 430 NTU respectivamente. Las ligeras variaciones que presentan los valores de turbidez se deben a que aun y cuando el coagulante contribuye con la turbidez, una parte de él está precipitando la molécula de arcilla-lignina parcialmente desestabilizada, lo cual ocasiona que las variaciones en los valores de turbidez sean pequeños. Después de las 50 ppm de coagulante, en ambas corrientes se presentaron descensos en la turbidez. Los valores a los cuales llegaron ambas mezclas fueron de 230 NTU para 90% de ARI y 210 NTU para 80% de ARI a la dosis de 80 ppm de coagulante. Estas remociones de turbidez se deben a que las dosis del coagulante después de 50 ppm presentan las condiciones adecuadas de contenido de arcilla y coagulante para adsorber y precipitar los coloides de lignina, que eliminan color y como consecuencia eliminan turbidez.

El segundo grupo lo conforma la corriente de 70% de ARI, ésta mezcla aumenta su turbidez al incrementarse las dosis de coagulante de 30 a 50 ppm, los valores de turbidez que se presentaron para estas dos dosis de coagulante fueron de 500 NTU y 570 NTU respectivamente. El efecto de incremento en la turbidez se debe a que una parte de coagulante dosificado permanece en solución lo cual aumenta la turbidez en la mezcla. Después de la dosis de 50 ppm, la turbidez disminuye conforme se incrementa la dosis de coagulante, el valor que se presenta a la dosis de 80 ppm es de 100 NTU. Estas remociones de turbidez se deben a que las dosis del coagulante después de 50 ppm presentan las condiciones adecuadas de contenido de arcilla y coagulante para adsorber y precipitar los coloides de lignina, que eliminan color y como consecuencia eliminan turbidez.

El tercer grupo se conforma por la corriente de 60% en volumen de ARI, la tendencia en ésta mezcla fue de disminuir conforme se incrementó la dosis de coagulante. El valor que tiene la turbidez a la concentración de 30 ppm de coagulante es de 420 NTU y disminuye hasta 60 NTU a dosis de 60 ppm (valor

mínimo), en las dosis de 70 y 80 ppm de coagulante los valores de turbidez que se tuvieron fueron de 100 y 90 NTU respectivamente, una vez más comparando el comportamiento con el de color a estas mismas condiciones encontramos que son muy similares y que corresponde la eliminación de color con la eliminación de turbidez.

6.4.2 Análisis de resultados de la segunda corrida

Esta prueba se llevó a cabo con una disminución del flujo hacia la planta de tratamiento de la corriente proveniente del lavado de los gases del horno de cal. La disminución en la corriente originó una menor cantidad de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, efecto que a su vez disminuye el color, la DQO, la conductividad y la turbidez del ARI. Los valores iniciales para la primera y la segunda corridas se muestran en la tabla 6.1, en donde se representan las disminuciones en los valores anteriormente descritos.

Tabla 6.1 Caracterización de condiciones iniciales

| | Primera corrida | Segunda Corrida |
|------------------------------|-----------------|-----------------|
| Color (Pt-Co) | 2530 | 2230 |
| DQO (ppm) | 1121 | 1013 |
| Conductividad (micromhos/cm) | 2190 | 1760 |
| Turbidez (NTU) | 520 | 380 |
| pH | 8.4 | 8.4 |

6.4.2.1. Color

Los resultados de color que se obtuvieron después de agregarles el coagulante a las diferentes mezclas formadas se representan en la figura 5.9. De esta figura se observa que los comportamientos del color se pueden agrupar en dos categorías.

Un primer grupo de mezclas tiende a elevar su color hasta llegar a un máximo y después desciende, y el otro grupo que desciende su color conforme se incrementa el coagulante. En el primer grupo la mezcla de 90% de ARI incrementa su color en las dosis de 30, 40 y 50 ppm de coagulante, los valores de color que se tienen a estas dosis de coagulante son de 1580, 1620 y 1970 unidades de Pt-Co, respectivamente. La mezcla de 80% de agua residual presenta un incremento ligero de color a las dosis de 30 y 40 ppm de coagulante, los valores de color que se tuvieron fueron de 1890 y 1940 unidades de Pt-Co, respectivamente. Los incrementos de color en ambas mezclas pueden ser debidos a que los contenidos de arcilla en las mezclas son bajos y neutralizan una pequeña cantidad de coloides de lignina los cuales son retirados

por una parte del coagulante, otra parte del coagulante se queda disociado en la solución e incrementa el color aparente final. Para la mezcla de 90% de ARI, a dosis mayores de 50 ppm de coagulante el color disminuye, y presenta una disminución drástica a la dosis de 60 ppm, bajando el color hasta 480 unidades de Pt-Co, los cambios de color a las dosis de 70 y 80 ppm son ligeros y tienen valores de 300 y 160 unidades de Pt-Co respectivamente. En la mezcla de 80% ARI las disminuciones de color se presentan a dosis mayores de 40 ppm de coagulante, la mayor disminución se presenta a la dosis de 60 ppm de coagulante, llegando hasta un valor de 440 unidades de Pt-Co, los valores de color que tiene la mezcla para las dosis de 70 y 80 ppm son 250 y 150 unidades de Pt-Co respectivamente. Al incrementarse la dosis de coagulante en éstas mezclas se terminan de neutralizar las partículas previamente desestabilizadas y moléculas coloidales de lignina, logrando mayores remociones de color.

El segundo grupo corresponde a las mezclas de 70% y 60% de ARI, en éstas mezclas el color descendió conforme se incrementó la dosis de coagulante. Así, para la mezcla de 70% de ARI se tuvo un color de 955 unidades Pt-Co a dosis de 30 ppm de coagulante, y de 175 (valor mínimo) unidades de Pt-Co para la dosis de 70 ppm de coagulante. La mezcla de 60% de ARI presentó niveles bajos en el color a partir de la dosis de 30 ppm de coagulante, el valor de color a estas dosis es de 252 unidades de Pt-Co. A partir de la dosis de 30 ppm y hasta 60 ppm de coagulante, el color desciende hasta llegar a un mínimo de 135 unidades de Pt-Co. Al incrementarse la concentración de arcilla en la mezcla, permite que mayor cantidad de iones coloidales de lignina sean adsorbidos y se formen varios complejos arcilla-lignina, que posteriormente son completamente desestabilizados por el coagulante dosificado. En especial éste efecto se ve más marcado en la mezcla de 60% de ARI, en donde a valores bajos de coagulante se presentan buenas remociones (a 30 ppm de coagulante se tuvo un color de 255 Pt-Co). Un efecto importante que contribuyó con la capacidad de coagulación y sedimentación de la partícula, son las variaciones de pH que se presentaron en las pruebas. Ésta disminuciones en el pH contribuyen con la coagulación y sedimentación de las moléculas coloidales, porque la solubilidad de la mezcla baja conforme decrece el valor del pH. Los valores de pH a los cuales se presentaron las condiciones para la sedimentación de las partículas coloidales fueron de 6.64 para 30 ppm de coagulante y 5.64 para la dosis de 80 ppm.

6.4.2.2 DQO

Los resultados que se tuvieron de DQO para las mezclas se representan en la Fig.5.10, en donde se observa que la DQO disminuyó conforme se incrementó la dosis de coagulante. Las mezclas de 90% y 80% de ARI presentaron disminuciones ligeras a las dosis de coagulante de 30, 40 y 50 ppm. Para la mezcla de 90% de ARI se presentó una disminución de 300 ppm de DQO, teniendo un valor de 590 ppm a la dosis de 50 ppm de coagulante. Para la mezcla de 80% de ARI prácticamente no hubo variación para las dosis de 30, 40

y 50 ppm de coagulante, el valor de DQO en las tres dosis fue del orden de 530 ppm de DQO. Estas ligeras disminuciones se presentan debido a que al existir baja concentración de arcilla en la mezcla y baja dosis de coagulante en la mezcla, cantidades pequeñas de moléculas coloidales serán retiradas. En la dosis de 60 ppm de coagulante ambas mezclas (90% y 80% de ARI) presentan una disminución muy marcada en los valores la DQO, teniendo valores de 409 y 402 ppm de DQO respectivamente. La disminución de DQO es provocada por la cantidad de coagulante dosificada (60 ppm), el cual desestabiliza y precipita una mayor cantidad de complejos arcilla-coloide y coloides de lignina. Para las dosis de 70 y 80 ppm de coagulante, se puede considerar sin cambios en la DQO de la mezcla de 90% de ARI, el valor final que se tuvo fue de 413 ppm de DQO. Para la mezcla de 80% de ARI bajo las mismas dosis de coagulante se presentaron disminuciones ligeras, el valor que se tuvo para 80 ppm de coagulante fue de 351 ppm de DQO. Los efectos de DQO para las dosis de coagulante de 70 y 80 ppm se deben a que se han retirado casi en su totalidad los coloides de lignina que causan color y permanecen en la mezcla algunos compuestos que no originan color (Fig. 3.4), pero que demandan oxígeno para su oxidación.

La DQO de la mezcla de 70% de ARI disminuye conforme la dosis de coagulante se incrementa, las disminuciones son más marcadas a las dosis de coagulante de 30 ppm hasta 50 ppm, éste efecto se debe a que al tener más complejos arcilla-coloide parcialmente desestabilizados se demanda mayor cantidad de coagulante para su coagulación y precipitación, por lo tanto las remociones a 30 ppm (392 ppm de DQO) son menores que a 50 ppm de coagulante (281 ppm de DQO). Después de la dosis de 50 ppm de coagulante los cambios que se presentan en la DQO son prácticamente nulos para la mezcla. Los valores de DQO a las diferentes dosis de coagulante se presentan en la tabla 6.2

Tabla 6.2 Valores de DQO (en ppm) a diferentes dosis de coagulante

| | 30 ppm | 40 ppm | 50 ppm | 60 ppm | 70 ppm | 80 ppm |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 70% ARI | 392 | 333 | 281 | 279 | 284 | 276 |

La DQO de la mezcla de 60% de ARI disminuye conforme se incrementa la dosis de coagulante, las disminuciones son más marcadas a las dosis de coagulante de 30 ppm hasta 60 ppm, éste efecto se debe a que al tener más complejos arcilla-coloide parcialmente desestabilizados se demanda mayor cantidad de coagulante para su coagulación y precipitación, por lo tanto las remociones a 30 ppm (321 ppm de DQO) son menores que a 60 ppm de coagulante (237 ppm de DQO). Después de la dosis de 60 ppm de coagulante los cambios de DQO que se presentan son mínimos. En la tabla 6.3 se presentan los valores de DQO para ésta mezcla.

Tabla 6.3 Valores de DQO (en ppm) a diferentes dosis de coagulante

| | 30 ppm | 40 ppm | 50 ppm | 60 ppm | 70 ppm | 80 ppm |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 60% ARI | 321 | 267 | 254 | 237 | 231 | 239 |

Para las dosis de coagulante en ambas mezclas, en donde ya no se presentan cambios apreciables se presupone que los coloides que origina la DQO ya han sido retirados y por lo tanto las sustancias presentes en la mezcla no pueden ser retiradas por los métodos de coagulación/sedimentación.

6.4.2.3 pH

Los resultados del pH para las diferentes dosis de coagulante se presentan en la figura 5.11. El comportamiento del pH para todas las mezclas fue de disminuir conforme se incrementó la dosis de coagulante. Este comportamiento se genera cuando se forma la sustancia polimérica de hidróxido aluminio, la cual para formarse consume alcalinidad de la mezcla. En los casos en donde no se tiene la suficiente alcalinidad, el pH de la mezcla disminuye por consumo de iones hidroxilo provenientes del agua, y se liberan iones hidronio. Los valores de pH que presentan las aguas residuales industriales se muestran en la tabla 6.4.

Tabla 6.4 Valores de pH a diferentes dosis de coagulante

| | 30 ppm | 40ppm | 50ppm | 60ppm | 70ppm | 80ppm |
|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 90% ARI | 6.72 | 6.55 | 6.22 | 6.16 | 6.04 | 5.56 |
| 80% ARI | 6.62 | 6.55 | 6.41 | 6.29 | 6.09 | 5.98 |
| 70% ARI | 6.53 | 6.54 | 6.44 | 6.24 | 6 | 5.82 |
| 60% ARI | 6.64 | 6.57 | 6.41 | 6.14 | 5.84 | 5.64 |

De los datos obtenidos se observa que en todos los casos, a la dosis de 80 ppm de coagulante y a la dosis de 70 ppm para la mezcla de 60% ARI, se tienen valores de pH menores de 6, estos valores nos indican que a ésta dosificación de coagulante se está consumiendo la alcalinidad que contiene la mezcla y se está disociando el sulfato de aluminio con iones hidroxilo del agua. El efecto de disminución de iones de carbonato, bicarbonato e hidróxido en la corriente, disminuye la alcalinidad y la capacidad amortiguadora de la mezcla, es por estas razones que se presentaron para ésta corrida más valores de pH menores de 6 que en la primera corrida. Las disminuciones mayores que se presentaron en el pH en la segunda corrida, originaron que las remociones de color se incrementaran, éste efecto de aumento de remoción de color puede deberse a que el pH ácido origine la formación de compuestos con menos pigmentación.

Por otro lado estas disminuciones en el pH también generarán la necesidad de una etapa posterior para su ajuste a valores cercanos a 7.

6.4.2.4 Conductividad

El comportamiento que presenta la conductividad se describe en la figura 5.12, en la cual se muestra la tendencia de las mezclas a incrementar su valor de conductividad conforme se incrementa la dosis de coagulante. Este efecto se genera porque al disociarse el sulfato aluminio dosificado se aumenta la cantidad de iones presentes en la mezcla y como consecuencia su conductividad. En la tabla 6.5 se presentan los valores de la conductividad en función de la concentración de ARI en la mezcla y de la dosis de coagulante. En ésta corrida, se vio también el efecto que causó la disminución de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, el rango en el cual se mantuvieron los resultados de conductividad de las diferentes mezclas en ésta segunda prueba fue de 1760 (a 90% ARI y 80 ppm de coagulante) micromhos/cm como máximo y 1330 (a 60% ARI y 30 ppm de coagulante) micromhos/cm como mínimo, que comparado con los valores que se tuvieron en la primera corrida, a estas mismas condiciones fueron menores (2730 máximo y 1780 el mínimo).

Tabla 6.5 Valores de conductividad (en micromhos/cm) a diferentes dosis de coagulante

| | 30 ppm | 40ppm | 50 ppm | 60 ppm | 70 ppm | 80 ppm |
|---------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 90% ARI | 1660 | 1660 | 1680 | 1720 | 1730 | 1760 |
| 80% ARI | 1590 | 1630 | 1630 | 1640 | 1660 | 1670 |
| 70% ARI | 1510 | 1550 | 1570 | 1600 | 1600 | 1600 |
| 60% ARI | 1330 | 1380 | 1430 | 1410 | 1440 | 1460 |

6.4.3.5 Turbidez

Las tendencias que se presentan en la turbidez para ésta prueba se muestran en la figura 5.13. El análisis del comportamiento de resultados se presentará en dos tendencias. Una primera tendencia será para las mezclas que incrementan su valor de turbidez, conforme se aumenta la dosis de coagulante, hasta llegar a un máximo. Después del máximo, las siguientes dosis de coagulante producen una disminución en la turbidez. La segunda tendencia es para las mezclas que disminuyen en sus valores de turbidez conforme se incrementa la dosis de coagulante.

La corriente de 90% de ARI presenta la primera tendencia, y los incrementos de turbidez se presentan en ésta mezcla a las dosis 30, 40 y 50 ppm de coagulante. En la tabla 6.6 se muestran los valores de turbidez para estas dosis de

coagulante, en donde se observa que el máximo se presenta a 50 ppm de coagulante y tiene un valor de turbidez de 360 NTU. Estos incrementos en la turbidez se deben a la presencia de coagulante en la mezcla que se queda disociado.

Tabla 6.6 Valores de turbidez (en NTU)

| | 30 ppm | 40 ppm | 50 ppm |
|---------|--------|--------|--------|
| 90% ARI | 300 | 320 | 360 |

Después de la dosis de 50 ppm de coagulante, disminuyeron los valores de la turbidez conforme se incrementó la dosis del coagulante. Este efecto se debe a que las cantidades de coagulante que se dosifican, son suficientes para neutralizar y precipitar los complejos arcilla-coloides y de coloides de lignina. Mientras mayor es la cantidad de coagulante dosificado se tendrá un mayor consumo de la alcalinidad, menor será la turbidez de la mezcla por éste efecto, pero además se retirará mayor cantidad de coloides de lignina, acción que disminuirá más el valor. Los valores a los cuales se presenta la disminución en la turbidez se presentan en la tabla 6.7. En ésta tabla se observa que el menor valor de turbidez de la mezcla se presenta a la dosis de 80 ppm de coagulante.

Tabla 6.7 Valores de turbidez (en NTU)

| | 60 ppm | 70 ppm | 80 ppm |
|---------|--------|--------|--------|
| 90% ARI | 170 | 70 | 40 |

El segundo grupo de análisis lo conforman las mezclas de 80%, 70% y 60% de ARI, en éstas mezclas la turbidez disminuyó conforme se incrementó la dosis de coagulante. Los valores de turbidez para cada mezcla a las diferentes dosis de coagulante se muestran en la tabla 6.6. De éstos valores se observa que las mezclas de 70% y 60% de ARI disminuyen más rápidamente su turbidez que la mezcla de 80% de ARI. A las dosis de coagulante de 30,40 y 50 ppm, las mezclas de 60% y 70% de ARI disminuyen rápidamente su turbidez, el valor que tiene cada mezcla a la dosis de 50 ppm es de 68 NTU para la mezcla de 70% de ARI y de 29 NTU para mezcla de 60% de ARI. Este efecto de la disminución rápida es propiciado por el aumento en las concentraciones de arcilla en la mezcla, la cual adsorberá una gran cantidad de coloides de lignina, y las necesidades de coagulante para desestabilizar son relativamente bajas (50 ppm).

Tabla 6.8 Valores de turbidez (en NTU)

| | 30 ppm | 40 ppm | 50 ppm | 60 ppm | 70 ppm | 80 ppm |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 80% ARI | 370 | 340 | 290 | 100 | 60 | 50 |
| 70% ARI | 255 | 153 | 68 | 60 | 60 | 60 |
| 60 % ARI | 260 | 62 | 29 | 26 | 36 | 49 |

Después de la dosis de 50 ppm en ambas mezclas se considera que las variaciones en la turbidez son mínimas, esto indica que los compuestos que originan turbidez, han sido removidos y que la turbidez remanente puede ser causada por el coagulante dosificado que permanece en solución.

La mezcla de 80 ppm de ARI presenta disminuciones en la turbidez más ligeras que las mezclas de 70% y 60% de ARI. Así, para el intervalo de 30 a 50 ppm de coagulante disminuye 80 NTU, éste efecto se debe a las relativas bajas concentraciones de arcilla en la mezcla y las bajas dosis de coagulante, lo que provoca que no se desestabilicen grandes cantidades de coloides de lignina y que después del tratamiento aun se encuentren en solución, además de que permanecen en la mezcla iones de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y sulfatos. En el intervalo de 50 a 60 ppm de coagulante se presenta una mayor remoción de turbidez, la disminución se presentó de 290 a 100 NTU respectivamente. Esta disminución es debida a que al aumentar la dosis de coagulante, para formar las sustancias poliméricas de hidróxido de aluminio consumen alcalinidad y remueve mayor cantidad de complejos arcilla-coloide y coloides de lignina, estos dos efectos disminuyen la turbidez de la mezcla. En el último intervalo de 60 ppm a 80 ppm dosis de coagulante se observan nuevamente variaciones ligeras de turbidez, la disminución que se presenta en éste rango es de 50 NTU y es debida a la desestabilización de los coloides de lignina por efecto del coagulante, el valor remanente de turbidez en la mezcla esta asociado con las dosis de coagulante.

6.4.3 Análisis comparativo de los resultados de las pruebas finales

Este análisis comparativo que se realizará para ambas corridas, es realizado, por los marcados cambios que se presentan en los resultados finales de las mezclas, por efecto de la disminución en la corriente de lavado de gases del horno de cal. Esta disminución también trajo como consecuencia una modificación en los parámetros iniciales de las corrientes. En la tabla 6.7 se reportan los resultados de los análisis iniciales para éstas dos corrientes, ahí se muestra que las disminuciones en los diferentes parámetros de la segunda corriente bajaron; para color 300 unidades Pt-Co, DQO 108 ppm, conductividad 430 micromhos/cm y turbidez 140 NTU. El pH aun y cuando no presentó variación en las dos corrientes (8.4), se ajustó a valores de 6.1 y 6.2 para la primera y segunda corrida respectivamente. En ambos casos se prepararon las mezclas a las mismas concentraciones de ARI y AP (de 90% a 60% de ARI), y

se realizó la prueba de jarras con el mismo rango de dosis de coagulante (de 30 ppm a 80 ppm). Los resultados de las pruebas realizadas en los rangos descritos se reportaron en las tablas 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15. El análisis comparativo de estas dos corrientes se realizará sobre la mezcla de 60% de ARI y 40% de AP en el rango de dosis de coagulante de 30 a 80 ppm, este análisis se propone en esta mezcla pero puede ser aplicado en cualquier otra concentración de ARI.

De los resultados obtenidos de las pruebas y reportados en la tabla 6.7, se puede observar claramente que la primera corrida que tiene un mayor contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, presenta menores remociones de color que la segunda corrida. En los resultados se observa que el color mínimo alcanzado (420 Pt-Co) a la dosis de 60 ppm es superior aun al valor máximo que se presentó en la segunda corrida de 252 Pt-Co a dosis de 30 ppm. La disminución en la capacidad de eliminar color para las concentraciones de arcilla y dosis de coagulante, se atribuye a que los iones de $\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^- y OH^- que se encuentran presentes en la mezcla, interfieren en el proceso de adsorción del coloide de lignina en la arcilla. La interferencia en la adsorción se debe a dos factores fundamentalmente; el primer factor es que **presentan una barrera entre la arcilla y el coloide** y el segundo factor es que los iones de $\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^- y OH^- también presentan una **carga negativa, que competirá por la carga positiva de la arcilla.**

En la DQO, se presentan también valores menores en la segunda corrida. El valor mínimo de DQO en la primera corrida a la dosis de 80 ppm de coagulante fue de 331 ppm, este valor es mayor que el valor de 321 ppm de DQO para la dosis de coagulante que se tuvo en la segunda corrida. Esta diferencia de capacidad de eliminar DQO en las dos mezclas, está directamente asociada con el proceso de eliminación de color, debido que algunos de los compuestos que están demandando DQO, también causan la pigmentación. Por lo que al impedir los iones de $\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^- y OH^- la adsorción de coloides de lignina, también se está impidiendo la disminución en la DQO.

Los resultados de conductividad que se obtuvieron, nos indican que la primera corrida tiene valores mayores de conductividad que la segunda corrida. Los valores mínimo y máximo que se tuvieron para las dosis de 30 y 80 ppm de coagulante fueron de 1780 y 1920 micromhos/cm respectivamente, mientras que para la segunda corrida, a las mismas dosis de coagulante se tuvieron 1330 y 1460 micromhos/cm respectivamente. La primera mezcla se mantuvo en un intervalo mayor de conductividad, debido a la presencia de los iones de $\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^- y OH^- que influyen directamente sobre éste parámetro. El incremento que se presenta conforme aumenta la dosis de coagulante, se debe a los iones sulfato que liberan cuando se forman las especies poliméricas de hidróxido de aluminio.

Tabla 6.7 Comparación de resultados de la mezcla de 60% de ARI, para la primer y segunda corrida

| | Primera corrida | | Segunda corrida | | Resultados de la primera corrida | | Resultados de la segunda corrida | |
|------------------------------|-----------------------|------|-----------------------|------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|
| | Condiciones iniciales | | Condiciones iniciales | | (mezcla de 60% ARI) | | (mezcla de 60% ARI) | |
| | ARI | AP | ARI | AP | Máximo | Mínimo | Máximo | Mínimo |
| Color (Pt-Co) | 2530 | 3150 | 2230 | 3150 | 2400 a 30 ppm | 420 a 60 ppm | 252 a 30 ppm | 175 a 60 ppm |
| DQO (ppm) | 1121 | --- | 1013 | --- | 613 a 30 ppm | 331 a 80 ppm | 321 a 30 ppm | 237 a 60 ppm |
| Conductividad (Micromhos/cm) | 2190 | 155 | 1760 | 140 | 1920 a 80 ppm | 1780 a 30 ppm | 1460 a 80 ppm | 1330 a 30 ppm |
| Turbidez (NTU) | 520 | 465 | 380 | 465 | 420 a 30 ppm | 60 a 60 ppm | 260 a 30 ppm | 26 a 60 ppm |
| pH | 6.1 | 7.7 | 6.2 | 7.7 | 6.51 a 30 ppm | 5.75 a 80 ppm | 6.64 a 30 ppm | 5.64 a 80 ppm |

Para la turbidez se observa que la primera corrida tiene mayores valores que la primera. Los valores máximo y mínimo que se tuvieron en la primera corrida a las dosis de 60 y 30 ppm de coagulante fueron 420 y 60 NTU respectivamente, mientras que para la segunda corrida a estas mismas dosis de coagulante se tuvieron 260 y 26 NTU. Esta diferencia en los valores que se obtuvieron, se debió nuevamente a la mayor cantidad de CO_3^{2-} , HCO_3^- y OH^- , en la primera corrida, los cuales generan más turbidez en la mezcla.

Los valores que se presentaron de pH en ambas corridas son muy similares. Así, para la primer corrida el valor máximo 6.51 unidades se presentó a la dosis de coagulante de 30 ppm, y el valor mínimo de 5.75 se presentó a la dosis de 80 ppm. En la segunda corrida se tuvieron los valores, de 6.64 máximo y 5.64 mínimo a las dosis de coagulante de 30 y 80 ppm respectivamente. El valor menor que se tiene en la segunda corrida se debe a la disminución en los iones de CO_3^{2-} , HCO_3^- y OH^- , los cuales con su capacidad amortiguadora contribuyen a mantener el pH de la mezcla. Un comentario que es importante realizar es que se está analizando las corridas con valores máximos y mínimos, pero para éste caso del pH, en general los valores de la segunda corrida fueron menores a los valores de la primera corrida, efecto que se atribuye a la disminución en la capacidad amortiguadora de la mezcla.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos y después de haber realizado el análisis de los mismos, concluimos que:

1. La adición de la arcilla halloysita 7a contribuye a la desestabilización de los coloides de la lignina y sus derivados, a través de la adsorción química y neutralización de la carga. La ruptura de la arcilla genera cargas parcialmente positivas y negativas en su estructura. De acuerdo con el pH que se tiene en la mezcla, las cargas parciales negativas van a ser satisfechas por los iones hidrógeno, quedando libres las cargas positivas para realizar la adsorción de los coloides negativos de lignina.
2. La desestabilización de la partícula no es total, debido que aun y cuando crece su tamaño, todavía tiene carga eléctrica remanente provocada por la carga de la arcilla que impide su sedimentación.

3. La eficiencia de remoción se incrementa conforme se aumenta la concentración de arcillas en las mezclas de ARI y AP.
4. El sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ dio resultados positivos para la desestabilización total de la partícula. Los polímeros catiónicos y aniónicos no logran la desestabilización total de la partícula.
5. A bajas concentraciones de arcilla (10% de ARI) y bajas dosis de coagulante (<50 ppm), no se presenta remoción de color, porque las concentraciones de arcilla y dosificaciones de coagulante no son suficientes para desestabilizar la molécula coloidal de lignina.
6. Al retirar las moléculas coloreadas de coloides de lignina, se tiene una disminución de la DQO del ARI.
7. Los carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos presentes en la corriente de lavado de los gases del horno de cal, interfieren con la capacidad de la arcilla y del coagulante para desestabilizar moléculas coloidales de lignina, efecto que se nota en la segunda corrida de las pruebas finales.
8. El mecanismo imperante para la eliminación de los complejos arcilla-coloides, y los coloides de lignina, es el barrido. Efecto que se puede observar en las figuras 5.1, 5.4 y 5.9. En donde a bajas concentraciones de arcilla el barrido se presenta a dosis grandes coagulantes (>50 ppm), y a altas concentraciones de arcilla el barrido se presenta a bajas dosis de coagulante (< 60 ppm), lo cual es característico de éste mecanismo.
9. El tratamiento de las aguas residuales industriales provenientes de la industria de celulosa y papel, por medio de la arcilla y el coagulante, permitirá la eliminación de color y de una gran carga contaminante al cuerpo receptor.

7.2 Recomendaciones

Con base en la información obtenida de la experimentación se realiza ésta serie de recomendaciones:

1. Para la desestabilización del coloides de lignina se debe de suministrar arcilla Halloysita 7a, al tanque de premezclado (TQE) de la planta de tratamiento de agua residual.
2. Se debe de dosificar sulfato de aluminio a la mezcla formada, antes de alimentarse al sedimentador primario (SEPRI).
3. Debido a los efectos adversos que causan los compuestos de la corriente del horno de cal, sobre la desestabilización y precipitación de los coloides de lignina, se propone que la corriente sea tratada de forma independiente.

Las recomendaciones planteadas, generan una nueva propuesta de tratamiento, la cual se describe a continuación.

7.2.1 Propuesta de tratamiento.

Con base en los análisis realizados de las diferentes pruebas, encontramos que debido a la interferencia que causan en la adsorción de los coloides de lignina los iones de; carbonato, bicarbonato e hidróxido, es necesario separar la corriente del Horno de cal y darle un tratamiento separado. Esta condición nos lleva a proponer el arreglo para la planta de tratamiento mostrado en la figura 7.1

Este nuevo arreglo permitirá tener mejores condiciones de tratamiento en el sedimentador primario (SEPRI) por disminución del pH, que como se analizó en las pruebas realizadas debe de estar entre 6.1 y 6.3 en el ARI. Este mismo arreglo permitirá disminuir el consumo de HCl para acidificación como consecuencia de la eliminación de la corriente proveniente del horno de cal.

La eliminación de la corriente proveniente de los gases de lavado del horno de cal nos llevó a realizar una serie de pruebas de sedimentación de los sólidos que contiene esta corriente para proponer un diseño preliminar del sedimentador que tratará esta corriente. El área para lograr la sedimentación de los sólidos es de 175 m^2 y el diámetro es de 15 m . La memoria de calculo del diseño se presenta en el apéndice E

Después del tratamiento que se les aplica a las mezclas con arcilla en el sedimentador primario, el pH final de la solución tiende a disminuir a valores que se están entre 6.64 y 5.64, por lo que es necesario se considere una etapa de ajuste del pH a valores cercanos a 7, para que las lagunas trabajen adecuadamente. Antes de la etapa de ajuste se puede tener un incremento en el pH del sobreflujo del SEPRI, si se le une el sobreflujo del sedimentador del horno de cal (SEHOC). Los sólidos producidos en ambos sistemas de sedimentación pueden unirse y enviarse a un sistema de tratamiento de lodos para su posterior disposición.

El arreglo propuesto está considerando que la corriente arcillosa será adicionada de la purga de la presa, pero en caso de que existieran problemas por el uso de la corriente, se propone la búsqueda de un banco de material arcilloso para ser dosificado en el tanque de premezclado (TQE).

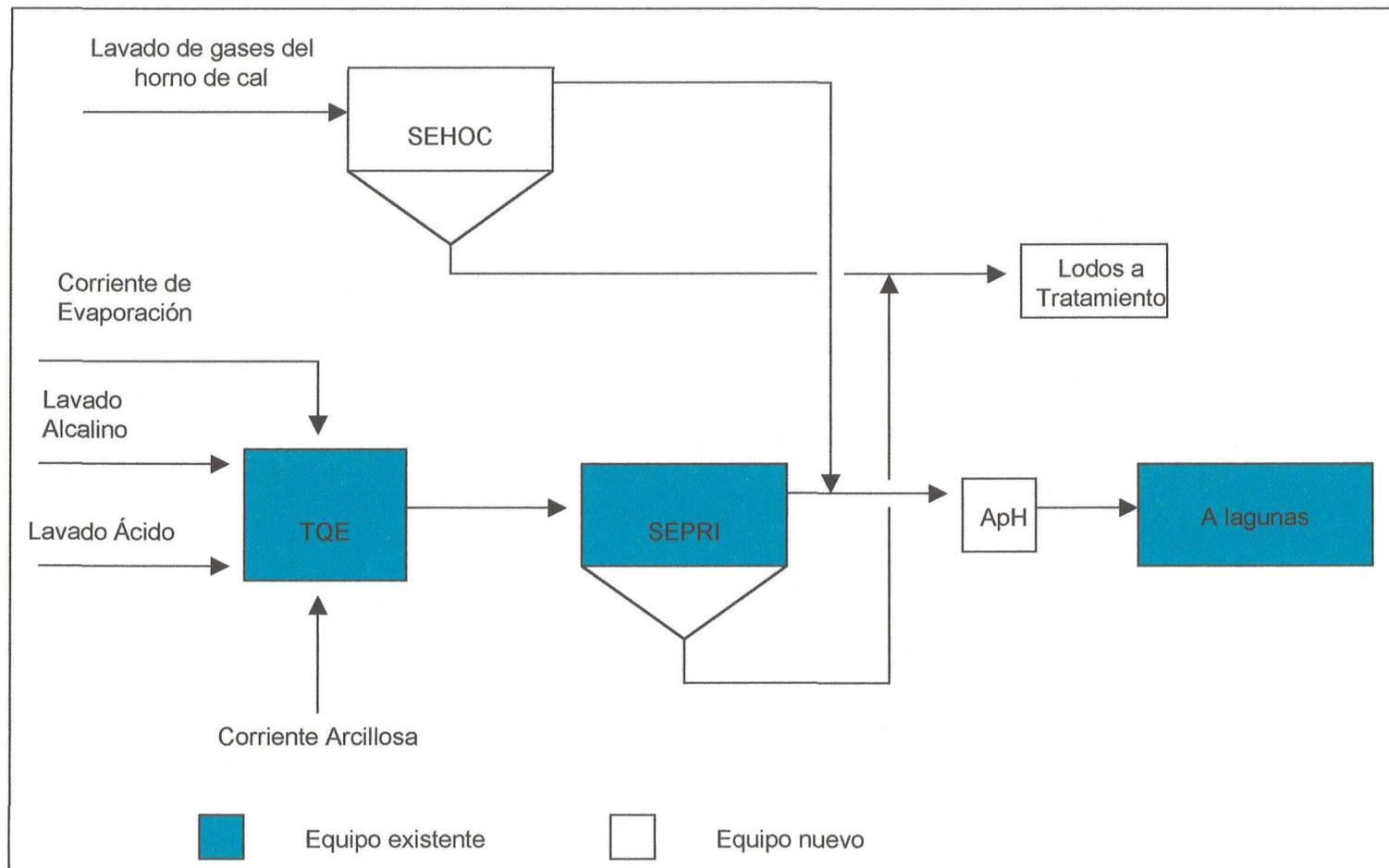


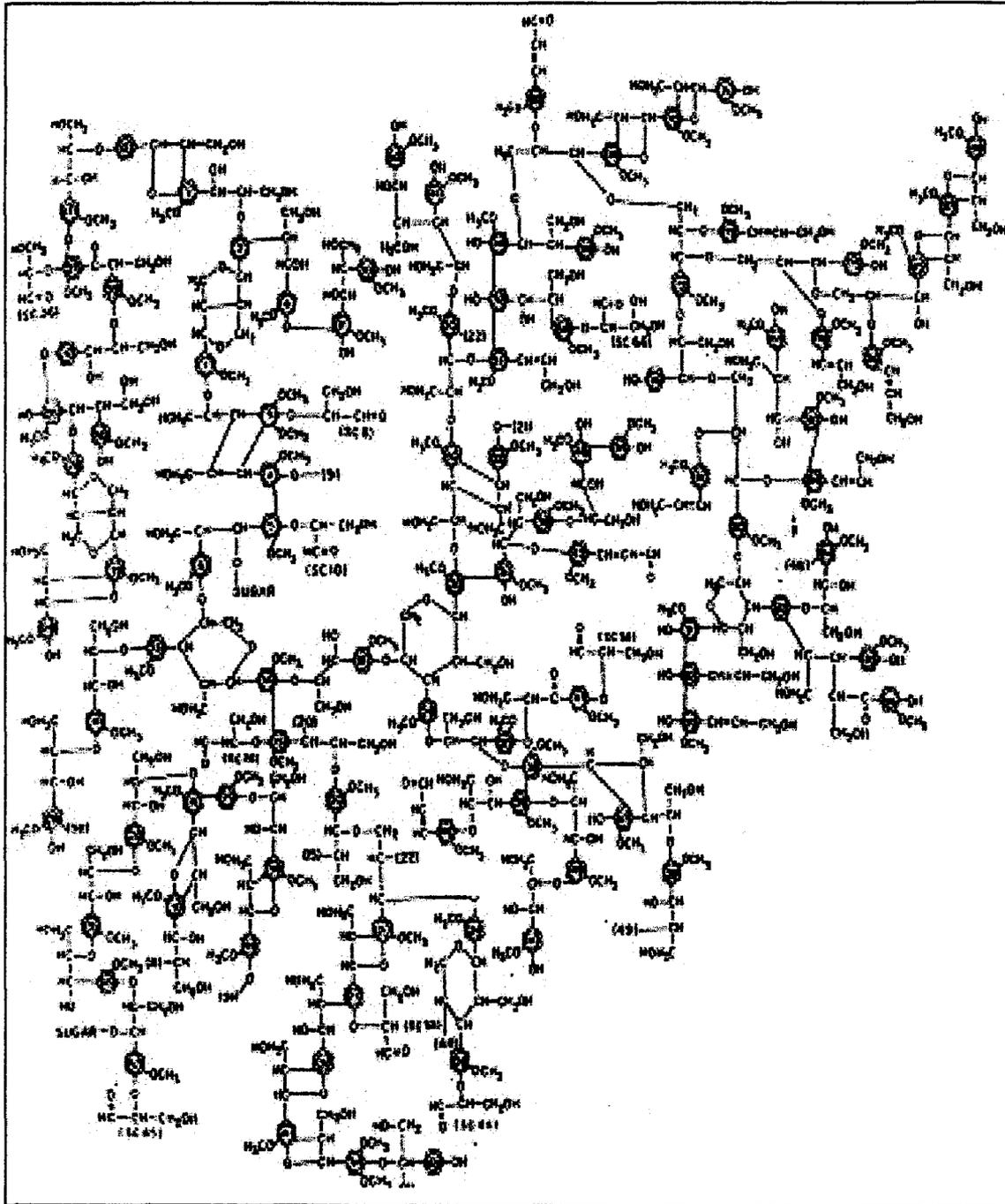
Fig.7.1 Propuesta de Tratamiento

Bibliografía

- 1) Fuente Organización Mundial de la Salud (OMS)
- 2) Enciclopedia "Tratamiento Universal del Medio Ambiente". Volumen 8 Primera edición. Rezza Editores. 1993
- 3) W Ryan. "Properties of ceramic raw materials". North Staffordshire Polytechnic, England. Pergamon Press. 2nd Edition.
- 4) Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (1992)
- 5) Estadísticas del medio ambiente (INEGI), 1997
- 6) Van Nostrand Reinhold Company. Handbook of Pulp and Paper Technology. Edited by Kenneth W. Britt. Second Edition 1970.
- 7) D.Fengel, G. Wegener, " Wood, Chemistry Ultraestructure Reactions" Editorial Walter de Gruyter Berlin. New York. 1989.
- 8) Walter, J., Weber Jr. "Coagulación y Floculación" Control de Calidad de Agua Procesos Fisico-químicos. Ed. Reverté S.A., Primera edición, 1979 pp. 64-112.
- 9) Caserio., Robert., Stewart. "Química Orgánica". Editorial Interamericana

- 10) LaMer, V.K. y Healy, T.W., " Adsorption-floculation Reactions of Macromolecules at the Solid-Liquid interface", Rev. Pure App. Chem., 13, 112-132 (1963).
- 11) R. Dyer John. "Aplicaciones de Espectroscopia de Absorción en Compuestos Orgánicos". Editorial Prentice /Hall Internacional, Primera edición. 1973.
- 12) A. Amirtharajah and Kirk M. Mills. " Rapid-mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation. AWWA. 1982.
- 13) Hernández Sampieri Roberto, Fernández Collado Roberto, Baptista Lucio Pilar, Metodología de la Investigación, ed. Mc Graw Hill, primera edición, 1991.
- 14) Richard L. Sheaffer, James T. McClave, "Probabilidad y Estadística para Ingeniería", ed. Grupo editorial Iberoamérica, primera edición, 1993.
- 15) Domenech Xavier. "Química del suelo". El impacto de los contaminantes. Editorial Miraguano Ediciones, primera edición 1995.
- 16) Cepeda Dovala Juan Manuel. "Química de Suelos". Editorial Trillas, segunda edición 1991.
- 17) Bohn Hinrichl, McNeal Brian L., O' Connor George A. "Química del suelo". Editorial Noriega editores, primera edición 1993.
- 18) T. Herrera, M. Ruiz Oronoz. "Botánica Criptogámica". Editorial ECLALSA, México, primera edición 1968.
- 19) Manual de Caracterización de Aguas Residuales. 1986
- 20) Norma Mexicana NMX-AA-003 Aguas Residuales – Muestreo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980.
- 21) Norma Mexicana NMX-AA-004 Aguas – Determinación de sólidos sedimentables en aguas residuales – Método del cono Imhoff, publicada en el diario oficial de la Federación el 13 de septiembre de 1977.
- 22) Norma Mexicana NMX-AA-005 Aguas – Determinación de grasas y aceites – Método de extracción soxhlet, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de agosto de 1980.
- 23) Norma Mexicana NMX-AA-007 Aguas – Determinación de la Temperatura - Método visual con termómetro, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 julio de 1980.

- 24) Norma Mexicana NMX-AA-008 Aguas – Determinación de pH – Método potenciométrico, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980.
- 25) Norma Mexicana NMX-AA-028 Aguas – Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno – Método de incubación por diluciones, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de julio de 1981.
- 26) Norma Mexicana NMX-AA-030 Aguas – Determinación de Demanda Química de Oxígeno, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de noviembre de 1992.
- 27) Norma Mexicana NMX-AA-034 Aguas – Determinación de sólidos en agua – Método gravimétrico, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de julio de 1981.
- 28) Norma Mexicana NMX-AA-038 Aguas – Determinación de Turbiedad, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de noviembre de 1992.
- 29) Norma Mexicana NMX-AA-045 Aguas – Determinación de Color, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de julio de 1981.



Diseño computarizado de la molécula de Lignina

Caracterización de las corrientes que llegan al tanque de premezcla y después de cada etapa en la planta de tratamiento.

| DBO5 (ppm) | | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Muestreos | | | | |
| Punto de Muestreo | Primero | Segundo | Tercero | Cuarto |
| Descarga de LAGEST | 99 | 92 | 88 | 90 |
| Descarga de LAGAIR | 113 | 147 | 119 | 118 |
| Descarga del SEPRI | 365 | 410 | 386 | 381 |
| Alimentación al SEPRI | 395 | 390 | 473 | 380 |
| Lavado de Gases | 241 | 241 | 152 | 268 |
| Corriente de Evaporac. | 565 | 240 | 317 | 361 |
| Lavado Alcalino | 385 | 370 | 249 | 328 |
| Lavado Acido | 121 | 183 | 75 | 118 |

| DQO (ppm) | | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Muestreos | | | | |
| Punto de Muestreo | Primero | Segundo | Tercero | Cuarto |
| Descarga de LAGEST | 540 | 621 | 450 | 466 |
| Descarga de LAGAIR | 609 | 724 | | |
| Descarga del SEPRI | 988 | 882 | 550 | 956 |
| Alimentación Al SEPRI | 529 | 879 | 550 | 956 |
| Lavado de Gases | 385 | 290 | 760 | 539 |
| Corriente de Evaporac. | 1200 | 1121 | 1240 | 2173 |
| Lavado Alcalino | 1569 | 1967 | 1433 | 1274 |
| Lavado Acido | 814 | 924 | 850 | 1005 |

| Conductividad Eléctrica | | | | |
|-------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Muestreos | | | | |
| Punto de Muestreo | Primero | Segundo | Tercero | Cuarto |
| Descarga de LAGEST | 2030 | 1930 | 1894 | 1930 |
| Descarga de LAGAIR | 1776 | 2140 | 1911 | 1860 |
| Descarga del SEPRI | 1654 | 1864 | 1768 | 1500 |
| Alimentación al SEPRI | 1541 | 1668 | 1708 | 1470 |
| Lavado de Gases | 3290 | 6410 | 5090 | 2730 |
| Corriente de Evaporac. | 246 | 375 | 326 | 350 |
| Lavado Alcalino | 2150 | 2020 | 1890 | 2340 |
| Lavado Acido | 3170 | 3910 | 4800 | 3090 |

| Sodio Na+ (mg/Lt) | | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Muestreos | | | | |
| Punto de Muestreo | Primero | Segundo | Tercero | Cuarto |
| Descarga de LAGEST | 248 | 263 | 259 | 256 |
| Descarga de LAGAIR | 252 | 283 | 251 | |
| Descarga del SEPRI | 238 | 265 | 235 | 208 |
| Alimentación al SEPRI | 214 | 161 | 197 | 193 |
| Lavado de Gases | 190 | 95 | 182 | 180 |
| Corriente de Evaporac. | 16 | 59 | 97 | 15 |
| Lavado Alcalino | 498 | 470 | 412 | 425 |
| Lavado Acido | 141 | 138 | 98 | 131 |

| Alcalinidad (mg/Lt) | | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Muestreos | | | | |
| Punto de Muestreo | Primero | Segundo | Tercero | Cuarto |
| Descarga de LAGEST | 400 | 450 | 369 | 398 |
| Descarga de LAGAIR | 450 | 400 | 310 | 266 |
| Descarga del SEPRI | 450 | 300 | 280 | 310 |
| Alimentación al SEPRI | 450 | 400 | 266 | 325 |
| Lavado de Gases | | | | |
| Corriente de Evaporac. | 250 | 350 | 236 | 148 |
| Lavado Alcalino | | 369 | 443 | 443 |
| Lavado Acido | 150 | 250 | 325 | |

| Temperatura (°C) | | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Muestreos | | | | |
| Punto de Muestreo | Primero | Segundo | Tercero | Cuarto |
| Descarga de LAGEST | 31 | 31 | 30 | 28 |
| Descarga de LAGAIR | 37 | 38 | 38 | 37 |
| Descarga del SEPRI | 49 | 50 | 49 | 48 |
| Alimentación al SEPRI | 50 | 51 | 50 | 50 |
| Lavado de Gases | 49 | 46 | 52 | 50 |
| Corriente de Evaporac. | 57 | 57 | 55 | 55 |
| Lavado Alcalino | 64 | 65 | 62 | 61 |
| Lavado Acido | 45 | 44 | 45 | 43 |

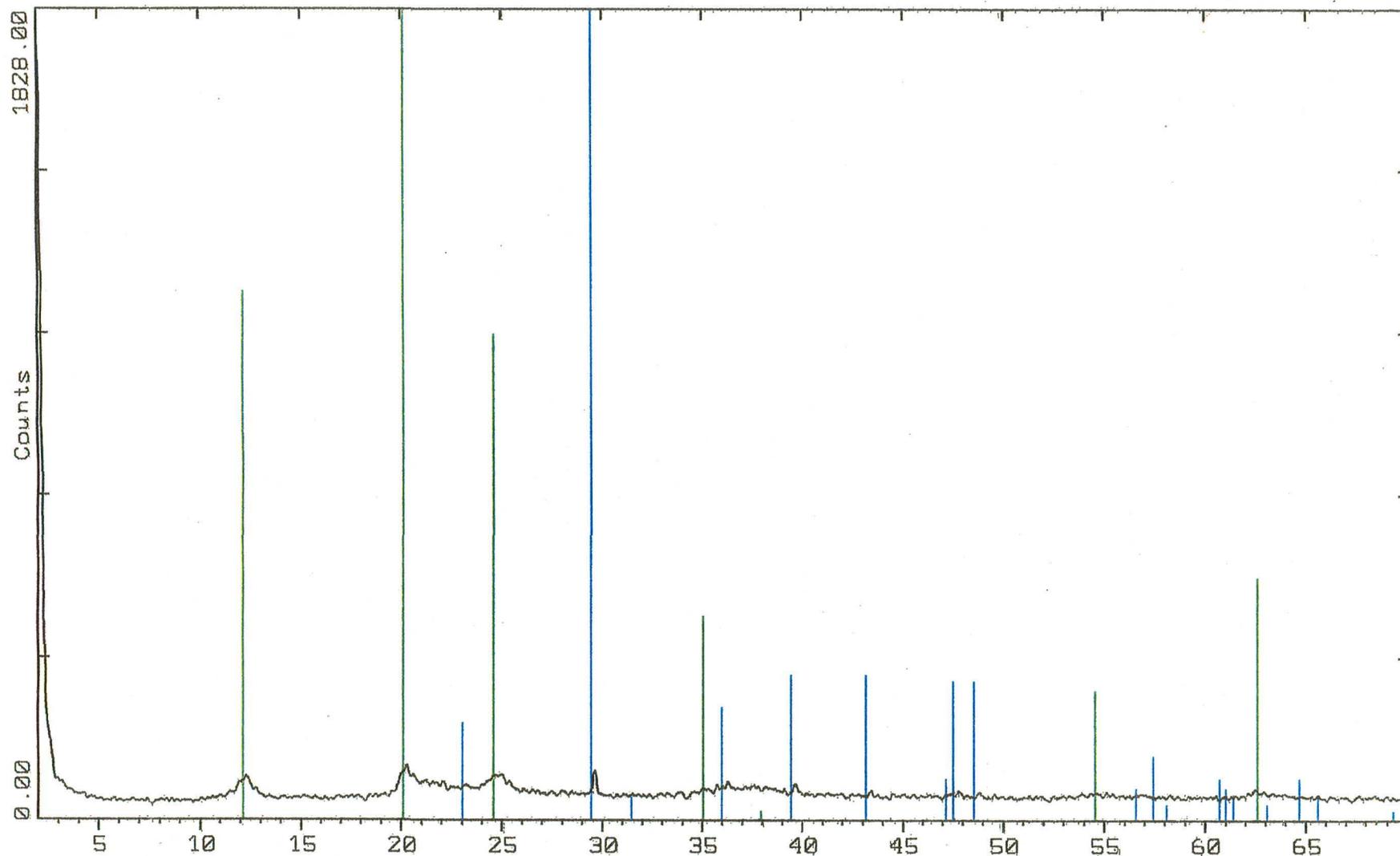
| Sólidos Totales (mg/Lt) | | | | |
|----------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Muestras | | | | |
| Punto de Muestreo | Primero | Segundo | Tercero | Cuarto |
| Descarga de LAGEST | 1480 | 1560 | 1520 | 1360 |
| Descarga de LAGAIR | 1560 | 1600 | 1720 | 2120 |
| Descarga del SEPRI | 1320 | 1200 | 1640 | 1450 |
| Alimentación al SEPRI | 1440 | 1360 | 1120 | 1250 |
| Lavado de Gases | 1680 | 1640 | 1420 | 1350 |
| Corriente de Evaporac. | 480 | 360 | 360 | 350 |
| Lavado Alcalino | 1040 | 2280 | 2520 | 1460 |
| Lavado Acido | 2400 | 2160 | 1680 | 1520 |

| Sólidos Sedimentables (ml/Lt) | | | | |
|----------------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Muestras | | | | |
| Punto de Muestreo | Primero | Segundo | Tercero | Cuarto |
| Descarga de LAGEST | 0 | 0.9 | 0.8 | 0.4 |
| Descarga de LAGAIR | 0 | 5.2 | 0.6 | 0.2 |
| Descarga del SEPRI | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.4 |
| Alimentación al SEPRI | 6.5 | 10 | 9 | 13 |
| Lavado de Gases | 9.5 | 22 | 21.5 | 15 |
| Corriente de Evaporac. | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0 |
| Lavado Alcalino | 2.7 | 1.2 | 0.9 | 1 |
| Lavado Acido | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.5 |

| Sólidos Disueltos (mg/Lt) | | | | |
|------------------------------|---------|---------|---------|--------|
| Muestras | | | | |
| Punto de Muestreo | Primero | Segundo | Tercero | Cuarto |
| Descarga de LAGEST | 1302 | 1344 | 1338 | 1320 |
| Descarga de LAGAIR | 1342 | 1340 | 1480 | 1823 |
| Descarga del SEPRI | 1122 | 1353 | 1460 | 1350 |
| Alimentación al SEPRI | 1332 | 1210 | 1000 | 1250 |
| Lavado de Gases | 1908 | 1378 | 1360 | 900 |
| Corriente de Evaporac. | 375 | 281 | 350 | 330 |
| Lavado Alcalino | 1958 | 2189 | 2419 | 1800 |
| Lavado Acido | 2280 | 2044 | 1596 | 1800 |

2-Theta - Scale

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE H. 21-May-1998 14:30



C:\USERDATA\ARC-ROJA.RAW ARC-ROJA (CT: 0.6s, SS:0.020dg, WL: 1.5406Ao, Phi: *****)
29-1487 * Al2Si2O5(OH)4 Halloysite-7A(WL: 1.5406Ao)
5-0586 * CaCO3 Calcite, syn(WL: 1.5406Ao)

Apéndice C

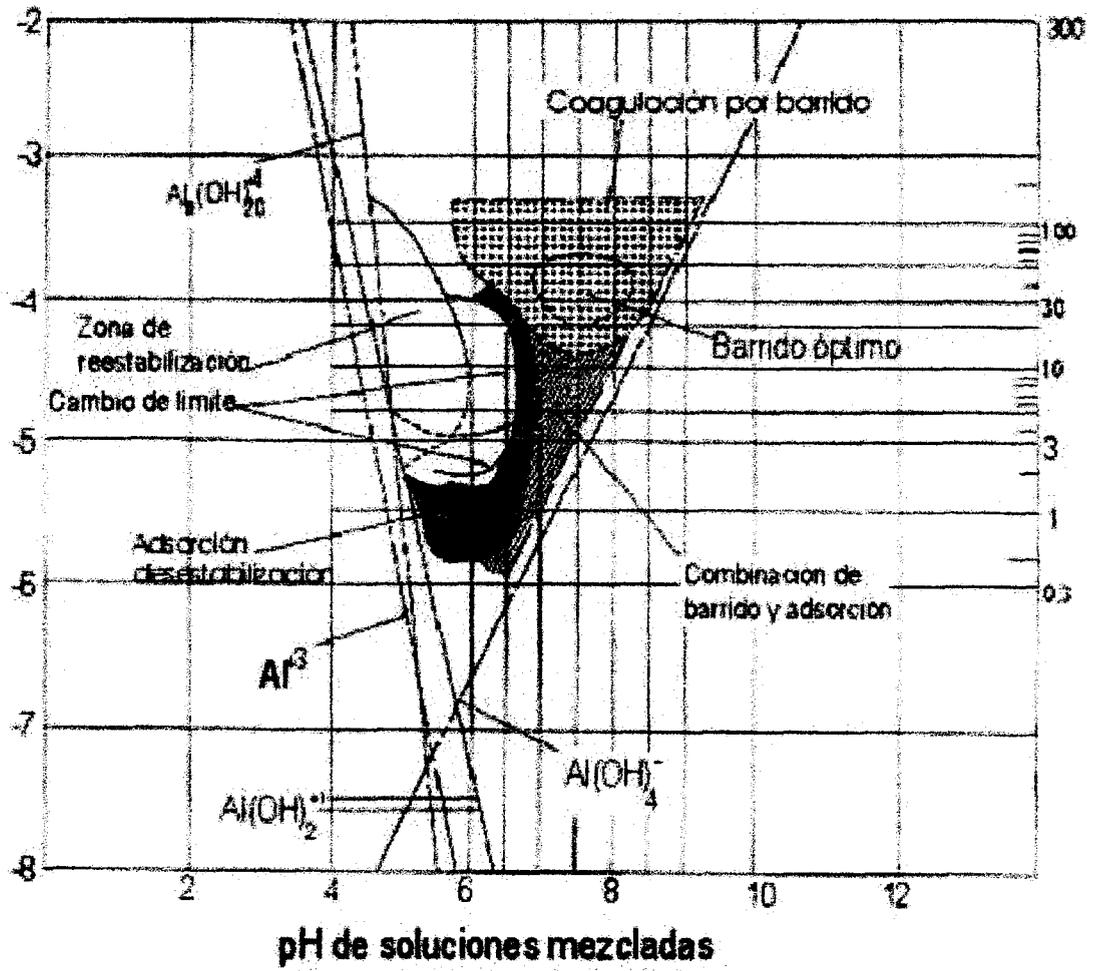


Diagrama de Solubilidad de Sulfato de Aluminio

Diseño preliminar del equipo de sedimentación (SEHOC) para la corriente proveniente del Horno de cal.

El tratamiento que se le debe de dar a la corriente es a través de un sedimentador, por lo que para diseñarlo se corrieron las pruebas de velocidad de sedimentación a una concentración de sólidos totales de 2322 ppm.

Diseño del sedimentador del horno de cal

Concentración de Sólidos = 2322 mg/lit

Velocidad de sedimentación:

$h = 35.8 \text{ cm} = 0.358 \text{ m}$

$t = 30 \text{ min.} = 0.5 \text{ hrs}$

$$v_s = \frac{0.358 \text{ m}}{0.5 \text{ hrs}} = 0.716 \text{ m/hr}$$

$c_s = 0.716 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$

Flujo del horno = $3,000 \text{ m}^3/\text{día}$
 $= 125 \text{ m}^3/\text{hr}$

Area = $(125 \text{ m}^3/\text{hr}) / (0.716 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}) = 174.58 \text{ m}^2$

$V = 349.16 \text{ m}^3$

$\theta = (349.16 \text{ m}^3) / (125 \text{ m}^3/\text{hr}) = 2.79 \text{ hrs}$

$$D = \sqrt{(4^3/\pi)} = \sqrt{((4 \cdot 174.58)/3.1416)} = 14.91 \text{ m}$$

Con la modificación de la corriente del horno de cal y la adición de la corriente arcillosa, el flujo total a tratar se modifica, por lo que es necesario realizar los balances de adición de sulfato de aluminio por flujo y dosificación.

Cálculo de las TPD de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ adicionado en las diferentes concentraciones

considerando como base de producción de aguas residuales 21,000 m³/día.

Mezcla 90 % — 10 %

$$Q_{\text{CRISOBA}} = 21,000$$

$$Q_{\text{MEZCLA}} = 21,000 / 0.9 = 23,333.3 \text{ m}^3/\text{día}$$

Ejemplo de cálculo:

$$23,333.3 \text{ m}^3/\text{día} * 20 \text{ g/m}^3 = \underline{466,666.67 \text{ g/día}} \text{ de coagulante}$$

$$= 0.47 \text{ TPD}$$

El resumen de los resultados de los balances se encuentra representado en la siguiente tabla. La zona sombreada nos indica los niveles a los cuales el coagulante presenta el nivel máximo de remoción.

| Conc. ppm | 90 % | 80 % | 70 % | 60 % |
|-----------|------|-------|------|------|
| 20 | 0.47 | 0.525 | 0.60 | 0.7 |
| 30 | 0.67 | 0.786 | 0.90 | 1.05 |
| 40 | 0.93 | 1.050 | 1.20 | 1.40 |
| 50 | 1.17 | 1.31 | 1.50 | 1.75 |
| 60 | 1.40 | 1.575 | 1.80 | 2.10 |
| 70 | 1.63 | 1.84 | 2.10 | 2.45 |
| 80 | 1.87 | 2.10 | 2.40 | 2.8 |

| Mezcla | Q _{MEZCLA} (m ³ /día) |
|-------------|---|
| 100% — 0% | 21,000 |
| 90 % — 10 % | 23,333 |
| 80 % — 20 % | 26,250 |
| 70 % — 30 % | 30,000 |
| 60 % — 40 % | 35,000 |
| 50 % — 50 % | 42,000 |

Centro de Información-Biblioteca



30002005824313