



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**PROPUESTA DE MEJORAS PARA REUTILIZAR LAS AGUAS
RESIDUALES TRATADAS DE LA EMPRESA
CAVENPI**

Autor:

Pinto León, Laura Patricia

Valencia, Julio de 2011



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**PROPUESTA DE MEJORAS PARA REUTILIZAR LAS AGUAS
RESIDUALES TRATADAS DE LA EMPRESA
CAVENPI**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

Tutor Académico:

Ing. Iván Parra.

Tutor Industrial:

Lic. Antonio Morales.

Autor:

Pinto León, Laura Patricia

Valencia, Julio de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado titulado: **PROPUESTA DE MEJORAS PARA REUTILIZAR LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS DE LA EMPRESA CAVENPI**, realizado por la bachiller: Pinto L. Laura Patricia., C.I.: 18.500.303, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo, y que no nos hacemos responsables de su contenido, pero lo encontramos correcto en su forma y presentación.

Prof. (a) Iván Parra
Presidente

Prof. (a) Viky Mujica
Jurado

Prof. (a) Carlos Alvarado
Jurado

Valencia, Julio de 2011

*A Dios por darme la vida e
iluminarme para llegar a
esta etapa.*

*A todas las personas que
han brindado cosas buenas
a mi vida*

*A las generaciones futuras
para que sirva de guía y
apoyo en sus estudios*

*A mis padres por ser este
logro de los tres!*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi guía y bendecirme, por darme la fortaleza y visión necesaria, por enseñarme a ser merecedora y que su voluntad estuvo unida a la mía en los aciertos y desaciertos del transcurrir de mi carrera universitaria.

A Gisela Zoa León Castro y Miguel Alfredo Pinto, mis padres a ellos principalmente por darme la vida, por apoyarme y ayudarme a lo largo de toda mi vida, por sus consejos, regaños y consentimientos, y por ser mi ejemplo a seguir. Los amo papas.

A mi familia: abuelos, abuelas, tíos, tías, primos y primas, por brindarme apoyo y ayuda incondicional en los momentos necesitados. Los quiero.

A Yolanda Gisela Acuña Bermúdez “ la chispa”, a ti mil gracias por que fuiste y seguirás siendo mi segunda madre, gracias por quererme, criarme y guiarme como tu hija, a ti y a toda tu familia muchas gracias.

A Carlos Eduardo Martínez Barreto, por ser mi pilar de apoyo en estos últimos dos años, por soportar mis malacrianzas y brindarme tantos momentos hermosos que han hecho de este tiempo el mejor que he vivido. Mil gracias mi amor TE AMO.

A mis amigos y compañeros de estudios, Pamela Peña, Patricia Moens, Marcos Hernández y Jorge Ortega con los que empecé a vivir la experiencia de la universidad, con los que compartí lágrimas y sonrisas, tristezas y alegrías, a ellos mil gracias por su ayuda, apoyo y momentos vividos, los adoro.

A mis futuros colegas y compañeros de estudio, Florangel Terán, Ivanis Díaz Legmy Hernández, Lixela López, Anais López, José Padilla, Jhonny Gaglione, Nelson Rivas, José Montaigne, Simón Acero, Jesús Escobar y demás compañeros, por permitirme compartir con ustedes estos últimos años de mi carrera y hacer de ello una experiencia inolvidable, por su incondicional ayuda y apoyo en los momentos más difíciles, gracias chiquillos los quiero.

A todos los profesores que de una u otra manera han impartido la enseñanza, educación y conocimientos adquiridos.

A la Universidad de Carabobo por permitir que me desarrollara como una profesional dentro de sus instalaciones.

A la empresa CAVENPI por abrirme sus puertas para realizar el desarrollo de este trabajo de grado.

Al Lic. Antonio Morales mi tutor industrial quien me brindó ayuda profesional y humana, y me facilitó las herramientas necesarias para culminar con este trabajo, muchas gracias.

Al Ing. Iván Parra futuro colega y mi tutor industrial, por su gran ayuda, orientación, impartición de conocimientos, paciencia y disponibilidad, gracias.

A la Ing. Jersey Lovera, Lic. Gloria Gutiérrez, Maritza Martínez, Sergio Agrizone, Freddy Moreno, Alexis y demás compañeros de la empresa CAVENPI que compartieron mi estadía allí, me ayudaron, me apoyaron e hicieron agradables todos los días que compartí con ellos.

Al Ing. Josué Oliveros por su especial colaboración para la realización de este trabajo de grado.

Al Ing. Luis Arocha, Ing. Marina Rodríguez y la Lic. Lorena Joten por su orientación.

A Mary, Leida y Trina, por su ayuda y colaboración incondicional.

A todos los que colaboraron con el desarrollo de este trabajo de grado y que de una u otra manera me han apoyado en toda mi carrera y en la culminación del mismo. Muchas gracias.

Laura Patricia Pinto León

RESUMEN

El proceso de la empresa CAVENPI genera un alto volumen de aguas residuales industriales que poseen valores de parámetros fisicoquímicos no permitidos por el control de vertidos o efluentes líquidos. De allí la existencia de la planta de tratamiento de efluentes; sin embargo, esta agua tratada, no cumple con los valores máximos permitidos para ser reutilizada como agua industrial o de riego. La empresa manteniendo su compromiso con la preservación del medio ambiente y los recursos hídricos ha iniciado una revisión de sus sistemas con fines de reutilizar las aguas residuales tratadas para disminuir la descarga de éstas contribuyendo así con la preservación del medio ambiente. La metodología empleada es la de investigación descriptiva de un proyecto factible tipo campo. El logro más resaltantes es que con la aplicación del tratamiento conocido como precipitación química se adecuan los efluentes inorgánicos a los niveles máximos establecidos en el Decreto 3219 para agua de riego, pudiéndose reutilizar con factibilidad los efluentes en el riego de las áreas verdes de la planta CAVENPI. Como conclusiones más relevantes están que el efluente necesita la adición de una sustancia coagulante para lograr una buena remoción en el tratamiento fisicoquímico; la aplicación de un tratamiento biológico a los efluentes que se generan no funcionaría por ser un agua residual biodegradable; la caracterización del efluente de inorgánico reveló que sin aplicación de tratamiento previo no es reutilizable para el riego. Se recomienda no pasar el efluente de origen inorgánico por el reactor sino que se unan con las efluentes de origen orgánico al final del tratamiento de aguas residuales; confinar los derrames producidos en planta colocando muros de contención y los drenajes de emergencia; al aplicar la propuesta seleccionada evaluar el proceso con el efluente unido para determinar las dosificaciones óptima de los químicos a utilizar.

PALABRAS CLAVE: CAVENPI, agua residual, agua de riego, decreto 3219, precipitación química.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO 1. Planteamiento del problema.	3
1.1. Descripción del problema.	5
1.2. Formulación del problema.	6
1.2.1. Situación actual.	6
1.2.2. Situación deseada.	7
1.3. Objetivos.	7
1.3.1. Objetivo General.	7
1.3.2. Objetivos Específicos.	7
1.4. Justificación.	8
1.5. Limitaciones	9
CAPÍTULO 2. Marco Teórico.	10
2.1. Antecedentes.	10
2.2. Bases teóricas.	17
2.2.1. Agua Residual.	17
2.2.2. Caracterización del agua residual	18
2.2.3. Características Físicas	18
2.2.4. Características Químicas	20
2.2.5. Características Biológicas	23
2.2.6. Tratamiento de aguas residuales	24
2.2.7. Pretratamientos	24
2.2.8. Tratamiento Primario	25
2.2.9. Tratamiento Secundario	30
2.2.10. Tratamiento Terciario	35
2.2.11. Descripción del proceso productivo.	37
2.2.12. Descripción de la planta de tratamiento.	39

CAPÍTULO 3. Marco Metodológico	46
3.1. Tipo de trabajo de investigación	46
3.2. Fases de la Investigación	47
3.2.1. Diagnóstico del funcionamiento de la planta de tratamiento	47
3.2.1.1. Proceso productivo de la planta	47
3.2.1.2. Identificación de las secciones donde se generan efluente	47
3.2.1.3. Identificación de las condiciones del proceso de acondicionamiento que reciben los efluentes de la empresa en la planta tratamiento.	48
3.2.1.4. Estudio del tratamiento fisicoquímico.	48
3.2.1.5. Elaboración de la prueba de jarras.	49
3.2.1.6. Estudio del tratamiento biológico.	50
3.2.2. Caracterización del agua a la salida de los clarifloculadores y a la descarga final de la planta de tratamiento.	54
3.2.2.1. Identificación de los parámetros a caracterizar.	54
3.2.2.2. Planificación del experimento.	55
3.2.2.3. Toma de muestras.	55
3.2.2.4. Análisis de campo y especiales.	55
3.2.3. Propuesta de las alternativas para alcanzar los objetivos de adecuación de las aguas residuales industriales que se encuentran a la salida de los clarifloculadores o la salida de la planta de tratamiento de efluentes.	57
3.2.3.1. Establecimiento de los niveles de reducción para cumplir con el decreto 3219 respecto al agua seleccionada.	57
3.2.3.2. Identificación y selección de los procesos que pueden ser aplicados a esta selección.	57
3.2.3.3. Generación de alternativas en base a los procesos investigados.	58
3.2.4. Selección de la(s) mejor(es) alternativa(as) en base al cumplimiento de los parámetros permitidos para el agua industrial o de riego.	58
3.2.4.1. Selección de la propuesta.	59
3.2.4.2. Descripción de la propuesta	59
3.2.5. Elaborar un estudio costo/beneficio de la(s) alternativa(s) seleccionada(s).	59
3.2.5.1. Búsqueda de información sobre los costos que genera la implementación de la alternativa propuesta.	60

3.2.5.2. Estimación de los beneficios generados.	60
CAPÍTULO IV. Análisis de los resultados	62
4.1. Diagnóstico del funcionamiento de la planta de tratamiento.	62
4.1.1. Elaboración de la prueba de jarras.	62
4.1.2. Estudio del tratamiento secundario.	71
4.1.3. Análisis histórico del comportamiento del efluente.	76
4.2. Caracterización del agua a la salida de los clarifloculadores y a la descarga final de la planta de tratamiento.	80
4.3. Propuesta de las alternativas para alcanzar los objetivos de adecuación de las aguas residuales industriales que se encuentran a la salida de los clarifloculadores o la salida de la planta de tratamiento de efluentes.	82
4.3.1. Primera Alternativa	86
4.3.2. Segunda Alternativa	91
4.3.3. Tercera Alternativa	95
4.3.4. Cuarta Alternativa	99
4.4. Selección de la(s) mejor(es) alternativa(as) en base al cumplimiento de los parámetros permitidos para el agua industrial o de riego.	103
4.4.1. Descripción de la propuesta Seleccionada	107
4.5. Elaborar un estudio costo/beneficio de la(s) alternativa(s) seleccionada(s).	110
Conclusiones y recomendaciones	114
Conclusiones	114
Recomendaciones	115
Referencias Bibliográficas	116
Apéndice A. Cálculos Típicos	122
Apéndice B. Decreto 3219	135
Apéndice C. Figuras Bibliográficas	172

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Diagrama de flujo de la planta de efluentes de CAVENPI.	4
Figura 2.1. Diagrama del bloque de un tratamiento biológico de lodos activados.	31
Figura 2.2. Parámetros de diseño para los procesos de fangos activados.	35
Figura 2.3. Estructura de algunos compuestos que constituyen la materia prima.	39
Figura 2.4. Diagrama de bloques del proceso productivo.	43
Figura 2.5. Diagrama del flujo de la planta de amarillos cromo.	44
Figura 2.6. Diagrama de flujo de la planta tradicional.	45
Figura 4.1. Sustancias químicas utilizadas en la prueba e jarras.	63
Figura 4.2. Preparación de los polímeros	63
Figura 4.3. Coagulantes preparados para la prueba de jarras.	64
Figura 4.4. Prueba de Jarras de la línea de Inorgánicos tradicional.	65
Figura 4.5. Prueba de Jarras de la línea de Inorgánicos amarillos cromo.	67
Figura 4.6. Etapas de la prueba de Jarras de la línea de orgánicos.	70
Figura 4.7. Comportamiento de los parámetros en el tanque de igualación y en el reactor biológico para las caracterizaciones realizadas desde el año 2009 hasta el presente año.	79
Figura 4.8. Diagrama de flujo de la primera alternativa	88
Figura 4.9. Diagrama de flujo de la segunda alternativa	92
Figura 4.10. Comportamiento de los aniones y cationes en la electrodiálisis.	96
Figura 4.11. Diagrama de flujo de la tercera alternativa.	97
Figura 4.12. Esquema de los fenómenos de ósmosis natural y ósmosis inversa.	100
Figura 4.13. Diagrama de flujo de la cuarta alternativa.	100
Figura 4.14. Diagrama de flujo de la propuesta seleccionada.	109
Figura C.1. Esquema de un proceso de tratamiento continuo para eliminar cromo	172
Figura C.2. Curva de precipitación de los metales pesados como hidróxido y como sulfuro.	173

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Tratamiento requerido según la biodegradabilidad	21
Tabla 3.1. Preservación de las muestras.	52
Tabla 3.2. Métodos utilizados para la determinación de los parámetros analizados en la caracterización.	53
Tabla 3.3. Métodos utilizados en los análisis de los parámetros caracterizados para utilizar el agua en el riego	55
Tabla 4.1. Variables evaluadas durante la elaboración de la prueba de jarras de la línea de Inorgánicos de la planta tradicional.	65
Tabla 4.2. Comparación entre los químicos utilizados en la prueba de jarra y el tratamiento actual de la línea de Inorgánicos de la planta tradicional.	66
Tabla 4.3. Variables evaluadas durante la elaboración de la prueba de jarras de la línea de Inorgánicos amarillos cromo.	68
Tabla 4.4. Comparación entre los químicos utilizados en la prueba de jarra y el tratamiento actual de la línea de Inorgánicos amarillos cromo.	68
Tabla 4.5. Variables evaluadas durante la elaboración de la prueba de jarras de la línea orgánica tradicional.	69
Tabla 4.6. Comparación entre los químicos utilizados en la prueba de jarra y el tratamiento actual de la línea orgánica tradicional.	70
Tabla 4.7. Resultados de DQO obtenidos al realizar la prueba de jarras.	71
Tabla 4.8. Caracterización del agua del reactor y efluente de la planta.	72
Tabla 4.9. Resumen de la medición de caudal.	73
Tabla 4.10. Parámetros de control, operación y diseño del reactor biológico	74
Tabla 4.11. Registro del oxígeno disuelto medido en el reactor durante cuatro meses.	75
Tabla 4.12. Datos históricos del efluente en el tanque de igualación desde el 2009 hasta el presente año.	77
Tabla 4.13. Datos históricos del efluente en el reactor biológico desde el 2009 hasta el presente año.	78
Tabla 4.14. Datos estadísticos de los parámetros comparados con datas anteriores.	80
Tabla 4.15. Análisis de la Demanda química de oxígeno de los efluentes de la planta a la salida del tratamiento primario y en el tanque de igualación.	81
Tabla 4.16. Resultados de la caracterización.	82
Tabla 4.17. Comparación de los valores resultantes de la caracterización con los fijados por la ley.	83
Tabla 4.18. Caracterización del efluente de inorgánico unido.	85
Tabla 4.19. Ventajas y desventajas de los tratamientos propuestos en la primera alternativa	89
Tabla 4.20. Calidad de salida del efluente para la primera alternativa propuesta.	90

Tabla 4.21. Ventajas y desventajas de los tratamientos propuestos en la segunda alternativa	93
Tabla 4.22. Calidad de salida del efluente para la segunda alternativa propuesta.	94
Tabla 4.23. Ventajas y desventajas de los tratamientos propuestos en la tercera alternativa	97
Tabla 4.24. Calidad de salida del efluente para la tercera alternativa propuesta.	98
Tabla 4.25. Ventajas y desventajas de los tratamientos propuestos en la cuarta alternativa	101
Tabla 4.26. Calidad de salida del efluente para la cuarta alternativa propuesta.	102
Tabla 4.27. Matriz de selección de las alternativas propuestas.	106
Tabla 4.28. Costo de los equipos.	110
Tabla 4.29. Costo total de los activos fijos tangibles.	111
Tabla 4.30. Costos anuales de los activos tangibles	111
Tabla 4.31. Costo total de los activos intangibles.	112
Tabla 4.32. Costo total de los componentes del capital de trabajo.	112
Tabla 4.33. Costos anuales totales del capital fijo y de trabajo	112
Tabla 4.34. Beneficios positivos de la implementación de la precipitación química.	113
Tabla 4.35. Relación costo beneficio	113
Tabla A.1. Porcentajes utilizados para calcular el costo de los activos tangibles.	131
Tabla A.2. Métodos utilizados para calcular el costo de los activos intangibles.	132
Tabla A.3. Costos asociados a la inversión inicial	133

INTRODUCCIÓN

El agua: Recurso Vital, es un tema de carácter interdisciplinario con implicaciones de tipo tecnológico, social, medio ambiental y de gran repercusión en la vida cotidiana; la contaminación del agua, incluye los cambios en sus propiedades físicas, químicas o biológicas que la transforman en no apta para beber, regar, limpiar, entre otros, ni para el desarrollo de los seres vivos que normalmente viven en ella (Arana, 1995).

La mayor parte de las fuentes de contaminación del agua provienen de las actividades humanas que generan efluentes que, directa o indirectamente, afectan la calidad de los cuerpos de agua receptores debidos a aguas residuales urbanas, aguas de uso industrial, siendo los principales sectores contaminantes las industrias relacionadas con el petróleo, carbón, industrias químicas y derivados de la celulosa y la contaminación de origen agrícolas (Varios autores, 1998).

En las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles, según se constata en el primer informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, *Agua para todos, agua para la vida* (marzo 2003) Estos datos aportan una idea de la importancia que tiene el tratamiento y la reutilización de aguas residuales en el sector industrial (Rodríguez *et al.* 2006)

El agua es tanto un derecho como una responsabilidad, y tiene valor económico-social y ambiental. Cada ciudadano, cada empresa, ha de tomar conciencia de que el agua dulce de calidad es un recurso natural, cada vez más escaso tanto a nivel superficial como subterráneo, necesario no sólo para el desarrollo económico, sino imprescindible como soporte de cualquier forma de vida en la naturaleza. No cabe duda de que la industria es motor de crecimiento económico y, por lo tanto, clave del progreso social. Sin embargo, demasiado a menudo la necesidad de maximizar el proceso productivo excluye de la planificación la tercera pata del progreso, la protección del Medio Ambiente.

El adecuado tratamiento de aguas residuales industriales y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible del agua y a la

regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas. Sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria.

Ante la dura y negativa realidad que se está viviendo de desmejoramiento de la calidad física, química y biológica de los cuerpos de agua que reciben efluentes o vertidos líquidos de distintos procesos y operaciones industriales, ha surgido una intensa y continua investigación, para la aplicación y desarrollo de operaciones y técnicas, destinadas al tratamiento de éstos efluentes, previa descarga a estos cuerpos de agua, con la finalidad de lograr su adecuación a los cada vez más rigurosos requerimientos y normas ambientales.

Al mismo tiempo, con el objetivo de reducir el impacto ambiental de los efluentes de las fábricas, muchas compañías estudian métodos para disminuir la carga contaminante del efluente, reducir su volumen, así como, la recuperación de sus vertidos de agua.

Comprometida con la protección del medio ambiente y los recursos naturales no renovables la empresa Venezolana de Pigmentos, CAVENPI, se planteó desarrollar un proyecto dirigido a desarrollar propuestas que permitan la adecuación de los efluentes de origen inorgánico con fines de reutilización del agua, para riego de las áreas verdes de dicha empresa la cual se realizó a través de este trabajo especial de grado.

La investigación se encuentra enmarcada en el área del saneamiento e ingeniería ambiental, enfocada a los procesos de tratamiento y depuración de efluentes industriales que vienen a representar la posible solución al problema ambiental que generan los efluentes. En estos procesos se encuentran involucradas múltiples operaciones unitarias pertenecientes a los fenómenos de transporte y transferencia de materia, al igual que reacciones químicas y biológicas.

Con estas propuestas se pretende reutilizar el agua residual tratada en la empresa CAVENPI como agua industrial (que pueda ser utilizada en el lavado de materia prima y de los filtros) o de riego (destinadas para el riego de cultivos no consumibles y sistemas contra incendio) definidas en Decreto 3219 tipo 5 y tipo b, subtipo 2b respectivamente; de esta forma disminuir el consumo de agua natural y contribuir con la preservación del medio ambiente.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Esta sección se refiere básicamente a la descripción del problema que se desea estudiar abarcando los objetivos planteados que se quieren lograr en el desarrollo de la investigación, el detalle de la situación actual, la especificación de la situación deseada y la definición de los factores que justifican y limitan la realización de dicho estudio.

1.1. Descripción del problema

C.A. Venezolana de pigmentos (CAVENPI), se encuentra ubicada en la Zona industrial San Diego; esta empresa fue fundada en el año 1974 por la compañía asociada C.A. Venezolana de Pinturas (antigua Sherwin Williams) y su principal competidor CORIMON (antigua MONTANA) con la finalidad de producir pigmentos inorgánicos.

Actualmente CAVENPI es una compañía subsidiaria por DOMINION COLOUR COPORATION y se dedica a la producción de una variedad de pigmentos orgánicos e inorgánicos; los cuales son utilizados y procesados en empresas del ramo de color para la fabricación de pinturas (decorativas e industriales), tintas de impresión para empaques y procesadores de polímeros plásticos, entre otros.

Esta empresa cuenta con una planta de tratamiento de efluentes para el cumplimiento de los parámetros necesarios de descarga, dicha planta está representada en la figura 1.1; la cual cuenta con la aplicación tanto de tratamientos físicoquímicos como de tratamiento biológico.

Su operación comienza con la entrada de los efluentes orgánicos e inorgánicos provenientes de las diferentes líneas de producción; a los cuales se les aplica un pre-tratamiento como lo es el desbastador, seguidamente dichos efluentes pasan a un sedimentador conocido como tratamiento primario, luego pasan a un sistema de coagulación-floculación conformado por un tanque de mezcla rápida y un tanque de mezcla lenta (clarifloculador); se debe mencionar que a la línea de efluentes orgánicos llegan los efluentes provenientes del área de calderas y materia prima los cuales son sometidos a una trampa de grasa antes de entrar al devastador.

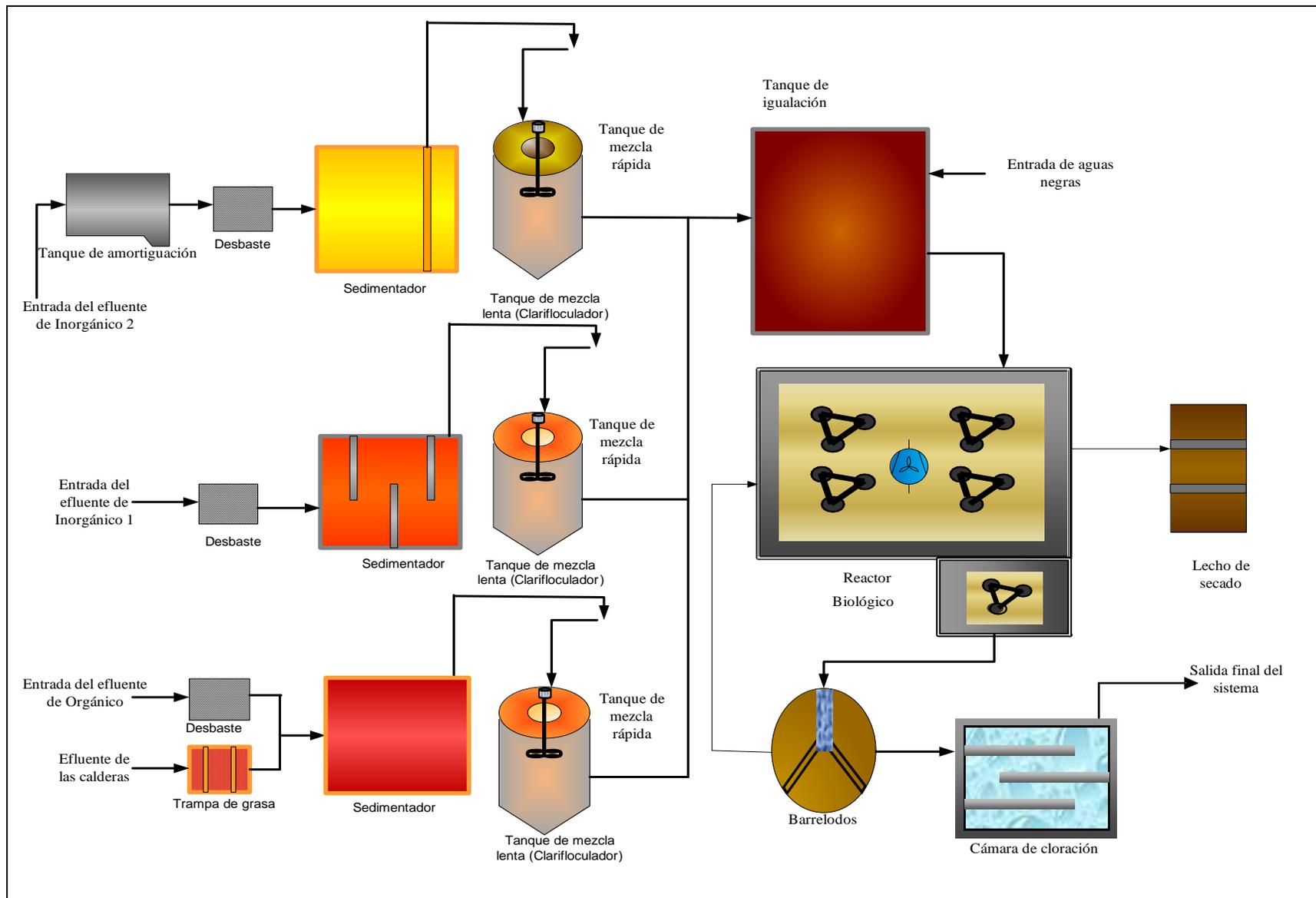


Figura 1.1: Diagrama de flujo de la planta de efluentes de CAVENPI.

Posteriormente al salir de los clarifloculadores estas efluentes son mezclados en un tanque de igualación donde llegan también las aguas negras de la planta; de allí son enviados a un biorreactor o reactor biológico, en este se dejan residir los fluidos junto con un lodo que contiene bacterias y a su vez se le suministra oxígeno a través de aireación, con el fin de que dichos microorganismos se alimenten de la materia orgánica presente en el agua residual para transformarla en materia inorgánica.

A continuación estos efluentes son llevados al barrelodo donde se recupera el lodo que se escapó del biorreactor para devolverlo al mismo, sin embargo puede ocurrir que la concentración de lodo sea elevada en el biorreactor, por lo tanto el lodo proveniente del barrelodo se envía a los lechos de secado. Por último, estos efluentes pasan a la cámara de cloración que consiste en una piscina con baffles intercalados donde se logra el mezclado del agente oxidante (cloro) con la materia orgánica remanente del proceso dando origen a un agua más limpia para proceder a la descarga externa.

Por otra parte, esta empresa es una organización orientada a la conservación y preservación del medio ambiente que cuenta con certificación ISO 9001:2000; lo cual ha generado la decisión de incorporar a su política la evaluación del impacto ambiental que originan los procesos realizados en la misma, además esta empresa quiere garantizar la existencia de una responsabilidad ambiental que permita alcanzar la excelencia en la calidad de todos los productos mediante el mejoramiento continuo de todos sus procesos.

Por esta razón CAVENPI ha decidido desarrollar una propuesta que permita reutilizar las efluentes que se generan en su proceso de producción, para así disminuir la descarga realizada al lago de Valencia; contribuyendo con la mejora del medio ambiente y promoviendo la reutilización de este recurso hídrico.

1.2. Formulación del problema

La empresa CAVENPI cuenta con una planta de efluentes con una capacidad de procesamiento de aguas industriales superior a su operación actual, es decir actualmente se utiliza entre un 60 a 65 % de su capacidad. La misma se encarga de

procesar el agua que proviene de las líneas de producción de pigmentos tanto orgánicos como inorgánicos, así como también las aguas negras generadas dentro de dicha empresa, esto se hace con el fin de cumplir con los parámetros requeridos por el decreto 3219 para posteriormente ser descargada al lago de Valencia.

Sin embargo, se sabe que las fuentes principales de contaminación de lago están relacionadas con los contenidos de sólidos disueltos y la carga orgánica (ej. fosfatos, detergentes sintéticos, entre otros) que generan un desbalance en la generación y consumo del oxígeno disponible, lo que a su vez origina, un proceso que se conoce como eutrofización, esto produce a su vez un desbalance en el equilibrio ambiental que provoca la muerte de otros seres vivos (ej. peces), el agua se pone verdosa y adquiere un mal olor. El déficit severo de oxígeno a partir de 15 m de profundidad se debe principalmente a la carga orgánica que recibe de ríos y otros afluentes.

Por esta razón la empresa CAVENPI manteniendo su compromiso con la preservación del medio ambiente y los recursos hídricos ha iniciado la revisión de los sistemas que permiten regenerar las aguas industriales a fin de dar respuesta a la siguiente interrogante: ¿se podrá encontrar alguna alternativa que permita reutilizar las aguas residuales tratadas en el proceso industrial para disminuir la descarga de las mismas?

1.2.1. Situación actual

El proceso industrial que desarrolla la compañía anónima Venezolana de Pigmento (CAVENPI), genera un alto volumen de aguas residuales industriales, éstas poseen valores de parámetros fisicoquímicos (sólidos suspendidos, sulfatos, cloruros, cromo, plomo, entre otros) que no son permitidos por el control de vertidos o efluentes líquidos. De allí la existencia de la planta de tratamiento de efluentes diseñada para procesar dicha agua, de manera que se pueda, entre otros, cumplir con los parámetros requeridos; sin embargo, esta agua tratada no cumple con los valores máximos permitidos para ser utilizada como agua industrial o de riego.

1.2.2. Situación deseada

Reutilizar el agua residual tratada en la empresa CAVENPI como agua industrial (que pueda ser utilizada en el lavado de materia prima y de los filtros) o de riego (destinadas para el riego de cultivos no consumibles y sistemas contra incendio) definidas en Decreto 3219 tipo 5 y tipo b, subtipo 2b respectivamente. La regeneración de los efluentes del proceso industrial permitiría disminuir tanto el consumo de agua natural como la descarga al lago. De esta forma contribuir con la preservación del medio ambiente. A este fin, se realizara una investigación de campo la cual permitirá determinar su factibilidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Proponer una alternativa para reutilizar las aguas residuales tratadas a la salida de la planta de efluentes o a la salida de los clarifloculadores, con la finalidad de dar un mejor aprovechamiento al recurso hídrico y disminuir los volúmenes de descarga del mismo.

1.3.2. Específicos

1. Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales.
2. Caracterizar fisicoquímicamente y biológicamente el agua a la salida de los clarifloculadores y a la descarga final de la planta de tratamiento.
3. Proponer alternativas para alcanzar los objetivos de adecuación de las aguas residuales industriales que se encuentran a la salida de los clarifloculadores o la salida de la planta de tratamiento de efluentes.
4. Seleccionar la(s) mejor(es) alternativa(s) en base al cumplimiento de los parámetros permitidos para el agua industrial o de riego.
5. Elaborar un estudio costo/beneficio de la(s) alternativa(s) seleccionada(s).

1.4. Justificación

Esta investigación tiene una relevancia en el ámbito ambiental debido a que la misma va a contribuir con la reutilización de los efluentes, disminuyendo su descarga a las aguas del lago y con ello se reduciría el riesgo de contaminación de este sistema acuático; además generaría un ahorro en el consumo del agua de fuentes naturales.

Con respecto a la parte social, su impacto sería muy positivo, pues permitiría que todas las empresas sujetas al decreto 3219, implementen el reciclaje o reutilización de estas aguas, dejando así el agua de fuentes naturales para el disfrute humano, lo cual redonda en una mejor calidad de vida, cumpliendo con los artículos 4 y 5 del primer título de la ley de aguas.

Entre los beneficios generados por esta investigación se tiene otro material de estudio y/o referencia para la Universidad de Carabobo; una gran utilidad para la empresa, ya que mediante este trabajo la misma tendrá la posibilidad de conocer la viabilidad de reciclar para reutilización del producto en beneficio propio; y también, de lograrse los objetivos planteados permitirá contribuir con la preservación y conservación del medio ambiente.

Asimismo, el desarrollo de la investigación permitirá profundizar los conocimientos de la investigadora así como desarrollar habilidades y destrezas para un mejor desempeño en el campo profesional.

Entre las implicaciones prácticas de esta investigación se presenta la propuesta para reutilizar el agua de efluentes al proceso industrial con la finalidad principal de disminuir la descarga de la misma. Dicha propuesta, requiere de un estudio de nuevos procesos que permitan cumplir con los parámetros necesarios para que el agua reciclada pueda ser utilizada en usos industriales que no necesiten agua potable; para el riego de cultivo no consumible o sistemas contra incendio.

De igual forma, la investigación presenta como aporte tecnológico el desarrollo creativo e innovador de los procesos que signifiquen la reutilización y reciclaje del agua de efluentes al interior de las industrias que minimizarán tanto el consumo de agua de fuentes naturales como las descargas.

Desde el punto de vista metodológico es de gran relevancia debido a que se estudiará la separación mediante una membrana, que es un añadido comparativamente nuevo a la tecnología de renovación o purificación del agua y que involucra distintos procesos como lo son: filtración, ultrafiltración, diálisis, electrodiálisis, osmosis inversa y bioreactores de membrana; esto hace que se tenga una diversidad de alternativas para proponer la mejor de acuerdo a las ventajas que las mismas proporcionen.

1.5. Limitaciones

La principal limitante que presenta esta investigación, es que la empresa no cuenta con la memoria descriptiva de la planta de tratamiento. Por otra parte los análisis experimentales para la caracterización de las muestras tomadas a lo largo del desarrollo de la misma, serán realizados en un laboratorio externo a la empresa. Esto origina que la realización y obtención de dichos análisis dependa de la disponibilidad del laboratorio y de los reactivos que sean necesarios para el análisis de cada muestra.

2. MARCO TEÓRICO

A continuación se describen de una manera breve una serie de estudios realizados, los cuales presenta relación con la presente investigación, con el fin de sustentar dicha investigación.

2.1. Antecedentes

Durán (2009), evaluó el desempeño de un conjunto de lagunas para el tratamiento de las aguas de riego provenientes del canal Tibanica y estudió el tratamiento y reuso de aguas residuales domésticas para el riego de cultivos agrícolas utilizando un sistema piloto de lagunas de estabilización, con la finalidad de ofrecer una mejor calidad de agua a la utilizada actualmente en el riego de cultivos agrícolas.

Debido a su importancia desde el punto de vista de la salud evaluó fundamentalmente la remoción de organismos coliformes. La evaluación del sistema se realizó bajo las siguientes condiciones: alimentación semicontinua y tiempos de retención hidráulica (TRH) total de 17, 11 y 7 días aproximadamente, para lo cual se analizaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tanto en el agua cruda como en los efluentes de las lagunas, por un periodo continuo de siete meses.

Los resultados indican que la condición más favorable desde el punto de vista de calidad y cantidad se obtiene para un TRH de 11 días, ya que se logran importantes niveles de remoción microbiológica, sin embargo; la calidad del efluente no garantiza por sí sola el cumplimiento de los límites establecidos para el riego de hortalizas, particularmente en lo que corresponde a coliformes totales, además los costos generados fueron de: US\$50/m³ para construcción del sistema de tratamiento y US\$0,45/m³ para la operación y mantenimiento por mes.

La similitud encontrada entre las dos investigaciones fue el estudio que permita adecuar las aguas residuales para ser reutilizadas como agua de riego; sin embargo en el antecedente se tiene que el agua residual es de uso doméstico, la reutilización del agua es para riego de cultivo consumibles y la evaluación se realizó a escala piloto;

mientras que en la presente investigación, el agua es de origen industrial, se requiere para el riego de cultivos no consumibles y su evaluación es realizada teóricamente.

Hernández et al. (2009), estudiaron la viabilidad económica de la reutilización de aguas residuales: valoración económica de los beneficios ambientales, basándose en que en las últimas décadas, el avance tecnológico en materia de regeneración de aguas residuales ha sido muy importante, ya que la viabilidad de los proyectos de reutilización de aguas residuales está sujeta fundamentalmente a aspectos económicos.

Para el desarrollo de esta investigación emplearon como metodología la determinación de los costos generados por los impactos producidos tanto a nivel interno como externo, para lo cual se realizó una cuantificación del valor monetario de los beneficios ambientales derivados en los proyectos de reutilización de aguas residuales, partiendo de la estimación de los precios sombra de los outputs no deseables derivados de la regeneración de aguas residuales.

La relación de semejanza que presenta este antecedente con la presente investigación, es el estudio realizado a nivel económico para determinar la viabilidad o factibilidad de la regeneración de aguas residuales para su posterior uso.

Rosell et al. (2009), realizaron una evaluación comparativa del proceso de tratamiento de aguas residuales textiles mediante un biorreactor de membrana (BRM) y un proceso de fangos activados (FA), bajo similares condiciones operativas y de calidad del efluente. Esta evaluación se logró mediante la preparación a nivel de laboratorio de un efluente textil que presentará las características del efluente industrial; posteriormente se realizó la evaluación del biorreactor de membrana (BRM) en una planta piloto de biorreactor de membrana (BRM), la cual estaba provista de membranas de ultrafiltración y microfiltración de polysulfona, seguidamente se evaluó el proceso de fangos activados, a través de escala piloto; estas evaluaciones se realizaron tres veces, con periodos de inoculación y puesta en marcha hasta alcanzar condiciones estacionarias.

El periodo de muestreo fue de 9 meses, en los que se realizó por triplicado la experimentación, aplicando diferentes técnicas de análisis al afluente, a los procesos biológicos de fangos activados (FA) y biorreactor de membrana (BRM) y a los efluentes

de los dos procesos, evaluando parámetros como temperatura, color aparente, turbiedad, sólidos suspendidos (totales y volátiles), pH, conductividad, entre otros.

Según los resultados que se obtuvieron el tratamiento de aguas residuales textiles mediante un biorreactor de membrana (BRM) resulta atractivo, ya que durante el desarrollo de la parte experimental presenta una mayor estabilidad del proceso, una remoción de la materia orgánica promedio de 89%, de sólidos suspendidos totales de 95% y de color del 69%. Al comparar un proceso convencional de fangos activados (FA) bajo las mismas características operativas, biomasa y efluente, según los resultados obtenidos se pudo concluir que el proceso biorreactor de membrana (BRM) es un 22% más eficiente en la eliminación de la materia orgánica que el proceso de fangos activados (FA), además el proceso biorreactor de membrana (BRM) elimina un 33% más que los fangos activados.

Entre las similitudes existentes entre este antecedente y la presente investigación, es que se estudia la posibilidad de la incorporación del efluente en el proceso productivo. Su diferencia radica en que el antecedente compara los procesos a escala piloto y en la presente investigación se estudiarían varios procesos para proponer una alternativa.

Arévalo et al. (2009), presentaron una revisión monográfica sobre la propuesta de construcción de una innovadora planta de tratamiento de aguas servidas, para evaluar si el efluente obtenido es adecuado para regar los jardines del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar, Guatemala, México, esto se llevó a cabo mediante la evaluación de tres áreas grandes, como lo fueron: localidad o comunidad en donde se midió la población de la comunidad universitaria, la dotación de agua potable y las instalaciones sanitarias; otra de las áreas fue las aguas residuales proyectadas para lo que se estudiaron los siguientes aspectos: caudal de aguas residuales proyectadas para el periodo de diseño e implementación, demanda Bioquímica de Oxígeno, demanda Química de Oxígeno y la concentración de sólidos totales, disueltos y en suspensión.

Y por último se evaluó el sistema existente de tratamiento de aguas negras, sin embargo la información acerca del afluente y del efluente de la planta de tratamiento

fueron tomados del estudio técnico que se realizó para la construcción de la misma, ya que aun dicha planta se encuentra en construcción.

Esta investigación presentó como conclusión que la planta arrojó un rendimiento teórico del 74%, los valores teóricos de los parámetros del efluente de la planta de tratamiento cumplen con las normas establecidas por la Environmental Protection Agency (EPA) y por el Acuerdo Gubernativo 236-2006, por lo cual el agua tratada en la planta de tratamiento es utilizable para riego de las aéreas verdes del campus.

Este antecedente se asemeja a la investigación en que reciclan el agua de efluentes proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales, así como también que su finalidad es para el riego de aguas verdes y entre las diferencias esta que en este estudio se desea que el agua también se reutilice en el proceso industrial.

Bracho et al. (2008), realizaron un estudio para evaluar alternativas de reutilización del agua regenerada por los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas existentes en la Península de Paraguaná, con la finalidad de proteger el medio ambiente, evitar riesgos en la salud de los seres vivos y satisfacer la demanda de la misma.

Este estudio se basó en cuatro fases las cuales fueron: la primera la recopilación de información necesaria de los sistemas de tratamiento de la península a través de material bibliográfico, así como visitas y entrevistas, la segunda se enfocó a la evaluación de la calidad del agua regenerada en los Sistemas de Tratamiento, que comprendió la recolección de muestras de agua de las plantas de tratamiento para evaluar los parámetros que definieron la calidad del agua, la tercera se basó en proponer las alternativas de reutilización y por último se procedió a proponer mecanismos de Mantenimiento y Control para los Sistemas de Tratamiento estudiados con la finalidad de mejorar su eficiencia tomando en cuenta el tipo de Planta de Tratamiento.

De acuerdo a los resultados se concluyó que los humedales construidos en el Parque Metropolitano son la alternativa más viable para la reutilización de las aguas regeneradas para riego (Tipo 2B), e indica que son también la mejor alternativa para el Tipo 4B dado que las exigencias para este tipo de agua son menores que para el riego. Sin embargo ninguno de los sistemas cumple con los parámetros considerados

para destinar las aguas regeneradas a usos que requieren la clasificación tipo 4B y tipo 5.

La reciprocidad que presenta esta investigación con la que se está llevando a cabo es que ambos proponen reciclar el agua de efluentes regenerada en una planta de tratamiento, además se relacionan con el uso final que se le quiere dar al agua; sin embargo, las mismas se diferencian en el tipo de agua residual que es tratada.

Granado (2008), planteó alternativas de mejoras en el proceso de tratamiento de efluentes provenientes de la sección de producción de jabón de una empresa manufacturera, a fin de mejorar los parámetros fisicoquímicos del agua residual y disminuir la generación de lodos. Llegó a la conclusión que la lejía alimentada a la planta de tratamiento es alcalina, que junto con los parámetros de aceites y grasas y sólidos disueltos son los que contribuyen a la generación de lodos. Además demostró que con la aplicación de policloruro de aluminio y un polímero aniónico ocurre una reducción en las variables de calidad del efluente.

La citada investigación al igual que la presente, amerita examinar las condiciones del funcionamiento de la planta de tratamiento, determinando los parámetros característicos del agua a la entrada y salida de la misma, además estudia la adición de reactivos químicos, planteando las alternativas más factibles para mejorar o adecuar el proceso de tratamiento.

Dorado et al. (2007), evaluaron la importancia que tiene el tratamiento de aguas residuales en el sector industrial, además de los tratamientos a los que se deben someter los efluentes para garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente a fin de obtener las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno. También hicieron referencia a los contaminantes y su clasificación en el agua residual así como de las tecnologías aplicadas (convencional y emergente). La semejanza que este estudio tiene con el presente trabajo es que ambos se evaluaron la factibilidad de reutilizar el agua residual.

Lugo et al. (2007), evaluaron el proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora, presentando como objetivo evaluar el proceso de coagulación

de un agua superficial que sirve como fuente de abastecimiento para una planta potabilizadora no convencional (utilizando energías alternativas).

La investigación se realizó de manera experimental, la cual consistió en valorar sulfato de aluminio tipo B, polielectrolito, almidón de yuca y almidón de maíz, mediante pruebas de jarras, que consistieron en simular el proceso de coagulación, floculación y sedimentación. Los resultados obtenidos señalan que el almidón de maíz, como alternativa técnica de coagulación es buena, dado que es una opción de tecnología adaptable y flexible, a las condiciones de operación de las plantas de potabilización municipales.

La semejanza que presentan estas investigaciones es el estudio realizado en el tratamiento primario, mediante la elaboración de unos ensayos de jarras en los cuales se pudo estudiar el comportamiento de las sustancias químicas coagulantes.

Huerga (2005), desarrolló alternativas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante el uso de tecnologías limpias dirigidas al reciclaje y/o valoración de contaminantes. Con el objetivo final de conseguir el reciclaje parcial del efluente y un efluente apto para el vertido; estudió diversas secuencias y/o tecnologías de tratamiento aplicadas a efluentes provenientes del sector textil, formulación de tensioactivos y tratamiento de superficies metálicas.

El primer caso aborda el estudio "in situ" de diversas secuencias de tratamiento para un efluente homogeneizado procedente de una industria de estampación y tintura, con la finalidad de que dicha secuencia proporcione una calidad al efluente adecuada para alimentar un proceso de ósmosis inversa. El segundo caso contempla el estudio de la tecnología de electrocoagulación-flotación en el tratamiento de efluentes sintéticos con tensioactivos de diferente origen: aniónico, catiónico y no iónico; con el objetivo de conocer si se puede tratar de una tecnología limpia. El tercer caso trata la posibilidad de obtener KNO_3 (un valioso fertilizante) a partir de un proceso de depuración de efluentes.

Según los resultados se obtuvo que para el primer estudio la secuencia óptima integrada por: filtro percolador, fangos activos, coagulación-floculación, consigue la mínima producción de lodos (1,87 Kg de lodos húmedos/L), la mínima adición de reactivos y el mejor rendimiento de depuración en términos de materia orgánica;

mientras que la segunda resultó ser considerada como una tecnología no limpia, debido a una producción elevada de lodos que eleva los costos por encima del carbón activado y generando menores porcentajes de rendimiento que el mismo.

Por último la tercera alternativa generó una secuencia conformada por: coagulación-floculación, electrodiálisis y evaporación a vacío obteniendo 2,3 g de KNO₃ y 1,5 g de CaSO₄/L, así como un efluente de alta calidad para su reutilización y vertido.

La similitud de este estudio con el presente trabajo de grado es el estudio realizado a diferentes tecnologías para poder conseguir el reciclaje parcial del efluente y un efluente apto para el vertido; sin embargo, estos estudios fueron realizados a tres tipos de efluentes mientras que en esta investigación fue a uno solo en específico.

Kestler (2004), propuso un sistema que logre minimizar el gasto indiscriminado de agua potable en actividades y tareas que no requieran tal calidad de agua, para reducir el consumo de la misma a través de la reutilización de las aguas residuales domésticas en una vivienda de la siguiente manera: el agua generada de duchas, lavamanos y lavaplatos sirvan para abastecer el tanque del inodoro, y el agua generada de los inodoros sea empleada para un sistema de riego subterráneo en los jardines.

Para llevar a cabo esta propuesta se realizaron las siguientes actividades: investigación bibliográfica para la reutilización de las aguas residuales domésticas en una vivienda, recopilación de información y especificaciones escrita en diversas instituciones, entrevistas personalizadas a diversas personas especializadas en el tema y por último desarrollo de la propuesta de especificaciones para la reutilización de las aguas residuales en una vivienda a través del diseño de: sistema de aguas grises; que comprende trampa de grasa y depósito acumulador, sistema de aguas negras con fosa séptica y sistema de riego.

Este trabajo tuvo como conclusión que el sistema propuesto resultó viable debido a que se tendría un ahorro de agua potable en la vivienda, ya que se reutilizaría las aguas residuales grises para realizar actividades donde no se requiera una alta calidad de agua, como lo es el llenado de los tanques de inodoros de forma controlada y segura, y a la vez es factible ya que puede adaptarse al sistema existente.

La relación de semejanza que presenta este antecedente con la presente investigación, es el hecho de que ambos proponen el reciclaje del agua residual; sin embargo difieren ya que el primero separa las aguas para poder darles un uso distinto y en la investigación se requiere reutilizar toda el agua residual que ha sido tratada en la planta sin una previa separación de las mismas.

Rodríguez y Stelling, (2004), ejecutaron la investigación titulada: Propuestas de alternativas para la reducción de costos del tratamiento de aguas servidas industriales de la empresa BridgestoneFirestone de Venezuela C.A. Este trabajo de grado tiene como objetivo general proponer alternativas para disminuir los costos del tratamiento de los efluentes industriales de la empresa BridgestoneFirestone de Venezuela C.A. Para ello, se realizan análisis de costo del proceso, proponiendo alternativas de mejora en el tratamiento químico de los efluentes, seleccionando luego, aquella que presente el menor costo de implementación y mejores resultados.

Finalmente, se determina que el sulfato de aluminio es la mejor alternativa como coagulante favoreciendo la formación de coágulos y amentando la de los flóculos. Con el análisis de costos se obtiene que el consumo de productos químicos representa el 63.9 % de los gastos totales de operación de la planta de tratamiento; y por último, se requiere de la implementación de la alternativa propuesta ya que con esto se logra que los efluentes presentes valores dentro de la norma.

La similitud de este antecedente respecto a la presenta investigación es que en ambas se trabaja con las variables del proceso, específicamente, con los reactivos químicos añadidos en la sección de coagulación y floculación, se caracterizan los afluentes y efluentes de la planta de tratamiento, planteando las alternativas más factibles para adecuar el proceso a las condiciones de operación.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Agua residual.

Toda comunidad genera residuos tanto sólidos como líquidos. La fracción de los líquidos, es el agua residual, definida como el agua que se desprende de la comunidad

una vez que ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales ha sido empleada. Desde el punto de vista de generación, podemos definir el agua residual como la combinación de residuos líquidos, o agua portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los cuales puede agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y fluviales (Ramalho, 1983).

2.2.2. Caracterización del agua residual.

El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental de cara al proyecto y explotación de las infraestructuras tanto de recogida como de tratamiento y evacuación de las aguas residuales, así como para la gestión de la calidad medio ambiental (Metcalf and Eddy, 1996). Los contaminantes en las aguas residuales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Normalmente no es ni práctico ni posible obtener un análisis completo de la mayoría de las aguas residuales. Por las razones anteriores se han desarrollado una serie de métodos empíricos cuya aplicación no requiere un conocimiento completo de la composición química específica de las aguas residuales consideradas. (Ramalho, 1983).

Los estudios de caracterización del agua residual están encaminados a determinar: (1) las características físicas, químicas y biológicas del agua y las concentraciones de los constituyentes del agua residual, y (2) los medios óptimos para reducir las concentraciones de los contaminantes (Metcalf and Eddy, 1996).

2.2.3. Características Físicas

Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido de sólido, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importante son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad (Metcalf and Eddy, 1996). A continuación se definen el contenido de sólido, el olor, color y la turbiedad los cuales son utilizados en esta investigación.

– **Sólidos totales:** Analíticamente, se define el contenido de sólidos totales como la materia que se obtiene como residuo después de someter el agua a un proceso de evaporación entre los 103 y 105 °C. Los sólidos totales, o residuo de la evaporación, pueden clasificarse en filtrables o no filtrables (sólidos en suspensión) (Metcalf and Eddy, 1996; Rigola, 1989).

• **Sólidos filtrables:** la fracción filtrable de los sólidos corresponde a sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal está compuesta por las partículas de materia entre 0.001 y 1 micrómetro, que se mantienen en suspensión aun en condiciones de reposo por un tiempo determinado. Los sólidos disueltos están compuestos de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución en el agua. No es posible eliminar la fracción coloidal por sedimentación. Normalmente para eliminar la fracción coloidal es necesaria la oxidación biológica o la coagulación complementadas con la sedimentación (Metcalf and Eddy, 1996).

• **Sólidos suspendidos:** son determinados por el material que queda en el filtro al pesar el filtro seco a 103°-105°, después y antes de la filtración, los sólidos suspendidos pueden ser: sedimentables o no sedimentables y se eliminan por filtración, decantación, precipitación, generalmente mayor a una micra. Entre ellos se puede estimar los sedimentables mayores a diez micras.

Para muchos ambientalistas el objetivo primordial de los sistemas de tratamiento de aguas residuales es la remoción de sólidos (López, 2009).

– **Olor:** normalmente, los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El olor más característico del agua residual séptica es el debido a la presencia de sulfuro de hidrógeno que se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos anaeróbicos. Las aguas residuales industriales pueden contener compuestos olorosos en sí mismo, o compuestos con tendencia a producir olores durante los diferentes procesos de tratamiento (Metcalf and Eddy, 1996).

– **Color:** el color es causado generalmente por la presencia de materias en estado de solución coloidal y lo producen tinturas orgánicas y/o inorgánicas, además de la presencia de Fe^{+2} y Mn^{+2} . Se ha elegido una escala arbitraria para efectos comparativos, la de platino-cobalto, en el cual la unidad de color está definida por el que

produce 1 mg de platino, como color platinado de potasio, y 0,5 mg de cobalto como cloruro cobaltoso. Para determinar, pues, el color de un agua se compara con estos patrones estándares (Henry y Heinke, 1999).

– **Turbiedad:** la turbiedad como medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, es otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. La materia coloidal dispersa absorbe la luz impidiendo su transmisión. Aún así, no es posible afirmar que exista una relación entre la turbiedad y la concentración de sólidos en suspensión de un agua no tratada. No obstante, sí están razonablemente ligados a la turbiedad y los sólidos en suspensión en el caso de efluentes procedentes de la decantación secundaria en el proceso de fangos activados (Metcalf and Eddy, 1996; Henry y Heinke, 1999)

Los valores de turbidez son de gran importancia en agua ya que permiten determinar el grado de tratamiento requerido por un efluente, su filtrabilidad, la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación y filtración. Se mide por el método nefolométrico (NTU) y por el turbidímetro clásico de Jackson (JTU), (López, 2009).

2.2.4. Características Químicas

El estudio de las características químicas de las aguas residuales se aborda en los siguientes cuatro apartados: (1) la materia orgánica, (2) la medición del contenido orgánico, (3) la materia inorgánica y (4) los gases presentes en el agua residual (Metcalf and Eddy, 1996).

– **Materia orgánica:** sustancias químicas de origen animal, vegetal e industrial. Incluye a la mayor de los compuestos de carbono, y son combustibles y volatilizables por el calor. La materia orgánica es contaminante debido a que es inestable y demanda oxígeno para transformarse a materia orgánica. La materia orgánica asociada al carbono es conocida como sustrato primario, mientras la asociada a nitrógeno y fósforo es conocida como sustrato secundario (Parra, 1999; Cifuentes, 2007).

– **Medición del contenido orgánico:** a lo largo de los años, se han ido desarrollando ensayos para la determinación del contenido orgánico de las aguas

residuales. En general, los diferentes métodos pueden clasificarse en dos grupos, los empleados para determinar concentraciones altas de contenido orgánico (DBO, DQO, COT) y los empleados para determinar concentraciones a nivel de trazas en el intervalo de 0,001 mg/L-1 mg/L, cromatografía de gases y espectroscopias de masas (Metcalf and Eddy, 1996). Siendo de interés para esta investigación DQO y DBO (Clair y Perry, 2001).

- **DBO:** es la cantidad de oxígeno requerida para la respiración de los microorganismos responsables de la oxidación bioquímica de la materia orgánica, a través de su actividad metabólica en medio aeróbico a un tiempo y a una temperatura especificada. Indirectamente representa una medida de la concentración de materia orgánica biodegradable contenida en el agua (Parra, 1999).

- **DQO:** es un parámetro analítico de la polución que mide el material orgánico degradable y no biodegradable que pueden ser oxidados químicamente (López, 2009). Estos dos parámetros orgánicos se relacionan según la siguiente tabla.

Tabla 2.1. Tratamiento requerido según la biodegradabilidad.

DBO/DQO	Biodegradabilidad del agua residual	Tratamientos Sugeridos
De 0,1 a 0,4	Poco biodegradable	Físico-químico Químico (Pruebas de Jarras)
De 0,4 a 0,6	Biodegradable	Combinar: Físico-químicos con biológicos (Prueba de tratabilidad)
Mayor de 0,6	Muy biodegradable	Biológico (cualquier versión de lodos activados)

Fuente: Manual para la formación del medio ambiente 2008. Pag 209

- **Materia inorgánica:** son varios los componentes inorgánicos de las aguas residuales que tienen importancia para la determinación y control de la calidad del agua. Las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua aumentan tanto por el contacto del agua por las diferentes formaciones geológicas, como por las aguas residuales, tratadas o sin tratar que a ellas se descargan (Metcalf and Eddy, 1996; Hidalgo, 2009).

- **pH:** la concentración de ión hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo de concentraciones adecuados para la adecuada proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico (Metcalf and Eddy, 1996). El agua residual debe tener valores de pH entre 6 y 9; si es menor que 6 tiende a ser corrosiva, y al estar por encima de 9 puede ocurrir la precipitación de algunos iones metálicos. (Hidalgo, 2009)

- **Nitrógeno y fósforo:** los elementos Fósforo y Nitrógeno son esenciales para el crecimiento de microorganismos, por ello es que reciben el nombre de nutrientes y bioestimuladores. El contenido total de nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. Por su parte, el fósforo en soluciones acuosas se presenta frecuentemente en forma de ortofosfatos, polifosfatos y los fosfatos orgánicos. Los elementos Fósforo y Nitrógeno son esenciales para el crecimiento de microorganismos, por ello es que reciben el nombre de nutrientes y bioestimuladores. El contenido total de nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. Por su parte, el fósforo en soluciones acuosas se presenta frecuentemente en forma de ortofosfatos, polifosfatos y los fosfatos orgánicos (Metcalf and Eddy, 1996; Hidalgo, 2009).

- **Compuestos tóxicos orgánicos:** algunos cationes son de gran importancia de cara al tratamiento y evacuación de aguas residuales. Muchos de estos compuestos están clasificados como contaminantes prioritarios. El cobre, el plomo, la plata, el cromo el arsénico y el boro son tóxicos en mayor o menor grado para los microorganismos, razón por la cual deben ser considerados en el proyecto de plantas de tratamiento biológico. Algunos aniones tóxicos, entre los que se incluyen los cianuros y los cromatos, están asimismo presente en los vertidos industriales y deben ser eliminados mediante pre-tratamientos adecuados antes de verter a las aguas residuales municipales, (Metcalf and Eddy, 1996).

- **Metales pesados:** como constituyentes importantes de muchas aguas también se encuentran cantidades, a nivel de trazas, de muchos metales. Entre ellos podemos destacar, el níquel, el manganeso el plomo, el cromo, el cadmio, el cinc, el cobre, el hierro y el mercurio. Muchos de estos metales también están catalogados como

contaminantes prioritarios. Debido a su toxicidad, la presencia de cualquiera de ellos en cantidades excesivas interferirá con gran número en los usos del agua (Metcalf and Eddy, 1996; Hidalgo, 2009).

– **Gases:** los gases que con mayor frecuencia se encuentran en aguas residuales brutas son el nitrógeno, el oxígeno, el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno, el amoníaco y el metano. Los tres primeros son gases de común presencia en la atmósfera, y se encuentran en todas las aguas en contacto con la misma. Los tres últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales (Metcalf and Eddy, 1996).

• **Oxígeno disuelto:** oxígeno presente en el aire y por solubilidad existe en el agua, su solubilidad depende de la presión y temperatura. La determinación de oxígeno disuelto (OD) es muy importante en el área ambiental por ser el factor que determina la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas en un medio particular según lo siguiente:

Oxígeno disuelto >0: condición aeróbica;

Oxígeno disuelto=0 y oxígeno molecular >0: condición anóxica.

Oxígeno disuelto=0 y oxígeno molecular=0: condición aneróbica (Parra, 1999)

• **Sulfuro de hidrógeno:** el sulfuro de hidrógeno se forma mediante el proceso de descomposición de la materia orgánica que contiene azufre, o en la reducción de sulfitos a sulfatos minerales, mientras que su formación queda inhibida en presencia de grandes cantidades de oxígeno. Es un gas incoloro, inflamable, con un olor típicamente característico que recuerda al de huevos podridos. El ennegrecimiento del agua residual y del fango se debe, generalmente, a la formación de sulfuro de hidrógeno que se combina con el hierro presente para formar sulfuro ferroso (FeS) u otros sulfuros metálicos como por ejemplo cabo la reacción del plomo con el sulfuro la cual es $Pb^{+2} + S^{-2} \leftrightarrow PbS$; el cual posee una coloración negra. (Metcalf and Eddy, 1996).

2.2.5. Características biológicas.

Se refiere al número y tipos de microorganismos presentes en el agua, lo que constituye un indicio de la calidad del agua. Muchas formas de vida microbiana pueden existir en agua en tanto se satisfagan las necesidades físicas y nutricionales apropiadas

para el crecimiento. Las bacterias aerobias y los protozoarios necesitan oxígeno disuelto para crecer (Henry y Heinke, 1999; Hidalgo, 2009).

2.2.6. Tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales recogidas en ciudades y municipios deben ser conducidas, en última instancia, a cuerpos de aguas receptores o al mismo terreno. La compleja pregunta acerca de que contaminantes contenidos en el agua residual y a qué nivel deben ser eliminados de cara a la protección del entorno, requiere una respuesta específica en cada caso concreto. Para establecer dicha respuesta es preciso analizar las condiciones y necesidades locales en cada caso, y aplicar tanto los conocimientos científicos como la experiencia previa de ingeniería, respetando la legislación y las normas reguladoras de la calidad del agua existente.

Para lograr tal fin, es preciso combinar varios tratamientos elementales cuyas bases pueden ser físicas, químicas o biológicas. Los tratamientos en los que predominan los fenómenos físicos son conocidos como operaciones unitarias, mientras que aquellos métodos en los que la eliminación de los contaminantes se realiza en base a procesos químicos o biológicos se conocen como procesos unitarios. En la actualidad, las operaciones y procesos unitarios se agrupan entre sí para constituir los así llamados pre-tratamientos, tratamientos primarios, secundarios y terciarios (Metcalf and Eddy, 1996).

2.2.7. Pretratamiento

El pretratamiento de las aguas residuales se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia puede provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Entre los pretratamientos tenemos:

– **Desbaste:** es la primera operación unitaria que se realiza en una planta de tratamiento. Una rejilla es un dispositivo con aperturas generalmente de tamaño uniforme, utilizado para retener los sólidos gruesos que arrastra el agua residual. Los elementos separadores pueden estar constituidos por barras, alambres, varillas, rejillas, tela metálica o placas perforadas y las aberturas pueden ser de cualquier forma,

aunque generalmente son ranuras rectangulares u orificios circulares (Metcalf and Eddy, 1996; Terence, 1999).

– **Tanques de igualación:** son utilizados para la homogenización de caudales, que consiste en amortiguar las variaciones de caudal con el objeto de conseguir un caudal constante o casi constante. Esta es una medida que se emplea para prevenir la desestabilización que las variaciones de caudal provocan en las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales, y para mejorar, en consecuencia, la efectividad de los procesos de tratamientos situados aguas abajo (Cuzzi y Odriozola, 2003).

2.2.8. Tratamiento primario

En el tratamiento primario se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual.

– **Coagulación-Floculación:** los procesos de coagulación y de floculación se emplean para extraer del agua los sólidos que en ella se encuentran suspendidos siempre que su rapidez de asentamiento sea demasiado baja para proporcionar clarificación efectiva. La clarificación del agua, el ablandamiento con cal, el espesamiento de lodos y el desecamiento, dependen de una correcta aplicación de las teorías de la coagulación y la floculación para que puedan efectuarse con éxito (Kemmer, 1997; Dorado *et al.*, 2007).

Teoría de la coagulación: para separar las partículas coloidales suspendidas en el agua es necesario un cambio de estado que permitan que se aglomeren y formen corpúsculos de mayor tamaño, decantándose por peso en condiciones de velocidad satisfactorias. Por lo tanto, la suspensión debe desestabilizarse al transformarse por medios artificiales, mediante dos acciones diferentes:

Una desestabilización efectuada por la adición de productos químicos que, por medio de mecanismos de agregación y de adsorción, anulan las fuerzas repulsivas o actúan sobre la hidrofilia de las partículas coloidales (llamada usualmente coagulación).

Una aglomeración de los coloides “descargados”, que resulta de diversas fuerzas de atracción entre partículas puestas en contacto, primero por movimiento Browniano y después por agitación mecánica exterior, que origina partículas de suficiente tamaño flóculos (llamada usualmente floculación).

Coagulación: la coagulación es, por definición, el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales que se consiguen al neutralizar sus cargas eléctricas negativas, al punto donde sus cargas de superficie no son tan fuertes como para prevenir su colisión. Consiste en introducir en el agua un producto capaz de:

- Neutralizar las cargas electronegativas del coloide en el agua.
- Formar un aglomerado fácil de sedimentar (Coraspe *et al.*, 1989).

Factores que influyen en la coagulación

El tratamiento de coagulación óptimo de un agua cruda tiene por objeto lograr un equilibrio muy complejo en el que están implicadas muchas variables. Así pues, para un agua dada, existirá un óptimo interrelacionado de condiciones, tales como pH, turbiedad, composición química del agua, tipo de coagulante y factores físicos del tipo de la temperatura y factores de mezcla.

Efecto del pH: los primeros investigadores de coagulación en el tratamiento de agua observaron que el pH era la variable independiente más importante de entre las muchas que había que considerar. Estos investigadores establecieron sin lugar a duda que, al menos, existe una escala de pH para un agua dada, dentro de la cual se registra una buena coagulación-floculación en el tiempo más corto para una dosis de coagulante determinada. La amplitud de la escala del pH está influenciada por el tipo de coagulante empleado, así como también por la composición química del agua y concentración del coagulante. Siempre que sea posible, la coagulación deberá efectuarse dentro de esta zona óptima de pH. Si no se trabajase dentro de la zona óptima para un agua dada, no sólo se derrochará una cierta cantidad de productos químicos, sino que el efluente de la planta de tratamiento de aguas será de calidad inferior.

Efecto de las sales: las aguas naturales nunca son puras sino que constituyen soluciones inorgánicas de concentraciones y composiciones diversas. El efecto de estas sales en el proceso de coagulación ha sido estudiado con detalle y se ha demostrado que ejerce una influencia determinada., que es función del ión específico y de su concentración. Los efectos principales de algunos iones son la modificación de los siguientes factores: 1) el margen de pH de coagulación óptima; 2) el tiempo necesario para la floculación; 3) la dosis óptima de coagulante, 4) y el coagulante

residual en el afluente. Además se han realizado estudios que han permitido realizar generalizaciones sobre los efectos de los iones en la coagulación:

1. Por regla general, la coagulación con sales de aluminio o hierro está sometida a una interferencia mayor de los aniones que de los cationes. En consecuencia, los iones del tipo sodio, calcio y magnesio ejercen un efecto relativamente pequeño sobre la coagulación.

2. Los aniones amplían el rango óptimo del pH para la coagulación hacia el lado ácido en un grado que depende de su valencia. De este modo los aniones monovalentes tales como cloro y nitrato, ejercen un efecto relativamente pequeño, mientras que los de sulfato y fosfato provocan desplazamientos notables de los valores óptimos de pH.

Efecto de la naturaleza de la turbiedad: la naturaleza de la turbiedad también es digna de tenerse en cuenta. Esta turbiedad se debe a la presencia de partículas, las cuales en su mayoría presenta un tamaño en el rango de 0,2 a 5 μ , es decir, que su tamaños corresponden a la escala superior de tamaños de los verdaderos coloides en un rango que permitirá su sedimentación por efecto de la gravedad si se deja transcurrir un tiempo suficiente. La coagulación de estas suspensiones se realiza con relativa facilidad, una vez que se haya determinado el pH adecuado. Sin embargo, hay que tener en cuenta las siguientes generalizaciones:

1. Por regla general, una vez que aumenta la turbidez es preciso añadir algo más de coagulante, pero la dosis de este no aumenta linealmente con el aumento de la turbiedad.

2. Paradójicamente, en el caso de turbiedades muy elevadas, se requieren dosis de coagulantes relativamente más pequeñas debido a las mayores probabilidades de colisión, por esta misma razón las turbiedades muy bajas suelen ser más difícil de eliminar por coagulación.

3. La materia orgánica presente en el agua no aumenta la demanda de coagulante.

4. Es más fácil coagular una distribución amplia de tamaño de partículas, que una suspensión que contenga un solo tipo de tamaño o una gama muy estrecha de estos.

Efecto del coagulante: uno de los factores que influye en la coagulación y que el encargado de una planta de abastecimiento de agua puede controlar es la selección del

coagulante. Por ejemplo, aunque el alumbre es, con mucho, el coagulante que más se emplea, también pueden emplearse sales de fierros, que, en algunos casos son más ventajosos que el alumbre, ya que las sales de hierro poseen un rango de pH para una buena coagulación más amplio que las de aluminio. Sin embargo, la selección del coagulante aplicable a un agua determinada debería basarse en una comparación experimental de su comportamiento, sin olvidar la influencia de los factores económicos.

Efecto de los factores físicos: se dispone de escasa información experimental sobre el efecto de la temperatura sobre la coagulación, especialmente de las temperaturas del orden de 0°C , pues los encargados de la planta de tratamiento de agua suelen estar de acuerdo en que surgen dificultades durante aquellos en los que las temperaturas del agua se aproximan a cero grado. Las características de sedimentación del floculo se deterioran y éste registra una tendencia a atravesar los filtros, lo que parece indicar que la resistencia de dichos floculos ha disminuido.

A medida que la temperatura disminuye, aumenta la viscosidad del agua y, en consecuencia, la velocidad de sedimentación del floculo disminuye. Aunque se sabe que la disminución de la temperatura reduce la velocidad de las reacciones químicas, en lo que respecta a la coagulación, este defecto es demasiado pequeño para que sea significativo. No obstante, se ha observado que el pH óptimo disminuye en función de la disminución de la temperatura, y que este desplazamiento es tanto más importante cuanto más pequeñas son las dosis de coagulantes.

Presencia de núcleos: en otro tiempo se pensó que los núcleos o partículas eran esenciales para la coagulación o formación inicial del floculo, pero hoy existe la opinión unánime de que la hidrólisis y precipitación subsiguientes de los coagulantes puede lograrse en ausencia absoluta de partículas sólidas en suspensión. Las partículas, a medida que su número aumenta, ejercen una indudable influencia sobre la velocidad de floculación y contribuyen al aumento de la densidad del floculo y, por consiguiente, dan lugar a velocidades de sedimentación superiores. EL pequeño número de partículas características de las aguas de baja turbiedad contribuyen a la lenta velocidad de formación del floculo y a las malas características de sedimentación de este.

Efecto de la mezcla: en una planta de tratamiento de agua se suele emplear dos etapas de mezcla o de otro procedimiento para generar turbulencia. La mezcla rápida

para distribuir el coagulante por toda el agua que se trata suele denominarse << mezcla instantánea >>. Esta mezcla rápida es esencial para dispersar uniformemente el coagulante y fomentar las colisiones de las partículas coagulantes con las que producen la turbiedad. Estas condiciones de turbulencia elevada deben mantenerse durante treinta a sesenta segundos, al final de cuyo período el coagulante se ha hidrolizado y ha sido absorbido por las partículas que ocasionan la turbiedad. La segunda etapa de crecimiento de flóculo, o floculación, consiste en una agitación moderada (The American Water Works Association, Inc. 1975).

Teoría de la floculación: en la coagulación, dosis fuertes de coagulantes producen un exceso de fangos que generalmente crean problemas. Por otro lado, no se consigue siempre un precipitado que posea las características deseadas para una buena separación. Por estas razones se ha recomendado el uso de floculantes (ayudantes de floculación). Al comienzo se utilizaron productos naturales minerales (sílice activada), luego orgánicos (almidones, alginatos, entre otros) y más tardes productos sintético denominados poli electrolitos (mayor masa atómica).

Floculación: la floculación es, por definición, la aglomeración de varios flóculos, mediante agitación suave, para formar partículas de mayor tamaño (aglomerados) con mayores velocidades de decantación. La agitación debe ser cuidadosamente controlada para impedir la desintegración de los floculos frágiles ya formados (Coraspe et al., 1989).

– **Precipitación:** la precipitación química en el tratamiento de aguas residuales con la finalidad de alterar el estado físico de los sólidos disueltos y en suspensión, y facilitar su eliminación por sedimentación (Metcalf and Eddy, 1996). El proceso de precipitado emplea el producto de solubilidad de un compuesto que contiene un ión o radical que es considerado perjudicial y que, en consecuencia, debe ser eliminado antes de que el agua pueda ser usada. La temperatura es un factor importante en las reacciones de precipitación. El producto de solubilidad depende de la temperatura; las características de la solubilidad del precipitado deseado influirán en la selección del equipo de tratamiento (Kemmer, 1989; Hidalgo, 2009).

– **Sedimentación:** consiste en la separación, por acción de la gravedad, de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua, esta operación

será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua. A este proceso se le suele denominar también decantación y se emplea para la eliminación de arenas, de materia en suspensión en flóculos biológicos y químicos, tanque de decantación primaria, de los flóculos químicos cuando se emplea la coagulación química y para la concentración de sólidos en los espesadores de fangos. El objetivo principal de la sedimentación es la obtención de un efluente clarificado y lodos con una alta concentración de sólidos (Metcalf and Eddy, 1996).

2.2.9. Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario de las aguas residuales está principalmente encaminado a la eliminación de los sólidos en suspensión y de los compuestos orgánicos biodegradables, aunque a menudo se incluye la desinfección como parte del tratamiento secundario. La expresión tratamiento secundario se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aeróbicos como anaeróbicos. A continuación se describirá el proceso de lodos activados; el cual ha sido utilizado para el tratamiento de aguas residuales tanto industriales como urbanas desde hace aproximadamente un siglo. (Hidalgo, 2009)

– Tratamiento biológico por lodos activados

Este proceso nació de la observación realizada hace mucho tiempo de que si cualquier agua residual, urbana o industrial, se somete a aeración durante un período de tiempo se reduce su contenido de materia orgánica, formándose a la vez un lodo floculento (Ramalho, 1983).

Consiste en poner en contacto el efluente de un tratamiento primario en una unidad de reacción denominada aireado con el lodo activado (de alta concentración microbiana) previamente separado que recibe el afluente del mencionado aerador. El lodo activado separado es para ello recirculado parcialmente a la unidad de reacción, en donde la suspensión microbiana actúa sobre el sustrato biodegradable presente en el líquido afluente del sistema; el esquema de este proceso se muestra en la Figura 2.1.

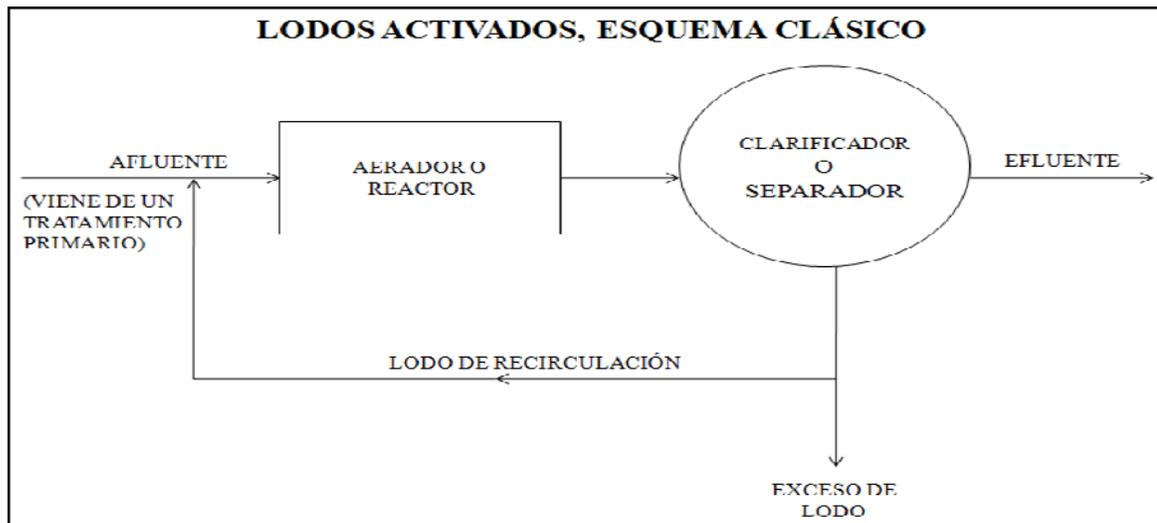


Figura 2.1. Diagrama del bloque de un tratamiento biológico de lodos activados.

El proceso en sí, de remoción de la materia orgánica biodegradable, se verifica en la unidad esencial del sistema, el reactor o aerador (este nombre en virtud de que en la unidad de tratamiento se airea el líquido bajo tratamiento). La remoción de la DBO se obtiene a través de los siguientes mecanismos esenciales:

- a. *Adsorción y coagulación* de aquellos sólidos suspendidos y coloidales que no hayan sido previamente separados durante la etapa de tratamiento primario.
- b. *Biosorción*, en donde la materia orgánica soluble en el líquido residual es, inicialmente, removida por absorción y almacenamiento, en las células de los organismos responsables de la actividad biológica presentes en el reactor y que, como dijéramos, se pone en íntimo contacto con tales sustratos antes de promoverse una mezcla efectiva del lodo activado recirculado con el líquido afluyente al proceso.
- c. A través del crecimiento del lodo, consecuencia de una *asimilación microbiológica* a través de sus mecanismos metabólicos de *respiración y síntesis* (crecimiento y multiplicación).
- d. A través en mayor o en menor grado de una *autodigestión* (respiración endógena) de las masa microbianas, cuando existan limitaciones de sustrato biodegradable (Rivas, 1978).

Por lo expuesto, puede comprenderse la importancia que reviste la relación de los dos elementos presentes en este proceso: el sustrato biodegradable disponible y la biomasa activa del sistema. Las ecuaciones que en los últimos años se han aparecido, tratando de racionalizar el diseño de estos tratamientos esencialmente biológicos, están toda íntimamente ligadas con tal relación, en la que existe unánime consenso de llamar: factor de carga del sistema (F/M), el cual está representado de acuerdo a la definición, por:

$$\frac{F}{M} = \frac{\text{sustrato/unidad de tiempo}}{\text{biomasa activa en el sistema}} \quad (2.1)$$

El sustrato biodegradable disponible, por unidad de tiempo, puede estar representado por el parámetro que es más representativo a este respecto, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). La biomasa activa presente y en contacto con el sustrato, puede estar a su vez representada, como ha sido la tendencia general durante los últimos años, por los sólidos suspendidos volátiles contenidos en la unidad de reacción del sistema, aerador. De acuerdo a tales consideraciones el valor del factor de carga puede ser ahora calculado así:

$$\frac{F}{M} = \text{factor de carga} = \frac{\text{Kg de DBO}_{\text{aplicada}}/\text{día}}{\text{Kg sól.suspend.volátiles en el aerador}} = \frac{\text{Kg DBO/día}}{\text{SSV.Volumen Reactor}} \quad (2.2)$$

(Rivas, 1978).

- **Factores que afectan la operación del sistema de lodos activados.**

- 1. Concentración de la materia a biodegradar (sustrato)**

Exceso de sustrato: en este caso demasiado sustrato en el reactor biológico puede ocasionar un déficit de oxígeno disuelto y la generación de microorganismos filamentosos no floculantes. Por otra parte una proporción significativa del sustrato no puede ser removida y pasa directamente a través del sistema disminuyendo la eficiencia del mismo.

Déficit del sustrato: en este caso el sistema no puede mantener un crecimiento bacteriano deseado. Se genera un efluente muy turbio, el cual está formado por partículas poco biodegradables provenientes de residuos de la auto-oxidación de los microorganismos (López, 2009).

2. Déficit de nutrientes

El sistema de tratamiento biológico para líquidos residuales podríamos definirlos como un sistema de elaboración de bacterias, a partir de los contaminantes contenidos en el líquido residual a tratar. La fórmula de una bacteria es $C_5H_7NO_2$, por lo tanto requiere para su elaboración principalmente C, N y Fósforo. Como el objetivo del tratamiento biológico es remover la materia carbonada, se requiere nitrógeno y fósforo en concentraciones adecuadas para el crecimiento bacteriano. Algunos líquidos residuales industriales no contienen estos nutrientes en concentraciones suficientes para un crecimiento bacteriano muy alto, como es el que presenta el sistema de tratamiento biológico, en este caso es necesario agregarlos al líquido residual (como sales de amonio y óxido de fósforo).

Se estima que los requerimientos de nitrógeno y fósforo por cada 100 kg de DBO (a remover) contenidos en el líquido residual son: 5 kg de nitrógeno y 1 kg de fósforo (López, 2009).

3. Oxígeno disuelto.

Uno de los primeros parámetros que debe medir el operador al empezar a evaluar la planta de tratamiento es el oxígeno disuelto. Se considera un valor de oxígeno disuelto satisfactorio en el reactor biológico si está comprendido entre 2-3 mg/L.

El déficit de oxígeno disuelto en el reactor biológico (<1mg/L) es causado por concentraciones de materia biodegradable en el líquido residual mayor a la estimada en el diseño. Esta sobrealimentación origina una superpoblación de microorganismos aeróbicos no posible de mantener con la cantidad de O_2 suministrado al reactor biológico; esto trae como consecuencia la creación de condiciones anaeróbicas en el reactor biológico, se favorece el crecimiento de bacterias filamentosas, las cuales no son floculantes.

El exceso de oxígeno disuelto en el reactor biológico (> 4 mg/L) es causado por poca materia biodegradable en el líquido residual a tratar, baja concentración de sólidos suspendidos en el reactor biológico y el suministro excesivo de oxígeno en el reactor. Estas traen como consecuencias el incremento en el costo en el mantenimiento, de floculación del lodo y favorece la formación de espuma (López, 2009).

4. pH

El pH tiene influencia significativa en el reactor biológico debido a:

- a. Los microorganismos tienen un rango óptimo de actividad bacterial (pH entre 6-8).
- b. El grado de toxicidad en un líquido residual depende del pH (López, 2009).

5. Espuma.

Frecuentemente en el reactor biológico se observa una cantidad apreciable de espuma, lo cual debe ser considerada normal si esta espuma recubre menos de un 20% de la superficie del reactor biológico. Puede ser: espuma de color blanco o de color marrón claro.

Espuma Blanca: esta espuma es debida principalmente o a ciertas proteínas que son descompuestas parcialmente; es causada por; detergentes en el líquido residual, alta materia biodegradable y baja concentración de microorganismos que no pueden oxidar la DBO hasta la fase final, factores tóxicos tales como metales, pH y oxígeno disuelto, los cuales disminuyen la eficiencia de la masa microbiana en descomponer la materia carbonada.

Espuma marrón claro: esta tipo de espuma está asociada con ciertos microorganismos nitrificantes y filamentosos, suele aparecer cuando hay nitrificación y bacterias filamentosas en el lodo activado. Su aparición puede deberse a: baja relación de F/M, alta concentración de sólidos suspendidos en el reactor biológico y la presencia de bacterias filamentosas (López, 2009).

6 Relación entre los sólidos suspendidos volátiles y totales

En condiciones de fango activado en el reactor los sólidos en suspensión en él corresponden a MLSSV (sólidos volátiles en suspensión en el licor mezclado); mientras que lo sólidos suspendidos totales se indican mediante MLSS (sólidos en suspensión

en el licor mezclado). La relación de ellos representada por MLSSV/MLSS en un reactor de lodos activados está comprendida normalmente dentro del intervalo 0,70 a 0,76, esto es, que del 70% al 76% de los sólidos en suspensión son volátiles (Ramalho, 1983; Parra, 1999).

Otros parámetros tomados en cuenta para verificar el funcionamiento del tratamiento secundario según el tipo de proceso son mostrados en la siguiente figura.

TABLA 10-5
Parámetros de diseño para los procesos de fangos activados

Modificación de proceso	θ_c , d	F/M kg DOB ₅ aplicada/ kg SSVLM · d	Carga volumétrica, kg de DBO ₅ aplicada/ m ³ · d	SSLM, mg/l	V/Q, h	Q _r /Q
Convencional	5-15	0,2-0,4	0,32-0,64	1.500-3.000	4-8	0,25-0,75
Mezcla completa	5-15	0,2-0,6	0,80-1,92	2.500-4.000	3-5	0,25-1,0
Alimentación escalonada	5-15	0,2-0,4	0,64-0,96	2.000-3.500	3-5	0,25-0,75
Aireación modificada	0,2-0,5	1,5-5,0	1,20-2,40	200-1.000	1,5-3	0,05-0,25
Contacto y estabilización	5-15	0,2-0,6	0,96-1,20	(1.000-3.000) ^a (4.000-10.000) ^b	(0,5-1,0) ^a (3-6) ^b	0,5-1,50
Aireación prolongada	20-30	0,05-0,15	0,16-0,40	3.000-6.000	18-36	0,5-1,50
Aireación de alta carga	5-10	0,4-1,5	1,60-1,60	4.000-10.000	2-4	1,0-5,0
Proceso Kraus	5-15	0,3-0,8	0,64-1,60	2.000-3.000	4-8	0,5-1,0
Oxígeno puro	3-10	0,25-1,0	1,60-3,20	2.000-5.000	1-3	0,25-0,5
Canal de oxidación	10-30	0,05-0,30	0,08-0,48	3.000-6.000	8-36	0,75-1,50
Reactor de flujo discontinuo secuencial	NA	0,05-0,30	0,08-0,24	1.500-5.000 ^d	12-50	NA
Reactor Deep Shaft	SI	0,5-5,0	SI	SI	0,5-5	SI
Nitrificación de etapa única	8-20	0,10-0,25 (0,02-0,15) ^c	0,08-0,32	2.000-3.500	6-15	0,50-1,50
Nitrificación en etapas separadas	15-100	0,05-0,20 (0,04-0,15) ^c	0,05-0,14	2.000-3.500	3-6	0,50-2,00

^a Unidad de contacto.
^b Unidad de estabilización de sólidos.
^c NKT/SSVLM.
^d Los SSLM varían en función de la fase del ciclo operativo.
NA = No aplicable.
SI = Sin información.

Figura 2.2. Parámetros de diseño para los procesos de fangos activados

Fuente: (Metcalf and Eddy, 1996).

2.2.10. Tratamiento terciario.

El tratamiento terciario denominado también tratamiento avanzado, utilizado para la eliminación de constituyentes de las aguas residuales que merecen especial atención, como los nutrientes, compuestos tóxicos, y los excesos de materia orgánica o de sólidos disueltos y/o en suspensión.

– **Electrodialisis:** en la electrodialisis (ED) la fuerza impulsora es de carácter eléctrico. Membranas semipermeables, que tienen propiedades de intercambio de anión

y de catión, son aplicadas en formas alternadas en una prensa con pasillos angostos de agua entre ellas.

Cuando se aplica una corriente directa a los electrodos colocados a cada lado de las membranas apiladas, los aniones se desplazan hacia el ánodo y los cationes hacia el cátodo. Ya que la membrana de intercambio de cationes sólo permite el paso de cationes y la membrana de intercambio de aniones el paso de aniones, la alternancia de membranas genera concentración y dilución en los compartimientos alternados del apilamiento. La velocidad de flujo a través de estos compartimientos pequeños o canales, el número de pilas empleadas y la magnitud de la fuerza impulsora o de la corriente eléctrica aplicada, determinan la cantidad de sal (cationes más aniones) removidos del agua (Kemmer, 1997; Ministerio de sanidad y política social, 2009).

– **Ósmosis inversa:** la ósmosis es un proceso en el cual un solvente fluye a través de una membrana separando una solución más fuerte de una solución más débil, el solvente fluye en la dirección que reducirá la concentración de la solución más fuerte. En la ósmosis inversa, una fuerza impulsora, la presión diferencial a través de la membrana, hace que el agua fluya de la solución más fuerte a la solución más débil. En consecuencia la presión requerida puede ser mayor a la presión osmótica (Ramalho, 1983).

– **Intercambio iónico:** el intercambio iónico remueve de un agua cruda los iones indeseables, transfiriéndolos a un material sólido, llamado intercambiador iónico, el cual los acepta cediendo un número equivalente de iones de una especie deseable que se encuentra almacenada en el esqueleto del intercambiador de iones. El intercambiador iónico tiene una capacidad limitada para almacenar iones en su esqueleto, llamada capacidad de intercambio; en virtud de esto, llegará finalmente a saturarse con iones indeseables. Entonces se le lava con una solución fuertemente regeneradora que contiene la especie deseable de iones los que sustituyen a los iones indeseables acumulados, dejando al material de intercambio en condición útil. Esta operación es un proceso químico cíclico, y el ciclo completo incluye de ordinario retro lavado, regeneración, enjuagado y servicio (Kemmer, 1997).

– **Oxidación-Reducción:** interpretada ampliamente, la oxidación es, por consiguiente, una reacción química en la que hay un incremento de valencia (o una

pérdida de electrones). Para conservar la neutralidad eléctrica de un sistema toda oxidación deberá estar acompañada de una reducción. Así, una reacción de reducción puede definirse como aquella en la que hay un decremento de valencia (o ganancia de electrones) (Kemmer, 1997).

2.2.11. Descripción del proceso productivo.

El proceso productivo (Figura 2.4) se inicia con una etapa de síntesis que consiste en revisar la formulación del pigmento y así proceder a pesar las cantidades de materiales necesarias para realizar el mismo, lo cual se realiza en el almacén de materia prima, una vez cuantificada dicha materia ésta es trasladada al área de elaboración, que consiste en preparar las soluciones que constituyen la materia prima en la elaboración del pigmento; dichas soluciones son preparadas en tanques de mezclados los cuales son destinados cada uno a una solución específica.

Seguidamente estas soluciones son bombeadas al tanque de precipitación del pigmento, manteniendo bajo control el tiempo estipulado en la formulación y las variables de proceso como pH, temperatura, entre otras. Una vez obtenido el cristal de pigmento se efectúa un tratamiento de superficie con soluciones de silicato, alúmina, entre otros; lo cual le proporcionará la estabilidad requerida.

Como se mencionó anteriormente existen dos procesos para las etapas posteriores del producto, el automatizado y el manual; en el primero, el pigmento sintetizado es bombeado a un filtro prensa para lograr la separación de los sólidos de sus aguas madres seguidamente viene el proceso de lavado, el cual consiste en lavar el pigmento con agua suavizada proveniente de pozos propios de la empresa, esto se hace para retirar del pigmento las sales solubles presentes en el mismo, este proceso se realiza hasta obtener una conductividad de $1100 \mu\Omega$, dicho valor es indicado por un panel de control existente en este proceso.

Posteriormente se realiza un proceso denominado exprimido que consiste en hacer entrar el agua dentro de las membranas de filtración con la finalidad de expandir las mismas y lograr la comprensión del pigmento para quitarle el agua presente en el mismo, el agua utilizada en la expansión es recirculada al tanque de depósito, luego se procede a un venteo en el cual se le inyecta aire a los conductos del filtro para

garantizar la ausencia de agua en el pigmento y lograr el desagüe total de las placas, por último se realiza el proceso de soplado que también consiste en una inyección de aire entre las membranas con la finalidad de secar el producto y disminuir su % de humedad, este proceso dura aproximadamente una hora.

Luego se procede con la descarga del filtro, donde la torta de pigmento es llevada por cintas transportadoras hasta una tolva de alimentación de la cámara de secado, en donde se seca el pigmento que pasa posteriormente a un molino centrífugo ubicado a la salida de la cámara, el cual posee un tamiz que permite el paso de partículas de cierto tamaño, este producto en polvo se transfiere a través de un transportador de cadena a tanques de almacenamiento (Holdding Tank) para su posterior descarga a un mezclador de agitación helicoidal. Después se procede a su envasado en sacos multipliego, en unidades de peso de 25 y 30 kilos; para ser enviados al almacén de productos terminados (Figura 2.5).

En el segundo proceso el pigmento sintetizado también es bombeado a un filtro prensa en donde se realizan los procesos de filtrado y lavado igual al anterior, sin embargo, la medición de conductividad es realizada por un operador tomando el agua de lavado y realizando la medición con un conductímetro; seguidamente se realiza el proceso de soplado.

De allí la torta es descargada manualmente del filtro prensa en grandes bateas, que luego son descargadas de la misma forma a unas bandejas que son llevadas en carritos transportadores a secadoras construidas en ladrillo refractario, que constan de dos serpentines de quince tubos por los cuales circula vapor sobrecalentado procedente de las calderas. Luego de que el producto es secado, la molienda se realiza a través de micromolinos recogiendo el producto molido en bolsas; este producto es transferido a unos homogeneizadores helicoidales. Por último se realiza el envasado igual que en el proceso anterior (Figura 2.6).

En este proceso se generan una gran variedad de pigmentos, sin embargo, los que se generan con mayor frecuencia son amarillo cromo, cromo medio, cromo limón en la línea continua; naranja de molibdato claro y oscuro, para la línea tradicional de inorgánicos; y amarillo hansa, bencidinas, rojos permanentes, rubines y toluidinas para la línea tradicional de orgánico. La materia prima utilizada está compuesta por cromo,

plomo (litargirio), dicromato de sodio, molibdato de sodio, silicato de sodio, sulfato de aluminio, bencidina, bona, beta naftol, bases y ácidos. De importancia es destacar que por ser un dato confidencial de la empresa no es posible revelar las formulaciones.

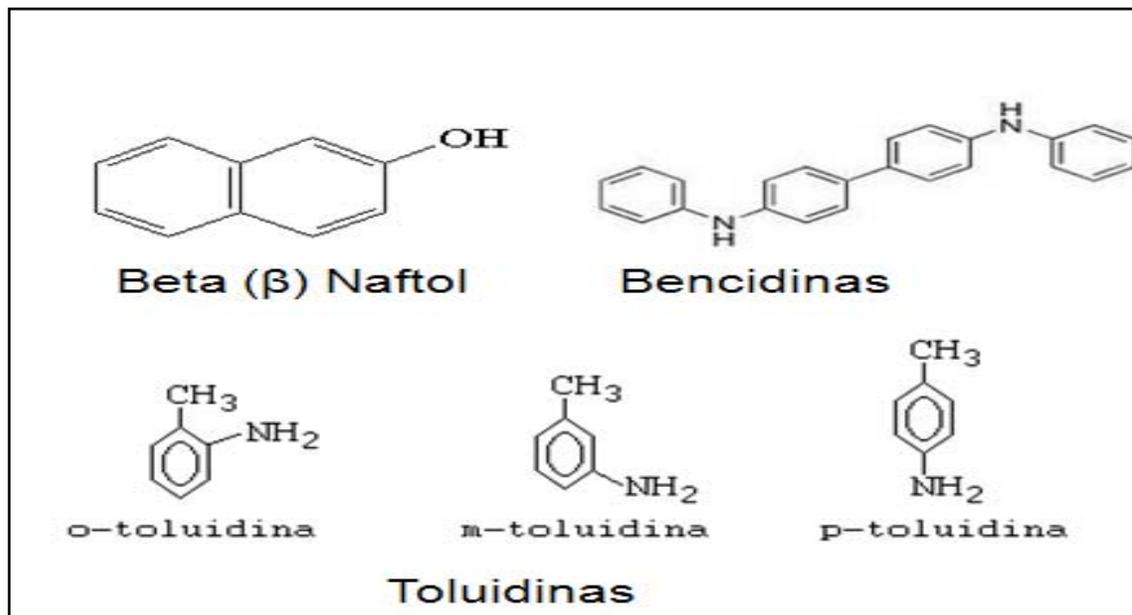


Figura 2.3. Estructura de algunos compuestos que constituyen la materia prima

Al conocer el proceso productivo se identifican las etapas donde se generan los afluentes que son tratados en la planta de tratamiento de aguas residuales, las cuales se enuncian de seguida: filtrado, lavado y exprimido del pigmento; además, mediante observación directa se pudo constatar que existen afluentes que llegan a la planta debido a que los operarios realizan lavados en el piso donde se derraman soluciones.

2.2.12. Descripción de la planta de tratamiento.

Luego de conocer el proceso productivo, se procedió a identificar los procesos que se llevan a cabo en la planta de tratamiento de las aguas residuales (Figura 1.1), mediante observación directa realizada durante un recorrido por la misma, logrando identificar que los tratamientos se realizan por separados a cada línea de alimentación hasta llegar al tanque de igualación, razón por la cual la descripción de estos procesos se realizan de forma separada a fin de detallar el tratamiento que recibe cada una:

1. Línea de inorgánicos de la planta tradicional (Inorgánico 1): el efluente proveniente de esta línea llega por gravedad a la planta de tratamiento, pasando primeramente por unas rejillas dispuestas para realizar la función de un desbastador con fines de retener sólidos de gran tamaño para evitar la obstrucción de las bombas, seguidamente pasa al sistema de sedimentación primario, conformado por dos tanques rectangulares que contienen baffles en su interior, siendo su función separar los sólidos sedimentables que pueden venir de la descarga.

De allí pasan por rebose a un tanque de bombeo, el cual se utiliza para regular la variación en el caudal del efluente y a su vez establecer un efecto amortiguador; además sirve para enviar a través de un sistema de control de nivel una rata de bombeo constante al tanque de agitación rápida, en el cual se añade sulfuro de sodio (Na_2S) para precipitar los metales pesados (plomo, cromo, entre otros) (Rodríguez y Rondón, 2002). Posteriormente estos efluentes pasan a un clarifloculador concéntrico que presenta forma cónica en el cual se realiza una agitación lenta con adición de un polímero floculante y se deja sedimentar los sólidos provenientes de la precipitación, luego pasan por rebose al tanque de igualación. A esta línea llegan principalmente cromo, plomo y molibdeno compuestos presentes en la materia prima utilizada para la formulación de los pigmentos que se procesan en esta línea.

2. Línea de inorgánico de amarillo cromo (Inorgánico 2): este efluente recibe el mismo recorrido que el tratamiento que la línea anterior; sin embargo, existen diferencias entre ambas, comenzando porque este efluente llega primero a un tanque de amortiguación antes de entrar a la planta, la segunda diferencia es que el sistema de sedimentación está conformado por un solo tanque y no presenta baffles en el mismo; Y por último, se tiene que en el tanque de agitación rápida existe un controlador de pH para garantizar que el mismo se encuentre de 8-9 (Rodríguez y Rondón, 2002) y así lograr la óptima precipitación con el sulfuro de sodio, este pH es ajustado con soda cáustica. A esta línea llegan principalmente cromo y plomo compuestos presentes en la materia prima utilizada para la formulación de los pigmentos que se procesan en esta línea.

3. Línea de orgánico: esta línea es prácticamente igual que las anteriores pero con dos diferencias primordiales; la primera que antes de entrar al sistema de sedimentador

conformado de un solo tanque, este efluente se une con el proveniente de las calderas, el cual entra a una trampa de grasas antes de ser unido, y la segunda que no recibe ninguna adición de químicos en el tanque de mezcla rápida. A esta línea llegan principalmente bencidina, bona y betanaftol compuestos presentes en la materia prima utilizada para la formulación de los pigmentos que se procesan en esta línea.

Luego de salir del tratamiento primario estas tres líneas llegan al tanque de igualación para seguir con el tratamiento de las mismas, allí se unen con una corriente de aguas negras que llega al mismo, posteriormente pasan a un tratamiento secundario (reactor biológico) de lodos activados para la disminuir los niveles de los parámetros hasta los niveles máximos permitidos por el Ministerio del Ambiente para la descarga de aguas residuales (art. 36 Decreto 3219, 1989).

Subsiguientemente al efluente del reactor se le agrega un químico denominado Arpol 2298 que es un polímero catiónico de alto peso molecular para precipitar los lodos; a continuación el efluente pasan a un clarificador secundario donde se separan estos lodos y son devueltos al reactor para mantener una concentración fija en el mismo, mientras que el efluente pasa hacia una cámara de cloración en la cual se le aplica hipoclorito de sodio para darle una calidad bacteriológica aceptable antes de salir a la tanquilla de descarga externa (Figura 1.1).

Los controles realizados en esta planta son: medición de cromo, plomo y sulfato a las aguas madres provenientes del proceso productivo de amarillos cromo, realizando la medición de los dos primero tres veces por semana y para el ultimo una sola vez; medición de cromo y plomo realizada una vez por semana al efluente del tratamiento primario de amarillos cromo, medición del volumen de sedimentación de lodo en el cono inhoff, pH y oxígeno disuelto en el reactor; este último realizado tres veces por semana, mientras que los dos primero durante toda la semana; verificación de pH en la dosificación de sulfuro de sodio en el tratamiento primario de amarillo cromo durante tres días a la semana y medición del caudal de cloro en la cámara de cloración, realizado dos veces por semana. Estos controles son realizados en la planta de tratamiento y no fueron estudiados en el presente trabajo de investigación a excepción del oxígeno disuelto.

Al conocer las condiciones de operación de la planta se notó que en el tratamiento fisicoquímico no se realiza la adición de coagulante, además que mediante el recorrido se observó que el color de los efluentes del tratamiento físico químico es similar al afluente, por esta razón se planteó realizar un prueba de jarra que consistió en simular el tratamiento actual que se realiza en planta pero con la adición de coagulante con la finalidad de comparar el porcentaje de remoción obtenido con estas pruebas y el logrado con el tratamiento actual que se realiza en la planta.

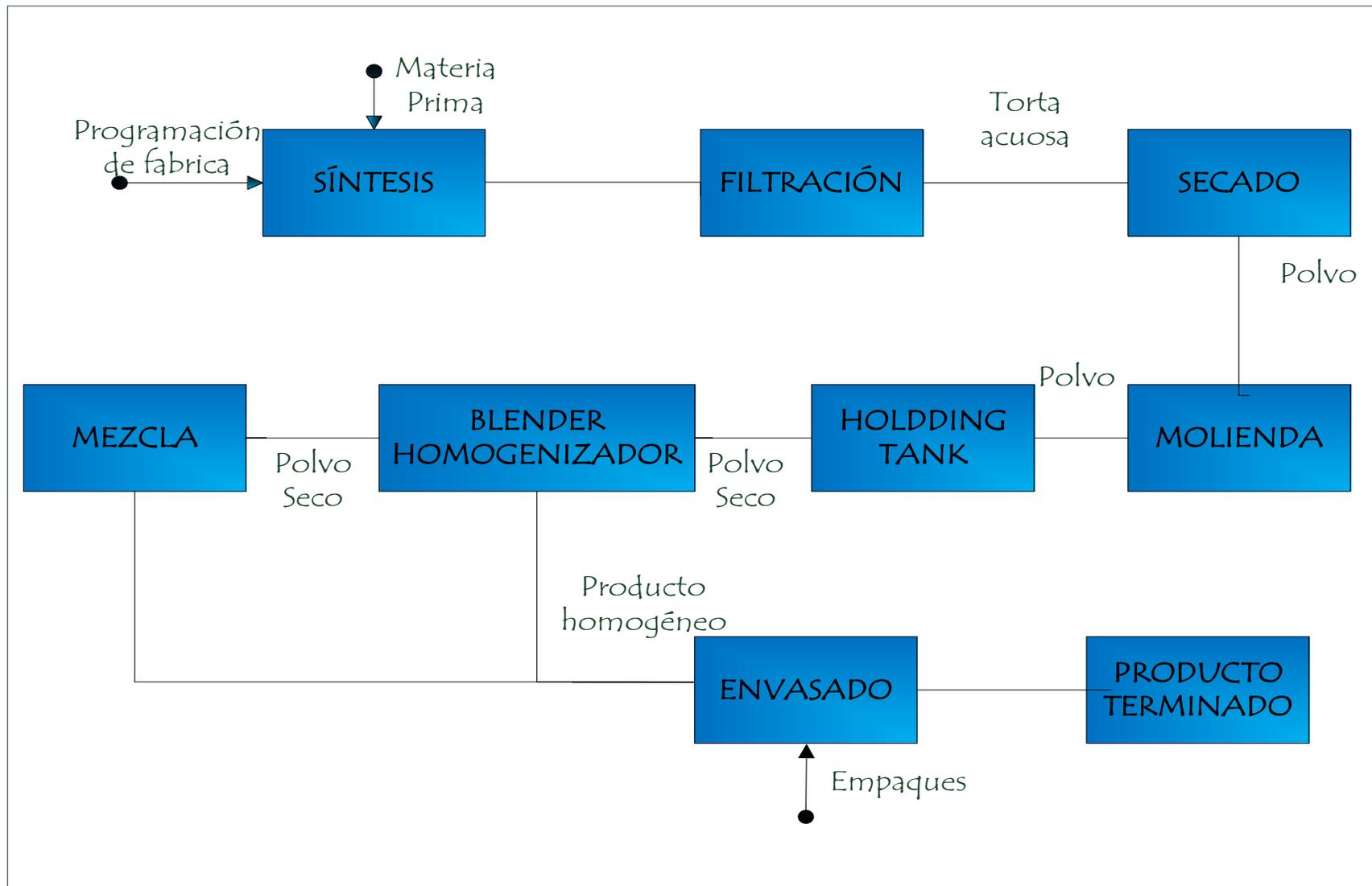


Figura 2.4. Diagrama de bloques del proceso productivo.

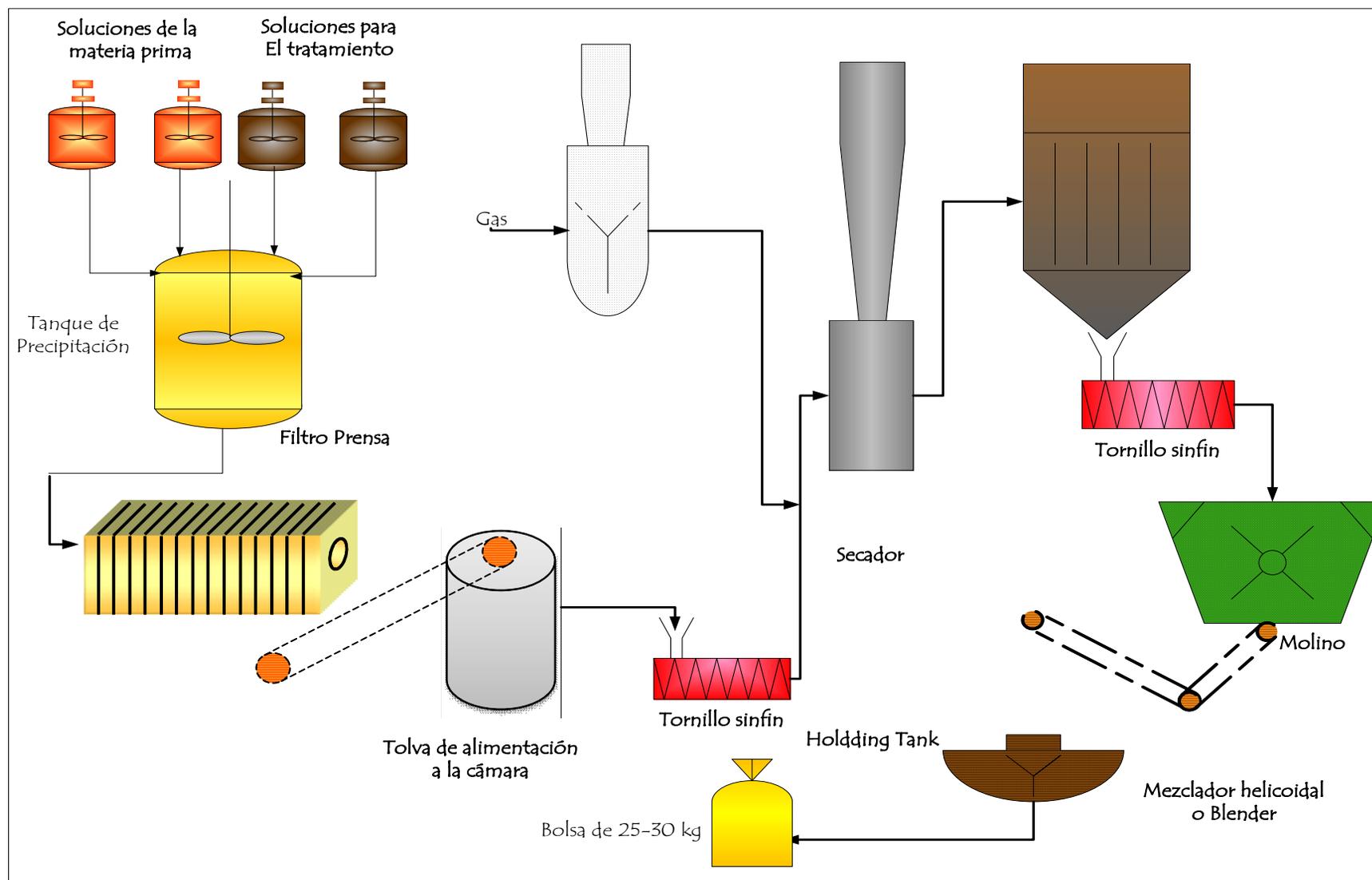


Figura 2.5. Diagrama del flujo de la planta de amarillos cromo.

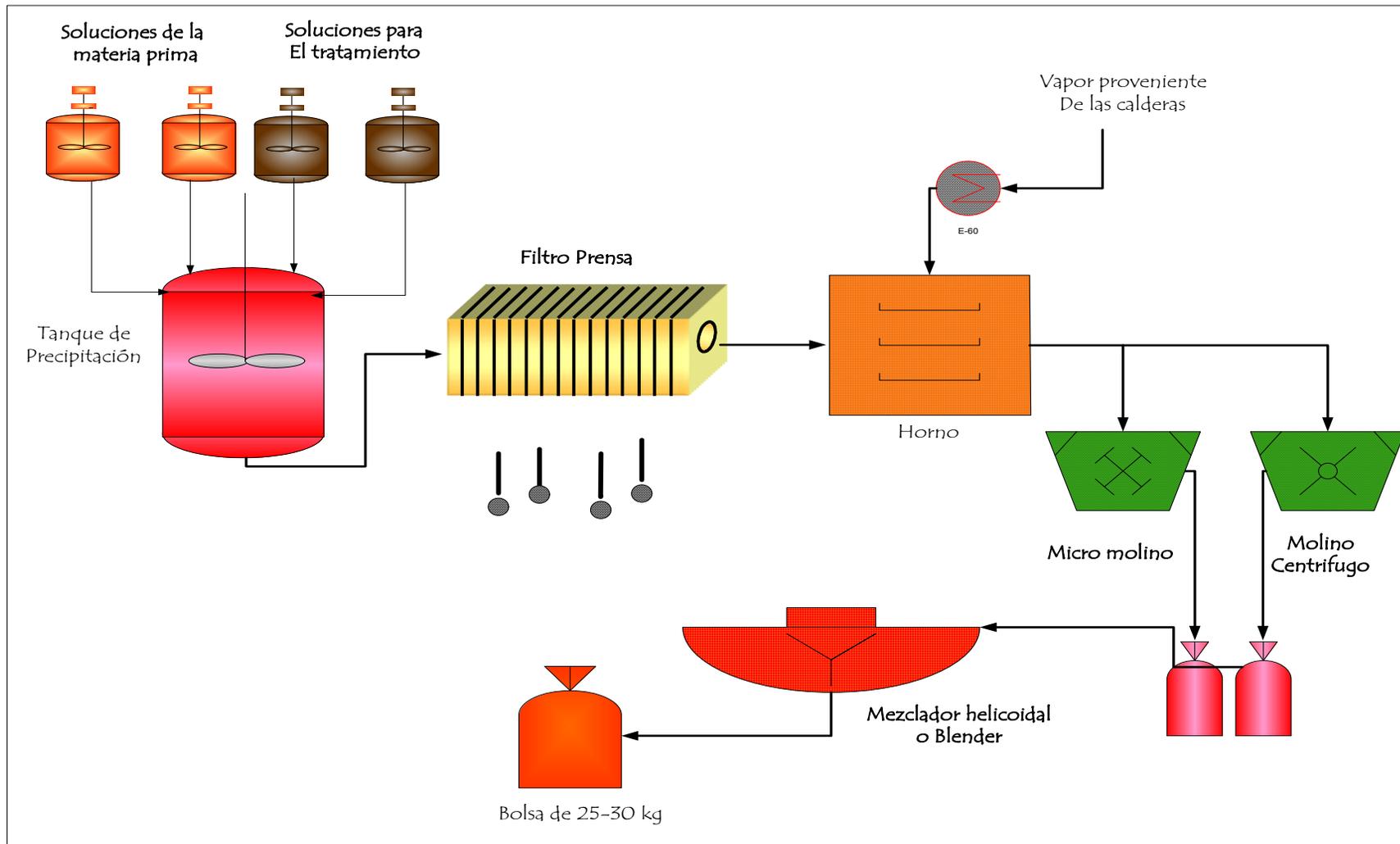


Figura 2.6. Diagrama de flujo de la planta tradicional.

3. METODOLOGÍA

En este segmento se describe el tipo de investigación que se va a realizar de acuerdo a su grado de profundidad y diseño empleado, contiene las actividades a realizar con una respectiva especificación de las técnicas, normas, estrategias y pautas a seguir para cumplir con el desarrollo de los procedimientos que permitan el logro de los objetivos estipulados.

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación que presenta este trabajo es descriptivo, definido por Best (1970) como:

Investigación descriptiva, comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, y la composición o procesos de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre cómo una persona, grupo o cosa se conduce o funciona en el presente.

Según el nivel de profundidad que presenta la pirámide holística, se concluye que la investigación es un proyecto factible, ya que esta se basa en la elaboración de una propuesta o modelo que pretende solucionar un problema, además es una investigación enfocada hacia el diseño de nuevos procesos que permitan la reutilización del agua en el proceso industrial, basándose en una serie de pasos consecuentes que requieren, describir, analizar, comparar, explicar y predecir, los resultados obtenidos en los estudios realizados (Arias, 2006).

De acuerdo a su naturaleza, la estrategia que emplea esta investigación para lograr los objetivos planteados es de tipo campo, esto se debe a que dicha investigación se realizará en un contexto determinado en donde se pretende comprender y resolver la situación, necesidad o problema existente; ya que allí se encuentra tanto el objeto de estudio como las fuentes consultadas de donde se obtendrán los datos más relevantes, los cuales serán analizados; es decir, que la investigación se ejecuta en el lugar de trabajo (Tamayo y Tamayo, 1996).

3.2. Fases de la Investigación

3.2.1. Diagnostico del funcionamiento de la planta de tratamiento.

En esta fase se conoce el proceso de producción (Figura 2.3) con el fin de identificar el origen del agua residual, así como las etapas que conforman la planta de tratamiento de aguas residuales (Figura 1.1), fase que se cumplió mediante la realización de las siguientes actividades.

3.2.1.1. Proceso productivo de la planta.

Se revisaron los manuales de operación del proceso productivo de la empresa CAVENPI, para identificar las condiciones de operación de las áreas que generan efluentes que se vierten en la planta de tratamiento de la mencionada empresa.

Inspección y recorrido del proceso productivo.

Esta etapa consistió en realizar un recorrido por el proceso productivo de CAVENPI, mediante el cual se conoció la secuencia del proceso, las secciones que lo conforman, su ubicación y funcionamiento, así como también la operación de cada uno de los equipos empleados en dicho proceso.

Realización de entrevistas al personal encargado de cada una de las secciones del proceso productivo.

Se amplió la información obtenida en la actividad anterior, ya que en este proceso se pudo conocer de manera detallada los tanques de almacenamiento y preparación de pigmento en el área de síntesis, las actividades que realizan los operarios en cada una de las secciones del proceso productivo, además de los turnos que se le laboran en el proceso de producción. Por otra parte, se identificaron las tuberías y sistemas de descargas los cuales transportan el agua residual hasta la planta de tratamiento.

3.2.1.2. Identificación de las secciones donde se generan efluentes.

Durante el recorrido del proceso y las entrevistas al personal, se conoció la procedencia del agua cruda, así como su frecuencia de uso en las etapas del proceso (síntesis, generación de vapor, exprimido, lavado), y en el mantenimiento y limpieza de

los equipos y de la planta en general; además, se identificó las etapas donde se genera el agua residual (generación de calor (caldera), filtración y lavado de pigmentos).

3.2.1.3. Identificación de las condiciones del proceso de acondicionamiento que reciben los efluentes de la empresa en la planta tratamiento.

Esta etapa consistió en conocer el funcionamiento de cada una de las unidades presentes en la planta de tratamiento, mediante las siguientes actividades:

Reconocimiento del proceso de tratamiento de efluentes mediante observación directa de las instalaciones, equipos y control operativo.

Se realizó un recorrido a la planta de tratamiento con el objeto de identificar de forma visual las unidades que conforman el proceso de adecuación de los efluentes de CAVENPI, así como también el control operativo que se realiza en la misma. Esto permitió realizar una descripción detallada sobre el funcionamiento y control de cada una de las etapas que conforman la planta de tratamiento.

3.2.1.4. Estudio del tratamiento fisicoquímico.

Esta fase consistió en la aplicación de una prueba de jarra para evaluar a nivel de laboratorio el tratamiento fisicoquímico aplicado a las tres líneas de efluentes provenientes de la producción, realizando una comparación entre el tratamiento actual que se lleva a cabo en la planta y un tratamiento con adición de coagulante, siendo necesario para tal fin tomar muestras del agua residual, antes y después, del tratamiento fisicoquímico que se realiza en planta.

Por no existir un método específico a seguir, la toma de muestra se realizó de la siguiente manera: de los tanques de sedimentación de cada línea, se tomó para los afluentes, una muestra de aproximadamente 14 L, almacenada en carboyas, utilizando como instrumento de recolección un recipiente plástico; mientras que para los efluentes, se tomó una muestra de 1 L, almacenada en un envase plástico del mismo volumen, recolectada de las tuberías de descarga provenientes del tratamiento fisicoquímico al tanque de igualación.

Partiendo de lo expuesto por (Coraspe *et al.*, 1989) cuando señala “para evaluar los resultados de una prueba de jarra no se siguen criterios convencionales o patrones

universales y casi se trata de un criterio particular del analista” se seleccionaron para evaluar los resultados de la prueba de jarra, las siguientes variables: turbidez inicial, turbidez final, tipo de coagulante y su dosis, tipo de floculante y su dosis, tiempo de formación, velocidad de sedimentación, tamaño y tiempo de sedimentación del flóculo, pH inicial y pH final quedando representadas en el instrumento de recolección de datos aplicado, que se presenta en las tablas 4.1, 4.3 y 4.5. Para evaluar tiempo de formación, velocidad de sedimentación, tamaño y tiempo de sedimentación del flóculo se fijaron criterios de evaluación cualitativos.

En las dos primeras, de carácter numérico, donde se asigno el valor de 5 para la más conveniente y 1 menos recomendable; en la tercera de carácter alfabético, se asigno para la letra A más recomendable y E para menos favorable; mientras que para tiempo de sedimentación del flóculo la evaluación se realizó mediante observación directa y dando un valor cuantitativo de manera apreciativa.

Se realizaron dos (2) pruebas sin repetición para cada afluente, una para evaluar el comportamiento de los coagulantes Arpol 2261, 2206, 2207 y 2275 con la adición del floculante Arpol 2209; y la otra, con la adición del floculante Arpol 2298.

3.2.1.5. Elaboración de la prueba de jarras.

Coraspe *et al.*, 1989 señalan tres condiciones de una prueba de jarras: una mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación.

Como pasos previos al inicio de la prueba se realizaron las siguientes actividades:

- ✓ Preparación de Floculantes al 0,1% *P/V* (Concentraciones fijadas por empresa Franmeller)
- ✓ Preparación de Coagulantes al 10% *V/V* (Concentraciones fijadas por empresa Franmeller)
- ✓ Preparación del sulfuro de sodio al 10% *P/V* (Rodríguez y Rondón, 2002)
- ✓ Ajuste del pH entre 8 y 9 porque es el rango requerido en planta para poder precipitar el plomo presente en dicho efluente (Rodríguez y Rondón, 2002)

Luego se procedió al practicar el ensayo de jarra así: Para mezcla rápida en la cual se añadió el sulfuro de sodio y el coagulante, se utilizo:

- ✓ velocidad de agitación 200 rpm
- ✓ tiempo de agitación de 2 min. para cada adición

Para mezcla lenta, en la cual se añadió el floculante, se utilizó:

- ✓ velocidad de agitación 30 rpm
- ✓ tiempo de agitación de 3 min.

Por último, se dejó sedimentar por un tiempo aproximado de 10 min. Sin agitación (0 rpm). Una vez decantado el lodo, se trasvasó directamente del beaker a recipientes plásticos de 100 mL muestras del sobrenadante; asimismo, se tomaron muestras de 100 mL de los efluentes recolectados en la actividad anterior, con la finalidad de medir la turbidez con turbidímetro externo a la empresa.

Posteriormente al obtener los resultados de turbidez y utilizando la ecuación 3.1 se calculó el porcentaje de remoción tanto de las distintas combinaciones evaluadas en la prueba de jarras para las tres líneas de alimentación como de los afluentes del sistema de tratamiento fisicoquímico de las mismas líneas. Los resultados fueron almacenados en las tablas 4.2, 4.4 y 4.6.

$$\%Remoción = \left(\frac{X_E - X_S}{X_E} \right) \cdot 100 \quad 3.1 \text{ (Metcalf and Eddy, 1996)}$$

Finalmente, para determinar cuál es el porcentaje de remoción de materia orgánica en el tratamiento fisicoquímico, que permita obtener la información de sustento para tomarlo como criterio ponderativo, se mandó a realizar el análisis de DQO a la mejor jarra de cada línea al igual que del agua cruda proveniente de las mismas, ya que la empresa no dispone de los equipos ni reactivos requeridos para la realización de este análisis.

3.2.1.6. Estudio del tratamiento biológico.

Esta fase consistió en conocer la operatividad del reactor de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa CAVENPI, para lo cual se requiere determinar los valores correspondientes a los parámetros de control y operación del mismo.

En primer lugar se identificaron los diferentes productos que se elaboran en planta, y sus respectivas materias primas, para definir los parámetros físicos, químicos y microbiológicos a ser evaluados, seguidamente se procedió a identificar los puntos

de muestreo donde se realizó la caracterización siendo estos definidos como: entrada y salida de los tratamientos fisicoquímicos de las tres líneas, tanque de igualación, entrada y salida del reactor así como el efluente dentro del mismo y salida final (Figura 1.1). Una vez definido los parámetros y los puntos de muestreo, se contactó al laboratorio externo contratado para la caracterización de los efluentes con el objeto de definir las fechas de ejecución de la toma de muestra y el tiempo de respuesta de los análisis realizados.

Concretada la fecha, el laboratorio procedió con la toma de muestras, la misma se lleva a cabo siguiendo los lineamientos de la norma COVENIN 2709:2002; ésta establece la captación, preservación y manejo de las muestras como sigue: La captación debe ser manual, por la variación en las características del efluente y porque no se requiere captación simultánea ni continua; la preservación y manejo depende de los parámetros, según la tabla 3.1. Vale la pena destacar que para la refrigeración (4°C) de las muestras se debe usar hielo comercial, y no hielo seco, puesto que estas se congelarían. Para el manejo de la muestra es necesario su identificación, que debe incluir: localización exacta del lugar de captación, fecha y hora de captación, tipo de muestra (instantánea, compuesta o integrada), determinaciones en el lugar de muestreo, información de las condiciones climáticas y ambientales, nivel del agua y caudal (COVENIN 2709, 2002).

La toma de muestras fue realizada un solo día, por parte del personal de HIDROLAB TOROS CONSULTORES C.A. con un tiempo de muestreo de cuatro horas; para realizar los análisis se necesitan cierto volumen de la muestra por lo cual para cada punto se tomó un volumen de 4L, el cual fue recolectado cada media hora tomando una alícuota de 400mL. Los análisis realizados en campos fueron pH, temperatura y altura del efluente a los vertederos de determinar aproximadamente su caudal.

En lo que se refiere a la caracterización del efluente, el personal de laboratorio realizó los análisis correspondientes según los métodos estándar para la evaluación del agua residual (Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, 21st, Edition, 2005). Los parámetros a evaluar y sus métodos de análisis se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.1. Preservación de las muestras.

Análisis	Envase	Volumen mínimo de muestra (mL)	Preservación	Periodo máx. de almacenamiento
pH	P, V	200	Analizar inmediatamente	2 h.
Sólidos	P, V	1000	Refrigerar	7 d.
Demanda Bioquímica de Oxígeno	P, V	1000	+ Refrigere.	6 h.
Demanda Química de Oxígeno	P, V	100	+ Refrigere. Añadir H ₂ SO ₄ hasta pH<2. Analizar Inmediatamente	7 d.
Fósforo	P, V	100	Refrigere pH<2 con H ₂ SO ₄	28 d.
Nitrógeno	P, V	500	Añadir H ₂ SO ₄ hasta pH<2, (Refrigerar)	7 d.
Sulfatos	P, V	100	Refrigerar	28 días
Temperatura	P, V	--	Determinar en el sitio de muestreo	--
Cloro residual	P, V	500	Analice inmediatamente	0,5 h.
Oxígeno disuelto	Botella Winkler	300	La titulación puede demorarse después de la acidificación	8 h.
P = Plástico V = Vidrio + Refrigerado = Almacenamiento a 4 ° C, en la oscuridad				

Fuente: COVENIN 2709, 2002

Tabla 3.2. Métodos utilizados para la determinación de los parámetros analizados en la caracterización.

Parámetros	Método
Potencial de hidrógeno	4500-H ⁺ B
Temperatura	2250 B
Sólidos suspendidos Totales	2540 D
Sólidos suspendidos Fijos	2540 D
Sólidos suspendidos Volátiles	2540 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno	5210 B
Demanda Química de Oxígeno	5220 D
Nitrógeno Total KJELDAHL	4500-Norg D
Fósforo Total	3120 B
Sulfatos	4110 B
Cromo Total	3120 B
Plomo Total	3120 B
Zinc	3120 B

Fuente: Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, 21st, Edition, 2005

Posteriormente y motivado a la inexistencia de memoria descriptiva de la planta de tratamiento se procedió a recopilar información bibliográfica con la finalidad de conocer cómo opera un reactor, encontrándose que existen ecuaciones las cuales se encuentran identificadas en el apéndice A como (Ec. A.3, Ec. A.4, Ec. A.5, Ec. A.6, Ec. A.7, Ec. A.8) que permiten calcular los principales parámetros de control y operación (Metcalf and Eddy, 1996; Parra, 1999) así como también la tabulación de los valores característicos de cada parámetro de diseño para los procesos de fangos activados (Figura 2.2).

El tiempo de respuesta del laboratorio para entregar la caracterización fue de 30 días. Luego de obtener los valores de caracterización se procedió al cálculo del % de biodegradabilidad y se realizaron los cálculos de los parámetros de control y operación (Apéndice A).

Por último con el fin de determinar el tamaño muestral (Ec. A.13) se realizó un análisis estadístico con datos de años anteriores para determinar las desviaciones presentes en cada parámetro, ya que éste representa un factor utilizado en el cálculo del tamaño muestral, además del error de muestreo (Ec. A.12) y la distribución normal

estándar asociado al nivel de confianza la cual tuvo un valor de 2,58 correspondiente a un nivel de confianza de 99% y obteniendo como variable de respuesta el tamaño o número de muestra (Araya, 2004).

3.2.2. Caracterización del agua a la salida de los clarifloculadores y a la descarga final de la planta de tratamiento.

En esta fase se analizaron las aguas del tratamiento primario de las líneas de inorgánico y de la salida final, con la finalidad de determinar los valores que presentan los parámetros regulados por el Decreto N° 3219 de la Presidencia de la República, de fecha 13 de enero de 1999 (G.O. N° 5305 extraordinario del 01/02/1999) para las aguas de riego.

3.2.2.1. Identificación de los parámetros a caracterizar.

Se procedió a la revisión del citado Decreto 3219 con la finalidad de identificar los parámetros y elementos o compuestos que son regulados por el mismo, para poder reutilizar el agua como agua de riego. Primeramente se identificó el tipo de agua según su uso, siendo la de riego clasificada como “tipo 2 subtipo 2b destinada al riego de cultivos no consumibles y sistemas contra incendio” (art. 5 Decreto 3219, 1989).

Luego de identificar el tipo de agua para la cual se desea reutilizar se identificaron los parámetros requeridos para su uso, siendo estos los nombrados a continuación: oxígeno disuelto (OD), organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales, nemátodos intestinales (*Ascaris*, *Trichuris* y *Anquilostoma*), clorofila (*), transparencia de las aguas medida con el disco Secchi. (*), aluminio, arsénico, bario, boro, cadmio, cianuro, cobre, cromo total, hierro total, litio, manganeso total, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, sólidos disueltos totales, sólidos flotantes, vanadio, zinc, biocidas, organofosforados y carbamatos, organoclorados, actividad α , actividad β . Donde el (*) significa aplicable al Lago de Valencia solamente (art. 8 Decreto 3219, 1989).

Posteriormente se identificaron los diferentes productos que se elaboran en planta, y sus respectivas materias primas; esto se hizo revisando las hojas de formulación de los pigmentos que se realizan en la planta, con la finalidad de reconocer

las materias primas que ingresan al proceso productivo; para determinar que parámetros y/o elementos de los ya identificados puedan estar presentes en el efluente del proceso productivo.

Los parámetros y/o elementos que se mandaron analizar en la caracterización de dichas aguas, fueron aquellos que se encontraron comunes en las dos revisiones realizadas (Tabla 4.16).

3.2.2.2. Planificación del experimento.

Una vez definidos los parámetros a caracterizar se procedió a delimitar los puntos de muestreo según el objetivo general planteado que establece recuperar el agua a la salida de los clariflocuradores o salida final de la planta de tratamiento, quedando delimitados a salida de los clarifloculadores de las líneas de inorgánico y de la salida final (Figura 1.1) y se contacto al laboratorio externo contratado para la caracterización de los efluentes con el objeto de definir las fechas de ejecución de la toma de muestra y el tiempo de respuesta de los análisis realizados.

Concretada la fecha el laboratorio procedió con la metodología referida en la sección 3.2.1.6.

3.2.2.3. Toma de muestras.

Esta fase consistió en tomar una muestra compuesta de cuatro litros por cada efluente en un período de muestreo de cuatro (4) h, el muestreo se realizó tomando alícuotas de 400 a 600 mL de cada efluente a un intervalo de tiempo de treinta (30) min.; realizando la medición de las variables de campos definida por el laboratorio siendo estas: pH, temperatura y altura del efluente a los vertederos de determinar aproximadamente su caudal.

3.2.2.4. Análisis de campo y especiales.

Por cuanto la empresa CAVENPI no dispone de equipos y reactivos necesarios para la realización de los análisis se contrató al laboratorio externo HIDROLAB TORO CONSULTORES C.A., quien se encargo de realizar los análisis pertinentes basándose

en los Métodos aprobados en el Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, en su 21^{va} Edición del año 2005.

Además utilizó un aseguramiento de la calidad en concordancia con lo establecido en las Normas EPA, Standard Methods, ASTM y Norma Internacional ISO/IEC 17025:2005, analizando al menos el 10% de las muestras por duplicado, utilizando en cada corrida analítica materiales de referencia o patrones certificados con trazabilidad, los cuales de acuerdo con el Procedimiento de Verificación de Ensayos MP-06-0, debe presentar un error inferior al 10% a fin de garantizar la exactitud y precisión de los ensayos efectuados.

Los métodos utilizados en el análisis de los parámetros se detallan en tabla 3.3.

Tabla 3.3. Métodos utilizados en los análisis de los parámetros caracterizados para utilizar el agua en el riego.

Parámetro	Método
Oxígeno disuelto	4500-O G
Organismos coliformes totales	9221 B
Organismos coliformes fecales	9221 E
Aluminio	3120 B
Plomo	3120 B
Bario	3120 B
Cromo	3120 B
Hierro	3120 B
Manganeso	3120 B
Molibdeno	3120 B
Sólidos disueltos totales	2540 C
Sólidos Flotantes	2530 B
Zinc	3120 B
Órganos clorados	EPA 8120
Órganos fosforados	6610 A

Fuente: Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, 21st, Edition, 2005.

3.2.3. Propuestas de las alternativas para alcanzar los objetivos de adecuación de las aguas residuales industriales que se encuentran a la salida de los clarifloculadores o la salida de la planta de tratamiento de efluentes.

En esta etapa se plantearon las alternativas que permitan adecuar el agua para su uso en el riego de las áreas verdes de la empresa CAVENPI, basándose en los niveles de reducción de los parámetros críticos de control que se encuentran fuera de norma según la caracterización obtenida en el objetivo anterior. Esto se logró realizando las siguientes actividades:

3.2.3.1. Establecimiento de los niveles de reducción para cumplir con el decreto 3219 respecto al agua seleccionada.

Una vez identificado el tipo de agua y los parámetros críticos (sección 3.2.2.1), se procedió con la identificación de los límites máximos correspondientes a dichos parámetros, luego se compararon estos límites con los determinados en la caracterización realizada, con la finalidad de identificar cuáles de ellos no cumplen con los valores críticos fijados en el artículo 8 del citado Decreto 3219. Los resultados obtenidos se tabularon en la tabla 4.17.

Posteriormente teniendo los valores de la caracterización y los límites fijados por el Decreto 3219 de la Presidencia de la República, de fecha 13 de enero de 1999 (G.O. Nº 5305 extraordinario del 01/02/1999), se calcularon para cada efluente caracterizado los porcentajes de desviación que presenta cada parámetro que se encuentra fuera de lo establecido.

3.2.3.2. Identificación y selección de los procesos que pueden ser aplicados a esta selección.

Identificados los parámetros que se deben ajustar a las regulaciones del citado Decreto 3219 para poder reutilizar el agua, se procedió a realizar una revisión bibliográfica acerca de las operaciones o procesos unitarios aplicados al tratamiento de aguas que permitan reducir los parámetros a ajustar, con el fin de obtener el principio de funcionamiento, así como las características de cada uno, los tipos de compuesto que remueve y su porcentajes de eficiencia o remoción, presentándose los resultados

de la revisión efectuada en tablas descriptivas 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 y 4.26.

Las selección de unidades para generar alternativas se hizo en base a una caracterización de referencia para la unión de los efluentes, esta caracterización fue calculada realizando un balance en componente (sección A.12), de donde se obtuvo el modelo matemático con el cual se realizó el cálculo de las concentraciones correspondientes a cada parámetro, que se indica a continuación:

$$V_T \cdot X_T = V_{I1} \cdot X_{I1} + V_{I2} \cdot X_{I2}$$

3.2.3.3. Generación de alternativas en base a los procesos investigados.

En esta etapa se plantean alternativas para un sistema de tratamiento de aguas residuales, con el fin de adecuar los parámetros a las normas correspondientes, y disminuir el grado de contaminación ambiental.

Cada alternativa planteada consta de una breve explicación del funcionamiento de los procesos u operaciones unitarias que contiene, un diagrama del proceso con las etapas involucradas en la misma, una tabla que represente las ventajas y desventajas y por último una tabla donde se muestra la concentración teórica de salida de cada parámetro después de someterse al tratamiento propuesto en cada alternativa, así como el valor de eficiencia que presenta cada unidad sugerida y el valor de eficiencia tomado por el investigador. Estos valores fueron tabulados en las siguientes tablas: 4.20, 4.22, 4.24 y 4.26.

El cálculo de las concentraciones de salida de cada unidad (Apéndice A) se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$C_s = C_e \cdot \left(1 - \frac{\% \eta}{100}\right) \quad (\text{Metcalf and Eddy, 1996}).$$

3.2.4. Selección de la(s) mejor(es) alternativa(as) en base al cumplimiento de los parámetros permitidos para el agua industrial o de riego.

En esta etapa se seleccionó la alternativa que resultó más conveniente según los criterios fijados por la empresa, posteriormente se describió la alternativa seleccionada realizando una breve definición de las unidades presentes en la alternativa seleccionada.

3.2.4.1. Selección de la propuesta.

Para seleccionar la alternativa más adecuada al tratamiento se empleo como herramienta una matriz de ponderación, en donde se le asignan pesos a los criterios planteados y posteriormente se le asigna un puntaje en base a una escala para cada alternativa según el criterio estudiado.

La elaboración de la matriz se realizó primeramente definiendo los criterios de evaluación y estableciendo un peso en porcentaje en orden de prioridad de manera que la suma de este peso de un 100%, seguidamente se definió una la escala numérica donde se evalúen las alternativas en relación a los criterios, utilizando una evaluación cualitativa, la cual va desde 5 para la más conveniente hasta 1 para la menos recomendable, comparando la conveniencia entre dichas alternativas, luego se asigna una ponderación a cada alternativa de acuerdo a la escala establecida en el paso anterior, se multiplica por el peso de cada criterio y se suman los puntos obtenidos de cada alternativa para obtener una puntuación total y finalmente se selecciona aquella alternativa que tenga la mejor puntuación. El formato de la matriz se presenta en la tabla 4.27.

La puntuación total se determina haciendo uso de la siguiente ecuación.

$$PT = \sum P. \%C$$

3.2.4.2. Descripción de la propuesta

Luego de seleccionar la alternativa más adecuada se procedió a describir las unidades que conforman dicha propuesta, complementando esta descripción con un diagrama de flujo que indique dichas unidades y los controles que se realizan en las mismas.

3.2.5. Elaboración de estudio costo/beneficio de la(s) alternativa(s) seleccionada(s).

En esta fase se realizó un estudio entre los costos producidos por la implementación de la alternativa seleccionada y los beneficios obtenidos con la implementación de la misma. Para el logro de este objetivo, se desarrollaron las siguientes actividades:

3.2.5.1. Búsqueda de información sobre los costos que genera la implementación de la alternativa propuesta.

Para el desarrollo de esta actividad, en una acción conjunta con la empresa, se solicitó cotizaciones de equipos, accesorios y sustancias químicas utilizados en la propuesta, a los proveedores autorizados para la cotización del proyecto que se llevará a cabo, en las cuales se describió cada uno de los accesorios, equipos y sustancias químicas requeridos, escogiéndose la más completa en cuanto a sugerencias y servicio. Las cotizaciones recibidas provinieron de las siguientes empresas: 2R Ingeniería C.A.; ANATEC C.A.; Ingenia del Centro C.A.; Calera Industrial C.A.; Induchem C.A.

Luego de seleccionar la cotización, se realizó la estimación de los costos, constituido por el capital fijo y el capital de trabajo, donde el primero, está compuesto por el costo de los activos fijos tangibles e intangibles, calculándose el valor de cada equipo, ya que para la correcta estimación del capital, fijo y de trabajo, se utilizan porcentajes sobre dicho costo (Tablas A.1 y A.2) (Giugni *et al.*, 2007).

Además, como el capital de trabajo está asociado a la materia prima, ésta se calculó por el consumo por año que tendría el efluente; dicho cálculo comenzó con la determinación del volumen de efluente tratado por año, seguido de la cantidad de químico consumida por este volumen y por último del costo generado (sección A.14). La suma del capital fijo y de trabajo genera la inversión inicial.

3.2.5.2. Estimación de los beneficios generados.

Posteriormente de calcular la inversión inicial conformada por el capital de trabajo y el capital fijo, se procedió a determinar los beneficios generados, los cuales se obtuvieron a partir de la información acerca de los tratamientos realizados en planta y mediante el ahorro que generaría cumplir con los vertidos de residuos a cloacas o cuerpos de aguas, lo cual se obtuvo con la utilización de la Ley de aguas con respecto a las multas que genera la violación de condiciones de vertido.

Por último se determinó la relación costo beneficio (sección A.16) que es el resultado del cociente realizado al dividir la inversión inicial entre los beneficios obtenidos. Dicho valor representa si la alternativa es favorable económicamente para la empresa, esto ocurre si la relación resulta ser menor a 1, si es mayor a 1 no es

favorable y si es igual a 1 el proyecto es indiferente (Giugni *et al.*, 2007), finalmente, la empresa tomará la decisión de implementar o no la propuesta.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación, así como se brinda un análisis detallado de cada uno de ellos, basándose en los lineamientos teóricos que se encuentran en capítulos anteriores.

4.1. Diagnóstico del funcionamiento de la planta de tratamiento.

Para poder realizar un análisis acerca de la planta de tratamiento, es necesario conocer la procedencia de los afluentes que son tratados en la misma, por lo cual se realizó recorrido al sistema de producción referido en el capítulo II, a fin de conocer el proceso productivo que se lleva a cabo en la empresa CAVENPI, el cual se detalla a continuación:

La empresa CAVENPI cuenta con un proceso productivo compuesto por tres líneas o plantas de producción (Figura 2.4), siendo dos de producción de pigmentos inorgánicos y una de pigmentos orgánicos. Por otra parte se conoció que una de las líneas de producción de pigmentos inorgánicos es de operación automatizada (Figura 2.5), mientras que las otras dos son de operación manual (Figura 2.6).

Una vez identificado el proceso productivo, se procedió a detallar, mediante observación directa durante recorrido, las etapas y secciones de la planta de tratamiento (Figura 1.1) las cuales se describieron en el capítulo II con la finalidad de conocer su funcionamiento y operación.

4.1.1. Elaboración de la prueba de Jarras.

El ensayo de jarras consistió en probar cuatro coagulantes y dos floculantes para comparar el funcionamiento del tratamiento actual versus las distintas combinaciones resultantes de aplicación de los coagulantes y floculantes.

Los coagulantes y floculantes de marca Arpol fueron suministrados por la empresa Franmeller; los coagulantes utilizados fueron Arpol 2261, Arpol 2206, Arpol

2207, Arpol 2275 (Figura 4.1a) y los floculantes fueron: Arpol 2209 y Arpol 2298 (Figura 4.1b).



Figura 4.1. Sustancias químicas utilizadas en la prueba de jarras; a) Coagulantes; b) Floculantes.

La prueba de jarras comenzó con la preparación de los floculantes a una concentración del 0,1% P/V, la misma se realizó añadiendo lentamente un gramo (1g) de cada floculante a un litro (1L) de agua contenido en un beaker del mismo volumen (figura 4.2a y 4.2b), durante agitación lenta, posteriormente se dejó treinta (30) min de agitación lenta llamado este tiempo etapa de preparación y posteriormente se dejó reposar diez (10) min, siendo este último tiempo la etapa de maduración (Figura 4.2c).



Figura 4.2. Preparación de los polímeros. a) Arpol 2298 durante la agitación; b) Arpol 2209 durante la agitación; c) Etapa de maduración de los polímeros.

Seguidamente se prepararon las soluciones de coagulantes al 10% V/V, esto consistió en añadir cuarenta mililitros (40 mL) del coagulante a trescientos sesenta mililitros (360 mL) de agua contenida en un recipiente de plástico y debidamente identificado (Figura 4.3). Seguidamente, se preparó una solución de sulfuro de sodio al

10% *P/V*, su preparación consistió en disolver veinte gramos (20 g) de sulfuro de sodio en doscientos mililitros (200 mL) de agua.



Figura 4.3. Coagulantes preparados para la prueba de jarras.

Una vez preparadas las soluciones se procedió a realizar el ensayo con las distintas líneas de alimentación, comenzando con la línea de inorgánicos tradicional, a esta línea se le ajusto el pH entre ocho y nueve (Rodríguez y Rondón, 2002), (Figura 4.4a) debido a que es el pH requerido en planta para poder precipitar el plomo presente en dicho efluente, observando la aparición de diminutos coágulos. Posteriormente se procedió a añadir la solución de Na_2S 10% *P/V* en mezcla rápida; esta adición fue de 0,2 mL por cada ensayo debido a que la concentración utilizada en planta es de 20 ppm (dato suministrado por el operador), la velocidad de agitación fue de 200 rpm y el tiempo de agitación de 2 min.

Seguidamente se procedió con la simulación del proceso de coagulación, el cual consistió añadir un mililitro (1mL) de los distintos coagulantes a su jarra correspondiente (Figura 4.4b), dejando la velocidad fijada anteriormente con el mismo tiempo de mezcla; este procedimiento se realiza con el objetivo de crear turbulencia y movimiento necesario para poner en contacto los reactivos químicos con las partículas coloidales del agua, de modo de neutralizar sus cargas, desestabilizarlas y hacer que se aglomeren en un corto periodo de tiempo; para lograr la formación de coágulos la cual fue observada durante el tiempo de mezcla.

Por otra parte se debe acotar que se fijó un tiempo de dos minutos debido a que para aguas con altos contenidos de sólidos una mezcla rápida prolongada puede ser dañina, ya que rompería los flóculos frágiles previamente formado.

Pasados los dos minutos de la coagulación se procedió a añadir el floculante (Figura 4.4c y 4.4d), consecutivamente se disminuyo la velocidad a 30 rpm simulando una mezcla lenta la cual se dejo durante 3 minutos; debido a que un tiempo excesivo de agitación puede crear calentamiento de la mezcla originando floculación más eficiente; pero a su vez una pobre sedimentación, ya que ocurre la liberación de los gases disueltos en el agua, formando burbujas que se adhieren a los flóculos y los hacen flotar (Manual de Lipesa, 1989).

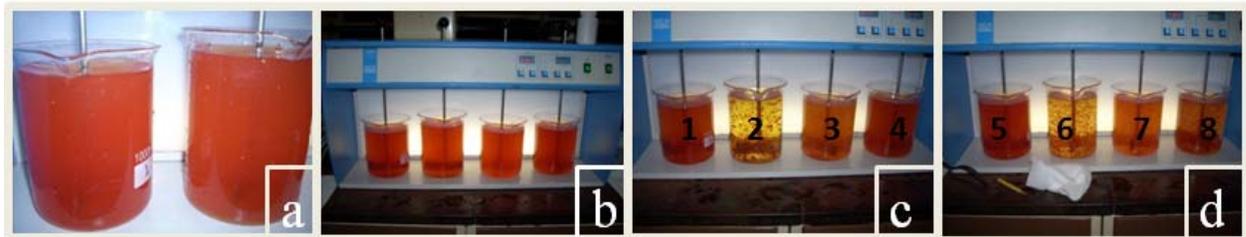


Figura 4.4. Prueba de Jarras de la línea de Inorgánicos tradicional, a) ajuste de pH con soda cáustica; b) adición de los coagulantes; c) adición del floculante Arpol 2209; d) adición del floculante Arpol 2298

Durante la floculación se evaluaron variables como: tiempo de formación del floc y tamaño del floc; y por último se dejo reposar un tiempo de aproximadamente diez minutos sin agitación para evaluar: velocidad y tiempo de sedimentación. Los resultados obtenidos se tabularon en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Variables evaluadas durante la elaboración de la prueba de jarras de la línea de Inorgánicos de la planta tradicional.

Nº	($T_i \pm 0,1$) (NTU)	($T_f \pm 0,1$) (NTU)	Coagulante	D_c (ppm)	Floculante	D_f (ppm)	Tiempo de formación del Floc	Tamaño del Flow	$V_{Sed.}$	$T_{sedimentación}$ (minutos)	($pH_i \pm 0,01$)	($pH_f \pm 0,01$)
1	151,0	15,6	A.2261	100	Arpol 2209	2	4	C	2	<5	8,69	8,69
2		5,2	A.2206				3	B	5	>10		8,74
3		57,2	A.2207				2	D	4	>10		8,75
4		49,6	A.2275				D	2	>10	8,73		
5		19,4	A.2261		Arpol 2298		1	D	2	>10		8,68
6		7,1	A.2206				4	B	4	<5		8,74
7		79,0	A.2207				2	D	3	>10		8,76
8		20,9	A.2275				4	B	4	<5		8,74

Con los resultados de turbidez obtenidos se procedió al cálculo de los porcentajes de remoción de turbidez con las diferentes combinaciones así como también la turbidez removida con el tratamiento actual. Los resultados se tabularon en la siguiente tabla:

Tabla 4.2. Comparación entre los químicos utilizados en la prueba de jarra y el tratamiento actual de la línea de Inorgánicos de la planta tradicional.

Coagulante	Floculante	($T_i \pm 0,1$) NTU	($T_F \pm 0,1$) NTU	(Remoción ± 2)%
A.2261	Arpol 2209	151,0	15,6	90
A.2206			5,17	97
A.2207			57,2	62
A.2275			49,6	68
A.2261	Arpol 2298		19,4	87
A.2206			7,07	95
A.2207			79,0	48
A.2275			20,9	86
Tratamiento Actual			38,4	75

Según los resultados reflejados en la tabla 4.2 la mayoría de los porcentajes de remoción son mayores al obtenido con el tratamiento actual, lo cual era de esperarse debido a que en las pruebas realizadas existe la adición de coagulante y floculante, y estos juntos realizan un mejor remoción, esto se debe a que el coagulante tiene la propiedad de desestabilizar el sistema coloidal, permitiendo que estos coloides se aglomeren y formen una partícula mayor denominada coagulo; mientras que el floculante reúne las partículas coaguladas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individuales en aglomerados (flóculos) que puedan asentarse (Kemmer, 1997).

Posteriormente se continuó con la evaluación, esto se hizo mediante la simulación de la prueba de jarras; esta vez a la línea de inorgánicos de la planta de amarillos cromo (Figura 4.5a), las condiciones de la prueba fueron las mismas que la

anterior, esto es debido a que ambas corrientes presentan plomo en sus efluentes ya que este es una de las materia prima para la síntesis del pigmento de origen inorgánico.

Al adicionar soda cáustica para ajustar el pH se pudo observar la formación de flóculos pero esta vez de menor tamaño que el afluente de la línea anterior, esto se puede deber a que uno de los mecanismos de desestabilización coloidal es la formación de hidróxidos cargados, lo cual se logra mediante la adición de un electrolito catiónico y un álcali produciendo una absorción sobre el coloide.

Seguidamente se procedió a añadir el sulfuro de sodio (Figura 4.5b) donde se observó que el afluente estudiado se tornó de color más oscuro, tomando una coloración marrón (sección 2.2.4). Luego, se añadió 1 mL de de los distintos coagulantes preparados a su jarra correspondiente, observando que la formación del coagulo tardo un poco más que la anterior, esto pudo ser causado debido a que la turbidez inicial del agua fue más baja que la anterior, lo que originó que no existiera el número de colisiones entre partículas necesarias para aglomerarse.

Para finalizar esta prueba se añadió el floculante correspondiente a los dos ensayos realizados (Figura 4.5c y 4.5d) y se dejo sedimentar. Los resultados obtenidos se tabularon en la tabla 4.3.

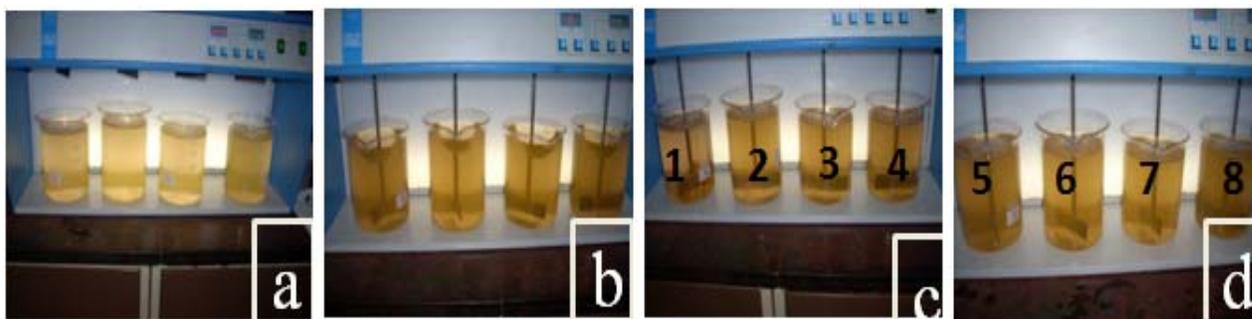


Figura 4.5. Prueba de Jarras de la línea de Inorgánicos amarillos cromo, a) ajuste de pH con soda cáustica; b) adición de los coagulantes; c) adición del floculante Arpol 2209; d) adición del floculante Arpol 2298.

Tabla 4.3. Variables evaluadas durante la elaboración de la prueba de jarras de la línea de Inorgánicos de la planta amarillos cromo.

N°	(T _i ±0,1) (NTU)	(T _F ±0,1) (NTU)	Coagulante	D _c (ppm)	Floculante	D _F (ppm)	Tiempo de formación del Floc	Tamaño del Flow	V _{Sed.}	T _{sedimentación} (minutos)	(pH _i ± 0,01)	(pH _F ± 0,01)
1	105,0	18,6	A.2261	100	Arpol 2209	2	4	B	3	>5<10	9,07	9,02
2		51,3	A.2206				1	E	1	>10		9,09
3		40,3	A.2207				1	E	1			9,11
4		53,8	A.2275				3	D	2			9,10
5		84,6	A.2261		Arpol 2298		3	D	1			>10
6		38,1	A.2206				1	E	1	9,09		
7		54,5	A.2207				1	E	1	9,11		
8		107,0	A.2275				1	E	1	9,10		

Al igual que en la prueba anterior se calcularon los porcentajes de turbidez removida, tabulando los mismos en la siguiente tabla:

Tabla 4.4. Comparación entre los químicos utilizados en la prueba de jarra y el tratamiento actual de la línea de Inorgánicos amarillos cromo.

Coagulante	Floculante	(T _i ±0,1) NTU	(T _F ±0,1) NTU	(Remoción±2) %
A.2261	Arpol 2209	105,0	18,6	82
A.2206			51,3	51
A.2207			40,3	61
A.2275			53,8	49
A.2261	Arpol 2298		84,6	19
A.2206			38,1	64
A.2207			54,5	48
A.2275			107,0	-2
Tratamiento Actual			228,0	-117

Como se observa en la tabla 4.4 la turbidez de salida del efluente del tratamiento físico químico en el tratamiento actual es mayor que la turbidez del afluente del mismo, esto es debido a la producción del PbS que como se mencionó anteriormente añade

color al agua, por lo cual es considerado un coloide; el cual puede ser hidrofóbico (adversos al agua) o hidrofílicos (afines al agua); estos coloides necesitan de la adición de un químico que posea una carga opuesta para desestabilizarlo, además de una fuerza mezcladora para que distribuya la sustancia química y proporcione colisiones rápidas, lo que facilita la aglomeración de los mismos (Kemmer, 1997).

Es por las razones expuestas anteriores que se obtuvieron mejores porcentajes de remoción en la simulación a nivel de laboratorio de un tratamiento fisicoquímico con la adición de una sustancia química coagulante con respecto al tratamiento actual.

Otra razón importante de mencionar es que este aumento de turbidez se observó solamente en la línea de inorgánicos 2, esto pudo ser causado ya que en esta línea existe un medidor de pH el cual regula el mismo para aplicar el tratamiento de precipitación del plomo mientras que en la línea de inorgánicos 1 no existe dicha regulación; por lo cual no se garantiza que el tratamiento de precipitación en esta última este siendo efectivo.

Para finalizar el estudio del tratamiento primario se aplicó el ensayo de jarras a la línea de orgánico, esta a diferencia de las anteriores no se le ajustó el pH debido a que allí no se realiza la precipitación por no ser estos pigmentos a base de plomo; el resto del tratamiento se aplicó de la forma explicada anteriormente, obteniendo los resultados tabulados en la tabla 4.5. y 4.6.

Tabla 4.5. Variables evaluadas durante la elaboración de la prueba de jarras de la línea de Orgánicos tradicional.

Nº	(T _i ±0,1) (NTU)	(T _f ±0,1) (NTU)	Coagulante	D _c (ppm)	Floculante	D _f (ppm)	Tiempo de formación del Floc	Tamaño del Flow	V _{Sed.}	T _{sedimentación n} (minutos)	(pH _i ±0,01)	(pH _f ±0,01)
1	862	21,3	A.2261	100	Arpol 2209	2	4	C	3	<5	6,99	6,40
2		38,4	A.2206				3	D	3			6,53
3		34,9	A.2207				4	A	5			6,60
4		39,7	A.2275				3	A	4			6,60
5		31,0	A.2261		Arpol 2298		3	C	4	<5		6,35
6		29,0	A.2206				3	C	3			6,52
7		15,7	A.2207				3	C	4			6,55
8		9,3	A.2275				3	C	3			6,55

TABLA 4.6. Comparación entre los químicos utilizados en la prueba de jarra y el tratamiento actual de la línea de orgánicos tradicional.

Coagulante	Floculante	($T_i \pm 0,1$) NTU	($T_f \pm 0,1$) NTU	(Remoción ± 2)%
A.2261	Arpol 2209	862,0	21,3	98
A.2206			38,4	96
A.2207			34,9	96
A.2275			39,7	95
A.2261	Arpol 2298		31,0	96
A.2206			29,0	97
A.2207			15,7	98
A.2275			9,32	99
Tratamiento Actual			237,0	73

Como se observa en la tabla 4.6 la remoción de turbidez pasó del 90%, siendo estos porcentajes los mejores obtenidos de la evaluación de las tres líneas, así como también se observa que la turbidez inicial también es la mayor de todos estos afluentes; por lo cual se comprueba el efecto de la turbiedad y la presencia de núcleos en el proceso de coagulación, las cuales señalan que la presencia de gran cantidad de partículas responsables de la turbidez son favorables, debido a que no necesitan gran cantidad de coagulantes ya que existen mayores probabilidades de colisión contribuyendo a una rápida formación del floculo y buenas características de sedimentación del mismo (The American Water Works Association, Inc. 1975). Para finalizar se añadió soda cáustica a las jarras para observar el comportamiento del afluente; observando que al igual que las anteriores hubo formación de coágulos esta vez con un tamaño mayor; lo que puede ser causado por la presencia de grasas.

Las etapas de esta prueba son mostradas en la figura 4.6.



Figura 4.6. Etapas de la prueba de jarras de la línea de orgánico; a) Agua de la línea de orgánico; b) adición de Arpol 2209; c) adición de Arpol 2298; d) adición de soda cáustica.

Adicionalmente a la mejor jarra de cada línea analizada se le mando a realizar análisis de DQO para saber qué porcentaje de remoción se estaba logrando con el tratamiento obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 4.7. Resultados de DQO obtenidos al realizar la prueba de jarras.

Parámetro	Inorgánicos 1		Inorgánicos 2		Orgánico	
DQO	C_E	C_S	C_E	C_S	C_E	C_S
		110	61	743	413	2195
% Remoción	44,55		44,41		24,65	

Según los resultados obtenidos en la tabla anterior se tiene que la prueba de jarras demostró que existe la eliminación de materia orgánica en la etapa de coagulación floculación.

4.1.2. Estudio del tratamiento secundario.

Otra de las observaciones durante el diagnóstico de la planta fue la excesiva espuma observada en el reactor biológico; además de observar sólidos flotando en el clarifloculador secundario, lo que conllevó a estudiar los parámetros de control y operación del reactor para conocer como estaba funcionando el mismo.

El estudio comenzó con la investigación de los modelos matemáticos que permitieran realizar el cálculo de los parámetros de control, observando que para el cálculo de los mismos se necesitaban valores de parámetros característicos del agua residual que se obtienen de la caracterización del agua de dicho reactor como la del efluente tratado, por lo cual se mando a realizar una caracterización en los siguientes puntos: entrada y salida del reactor, efluente del reactor y salida final del sistema; la muestras fueron tomadas como se indicó en la metodología y la caracterización fue realizada por parte de Hidrolab Toro Consultores, C.A.

Los resultados obtenidos de esta caracterización se muestran en las tablas 4.8 y 4.9. Posteriormente de obtener los resultados de la caracterización se calculó el % de biodegradabilidad a la entrada del reactor (ver apéndice A), con el objetivo de saber que tratamiento se debe aplicar a esta agua obteniendo un resultado de (0,08%); lo que indica que el agua residual es poco biodegradable y el tratamiento que se debe aplicar es físico o químico (figura 2.1), ya que un tratamiento por lodos activados no funcionaría debido a que la materia biodegradable es muy poca para mantener el crecimiento de microorganismos que corresponde a la síntesis de nuevas células de los mismos, por lo tanto no hay la suficiente cantidad de alimentos y estos microorganismos empiezan a consumir sus microorganismos compañeros como alimento, esto corresponde a la fase de respiración endógena, lo que afectaría la eficiencia del tratamiento, lo cual se evidencia al calcular el % de remoción de DBO dando como resultado un valor de 23,19% (Ramalho, 1975).

Tabla 4.8. Caracterización del agua del reactor y efluente de la planta.

Parámetros	Unid.	Entrada del Reactor	Reactor Biológico	Salida del Reactor	Salida Final del sistema
Potencial de hidrógeno	Adim.	7,58-7,84	8,60-8,78	8,55-8,66	8,07-8,40
Temperatura	°C	31-32	24-27	27-28	27-28
Sólidos suspendidos Totales	mg/L	374	5930	2540	198
Sólidos suspendidos Fijos	mg/L	2	3400	1527	104
Sólidos suspendidos Volátiles	mg/L	372	2530	1013	94
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	138	-	106	60
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	1801	-	707	406
Nitrógeno Total KJELDAHL	mg/L	<0,01	-	<0,01	<0,01
Fósforo Total	mg/L	25,04	-	27,98	6,250
Sulfatos	mg/L	2167	-	1798	136
Cromo Total	mg/L	-	1,913	-	-
Plomo Total	mg/L	-	2,266	-	-
Zinc	mg/L	-	0,330	-	-

Tabla 4.9. Resumen de la medición del caudal.

Parámetros	Puntos de medición		Unidad
	Entrada al Bio-reactor	Salida final del sistema	
Lapso de medición	11:00 a.m. a 03:00 p.m.	11:00 a.m. a 03:00 p.m.	Horas
Tiempo de medición	240	240	min.
Caudal máximo	1,2084	1,0713	L/s
Caudal mínimo	0,5341	0,6311	L/s
Caudal medio	0,8116	0,7806	L/s

Seguidamente, se realizaron los cálculos asociados a los parámetros de control y operación de la planta, así como también los de diseño de la misma (ver apéndice A), con la finalidad de comparar si estos se encontraban dentro o fuera del rango establecido por la bibliografía, los resultados se tabularon en la tabla 4.10.

El proceso de lodos activados convencional está definido como la mezcla del agua decantada y el lodo recirculado realizada en un tanque de aireación con aire disuelto o con agitadores mecánicos, donde el suministro de aire suele ser uniforme a lo largo de toda la longitud del canal y mediante el cual se produce la adsorción, floculación y oxidación de la materia orgánica; posteriormente los sólidos de los lodos activados se separan en un decantador secundario; además se conoce que existen dos procesos que presentan características similares como lo son: aireación prolongada y aireación de alta carga:

El primero se diferencia del convencional ya que funciona la fase de respiración endógena en la curva de crecimiento lo cual precisa una carga orgánica reducida y un largo período de aireación; y el segundo se caracteriza por tener altas concentraciones de MLSSV con alta carga volumétrica; lo que permite una elevada relación de F/M y largos tiempos de retención celular, con tiempo de detención hidráulica cortos (Metcalf and Eddy, 1996).

Tabla 4.10. Parámetros de control, operación y diseño del reactor biológico

Parámetros	θ_c , d	F/M, d ⁻¹	C_v , (Kg _{DBO} /m ³ .d)	MLSS (mg/L)	θ , h	MLSSV MLSS (%)	Relación de Wilker (DBO:N:F)
Valor obtenido	327	0,006	0,01	5930	233	43	100:7.10 ⁻³ :18

El valor de MLSS obtenido de la caracterización indica que el proceso llevado a cabo para esta condición es de aireación prolongada o de alta carga ya que estos procesos comprende un rango de MLSS (3000-6000) para el primero y de (4000-10.000) para el segundo (Figura 2.2); sin embargo los valores obtenidos para el factor de carga (F/M) y la carga volumétrica (C_v) son demasiado bajos para los rangos que comprenden estos tipo de proceso, mientras que el resultado obtenido para los tiempos de retención hidráulica y celular son muy elevados en comparación con el rango característico para este tipo de proceso (ver figura 2.3, Metcalf and Eddy, 1996). Lo que indica que el reactor no está funcionando correctamente debido a que no cumple con los parámetros de diseño de estos tipos de proceso.

Por otra parte, para estudiar si existe una fase de respiración endógena se realizó el cálculo de la relación existentes entre los sólidos suspendidos volátiles y los sólidos suspendidos totales del reactor MLSSV/MLSS (Apéndice A), utilizando los valores obtenidos de la caracterización, los cuales tienen un valor mostrado en la tabla 4.7 de 2530 para los MLSSV y de 5930 para MLSS, dando una relación del 42,7% (Tabla 4.10) siendo los valores teóricos para esta relación entre el 70-76%, lo cual también indica la existencia de respiración endógena, ya que los MLSSV representan la biomasa activa presente y en contacto con el sustrato, y durante esta fase tienden a disminuir debido que la velocidad de destrucción de células de microorganismos excede la de síntesis de nuevas células (Ramalho, 1983).

Otro de los factores evaluado fue el valor de los sólidos suspendidos fijos; ya que como se observa en la tabla 4.8 tienen un valor a la entrada de 2 mg/L mientras que a la salida es de 1527 mg/L lo cual indica que existe una flotación de lodos en el reactor;

esta flotación es causada por cinco razones, las cuales son: lodo viejo, lodo joven, lodo desnutrido, sobreoxidación y materiales filamentosos.

Debido a esto, se realizó una revisión del control de oxígeno disuelto realizado en la planta desde enero (Tabla 4.11), obteniendo un valor promedio para este parámetro de valor $(4,475 \pm 0,002) \text{ mg/L}$; siendo el valor teórico para este parámetro un rango comprendido entre $(2 - 3 \text{ mg/L})$; lo que evidencia que existe una sobreoxidación que ocasiona la flotación del lodo y por otra parte se comprueba una vez más la existencia de una fase de respiración endógena, ya que el exceso de oxígeno disuelto en el reactor es causado por la presencia de poca materia biodegradable en el líquido residual del reactor (López, 2009).

Otro factor estudiado fue la relación de WilKer o de nutrientes (DBO:N:F); la cual teóricamente debería ser $(100:5:1)$, para que exista una reproducción de células nuevas mediante las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, sin embargo la relación obtenida fue de $(100:7.10^{-3}:18)$; lo que indica que no existe crecimiento bacteriano en el reactor por la baja concentración de nitrógeno existente y por lo tanto un lodo desnutrido y posiblemente viejo, lo cual quedó evidenciado por el tiempo de retención celular (Tabla 4.10) que dio como resultado un valor de $\theta_c = 327 \text{ d}$, que confirma que el lodo presente en el reactor es viejo ya que el valor teórico máximo para este parámetro es de 30 d, siendo esta otra razón por la cual ocurre la flotación del mismo (Kemmer, 1997; López, 2009).

Tabla 4.11. Registro del oxígeno disuelto medido en el reactor durante cuatro meses.

Meses	Enero 2011				Febrero 2011			
Semanas	1	2	3	4	1	2	3	4
Oxígeno disuelto ($O_2 \pm 0,03$) mg/L	-	.	5,73	4,87	4,40	4,63	5,60	4,23
Meses	Marzo 2011				Abril 2011			
Semanas	1	2	3	4	1	2	3	4
Oxígeno disuelto ($O_2 \pm 0,03$) mg/L	2,83	3,07	4,33	4,37	4,00	5,23	3,68	5,69

4.1.3. Análisis histórico del comportamiento del efluente.

La empresa CAVENPI es una empresa comprometida con el ambiente, para ello la misma realiza mediciones trimestrales de las características que poseen los efluentes de su proceso productivo, los cuales son tratados en la planta de tratamiento, por esta razón la empresa cuenta con una data histórica de las mediciones llevadas a cabo en dicha planta, lo que permitió realizar un análisis histórico para saber el comportamiento que presentaban parámetros como DBO, DQO en el tanque de igualación y sólidos suspendidos volátiles y totales en el reactor (SSV, SS); así como las relaciones de SSV/SS, DBO/DQO, los resultados obtenidos se tabulan en las tablas 4.12 y 4.13.

Según los datos mostrados en las tablas 4.12 se tiene que la mayoría de las desviaciones presentadas muestran un valor menor a la mitad de la media, lo que indica que los valores son de confianza, sin embargo para los parámetros de cromo, plomo y zinc no se observan la misma condición lo que indica que en la producción existe una gran variación que justifica la presencia del tanque de igualación.

Por otra parte la tabla 4.13 se observa que los valores de desviación estándar para todos los sólidos son mayores que la mitad de la media indicando nuevamente las variaciones que se presentan en el afluente, no obstante la relación existente entre los sólidos suspendidos volátiles y totales no presenta un comportamiento muy variable y su relación siempre es menos al 0.5 (Figura 4.7f) lo que indica que no existe funcionamiento en el reactor ya que esto es lo que indica la fracción activa de los fangos del reactor.

El comportamiento de los parámetros observados en la figura 4.7 indica que los mismos han presentado mucha variación durante el período 2009 a 2011, esto indica que el proceso no es estandarizado; sin embargo, sus relaciones se mantienen constante lo que indica que las variaciones han sido reales y que los datos son confiables, por lo cual se realizó el análisis estadístico de la biodegradabilidad y la relación MLSSV/MLSS para determinar el tamaño muestral (Apéndice A), obteniendo que el número de muestras necesarias para estudiar dicha caracterización, con un 99% de confianza (Tabla 4.14).

Tabla 4.12. Datos históricos del efluente en el tanque de igualación desde el 2009 hasta el presente año.

Parámetros	Potencial de Hidrógeno (Adim.)	Temperatura (°C)	Sólidos suspendidos fijos (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	Biodegradabilidad	Cromo Total (mg/L)	Plomo Total (mg/L)	Zinc (mg/L)
1^{ero} 2009	9.53-9.58	27-32	29.00	128.00	527.00	0,24	0.61	0.46	0.04
2^{do} 2009	8.44-8.80	30-31	80.00	140.00	412.00	0,34	1.20	1.02	0.09
3^{ero} 2009	8.51-8.69	27-29	62.00	337.00	687.00	0,49	1.87	1.59	0.24
1^{ero} 2010	8.20-8.40	29-32	64.00	292.00	706.00	0,41	1.66	4.02	0.41
3^{ero} 2010	8.33-8.59	28-31	4.00	166.00	341.00	0,49	0.98	0.52	0.46
1^{ero} 2011	7.85-8.75	26-27	162.00	212.00	599.00	0,35	1.91	2.27	0.33
Media	8.64	29.08	66.83	212.50	545.33	0,39	1.37	1.65	0.26
Desviación estándar	0.47	1.56	54.11	85.30	147.40	0,09	0.53	1.35	0.17

Tabla 4.13. Datos históricos del efluente en el reactor biológico desde el 2009 hasta el presente año.

Parámetros	Potencial de Hidrógeno (Adim.)	Temperatura (°C)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Sólidos suspendidos fijos (mg/L)	Sólidos suspendido volátiles(mg/L)	SSV/SS
1^{er} 2009	8.85-8.90	26-29	343.00	186.00	157.00	0.46
2^{do} 2009	8.39-8.47	27-29	8930.00	5560.00	3370.00	0.38
3^{er} 2009	8.62-8.69	26-29	5964.00	3652.00	2312.00	0.39
1^{er} 2010	8.60-8.91	28-29	9750.00	5600.00	4150.00	0.43
3^{er} 2010	8.33-8.59	28-29	9350.00	5450.00	3900.00	0.42
1^{er} 2011	8.60-8.78	24-27	5930.00	3400.00	2530.00	0.43
Media	8,58	27,58	6711.17	3974.67	2736.50	0.42
Desviación estándar	0.28	1.11	3545.23	2103.33	1458.06	0.03

A continuación se muestran el comportamiento que presentaban parámetros como DBO, DQO en el tanque de igualación y sólidos suspendidos volátiles y totales en el reactor (SSV, SS); así como las relaciones de SSV/SS, DBO/DQO.

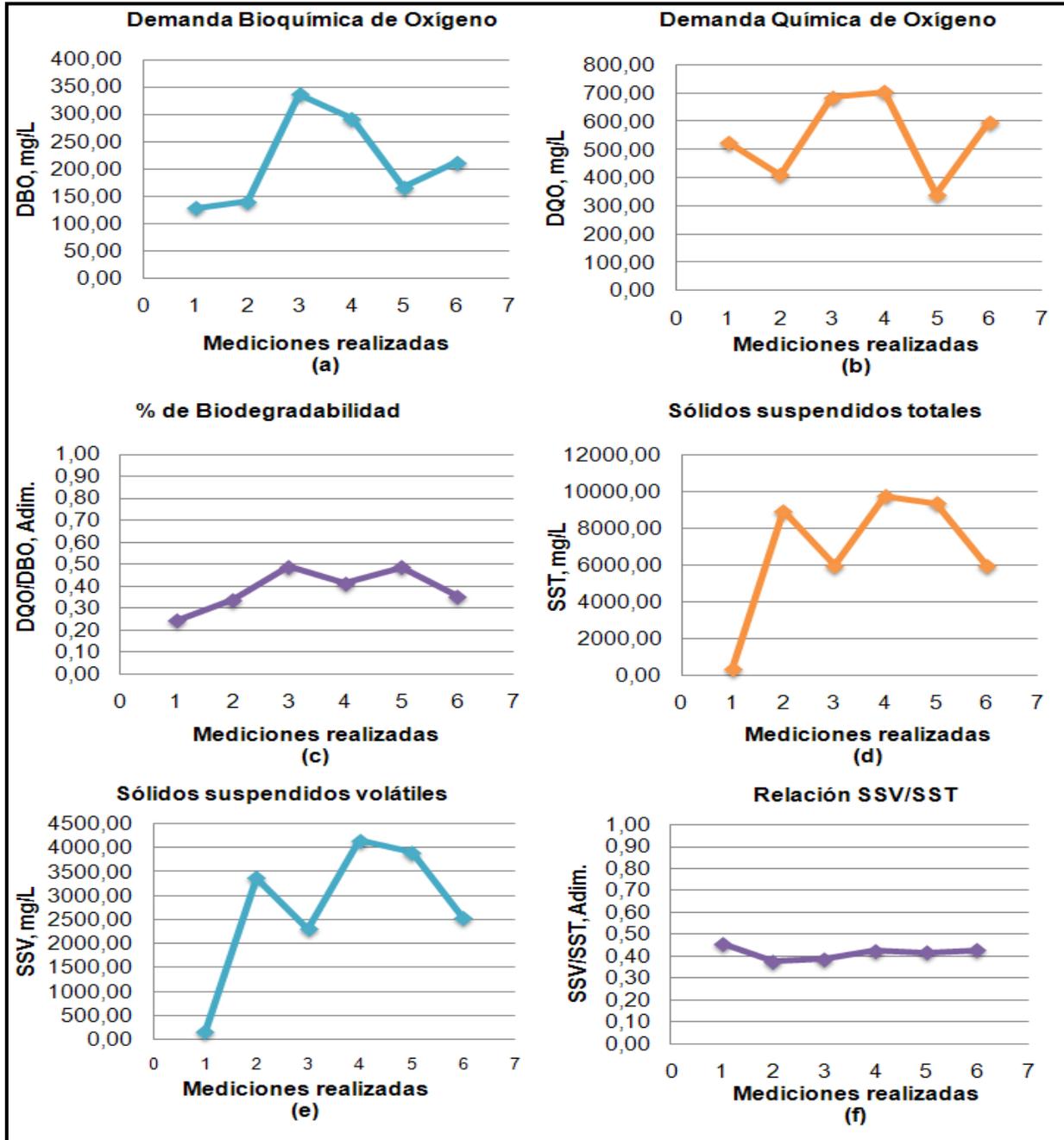


Figura 4.7. Comportamiento de los parámetros en el tanque de igualación y en el reactor biológico, para las caracterizaciones realizadas desde el año 2009 hasta el presente año.

Tabla 4.14. Datos estadísticos de los parámetros comparados con datos anteriores.

Parámetros	%Biodegradabilidad	Relación MLSSV/MLSS
Media	0,39	0,42
Desviación estándar	0,09	0,04
Tamaño muestral	2	2

4.2. Caracterización del agua a la salida de los clarifloculadores y a la descarga final de la planta de tratamiento.

Una vez realizado el diagnóstico se procedió a realizar la caracterización necesaria para determinar si los efluentes tratados pueden ser utilizados como agua de riego o necesitan un tratamiento adicional, para ello se comenzó con identificar los parámetros requeridos para utilizar el agua como agua de riego.

Por esta razón se procedió a realizar una revisión del Decreto N° 3219 (ver apéndice B), en el cual se especifica en su artículo 5° la clasificación del agua según su uso; siendo el agua de riego clasificada como tipo 2 subtipo 2B, la cual se define como aguas de usos agropecuarios destinadas al riego de cualquier cultivo no consumible en crudo y para fines pecuarios, seguidamente se buscaron las características de calidad de las aguas para cada tipo de uso asignado, siendo esto especificado en el artículo 8° del mencionado decreto.

De igual manera se revisaron las formulaciones de pigmentos para determinar que parámetros pudiesen estar presentes en las aguas residuales provenientes del proceso productivo, obteniendo así los parámetros a analizar en la caracterización de dichas aguas; estos parámetros fueron: oxígeno disuelto, coliformes fecales y totales, aluminio, plomo, bario, cromo, hierro, manganeso, molibdeno, sólidos disueltos totales y flotantes, zinc, órganos clorados y fosforados.

Seguidamente se procedió a definir los puntos de muestreo, para ello se estudiaron los valores de DQO a la salida del tratamiento primario de las tres líneas de efluentes y del tanque de igualación, debido a que el porcentaje de biodegradabilidad calculado en el diagnóstico del reactor fue 0.1%, lo que indica que existe muy poca

materia biodegradable en dicha agua. Estos valores de DQO fueron obtenidos de la caracterización trimestral realizada por la empresa, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 4.15. Análisis de la Demanda química de oxígeno de los efluentes de la planta a la salida del tratamiento primario y en el tanque de igualación.

Parámetro	Unidad	Inorgánico 1	Inorgánico 2	Orgánico	Tanque de igualación
DQO	mg/L	67	562	1824	599
Caudal	L/s	2,3558	2,2800	0,9279	5,6910

Según la tabla anterior se tiene que la demanda química de oxígeno aportada por la línea de orgánico es mucho mayor que las dos líneas de inorgánicos al igual que la del tanque de igualación, además se tiene que los caudales de inorgánico son mayores que los de orgánico lo que indica que estas líneas de inorgánico no están aportando demanda química al reactor sino que están diluyendo la misma; por lo cual se plantea dividir los efluentes para hacer una simplificación y de esa forma hacer más sencillas las aplicaciones físico-químicas y biológicas a que hubiese lugar, con el fin de optimizar cada uno de los parámetros sugeridos. Por lo anteriormente dicho se decidió caracterizar los efluentes provenientes de las líneas de inorgánicos y de la salida final, sin proceder a caracterizar la línea proveniente de orgánico ya que se considera que separando estos efluentes el reactor de lodos activados mejore su eficiencia.

Por último se procedió a la toma de muestra por parte de los especialistas del laboratorio utilizando la metodología explicada en el capítulo anterior, con un tiempo de respuesta del laboratorio de 30 días se obtuvieron los resultados tabulados en la tabla 4.16. Finalmente se realizó un análisis de los resultados obtenidos, en donde se pudo verificar que estas aguas no cumplen con algunos de los parámetros críticos de control fijados en los artículo 8° y 36° del citado Decreto 3219, impidiendo su uso en el riego

Tabla 4.16. Resultados de la caracterización.

Parámetro	Unidad	Efluente de Inorgánicos 1	Efluente de Inorgánicos 2	Salida final
Oxígeno disuelto	mg/L	2,78	6,47	3,71
Organismos coliformes totales	NMP/100mL	-	-	900
Organismos coliformes fecales	NMP/100mL	-	-	< 200
Aluminio	mg/L	0,21	0,70	0,19
Plomo	mg/L	0,57	7,17	0,025
Bario	mg/L	0,46	0,14	0,168
Cromo	mg/L	5,47	1,52	2,00
Hierro	mg/L	0,34	0,23	0,167
Manganeso	mg/L	0,33	0,016	0,069
Molibdeno	mg/L	0,187	0,001	0,12
Sólidos disueltos totales	mg/L	6810	32100	11300
Sólidos Flotantes	Adim.	Ausente	Ausente	Ausente
Zinc	mg/L	0,94	0,022	0,004
Órganos clorados	mg/L			
Órganos fosforados	mg/L			

4.3. Propuesta de las alternativas para alcanzar los objetivos de adecuación de las aguas residuales industriales que se encuentran a la salida de los clarifloculadores o la salida de la planta de tratamiento de efluentes.

Se conoce que para seleccionar los procesos de tratamientos de aguas residuales o la combinación de estos, se debe tomar en cuenta dos factores importantes:

- a) Caracterización del agua residual.
- b) Calidad del efluente de salida requerido.

Por lo cual una vez obtenida la caracterización, es necesario conocer los parámetros que se encuentran fuera de la regulación del citado Decreto 3219, con la

finalidad de proponer las alternativas que puedan eliminar o remover estos contaminantes para poder darle al agua el uso requerido; por esta razón se procedió a comparar los valores obtenidos en la caracterización con los límites exigidos por el decreto, tabulando dichos parámetros en la tabla 4.17.

Tabla 4.17. Comparación de los valores resultantes de la caracterización con los fijados por la ley.

Parámetro	Unidad	Efluente de Inorgánicos 1	Efluente de Inorgánicos 2	Efluente de la PTAR	Valor máximo (Decreto 3219)
Oxígeno disuelto	mg/L	2,78	6,47	3,71	3,0 mínimo
Organismos coliformes totales	N MP/100mL	-	-	900	5000
Organismos coliformes fecales	NMP/100mL	-	-	< 200	1000
Aluminio	mg/L	0,21	0,70	0,19	1,0
Bario	mg/L	0,46	0,14	0,168	1,0
Cromo	mg/L	5,47	1,52	2,00	0,05
Hierro	mg/L	0,34	0,23	0,167	1,0
Manganeso	mg/L	0,33	0,016	0,069	0,5
Molibdeno	mg/L	0,187	0,001	0,12	0,005
Plomo	mg/L	0,57	7,17	0,025	0,05
Sólidos disueltos totales	mg/L	6810	32100	11300	3000
Sólidos Flotantes	Adim.	Ausente	Ausente	Ausente	Ausentes
Zinc	mg/L	0,94	0,022	0,004	5,0
Órganos clorados	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
Órganos fosforados	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	0,2

Como se puede observar en la tabla los parámetros que se encuentran fuera de norma son; cromo, molibdeno, plomo y sólidos disueltos totales, presentando grandes desviaciones con respecto a lo establecido, estas desviaciones son: (10840% Cr, 3640% Mo, 1040% Pb, 127% en sólidos disueltos) para inorgánico 1; (2940% Cr,

14240% Pb, 970% en sólidos disueltos) para inorgánicos 2 y (3900% Cr, 2300% Mo, 277% en sólidos disueltos) para la salida final.

La presencia de cromo, plomo y molibdeno en la línea de inorgánico tradicional (inorgánico 1) es debido a que estas sustancias constituyen la principal materia prima para la elaboración de pigmentos; lo mismo aplica para la presencia de plomo y cromo en la planta de inorgánico de amarillo cromo (inorgánico 2); mientras que la presencia de sólidos disueltos se debe a las sales presentes en el agua; ya que existe una relación entre los sólidos disueltos y la conductividad debido a que ambos miden los compuestos iónicos disueltos (aguamarket) por lo que es de esperarse que se encuentre en un valor mayor, ya que esta agua proviene del lavado de los pigmentos que tiene como objetivo remover las sales presentes en los mismos.

Sobre la base de dividir las líneas de efluentes (orgánicos e inorgánicos) para aplicar tratamientos distintos que eviten su mezcla y además conociendo que el cromo, plomo y molibdeno provienen del lavado de los pigmentos de origen inorgánico, se infiere que no habrá presencia de estos metales en la salida final, por lo cual las propuestas estarán dirigidas a la reutilización de los efluentes de origen inorgánico.

Por otra parte para fines de las propuestas se establece la unión de las dos líneas provenientes de inorgánicos para realizar el mismo tratamiento a ambas, por lo cual se requiere colocar un tanque de igualación que permita homogenizar los efluentes provenientes de estas líneas con la finalidad de aminorar las variaciones de los caudales, intentando conseguir una corriente mezclada con un caudal relativamente constante que sea el que llegue a la planta de tratamiento, ya que esta producción no es constante.

La caracterización del efluente unido que se tomó como referencia para realizar las propuestas, se calculó realizando un balance de los dos efluentes de inorgánico utilizando los parámetros obtenidos en la caracterización de la tabla 4.17 y la DQO y sólidos suspendidos obtenidos de la caracterización trimestral (Apéndice A). Teniendo como resultado que los parámetros que se encuentran fuera de norma siguen siendo los mismos que se obtuvieron de la caracterización original a excepción del DQO y SS que no se encontraba anteriormente ya que no son regulados para el riego.

Tabla 4.18. Caracterización del efluente de inorgánico unido.

Parámetro	Unidad	Efluente Inorgánico	Valor máximo (Decreto 3219)
Sólidos suspendidos	mg/L	1989	80
DQO	mg/L	310	350
Oxígeno disuelto	mg/L	4,59	3,0 mínimo
Organismos coliformes totales	N MP/100mL	-	5000
Organismos coliformes fecales	NMP/100mL	-	1000
Aluminio	mg/L	0,45	1,0
Bario	mg/L	0,30	1,0
Cromo	mg/L	3,53	0,05
Hierro	mg/L	0,29	1,0
Manganeso	mg/L	0,18	0,5
Molibdeno	mg/L	0,10	0,005
Plomo	mg/L	3,82	0,05
Sólidos disueltos totales	mg/L	19248	3000
Sólidos Flotantes	Adim.	Ausente	Ausentes
Zinc	mg/L	0,49	5,0
Órganos clorados	mg/L	<0,01	0,1
Órganos fosforados	mg/L	<0,01	0,2

Además se plantea como otra constante en las propuestas la optimización del tratamiento físico-químico que se basa en añadir coagulante al mismo, ya que sin la adición de este no existe la desestabilización que logren la posterior aglomeración de las mismas para formar flóculos capaces de asentarse y de esta manera remover las sustancias coloidales tales como: metales pesados, color y sólidos orgánicos.

Esto se deduce debido a que la teoría define que cada partícula presente en el agua se encuentra estabilizada por cargas eléctricas negativas sobre su superficie, haciendo que repela las partículas vecinas como se repelen mutuamente dos polos magnéticos. Ya que esto impide el choque de las partículas y que formen así masas mayores, llamados flóculos, las partículas no se asientan. La coagulación desestabiliza estos coloides al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, esto se logra,

por lo general, añadiendo coagulantes químicos y aplicando energía de mezclado (Kemmer, 1997).

En adición se sabe que los procesos de coagulación-floculación se emplean para extraer del agua los sólidos que en ella se encuentran suspendidos siempre que su rapidez natural de asentamiento sea demasiado baja para proporcionar clarificación efectiva. Siendo su correcta aplicación la diferencia de lograr o no con éxito la clarificación del agua, operaciones con membranas, la precipitación química, el espesamiento y desecamiento de lodos.

Por último se plantea como constante un lecho de secado para tratar los lodos que se generan en el efluente fisicoquímico o en los tratamientos aplicados en las alternativas que se generaran.

Partiendo de lo anteriormente expuesto y considerando las diferentes opciones de adecuación del efluente en estudio obtenidas mediante las reuniones con el tutor industrial, profesores universitarios y expertos en el área ambiental, se presentan las siguientes alternativas que permitan adecuar el agua residual para su reutilización, señalando que en dichas alternativas permanecerá constante el pre-tratamiento (desbaste) y el tanque de igualación.

Así mismo, cada propuesta tendrá una breve descripción de las principales unidades de tratamiento que la constituyen con sus ventajas y desventajas, un diagrama del sistema y una tabla complementaria contentiva de la información relativa a la eficiencia teórica de remoción de cada parámetro que se encuentre fuera de norma (Decreto 3219), indicando que elementos remueve cada una y en qué proporción lo hace.

4.3.1. Primera Alternativa

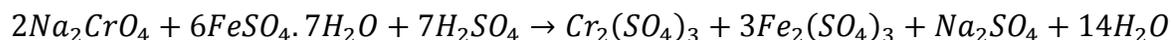
Esta alternativa se basa en la eliminación de plomo, cromo y molibdeno mediante la precipitación química, teniendo en cuenta que se necesita de una oxidación/reducción y coagulación-floculación para completar el tratamiento, estas unidades se describen a continuación.

- **Oxidación-Reducción para reducir el cromo.**

La oxidación es, una reacción química en la que hay un incremento de valencia (o una pérdida de electrones) y para conservar la neutralidad eléctrica de un sistema toda oxidación deberá estar acompañada de una reducción, así, una reacción de reducción puede definirse como aquella en la que hay un decremento de valencia (o ganancia de electrones).

El estado de valencia de un metal en el agua, es un factor importante en la precipitación de metales pesados, siendo un ejemplo de esto el cromo, cuya forma hexavalente, el cromato CrO_4^{-2} ($Cr^{+6}.O_4^{-8}$), es mucho más soluble que la forma trivalente, Cr^{+3} . En este caso, el cromato (donde el Cr está presente como Cr^{+6}) debe ser reducido, de ordinario con SO_2 en un pH bajo, para eliminar el cromo (como Cr^{+3}) por precipitación.

La reducción del cromo se realiza mediante la siguiente reacción:



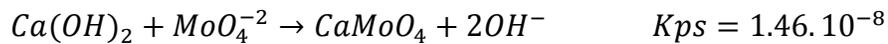
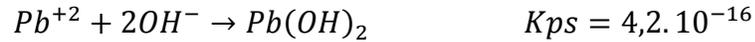
Teniendo en cuenta que esta reacción debe llevarse a un pH de alrededor de 2.5 a 3.0, usando más del doble de lo requerido teóricamente del agente reductor (3.94 mg/L por cada mg/L de cromato), para la terminación de la reacción en 15 a 20 minutos (Kemmer, 1997).

- **Precipitación química con sedimentación para remover cromo, plomo y molibdeno.**

Los metales pesados son eliminados del agua por precipitación, aunque también se emplea intercambio iónico y adsorción, puesto que los hidróxidos de los metales pesados son insolubles, es común usar cal para precipitarlos. Sin embargo, algunas veces los carbonatos o los sulfuros son menos solubles que los hidróxidos, de manera que también debe considerarse la precipitación en esta forma. Es probable que se presenten situaciones en las que los costos justifiquen una precipitación con cal para llegar al nivel de solubilidad del hidróxido seguido de un tratamiento secundario con sulfuro para llegar a los límites especificados (Kemmer, 1997).

Por esta razón se propone primeramente la adición de cal para la eliminación de

los hidróxidos de plomo y cromo además del molibdato de calcio producido los cuales son indeseables, facilitando así su eliminación por sedimentación, esto evidenciado según las siguientes reacciones.



Y finalmente adicionar sulfuro de sodio para terminar de precipitar el plomo según la reacción:



Finalmente se deja reposar el agua para lograr la separación sólido-líquido empleando la sedimentación, la cual separa los sólidos suspendidos del agua por gravedad.

A continuación se presenta el diagrama de flujo para esta propuesta y las tablas complementarias de la misma.

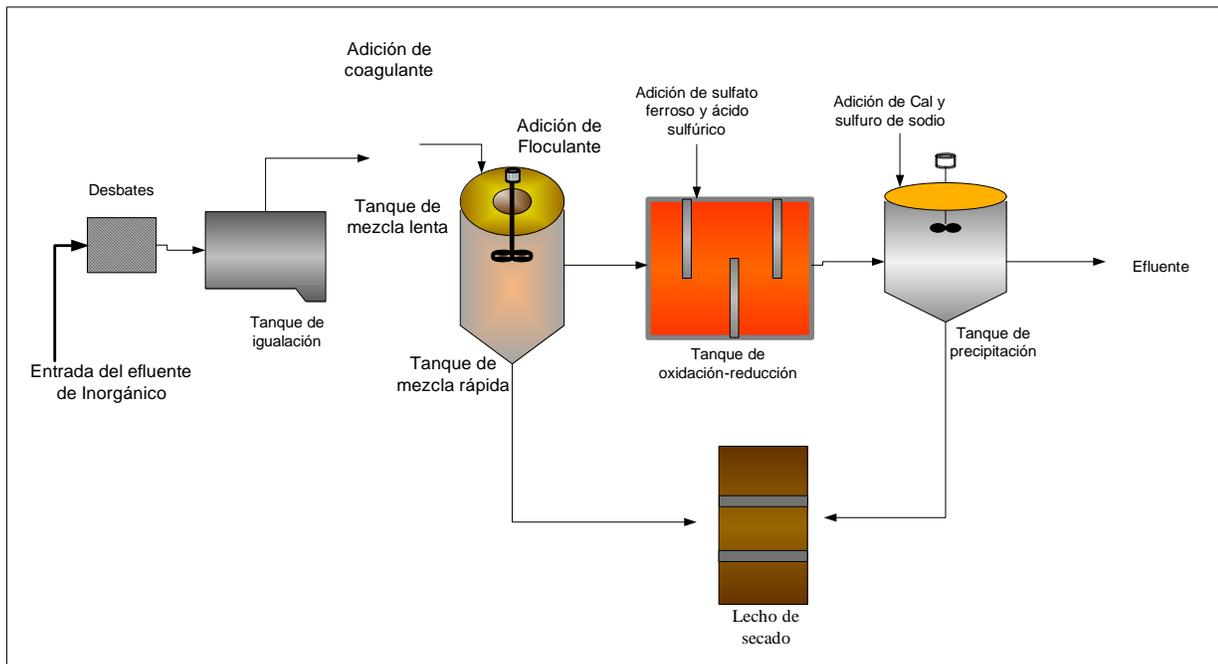


Figura 4.8. Diagrama de flujo de la primera alternativa.

Tabla 4.19. Ventajas y desventajas de los tratamientos propuestos en la primera alternativa

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Precipitación química	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de sólidos disueltos. • >90% de remoción de materia total suspendida, 40-70% de DBO, 30-60% de remoción de DQO. • La dosificación de reactivo es vinculada a las variaciones de flujo del agua, y se adapta fácilmente a nuevos objetivos de tratamientos o cambios en las concentraciones del influente. • Permite incrementar la capacidad de tratamiento sin tener que invertir en la construcción de otra planta de tratamiento de agua residual. 	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de los constituyentes disueltos en el agua residual. • Se debe realizar neutralización antes de la precipitación química. • Incremento de la sustancia precipitante debido a que pueden ocurrir reacciones secundarias con distintos elementos presentes en el agua. • Producción de gran volumen de fango a tratar que además puede contener compuestos tóxicos que dificulten su tratamiento y evacuación. • Gasto de energía debido al uso de equipos dosificadores y agitadores (c). • Uso de un medidor de pH.

Fuente: Metcalf and Eddy, 1996; Coraspe *et als*, 1989; Inter Pro France, Ingeniería del agua; Ramalho, 1983.

Tabla 4.20. Calidad de salida del efluente para la primera alternativa propuesta.

Tratamiento aplicado			Coagulación-floculación		Precipitación química		Efluente	Valor límite ⁴
Valores de eficiencia			>90% SS ⁽²⁾ 30-60% DQO ⁽²⁾ ; 50% de Pb, Cr, Mo, SD ⁽²⁾		99% Cr con cal ⁽¹⁾ , 80-90% Pb, Mo, SD con cal ⁽²⁾ , 96% Pb con sulfuro ⁽³⁾ ,			
Eficiencia tomada			95% SS 45% DQO 50% de Pb, Mo, Cr, SD		99% Cr con cal, 85% Pb, SD, Mo con cal, 96% Pb con sulfuro,			
Parámetro	Unidad	Valor	C _e	C _s	C _e	C _s		
SS	mg/L	1989	1989	99	-	-	99	80
DQO	mg/L	310	310	171	-	-	171	350
Cromo	mg/L	3,53	3,53	1,76	1,76	0,02	0,018	0,05
Molibdeno	mg/L	0,10	0,096	0,05	0,05	0,007	0,007	0,005
Plomo	mg/L	3,82	3,82	1,91	1,91	0,29	0,01	0,05
						0,01		
Sólidos disueltos totales	mg/L	19248	19248	9624	9624	1444	1444	3000

Fuente: 1) Dudamel *et al*s, 2003; 2) Metcalf and Eddy, 1996; 3) Rodríguez y Rondón, 2002, 4) Decreto 3219, 1989.

4.3.2. Segunda alternativa

Esta alternativa se basa en la utilización de resinas de intercambio aniónico y catiónico para la eliminación de metales pesados, sólidos disueltos y materia orgánica, con la aplicación de un tratamiento de coagulación-floculación previo para evitar el taponamiento de los lechos de intercambio iónico.

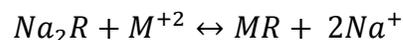
- **Intercambio iónico**

El intercambio iónico es un proceso en el cual iones retenidos, por fuerzas electroestáticas a grupos funcionales con carga eléctrica, sobre la superficie de un sólido, son intercambiados por iones de carga similar en solución. El intercambio iónico es el desplazamiento de un ión por otro; es el intercambio reversible de iones entre un líquido y un sólido, sin ningún cambio radical en la estructura física del sólido.

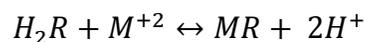
Existen dos tipos básicos de intercambiadores iónicos que son: catiónicos y aniónicos, se denomina intercambiador catiónico, o intercambio básico al desplazamiento de un ión positivo, o catión por otro ión positivo; en aguas residuales estos cationes son por lo regular, metales y amonio. De la misma manera, se denomina intercambio aniónico, o intercambio ácido, el desplazamiento de un ión negativo, o anión, por otro ión negativo (Romero, 2000).

Como se nombro anteriormente para la remoción de metales (Mo, Cr, Pb) es necesario la aplicación de una resina catiónica; las cuales tienen como principio intercambiar los cationes de una solución por iones sodio (Na^+ , ciclo de sodio) o por iones hidrógeno (H^+ , ciclo de hidrógeno), las reacciones de remoción se presentan a continuación siendo M^{+2} , la representación de un catión.

Ciclo de sodio

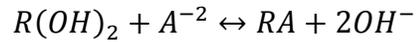


Ciclo de Hidrógeno



Sin embargo, para reducción de sólidos disueltos totales, es necesario utilizar tanto resinas de intercambio aniónico como resinas de intercambio catiónico, siendo las

primeras las encargadas de remover los aniones mediante el intercambio de iones oxidrilos, la separación viene representada por la siguiente reacción donde A^{-2} , representa un anión.



(Ramalho, 1983).

Por esta razón se propone colocar las dos resinas de intercambio iónico, donde el procedimiento consiste en hacer circular el agua por un intercambio catiónico, donde los iones positivos se sustituyen por iones hidrógenos y posteriormente este efluente del intercambio catiónico se hace pasar por una resina de intercambio iónico, en donde los iones aniónicos se sustituyen por iones hidróxilos, por lo tanto, los sólidos en suspensión se sustituyen por iones hidrógenos e hidróxilos que reaccionan para formar moléculas de agua. (Metcalf and Eddy, 1996).

A continuación se presenta el diagrama de flujos para esta propuesta y las tablas complementarias de la misma.

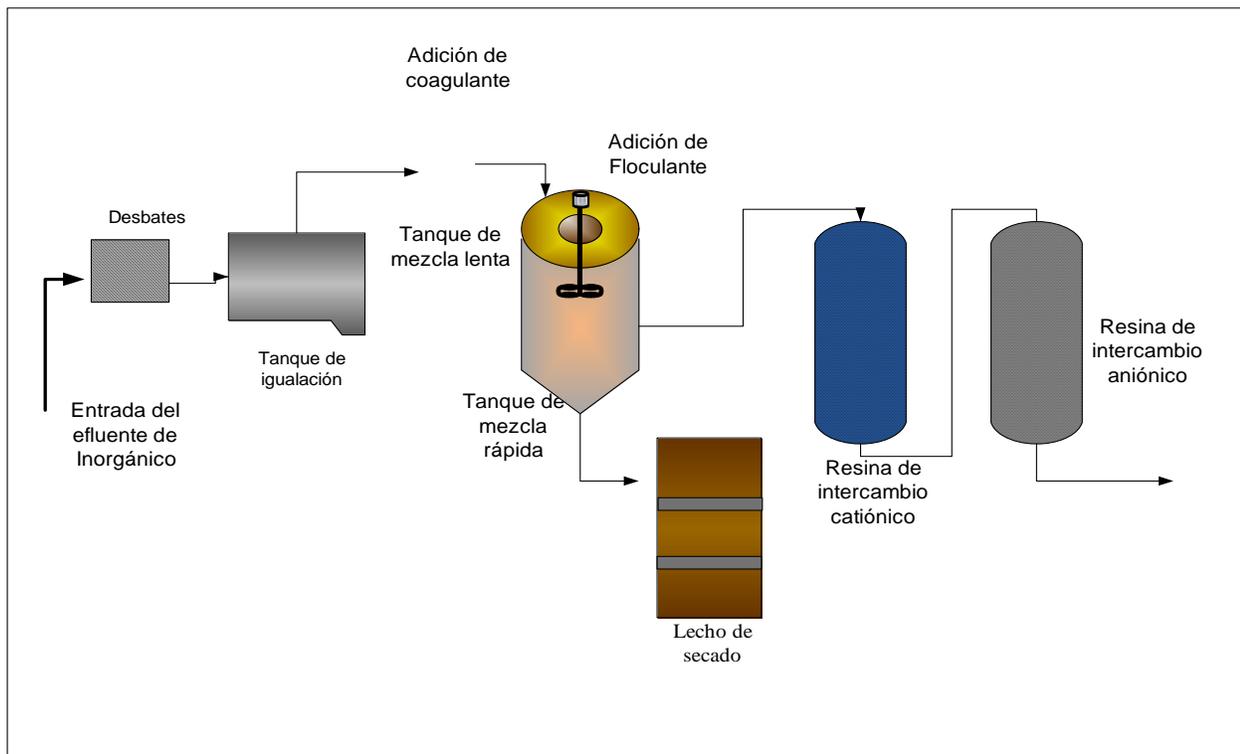


Figura 4.9. Diagrama de flujo de la segunda alternativa.

Tabla 4.21. Ventajas y desventajas de los tratamientos propuestos en la segunda alternativa.

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
<p align="center">Intercambio Iónico</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Remoción de sólidos en disueltos, metales, aniones y cationes. • Remueve el cromo trivalente. • Proporciona el ablandamiento de las aguas residuales. • Proporciona agua desmineralizada. • Los desechos de regeneración se encuentran en forma de solución. • Reduce la alcalinidad con poca generación de sólidos totales. • Eficiencia 95%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Adsorción máxima a pH bajo. • Depende de un tamaño de iones. • El intercambio iónico es selectivo. • Sólidos suspendidos y precipitados ocasionan taponamiento de la membrana. • Los regenerantes causan corrosión. • Eliminación parcial de los iones • Generación de costos por regeneración. • Estricta Operación. • Alto costo de inversión y operación. • Disposición de los desechos de regeneración

Fuente: Romero, 2000; Ramalho, 1983; Metcalf and Eddy, 1996; Kemmer, 1989; Ambrosio, 2005

Tabla 4.22. Calidad de salida del efluente para la segunda alternativa propuesta.

Tratamiento aplicado			Coagulación-floculación		Intercambio Iónico			
Valores de eficiencia			>90% SS ⁽¹⁾ 30-60% DQO ⁽¹⁾ ; 50% de Pb, Cr, Mo, SD ⁽¹⁾		90% Cr ⁽²⁾ 80% Pb, Mo, SD ⁽²⁾ , 25-50% DQO ⁽¹⁾			
Eficiencia tomada			95% SS 45% DQO 50% de Pb, Mo, Cr, SD		90% Cr, 80% Pb, Mo, SD, 37,5% DQO			
Parámetro	Unidad	Valor	C _e	C _s	C _e	C _s	Efluente	Valor límite ³
SS	mg/L	1989	1989	99	-	-	99	80
DQO	mg/L	310	310	171	171	107	171	350
Cromo	mg/L	3,53	3,53	1,76	1,76	0,18	0,176	0,05
Molibdeno	mg/L	0,096	0,096	0,05	0,05	0,010	0,010	0,005
Plomo	mg/L	3,82	3,82	1,91	1,91	0,38	0,38	0,05
Sólidos disueltos totales	mg/L	19248	19248	9624	9624	1925	1925	3000

Fuente: 1) Metcalf and Eddy, 1996; 2) D'Ambrosio, 2005, 3) Decreto 3219, 1989.

4.3.3. Tercera propuesta.

Esta alternativa se basa en la utilización de operaciones con membranas específicamente electrodiálisis para la eliminación de metales pesados y sólidos disueltos con la aplicación de un tratamiento de coagulación-floculación previo para la presencia de sólidos disueltos en el efluente que puedan obstruir la misma.

- **Electrodiálisis.**

La electrodiálisis es un proceso de membrana, impulsado eléctricamente, usado para reducir los sólidos disueltos totales (SDT). En el proceso de electrodiálisis, los iones del agua, son transferidos a través de membranas de intercambio iónico, mediante la aplicación de un voltaje de corriente directa. El efluente circula entre dos membranas dispuestas a modo de paredes, detrás de las cuales se sitúan ánodos y cátodos que atraen iones negativos y positivos, quedando el agua con bajo contenido de sales y una salmuera como desecho.

Los dos tipos de membranas utilizadas en ED son:

- a. Membranas conductoras de electricidad de transferencia de aniones, impermeables al agua, que permitan el paso de aniones solamente.
- b. Membranas conductoras de electricidad de transferencia de cationes, impermeables al agua, que permitan el paso de cationes solamente.

Además, existen membranas selectivas para el paso de iones monovalentes o divalentes y para el paso de ciertos iones específicos.

En la figura 4.9 se muestra lo que ocurre en seis compartimiento separados por membranas de intercambio iónico cuando se aplica corriente directa a los electrodos; siendo los aniones representados por el ión cloro y los cationes por el ión sodio. En este caso las membranas hacen que los iones se comporten de la siguiente manera:

- En los compartimientos 1 y 6 los electrodos metálicos permiten que ocurra oxidación reducción.
- En el compartimiento 2 los iones Cl^- pasan por medio de la membrana aniónica (A) hacia el compartimiento 3 mientras que los cationes Na^+ se mueven a través de la membrana catiónica (C) hacia el compartimiento 1.
- En el compartimiento 3 los iones Na^+ no pueden moverse a través de la

- membrana aniónica y permanecen en él. Los iones Cl^- tampoco pueden pasar a través de la membrana catiónica y, también, permanecen en el compartimiento 3.
- En el compartimiento 4 los iones Cl^- pasan a través de la membrana aniónica hacia el compart
 - imiento 5, mientras que los iones Na^+ pasan a través de la membrana catiónica hacia el compartimiento 3.
 - En el compartimiento 3 los cationes Na^+ no pueden pasar a través de la membrana aniónica y permanecen en él. Los aniones Cl^- no pueden pasar a través de la membrana catiónica, y permanecen, igualmente, en el compartimiento 5.

Los compartimientos 2 y 4 están libres de iones mientras que los compartimientos 3 y 5 tienen una concentración de iones alta.

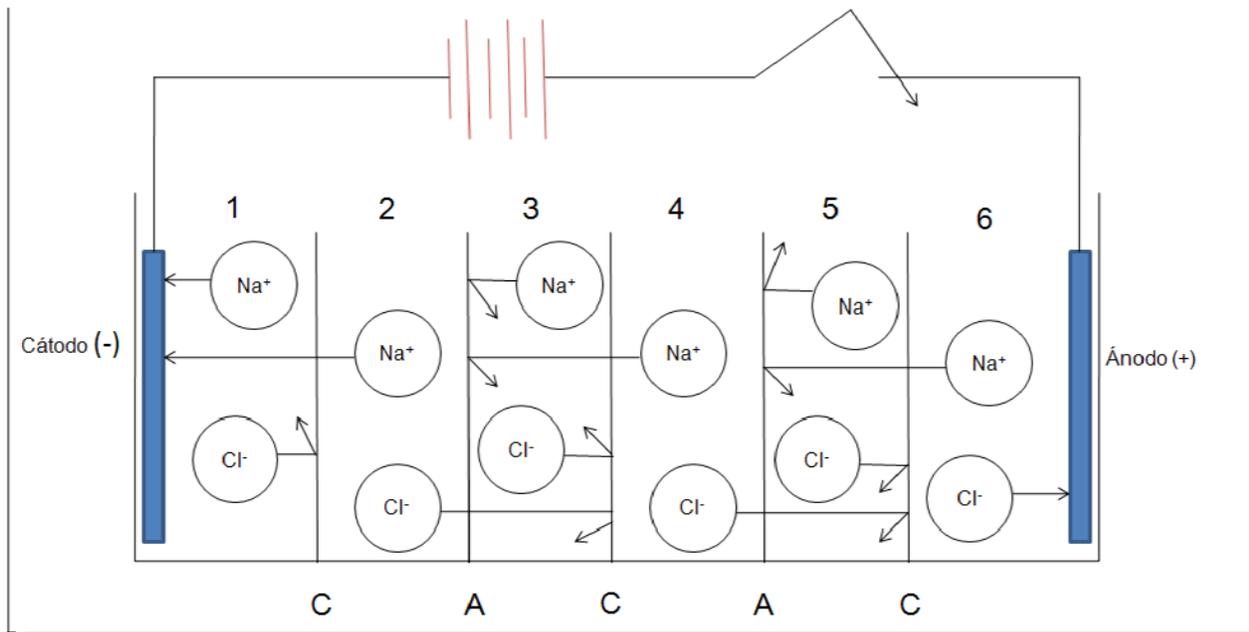


Figura 4.10. Comportamiento de los aniones y cationes en la electrodiálisis.

(Romero, 2000)

A continuación se presenta el diagrama de flujos para esta propuesta y las tablas complementarias de la misma.

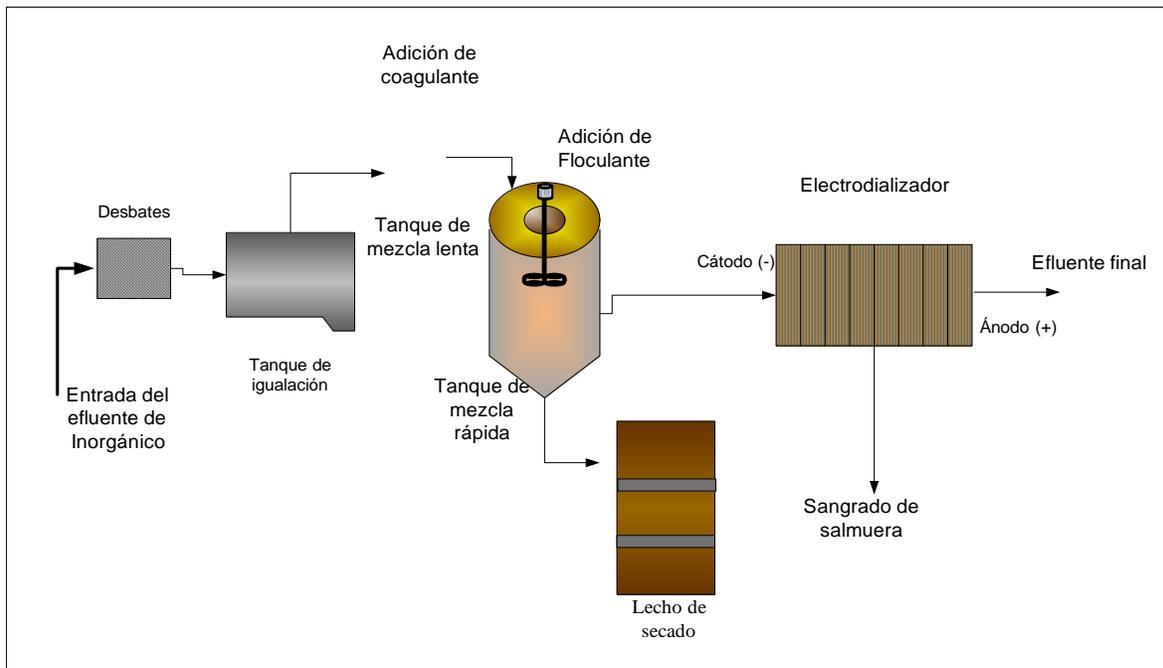


Figura 4.11. Diagrama de flujo de la tercera alternativa.

Tabla 4.23. Ventajas y desventajas de los tratamientos propuestos de la tercera alternativa.

Tratamiento	Ventajas
Electrodialisis	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de sólidos disueltos, metales pesados. • Remoción de 50-99% de sólidos disueltos totales. • Su uso es para remover componentes ionizados.
	Desventajas
	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de incrustaciones. • Generación de costo por el uso de energía. • Necesidad de aplicar un tratamiento para remover sólidos suspendidos y material coloidal. • No son aptas para remoción de bacterias o de contaminantes orgánicos sin carga eléctrica.

Fuente: Metcalf and Eddy, 1996; Romero 2000.

Tabla 4.24. Calidad de salida del efluente para la tercera alternativa propuesta.

Tratamiento aplicado			Coagulación-floculación		Electrodialisis			
Valores de eficiencia			>90% SS ⁽¹⁾ 30-60% DQO ⁽¹⁾ ; 50% de Pb, Cr, Mo, SD ⁽¹⁾		99% Cr, Pb, Mo, SD ⁽²⁾ ,			
Eficiencia tomada			95% SS 45% DQO 50% de Pb, Mo, Cr, SD		99% Cr, Pb, Mo, SD,			
Parámetro	Unidad	Valor	C _e	C _s	C _e	C _s	Efluente	Valor límite ³
SS	mg/L	1989	1989	99	-	-	99	80
DQO	mg/L	310	310	171	-	-	171	350
Cromo	mg/L	3,53	3,53	1,76	1,76	0,02	0,018	0,05
Molibdeno	mg/L	0,096	0,096	0,048	0,048	0,0005	0,0005	0,005
Plomo	mg/L	3,82	3,82	1,91	1,91	0,02	0,02	0,05
Sólidos disueltos totales	mg/L	19248	19248	9624	9624	96	96	3000

Fuente: 1) Metcalf and Eddy, 1996; 2) Romero, 2000; 3) Decreto 3219, 1989.

4.3.4. Cuarta alternativa.

Esta alternativa se basa en la utilización de operaciones con membranas esta vez utilizando ósmosis inversa como equipo principal para la eliminación de metales pesados, sólidos disueltos y materia orgánica, con la aplicación de un tratamiento de coagulación-floculación previo para la presencia de sólidos disueltos en el efluente que puedan obstruir la misma.

- **Ósmosis Inversa.**

La ósmosis inversa es un proceso en el que se separa el agua de las sales disueltas en disolución mediante la filtración a través de una membrana semipermeable a una presión superior a la presión osmótica provocada por las sales disueltas en el agua residual (Metcalf and Eddy, 1996). El proceso se detalla a continuación:

Cuando un agua pura y una solución salina se encuentran en lados opuestos de una membrana semipermeable, el agua pura se difunde a través de la membrana y diluye la solución salina. Este fenómeno se conoce como ósmosis, o difusión de un solvente, por ejemplo agua pura, desde una solución salina diluida a una solución concentrada, a través de una membrana semipermeable que separa las dos soluciones. Debido a la diferencia en la concentración de sales, el agua pura fluye a través de la membrana como si se aplicara presión sobre ella; dicha presión se llama presión osmótica y su magnitud depende de la concentración de sales en solución y de la temperatura del agua.

La presión osmótica es, por tanto, el cambio en la altura estática requerido para transportar el agua a través de la membrana semipermeable que separa dos soluciones salinas de concentración diferente. Ahora bien, si se aplica presión sobre la solución salina, el fenómeno de ósmosis se puede invertir. Cuando la solución aplicada sobre la solución salina es mayor que la presión osmótica, la presión en exceso hace que el solvente, agua dulce, fluya de la solución más concentrada a la solución más diluida, a través de la membrana, en dirección opuesta al flujo osmótico normal, fenómeno que se denomina ósmosis inversa (Romero, 2000).

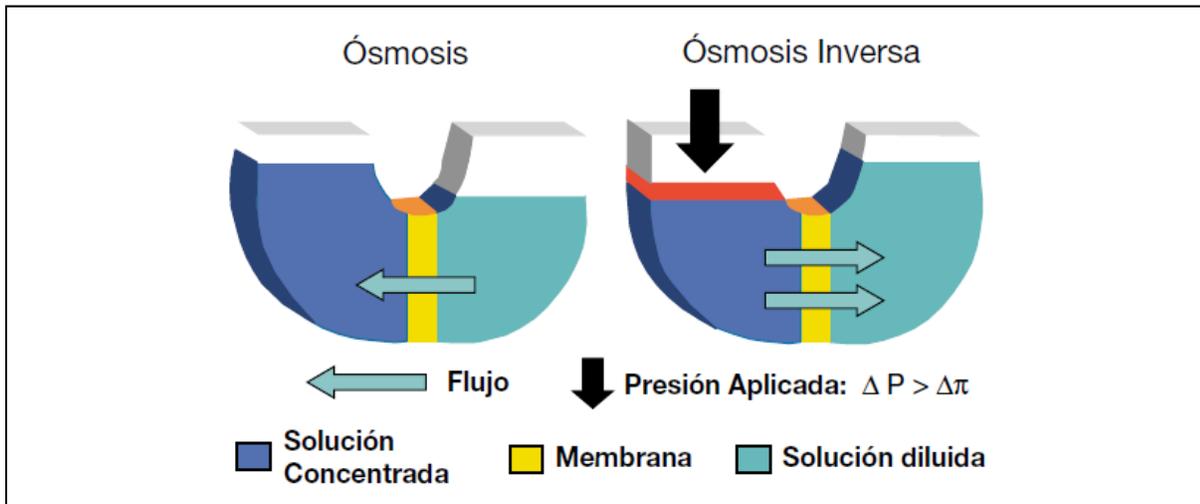


Figura 4.12. Esquemas de los fenómenos de ósmosis natural y ósmosis inversa

Fuente: Ministerio de sanidad y política social, 2009

A continuación se presenta el diagrama de flujos para esta propuesta y las tablas complementarias de la misma.

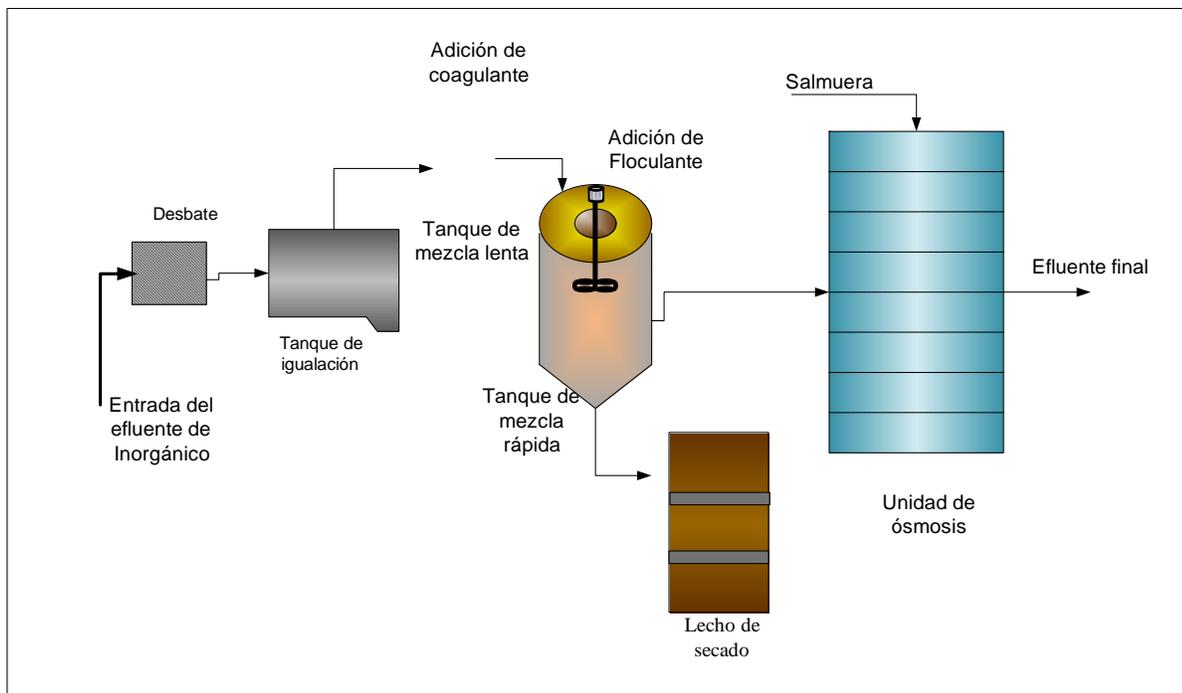


Figura 4.13. Diagrama de flujo de la cuarta propuesta.

Tabla 4.25. Ventajas y desventajas de los tratamientos propuestos en la cuarta alternativa.

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Osmosis Inversa	<ul style="list-style-type: none"> • Separación de sales disueltas en disolución. • Eliminación de materia orgánica. • Puede llegar a remoción >95% • Equipamiento compacto y automatizado. • Es una tecnología disponible. • Bajo consumo de energía. • Permite la adaptabilidad a posibles ampliaciones. • Este tipo de planta, generalmente tiene una alta tasa de producción. • Este proceso puede tratar prácticamente cualquier tipo de agua sin importar su origen. • Permite remover con cierta sencillez contaminantes orgánicos e inorgánicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado costos. • Escasa experiencia en el tratamiento de aguas residuales. • Necesaria aplicación de un pretratamiento al efluente. • Trabaja a un rango de pH específico. • Produce incrustaciones en el agua. • Nueva tecnología para el personal de operaciones, lo que requiere de alta automatización para poder operar. • Genera una corriente de desecho alto en concentración de sales aproximadamente 40% del caudal de entrada. • La membrana requiere de limpieza continua. • Riesgo de contaminación bacterial de las membranas la cual puede introducir a olores y sabores desagradables en el producto final. • Requiere de una fuente confiable de energía, es decir de un suministro permanente para generar el producto.

Fuente: Metcalf and Eddy 1996; Ramlho 1983; D' Ambrosio, 2005.

Tabla 4.26. Calidad de salida del efluente para la cuarta alternativa propuesta.

Tratamiento aplicado			Coagulación-floculación		Ósmosis inversa			
Valores de eficiencia			>90% SS ⁽¹⁾ 30-60% DQO ⁽¹⁾ ; 50% de Pb, Cr, Mo, SD ⁽¹⁾		>95% Cr, Pb, Mo, SD ⁽²⁾ , 50% DQO ⁽¹⁾			
Eficiencia tomada			95% SS 45% DQO 50% de Pb, Mo, Cr, SD		99% Cr, Pb, Mo, SD, 50% DQO			
Parámetro	Unidad	Valor	C _e	C _s	C _e	C _s	Efluente	Valor límite ³
SS	mg/L	1989	1989	99	-	-	99	80
DQO	mg/L	310	310	171	171	85	85	350
Cromo	mg/L	3,53	3,53	1,76	1,76	0,04	0,04	0,05
Molibdeno	mg/L	0,096	0,096	0,048	0,048	0,001	0,001	0,005
Plomo	mg/L	3,82	3,82	1,91	1,91	0,05	0,05	0,05
Sólidos disueltos totales	mg/L	19248	19248	9624	9624	241	241	3000

Fuente: 1) Metcalf and Eddy, 1996; 2) D' Ambrosio, 2005, 3) Decreto 3219, 1989.

4.4. Selección de la(s) mejor(es) alternativa(s) en base al cumplimiento de los parámetros permitidos para el agua industrial o de riego.

Después de proponer las diferentes alternativas para el tratamiento de los efluentes de carácter inorgánico se procede a la selección de la alternativa más favorable, utilizando la matriz Moody y evaluando de una manera cuantitativa las diferentes propuestas asignando a las mismas un número entre 1-5 siendo el 5 considerado como la más favorable. Para realizar la selección se fijaron los siguientes criterios de selección.

Criterio 1: Inversión inicial.

Considera el costo generado por la implantación de la alternativa. Incluye los costos de adquisición de equipos y accesorios, además de los costos de instalación de los mismos y su impacto financiero. Este criterio se considera uno de los más importantes, y se le asigna un valor del 20% debido a que la inversión va destinada a la implementación de una de las alternativas para lograr la calidad del agua a ser reutilizada en el riego de las áreas verdes de la empresa.

Mediante consultas bibliográficas y entrevistas con personas desenvueltas en el ámbito del tratamiento de agua, se llega a la conclusión de que los gastos para la implementación de una ósmosis inversa son mayores que las otras alternativas propuestas por lo cual se le asigno un valor de 1, seguido de 2 para el intercambio iónico, para la electrodiálisis un valor de 3 y por último un valor de 4 para la precipitación química.

Criterio 2: Costos operativos.

Considera el costo generado para operar, controlar y mantener el sistema una vez desarrollada la alternativa; esto incluye los gastos generados por el consumo de energía. A este criterio también se le asigna una ponderación de 20%, ya que una buena alternativa no debe tener sólo una baja inversión, sino que también debe contemplar bajos costos operativos.

En este caso se le asigna 1 a la alternativa 3 o electrodiálisis debido a que esta es la que utiliza más energía para su operación, seguida de la ósmosis inversa con un valor de 2 puntos ya que esta necesita de una fuente de energía permanente, a las dos alternativas restantes se le dio una ponderación de 4 ya que su generación de costos operativos es menor.

Criterio 3: Eficiencia.

Este criterio es considerado de gran importancia y se considera prioritario porque de él depende la calidad del agua que se va a reutilizar, por esta razón se le asignó un peso de 15%.

Según la bibliografía consultada y la tabla presentada para cada alternativa propuesta se tiene que los mejores efluentes obtenidos fueron los de precipitación química y la electrodiálisis, seguido de la ósmosis inversa y por último el intercambio iónico, sin embargo la ósmosis tiene valores de DQO limitado para entrara a la mismas y la electrodiálisis no remueve materia orgánica que no esté cargado, por esta razones se asignó un puntaje de 5 para la precipitación, seguida de una puntuación de 4 para ósmosis y electrodiálisis, y por último 3 para el intercambio iónico.

Criterio 4: Operabilidad.

Una adecuada alternativa además de tener bajos costos y una mayor eficiencia no debería presentar dificultad en los procedimientos necesarios para operar y controlar el sistema de tratamiento; por lo cual, este criterio se le asigna un porcentaje del 15%.

Se le asignó una puntuación de 5 a la alternativa 1 (precipitación química), ya que esta es la que presenta una operación sencilla; seguido de una puntuación de 2 para las alternativas 2 y 3, ya que sus operaciones son de mayor dificultad debido al control que se debe tener en ellas y por último se asignó una puntuación de 1 a la alternativa 4 ya que la misma requiere de control y supervisión continua.

Criterio 5: Experticia del operador.

Este criterio considera el requerimiento de mano obra especializada para su operación; está asociada al criterio de operabilidad y se le asigno un peso del 10%.

Debido a que este criterio presenta gran asociación con el anterior la puntuación fue similar al anterior, ya que una operación con mayor dificultad requiere de una mano de obra más especializada por lo tanto las puntuaciones de las alternativas 2,3 y 4 fueron iguales que la anterior mientras que la alternativa 1 se le asignó un puntaje de 4.

Criterio 6: Uso de químicos. Este criterio está asociado con el uso de aditivos químicos, al cual se le asignó un peso de 10%. El mayor puntaje en favor lo obtuvo la electrodiálisis con 5 puntos debido a que es la solución que necesita menos químicos para su operación, seguidamente la precipitación y la ósmosis inversa con una puntuación de 2 la primera ya que existen regulaciones en el pH para poder obtener una buena oxidación/reducción que permitan obtener una eficiente remoción durante la precipitación y la segunda porque requiere de una limpieza continua para garantizar su adecuado funcionamiento, y por último se encuentra el intercambio iónico debido a la regeneración continua que se debe realizar para cumplir con el ciclo de funcionamiento.

Criterio 7: Requerimiento de espacio físico.

Se requiere un sistema de tratamiento que permita ocupar el menor espacio físico posible, pero que resulte ergonómico para las actividades que se desarrollan en la planta, a esta alternativa se le asignó un peso de 10% ya que los espacios no son limitantes para la empresa, sin embargo se tiene que pensar en ampliaciones futuras.

El espacio ocupado por la electrodiálisis y la ósmosis son pequeños en comparación con el intercambio iónico por lo cual a las dos primeras se le asignó una puntuación de 4 mientras que el último obtuvo una puntuación de 3 quedando como alternativa menos favorable para este criterio la precipitación debido a los tanques que se tienen que utilizar para la misma.

En la tabla 4.27, se muestran los resultados de la matriz de selección de la alternativa de adecuación de los efluentes para la reutilización en el riego de las áreas verdes de la empresa CAVENPI. Teniendo en cuenta que las alternativas presentadas fueron: como alternativa 1 precipitación química, alternativa 2 intercambio iónico, alternativa 3 electrodiálisis, alternativa 4 ósmosis inversa.

Tabla 4.27. Matriz de selección de las alternativas propuestas.

CRITERIOS	(%C)	ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2		ALTERNATIVA 3		ALTERNATIVA 4	
		P	%C*P	P	%C*P	P	%C*P	P	%C*P
Inversión Inicial	20	4	0,8	2	0,4	3	0,6	1	0,2
Costos operativos	20	4	0,8	4	0,8	1	0,2	2	0,4
Eficiencia	15	5	0,75	3	0,45	4	0,6	4	0,6
Operabilidad	15	5	0,75	2	0,3	2	0,3	1	0,15
Experticia del Operador	10	4	0,4	2	0,2	2	0,2	1	0,1
Uso de químicos	10	2	0,2	1	0,1	5	0,5	2	0,2
Requerimiento de espacio físico.	10	2	0,2	3	0,3	4	0,4	4	0,4
TOTAL	100		3,9		2,6		2,8		2,1

De acuerdo a la tabla 4.27, la alternativa que posee mayor puntaje según los criterios establecidos, es la primera que se basa en la precipitación química de los metales pesados.

4.3.1. Descripción de la propuesta seleccionada

A continuación se presenta una descripción de las unidades que conforman el esquema de tratamiento:

- **Unidad de Desbaste:** está compuesto por un sistema de rejillas al cual llega el afluente por gravedad que tiene como función por una parte, de proteger las instalaciones (y su funcionamiento) que constituyen las obras de tratamiento; y por la otra, con miras a eliminar o reducir sensiblemente, las condiciones indeseables relacionadas, mayormente, con la apariencia estética de la planta (Rivas, 1978).

- **Unidad de homogenización:** luego de pasar el agua por el tratamiento preliminar llega a esta unidad, que está conformada por un tanque provisto de un medidor de pH, con el objetivo principal de aminorar las variaciones de dichas corrientes y conseguir una corriente mezclada con un caudal relativamente constante, además de aminorar las variaciones de DBO del afluente a la planta (Ramalho, 1983). Y por último controlar la adición de ácido o base para lograr el pH de operación (9.10) del tratamiento físico-químico

- **Unidad de mezcla rápida:** el efluente llega a esta unidad por medio de bombeo, está conformado por un tanque de forma cilíndrica con un agitador mecánico, dosificación de coagulante y un medidor de pH. Esta unidad tiene como función principal desestabilizar o neutralizar las cargas de eléctricas de los coloides y emulsiones mediante la dosificación de reactivos químicos y agitación vigorosa que permitan la separación de los mismos por decantación. El medidor de pH tiene la función de controlar el pH de reacción para que este proceso sea más eficiente.

- **Unidad de mezcla lenta:** luego del proceso de coagulación el efluente llega a esta unidad que está conformada por un tanque en forma de cono y la adición de una sustancia floculante. Dicha sustancia floculante son las que hacen posible el reagrupamiento de las partículas formadas en el proceso de coagulación para formar

unas de mayor tamaño y lograr velocidades de decantación mayores.

- **Sistema de oxido-reducción:** luego de neutralizar las cargas y remover los sólidos suspendidos del efluente, se pasa al proceso de reducción del cromo para su posterior precipitación, este sistema está conformada por dos tanques que contienen baffles los cuales proporcionan la mezcla para lograr la reducción de dicho metal. El proceso consiste en una transferencia de electrones entre los compuestos que intervienen en la reacción, de tal forma que un compuesto los cede y otro los capta.

El proceso de reducción del cromo se realiza a pH ácido (2), por lo cual el proceso se realiza de la siguiente manera; la acidificación del efluente se realiza en un primer tanque que consta de un medidor de pH sumergido dentro del efluente el cual controla la adición del ácido, posteriormente este efluente pasa a un segundo tanque donde se añade el agente reductor (FeSO_4), el cual cuenta con un medidor del potencial redox, que en el que mantiene el control del agente reductor.

El potencial redox viene dado por:

$$E = 0,902 + \frac{0,0591}{6} \cdot \log \frac{|\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}| |\text{H}^+|^{14}}{[\text{Cr}^{+3}]^2} \quad (\text{Sainz, 1995})$$

- **Unidad de neutralización:** esta unidad está conformada por un tanque con un medidor de pH, con la finalidad de llevar el pH a una forma neutra de aproximadamente 7 antes de realizar el proceso de precipitación, ya que las aguas residuales ácidas, además de la acidez contienen diferentes concentraciones de metales pesados.

- **Unidad de precipitación:** consta de un tanque de agitación rápida y uno de agitación lenta; en el primero se realiza la dosificación de reactivos químicos los cuales al reaccionar con el agua residual produzcan sales u otros compuestos insolubles que puedan ser separados por decantación. El proceso de precipitación de metales pesados se lleva a cabo de forma generalizada por formación de los hidróxidos metálicos correspondientes, cuyos productos de solubilidad suelen ser suficientemente bajos como para permitir el vertido del agua clarificada al receptor una vez eliminados los sólidos en suspensión formados en la precipitación.

Se debe tener en cuenta que la precipitación de metales pesados en forma de hidróxidos depende del pH, lo que puede causar un reajuste de pH al agua antes del vertido final. Otro problema que se presenta es que los diferentes metales pesados al tener unos valores del producto de solubilidad mínimo a valores de pH diferentes, lo cual se debe tomar en cuenta a la hora de fijar el punto final de precipitación, por lo cual este tanque debe contar con un medidor de pH y un controlador PLC (7,8,9) que controle los diferentes pH. El segundo tanque es utilizado para la decantación de los sólidos formados en la precipitación.

- **Lecho de secado:** el cual se encarga de tratar los lodos provenientes de la coagulación-floculación y la precipitación química, debido a que estos pueden presentar características altamente ofensivas para los suelos o receptores donde son normalmente dispuestos.

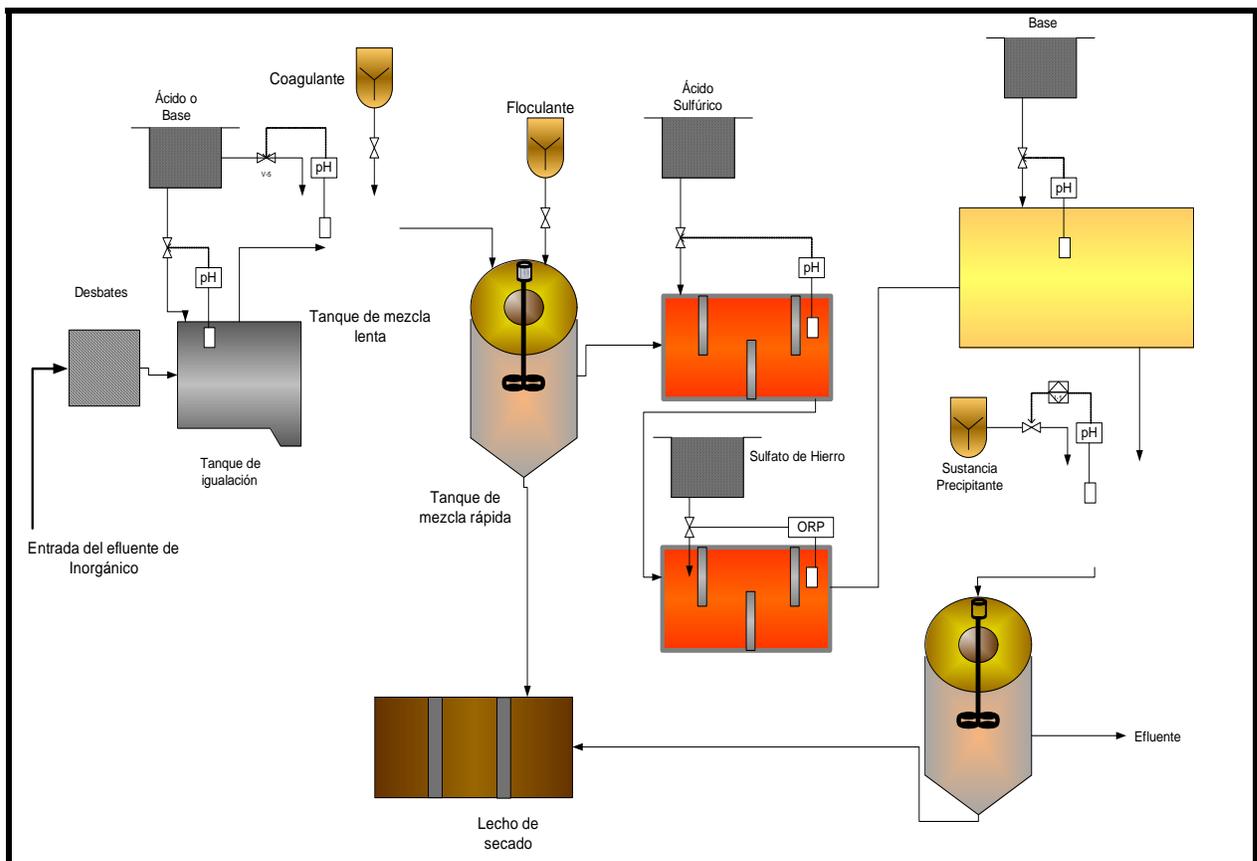


Figura 4.14. Diagrama de flujo de la propuesta seleccionada.

4.5. Elaborar un estudio costo/beneficio de la(s) alternativa(s) seleccionada(s).

El análisis costo beneficios una lógica o razonamiento basado en el principio de obtener los mejores y mayores resultados al menor esfuerzo invertido, tanto por eficiencia técnica como por motivación humana. En otras palabras, el análisis de costo-beneficio pretende determinar si los beneficios de una propuesta supera los costos que su implementación implica.

Los componentes de esta relación son los costos generados por la inversión inicial al implementar la propuesta y los beneficios obtenidos de dicha implementación.

La inversión inicial está definida como el dinero requerido para financiar construcción, puesta en operación y estabilización de cualquier actividad productiva, la cual está compuesta por el capital fijo y el capital de trabajo.

El capital fijo es el dinero necesario para acondicionamiento de actividad productiva, desde conceptualización de ideas hasta gastos de arranque y puesta en marcha de sistemas, está compuesto por los activos tangibles e intangibles.

Los activos tangibles están formados por bienes que tienen cierta permanencia, adquiridos con el propósito de usarlos; entre ellos se encuentran: equipos, instrumentación y control, tuberías, equipos eléctricos.

A continuación se presentan los costos asociados a los equipos requeridos para la alternativa seleccionada.

Tabla 4.28. Costo de los equipos.

Activo	Costo (BsF.)	Cantidad	Total (BsF.)
Sistemas de dosificación	22135	4	22135
Medidor de pH	22275	4	22275
Controlador PLC	2190	1	2190
Controlador de ORP	25275	1	25275
Total			205105

A continuación se muestran los costos totales por los activos tangibles.

Tabla 4.29. Costo total de los activos fijos tangibles

Activo	Costo (BsF.)
Equipos	205105
Instrumentación y control	26664
Tuberías	41021
Equipos eléctricos	25638
Total	298428

Es importante mencionar que estos flujos monetarios deben expresar de igual manera, para el caso del costo total de activos tangibles (tabla 4.28) se expresan como valor actual, lo cual se debe transformar a valores anuales, para ello es necesario utilizar una tasa de interés, la cual para el caso particular se asumió igual a 8% y se establece como vida del proyecto igual a 20 años para la determinación del valor anual (Burns and mcdonald, 2010), el cálculo asociado se muestra en el apéndice A. Con este valor se obtiene el costo total anual de equipos mostrado en la siguiente tabla:

Tabla 4.30. Costos anuales de los activos tangibles.

Parámetro	Costo anual (Bsf/año)
Total de activos tangibles	30396

Los activos intangibles están destinados a la adquisición de bienes inmateriales, tales como: costos de servicios industriales, de supervisión y entrenamiento, arranques, pruebas y contingencias y sus respectivos costos son representados a continuación:

Tabla 4.31. Costo total de los activos intangibles.

Activo	Costo (BsF.)
Servicios Industriales	112808
Estudios y proyectos	71787
Supervisión y entrenamiento	10255
Arranques, pruebas y contingencias	44395
Total	239245
Total anual (BsF/año)	24368

Por su parte el capital de trabajo está definido como el dinero necesario para iniciar operaciones de producción y/o cumplir con compromisos establecidos. Depende de las características de la actividad productiva y sus costos se indican en la siguiente tabla.

Tabla 4.32. Costo total de los componentes del capital de trabajo.

Activo	Costo (BsF/año.)
Inventario de materia prima	42019
Inventario de repuesto	25638
Total	44630

Tabla 4.33. Costos anuales totales del capital fijo y de trabajo

Capital	Costo anual (Bsf/año)
Fijo	54763
Trabajo	44630
Inversión inicial	99393

Teniendo en cuenta que el beneficio se define como la entrada de dinero a una empresa y en este caso no sucede se tomara como beneficio el ahorro del costo que amerita tratar los lodos producidos en el reactor biológico ya que estos no presentarían

metales pesados luego de separar los efluentes; por otra parte esta propuesta adecuaría los parámetros del agua residual para ser descargada si así se desearía, ya que de no ser así la empresa cumple el riesgo de tener una multa de entre 50-5000U.T. (art. 124 Ley de aguas, 2007), otros beneficios generados sería el cobro por m³ extraído de los pozos así como también el asociado a los m³ descargados a cloacas o cuerpos de aguas, que se aplicaran en un futuro. Tomados los dos primeros se tiene:

Tabla 4.34. Beneficios positivos de la implementación de la precipitación química.

Beneficio	Costo (BsF/año)
Tratamiento de los lodos actualmente	73600
Valor de la multa ambiental.	191900
Total	265500

Fuente: CAVENPI, Ley de aguas.

La relación costo beneficio se determina como el cociente entre el costo que incluye la inversión inicial, los beneficios obtenidos la tabla 4.34 se muestra dicha relación.

Tabla 4.35. Relación costo beneficio

Inversión inicial (Bsf/año)	Beneficio (Bsf/año)	Relación costo beneficio
99323	265500	0,3744

La relación costo beneficio resultó ser igual a 0,3744 lo que quiere decir que la alternativa es factible económicamente, ya que los costos generados resultaron ser menores que los beneficios obtenidos.

CONCLUSIONES

1. La adición de una sustancia química coagulante al tratamiento físico-químico presentó valores de remoción más altos que el obtenido con el tratamiento actual.
2. Un tratamiento biológico al efluente del tanque de igualación de la planta de tratamiento no funcionaría ya que esta agua posee un porcentaje de biodegradabilidad menor a 0,5 lo que indica que es un agua muy poco biodegradable.
3. La demanda química de oxígeno aportada por la línea proveniente de la producción de orgánico es diluida por las líneas de producción de inorgánico ya que los caudales de esta última superan el de orgánico.
4. En la caracterización del agua residual, los parámetros; cromo, plomo, molibdeno y sólidos disueltos resultaron estar fuera del límite establecido por el Decreto 3219 (1989).
5. Entre las alternativas propuestas para la adecuación de los efluentes se encuentran: precipitación química, intercambio iónico, electrodiálisis y ósmosis inversa.
6. La alternativa de tratamiento seleccionada resultó ser la precipitación química, por ser la más favorable con respecto a los criterios fijados.
7. La relación costo beneficio de la alternativa seleccionada arrojó un valor de 0,3744 lo que implica que los costos generados son menores que los beneficios obtenidos.

RECOMENDACIONES

- Luego de tratar el efluente de inorgánico unirlo con el efluente de orgánico tratado a fin de diluir sus concentraciones y utilizar más caudal para el riego.
- Confinar los derrames producidos en planta colocando muros de contención encima de los tanques de preparación de soluciones y los drenajes de emergencia.
- Al aplicar la propuesta seleccionada evaluar el proceso con el efluente unido para determinar las dosificaciones óptimas de los químicos a utilizar.
- Evaluar la biodegradabilidad del agua de orgánico para verificar si la misma se podría pasar por un tratamiento biológico.
- Determinar el lodo producido con las dosificaciones óptimas a fin de determinar si los lechos de secado cubren la capacidad o se necesita diseñar uno.

REFERENCIAS

1. Arana, Federico (1995). *Ecología para principiantes*. México: Trillas
2. Araya, C. (2004). *Estadísticas para laboratoristas químicos*. Ciudad Universitaria "Rodrigo Facio", Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
3. Arévalo, E.; Anléu, Melissa; Bonilla S., José J.; Castillo M., Manuel J.; González P., José R.; Ixpaché, Eddi; Morales G., Juan L.; y Rodas S., Sofía (2009). Reuso del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales del campus central de la Universidad Rafael Landívar para el riego de los jardines del campus. *Revista electrónica*, N° 13, pp. 53-93. Facultad de Ingeniería, Universidad Rafael Landívar. Guatemala, México. Disponible en: <http://www.tec.url.edu.gt/boletín/URL13QUI02.pdf>
4. Arias, E. (2006). *Mitos y errores en la elaboración de tesis y proyectos de investigación*, (3ª Edición). Caracas: Episteme.
5. Bracho, María B.; Dall P., María; Escalona, Zuleima y García, Roberto (2008). Alternativas de reutilización de aguas residuales regeneradas en sistemas de tratamiento de la Península de Paraguaná. Revista académica, *Desarrollo Local Sostenible* Vol 1, N° 3. Falcón, Venezuela. Disponible en: <http://www.eumed.net/rev/delos/03/pbdeg.pdf>.
6. Best, J.W. (1970). *Cómo investigar en educación*, (2ª Edición). Madrid: Morata.
7. Cifuentes, Olga (2007). *Aguas residuales y tratamientos de efluentes cloacales*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional
8. Clair N., Perry L. (2001). *Química para ingeniería ambiental*. Bogotá: Mc Graw Hill.

9. Coraspe R., Héctor J.; Corredor R., Luis A.; Marcano N., Andémulo R. y Nava S., Medardo A. (1989). *Manual de tratamiento de Agua LIPESA*. Caracas: Gráficas Chemar C.A.
10. Dorado, M.; Fernández, A.; Letón, P.; Rodríguez, A.; Rosal, R.; Sanz, J. y Villar, S. (2007). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. *Vigilancia tecnológica*. Madrid: CEIM. [Documento en línea]. Disponible en:
<http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2>
11. Durán H., Zulma L. (2009), *Evaluación del desempeño de un conjunto de lagunas para el tratamiento de las aguas de riego provenientes del canal Tibanica*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. . [Documento en línea]. Disponible en:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/1772/>
12. D' Ambrosio, María C. (2005). "Evaluación y selección de alternativas para la remoción de arsénico" [Documento en línea]. Disponible en: www.produccion-animal.com.ar
13. Granado, M. (2008). *Propuesta de mejora en el proceso de efluentes provenientes de la sección de producción de jabón de una empresa manufacturera*. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Venezuela.
14. Gutiérrez, H.; De La Vara, R. (2006). *Control estadístico de calidad y seis sigma 6σ*. México: McGraw Hill.
15. Henry, Glynn y Heinke, Gary (1999). *Ingeniería Ambiental*, (2da Edición). México: Prentice Hall.
16. Hernández, C. (2008). *Guía para análisis de rentabilidad de proyectos*. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería. Valencia, Venezuela.

17. Hernández S., Francesc; Molinos S., María y Sala G., Ramón (2009), *Viabilidad económica de la reutilización de aguas residuales: valoración económica de los beneficios ambientales*. Valencia, España: Universitat de València. [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.asepuma.org/AnalesDeAsepuma/2010/510.pdf>.
18. Hidalgo, Liz A. (2009). *Evaluación del sistema de tratamiento de aguas blancas y propuesta de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la empresa CHICCO Valencia*. Trabajo no publicado. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería. Valencia, Venezuela.
19. Hueriga P., Efrain (2006), *Desarrollo de alternativas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante el uso de tecnologías limpias dirigidas al reciclaje y/o valoración de contaminantes*. Valencia, España: Universitat de València. Departament de Biologia Funcional i Antropologia Física. [Documento en línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10803/9490>.
20. Kemmer, Frank N. (1997). *Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. Tomos I y II. México: McGraw-Hill..
21. Kestler R., Patricia J. (2009). *Uso, reuso y reciclaje del agua residual en una vivienda*. Facultad de ingeniería, Universidad Rafael Landívar. Guatemala, México. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/fulltext/usoreuso.pdf>
22. Jaimes, Jorge; López, Socorro; Mijalova, Petia y Ramírez, Esperanza (1994). *Factibilidad técnica del proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de efluentes en la industria química-farmacéutica*. Instituto Mexicano de Tecnología del agua. [Documento en línea] Disponible en: www.bvsde.paho.org/bvsaar/fulltext/factibilidad.pdf
23. López L., Rafael (2009). *Manual de tratamiento fisicoquímico y biológico de aguas residuales*.

24. *Manual para la formación del medio ambiente* (2008), (1° Edición), España: Lex Nova S.A. España.
25. Lugo, I.; Malaver, C.; Rodríguez, J. y Rojas C. (2007), Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. Bogotá: Fundación Universitaria Manuela Beltrán. [Documento en línea]. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/html/304/30401102/30401102.html>
26. Metcalf and Eddy (1996). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. (3^{ra} Edición). México: McGraw-Hill.
27. Ministerio de sanidad y política social (2009). *Guía de desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano*. España. [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.msps.es> [Consulta: Abril 2011].
28. *Normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la cuenca del Lago de Valencia* (Decreto N° 3219). (1989, Enero 13). Gaceta oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 5.305 (Extraordinario). (1.989, Febrero 1).
29. Parra C., Iván. (1999) *Introducción al tratamiento de aguas residuales industriales*. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela
30. Ramalho, N. (1983). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Quebec, Canadá: Reverté.
31. Rigola, M. (1989). *Tratamiento de agua industriales: Agua de proceso y residuales*. Editorial Alfaomega. [Libro en línea] Disponible en: http://books.google.co.ve/books?id=fQcXUq9WFC8C&pg=PA137&lpg=PA137&dq=Tratamiento+de+agua+industriales:+Agua+de+proceso+y+residuales.&source=bl&ots=O1qy_W3L7b&sig=6t8dL5vmSBhttRF75cMpRGYLVhc&hl=es&ei=LwtDSviZE8SFtgqqsWoCw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=5. [Consulta: 2011, Abril].

32. Rivas, M. G. (1978). *Tratamiento de aguas residuales*, (2^{da} Edición). Madrid, España: Ediciones vegas s.r.l.
33. Rodríguez R., Lisel M. y Rondón H., Haimar V. (2002) “*Determinación de las condiciones operativas y funcionales de la planta de tratamiento de efluentes de la nueva línea de producción de pigmentos inorgánicos de la empresa CAVENPI*”. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería. Valencia, Venezuela.
34. Rodríguez y Stelling, (2004) Propuestas de alternativas para la reducción de costos del tratamiento de aguas servidas industriales de la empresa BridgestoneFirestone de Venezuela C.A. Trabajo especial de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo; Valencia, Venezuela.
35. Romero R. Jairo A. (2002). *Purificación del agua*, (1^{ra} Edición). Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
36. Rosell; Matí C.; Salazar G., Lorena y Salazar, Roberto. (2009). “*Tratamiento de aguas residuales textiles mediante un biorreactor de membrana*”. Ingeniería y desarrollo, Núm. 26, pp. 83-89. Universidad de Norte. Colombia. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=85212233007&iCveNum=1223>
- 3
37. Sainz, Juan A. (1995). *Programa de formación medioambiental para consultores venezolanos*. Madrid.
38. Tamayo y Tamayo, M. (1996). *El proceso de la investigación científica*, (3^a Edición).
39. Terence J. (1999). *Abastecimiento de agua y alcantarillado, Ingeniería ambiental*, (6^{ta} Edición), Colombia: McGraw Hill.

40. The American Water Works Association, INC (1975). *“de calidad y tratamiento del agua*. New York: McGraw-Hill.

41. Varios autores (1998). *Funciones de Guardería y Control de los Recursos Naturales y el Ambiente de la Guardia Nacional de Venezuela*. Caracas: FUDENA.

CÁLCULOS TÍPICOS

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo utilizado para la obtención de los distintos resultados expuestos en el desarrollo experimental de las alternativas de tratamiento.

A.1. Cálculo del porcentaje de turbidez removido

Para el cálculo de este porcentaje se utilizó la siguiente ecuación, definida como:

$$\%Remoción = \left(\frac{T_I - T_F}{T_I} \right) \cdot 100 \quad (\text{Ec. A.1, Metcalf \& Eddy, 1996})$$

Donde:

T_I : turbidez inicial del efluente (NTU).

T_F : turbidez final del efluente (NTU).

Sustituyendo los valores obtenidos con la muestra 1 de la línea proveniente de inorgánicos tradicional (ver tabla 4.1), se obtuvo:

$$\%Remoción = \left(\frac{151,0 - 21,3}{151,0} \right) \cdot 100 = 89,7\%$$

Seguidamente se calculó el erro mediante:

$$\Delta R = \left(\left| \frac{\delta \%Remoción}{\delta T_I} \right| \cdot \Delta T_I + \left| \frac{\delta \%Remoción}{\delta T_F} \right| \cdot \Delta T_F \right) \cdot 100\%$$

Al derivar se obtuvo:

$$\Delta R = \left(\left| \frac{T_F}{(T_I)^2} \right| \Delta T_I + \left| \frac{-1}{T_I} \right| \cdot \Delta T_F \right) \cdot 100 \%$$

Sustituyendo los datos correspondientes, se tiene.

$$\Delta R = \left(\left| \frac{21,3}{(151,0)^2} \right| \cdot 0,1 + \left| \frac{-1}{151,0} \right| \cdot 0,1 \right) \cdot 100\% = 0,07\%$$

Reportando el valor:

$$\%Remoción = (89,67 \pm 0,07)\%$$

Lo mismo se realizó para los demás valores tanto de la línea de inorgánicos tradicional, como a la línea de inorgánicos continua y la de orgánico, los cuales res registraron en las tablas (4.2; 4.4 y 4.6) respectivamente.

A.2. Cálculo del % de biodegradabilidad

El cálculo de este parámetro se realizó utilizando el siguiente modelo matemático:

$$\%biodegradabilidad = \frac{DBO}{DQO} \cdot 100 \quad (\text{Ec. A.2, Metcalf \& Eddy, 1996})$$

Donde:

DBO: demanda bioquímica de oxígeno a la entrada del reactor (mg/L).

DQO: demanda química de oxígeno a la entrada del reactor (mg/L).

Sustituyendo los datos resultados de la caracterización para la entrada del reactor (Ver tabla 4.8.) se obtuvo:

$$\%Biodegradabilidad = \left(\frac{138}{1801} \right) \cdot 100 = 0,1\%$$

El cálculo del error no se cálculo debido a que los valores reportados en la caracterización no presentaron error. Este cálculo fue realizado de la misma manera para los datos de las caracterizaciones anteriores, los resultados fueron tabulados en la tabla 4.12.

A.3. Determinación de la Carga volumétrica

Este valor se obtuvo haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{DBO \cdot Q_R}{V_R} \cdot F_{C1} \cdot F_{C2} \quad (\text{Ec. A.3, López, 2009})$$

Donde:

C_v : carga volumétrica, $kgDBO/d \cdot m^3$

DBO: cantidad de materia orgánica biodegradable que entra al reactor, mg/L .

Q_R : caudal de entrada al reactor, L/s .

V_R : volumen del reactor, (1.012 m^3).

F_{C1} : factor de conversión, $10^{-6}kg/mg$.

F_{C2} : factor de conversión, 86400 s/d .

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación A.3, se obtuvo:

$$C_v = \frac{138 \text{ mg/L} \cdot 1,2086 \text{ L/s}}{1.012 \text{ m}^3} \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mg}} \cdot 86400 \frac{\text{s}}{\text{d}} = 0,0142 \frac{\text{kgDBO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

El cálculo del error no se realizó porque los datos provienen de una caracterización y no presentan error, por lo cual son considerados teóricos. El valor fue reportado en la tabla 4.10.

A.4. Cálculo del Factor de carga.

Este valor se determinó con el siguiente modelo:

$$\frac{F}{M} = \frac{DBO \cdot Q_R}{MLSS \cdot V_R} \cdot F_{C3} \quad (\text{Ec. A.4, Metcalf \& Eddy, 1996})$$

Donde:

$\frac{F}{M}$: factor de carga, d^{-1} .

MLSS: sólidos suspendidos totales del reactor, mg/L .

F_{C3} : factor de conversión, $10^{-3} \text{ m}^3/\text{L}$.

Sustituyendo los valores correspondientes, se obtuvo:

$$\frac{F}{M} = \frac{138 \text{ mg/L} \cdot 1,2084}{1.012 \text{ m}^3 \cdot 5930 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{L}} = 0,0056 \text{ d}^{-1}$$

El cálculo del error no se realizó ya que los datos provienen de una caracterización. El resultado obtenido se tabuló en la tabla 4.10.

A.5. Cálculo de la relación MLSSV/MLSS.

El cálculo de este parámetro se realizó con la ecuación:

$$\text{Relación MLSSV/MLSS} = \frac{MLSSV}{MLSS} \cdot 100 \quad (\text{Ec. A.5, Sainz, 2005})$$

Donde:

MLSSV: sólidos suspendidos volátiles del reactor (mg/L).

Sustituyendo los valores de la caracterización correspondientes al efluente del reactor (ver tabla 4.8.) se obtuvo:

$$\text{Relación MLSSV/MLSS} = \frac{2530}{5930} \cdot 100 = 42,7\%$$

El cálculo del error no se realizó porque los valores de la caracterización no presentaban error. Este cálculo fue realizado del mismo modo para los datos obtenidos de caracterizaciones anteriores.

A.6. Cálculo del tiempo de retención hidráulica

Este valor fue determinado utilizando el modelo que se describe a continuación:

$$\theta = \frac{V_R}{Q_R \cdot F_{C3}} \cdot F_{C4} \quad (\text{Ec. A.6, López, 2005})$$

Donde:

θ : tiempo de retención hidráulica, h.

F_{C4} : factor de conversión, 0,0002778 h/s.

Sustituyendo los datos correspondientes se obtuvo lo siguiente:

$$\theta = \frac{1.012 \text{ m}^3}{1,2084 \text{ L/s}} \cdot 1000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3} 0,0002778 \frac{\text{h}}{\text{s}} = 233 \text{ h}$$

El cálculo del error no se realizó debido a que los datos provenían de una caracterización. El valor fue reportado en la tabla 4.10.

A.7. Cálculo de la relación de nutrientes

El cálculo de este parámetro se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{kg}_i}{\text{día}} = \frac{i \cdot Q_{ER} \cdot F_{C1} \cdot F_{C2}}{\text{kg DBO} / \text{día}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. A.7, Parra, 2010})$$

Donde:

$\frac{\text{kg}_i}{\text{día}}$: kilogramos de nutrientes que entran al reactor por día, $\text{kg} / \text{día}$.

$\frac{\text{kg DBO}}{\text{día}}$: cantidad de DBO que entran al reactor por día, $\text{kg} / \text{día}$.

i : representa los distintos nutrientes que entran al reactor, mg / L .

Q_{ER} : caudal de efluente que entra al reactor, L / s .

Sustituyendo los valores correspondientes se tiene:

$$\frac{\text{kg DBO}}{\text{día}} = \frac{138 \frac{\text{mg DBO}}{\text{L}} \cdot 1,2084 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mg}} \cdot 86400 \frac{\text{s}}{\text{día}}}{14,4080 \frac{\text{kg DBO}}{\text{día}}} \cdot 100 = 100$$

Lo mismo se realizó para los kg de nitrógeno y fósforo por día, dando como resultado.

$$\frac{KgN}{día} = 0,007 = 7.10^{-3}$$

$$\frac{kg F}{día} = 18,145$$

El error no fue calculado ya que los datos proceden de la caracterización de un laboratorio externo, siendo considerado como un dato teórico. La relación fue reportada en la tabla 4.10.

A.8. Cálculo de la edad del lodo

El cálculo se realizó con la ecuación A.8, descrita como:

$$\theta_d = \frac{SS_R \cdot V_R \cdot F_{C1}}{(SS_C \cdot Q_C + SS_E \cdot Q_D) \cdot F_{C2} \cdot F_{C3}} \quad (\text{Ec. A.8, López, 2009})$$

Donde:

SS_R: sólidos suspendidos de reactor ($\frac{mg}{L}$).

V_R: volumen del reactor (m^3).

SS_C: sólidos suspendidos del clarificador secundario ($\frac{mg}{L}$).

Q_C: caudal del clarificador ($\frac{L}{s}$).

SS_E: sólidos suspendidos del espesador ($\frac{mg}{L}$).

Q_D: caudal del lodo desechado ($\frac{L}{s}$).

Sustituyendo los datos correspondientes en la ecuación A.8, y acotando que en la planta no existe lodo desechado; queda:

$$\theta_d = \frac{5930 \frac{mg}{L} \cdot 1012 m^3 \cdot 0,001 \frac{L}{m^3} \cdot 0,001 \frac{kg}{mg}}{198 \frac{mg}{L} \cdot 1,0713 \frac{L}{s} \cdot 86400 \frac{s}{día}} = 327,4501 \text{ días}$$

El cálculo del error no fue realizado debido a que los datos provienen de una caracterización y el volumen es un dato teórico.

A.9. Cálculo del promedio del oxígeno disuelto

El cálculo se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$\bar{O}_2 = \sum_{i=1}^n \frac{O_{2i}}{n}$$

Donde:

\bar{O}_2 : Promedio de los valores de oxígeno disuelto (mg/L).

O_{2i} : Valores de oxígeno disuelto (mg/L).

i: va desde 1 hasta n.

n: número de mediciones del oxígeno disuelto (14).

Sustituyendo los valores de la tabla 4.9 se obtuvo que:

$$\bar{O}_2 = \frac{5,73 + 4,87 + 4,40 + 4,63 + 5,60 + 4,23 + 2,83 + 3,07 + 4,33 + 4,37 + 4,00 + 5,23 + 3,68 + 5,69}{14}$$

$$= 4,475 \text{ mg/L}$$

El cálculo del error se realizó como la deriva de la ecuación anterior quedando

$$\Delta \bar{O}_2 = \left(\left| \frac{\delta \bar{O}_2}{\delta O_2} \right| \Delta O_2 + \left| \frac{\delta \bar{O}_2}{\delta n} \right| \Delta n \right)$$

Siendo Δn cero por ser n un a número entero, por lo tanto queda:

$$\Delta \bar{O}_2 = \left| \frac{n \Delta O_2}{n^2} \right| = \frac{\Delta O_2}{n}$$

Sustituyendo los valores correspondientes (ver tabla 4.10) se obtuvo un valor del error de:

$$\Delta \bar{O}_2 = \frac{0,03}{14} = 0,002$$

Reportando el valor como:

$$O_2 = (4,475 \pm 0,002) \text{ mg/L}$$

A.10. Cálculos estadísticos realizados a los parámetros de biodegradabilidad

Cálculo de la media

El cálculo se realizó mediante la ecuación A.10:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Donde:

\bar{X} : media de los valores del % de biodegradabilidad.

X: los valores del % de biodegradabilidad.

i: va desde 1 hasta n

n: número de parámetros obtenidos (7).

Sustituyendo los valores de la tabla 4.12, se tiene que:

$$\bar{X} = \frac{0,24 + 0,34 + 0,49 + 0,41 + 0,29 + 0,49 + 0,35}{7} = 0,3746 = 0,37$$

Cálculo de la desviación estándar

Este cálculo se realizó mediante haciendo uso de la ecuación A.11, descrita como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ : desviación estándar

Sustituyendo los datos de la tabla 4.12. respectivamente se tiene:

$$\sigma = \frac{(0,24 - 0,37)^2 + (0,34 - 0,37)^2 + (0,49 - 0,37)^2 + (0,41 - 0,37)^2 + (0,29 - 0,37)^2 + (0,49 - 0,37)^2 + (0,35 - 0,37)^2}{7 - 1} = 0,0939$$

= 0,09

El resultado se reportó en la tabla 4.14

Cálculo del error máximo

Este cálculo se realizó utilizando la ecuación A.12 siendo definida como:

$$E = \frac{K_{\alpha} \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

K_{α} : es el valor de la distribución normal estándar asociado al nivel de confianza (2,58 para 99% de confianza).

n: número de muestras.

Sustituyendo los datos en la ecuación anterior se tiene:

$$E = \frac{2,58 \cdot 0,095}{\sqrt{6}} = 0,10$$

Cálculo del tamaño muestral

Este cálculo se realizó con la ecuación A.13 siendo está la siguiente:

$$N = \left(\frac{K_{\alpha} \cdot \sigma}{2 \cdot E} \right)^2$$

Donde:

N: tamaño muestral.

Sustituyendo los datos correspondientes se obtuvo:

$$N = \left(\frac{2,58.0,095}{2.0,10} \right)^2 = 1,5000 = 2$$

El cálculo fue tabulado en la tabla 4.14.

Del mismo modo se realizaron los cálculos estadísticos para la relación de MLSSV/MLSS.

A.11. Determinación de los porcentajes de desviación de los parámetros de la caracterización con los límites máximos tabulados en el decreto 3219.

El cálculo se realizó utilizando la ecuación A.14 la cual se describe como:

$$\%desviación = \left(\frac{V_o - L_M}{L_M} \right) \cdot 100 \quad (\text{Ec. A.14, Matcalf \& Eddy, 1996})$$

Donde:

V_o : es el valor obtenido de la caracterización.

L_M : límite máximo del decreto 3219.

Sustituyendo los datos de la tabla 4.17 para el cromo en la ecuación A.14 se tiene que:

$$\%desviación = \left(\frac{5,47 - 0,05}{0,05} \right) \cdot 100 = 10840\%$$

No se calculo error ya que los datos fueron obtenidos de una caracterización y de referencia bibliográfica, este cálculo se realizó para todos los parámetros que se encontraban fuera de norma y para cada efluente caracterizado.

A.12. Determinación de la caracterización de referencia utilizada para proponer las alternativas.

El cálculo de las concentraciones para la caracterización de referencia se realizó un balance en componente obteniendo:

$$V_T \cdot X_T = V_{I1} \cdot X_{I1} + V_{I2} \cdot X_{I2} \quad (\text{Ec. A.15})$$

Donde:

V: volumen (L/s).

X: concentración de los parámetros (mg/L).

T: volumen o la concentración en el efluente unido.

I1: volumen o concentración en el efluente de inorgánico 1.

I2: volumen o concentración en el efluente de inorgánico 2.

Sustituyendo los valores de volumen de las tabla 4.15 y los valores de cromo de la tabla 4.16 se tiene:

$$X_T = \frac{2,3558 \text{ L/s} \cdot 5,47 \text{ mg/L} + 2,2800 \text{ L/s} \cdot 1,52 \text{ mg/L}}{(2,3558 + 2,2800) \text{ L/s}} = 3,53 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Los cálculos fueron realizados para todos los parámetros fuera de los valores límites fijados en el decreto 3219, el DQO y los sólidos suspendidos obtenidos de la caracterización trimestral, los resultados fueron tabulados en la tabla 4.18.

A.13. Determinación de la concentración de salida de las unidades de tratamiento

El cálculo de la concentración del efluente a la salida de la unidad de tratamiento se realizó mediante:

$$C_s = C_e \cdot \left(1 - \frac{\%remoción}{100}\right) \quad (\text{Ec. A.16, Metcalf \& Eddy, 1996})$$

Donde:

C_s : concentración del efluente de la unidad de tratamiento (mg/L).

C_e : concentración del afluente de la unidad de tratamiento (mg/L).

%remoción: remoción de la unidad de tratamiento (%)

Sustituyendo los datos de la tabla 4.20 para el cromo y coagulación floculación se tiene:

$$C_s = 3,53 \cdot \left(1 - \frac{50\%}{100}\right) = 1,76$$

El error no se calculo ya que los datos están asociados a caracterizaciones y valores bibliográficos, este procedimiento se realizó para todos los parámetros del afluente a las diferentes unidades de tratamientos para cada alternativa propuesta.

A.14. Determinación de los costos de la inversión inicial.

- **Cálculo de los activos tangibles.**

Este procedimiento comenzó con calcular los costos de los equipos los cuales vienen dado por:

$$C_{TE} = \sum N_E C_{CE} \quad (\text{Ec. A.17, Hernández 2008})$$

Donde:

C_{TE} : costo total de los equipos (BsF).

C_{CE} : costo de cada equipo (BsF).

N_E : número de equipos empleados.

Los costos de cada equipo fueron tabulados en la tabla 4.28 así como la cantidad utilizada de cada uno de ellos, obteniendo un costo total de:

$$C_T = 205105 \text{ BsF.}$$

Posteriormente se calcularon los costos asociados a instrumentación y control, tuberías y equipos eléctricos utilizando los siguientes valores; esto se realizó multiplicando el porcentaje por el valor del costo de equipo.

Tabla A.1. Porcentajes utilizados para calcular el costo de los activos tangibles.

Activo	Rango de porcentaje	Porcentaje seleccionado	Costo obtenido (BsF.)
Instrumentación y control	13%	13%	26664
Tuberías	15-25%	20%	41021
Equipos eléctricos	10-15%	12,5%	25638
Subtotal			93323
Total			298428

Como los costos deben estar asociados a BsF por año se utilizó la siguiente ecuación para su adecuación.

$$C_{A} = C_{AC} \cdot \frac{T_i}{1 - (1 - T_i)^{-N_a}} \quad (\text{Ec. A.17, Sullivan, 2004})$$

Donde:

CA_A : costo anual de un activo (BsF/año).

C_{AC} : costo del activo (BsF).

T_I : tasa de interés (8%).

N_A : número de años (20 años).

Sustituyendo el valor total de los activos tangibles en la Ec.A.17 se tiene:

$$CA_A = 298428 \cdot \frac{8\%}{1 - (1 + 8\%)^{-20}} = 30396 \frac{BsF.}{año}$$

- **Cálculo de los activos intangibles**

El cálculo de estos se realizó de igual manera que el anterior obteniendo:

Tabla A.2. Métodos utilizados para calcular el costo de los activos intangibles.

Activo	Método	Porcentaje seleccionado	Costo obtenido (BsF/año)
Servicios Ind.	55% C_{TE}	55% C_{TE}	11490
Estudios y proyectos	35% C_{TE}	35% C_{TE}	7312
Supervisión y entrenamiento	2-7% C_{TE}	5% C_{TE}	1045
Arranques pruebas y contingencias	Activos tangibles+ intangibles	Activos tangibles+ intangibles	4522
Total (BsF/año)			298428

El costo del capital fijo viene dado por la suma de los activos tangibles e intangibles, obteniendo un valor de:

$$Capital_{Fijo} = 54763 \frac{BsF}{año}$$

- **Capital de trabajo**

El capital de trabajo está conformado por el inventario de materia prima y el inventario de repuesto, este último se determinó como el 12,5% del costo de los equipos, mientras que el primero fue sacado por la cantidad consumida por el efluente.

Primero se cálculo el volumen de agua tratado por año según:

$$V_A = (V_{I1} \cdot TF_{I1} + V_{I1} \cdot TF_{I1}) \cdot F_{c4} \cdot D_L \quad (\text{Ec. A.18, Propia})$$

Donde:

V: volumen de agua (L).

T: tiempo de filtración (h)

F_{c4}: factor de conversión 4 (3600 s/h)

Los subíndices son:

A: tratado anualmente.

I1: inorgánico 1.

I2: inorgánico 2.

D_L: días laborables (269 días/año).

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior se tiene:

$$V_A = \left(2,2800 \frac{L}{s} \cdot 4 \frac{h}{d} + 2,3558 \frac{L}{s} \cdot 4 \frac{h}{d} \right) \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot 269 \frac{d}{año} \cdot \frac{m^3}{1000L} = 17957 \frac{m^3}{año}$$

Por otra parte se sabe que por cada litro de agua se utiliza 100 mg de coagulante y conociendo que el precio de coagulante es 10,20 BsF/Kg, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Costo de coagulante} &= \frac{100mg}{L} \cdot 17957 \frac{m^3}{Año} \cdot \frac{1000L}{m^3} \cdot \frac{g}{1000mg} \cdot \frac{kg}{1000g} \cdot 10,20 \frac{BsF}{kg} \\ &= 1796 \frac{BsF}{año} \end{aligned}$$

Lo mismo se realizó para la demás sustancia obteniendo como resultado:

Tabla A.3. Costos asociados a la inversión inicial

Parámetro	Costo obtenido (BsF/año)
Capital Fijo	54763
Capital de trabajo	44630
Inversión Inicial	99393

A.15. Determinación de beneficios.

Los beneficios son asociados al tratamiento de lodos los cuales son tratados por la cantidad de metales pesados en ellos, tratando 46 TM anuales por un costo de 1600 BsF/TM y por otra parte se podría tener una multa entre 50-5000 U.T por violar el vertido de residuos, utilizando un valor promedio el cual fue 2525 U.T por 76 BsF/U.T, obteniendo un beneficio de 265500 BsF/anual.

A.16. Determinar la relación costo-beneficio

$$C/B = \frac{I_i}{B} \quad (\text{Ec. A.19, Sullivan 2004})$$

Donde,

C/B: relación costo beneficio (Adim).

B: beneficio (BsF/año).

I_i: inversión inicial (BsF/año).

$$\frac{C}{B} = \frac{99393 \text{ BsF/año}}{265500 \text{ BsF/año}} = 0,37$$

APÉNDICE B

A continuación se presenta el decreto utilizado durante el desarrollo de este trabajo de grado.

NORMAS PARA LA CLASIFICACION Y EL CONTROL DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DEL LAGO DE VALENCIA

Gaceta Oficial N° 5305 Extraordinario del 1° de febrero de 1999

Decreto N° 3.219

13 de enero de 1999

RAFAEL CALDERA
PRESIDENTE DE LA REPUBLICA

En ejercicio de la atribución que le confiere el artículo 190, ordinal 10° de la Constitución y de conformidad con lo establecido en los artículos 19, 20 y 21 de la Ley Orgánica del Ambiente, 5° y 6° del Decreto N° 883 de fecha 11 de octubre de 1.995, publicado en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5.021 Extraordinario de fecha 18 de diciembre de 1995, en Consejo de Ministros,

CONSIDERANDO

Que es deber del Estado la protección de las cuencas hidrográficas, la clasificación y la regulación de la calidad de los cuerpos de agua y el control de los vertidos o efluentes líquidos capaces de degradar el medio acuático y alterar los niveles aptos, exigibles, para preservar y mejorar el ambiente,

CONSIDERANDO

Que la Comisión Nacional de Normas Técnicas para la Conservación, Defensa y Mejoramiento del Ambiente, a través del grupo técnico designado para tal fin, ha realizado una cuidadosa revisión de la situación de los cuerpos de agua considerados prioritarios para su manejo y control, estableciendo una jerarquización y encontrando que la cuenca del Lago de Valencia, debido a sus condiciones de desarrollo industrial y poblacional y al hecho de constituir el propio lago una cuenca endorreica y de inmenso potencial en cuanto al uso que pueda asignársele, debe ser objeto de una regulación técnico-normativa especial, que garantice adecuadamente la calidad de sus aguas,

CONSIDERANDO

Que existe la suficiente información técnica para abordar con rigor científico el diseño de normas para la clasificación de las aguas y el control de vertidos líquidos y llevar a cabo un plan maestro de manejo de la calidad y del nivel de las aguas en la cuenca del Lago de Valencia,

CONSIDERANDO

Que el crecimiento poblacional e industrial en la cuenca ha incrementado la demanda de agua para uso doméstico e industrial, la cual debe trasvasarse de otras cuencas, con el consiguiente aumento progresivo del nivel del Lago de Valencia y de la necesidad de controlar este nivel a través de la extracción y el trasvase de aguas de la Cuenca del Lago hacia otras cuencas.

DECRETA:

Las siguientes:

NORMAS PARA LA CLASIFICACION Y EL CONTROL DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DEL LAGO DE VALENCIA

CAPITULO I DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 1°.- Este Decreto establece la clasificación de las aguas del Lago de Valencia y sus tributarios y las normas para el control de la calidad de los vertidos líquidos a ellos descargados.

Artículo 2°.- A los efectos de este Decreto, la cuenca del Lago de Valencia comprende una porción del territorio nacional, ubicada en jurisdicción de los Estados Aragua y Carabobo, con una superficie aproximada de trescientos doce mil novecientos treinta y un hectáreas (312.931 ha), delimitada por una poligonal cerrada, definida por accidentes físicos naturales y por vértices expresados por coordenadas U.T.M. (Universal Transversa de Mercator), Huso 19, Datum La Canoa, los cuales se especifican a continuación:

Partiendo del Punto 1 de coordenadas N = 1.147.150,00 m, E = 662.700,00 m, ubicado en el pico Jengibre de Intersección de los límites de los Municipios Guacara y Puerto Cabello del Estado Carabobo y Girardot del Estado Aragua se sigue con Dirección Este por la divisoria de aguas pasando por el Pico Vigirima, Fila El Aguacate, Pico Periquito, Rancho Grande, Pico Guacamaya, Cerro Chimborazo, Fila Alta, Pico Palmarito, Topo El Guayabo, Pico Cambural, Pico La Negra, Topo El Cenizo, Mesa de Brasén, Pico Cogollal, llegando al Peñón de Gabante. Punto 2 de coordenadas N = 1.149.150,00 m, E = 681.080,00 m, se sigue por la división política entre el Estado Aragua y el Distrito Federal hasta el Pico Codazzi. Punto 3 de coordenadas N = 1.151.850,00 m, E = 685.080,00 m, cambiando dirección hacia el Sur y pasando por Capachal, Topo LLano Grande, Topo Los Pericos, Topo Carrizalito, Topo El Valle y Topo El Peñón, pasando por el centro del vértice Maletero de la Dirección de Cartografía Nacional de coordenadas N = 1.134.940,77 m, E = 686.900,10 m, se intercepta la Autopista Regional del Centro muy cerca del Distribuidor La Victoria.

Punto 4 de coordenadas N = 1.130.925,00 m, E = 685.350,00, siguiendo luego con rumbo variable pasando por la Fila La Palma y Topo Tamborón, hasta llegar al Topo Los Pavos se sigue hasta el

Cerro Cueva del Tigre. Punto 5 de coordenadas N = 1.118.980,00 m, E = 674.000,00 m, se sigue luego por la Fila El Tamarindo rumbo Sur-Oeste, Cerro El Hoyito y Fila Las Rosas. Punto 6 de coordenadas N = 1.112.000,00 m, E = 666.000,00 m, de aquí se pasa al Cerro El Calvario al Sur de Villa de Cura. Punto 7 de coordenadas N = 1.108.980,00 m, E = 667.000,00 m, se sigue luego con rumbo Sur-Oeste por la Fila Camejo hasta interceptar el límite entre los Estados Aragua y Carabobo y seguir luego la división política entre ambos estados rumbo Oeste hasta llegar al Pico El Horno. Punto 8 de coordenadas N = 1.108.480,00 m, E = 643.000,00 m, siguiendo con dirección Oeste la División entre los Parroquias Güigüe y Belén, luego por la división entre los Parroquias Tacarigua y Belén y luego la división entre los Parroquias Tacarigua y Negro Primero, todos del Estado Carabobo, se llega hasta la intersección con la Fila Toma Las Manos. Punto 9 de coordenadas N = 1.105.080,00 m, E = 618.850,00 m, siguiendo con dirección Sur-Oeste, esta última Fila pasando por El Cocuy y hasta el Cerro Jengibre. Punto 10 de coordenadas N = 1.096.650,00 m, E = 610.350,00 m, se sigue luego la división entre los Parroquias Negro Primero e Independencia hacia el Norte hasta interceptar el límite entre los Municipios Independencia y Miguel Peña en el Cerro Quelpa. Punto 11 donde se encuentra el vértice del mismo nombre de la Dirección de Cartografía Nacional de coordenadas N = 1.104.916,55 m, E = 608.183,14 m, de allí con rumbo Norte en línea recta hasta interceptar el Caño Paíto en el sitio conocido como el Desparramadero. Punto 12 de coordenadas N = 1.114.850,00 m, E = 609.000,00 m, siguiendo con dirección Nor-Oeste y atravesando la Autopista Valencia - Campo de Carabobo y la carretera de El Vigía hasta donde comienza la Fila Guacamaya. Punto 13 de coordenadas N = 1.123.000,00 m, E = 602.950,00 m, se sigue luego por esta Fila la divisoria de aguas pasando por los cerros La Manguita, Rincón de Tigre hasta el Cerro El Café. Punto 14 de coordenadas N = 1.135.800,00 m, E = 601.950,00m, de este punto se sigue con dirección Nor-Este atravesando la autopista Valencia - Puerto Cabello hasta interceptar la Fila Las Carpas en el Punto 15 de coordenadas N = 1.142.750,00 m, E = 604.200,00 m, de este último punto se sigue luego por la división entre los Municipios Valencia y Puerto Cabello, luego por la división entre los Municipios Guacara y Puerto Cabello hasta interceptar la división política entre los Estados Aragua y Carabobo en el Pico Jengibre o Punto 1 de origen.

Artículo 3º.- A los fines de este Decreto se entiende por:

Aguas anóxicas: Aguas sin oxígeno disuelto.

Aguas servidas: Aguas utilizadas o residuales provenientes de una comunidad, industria, granja u otro establecimiento, con contenido de materiales disueltos y suspendidos.

Bioacumulación: Proceso de acumulación progresiva de sustancias químicas en los tejidos de los seres vivos, a medida que se asciende en la cadena alimenticia.

Calidad de un cuerpo de agua: Características físicas, químicas y biológicas de aguas naturales que determinan su utilidad al hombre y demás seres vivos.

Carbono orgánico total (COT): Cantidad de carbono en los compuestos orgánicos de una muestra de agua. Como todos los compuestos orgánicos tienen carbono, se considera que las mediciones de carbono orgánico total dan una medida que permite estimar el grado de contaminación orgánica.

Carga másica de un efluente: Cantidad total de contaminante descargado por unidad de tiempo, la cantidad expresada en kilogramos o toneladas métricas y la unidad de tiempo en día o año.

Clorofila: Pigmento verde de las plantas que participa en el proceso de fotosíntesis, como receptor de la energía radiante. Siendo el pigmento principal en el fitoplancton, es frecuentemente utilizado como un indicador de la biomasa presente en las aguas.

Contaminación de las Aguas: Acción o efecto de introducir elementos, compuestos o formas de energía capaces de modificar las condiciones del cuerpo de agua superficial o subterráneo de manera que se altere su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica para el desarrollo de la vida acuática y ribereña.

Contaminación microbiana: Contaminación de las aguas por micro-organismos patógenos que son capaces de transmitir al hombre enfermedades mediante contacto directo o indirecto, bien a través del consumo del agua o a través del consumo de moluscos o mediante el baño en playas ribereñas y litorales. Como indicador de este tipo de contaminación se utilizan los micro-organismos del grupo coliforme

Contaminación orgánica: Contaminación de las aguas por materia orgánica, planteando una demanda de oxígeno al curso de agua receptor y afectando de esta manera el balance de oxígeno de éste.

Déficit de oxígeno disuelto: La diferencia entre el oxígeno disuelto de saturación y la concentración real de oxígeno disuelto en las aguas.

Demanda Bioquímica de Oxígeno, a los 5 días, 20°C (DBO_{5,20}): Cantidad de oxígeno requerido para estabilizar la materia orgánica en descomposición presente en el agua mediante acción bioquímica aeróbica, determinada a los 5 días de incubación a 20°C.

Epilimnio: Estrato superior de aguas menos densas, bien mezcladas, casi isotérmico, en un cuerpo de agua estratificado. En el caso de lagos estratificados térmicamente presenta temperaturas mayores que las de los estratos inferiores.

Eutroficación: El proceso de eutroficación de un cuerpo de agua puede definirse como el enriquecimiento de las aguas con nutrientes de plantas, acompañado de incremento de la producción biológica, típicamente manifestado por crecimiento excesivos de algas. Es un proceso natural, que puede ser acelerado drásticamente por la actividad del hombre.

Fitoplancton: Conjunto de organismos vegetales microscópicos, presentes en el medio acuático, que constituyen la base de la cadena trófica (productores primarios).

Hipolimnio: Estrato más profundo, relativamente no-perturbado, de aguas más densas, generalmente anóxicas, con poca iluminación, en un cuerpo de agua estratificado.

Nivel crítico de las aguas: Nivel del espejo de agua del Lago, expresado en metros sobre el nivel del mar, en exceso del cual se pueden causar daños económicos y sociales por inundación de las riberas del Lago.

Oxígeno Disuelto (OD): Oxígeno molecular que está disuelto en aguas naturales, aguas de desecho u otro líquido, usualmente expresado en miligramos por litro (mg/l) o en porcentaje de saturación.

Oxígeno disuelto de saturación: La cantidad máxima de oxígeno disuelto que un líquido de determinadas características químicas, en equilibrio con la atmósfera, puede contener a una temperatura y presión dadas.

Oxígeno disuelto crítico (Odc): Oxígeno disuelto (en mg/l) a mantener en un cuerpo receptor, según la clasificación de usos de las aguas que se haya hecho para ese tramo.

Plantas de Tratamiento de Propiedad Pública (PTPP): Un sistema de propiedad pública que recolecta, somete a tratamiento y conduce a un sitio de disposición final, aguas servidas de diversa procedencia.

Población Equivalente (PE): Población estimada que contribuiría con una cantidad determinada de un parámetro específico, indicador de contaminación ($DBO_{5,20}$ en el caso de contaminación orgánica, microorganismos coliformes en contaminación microbiana). Las conversiones de carga orgánica a PE se basarán en una contribución de 54 g de $DBO_{5,20}$ /persona/día, las de carga microbiana en número más probable per cápita por día de 200×10^9 coliformes.

Progresivas de un río: Distancias en kilómetros desde la desembocadura en el Lago de Valencia hasta un punto preseleccionado en éste, medida en kilómetros a lo largo de su cauce o canal.

Transparencia de las aguas medida con el disco Secchi: Promedio entre la profundidad a la cual un objeto convencionalmente conocido como el disco Secchi sumergido desaparece a la vista y la profundidad a la cual el mismo disco llevado más abajo de ese nivel y posteriormente elevado dentro de la columna de agua aparece nuevamente a la vista.

Vertido líquido: Descarga de aguas residuales que se realice directa o indirectamente a los cauces, mediante canales, desagües o drenajes de agua; descarga directa sobre el suelo o inyección en el subsuelo, descarga a redes cloacales, descarga al medio marino-costero y descargas submarinas.

CAPÍTULO II DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DEL LAGO DE VALENCIA

Artículo 4º.- A los efectos de este Decreto, se establece en este artículo el perfil de calidad de aguas a alcanzar en el Lago de Valencia, el cual resume las metas u objetivos a lograr en el Lago mediante la aplicación de estas Normas. El perfil queda definido en los términos deseados así:

1. Un Lago más oxigenado, donde los déficits de oxígeno disuelto (OD) sean progresivamente reducidos y, donde sea factible, eliminar los déficits completamente. Esta mejora de la situación de oxígeno disuelto del Lago ha de manifestarse de dos maneras:
 - 1.a. Una reducción de los fuertes déficits de OD existentes actualmente en las áreas costeras cercanas a las grandes descargas al Lago, de manera de elevar la concentración de OD en esas áreas y en general en el estrato superior o epilimnio del Lago a 5,0 mg/l o, expresado en porcentaje de saturación, un porcentaje mayor de 60.
 - 1.b. Un progresivo desplazamiento del hipolimnio hacia mayores profundidades, invirtiendo la tendencia actual, con la consiguiente reducción del estrato anóxico del Lago.
2. Una mayor variedad en la composición de la población del fitoplancton, reduciendo y eventualmente eliminando el predominio actual de las algas *verde-azules* (División Cyanophyta) y estimulando a otras Divisiones, más edibles para el zooplancton (haciendo de esta manera más eficiente a la cadena alimentaria), así como reduciendo otros efectos nocivos de las algas cianofitas.
3. Una reducción de los niveles de clorofila en el Lago hasta 12 $\mu\text{g/l}$, utilizando este parámetro como indicador de la biomasa de la comunidad fitoplanctónica.
4. El establecimiento de una ictiofauna estable de especies deseables, que promueva la pesca comercial y deportiva.
5. Aguas aptas sanitariamente para los diversos usos recreacionales de las mismas, tanto los de contacto humano parcial como total (balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva), de manera que se haga posible una promoción de estos usos.
6. Una reducción del contenido de sales disueltas de las aguas del Lago, de manera que se promueva el uso de éstas para fines de riego agrícola.
7. Un mejoramiento de la transparencia de las aguas, medida con el disco Secchi, hasta un mínimo de 2,0 metros.
8. Un mejoramiento general de la calidad de las aguas del Lago, de manera que se favorezca el uso indirecto de las mismas para fines de abastecimiento de agua potable, previo acondicionamiento.
9. Control del nivel del espejo de agua del Lago, de manera que no exceda el nivel de daños económicos y sociales en las riberas de éste, el cual según los estudios realizados es de 408,0 m.s.n.m.

Artículo 5°.- A los efectos de este Decreto, las aguas se clasifican en:

Tipo 1 Aguas destinadas al uso doméstico e industrial que necesiten agua potable, siempre que ésta forme

parte de un producto o subproducto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él.

Las aguas del Tipo 1 se desagregan en los Subtipos siguientes:

- Subtipo 1A** Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes.
- Subtipo 1B** Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de procesos de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración.
- Subtipo 1C** Aguas que pueden ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencionales.

Tipo 2 Aguas destinadas a usos agropecuarios.

Las aguas del Tipo 2 se desagregan en los Subtipos siguientes:

- Subtipo 2A** Aguas para riego de vegetales destinados a ser consumidos en crudo.
- Subtipo 2B** Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para fines pecuarios.

Tipo 4 Aguas destinadas a balnearios y deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia.

Las aguas del Tipo 4 se desagregan en los Subtipos siguientes:

- Subtipo 4A** Aguas para el contacto humano total.
- Subtipo 4B** Aguas para el contacto humano parcial.

Tipo 5 Aguas destinadas para usos industriales que no necesiten agua potable.

Tipo 6 Aguas destinadas a la navegación y a la generación de energía.

Artículo 6°.- Las aguas de la cuenca del Lago de Valencia se clasifican según su potencial de uso bajo los tipos siguientes:

Sector	Clasificación	Descripción
Todo el Lago de Valencia.	Tipo 1, Subtipo 1C. Tipo 2, Subtipo 2B. Tipo 4, Subtipo 4A. Tipo 4, Subtipo 4B. Tipo 5. Tipo 6.	Aguas que pueden ser acondicionadas por procesos de potabilización no convencionales. Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario. Aguas para el contacto humano total. Aguas para el contacto humano parcial. Aguas destinadas para usos industriales que no requieran de agua potable. Aguas destinadas a la navegación y a la generación de energía.
Tributarios del lago.	Según artículo 7° de las presentes normas.	

Parágrafo Unico: Esta asignación de usos se corresponde con los niveles de calidad deseados, los cuales se definen como metas para la determinación de los elementos de control y planificación necesarios.

Artículo 7°.- Las aguas de la red hidrográfica de la cuenca del Lago de Valencia se clasifican según su potencial de uso bajo los tipos siguientes:

Tributario	Tramo	Clasificación	Descripción	Observaciones
Río Los Guayos	Aguas arriba de R. San Diego y en este río. Aguas abajo de desembocadura de río San Diego.	Tipo 1, Subtipo 1A Tipo 4, Subtipo 4A Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes. Aguas destinadas a balnearios y deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Contacto humano total. Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	Se prevé el desvío del efluente de la Planta de Tratamiento de Los Guayos hacia la cuenca del río Paíto y embalse Pao-Cachinche (cuenca del río Pao).
Río Cabriales	Desde naciotes hasta Bárbula. Desde Bárbula hasta aguas arriba de Progresiva 28,9. Aguas abajo de Progresiva 28,9	Tipo 1, Subtipo 1A Tipo 2, Subtipo 2A. Tipo 2, Subtipo 2B. Tipo 1, Subtipo 1C	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes. Aguas destinadas para riego de vegetales destinados a ser consumidos en crudo. Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario. Aguas que pueden ser acondicionadas para consumo humano por procesos de potabilización no convencionales.	Se prevé el desvío de los colectores marginales de este río hacia la Planta de Tratamiento de La Mariposa, en la cuenca del río Paíto y embalse Pao-Cachinche (cuenca del río Pao). El drenaje natural será desviado hacia el río Paíto, hasta un caudal de lluvias predeterminado a partir del cual el río Cabriales aliviará hacia el Lago de Valencia. Al aplicarse estas previsiones las aguas del río tendrán como usos los que tienen o puedan tener el río Paíto y el embalse Pao-Cachinche.
Río Maruria (afluente del Caño Central).	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B. Tipo 1, Subtipo 1C	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario. Aguas que pueden ser acondicionadas para consumo humano por procesos de potabilización no convencionales.	Se prevé el desvío de las aguas de este río a la cuenca del río Paíto y embalse Pao-Cachinche (cuenca del río Pao). Al ocurrir esto sus aguas tendrán como usos los que tienen o puedan tener estos cuerpos de agua receptores.
Caño Central	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	
Río Güigüie	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	
Río Tocarón	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	

Tributario	Tramo	Clasificación	Descripción	Observaciones
Río Aragua	Aguas arriba de Progresiva 30,5. Aguas abajo de Progresiva 30,5	Tipo 1, Subtipo 1B. Tipo 2, Subtipo 2A. Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de procesos de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración. Agua para riego de vegetales destinados a ser consumidos en crudo. Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	Las aguas de este río son desviadas en dos puntos: a) En el sitio La Curia, con canal de aducción hasta el embalse Zuata; b) en el Dique Turmero-Aragua, con canal de aducción hasta el embalse Taiguaguay.
Río Turmero	Aguas arriba de su afluente el R. Guayabita y en este río. Aguas abajo de desembocadura de R. Guayabita.	Tipo 1, Subtipo 1B. Tipo 4, Subtipo 4A Tipo 2, Subtipo 2A. Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de procesos de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración. Aguas destinadas a balnearios y deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Contacto humano total. Agua para riego de vegetales destinados a ser consumidos en crudo. Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	Parte de las aguas de este río son desviadas hacia el embalse Taiguaguay en el Dique Cari-Cari, a través de un canal aductor.
Río Maracay	Aguas arriba del Parque Las Cocuizas. Aguas abajo de Parque Las Cocuizas.	Tipo 1, Subtipo 1A Tipo 4, Subtipo 4A Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes. Aguas destinadas a balnearios y deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Contacto humano total. Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	
Río Guey	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	Si van a ser usadas para riego de parques y jardines públicos, debe evaluarse el posible requerimiento de algún tipo de tratamiento.
Río Tapatapa o Limón	Aguas arriba de Estación Profauna (en El Limón). Aguas abajo de Estación Profauna.	Tipo 1, Subtipo 1B. Tipo 4, Subtipo 4A. Tipo 2, Subtipo 2A. Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de procesos de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración. Aguas destinadas a balnearios y deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Contacto humano total. Agua para riego de vegetales destinados a ser consumidos en crudo. Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	

Tributario	Tramo	Clasificación	Descripción	Observaciones
Río Mariara	Aguas arriba de Mariara. Aguas abajo de Mariara.	Tipo 1, Subtipo 1A. Tipo 4, Subtipo 4A. Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes. Aguas destinadas a balnearios y deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Contacto humano total. Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario	
Río Ereigue o San Joaquín	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	
Río Guacara	Aguas arriba de Vigirima. Aguas abajo de Vigirima.	Tipo 4, Subtipo 4B. Tipo 2, Subtipo 2A. Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas destinadas a balnearios y deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Aguas para el contacto humano parcial. Aguas destinadas para riego de vegetales destinados a ser consumidos en crudo. Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	
Quebrada Los Dividives	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	
Embalse Zuata	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B. Tipo 4, Subtipo 4B.	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario. Aguas destinadas a balnearios y deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Aguas para el contacto humano parcial.	
Embalse Taiguaiquay	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B. Tipo 4, Subtipo 4B.	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario. Aguas destinadas a balnearios y deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Aguas para el contacto humano parcial.	Se prevé el trasvase de aguas excedentes hacia el río Tucutunemo, previo tratamiento. Al ocurrir esto sus aguas tendrán como usos los que tiene o pueda tener este río.
Caño Maraca (afluente de Embalse Taiguaiquay)	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	
Caño La Minera (afluente de Taiguaiquay)	Todo el cuerpo de agua.	Tipo 2, Subtipo 2B.	Aguas para el riego de cualquier tipo de cultivo que no sean vegetales de consumo en crudo y para uso pecuario.	

Parágrafo Único: Esta asignación de usos se corresponde con los niveles de calidad deseados, los cuales se definen como metas para la definición de los elementos de control y de planificación necesarios.

Artículo 8°.- De conformidad con lo establecido en el Decreto N° 883 del 11 de octubre de 1995, publicado en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5.021 Extraordinario de fecha 18 de diciembre de 1995, el cual contiene las *Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos*, las características de calidad de las aguas para

cada tipo de uso asignado, son:

1. Aguas Subtipo 1A, límites y rangos:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (O.D.)	mayor de 4,0 mg/l. (*)
pH	mínimo 6,0 y máximo 8,5.
Color real	menor de 50, U Pt-Co.
Turbiedad	menor de 25, UNT.
Fluoruros	menor de 1,7 mg/l.
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor de 2000 NMP por cada 100 ml.
Clorofila	12 µg/l.
Transparencia de las aguas medida con el disco Secchi.	mínimo 2,0 m.

* Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 50%.

2. Aguas Subtipo 1B, límites y rangos:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (O.D.)	mayor de 4,0 mg/l. (*)
pH	mínimo 6,0 y máximo 8,5.
Color real	menor de 150, U Pt-Co.
Turbiedad	menor de 250, UNT.
Fluoruros	menor de 1,7 mg/l.
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor de 10000 NMP por cada 100 ml.

* Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 50%.

3. Las aguas de los Subtipos 1A y 1B no deberán exceder, además, los límites siguientes:

Elementos o compuestos	Límites

Elementos o compuestos	Límites
Aceites minerales	0,3 mg/l
Aluminio	0,2 mg/l
Arsénico total	0,05 mg/l
Bario total	1,0 mg/l
Cadmio total	0,01 mg/l
Cianuro total	0,1 mg/l
Cloruros	600 mg/l
Cobre total	1,0 mg/l
Cromo total	0,05 mg/l
Detergentes	1,0 mg/l
Dispersantes	1,0 mg/l
Dureza, expresada como CaCO ₃	500 mg/l
Extracto de carbono al cloroformo	0,15 mg/l
Fenoles	0,002 mg/l
Hierro total	1,0 mg/l
Manganeso total	0,1 mg/l
Mercurio total	0,001 mg/l
Nitritos + Nitratos (N)	10,0 mg/l
Plata total	0,05 mg/l
Plomo total	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sodio	200 mg/l
Sólidos disueltos totales	1500 mg/l
Sulfatos	400 mg/l
Zinc	5.0 mg/l

Biocidas	
Organofosforados y Carbamatos	0.1 mg/l
Organoclorados	0.2 mg/l

Radiactividad	
Actividad α	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l).
Actividad β	máximo 1,0 Becquerelio por litro (Bq/l).

4. Las aguas del Subtipo 1C son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
pH	entre 3,8 y 10,5.
Clorofila (*)	12 μ g/l.
Transparencia de las aguas medida con el disco Secchi. (*)	mínimo 2,0 m.

* Aplicable al Lago de Valencia solamente.

5. Las aguas del Subtipo 2A son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 1000 NMP por cada 100 ml.
Organismos coliformes fecales	menor a 100 NMP por cada 100 ml.
Nemátodos intestinales (Ascaris, Trichuris y Anquilostoma).	Promedio aritmético de huevos por litro, igual o menor que uno

6. Aguas Subtipo 2B, límites y rangos:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno Disuelto (OD)	3,0 mg/l mínimo.
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 5000 NMP por cada 100 ml.
Organismos coliformes fecales	menor a 1000 NMP por cada 100 ml.
Nemátodos intestinales (Ascaris, Trichuris y Anquilostoma).	Promedio aritmético de huevos por litro, igual o menor que uno
Clorofila (*)	12 µg/l.
Transparencia de las aguas medida con el disco Secchi. (*)	mínimo 2,0 m.

* Aplicable al Lago de Valencia solamente.

5. Las aguas de los Subtipos 2A y 2B no deberán exceder, además, los límites siguientes:

Elementos o compuestos	Límites
Aluminio	1,0 mg/l
Arsénico	0,05 mg/l
Bario	1,0 mg/l
Boro	0,75 mg/l
Cadmio	0,005 mg/l
Cianuro	0,2 mg/l
Cobre	0,2 mg/l
Cromo Total	0,05 mg/l
Hierro Total	1,0 mg/l
Litio	5,0 mg/l
Manganeso total	0,5 mg/l
Mercurio	0,001 mg/l
Molibdeno	0,005 mg/l
Níquel	0,5 mg/l

Elementos o compuestos	Límites
Plata	0.05 mg/l
Plomo	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sólidos disueltos totales	3000 mg/l
Sólidos flotantes	Ausentes
Vanadio	10,0 mg/l
Zinc	5,0 mg/l
Biocidas	
Organofosforados y carbamatos	0,1 mg/l
Organoclorados	0,2 mg/l

Radiactividad	
Actividad α	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l).
Actividad β	máximo 1,0 Becquerelio por litro (Bq/l).

8. Aguas Tipo 4A , límites y rangos:

Parámetro	Límite o rango máximo
Organismos coliformes totales	a) menor a 1000 NMP por cada 100 ml en el 90% de una serie de muestras consecutivas. b) menor a 5000 NMP por cada 100 ml en el 10% restante.
Organismos coliformes fecales	a) menor a 200 NMP por cada 100 ml en el 90% de una serie de muestras consecutivas. b) menor a 400 NMP en el 10% restante.
Clorofila. (*)	12 μ g/l.
Transparencia de las aguas medida con el disco Secchi. (*)	mínimo 2,0 m.

Parámetro	Límite o rango máximo
Moluscos infectados con <i>Schistosoma mansoni</i>	Ausentes.

* Aplicable al Lago de Valencia solamente.

9. Las aguas del Tipo 4B, límites y rangos:

Parámetro	Límite o rango máximo
Organismos coliformes totales	a) menor a 5000 NMP por cada 100 ml en el 80% de una serie de muestras consecutivas. b) menor a 10000 NMP en el 20% restante.
Organismos coliformes fecales	menor a 1000 NMP por cada 100 ml en la totalidad de las muestras.
Clorofila. (*)	12 µg/l.
Transparencia de las aguas medida con el Disco Secchi. (*)	mínimo 2,0 m.
Moluscos infectados con <i>Schistosoma mansoni</i>	Ausentes.

* Aplicable al Lago de Valencia solamente.

10. Las aguas del Tipo 4 deberán cumplir, además, con los límites siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (O.D.)	Mayor de 5,0 mg/l. (*)
pH	Mínimo 6,5 y máximo 8,5.
Aceites minerales	0,3 mg/l.
Detergentes	Menor de 1 mg/l.
Sólidos disueltos	Desviación menor de 33% de la condición natural.
Residuos de petróleo, sólidos sedimentables y flotantes.	Ausentes.
Metales y otras sustancias tóxicas	no detectable (**)
Fenoles y sus derivados	0,002 mg/l.

Biocidas	
Organofosforados y carbamatos	0,1 mg/l
Organoclorados	0,2 mg/l

Radiactividad	
Actividad α	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l).
Actividad β	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l).

* Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 60%.

** Según los métodos aprobados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.

11. Aguas Tipo 5, límites y rangos:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno Disuelto (OD)	3,0 mg/l mínimo.
Fenoles	Menor de 0,002 mg/l.
Aceites y espumas.	Ausente.
Sustancias que originen sedimentación de sólidos y formación de lodos.	Ausente.
Clorofila	12 μ g/l.
Transparencia de las aguas medida con el disco Secchi.	mínimo 2,0 m.

* Aplicable al Lago de Valencia solamente.

12. Las aguas del Tipo 6 son aquellas cuyas características corresponden a los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (OD)	mayor de 4 mg/l.
Sólidos flotantes y sedimentables o depósitos de lodos	concentraciones que no interfieran la navegación o la generación de energía.

Parágrafo Unico: A los efectos del control de la calidad de las aguas del Lago de Valencia y

tributarios, en el caso de que un mismo parámetro aparezca con límites distintos en los diversos usos asignados, bien al Lago o a un tributario determinado, se aplicarán límites más restrictivos en cada caso en que esto ocurra.

Artículo 9°.- De conformidad con lo dispuesto en el artículo 6° del Decreto 883 del 11 de octubre de 1995, publicado en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5.021 Extraordinario del 18 de diciembre de 1995, se aprueba el Plan Maestro para el Control y el Manejo de la Calidad de las Aguas de la Cuenca del Lago de Valencia para el logro de los objetivos de calidad fijados en la clasificación de usos establecida en estas normas.

El Plan estará disponible en el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables y en el mismo se identifican las acciones para prevenir y corregir los problemas de calidad de aguas del sistema del Lago de Valencia y de su red hidrográfica tributaria y se formulan conclusiones y recomendaciones para complementar el control de los vertidos establecido en estas Normas.

CAPITULO III DEL CONTROL DE LOS VERTIDOS LÍQUIDOS

Sección I De las actividades sujetas a control

Artículo 10. Las actividades que se someterán a la aplicación de este Decreto, de acuerdo a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de las Naciones Unidas, son las siguientes:

División	Agrupación	Grupo	Título
11	111	1110	Producción agropecuaria (bovinos, equino, granjas avícolas, granjas piscícolas y cultivos agrícolas intensivos).
		1111	Explotación porcina.
23	230	2302	Extracción de minerales no ferrosos.
29	290	2901	Extracción de piedra, arcilla y arena.
		2902	Extracción de minerales para fabricación de abonos y elaboración de productos químicos.
		2909	Extracción de minerales.
31	311	3110	Fabricación de productos alimenticios, excepto bebidas.
		3111	Matanza de ganado y preparación y conservación de carne.

División	Agrupación	Grupo	Título
		3112	Fabricación de productos lácteos.
		3113	Envasado y conservación de frutas y legumbres.
		3114	Elaboración de conservas de pescado, crustáceos y otros productos marinos.
		3115	Fabricación de aceites y grasas, vegetales y animales.
		3118	Fábrica y refinería de azúcar.
	312	3121	Elaboración de productos alimenticios diversos entre ellos: productos de molinería, pastas alimenticias y productos amiláceos.
		3122	Elaboración de alimentos preparados para animales.
	313	3131	Destilación, rectificación y mezcla de bebidas espirituosas.
		3132	Industrias vinícolas.
		3133	Fabricación de cerveza.
		3134	Industrias de bebidas no alcohólicas y agua gaseosa.
	314	3140	Industria del tabaco.
32	321	3211	Hilado, tejido y acabado de textiles. Fabricación de fibras textiles naturales y sintéticas.
	323	3231	Curtidurías y talleres de acabado.
		3232	Industria de la preparación y teñido de pieles.
34	341	3411	Fabricación de pulpa de madera, papel y cartón.
		3419	Fabricación de artículos de pulpa, papel y cartón. Industria de la madera.
35	351	3511	Fabricación de sustancias químicas industriales básicas, excepto abonos.
		3512	Fabricación de abonos y plaguicidas.
		3513	Fabricación de resinas sintéticas, materias plásticas y fibras artificiales, excepto el vidrio.

División	Agrupación	Grupo	Título
	352	3521	Fabricación de pinturas, barnices y lacas.
		3522	Fabricación de productos farmacéuticos y medicamentos.
		3523	Fabricación de jabones y preparación de productos de limpieza, perfumes, cosméticos y otros productos de tocador.
		3529	Fabricación de productos químicos no especificados y transformación de materiales y plásticos.
	354	3540	Fabricación de productos diversos derivados del petróleo y del carbón.
	355	3559	Fabricación de productos de caucho no especificados.
36	362	3620	Fabricación de vidrio y productos de vidrio.
	369	3692	Fabricación de cemento, cal y yeso.
38	381	3819	Fabricación de productos metálicos no especificados, exceptuando maquinaria y equipos.
	384	3843	Fabricación de vehículos (automóviles).
41	410	4101	Generación y transmisión de energía eléctrica, industria termoeléctrica.
63	632	6320	Hoteles.
71	711	7115	Transportes por oleoductos o gasoductos.
	712	7123	Servicios relacionados con el transporte por agua (Puertos).
	719	7192	Depósito y almacenamiento de hidrocarburos y sus derivados.
92	920	9200	Servicios de saneamiento y similares.
94	949	9490	Servicios de diversión y esparcimiento (urbanizaciones y clubes).
95	952	9520	Establecimientos de teñido y prelavado.
	959	9592	Laboratorios fotográficos, incluida la fotografía comercial.

Parágrafo Unico: Para otras actividades se aplicará supletoriamente lo contemplado en las Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos (Decreto N° 883 del 11 de octubre de 1995 publicado en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5.021 Extraordinario de fecha 18 de diciembre de 1995).

Artículo 11.- Quedan también sujetas a las disposiciones contenidas en este Decreto, las actividades que generen efluentes líquidos no incluidas en la lista del artículo anterior, que se señalan a continuación:

1. Actividades cuyos vertidos contengan elementos incluidos en el artículo 12.
2. Actividades cuyos vertidos superen una Población Equivalente (PE) de 1000 PE en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno ($DBO_{5,20}$) o $DBO_{5,20}$ mayor de 54 g/hab/día o que afecten desde el punto de vista sanitario áreas recreacionales o cuerpos de agua.
3. Las aguas servidas que, en su conjunto, en cada ciudad o población, tengan descargas que excedan el límite de 1000 PE en términos de $DBO_{5,20}$ o una $DBO_{5,20}$ mayor de 54 gr/hab/día.

Sección II

De la clasificación de los constituyentes de los vertidos líquidos

Artículo 12.- Los constituyentes de los vertidos líquidos se agrupan en dos categorías:

I.- **GRUPO I.-** Sustancias para las cuales existe evidencia teórica o práctica de su efecto tóxico, agudo o crónico:

1. Compuestos órganohalogenados y sustancias que puedan dar origen a compuestos de este tipo en el medio acuático.
2. Compuestos organofosfóricos.
3. Sustancias cancerígenas.
4. Mercurio y compuestos de mercurio.
5. Cadmio y compuestos de cadmio.
6. Aceites minerales persistentes e hidrocarburos derivados del petróleo, de lenta descomposición.
7. Metaloides, metales y sus compuestos de la siguiente lista:
Aluminio, Antimonio, Arsénico, Bario, Boro, Cobalto, Cobre, Cromo, Estaño, Molibdeno, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio, Telurio, Titanio, Uranio, Vanadio y Zinc.
8. Biocidas y sus derivados.
9. Compuestos organosilícicos tóxicos o persistentes.
10. Cianuros y fluoruros.
11. Sustancias radiactivas.
12. Sustancias sintéticas persistentes que puedan flotar, permanecer suspendidas o sedimentar perjudicando cualquier uso de las aguas.

II.- **GRUPO II.-** Sustancias o parámetros que aún cuando no se conozca de su efecto tóxico, agudo o crónico, generan condiciones en el cuerpo receptor que afectan la biota o perjudican cualquier

uso potencial de las aguas:

1. Aceites naturales e hidrocarburos degradables o poco persistentes.
2. Materia orgánica carbonácea expresada en términos de demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_{5,20}$) y demanda química de oxígeno (DQO).
3. Compuestos inorgánicos del fósforo y fósforo elemental.
4. Compuestos orgánicos no tóxicos del fósforo.
5. Compuestos orgánicos e inorgánicos del nitrógeno.
6. Cloruros.
7. Detergentes.
8. Dispersantes.
9. Sólidos suspendidos totales que no contengan elementos tóxicos.
10. Temperatura.
11. pH.
12. Parámetros biológicos.

Parágrafo Primero: Los límites del primer grupo deberán cumplirse, sin excepción, para todas las descargas al Lago de Valencia y la red hidrográfica tributaria, redes cloacales y para disposición directa sobre el suelo y el subsuelo. El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables determinará los límites para sustancias que no los tengan fijados, en función de los estudios que presente el administrado.

Parágrafo Segundo: Los límites del segundo grupo podrán ser modificados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Las modificaciones se ajustarán a las características del Lago de Valencia y se sujetarán a las restricciones que imponga su capacidad de asimilación, aplicando como criterio general que las descargas no alteren la calidad de las aguas definida por los parámetros que corresponden según el uso a que han sido destinadas en este Decreto.

Sección III

De los parámetros críticos de control

Artículo 13.- Se establecen como problemas prioritarios de calidad de aguas del Lago de Valencia los generados por la aceleración del proceso de eutroficación, la contaminación por materia orgánica, la contaminación microbiana, la contaminación tóxica y la contaminación por sales disueltas y sólidos en suspensión.

Artículo 14.- Se establecen como parámetros críticos de control del proceso de eutroficación del Lago al nitrógeno total y fósforo total en los vertidos o efluentes líquidos. Estos parámetros se registrarán por cargas máscas, en kilogramos por día (kg/d) o toneladas por año (ton/año).

Artículo 15.- Se establece como parámetro crítico de control de la contaminación orgánica en los vertidos o efluentes líquidos a la materia orgánica carbonácea expresada en términos de demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_{5,20}$). Este parámetro se registrará por cargas máscas, en kilogramos por día (kg/d) o en población equivalente (PE), aplicando el factor de conversión señalado en el artículo 3°.

Artículo 16.- Se establece como parámetro crítico de control de la contaminación microbiana en los vertidos o efluentes líquidos el grupo de organismos coliformes, el cual se expresará en población equivalente (PE), aplicando el factor de conversión indicado en el artículo 3°.

Artículo 17.- Se establecen como parámetros críticos de control de la contaminación tóxica.- a) los metales pesados, con prioridad los siguientes: Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Zinc (Zn), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg); b) los cianuros; c) los fenoles.

Artículo 18.- Se establece como parámetro crítico en el control de la contaminación por sales disueltas totales a los sulfatos.

Artículo 19.- Se establece como parámetro crítico en el control de la contaminación por sólidos en suspensión a los sólidos suspendidos totales (SST).

Sección IV

Del Nivel Crítico de las Aguas del Lago, para fines de Control

Artículo 20.- Se establece como nivel crítico del espejo de agua del Lago, para fines del diseño del control de los vertidos, la cota 408,00 metros sobre el nivel medio del mar.

Artículo 21.- A los efectos de impedir que se rebase el nivel crítico de las aguas del Lago establecido en el artículo 20, así como para coadyuvar al objetivo de renovación de las aguas del Lago señalado en el artículo 23, el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables promoverá, planificará, coordinará, evaluará y ejecutará programas y planes de desvíos de volúmenes de efluentes o vertidos líquidos, debidamente tratados, hacia cuencas vecinas, así como de extracción de otros volúmenes de aguas directamente del Lago mismo, tomando todas las previsiones que resulten aconsejables de los estudios que se realicen, para minimizar el impacto de las aguas trasvasadas a otras cuencas.

Artículo 22.- Las actividades económicas cuyos procesos contemplan el uso de agua como insumo prioritario o más abundante, deberán incorporar en sus diseños o en sus propuestas de adecuación la recuperación y reciclaje del agua, como técnica necesaria para reducir los caudales aportados al Lago.

Parágrafo Unico: En los programas de desarrollo para la Cuenca del Lago de Valencia se deberán incluir como prioritarios los que permitan la reutilización de las aguas servidas tratadas para fines compatibles con la calidad de los mismos, para evitar su ingreso al Lago.

Sección V

Acciones y directrices fundamentales para el saneamiento y recuperación del Lago de Valencia

Artículo 23.- La renovación de las aguas del Lago, a través de la extracción directa del Lago mismo

y preferiblemente desde el hipolimnio de éste, es una de las acciones necesarias para sanear al Lago. A los fines de obtener resultados en un lapso razonable, la extracción debe preverse en términos de $5,0 \text{ m}^3/\text{s}$ o más.

Artículo 24.- El Ejecutivo Nacional, en coordinación con las Gobernaciones de Estado y con las Alcaldías de los Municipios con jurisdicción en la cuenca del Lago y a través de los mecanismos legales y administrativos de que dispone, se ocupará de la gestión inherente al desarrollo de los sistemas colectores y de tratamiento requeridos para las aguas servidas de las ciudades y poblaciones existentes en la Cuenca del Lago de Valencia.

Artículo 25.- Los vertidos líquidos que vayan a ser descargados a través de los sistemas colectores públicos de la cuenca del Lago de Valencia a las Plantas de Tratamiento de Propiedad Pública en construcción a través del Proyecto MARNR-BID 557/OC-VE, deberán cumplir con los límites para descargar a redes cloacales.

Parágrafo Unico: Para el caso de la Demanda Bioquímica de Oxígeno y la Demanda Química de Oxígeno, el límite señalado en el artículo 38 podrá ser excedido siempre y cuando las Plantas de Tratamiento de Propiedad Pública tengan margen disponible para tratar la carga adicional involucrada.

Artículo 26.- Los efluentes de las Plantas de Tratamiento de Propiedad Pública que sean descargados al Lago de Valencia, deben cumplir con los límites establecidos en este Decreto para descargas al Lago.

Parágrafo Primero: En los casos de las Plantas de Tratamiento de La Mariposa y de los Guayos, en construcción y próximas a ser concluidas, cuyos efluentes tratados se ha previsto sean desviados hacia la cuenca del río Paíto y el embalse Pao-Cachinche, deberán garantizar a través de los sistemas de tratamiento secundario y terciario que las constituyen, la remoción de nitrógeno, fósforo, presencia de patógenos y demanda bioquímica de oxígeno (5 días, 20°C) al máximo alcanzable con la tecnología conocida y disponible, cumpliendo en todo caso con los requisitos técnicos acordados en el Convenio de Préstamo MARNR-BID. Asimismo, deberán complementarse con el acondicionamiento de la Laguna de El Paíto, para que funcione a manera de tratamiento de pulitura de los efluentes tratados de las mismas.

Parágrafo Segundo: En el caso de la Planta de Tratamiento de Taiguaiguay, cuyo efluente tratado será descargado al embalse Taiguaiguay, desde el cual será reutilizado para fines de riego agrícola, deberá cumplir con los requisitos técnicos del diseño a base de tratamiento secundario. En el caso de que se decida llevar a la práctica el trasvase previsto de las aguas excedentes del embalse Taiguaiguay hacia el río Tucutunemo, afluente del río Guárico, deberá someterse a las aguas a trasvasar al tratamiento adicional que determinen los estudios de factibilidad que el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables habrá de realizar previamente con este objeto.

Artículo 27.- Las industrias cuyos efluentes no estén empotrados a la red de cloacas públicas y posean sistemas de tratamiento que fueron diseñados y construidos, o estén en construcción, según

procesos de adecuación aprobados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables y, por lo tanto, están cumpliendo con los límites vigentes para descargas directas a cuerpos de agua, pueden optar por continuar descargando en la misma forma, manteniéndose dentro de los límites pautados en este Decreto.

Parágrafo Primero: En el caso de cada una de las industrias comprendidas en este artículo, que haya optado por continuar descargando en la forma autorizada, el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables deberá evaluar si la carga remanente que llega al Lago se encuentra dentro del margen asimilable por éste, en el caso de cada uno de los parámetros para los cuales se fijan en este Decreto límites de cargas máxicas.

Parágrafo Segundo.- En el caso de industrias comprendidas en este artículo o de proyectos de nuevas industrias, que opten por construir las obras necesarias para empotrar sus efluentes a una red de colectores cloacales que sea afluente de una de las Plantas de Tratamiento de Propiedad Pública (P.T.P.P.), el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables deberá revisar, en consulta con la administración de la P.T.P.P., si la Planta de Tratamiento involucrada tiene margen de capacidad para tratar el volumen y las cargas contaminantes adicionales que aporten el efluente correspondiente.

Parágrafo Tercero: En ningún caso se debe interpretar que estas Normas obligarán a las industrias a tratar sus aguas residuales en las Plantas de Tratamiento de Propiedad Pública. Se dará consideración a las propuestas de adecuación que presenten alternativas, con preferencia a las que incluyan minimización de aguas residuales como, por ejemplo, soluciones a base de reciclaje o reconversión industrial, las cuales se consideran más convenientes en pro de la calidad y del control del nivel de las aguas del Lago.

Artículo 28.- Los nuevos desarrollos urbanísticos y turísticos a ubicarse en la Cuenca del Lago de Valencia deberán contar con los sistemas de cloacas conectados a los colectores que lleven las aguas servidas a las Plantas de Tratamiento de Propiedad Pública, de lo contrario tendrán que disponer de tratamiento propio, debiendo cumplir con los límites establecidos en este Decreto.

Artículo 29.- Los desarrollo agropecuarios en la Cuenca del Lago de Valencia deberán contemplar medidas para reducir el empleo de plaguicidas y fertilizantes u otros químicos que puedan ser arrastrados al Lago o a sus tributarios así como sistemas colectores y de drenaje que permitan conducir las aguas a un tratamiento para su reutilización en actividades relacionadas con este rubro.

Sección VI

De las descargas al Lago de Valencia y a la red hidrográfica tributaria

Artículo 30.- A los efectos de este Decreto, se establece como carga límite de nitrógeno total en el Lago, la cantidad de 1.500 ton/año ($4,05 \text{ g/m}^2/\text{año}$ para una superficie del espejo de agua del Lago de 370 km^2), la cual no debe ser excedida por la suma de las descargas puntuales de nitrógeno total,

directas al Lago.

Artículo 31.- A los efectos de este Decreto, se establece como carga límite de fósforo total en el Lago, la cantidad de 111 ton/año ($0,3 \text{ g/m}^2/\text{año}$ para una superficie del espejo de agua del Lago de 370 km^2), la cual no debe ser excedida por la suma de las descargas puntuales de fósforo total directas al Lago.

Artículo 32.- A los efectos de este Decreto, se establece como carga límite de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), proveniente de la suma de las descargas puntuales al Lago, la cantidad de 25.000 Kg/día.

Artículo 33.- A los efectos de este Decreto, se establece como carga límite de micro-organismos del grupo coliforme, proveniente de la suma de las descargas puntuales al Lago, una Población Equivalente de 100.000 personas.

Artículo 34.- El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables velará porque las cargas límites establecidas en los artículos anteriores no sean excedidas por la suma de los efluentes puntuales que sean descargados al Lago.

Parágrafo Primero: A los efectos de este artículo, el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables llevará una contabilidad de las cargas máxicas descargadas al Lago en los parámetros críticos de control a los cuales se han asignado cargas límite en los artículos 30, 31, 32 y 33, comparando siempre con las cargas límite establecidas, dejando un margen de seguridad para permitir desarrollos futuros, a juicio del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.

Parágrafo Segundo: Si en la contabilidad a que se alude en el parágrafo anterior, el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables determina que se está excediendo la carga máxica límite establecida para alguno de los parámetros críticos, podrá tomar las medidas adicionales de control que estime necesarias.

Parágrafo Tercero: La autorización de nuevas actividades que impliquen descargas adicionales directas al Lago de Valencia en los parámetros críticos, estará sujeta a la disponibilidad de capacidad asimilable remanente, según lo determine el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables a la luz del presente artículo y de los artículos anteriores.

Artículo 35.- A los efectos del control de los sólidos suspendidos totales (SST) y los sulfatos, el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables promoverá, planificará, coordinará, evaluará y ejecutará programas y planes para la conservación de suelos, el control de la erosión, prácticas conservacionistas en los cultivos, y reforestación de las cuencas alta y alta/media del Lago de Valencia.

Parágrafo Unico: El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables podrá celebrar convenios con las autoridades estatales y municipales, así como con las empresas y particulares, para

la ejecución de los programas señalados en este artículo.

Artículo 36.- Sin perjuicio de los límites de cargas máxicas establecidas en este Decreto para los parámetros críticos de control, se fijan los rangos y límites máxicos de concentraciones en los vertidos líquidos que sean o vayan a ser descargados, en forma directa o indirecta, al Lago de Valencia y red hidrográfica tributaria, siguientes:

Parámetros Físico-Químicos	Límites máxicos o rangos
Aceites minerales e hidrocarburos	20 mg/l
Aceites y grasas vegetales y animales.	20 mg/l
Alkil Mercurio	No detectable (*)
Aldehidos	2,0 mg/l
Aluminio total	1,0 mg/l
Arsénico total	0,1 mg/l
Bario total	5,0 mg/l
Boro	5,0 mg/l
Cadmio total	0,1 mg/l
Cianuro total	0,1 mg/l
Cloruros	1000 mg/l
Cobalto total	0,05 mg/l
Cobre total	0,5 mg/l
Cromo total	2,0 mg/l
Cromo hexavalente	0,1 mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5, 20})	60 mg/l
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	350 mg/l
Detergentes	2,0 mg/l
Dispersantes	2,0 mg/l
Espuma	Ausente
Estaño	5,0 mg/l

Parámetros Físico-Químicos	Límites máximos o rangos
Fenoles	0,05 mg/l
Fluoruros	5,0 mg/l
Fósforo total (expresado como fósforo).	1,0 mg/l
Hierro total	10 mg/l
Manganeso total	2,0 mg/l
Mercurio total	0,01 mg/l
Níquel total	1,0 mg/l
Nitrógeno total (expresado como nitrógeno)	10 mg/l
pH	6 – 9
Plata total	0,1 mg/l
Plomo total	0,5 mg/l
Selenio	0,05 mg/l
Sólidos flotantes	Ausentes
Sólidos sedimentables	1,0 mg/l
Sólidos suspendidos	80 mg/l
Sulfitos	2,0 mg/l
Sulfatos	600 mg/l
Sulfuros	0,5 mg/l
Zinc	5,0 mg/l

Biocidas	
Organo fosforados y Carbamatos	0,25 mg/l
Organoclorados	0,05 mg/l

* Según los métodos aprobados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.

Radiactividad:

Actividad α	máximo 0,1 Bq/l.
Actividad β	máximo 1,0 Bq/l.

Parámetros Biológicos:

Organismos coliformes totales.	máximo 1.000 NMP/100 ml.
Organismos coliformes fecales.	máximo 200 NMP/100 ml.

Parágrafo Único: En ríos y quebradas de la cuenca, la variación de la temperatura media de una sección fluvial en la zona de mezcla, comparada con otra aguas arriba de la descarga del efluente líquido, no superará los 3°C.

Artículo 37.- El color no será un parámetro relevante y su control se centrará en los parámetros que dan la coloración y que están regulados en este Decreto.

Sección VII
De las descargas a redes cloacales

Artículo 38.- Sin perjuicio de las cargas máxicas establecidas en este Decreto para los parámetros críticos de control, se fijan los límites y rangos máxicos de concentraciones de los vertidos líquidos que sean o vayan a ser descargados a redes cloacales, siguientes:

Parámetros Físico-Químicos	Límites máxicos o rangos
Aceites minerales e hidrocarburos	20 mg/l
Aceites y grasas vegetales y animales	100 mg/l
Alkil Mercurio	No detectable (*)
Aluminio total	5,0 mg/l
Arsénico total	0,5 mg/l
Bario total	5,0 mg/l
Cadmio total	0,2 mg/l
Cianuro total	0,2 mg/l
Cobalto total	0,5 mg/l
Cobre total	0,5 mg/l
Cloruros	300 mg/l

Parámetros Físico-Químicos	Límites máximos o rangos
Cromo total	2,0 mg/l
Cromo hexavalente	0,5 mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5, 20})	350 mg/l
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	700 mg/l
Detergentes y/o dispersantes	8,0 mg/l
Fenoles	0,5 mg/l
Fósforo total (expresado como fósforo)	10 mg/l
Hierro total	25 mg/l
Manganeso total	10 mg/l
Mercurio total	0,01 mg/l
Níquel total	1,0 mg/l
Nitrógeno total (expresado como nitrógeno)	40 mg/l
pH	6 – 9
Plata total	0,1 mg/l
Plomo total	0,5 mg/l
Selenio	0,2 mg/l
Sólidos flotantes	Ausentes.
Sólidos sedimentables	100 mg/l
Sólidos suspendidos	400 mg/l
Sólidos totales	1.600 mg/l
Sulfatos	400 mg/l
Sulfuros	1,0 mg/l
Temperatura	Variación respecto a la temperatura de la cloaca receptora, en sitio de la descarga.- 5 °C
Vanadio	5,0 mg/l

Parámetros Físico-Químicos	Límites máximos o rangos
Zinc	5 mg/l

* Según los métodos aprobados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.

Biocidas	
Organo fosforados y Carbamatos	0,25 mg/l
Organo clorados	0,05 mg/l

Radioactividad:	
Actividad α	máximo 0,1 Bq/l.
Actividad β	máximo 1,0 Bq/l.

Artículo 39.- Las tarifas de servicios a ser fijadas por la futura Administración de las Plantas de Tratamiento de Propiedad Pública deberán ser establecidas dentro del marco de las disposiciones de la normativa ambiental vigente.

Sección VIII Del Control de Otras Fuentes Contaminantes

Artículo 40.- Se prohíbe:

1. El uso de sistemas de drenaje de aguas pluviales para la disposición de efluentes líquidos.
2. La descarga de desechos sólidos a los cuerpos de agua y a las redes cloacales.
3. La dilución de efluentes con agua limpia para cumplir con los límites establecidos en el presente Decreto.

Artículo 41.- Los efluentes líquidos generados en los rellenos sanitarios cumplirán con los rangos y límites establecidos en las Secciones VI y VII del Capítulo III de este Decreto.

CAPITULO IV DEL SEGUIMIENTO Y CONTROL

Sección I Del monitoreo de las aguas del Lago de Valencia y de la red hidrográfica tributaria

Artículo 42.- El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables promoverá, planificará, coordinará, evaluará y ejecutará un programa de monitoreo de la calidad de las aguas y de evaluación y medición de los sedimentos del Lago de Valencia y red hidrográfica tributaria, el cual

se ajustará a los criterios y las previsiones de la “Red Nacional de Calidad Ambiental”, en lo referente a calidad de agua y a las recomendaciones del Plan Maestro previsto en el artículo 9° de este Decreto.

Artículo 43.- El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables promoverá o celebrará convenios con las autoridades estatales y municipales, así como con las empresas y particulares, para garantizar el cumplimiento de programas de saneamiento y monitoreo de las aguas del Lago de Valencia y de la red hidrográfica tributaria.

Sección II

Registro de Actividades Susceptibles de Degradar el Ambiente

Artículo 44.- Las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, que se propongan iniciar cualquiera de las actividades contempladas en el artículo 10 de este Decreto, deberán inscribirse previamente en el Registro de Actividades Susceptibles de Degradar el Ambiente creado mediante Decreto N° 883 de fecha 11 de octubre de 1995, publicado en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5.021 Extraordinario de fecha 18 de diciembre de 1995. Asimismo, deberán inscribirse en el registro las empresas en funcionamiento a la fecha de publicación de este Decreto.

Parágrafo Primero: Se exceptúan del cumplimiento de lo señalado en este artículo, las empresas inscritas en el Registro de Actividades Susceptibles de Degradar el Ambiente llevado por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables con anterioridad a la fecha de publicación de este Decreto.

Parágrafo Segundo: Los responsables de las actividades sujetas a control por este Decreto, que realicen modificaciones en los procesos de las mismas, deberán suministrar la información, a los efectos de actualizar su registro.

Artículo 45.- Los interesados se inscribirán en el registro a que se refiere el artículo 44, llenando los datos que aparecen en la planilla y conforme al instructivo anexo a la misma, la cual estará a la disposición en las oficinas desconcentradas del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Una vez consignada la planilla, debidamente llena y cumplidos los requisitos exigidos en el mencionado instructivo, se le otorgará al administrado la correspondiente constancia de registro.

Parágrafo Unico: Las empresas ya inscritas en el registro y que no cuenten con la constancia correspondiente, podrán solicitarla ante las oficinas desconcentradas del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.

Artículo 46.- Los responsables de las actividades inscritas en el registro deberán presentar ante el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, la caracterización de sus efluentes, al menos una vez cada (3) meses. La misma debe ir acompañada de un registro diario del caudal de los efluentes.

Parágrafo Unico: Se exceptúan del cumplimiento de lo dispuesto en este artículo, a las actividades que se encuentran en proceso de adecuación conforme a lo señalado en el Capítulo V de estas Normas.

Artículo 47.- Los responsables de las empresas deberán mostrar la constancia de inscripción en el registro y de la caracterización o evaluación correspondiente, a las autoridades ambientales que por razones de vigilancia y control así lo requieran.

Artículo 48.- La información suministrada para los fines del registro será de carácter confidencial en lo relativo a la licencia industrial de producción, pero no así los datos concernientes al control de la contaminación de las aguas.

CAPITULO V DEL RÉGIMEN DE ADECUACIÓN

Artículo 49.- Las actividades en funcionamiento comprendidas en el listado previsto en el artículo 10, que para la fecha de publicación de este Decreto no hayan alcanzado los límites de descarga establecidos en las Secciones VI y VII del Capítulo III de este Decreto, deberán iniciar un proceso de adecuación a la normativa ambiental, atendiendo a los aspectos siguientes:

1. La ubicación de la actividad respecto a centros poblados y ecosistemas frágiles.
2. El uso actual y potencial del cuerpo de agua receptor.
3. El volumen, la periodicidad y las características físico-químicas, biológicas, considerando la presencia de compuestos o elementos potencialmente tóxicos de los efluentes.
4. Las limitaciones y restricciones de carácter técnico para la ejecución de las actividades de adecuación.
5. Las condicionantes financieras para el desarrollo del proceso de adecuación.
6. Las acciones o avances en materia de adecuación a la normativa ambiental en proceso de ejecución.
7. La reducción en la generación de vertidos o efluentes líquidos.

Artículo 50.- Los responsables de las actividades señaladas en el artículo anterior que no tengan aprobados cronogramas de adecuación o elaboradas sus respectivas propuestas de adecuación, presentarán ante la dependencia desconcentrada del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables correspondiente, una propuesta de términos de referencia. La propuesta incluirá:

- a) La descripción de la actividad, incluyendo la localización, insumos, tecnologías, procesos productivos, recursos humanos y servicios.
- b) La descripción de los equipos y procesos generadores de los efluentes.
- c) La propuesta, debidamente justificada, sobre los objetivos específicos, características,

alcances y condiciones del proceso de adecuación.

Parágrafo Primero: En los casos en que los responsables de las actividades señaladas en este artículo ya tengan formuladas sus propuestas de adecuación, las mismas podrán ser presentadas directamente para su evaluación ante el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, sin que sea necesaria la formulación de unos términos de referencia.

Parágrafo Segundo: Quienes a la fecha de publicación de estas Normas tengan aprobados cronogramas de adecuación de efluentes a las normas ambientales y que, por dificultades técnicas o financieras, no hayan concluido su ejecución, podrán solicitar ante el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables la revisión y reconsideración de los mismos. La solicitud contendrá, además de los recaudos establecidos en estas Normas, la justificación detallada de las circunstancias que la motivan.

Artículo 51.- El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables evaluará la propuesta y, en caso de no considerarla adecuada, lo comunicará al interesado para que éste efectúe las correcciones correspondientes y proceda, dentro de los treinta (30) días consecutivos siguientes, a la presentación de una propuesta definitiva de términos de referencia.

Artículo 52.- La propuesta definitiva de términos de referencia será evaluada por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables y en caso de ser aprobada fijará un plazo no mayor de treinta (30) días consecutivos para la presentación de una propuesta de adecuación de los efluentes.

Parágrafo Unico: El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables podrá, de acuerdo a cada situación y previa justificación, prorrogar el plazo para la presentación de la propuesta de adecuación de los efluentes.

Artículo 53.- Las propuestas de adecuación contendrán:

- a) La descripción de la actividad, incluyendo la localización, insumos, tecnologías, procesos productivos, recursos humanos y servicios.
- b) La descripción de los equipos y procesos generadores de los efluentes.
- c) La caracterización cuantitativa y cualitativa de los efluentes generados, o en su defecto los cálculos teóricos sobre los mismos.
- d) La información sobre las características cualitativas y cuantitativas del cuerpo de agua en el área de la descarga, de estar disponible.
- e) La descripción de las acciones de adecuación a la normativa ambiental en proceso de ejecución.

- f) Los datos disponibles sobre la rentabilidad de la empresa o sector que se estimen necesarios para la toma de decisiones sobre el proceso de adecuación.
- g) La propuesta de un paso definido para el traslado o clausura de la actividad ante la imposibilidad técnica o financiera para la adecuación a la normativa ambiental, de ser el caso.
- h) La propuesta sobre acciones a desarrollar presentadas de un modo cronológico con la indicación de sus fechas de ejecución y resultados esperados del proceso de adecuación.

Artículo 54.- Presentada la propuesta de adecuación de los vertidos líquidos el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables procederá a su evaluación y de ser procedente autorizará la continuación temporal de la actividad y fijará las condiciones, limitaciones y restricciones bajo las cuales ésta se desarrollará, mientras dure el proceso de adecuación a las normas técnicas complementarias de la Ley Penal del Ambiente.

Parágrafo Único: La autorización señalada en este artículo se otorgará con base en lo establecido en el artículo 21 de la Ley Orgánica del Ambiente. En este sentido, quienes se encuentren tramitando debidamente el proceso de adecuación o ejecutando sus respectivas actividades conforme a sus propuestas de adecuación de los efluentes, estarán cumpliendo con las Normas Técnicas complementarias de la Ley Penal del Ambiente establecidas por el Ejecutivo Nacional.

Artículo 55.- La propuesta de adecuación y la autorización correspondiente serán publicadas, por cuenta del administrado, en un diario de circulación regional en el área de influencia de la industria, a los efectos de informar a la ciudadanía y promover su participación en el seguimiento del proceso.

Artículo 56.- Cumplida la propuesta de adecuación, los interesados presentarán la caracterización de sus efluentes, conforme a lo establecido en el artículo 45 de estas Normas.

Artículo 57.- El incumplimiento de los plazos señalados en los artículos 51 y 52 de las propuestas de adecuación de los efluentes y de las condiciones, limitaciones y restricciones para el desarrollo de actividades mientras dura el proceso de adecuación, por causas imputables al administrado, dará lugar a la aplicación de las medidas de seguridad y preventivas establecidas en la Ley Orgánica del Ambiente, sin perjuicio de la responsabilidad penal establecida en la Ley Penal del Ambiente.

CAPITULO VI DISPOSICIONES FINALES Y TRANSITORIAS

Artículo 58.- El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, a solicitud de parte interesada, podrá otorgar constancias de cumplimiento de la normativa ambiental en materia de efluentes, a aquellas actividades inscritas en el registro que hayan presentado la caracterización correspondiente con resultados satisfactorios y a quienes hayan cumplido con su proceso de adecuación.

Artículo 59.- El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables podrá autorizar períodos de prueba para la operación inicial de procesos o de equipos para el control de efluentes. Esta autorización se otorgará conforme a lo establecido en el artículo 21 de la Ley Orgánica del Ambiente y su duración no excederá de un (1) año.

Artículo 60.- En casos de emergencia o de situaciones de vertidos imprevisibles en violación de estas normas, los responsables de la actividad lo notificarán al Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, a la brevedad posible y activarán los planes de contingencia a que haya lugar. Cuando se trate de paradas por mantenimiento, el interesado notificará al Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables con tres (3) meses de anticipación, a objeto de fijar las condiciones de operación y tomar las medidas que sean pertinentes

Artículo 61.- A los efectos de este Decreto, sólo estarán autorizados para realizar las caracterizaciones de los efluentes, los laboratorios inscritos en el Registro de Laboratorios Ambientales a que se refiere el artículo 41 del Decreto N° 883 de fecha 11 de octubre de 1995, publicado en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5.021 Extraordinario de fecha 18 de diciembre de 1995.

Artículo 62.- El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables y los responsables de las actividades generadoras de vertidos podrán suscribir convenios para la formulación y ejecución de programas dirigidos a la internalización del costo ambiental derivado de los efectos generados en el área de influencia de sus descargas.

Artículo 63.- El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, a los fines de lograr la participación de la comunidad, propiciará la creación de Juntas Asesoras Regionales y Locales para el seguimiento de la Calidad de las Aguas. Dichas Juntas estarán integradas por representantes designados por el Ministerio de Sanidad y Asistencia Social (Ministerio de la Salud, cuando comience a regir), por la Guardia Nacional, por los Ejecutivos Estadales, por las Alcaldías, por el Ministerio Público, por las corporaciones regionales de desarrollo, por las empresas encargadas de los servicios de distribución de agua y alcantarillado, por las Universidades, por la comunidad organizada, por las asociaciones de industriales y comerciantes y por los sindicatos.

Artículo 64.- El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables podrá practicar las visitas, inspecciones y comprobaciones que sean necesarias para verificar el adecuado cumplimiento de las disposiciones contenidas en estas Normas.

Artículo 65.- Los costos de las inspecciones y de las comprobaciones que deben ser realizadas con motivo de solicitudes presentadas por los administrados y durante el cumplimiento del proceso de adecuación, serán sufragados por los interesados mediante aportes a los Servicios Autónomos del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. A tales efectos se establecerán programas respectivos trimestrales, semestrales o anuales, donde se incluirán los costos pertinentes. En todo caso, se dará amplia participación a los administrados, responsables, sujetos a los procesos y a los cronogramas de adecuación, a los efectos de la internalización de los costos ambientales. De igual forma se podrán brindar talleres, por parte de funcionarios competentes del MARNR, a los

finés del alcance de los objetivos de orden público para la conservación, defensa y mejoramiento del ambiente, evitando degradaciones irreversibles al bien jurídico tutelado por la Ley Orgánica del Ambiente.

Artículo 66.- La Comisión Nacional de Normas Técnicas para la Conservación, Defensa y Mejoramiento del Ambiente creada por Decreto N° 2237 de fecha 30 de abril de 1992, procederá al término de cinco (5) años contados a partir de la fecha de vigencia de este Decreto, o antes si fuere necesario y conveniente, a una revisión y evaluación de sus disposiciones técnicas, a los efectos de su actualización, teniendo en cuenta la nueva realidad ambiental y socioeconómica de la cuenca hidrográfica del Lago de Valencia y en atención a la dinámica científica y técnica.

Artículo 67.- El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables hará la más amplia difusión de estas normas a través de las Asociaciones Gremiales, Cámaras de Industriales y Comerciantes, Asociaciones de Vecinos y demás Comunidades Organizadas interesadas en su cumplimiento, a fin de transmitir la importancia del control de los efluentes y vertidos líquidos capaces de degradar el medio acuático como una forma de preservar y mejorar la calidad de las aguas y por lo tanto de atender a la salud, el bienestar y la calidad de vida de la población humana y animal.

Artículo 68.- Para todo lo no previsto en el este Decreto, se aplicarán supletoriamente las Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos, Decreto N° 883 de fecha 11 de octubre de 1995 publicado en la Gaceta Oficial N° 5.021 Extraordinario de la República de Venezuela del 18 de diciembre de 1995.

Artículo 69.- El Ministro del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables queda encargado de la ejecución de este Decreto.

Dado en Caracas a los 13 días del mes de enero de mil novecientos noventa y ocho. Año 188° de la Independencia y 139° de la Federación.

APÉNDICE C

A continuación se presentan figuras bibliográficas utilizadas en el desarrollo de la investigación.

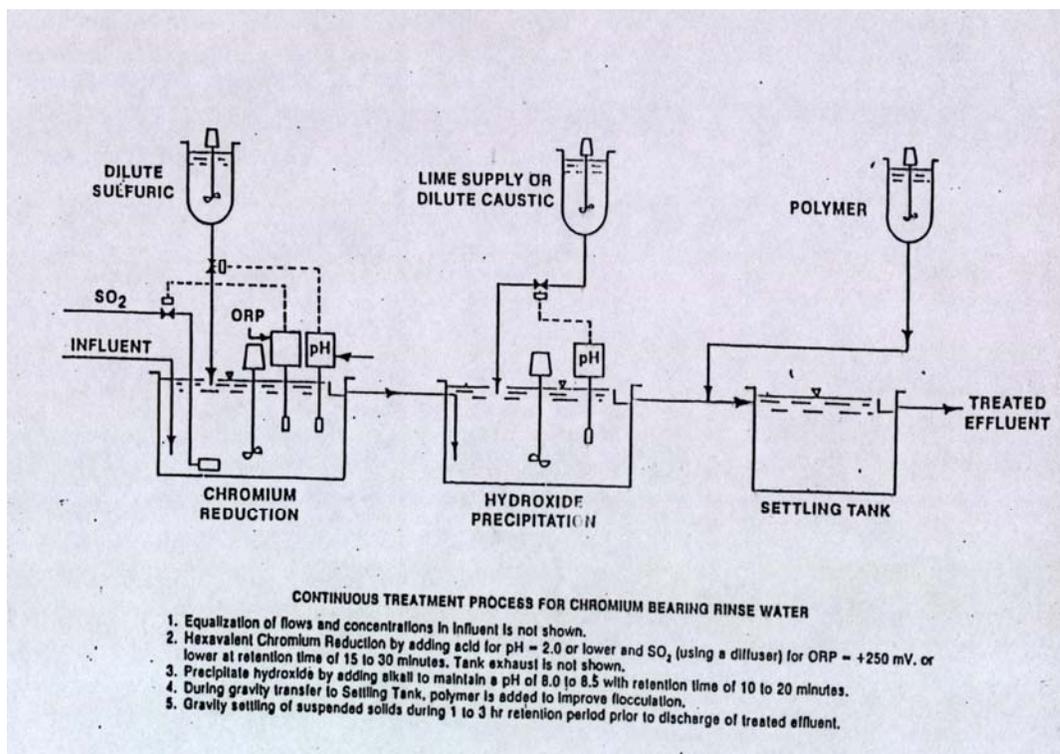


Figura C.1. Esquema de un proceso de tratamiento continuo para eliminar cromo

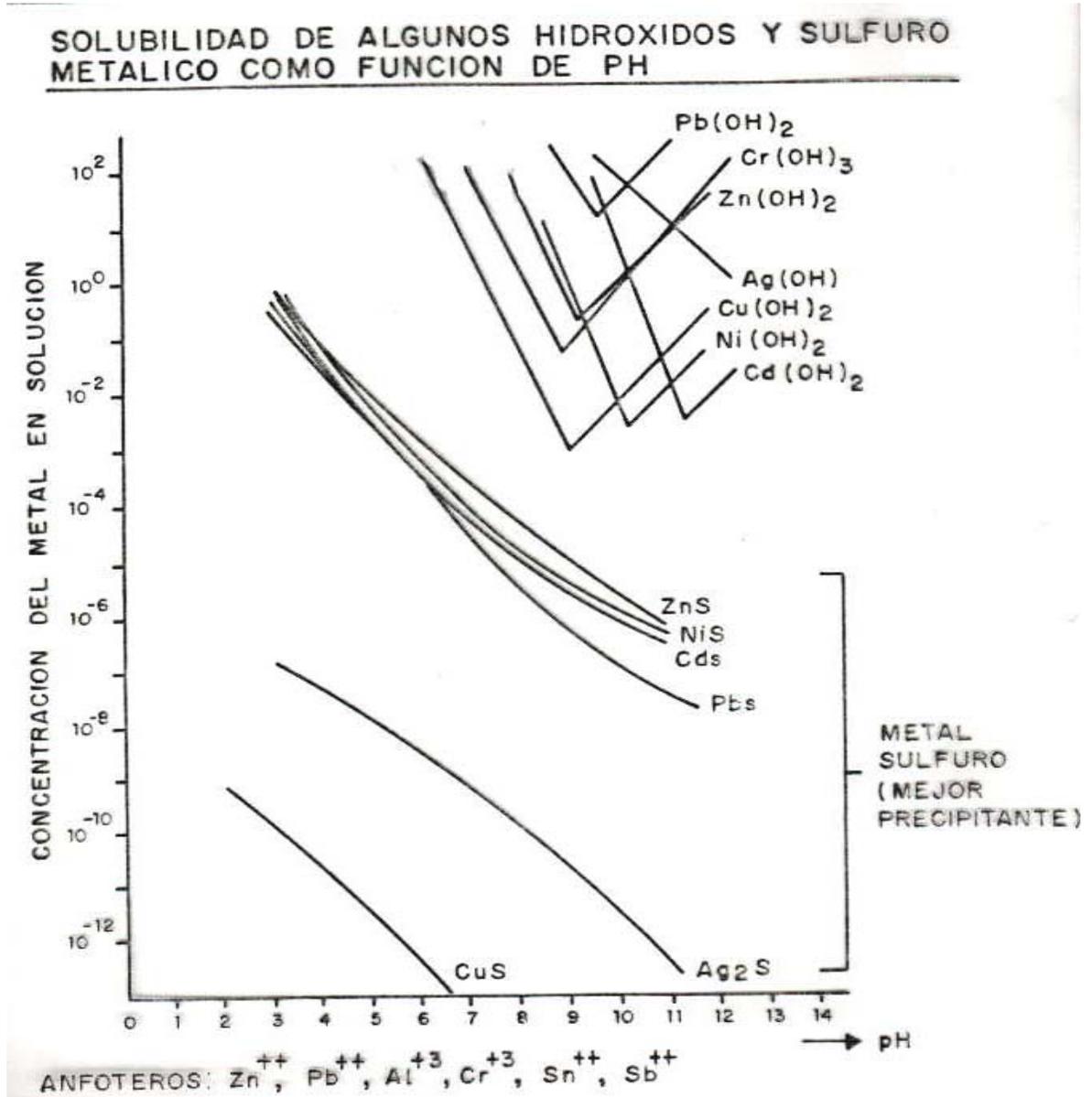


Figura. C.2. Curva de precipitación de los metales pesados como hidróxido y como sulfuro.

