

INFORME FINAL

LICITACIÓN PÚBLICA N° 1588-151-LE09

CONSULTORÍA DE APOYO A LOS PROCESOS DE
NORMAS AMBIENTALES EN SISTEMAS HÍDRICOS:

ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO
DE CONTAMINANTES EN RESIDUOS LÍQUIDOS

Para:
CONAMA

Preparado por:
Programa de Medio Ambiente
Fundación Chile

Marzo 2010



Tabla de Contenidos

1	Antecedentes	4
2	Tecnologías de Tratamiento de Efluentes	5
2.1	Búsqueda de Tecnologías de Tratamiento de Efluentes.....	5
2.1.1	Metodología de Búsqueda	5
2.2	Resultado para Tecnologías de Tratamiento de Efluentes.....	6
2.2.1	Tecnologías Convencional – Consolidadas	7
2.2.2	Tecnologías Emergentes	10
3	Evaluación Económica para Tecnologías de Tratamiento	12
3.1	Metodología de Evaluación de Estimación de Costos.....	12
3.2	Evaluación de Estimación de Costos	15
4	Entregables del Proyecto.....	17
4.1	Fichas Tecnológicas.....	17
4.2	Tablas	20
4.2.1	Tablas de parámetros versus tecnologías disponibles.....	20
4.2.2	Tablas de eficiencias, costos y aplicabilidad de las distintas tecnologías.....	21
5	Análisis Técnico-Económico	22
5.1	Tecnologías de Tratamiento para regular Temperatura.....	22
5.2	Tecnologías para remover Bromo	30
5.3	Tecnologías para remover THM.....	32
5.4	Tecnologías para remover Cloro libre residual	35
5.5	Tecnologías para Remoción de SST y Sólidos Sedimentables.....	36
5.6	Tecnologías para Remoción de Aceites y Grasas.....	45
5.7	Tecnologías para Remoción de Color Verdadero.....	48
5.8	Tecnologías para Remoción de AOX	51
5.9	Tecnologías para Remoción de DBO ₅	54
5.10	Tecnologías para Remoción de Nitrógeno	58
5.11	Tecnologías para Remoción de Fósforo.....	61
5.12	Tecnologías para Remoción de Mercurio	62

5.13	Tecnologías para Remoción de Índice de Fenol	64
5.14	Tecnologías para Remoción de Poder Espumógeno	66
6	Asesoría Técnica a CONAMA.....	67
7	Fuentes de Información	68

1 Antecedentes

El presente informe se enmarca dentro de lo establecido en el Decreto Supremo N° 93/95 del MINSEGPRES "Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad y Emisión" el que establece en su artículo 36°, que toda norma de calidad y de emisión será revisada a lo menos cada 5 años, siendo necesario requerir de estudios que den cuenta aspectos tales como, costos en inversión y operación de las tecnologías existentes y disponibles para el abatimiento de contaminantes en el agua, con el fin de identificar las tecnologías disponibles y los costos asociados a su implementación.

En este ámbito el Programa de Medio Ambiente de Fundación Chile postuló y se adjudicó la licitación N° 1588-151-LE09 "**Consultoría de apoyo a los procesos de normas ambientales en sistemas hídricos: Estimación de costos de abatimiento de contaminantes en residuos líquidos**" para desarrollar un estudio cuyo objetivo principal correspondió a "Estimar los costos de inversión, operación y mantención de abatir contaminantes en residuos líquidos (aguas servidas y Riles), según tecnologías de tratamiento existente en Chile y en el extranjero factibles de implementar y apoyar en estos temas a CONAMA en los procesos normativos que lleva a cabo". Las actividades realizadas se abocaron a los siguientes objetivos específicos:

- ❑ Identificación de las tecnologías de abatimiento existentes, a nivel nacional e internacional, en el agua dulce y marina.
- ❑ Elaboración de fichas técnicas por cada tecnología de abatimiento identificada, en total 34 fichas técnicas.
- ❑ Estimación de los costos de inversión, operación y mantención para cada tecnología de abatimiento existente para los parámetros: Temperatura, Bromo, Trihalometanos, Cloro Libre Residual, Sólidos Suspendedos Totales, Aceites y Grasas, Sólidos Sedimentables, Color verdadero, AOX, DBO₅, Nitrógeno total, Fósforo, Mercurio, Poder Espumógeno, Índice de Fenol.
- ❑ Elaboración de tablas resúmenes para la evaluación rápida de costos de abatimiento de parámetros en los residuos líquidos (aguas servidas y Riles), según tecnologías de tratamiento factibles de implementar en Chile.
- ❑ Prestación a CONAMA de asesorías técnicas sobre aspectos que tengan relación con costos y eficiencias de tecnologías de abatimiento, en el marco de los procesos normativos que ésta lleva a cabo, específicamente en normas de emisión de agua.

A continuación se muestran detalladamente cada uno de los resultados obtenidos.

2 Tecnologías de Tratamiento de Efluentes

Se presenta la metodología utilizada en la búsqueda de alternativas tecnológicas y los principales resultados obtenidos.

2.1 Búsqueda de Tecnologías de Tratamiento de Efluentes

Se realizó una amplia búsqueda de tecnologías existentes para establecer las alternativas presentes en el mercado mundial. La primera etapa se llevó a cabo a nivel nacional, en base de datos nacionales principalmente en documentos entregados por la contraparte, CONAMA, y en documentos encontrados en la base de datos de la SISS. Complementariamente se realizó una búsqueda nacional de proveedores de tecnologías que ofrecer servicios para tratamiento de agua.

A nivel internacional, la búsqueda se realizó en buscadores especializados como Matheo, CDerwent, EDerwent, Analyzer y Vantage Point y MDerwent, entre otros. A ello se sumó búsqueda de tecnologías emergentes en buscadores como Sciencedirect.com, Internet (portales especializados, noticias, redes sociales, blogs, motores de búsqueda, directorios, entre otras).

A continuación se detalla la metodología de búsqueda.

2.1.1 Metodología de Búsqueda

La estructura de la búsqueda de tecnologías fue la siguiente:

Title: (removal OR treatment OR braking down) AND Title: ("color") AND Title: ("waste water" OR "wastewater" OR "waste-water")
Timespan: 2000-2009.

La información recolectada fue analizada, clasificada y sistematizada en un excel, de acuerdo al siguiente orden:

- **Contaminantes o parámetros:** Temperatura, Bromo, Trihalometanos, Cloro Libre Residual, Sólidos Suspendidos Totales, Aceites y Grasas, Sólidos Sedimentables, Color verdadero, AOX, DBO₅, Nitrógeno total, Fósforo, Mercurio, Poder espumígeno, Índice de Fenol.
- **Tipo de tratamiento:** Convencional, No Convencional y Emergente; dónde los tratamientos Convencional y no Convencional se refieren a tecnologías disponibles a nivel industrial, es decir tecnologías establecidas. Por otra parte el término emergente se usó para aquellos desarrollos tecnológicos en proceso, como investigación científica aplicada a nivel laboratorio y piloto, no industrial.
- **País:** Chile o Internacional.
- **Clasificación General:** Biológico, Fisicoquímico, Químico, Físico, Electrofísico, Fisicobiológico, Transferencia de calor.
- **Tipo de tratamiento:** nombres generales de tipos de tecnologías como por ejemplo: adsorción, intercambio iónico, degradación biológica, oxidación, filtración, entre otras.

- **Tecnología.** Aquí se menciona el nombre de la tecnología.

En la Tabla n°1 se muestra una sección de la base de datos.

Tabla n°1: Tabla Base de Datos

Contaminantes	Tipo	País	Clasificación General	Tipo de tratamiento	Tecnologías
Aceites y Grasas	Convencional	Chile	Fisicoquímico	Aireación	Flotación por aire disuelto DAF
Aceites y Grasas	Convencional	Chile	Físico	Coagulación y floculación	coagulación seguida de precipitación química
Aceites y Grasas	Convencional	Chile	Físico	Filtración	Filtros empacados
Aceites y Grasas	Convencional	Chile	Físico	Separación	Separadores por gravedad
Aceites y Grasas	Convencional	Chile	Físico	Separación	Separación simple

A continuación se presentan las distintas tecnologías de tratamiento para los parámetros principalmente de Nitrógeno y Temperatura, considerando que varias de ellas son capaces de remover en forma simultánea DBO₅, Sólidos Suspendidos, Sólidos Sedimentables y Fósforo.

2.2 Resultado para Tecnologías de Tratamiento de Efluentes

Como resultado de la búsqueda de tecnologías de tratamiento de efluentes, se identificaron un total de 207 alternativas tecnológicas para los 15 parámetros definidos en la presente consultoría. De ellos se realizó una clasificación considerando que existen tecnologías capaces de remover en forma simultánea varios parámetros, obteniéndose de esta forma 57 tecnologías Convencionales o tecnologías establecidas y 29 tecnologías Emergentes. Finalmente, se reagruparon aquellas que representaban grandes similitudes, generándose un total de 34 fichas técnicas con sus respectivas evaluaciones económicas, cuyos resultados se muestran en los capítulos siguientes.

2.2.1 Tecnologías Convencional – Consolidadas

Las tecnologías convencionales, conocidas también como consolidadas, son aquellos desarrollos tecnológicos que ya se encuentran usados en diversas partes del mundo. Estos desarrollos, ampliamente usados, son continuamente optimizados para ser adaptables a nuevas aplicaciones demandantes del nivel industrial. El mercado en Chile de este tipo de tecnologías de tratamiento de aguas es versátil, y principalmente corresponden a compañías internacionales que poseen representación acá.

En la Tabla n°2 se muestra un extracto de las tecnologías y los parámetros que esta abate en forma directa e indirectamente.

Tabla n°2: Tecnologías y los parámetros que abate

N°	Tecnología	Remoción Directa	Remoción Indirecta
1	Adsorción con Carbón Activada	DBO ₅ , Compuestos Orgánicos (Hidrocarburos, Índice de fenol, Pesticidas, THM, AOX), Color, Sabor, Olor, Poder Espumógeno, Cloro Libre y bromo	Puede remover arsénico, metales pesados y eliminar agentes patógenos y bacterias
2	Adsorción con Diferentes Materiales	DBO ₅ , Índice de fenol, Color, SST, Sólidos Sedimentables	Mercurio, cadmio, plomo, arsénico
3	Tecnologías de Flotación por Aire Disuelto (DAF)	Sólidos Suspendidos Totales, Aceites y grasas	
4	Bekosplit con Aire comprimido	AyG, Hidrocarburos	SST y sólidos sedimentables
5	Coagulación y/o Floculación	SST, DBO ₅ , DQO, Nitrógeno, Fósforo, nutrientes, color, turbidez, Sólidos Sedimentables, cationes y aniones en general	Remueve Color y AOX, y además regula pH.
6	Coalescencia	Aceites y Grasas	SST, Sólidos Sedimentables, color verdadero e hidrocarburos
7	Biofiltros	Coliformes Fecales, DBO ₅ , Turbidez, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Suspendidos Volátiles, Nitrógeno, Fósforo, Color, Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Aceites y Grasas	
8	Lombrifiltros	Coliformes Fecales, DBO ₅ , Turbidez, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Suspendidos Volátiles, Nitrógeno y Aceites y Grasas	
9	Reactores Biológicos Secuenciales (SBR)	Compuestos Orgánicos, DBO ₅ y DQO, Nitrógeno, Fósforo, Sólidos Suspendidos Totales, Compuestos Refractarios, COD, Hidrocarburos Totales, Compuestos Fenólicos	Regulan condiciones de pH y temperatura.

INFORME FINAL

Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos

N°	Tecnología	Remoción Directa	Remoción Indirecta
10	Arrastre por aire (Air stripping)	THM, AOX, NH ₃ (amoníaco) e índice de fenol, compuestos orgánicos volátiles	Regulan condiciones de temperatura
11	Electrooxidación	Índice de Fenol, alcoholes, AOX, NH ₃ y precursores de THM	Agentes patógenos como E. Coli
12	Extracción por solvente	Compuestos orgánicos (bifenilos, policlorados, compuestos orgánicos volátiles, solventes halogenados y desechos del petróleo) y metales	
13	Skimmer	Aceites y Grasas e Hidrocarburos	
14	Filtros AMIAD	Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Disueltos, Color, Turbidez	
15	Pre-filtración	Elementos flotantes, grasas, trapos, ramas, arenas, etc	Puede reducir los SST y DBO ₅
16	Separadores por Gravedad	SST, Sólidos sedimentables	Aceites y grasas
17	Incineración catalítica	Compuestos orgánicos y volátiles como fenol	
18	Intercambio Iónico	Amonio, Nitrato, Boro, Arsénico, Color, Molibdeno, Mercurio y otros cationes y aniones	Conductividad, Salinidad, entre otras.
19	Procesos de Oxidación Avanzada, POAs	Índice de Fenol, color, AOX, compuestos orgánicos persistentes y precursores de THM	
20	Oxidación con Agua Supercrítica	Índice de Fenol, AOX, color, plaguicidas y precursores de THM.	
21	Oxidación con Aire Húmedo	Índice de Fenol, AOX, NH ₃ , CN- y precursores de THM.	
22	Depuración al Vapor/ Destilación	THM y color	
23	Nanofiltración	Desmineralizado, remoción de color, material orgánico y desalinización.	Color, turbidez, entre otros
24	Electrodialísis	Sólo remueve especies cargadas eléctricamente, como sales minerales, nitrato, fosfato, sulfato, entre otros.	

INFORME FINAL

Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos

N°	Tecnología	Remoción Directa	Remoción Indirecta
25	Osmosis Inversa	Sales como fosfato, nitrato, sulfato y iones metálicos, durezas, patógenos, turbidez, compuestos orgánicos sintéticos, THM, pesticidas y la mayoría de los contaminantes del agua potable conocidos	
26	Ultra y Microfiltración	Compuestos Orgánicos, índice de fenol, AOX, turbidez, Sólidos Suspendedos Totales (SST), sólidos Sedimentables, Agentes Patógenos como Giardia y Cryptosporidium, Color y Turbidez	Remueve índice de Fenol, AOX y pesticidas y parcialmente sales.
27	Intercambiador de Calor	Aprovechamiento del Calor	
28	Torres de Enfriamiento	Regulación de Temperatura	
29	Lagunas Aireadas	Compuestos Orgánicos, Nitrógeno, Fósforo, DBO ₅ , DQO, pH, compuestos refractarios y sólidos suspendidos totales.	Remueve Coliformes fecales, color, e índice de fenol y regular el pH y la temperatura.
30	Lodos Activados	DBO ₅ , DQO, Nitrógeno, Fósforo, Sólidos Suspendedos Totales	Regula pH, temperatura y en algunos casos además remueve Coliformes fecales, color e índice de fenol.
31	Reactor Anaeróbico	DBO ₅ , nitrito, nitrato, Fosfatos	Regula pH y temperatura.
32	Reactor Aeróbico de Lecho Fijo Sumergible (RALFS)	DBO ₅ – SST – Nitrógeno – Coliformes Fecales	Remueve Turbidez, Cloruros, Fósforo, Aceites y Grasas, y además regula pH.
33	Wetlands Artificiales	DQO, DBO ₅ , pH, Color, Turbidez, SST, Nitrógeno, Fósforo y color.	
34	Declaración usando dióxido de azufre	Cloro libre o cloro residual	

2.2.2 Tecnologías Emergentes

Las tecnologías emergentes corresponden a todos aquellos desarrollos tecnológicos que no han alcanzado la consolidación industrial, es decir, todas las iniciativas probadas a nivel laboratorio y piloto. Otra característica de las tecnologías emergentes es que suelen ser variaciones de las tecnologías clásicas, y suponen una mejora con alguna variante que resulta en una tecnología más costo-eficiente para una aplicación en particular.

A continuación se presentan agrupadas las líneas de desarrollo de las tecnologías emergentes destacadas en este estudio.

Adsorción

Dentro de las modificaciones usadas en los procesos de adsorción de contaminantes, destacan los siguientes:

1. Adsorción usando óxidos de calcio y magnesio
2. Adsorción usando cascarras de nuez
3. Adsorción usando carbón activado modificado con plata y aerogeles, con hidróxido de hierro granular, GFH
4. Usando carbón activado o con Fe(0)
5. Adsorción usando una mezcla de lodos y carbón como adsorbentes para la remoción de fósforo
6. Carbón activado como powered activated carbón (PAC), adsorción con xantato, adsorción con otros adsorbentes como: BHHc (bicarbonate), MHBB, Macrocycles Adsorption
7. Nanotubos comerciales modificados
8. Phoslock technology- bentonita modificada con lantano para remoción de fósforo
9. Zeolitas substituidas con alquil aminas terciarias, entre otras
10. ZEOTREAT
11. Intercambio iónico con resinas selectivas con amonio cuaternario o DA-201C

Aireación

En Aireación las mejoras se refieren a incluir algunos reactivos que mejoren la eficiencia del proceso, pero a menudo además incrementan los costos de implementación. Entre los destacados se encuentra:

- Flotación usando diferentes agentes surfactantes
- Separación mediante aeración superficial (air stripping modificado)

Coagulación y/o Floculación

En las técnicas de coagulación, floculación seguida de precipitación existe una amplia gama de reactivos químicos que se pueden utilizar. En esta categoría destaca el uso de sustancias naturales como el ácido húmico.

Degradación biológica

En degradación biológica los nuevos desarrollos tecnológicos apuntan a la obtención de degradación por vía enzimática, asilando y cultivando enzimas fuera de ambientes biológicos y aprovechar de este modo su gran capacidad de degradación específica, por ejemplo enzimas dehalogenizantes. Lo mismo ocurre con la utilización de biomasa de hongos.

Algunos ejemplos:

1. Bromato. in a denitrifying bioreactor supplemented with ethanol
2. Biológico usando bacterias mercurio-resistentes

Filtración

En filtración se han incorporado técnicas como filtración magnética, cuya novedad consiste en incorporar a los diseños clásicos material magnético como “Tierras Raras” que produce flujos magnéticos muy altos asegurando una mejor filtración. Este tipo de técnicas esta ahora en proceso de consolidación industrial.

Tecnologías químicas:

Como Electroquímica, Oxidación, Extracción por solvente son tecnologías cada vez menos usadas por sus altos costos en reactivos químicos, si bien estas tecnologías cuentan con la gran ventaja de su efectividad, muchas veces es difícil encontrarlas en el mercado industrial en usos masivos.

Algunos ejemplos son:

1. Oxidación seguida de volatilización del bromo. Bromide is oxidized by electrolysis to bromine and then the bromine apparently volatilized.
2. Reducción Química
3. Microemulsión
4. Fotodegradación con luz solar
5. Fotoeléctrica catalítica
6. Fotocatálisis heterogénea, la fototransformación y el fotodepósito de metales
7. Pre- tratamiento químico + tratamiento biológico (alkaline sulphide chemical + biological treatment)
8. Precipitación con sulfuros
9. Sonoquímica
10. Electroquímica
11. Irradiación de ultrasonido

Técnicas de Membrana

En las tecnologías de membrana los desarrolladas corresponden a variantes de los proceso clásicos, como nuevas membranas que tengan cualidades de mejor resistencia o variadas aplicaciones.

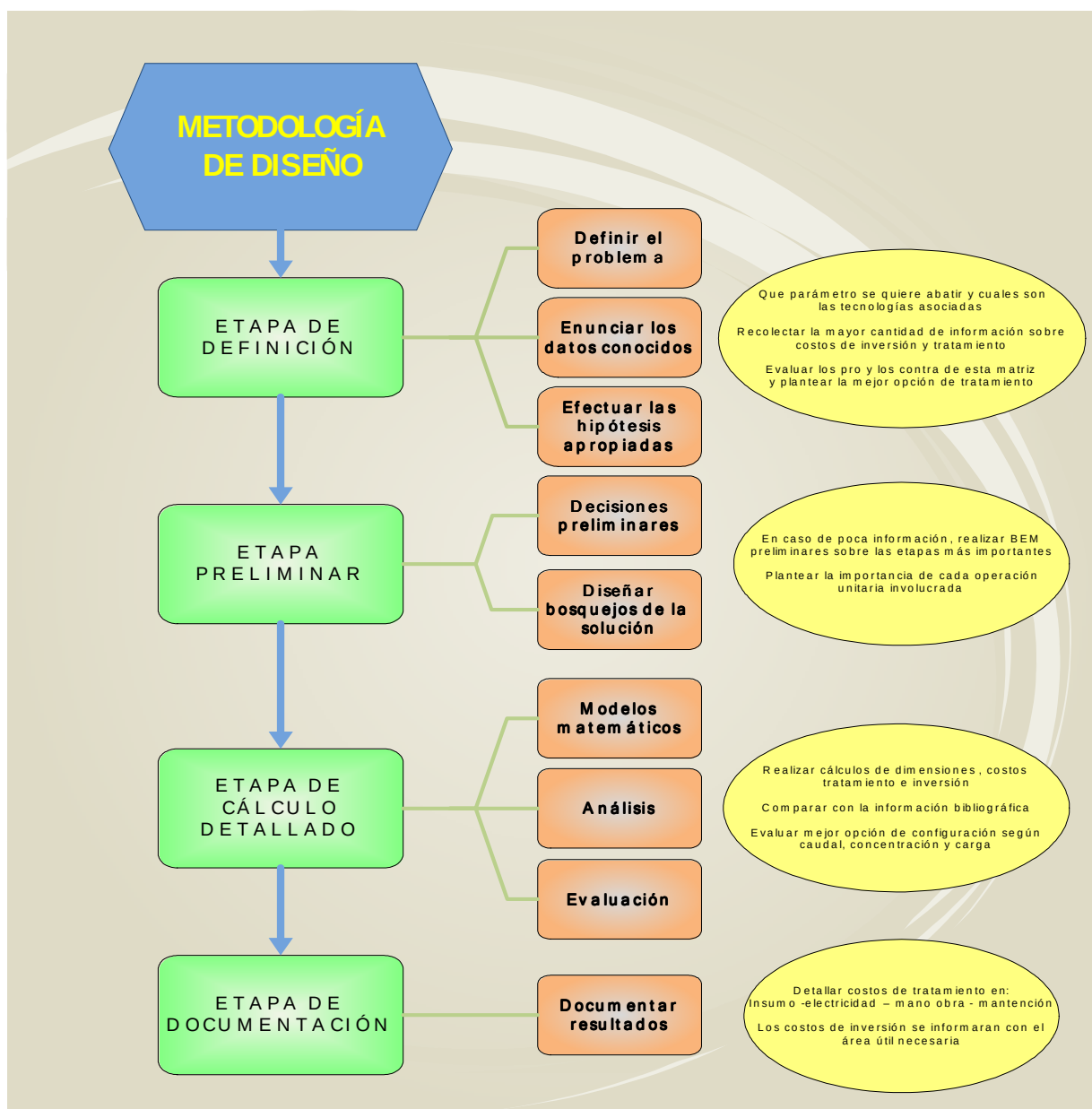
Algunos ejemplos son:

1. Quelación + ultrafiltración, Osmosis Inversa, Charged Ultrafiltración, Crossflow microfiltración
2. Nanofiltración con membranas comerciales NF200 y DS5
3. Membranas de osmosis inversa, con AFC99 membrane in tubular module B1, PCI, and the FT30 membrane in a spiral-wound element BW3040, FilmTec

3 Evaluación Económica para Tecnologías de Tratamiento

3.1 Metodología de Evaluación de Estimación de Costos

La siguiente metodología es la que se ha presentado en las reuniones sostenidas en CONAMA y es la que se ha comenzado a desarrollar para las evaluaciones de cada una de las tecnologías. La figura N° 1 describe los pasos básicos de evaluaciones de proyectos de ingeniería de diseño.



BEM: Balance energético y de masa

Figura 3.1.1: Ilustración de la Metodología de Diseño

INFORME FINAL

Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos

Etapas de definición:

En esta etapa se realiza un ordenamiento de la información recopilada para la confección de las fichas técnica de cada tecnología. El propósito de este orden es relacionar la tecnología y los parámetros de mayor remoción con el principal rubro industrial. Esta asociación permite definir condiciones de borde con respecto al caudal y concentración de entrada al sistema de tratamiento.

TECNOLOGÍA	RUBRO (CIU)	PARÁMETROS	CAUDAL	CONCENTRACIÓN	COSTOS ASOCIADOS

Etapas Preliminar:

Etapas en la cual se concreta la matriz planteada y se completa la información faltante mediante búsqueda especializada y balances de masa y energía en las operaciones unitarias más importantes del tratamiento. Por otro lado, la información se obtiene por medio de cotización telefónica y/o por correo electrónico a los proveedores más importantes de cada tecnología.

Obtenida la información necesaria se define las condiciones de borde (caudal, concentración y carga) de cada tecnología para acotar la evaluación a escenarios reales y que actualmente se están utilizando en Chile y en el mundo.

Etapas de cálculo detallado

El capital total necesario para la instalación de una industria esta compuesto de dos componentes principales:

- ❖ **Capital fijo:** referente a las inversiones necesarias para que la planta quede en condiciones de operar.
- ❖ **Capital de trabajo:** es aquel que se necesita para que la planta ya instalada pueda operar.

Para determinar el monto de las inversiones en capital fijo existen varios procedimientos que se clasifican en cinco categorías:

1. Estimación de orden de magnitud (30 – 60%)
2. Estimación preliminar para estudios de pre factibilidad (20 – 30%)
3. Estimación para preparar presupuestos (10 – 20%)
4. Estimación definitiva (5 – 10%)
5. Estimación detallada (3 – 5%)

Para este estudio se utiliza el tipo de estimación de magnitud, por ser de tipo rápido, que utiliza costos totales de plantas re actualizados. El nivel de esta estimación es preliminar, la cual da una idea del nivel de inversión total. El grado de exactitud de este método es del 30 – 60%, considerada adecuada ya que la información requerida es para tener una aproximación de los costos de inversión necesarios según sea el caso, tomando en cuenta el tiempo requerido para cumplir con todas las tecnologías.

Aplicando las relaciones de índice de costos y las del factor de Williams se puede estimar fácilmente el costo de inversión, según la relación que se presenta a continuación:

INFORME FINAL

Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos

$$C_A = C_B \times R_I \times R_V$$

En donde:

C_A : Costo de la planta A (que se desea conocer)

C_B : Costo de planta B (cuya información se conoce)

R_I : relación de índices de costos

$$R_I = \frac{I_A}{I_B}; \text{ Donde } I_A-I_B: \text{ índice fecha actual y a la fecha indicada para B respectivamente}$$

R_C : Relación de capacidades

$$R_C = \left(\frac{X_A}{X_B} \right)^n; \text{ Donde } X_A-X_B-n: \text{ capacidad equipo A y B. y n; factor de Williams}$$

Por lo general el exponente de Williams se estima en $n=0.6$. Para el caso en que las plantas cuenten con unidades múltiples de tratamiento, $n=0.8$ a 1.0 . Cuando se trate de plantas piloto, se utilizará $n=0.3$ a 0.5

Para obtener los costos de tratamiento de cada tecnología se ha comenzado con información de costos típicos en fuentes de información como lo es la página www.seia.cl y a través de cotizaciones o consultas directas a proveedores del tratamiento.

De ser estrictamente necesario, para los casos en que se obtenga nula o poca información, se realizarán balances de masa y energía a las operaciones unitarias más importantes involucradas en el proceso, con lo cual se determinará un precio o costo aproximado de tratamiento.

El desglose del costo de tratamiento, en Insumos, Mantención y Operación se realiza en base a relaciones porcentuales informadas en bibliografía especializada de ingeniería de procesos.

Insumo: involucra materias primas y suministros. Esto equivale entre un 80 a 90% de costo.

Operación: referido principalmente al personal involucrado en el tratamiento, 9 – 17%

Mantencion: se estima entre un 3 a 5% del costo físico de la planta. Lo que significa entre un 1 a 3% del costo de tratamiento.

Para la obtención de funciones de costos de tratamiento provendrá a través de expresiones simples de costos de producción y de economía de escala, informada en bibliografía especializada de evaluación económica de procesos industriales.

Se realizan correlaciones: lineal, exponencial, logarítmica y potencial y se selecciona aquella que arroje la mejor correlación (generalmente mayor de 0.9).

Etapa de documentación

Se compila la información de entrada, los cálculos realizados y un análisis detallado por cada tecnología que describe las consideraciones más importantes para la estimación económica de inversión y tratamiento extrapolada con las funciones de costos obtenidas.

3.2 Evaluación de Estimación de Costos

Las planillas corresponden a las evaluaciones de estimación de costos de las tecnologías correspondientes a las que a continuación se listan y se adjuntan en el anexo N° 4

1. Carbón Activado
2. Adsorción con diferentes materiales
3. Flotación por Aire disuelto (DAF)
4. Bekosplit
5. Coagulación y/o Floculación
6. Coalescencia
7. Biofiltros
8. Lombrifiltros
9. Reactores Biológicos Secuenciales (SBR)
10. Arrastre por aire (Air Stripping)
11. Electrooxidación
12. Extracción por Solvente
13. Skimmer
14. Filtros AMIAD
15. Prefiltración
16. Sedimentación natural y acelerada
17. Incineración Catalítica
18. Intercambio Iónico
19. Oxidación Avanzada Catalítica, POAS
20. Oxidación con agua Supercrítica
21. Oxidación con Aire Húmedo
22. Destilación
23. Nanofiltración
24. Electrodialisis
25. Osmosis Inversa
26. Ultrafiltración
27. Intercambiador de Calor
28. Torres de Enfriamiento
29. Lagunas Aireadas
30. Lodos Activados
31. Reactor Anaeróbico
32. Reactor Aeróbico de Lecho Fijo Sumergible (RALFS)
33. Wetlands Artificiales
34. De-cloración

A continuación se muestra un ejemplo de cómo serán mostrados los resultados de la evaluación económica.

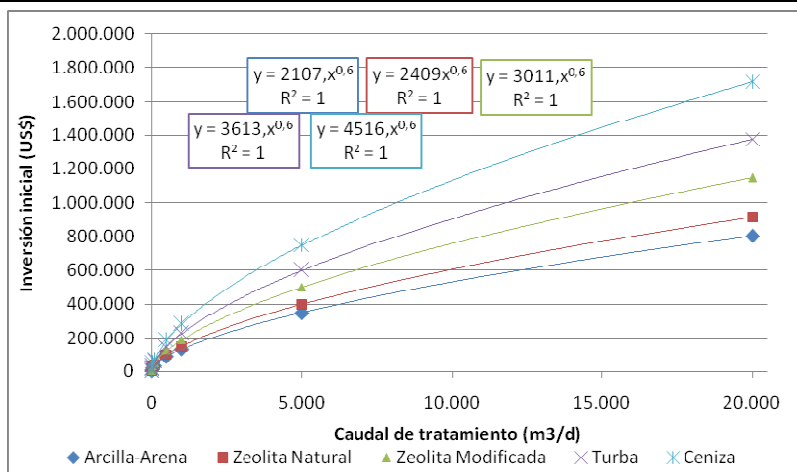
INFORME FINAL

Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos

N° 2 ADSORCION CON DIFERENTES MATERIALES			1/2
Dato inicial			LEYENDAS
Valor material adsorbente:		Tc1	: Información inicial del proveedor
Arcilla	0,2	(peso/dolar)	: Parámetro variable
Arena	0,2	500	: Producto de los cálculos estimativos
Cenizas	1000		: Tasa de cambio a diciembre 2009
zeolita natural	0,3		
Zeolita modificada	1,5		
Turba	113		

A) Los valores de inversión se determinan mediante procedimiento de Williams. Error asociado 30%

Caudal Tratamiento m³/d	Inversión (US\$) Arcilla-Arena	Inversión (US\$) Zeolita Natural	Inversión (US\$) Zeolita Modificada	Inversión (US\$) Turba	Inversión (US\$) Ceniza
1	2.108	2.409	3.011	3.614	4.517
10	8.392	9.591	11.988	14.386	17.982
50	22.041	25.190	31.487	37.785	47.231
100	33.408	38.181	47.726	57.271	71.589
500	87.747	100.283	125.353	150.424	188.030
1.000	133.000	152.000	190.000	228.000	285.000
5.000	349.328	399.232	499.040	598.848	748.560
20.000	802.545	917.195	1.146.494	1.375.792	1.719.740



Estimación de inversión (US\$)		
Caudal	50	m³/d
Arcilla - Arena	22.041	US\$
Zeolita Natural	25.189	US\$
Zeolita Modificada	31.487	US\$
Turba	37.785	US\$
Ceniza	47.230	US\$

B) Los costos de tratamiento se relacionan directamente con la energía consumida en bombeo y mantención.

Caudal Tratamiento m³/d	Costo US\$
1	2,3
10	1,87
50	1,34
100	0,82
500	0,27
1000	0,15
5000	0,09
20000	0,06

Estimación costo tratamiento Industrial (US\$/m³)		
Caudal	50	m³/d
costo industrial	0,76	US\$/m³

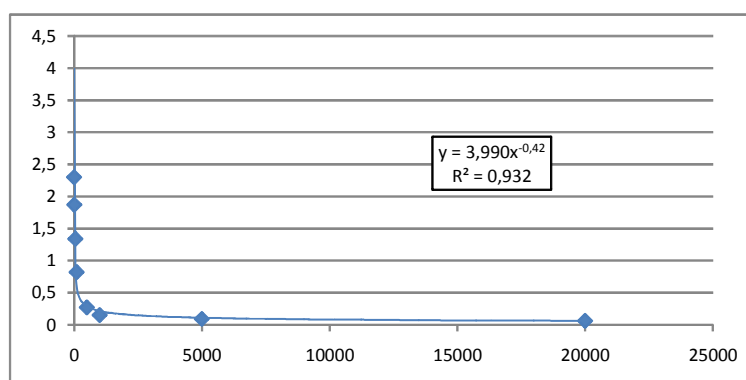


Figura 3.2.1: Ejemplo planillas de evaluaciones económicas

4 Entregables del Proyecto

Como resultado de la búsqueda y evaluación técnico económica de las distintas alternativas tecnológicas para el tratamiento de los parámetros, se elaboraron fichas tecnológicas y tablas resúmenes de acuerdo a:

4.1 Fichas Tecnológicas

Para cada tecnología mencionada en el punto anterior se han generado fichas técnicas que describen brevemente las características de ellas. En la figura n°3 se muestra un ejemplo de diseño gráfico de la ficha técnica a presentar.

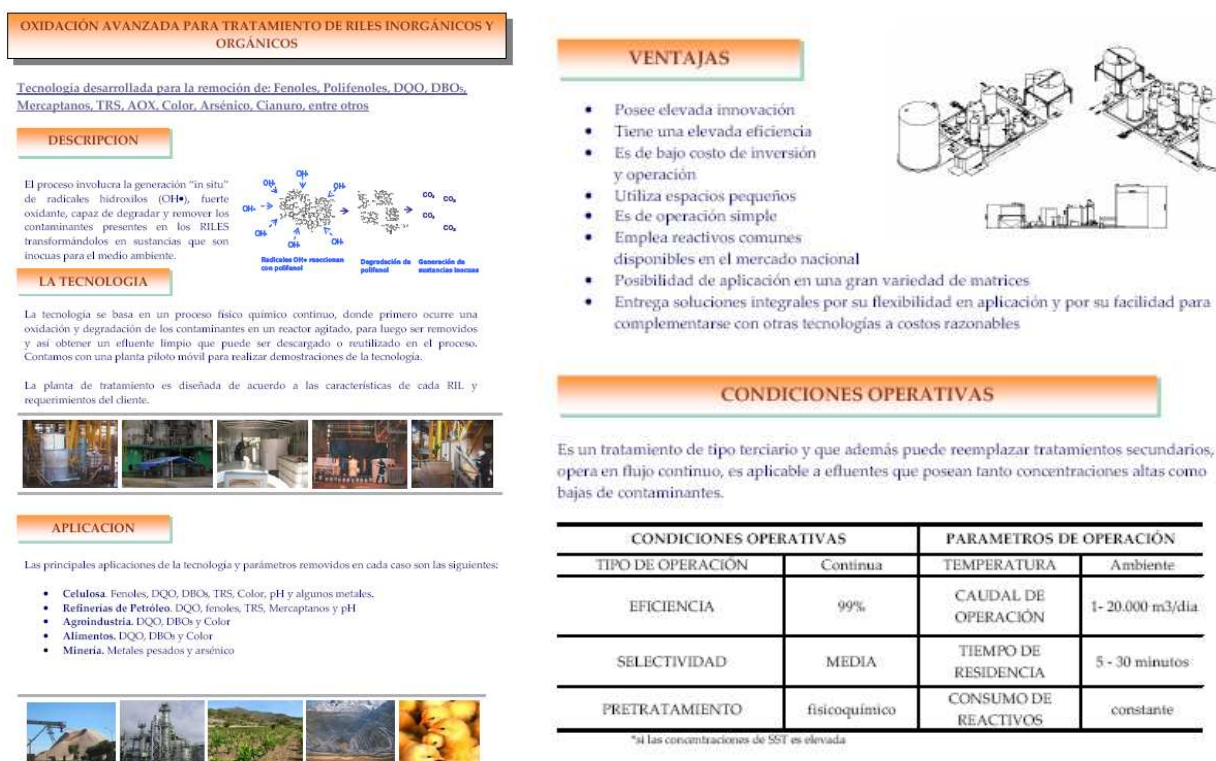


Figura 4.1.1: Ejemplo de Diseño Gráfico de Ficha Técnica

Los contenidos principales de las fichas son:

- Título de la Tecnología
- Subtítulo cuando corresponda una tecnología más específica
- Remoción directa e indirecta
- Descripción, con una figura que la represente.
- La Tecnología
- Aplicación
- Ejemplo destacable
- Eficiencia
- Ventajas
- Desventajas
- Condiciones operativas
- Costos Asociados
- Recomendaciones
- Bibliografía

A continuación se señala el detalle descriptivo de cada uno de los ítems incluidos en las fichas técnicas.

En el encabezado de la ficha, **Título de la tecnología**, va el nombre principal con que la tecnología es mayormente conocida.

El subtítulo, según corresponda aquí se agrega información adicional y la clasificación de la tecnología, si es convencional o emergente y el tipo ya sea biológico, físico o fisicoquímico.

Remoción Directa: Aquí se hace referencia a aquellos parámetros directamente removidos por la tecnología.

Remoción Indirecta: Aquí se hace referencia a aquellos parámetros adicionalmente removidos producto de la aplicación de la tecnología.

Descripción: la descripción corresponde al principio esencial de la tecnología y a descripciones sobre el proceso.

La Tecnología En esta sección se incorpora información sobre las características específicas de la tecnología, su modo de funcionamiento y una descripción del proceso incluyendo las características de la tecnología, los tipos, explicación de cómo trabaja, etc.

Aplicación: se refiere a los principales rubros donde la tecnología puede ser aplicada preferentemente. Aquí se incluyen además los códigos CIIU.

Ejemplo Destacable: En esta sección el objetivo es ilustrar una aplicación ejemplar de la tecnología a nivel industrial en el mundo.

Eficiencia: En esta sección se indican las remociones logradas a través de la aplicación de las tecnologías. La eficiencia se expresa como porcentaje de remoción, capacidades de captación entre otras.

Ventajas y Desventajas:

Características o atributos que mejoran el desempeño de la tecnología considerando factores como nivel de capacitación, espacio físico requerido, materiales involucrados, externalidades, entre otros. Así mismo, deben resaltarse las barreras o inconvenientes que pudiesen comprometer la implementación de la tecnología, a modo de hacer un análisis de pros y contras antes de decidir que alternativa tecnológica es la mejor.

Condiciones Operativas

Condiciones operativas básicas que permitan darse una idea de cómo opera la tecnología, incluyendo Tipo de Operación; Selectividad; Pre Tratamiento; Consumo de Reactivos y parámetros de operación como: Temperatura; Caudal de Operación; Vidal Útil; Tipo de Tratamiento, entre otros que pudiesen ser relevantes.

Costos Asociados

En este ítem se incluyen costos referenciales de operación e inversión. Además se incorporó las fórmulas de cálculo para distintos escenarios.

Recomendaciones

Según toda la información mostrada en la ficha, en esta sección se hace una recomendación que puede ser sobre la aplicación de la tecnología o algún factor relevante.

INFORME FINAL

Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos

Se adjunta a este informe un anillado con las 34 fichas técnicas de las tecnologías seleccionadas.

4.2 Tablas

Las tablas tienen el objetivo de representar en forma resumida y accesible los principales resultados obtenidos en esta búsqueda tecnológica. Se entregan dos tipos de tablas, una matriz de parámetros versus tecnologías, y tablas resúmenes de eficiencias, costos y aplicabilidad de las distintas tecnologías.

4.2.1 Tablas de parámetros versus tecnologías disponibles

Las tablas de parámetros versus tecnología corresponden a una matriz de 1*1 donde se señalan por parámetro todas las tecnologías que lo remueven, además se incluyó una columna adicional con otros parámetros que las tecnologías además remueven.

La simbología utilizada en estas tablas es:

- ch:** Tecnologías que se encuentran disponibles en Chile
- in:** Tecnologías que se encuentran disponible en el extranjero y que aún no están en Chile
- ch/in:** Tecnologías disponible tanto en Chile como en el extranjero
- (*)** El asterisco simboliza aquellos parámetros que son removidos indirectamente.

4.2.2 Tablas de eficiencias, costos y aplicabilidad de las distintas tecnologías

Las tablas de eficiencias, costos y aplicabilidad de las distintas tecnologías serán presentadas por parámetro a remover. En la Tabla a continuación se muestra un ejemplo.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) min y máx	Inversión (US\$) min y máx	Costo trat (US\$/m ³) min y máx
Aceites y Grasas	Biológico	Biofiltro / Lombrifiltro	80%	20 - 300	60.000 - 150.000	0,45 - 0,14
	Físico	Coalescencia	95 - 99%	50 - 3000	5.500 - 26.600	0,17 - 0,01
		Skimmer	98%	0,2 - 24	3848 - 8472	2,49 - 0,19
		Flotación por Aire Disuelto	90%	160 - 5200	30.000 - 680.000	0,51 - 0,03
		Bekosplit	90%	0,16 - 3,20	20.300 - 69.700	10,1 - 0,92
	Fisicoquímico	Oxidación, POAS	90%	10 - 5000	90.500 - 3.800.000	2,6 - 0,6

En el anexo 4 se adjuntan las tablas respectivas para cada uno de los parámetros.

5 Análisis Técnico-Económico

En esta sección se realizó un análisis basado en la información técnica relevante sobre cada una de las tecnologías, y un análisis económico basado en las evaluaciones, considerando costos de operación e implementación. El análisis se hizo por parámetro de estudio, evaluando todas las alternativas existentes y haciendo una comparación de ventajas técnicas y económicas en diferentes casos de aplicación. A continuación se muestra el análisis por parámetro.

5.1 Tecnologías de Tratamiento para regular Temperatura

Las alternativas tecnologías diseñadas para el manejo de deltas de temperatura en efluentes industriales son: Torres de enfriamiento e intercambiadores de calor.

1.- Torres de enfriamiento:

Como conclusión de este equipo se señala que: "La variación de temperaturas no influye directamente al nivel de inversión de estos equipos. Los parámetros de diseño más relevante son el caudal y la temperatura de bulbo húmedo. Se debe tener en cuenta que estos equipos tienen la limitante de que sólo pueden enfriar hasta 4°C sobre la temperatura de bulbo húmedo, es decir que si en el sector la T° de bulbo húmedo es de 16°C, la torre será capaz de enfriar hasta los 20 °C como máximo. Si la temperatura de entrada varía en 5, 10, 20 °C, la variación en la inversión de este mismo equipo será marginal. Por otro lado, si es el caudal el parámetro a variar, ahí si se nota un cambio radical en el tamaño del equipo y por ende en la inversión"

A) Caso de Estudio para una torre de enfriamiento

Mediante este ejemplo gráfico se darán a conocer las variables operacionales más importantes en el diseño y operación de una torre de enfriamiento.

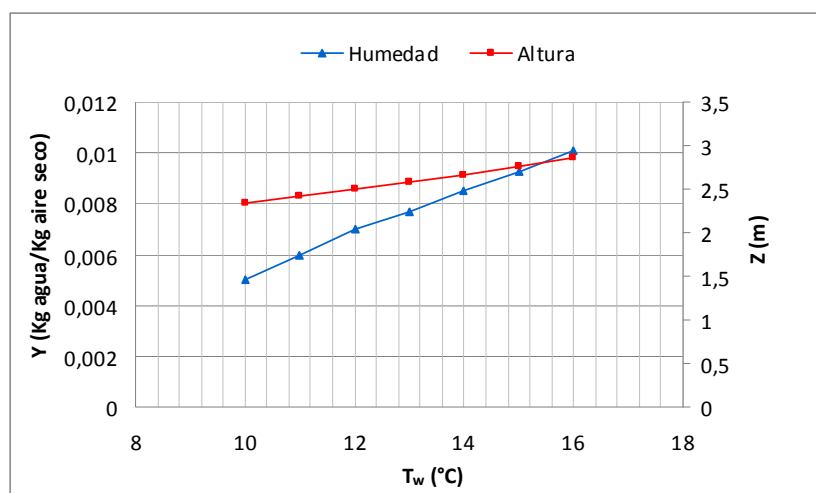


Figura 5.1.1: Influencia de la Temperatura de bulbo húmedo en la Altura de la Torre

En la Figura 5.1.1, se puede observar la relación que existe entre la temperatura de bulbo húmedo y la humedad absoluta medida en el sector a instalar la torre. Cuanto menor sea la humedad ambiente, más rápidamente se evaporará el agua. Así mismo, la variación de altura de la torre depende de cuan eficiente sea la evaporación natural. Mientras mayor sea la evaporación, se necesitará una menor área de transferencia dentro de la torre, por lo tanto la altura es menor.

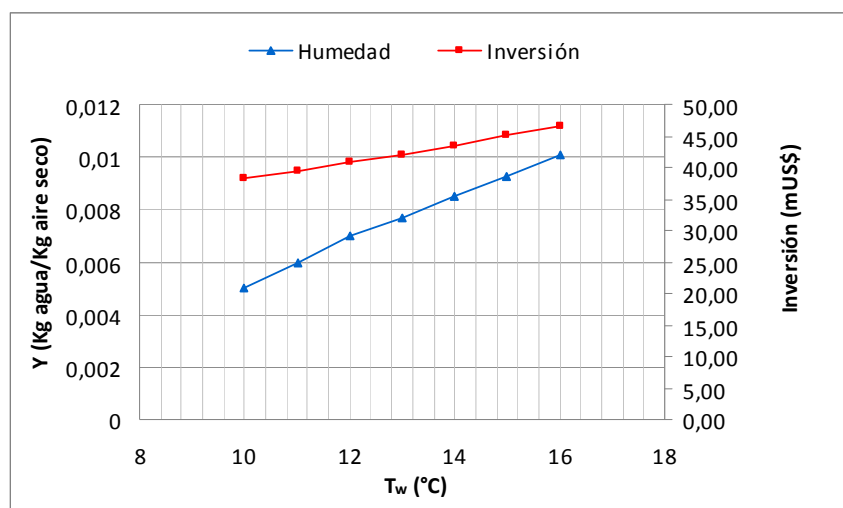


Figura 5.1.2: Relación de la Temperatura de bulbo húmedo con la humedad absoluta y la inversión

De la Figura 5.1.1 y 5.1.2, se puede inferir que la variación de la temperatura de la torre de enfriamiento condiciona directamente al nivel de inversión o coste del equipo, lo que se puede corroborar en la figura 5.1.3. La variación de la T_w en 6 °C, implica una variación de inversión en un 20% aproximadamente.

Se debe tener en cuenta que:

- Las torres de enfriamiento en la práctica pueden enfriar solo hasta 4°C sobre la temperatura de Bulbo Húmedo.
- El agua de reposición se encuentra entre 1 a 2 % del caudal de entrada (según diseños usuales).

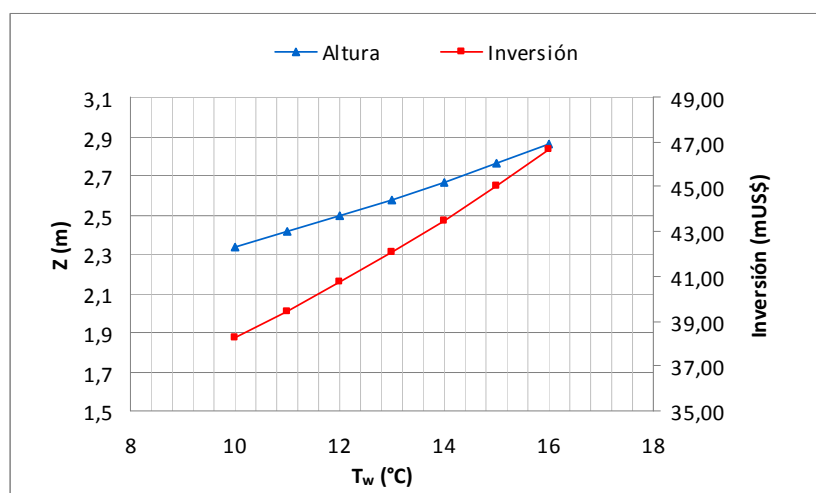


Figura 5.1.3: Relación de la temperatura de bulbo húmedo con la altura de la torre y la Inversión

En la Figura 5.1.3, se observa la relación entre la temperatura de bulbo húmedo medida en el sector de instalación y la altura de la torre, variando de mismo modo el coste del equipo. En base a esto se determina que las variables fundamentales en el diseño de este tipo de equipos son: Caudal, temperatura de entrada y salida del líquido a enfriar, temperatura de bulbo húmedo y humedad absoluta.

La iteración o combinación adecuada de estos parámetros nos entregará el diseño óptimo del equipo según los requerimientos en cada caso.

2.- Intercambiadores de calor:

Los equipos de intercambiadores de calor pueden ser utilizados para la regulación de la T° en un RIL de descarga, siempre y cuando se pueda aprovechar la temperatura transferida desde el flujo caliente al flujo de refrigeración. En el caso en que el flujo de refrigeración obtenga el calor necesario para aumentar su T° en un grado tal que al ingresar a la siguiente operación unitaria del proceso, sea provechoso para la reacción u operación, sólo en estos casos se puede hablar de un ahorro equivalente (explicado a continuación) interpretado como cantidad de petróleo que se dejaría de utilizar.

A) Caso de Estudio para un Intercambiador de Calor

A continuación se dan a conocer las variables operacionales más importantes en el diseño y operación de un intercambiador de calor.

En las siguientes figuras se muestra el comportamiento térmico que sufre una corriente acuosa de alta temperatura (fluido caliente, en adelante) cuando se pone en contacto con una corriente acuosa fría (fluido frío, en adelante) utilizando el equipo "Intercambiador de Calor".

La eficiencia de estos equipos está directamente relacionada al área de contacto, flujo de los fluidos frío y caliente y sus respectivas temperaturas de entrada y salida.

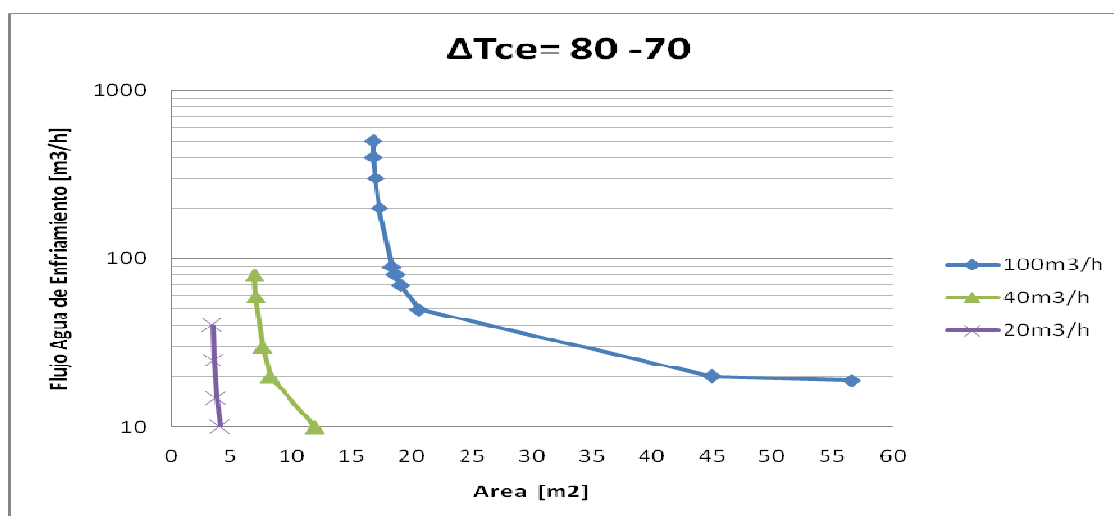


Figura 5.1.4: Variación del área de transferencia cuando un caudal de 100, 40 y 20 m³/h de fluido caliente es enfriado desde 80 a 70 °C, usando distintos caudales de fluido frío a 25 °C.

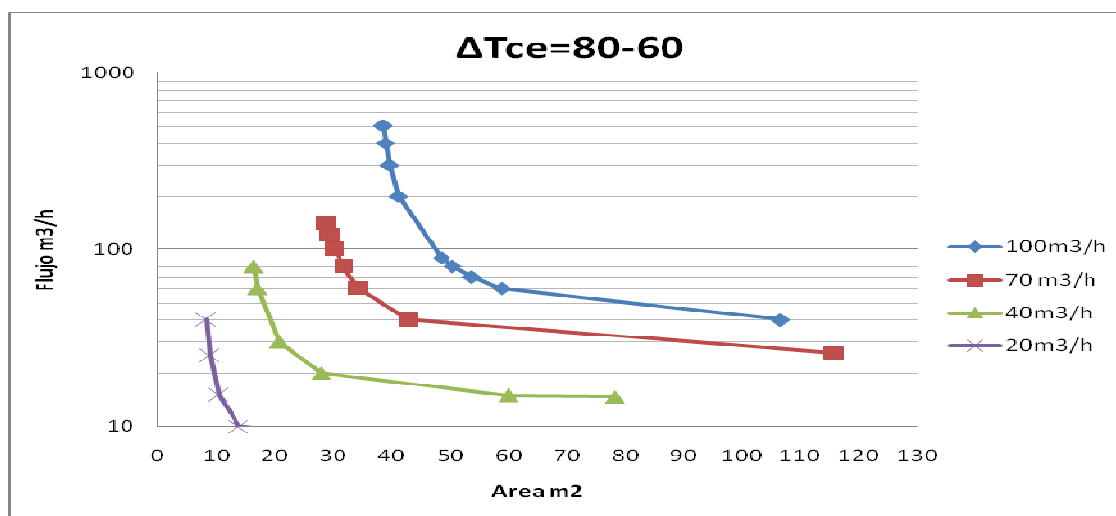


Figura 5.1.5: Variación del área de transferencia cuando un caudal de 100, 70, 40 y 20 m³/h de fluido caliente es enfriado desde 80 a 60 °C, usando distintos caudales de fluido frío a 25 °C.

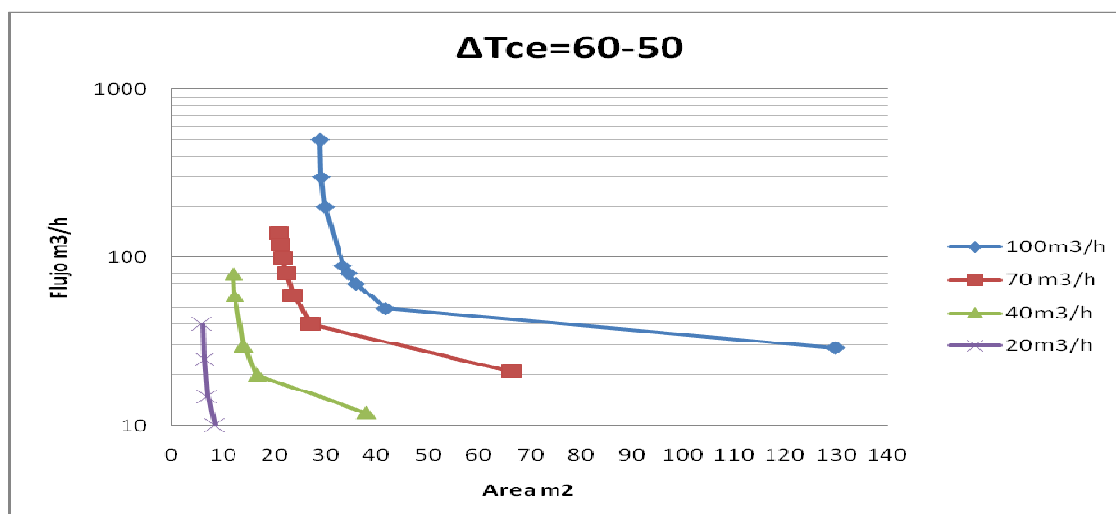


Figura 5.1.6: Variación del área de transferencia cuando un caudal de 100, 70, 40 y 20 m³/h de fluido caliente es enfriado desde 60 a 50 °C, usando distintos caudales de fluido frío a 25 °C

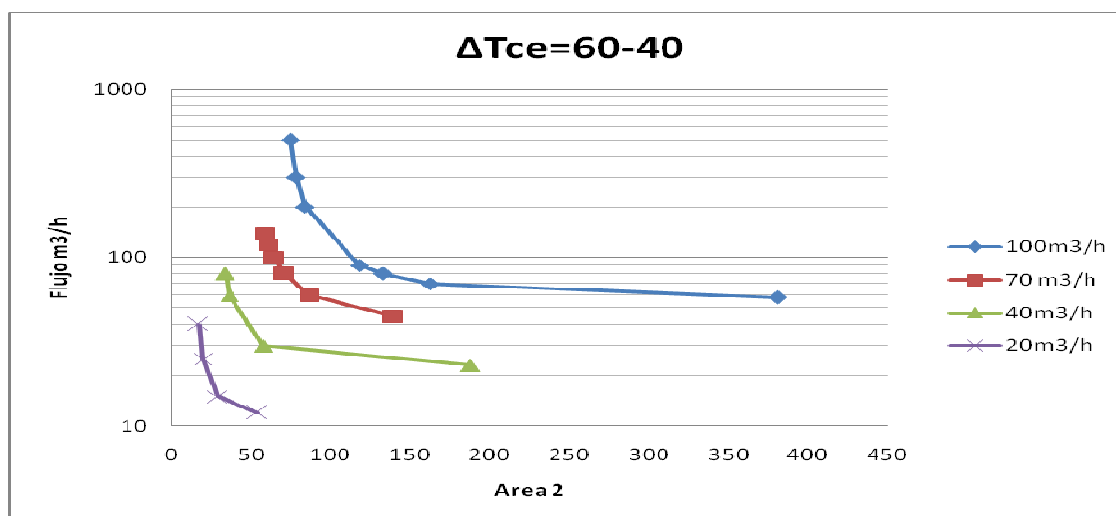


Figura 5.1.7: Variación del área de transferencia cuando un caudal de 100, 70, 40 y 20 m³/h de fluido caliente es enfriado desde 60 a 40 °C, usando distintos caudales de fluido frío a 25 °C.

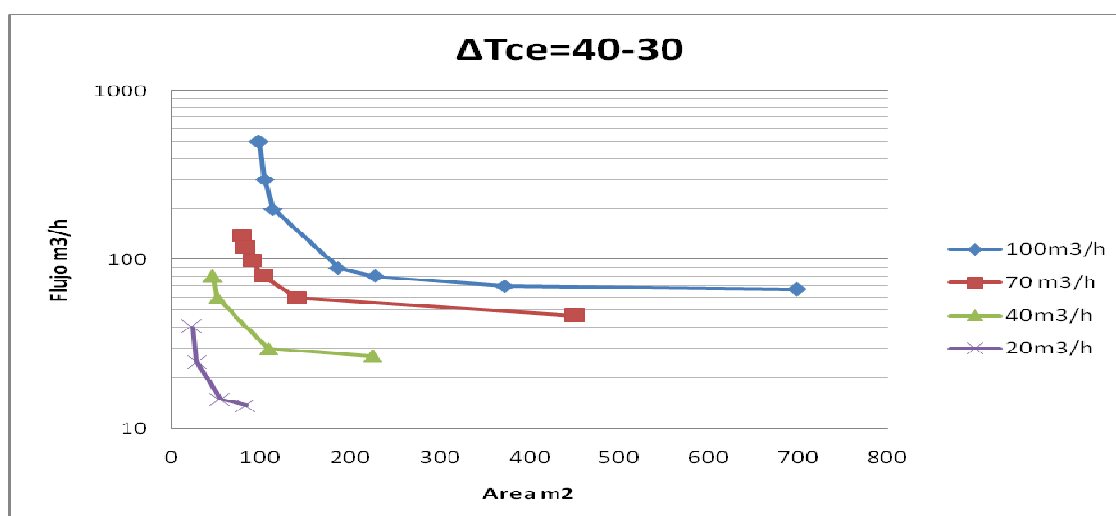


Figura 5.1.8: Variación del área de transferencia cuando un caudal de 100, 70, 40 y 20 m³/h de fluido caliente es enfriado desde 40 a 30 °C, usando distintos caudales de fluido frío a 25 °C.

De las figuras se puede concluir que a mayores caudales de fluido caliente, se necesita una mayor área de transferencia para poder enfriarlo usando un fluido frío a 25 °C.

Por otro lado, mientras más alto sea el caudal del fluido frío, el área de transferencia permanece casi constante.

Además, para un área fija de transferencia, se necesita aumentar el flujo de fluido frío, cada vez que se aumenta el caudal del fluido caliente.

Si comparamos las figuras 5.1.4 y 5.1.5, podemos observar que para disminuir en 10 °C la temperatura del fluido caliente se necesita menos área de transferencia que cuando se requiere bajar en 20 °C. Así mismo, comparando 5.1.4 y 5.1.8, fijando condiciones de 100 m³/h para ambos fluidos, se necesita una

mayor área de transferencia para enfriar en 10 °C, cuando el fluido caliente tiene una menor temperatura de entrada. Estos dos fenómenos se explican por el gradiente (diferencia) de temperatura que existe entre ambos fluidos. Mientras más grande sea esta diferencia, tanto a la entrada como a la salida, se hace más fácil disminuir la temperatura del fluido caliente ya que la transferencia de calor es más rápida.

En las siguientes figuras se muestra una sensibilización del área de transferencia cuando un caudal de fluido caliente, a diferentes temperaturas de entrada 80, 60 y 40 °C, es enfriado en 10 °C cuando se pone en contacto con un caudal de fluido frío a 25 °C. Se hace notoria la influencia que tiene el gradiente de temperatura a la entrada y salida de cada fluido.

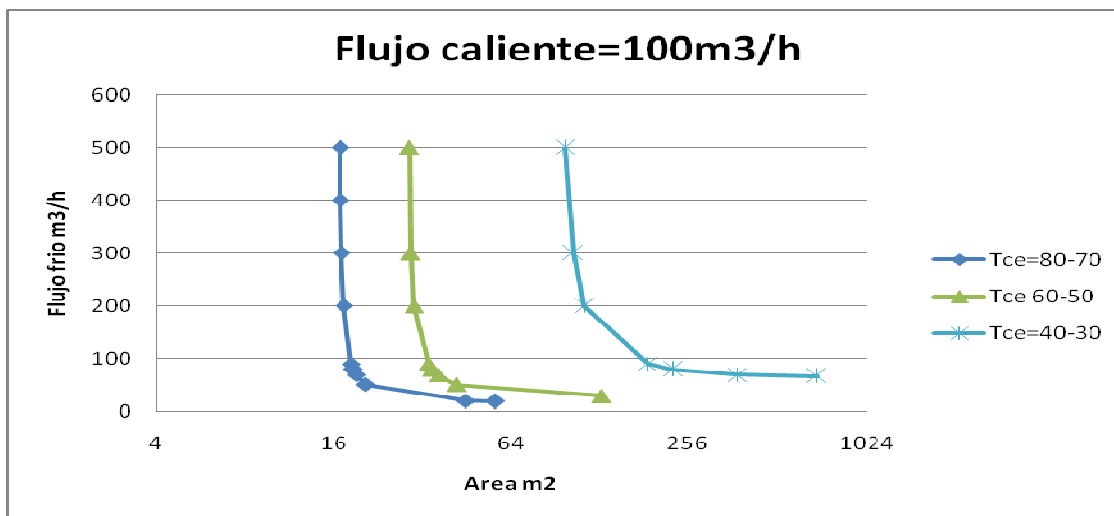


Figura 5.1.9: Variación del área de transferencia cuando un caudal de 100 m³/h de fluido caliente es enfriado desde en 10 °C, usando distintos caudales de fluido frío a 25 °C.

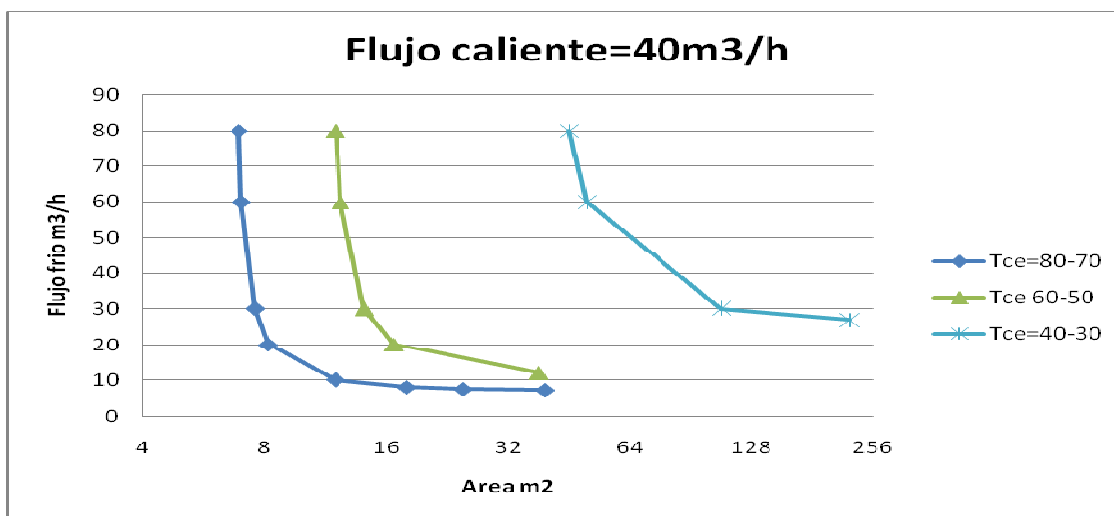


Figura 5.1.10: Variación del área de transferencia cuando un caudal de 40 m³/h de fluido caliente es enfriado desde en 10 °C, usando distintos caudales de fluido frío a 25 °C.

Al observar las figuras 5.1.9 y 5.1.10, notaremos que el área de transferencia de calor aumenta cuando se tiene una menor temperatura de entrada a un caudal fijo de fluido caliente.

Si se aumenta el caudal de fluido frío el área de transferencia permanece constante, como se indicó anteriormente. Además se observa que al disminuir el caudal de fluido caliente, el área de transferencia necesaria es menor.

Al ver como todos estos factores varían en el área de transferencia, y por ende en el porte final del equipo intercambiador de calor, la inversión varía de la misma manera. Es por eso que es difícil encontrar equipos prefabricados. Usualmente éstos son diseñados, forma, operación y material a la medida de cada caso puntual.

B) Caso de Estudio para un Intercambiador de Calor

Mediante el siguiente análisis se da conocer la capacidad de ahorro que puede aportar su utilización dentro del proceso.

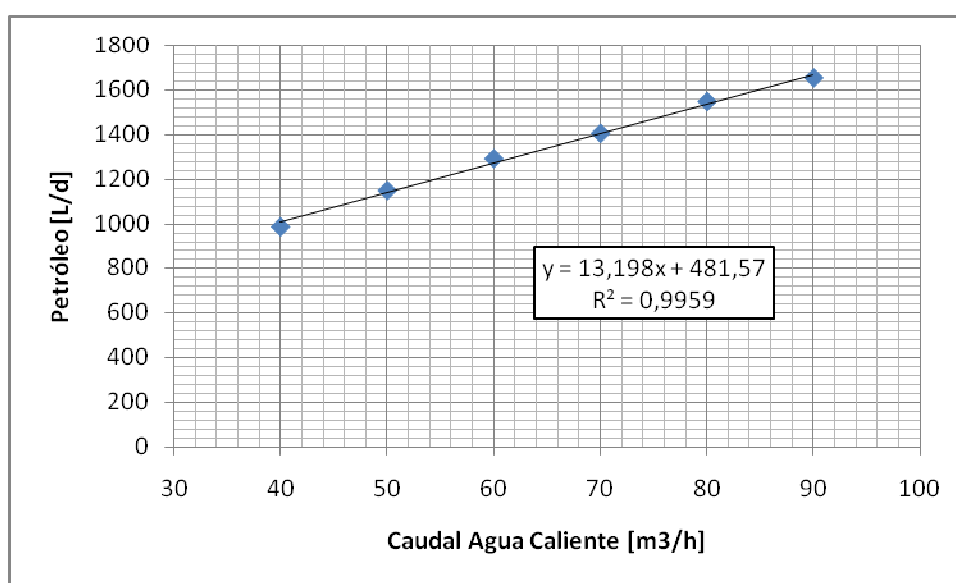


Figura 5.1.11: Equivalente de petróleo ahorrado cuando se utiliza intercambiador de calor

La figura 5.1.11 muestra cual es el ahorro potencial en términos de cantidad de petróleo diario que no se utilizará si se aprovecha el calor obtenido al enfriar una corriente caliente desde 40° a 30° C, cuando se pone en contacto con una corriente fría de 100 (m³/h) a 25°C.

Hay que tener en cuenta que el ahorro se hace efectivo sólo cuando se logra calentar el fluido refrigerante por sobre la temperatura mínima requerida para la operación unitaria siguiente donde será utilizada esta corriente. De lo contrario, no se considera como un valor agregado, y solo es un proceso de regulación de temperatura sin lograr un ahorro en el consumo energético.

El costo energético de ahorro, dependerá directamente del valor de compra que posee la empresa. Ya que cada contrato es diferente considerando ubicación geográfica, nivel de compra y contratos adjudicados.

Al hacer un análisis económico para establecer que técnica utilizar, se hace necesario establecer el orden de inversión asociado a ambas técnicas, en la figura 5.1.12 se presentan dos gráficos, el primero con los costos de inversión y el segundo con los costos de tratamiento y operación.

Según los resultados mostrados en la figura, se observa como la inversión asociada a torres de enfriamiento es siempre mayor que la requerida para la implementación de intercambiadores de calor. Así mismo, esta tendencia se repite al considerar los costos de operación de ambos equipos. El uso de uno u otro equipo está determinada por el objetivo del tratamiento, si éste corresponde a la descarga cumpliendo los niveles máximos permitidos por la autoridad, normalmente se instalan torres de enfriamiento. Si por el contrario el objetivo es la recuperación y aprovechamiento del calor, se usa intercambiadores de calor.

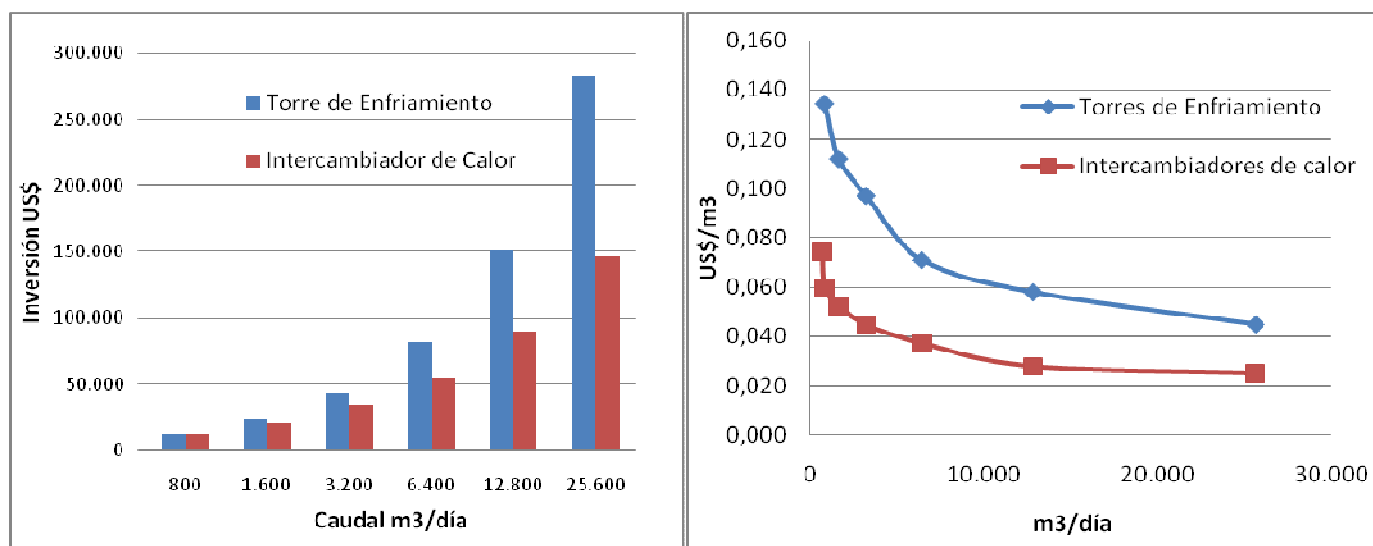


Figura 5.1.12: Gráficos de costos técnicos de torres de enfriamiento e intercambiadores de calor

Otro factor relevante en la inversión es el costo final del proyecto, en la Figura 5.1.13, se observa cómo se incrementa el valor del proyecto al incluir instalación. En este análisis se incluyó: Costo del equipo, Flete y seguro, Mano de obra instalación, supervisión, conexiones hidráulicas y eléctricas. No involucra obras civiles, ingeniería, imprevistos.

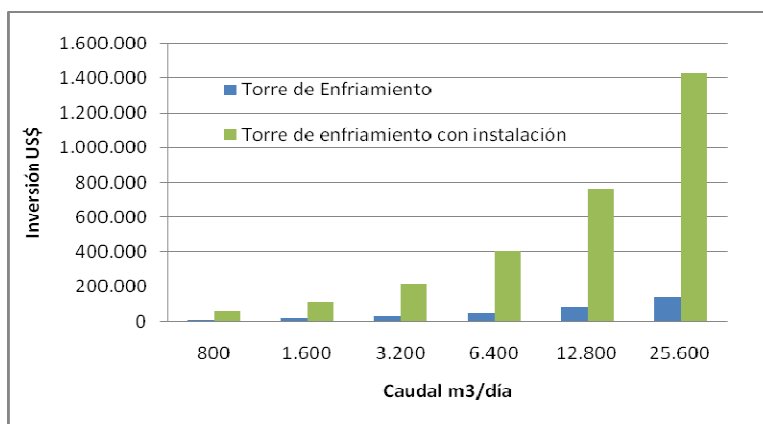


Figura 5.1.13: Gráfico de costos de inversión para torres de enfriamiento

5.2 Tecnologías para remover Bromo

El bromo es un parámetro poco común en descargas industriales, salvo determinados rubros industriales como: curtiembres, galvanoplastia, pesticidas, desinfección, entre otros. En general las concentraciones encontradas de este parámetro tenderán a ser bajas.

Se detectaron tres tecnologías que presentan elevada eficiencia para remover el bromo del agua, estas son: Adsorción con carbón activado, intercambio iónico y osmosis inversa, las tres tecnologías corresponden a tratamiento fisicoquímico. En la siguiente tabla se presentan las tres tecnologías incluyendo información sobre eficiencia de remoción, costos de inversión y costos operacionales, entre otros datos de interés.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) min y máx	Inversión (US\$) min y máx	Costo trat (US\$/m ³) min y máx
Bromo	Fisicoquímico	Carbón Activado	95 a 99%	250 - 2000	89.000 - 312.000	0,47 - 0,11
		Intercambio iónico	99%	9000 - 31334	4.000.000 - 9.100.000	0,057 a 0,114
		Osmosis Inversa	99%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32

Con el objetivo de establecer cual es la alternativa más costo-eficiente se analizará a continuación el nivel de inversión y los costos de tratamiento para las tres alternativas. En la figura 5.2.1 se muestran dos gráficos, el primero con los costos de inversión y el segundo con los costos de tratamiento.

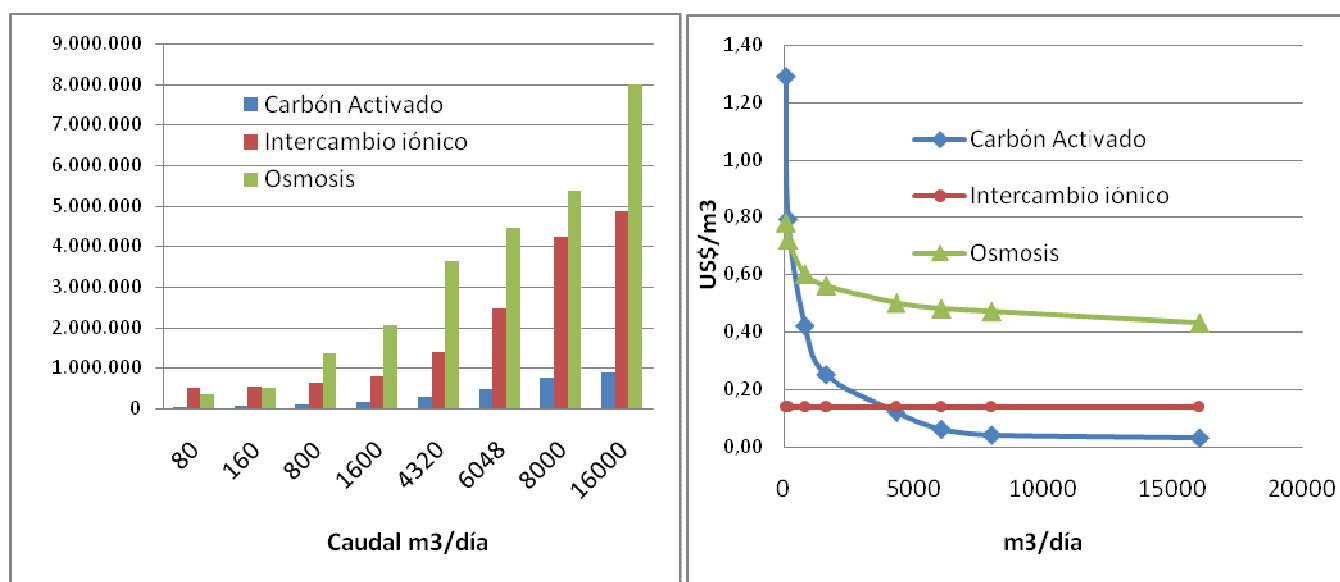


Figura 5.2.1: Gráfico de de costos de inversión y costos operacionales

Se observa que la menor inversión es obtenida al usar carbón activado, seguida por intercambio iónico y finalmente osmosis inversa. En los costos operacionales la tendencia se repite, en términos generales la opción de osmosis inversa se traduce en costos de tratamiento mayores que bordean los 0,5 US/m³, dependiendo del caudal de tratamiento. En promedio, los costos para intercambio iónico son 0,14 US/m³.

INFORME FINAL

Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos

Para Carbón activado los costos varían desde 1,3 US/m³ hasta 0,03 US/m³, y desde los 4000 m³/día hacia arriba los valores se estabilizan en 0,03 US/m³.

En términos económicos, la mejor alternativa para sólo remover el bromo es carbón activado. Si se requieren tratamientos que además remuevan otros parámetros se deberá considerar las opciones de intercambio iónico y osmosis inversa.

5.3 Tecnologías para remover THM

Se detectaron ocho alternativas tecnológicas para la remoción de THM, las cuales son posible de clasificar según el tipo en: físicas y fisicoquímicas. En la tabla se muestran las tecnologías, su eficiencia, caudal de operación y costos operacionales y de inversión.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) min y máx	Inversión (US\$) min y máx	Costo trat (US\$/m ³) min y máx
THM	Físico	Arrastre por aire	90 a 95%	80 - 16000	15.000-354.000	1,09 - 0,03
		Osmosis Inversa	99%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32
		Destilación	99%	0,5 - 48	22.852 - 141.251	19,7 - 2,81
	Fisicoquímico	Electro-oxidación	90 a 100%	10 - 5000	45,214 - 1,882,151	4,24 - 0,98
		Oxidación, POAS	90 a 100%	10 - 5000	90.500 - 3.800.000	2,6 - 0,6
		Oxidación con agua supercrítica	90 a 100%	10 - 5000	100.475 - 4,182,558	4,16 - 0,96
		Oxidación con aire húmedo	90 a 100%	10-5000	75000- 3.136.000	3,51-0,81
		Carbón Activado	95 a 99%	250 - 2000	89.000 - 312.000	0,47 - 0,11

En general todas las tecnologías expresan eficiencias de remoción sobre el 95%, caudales de operación amplios y diferentes niveles de inversión dependiendo del tipo de equipamiento utilizado por las diferentes tecnologías. La única tecnología que posee una limitación de implementarse en caudales mayores a 50 m³/día es la tecnología de destilación simple o forzada, ella posee un alto costo de implementación al considerar su baja capacidad de tratamiento.

Se realizó un gráfico que se muestra en la figura 5.3.1 donde es posible comparar los costos de inversión de las diferentes tecnologías.

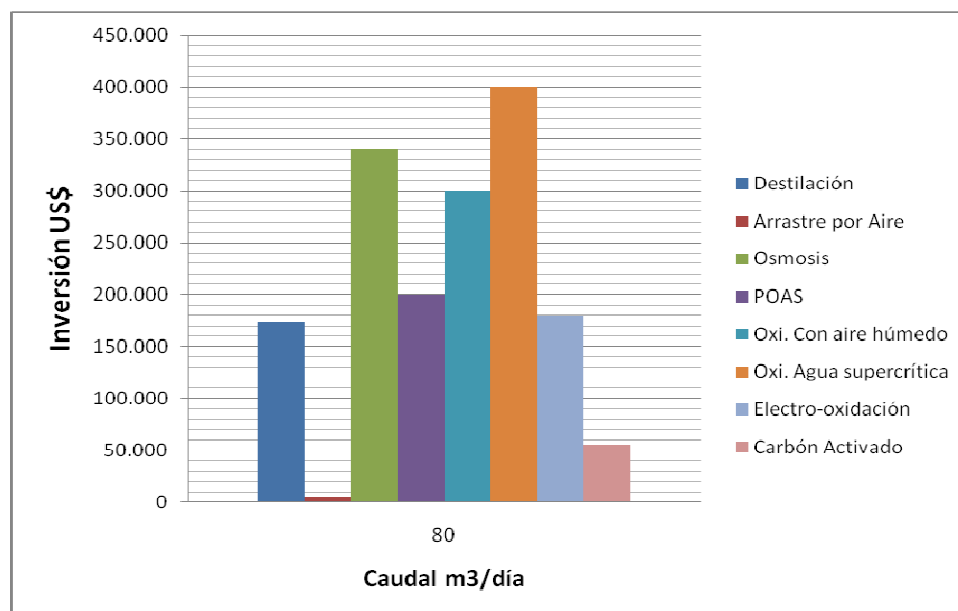


Figura 5.3.1: Gráfico de costos de inversión de diferentes tecnologías para remoción de THM

Según los resultados expresados en el gráfico es posible clasificar los niveles de inversión de las distintas tecnologías en tres niveles de inversión: bajo, medio y alto. En el nivel alto de inversión encontramos a las tecnologías de osmosis inversa, oxidación con aire húmedo y agua Supercrítica. A nivel industrial es mucho más común ver que cuando se realizan inversiones de este orden de magnitud la tecnología seleccionada es osmosis inversa, dada su capacidad para tratar grandes caudales y remover un sinnúmero de parámetros en forma simultánea.

En el nivel medio de inversión tenemos las tecnologías de oxidación catalítica (POAS) y electro-oxidación, entre los 150.000 y 200.000 US\$. En la figura 5.3.2, se muestran dos gráficos, el primero compara los costos de operación y el segundo los niveles de inversión para ambas tecnologías.

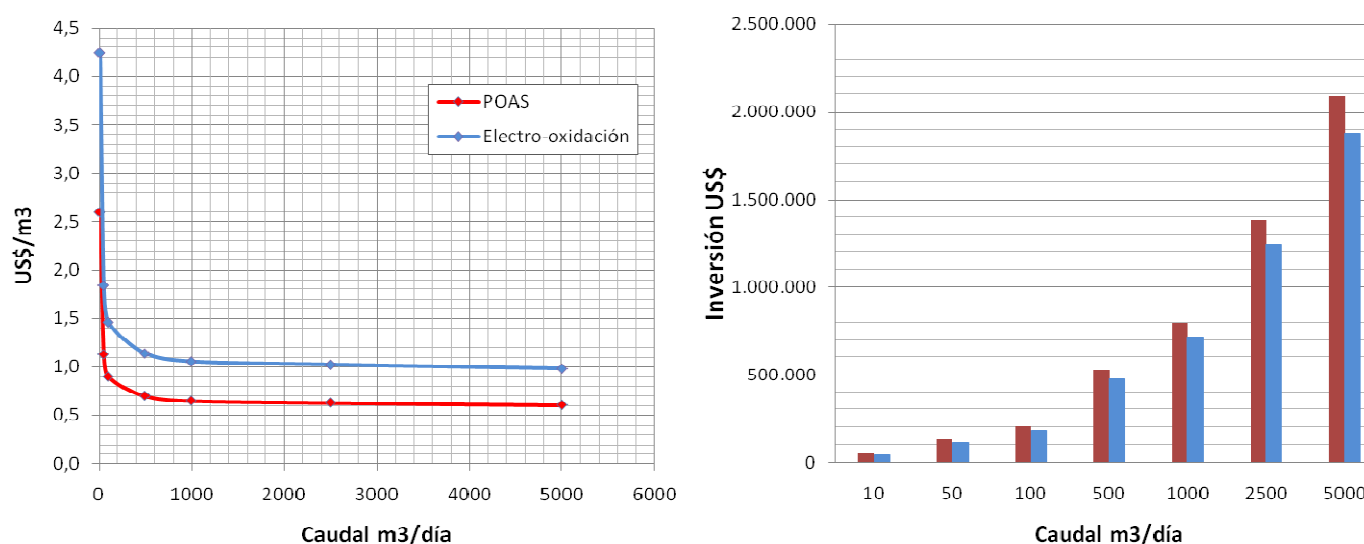


Figura 5.3.2: Gráfico de costos operacionales y de inversión para Oxidación Catalítica y Electro-oxidación

En la figura se observa que ambas tecnologías tienen comportamientos similares. Los costos de tratamiento difieren por 0,5 US\$/m³ en todo el rango de caudales de tratamiento, siendo la tecnología más económica: oxidación catalítica (POAS). Este mismo comportamiento se repite en la inversión donde nuevamente oxidación catalítica resulta ser de menor inversión.

Finalmente en la categoría de niveles de inversión bajos, se encuentran las tecnologías de arrastre por aire y carbón activado, destacándose por su baja inversión arrastre por aire, con un valor cercano a los 5.000 US\$ para un caudal de 80 m³/día. Luego, se ubica carbón activado con un orden de magnitud mayor, bordeando los 50.000 US\$. En la figura 5.3.3 se muestra la inversión para ambas tecnologías en un amplio rango de tratamiento.

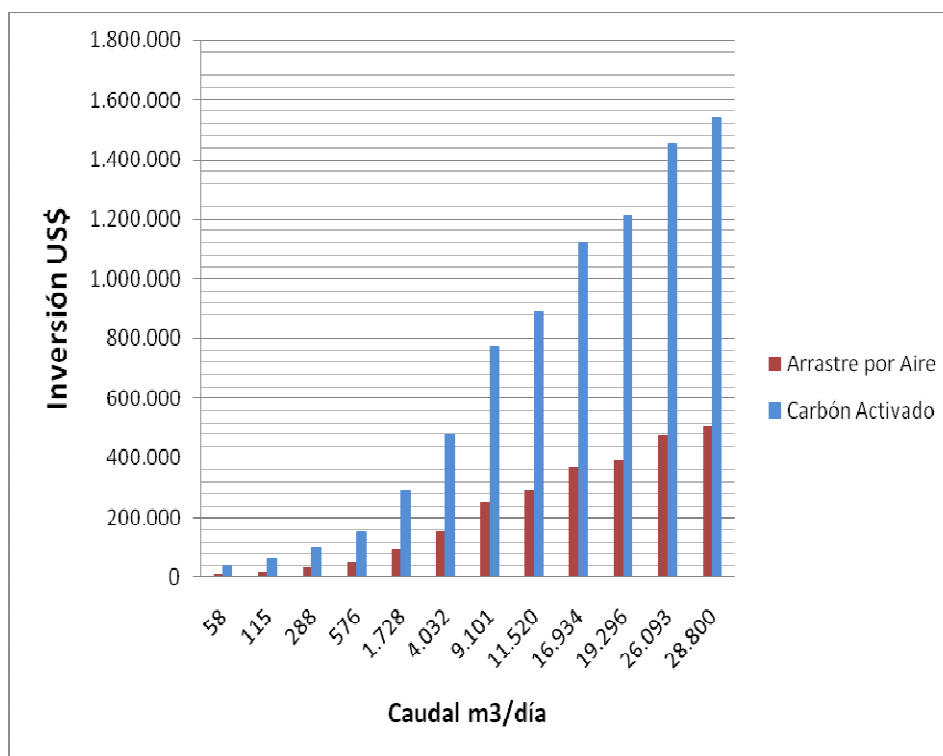


Figura 5.3.3: Gráfico de costos de inversión

Como se observa en la figura, en todo el rango de caudales de 50 a 30.000 m³/día, la tecnología de **Arrastre por Aire** o Air stripping, resulta ser la más económica. El proceso en que se basa esta tecnología es en hacer pasar un contra-flujo de aire a través de una columna empacada con diferentes materiales de relleno. Lo mas relevante es asegurar que la transferencia entre la fase acuosa y gaseosa sea óptima para permitir a los componentes volátiles moverse desde el efluente a la corriente de aire. Esta tecnología es ampliamente usada en la remediación de acuíferos contaminados con compuestos orgánicos volátiles. Así mismo, es una tecnología muy usada en procesos industriales.

Esta tecnología no adiciona reactivos al efluente, solo airea.

5.4 Tecnologías para remover Cloro libre residual

La eliminación de cloro residual se hace necesaria cuando se ha efectuado previamente una etapa de desinfección, usando cloro, y por algún motivo se ha agregado una dosis mayor a la estequiométrica necesaria. En estos casos, se produce el riesgo de que el cloro libre residual pueda reaccionar con compuestos orgánicos y generar compuestos de mayor toxicidad conocidos como THM, trihalometanos.

La forma más segura de evitar la formación de THM, es sustituir al cloro en el proceso de desinfección el que puede ser reemplazado por rayos UV, entre otras opciones. La segunda medida que puede aplicarse es evaluar y hacer un estudio de la dosis de cloro a agregar, si esta corresponde justo a la demanda no se generará cloro libre residual. Si pese a lo anterior, el efluente ya presenta cloro libre residual existen principalmente dos alternativas tecnológicas que permiten su destrucción, ellas son: Adsorción con carbón activado y decloración usando dióxido de azufre. En la tabla se muestran los costos y eficiencias para ambas tecnologías.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) min y máx	Inversión (US\$) min y máx	Costo trat (US\$/m ³) min y máx
Cloro Libre Residual	Fisicoquímico	Carbón Activado	95 a 99%	250 - 2000	89.000 - 312.000	0,47 - 0,11
		Decloración usando dióxido de azufre	95%	20 - 50000	12.950- 1,415,923	0,18 a 0,021

En general se usa a nivel mundial la técnica de eliminación de cloro usando dióxido de azufre, ya que permite usar rangos amplios de caudales de tratamiento. Con respecto a los costos, esta opción tecnológica es económica lo que explica su gran uso. En la figura 5.4.1 se presentan dos gráficos con los costos operacionales y los de inversión para ambas opciones.

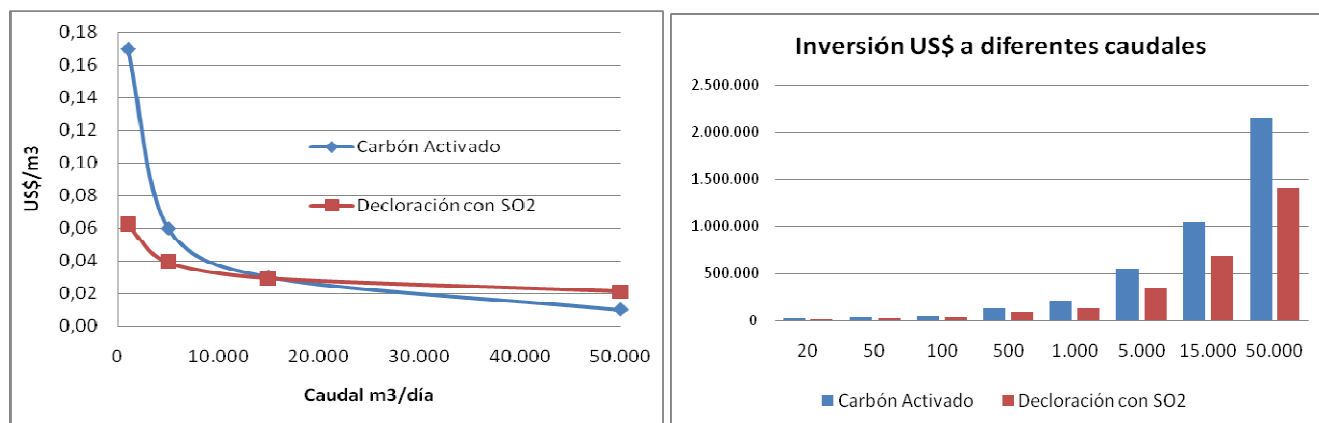


Figura 5.4.1: Gráfico de costos de operación e inversión para alternativas de decloración

5.5 Tecnologías para Remoción de SST y Sólidos Sedimentables

Para la remoción de Sólidos Suspendedos Totales existe una gran variedad de alternativas tecnológicas, las que pueden combinarse dependiendo de la matriz a tratar y el nivel de salida que se desee alcanzar.

Entre las combinaciones mas utilizadas destacan:

- Filtración primaria + DAF + biológico altos caudales
- Pre-filtración + Filtro AMIAD + biológico altos caudales
- Biológico bajos caudales + Filtro AMIAD o carbón activado
- Pre-filtración + Filtro AMIAD + biológico altos caudales
- Pre-filtración + DAF + biológico + técnicas de membrana
- Pre-filtración + Filtro AMIAD + carbón activado
- Pre-filtración + DAF + técnicas de membrana
- Pre-filtración + Filtro AMIAD + técnicas de membrana
- Filtro AMIAD + técnicas de membrana
- DAF + biológico

En donde, el término Biológico se refiere a SBR, Wetland, Lodos activados y Lagunas Aireadas; el término Técnicas de Membrana está relacionado con las siguientes técnicas: Osmosis Inversa, Nanofiltración, ultra o Microfiltración y electrodiálisis; y el término Filtración primaria se refiere a Pre-filtración o sedimentación natural o acelerada.

Los tratamientos biológicos son todos eficientes en la remoción de SST, se diferencian principalmente por sus costos de inversión, que a su vez están determinados por los equipos, el grado de mecanización, la mano de obra, la construcción, entre otras. En el caso de los tratamientos físicos, estos complementan a los tratamientos biológicos ya sea como pre-tratamiento (como el caso de la pre-filtración y los separadores de gravedad y sedimentación) o tratamiento post o de depuración (como técnicas de membrana). Así mismo los tratamientos fisicoquímicos complementan a los anteriores.

En la siguiente tabla se detallan las alternativas tecnológicas para la remoción de SST, además se incluye información sobre costos, eficiencia y capacidad de tratamiento.

INFORME FINAL

Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m³/d) min y máx	Inversión (US\$) min y máx	Costo trat (US\$/m³) min y máx		
SST	Biológico	Biofiltro / Lombrifiltro	95%	20 - 300	60.000 - 150.000	0,45 - 0,14		
		Lodos Activados	85 – 95%	19 - 507.000	66.000 - 315.000.000	0,28 - 0,01		
		Lagunas Aireadas	hasta un 95%	58 - 57600	88.000 - 50.500.000	0,76 - 0,01		
		SBR	85 – 95%	5 - 200	63.000 - 578.000	1,62 - 0,09		
		RALFS	80 – 90%	50 - 50000	93.000 - 5.900.000	1,02 - 0,006		
		Wetlands	90%	2 - 100	13.000 - 206.000	0,05 - 0,006		
	Físico	Prefiltración	< 40%	reja: 86,4 a 17.280	8265 - 68,815	0,057 a 0,003		
				tamiz rotatorio: 86,4 a 17.280	30,820 - 964,938			
				tamiz parabólico: 86,4 a 17.280	3,046 - 73,169			
		Separadores por gravedad y sedimentación	50 - 90%	Natural: 8,64 a 28.800	2.500 - 262.725	0,21 - 0,002		
				Acelerada: 8 a 6400	9.288 a 512.591	0,46 a 0,032		
				Nanofiltración	98%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,6 - 0,3
				Osmosis Inversa	99%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32
				Bekosplit	75%	0,16 - 3,20	20.300 - 69.700	10,1 - 0,92
				Ultrafiltración	85 - 95%	1514 - 378.000	1,7 MM a 47 MM	0,549 a 0,281
				Filtros AMIAD	mayor que 90%	160 - 9600	33.000 - 113.000	0,02 - 0,01
Fisicoquímico	Carbón Activado	95 a 99%	250 - 2000	89.000 - 312.000	0,47 - 0,11			
	Flotación por Aire Disuelto	hasta un 99%	160 - 5200	30.000 - 680.000	0,51 - 0,03			

El análisis técnico económico se hará siguiendo el proceso convencional de tratamiento de aguas servidas, el que parte por un proceso de pre filtración (tratamiento primario), seguido de un tratamiento biológico (tratamiento secundario) y finalmente tratamiento fisicoquímico (tratamiento terciario) para depuración final. Se ha considera para el análisis aquellas tecnologías más usadas.

1.- Filtración o tratamiento Primario

La pre-filtración se usa como tratamiento primario para remover elementos de mayor tamaño como elementos flotantes, grasas, trapos, ramas, arenas, entre otros. Las alternativas son variadas dependiendo de las necesidades del tratamiento. Las más comunes son: Sedimentadores, centrifugas, tamiz rotatorio y parabólico y rejas en diferentes modelos.

Los costos de estos equipos varían por el grado de automatización. En la siguiente figura se muestra un gráfico con las inversiones obtenidas para estos cinco equipos en un rango de caudal de tratamiento que va desde 80 a 13.000 m³/día.

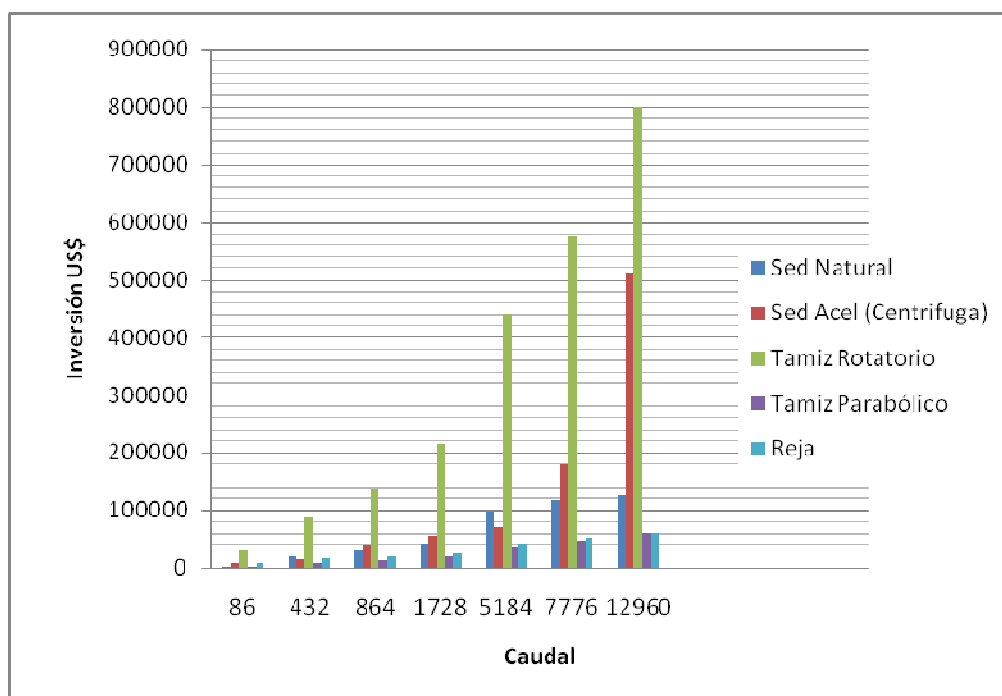


Figura 5.5.1: Gráfico de costos de inversión para alternativas de Tratamiento primario

En general todos estos equipos son ampliamente utilizados, por lo cual la elección entre una u otra alternativa necesariamente debe considerar otro tipo de factores, como por ejemplo espacio disponible, personal capacitado, energía eléctrica, caudal a tratar, materiales y disponibilidad en el mercado nacional, entre otras.

2.- Tratamiento Biológico o Secundario

Este tratamiento es el más importante para la remoción de materia orgánica, en esta etapa se produce la degradación de la materia orgánica por acción biológica. Las alternativas son variadas, entre las que destacan: Lombifiltro/Biofiltro, SBR, RALFS, Lagunas aireadas, lodos activados, reactor anaeróbico y Wetlands.

El análisis tecnológico se hará considerando una población pequeña, media y una de tamaño grande.

1.1 Poblaciones hasta 30.000 habitantes

Poblaciones con hasta 30.000 habitantes generan en promedio un caudal de 400 m³/día de aguas servidas. Las características de estas aguas es que están formadas por 99% de agua y un 1% de sólidos en suspensión y solución. Dentro de los componentes más habituales se encuentran

- Temperatura
- pH
- Sólidos en suspensión totales (SST)
- Materia orgánica valorada como DQO y DBO (a veces TOC)
- Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)
- Nitrógeno amoniacal y nitratos
- Agentes patógenos

Para evaluar las alternativas se analizará el nivel de la inversión requerida. Para ello, en la Figura 5.5.2 se presentan dos gráficos, en el primero una rango de caudal de tratamiento hasta 400 m³/día y en el segundo hasta 100 m³/día.

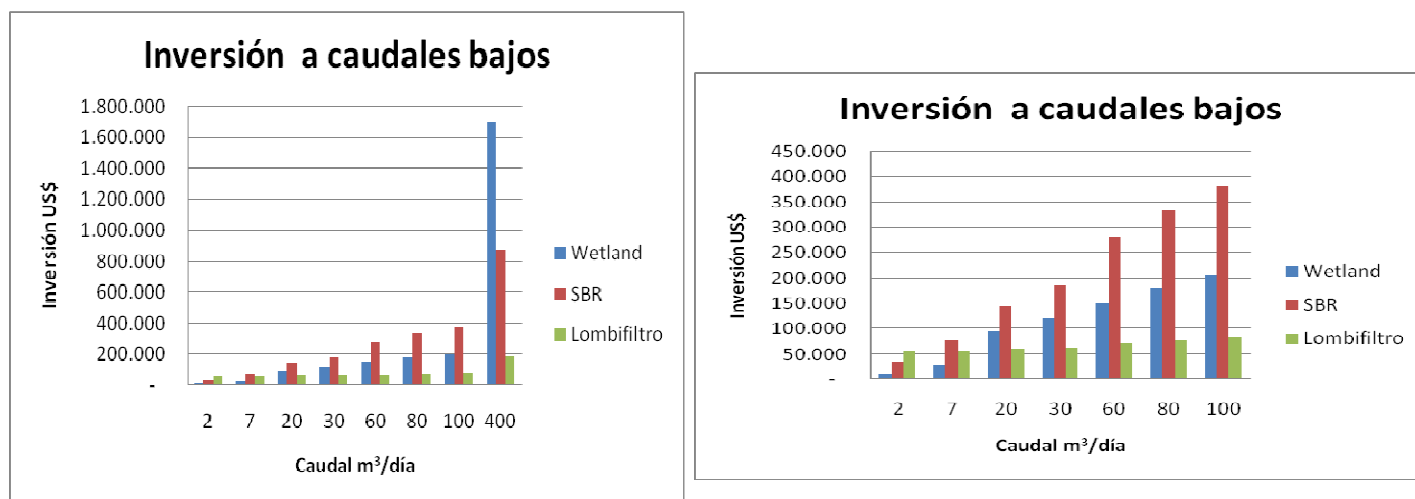


Figura 5.5.2: Gráfico de costos de inversión para las diferentes alternativas de tratamiento biológico para poblaciones pequeñas

Tal como se puede observar en la figura, a un caudal de 400 m³/día el costo de inversión de un wetland se eleva por una gran diferencia con los demás, razón por la que esta tecnología es recomendable usarla hasta un caudal de 100 m³/día. A caudales mayores se incrementan los costos debido a la extensa superficie de terreno requerido.

Hasta un caudal de 100 m³/día la alternativa más económica es Lombifiltro seguida de wetlands y SBR. Esto debido al mayor grado de equipamiento que posee la tecnología SBR con respecto a las otras dos. Para establecer la mejor opción es necesario comparar los costos operacionales. En la figura 5.5.3 se muestran los resultados.

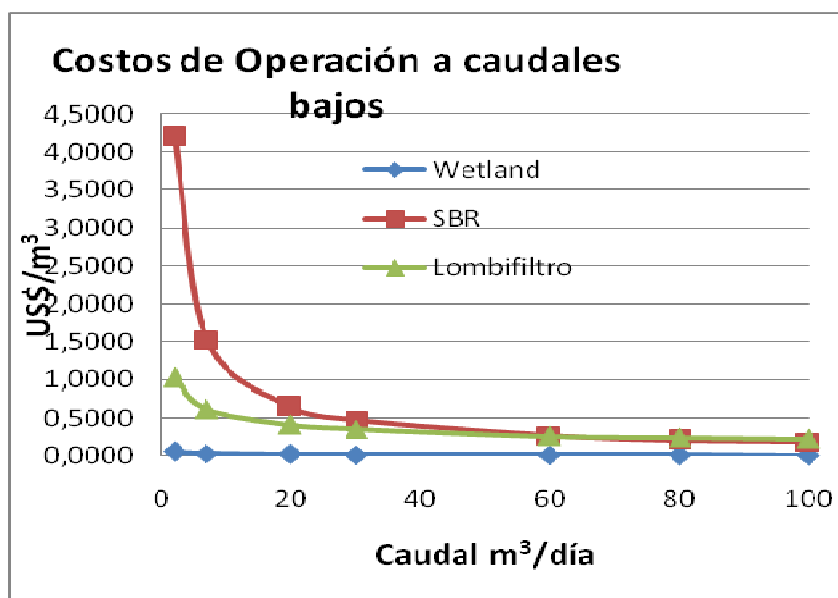


Figura 5.5.3: Gráfico de costos de inversión para las diferentes alternativas de tratamiento biológico

Los resultados para costos de tratamiento siguen la misma tendencia que los costos de inversión, la tecnología con mayores costos de operación es SBR, seguida de lombifiltro y wetland. Wetland destaca por sus bajísimos costos operacionales convirtiéndose en una opción costos efectiva.

1.2 Poblaciones hasta 350.000 habitantes

Poblaciones con hasta 350.000 habitantes generan en promedio un caudal de 5251 m³/día de aguas servidas. Las tecnologías mas usadas en este rango de tratamiento son: Lombifiltro, lagunas aireadas y lodos activados.

El análisis se realizará, al igual que en el caso anterior, a través de los costos de inversión y de los cotos de tratamiento. En la figura 5.5.4 se muestran dichos resultados.

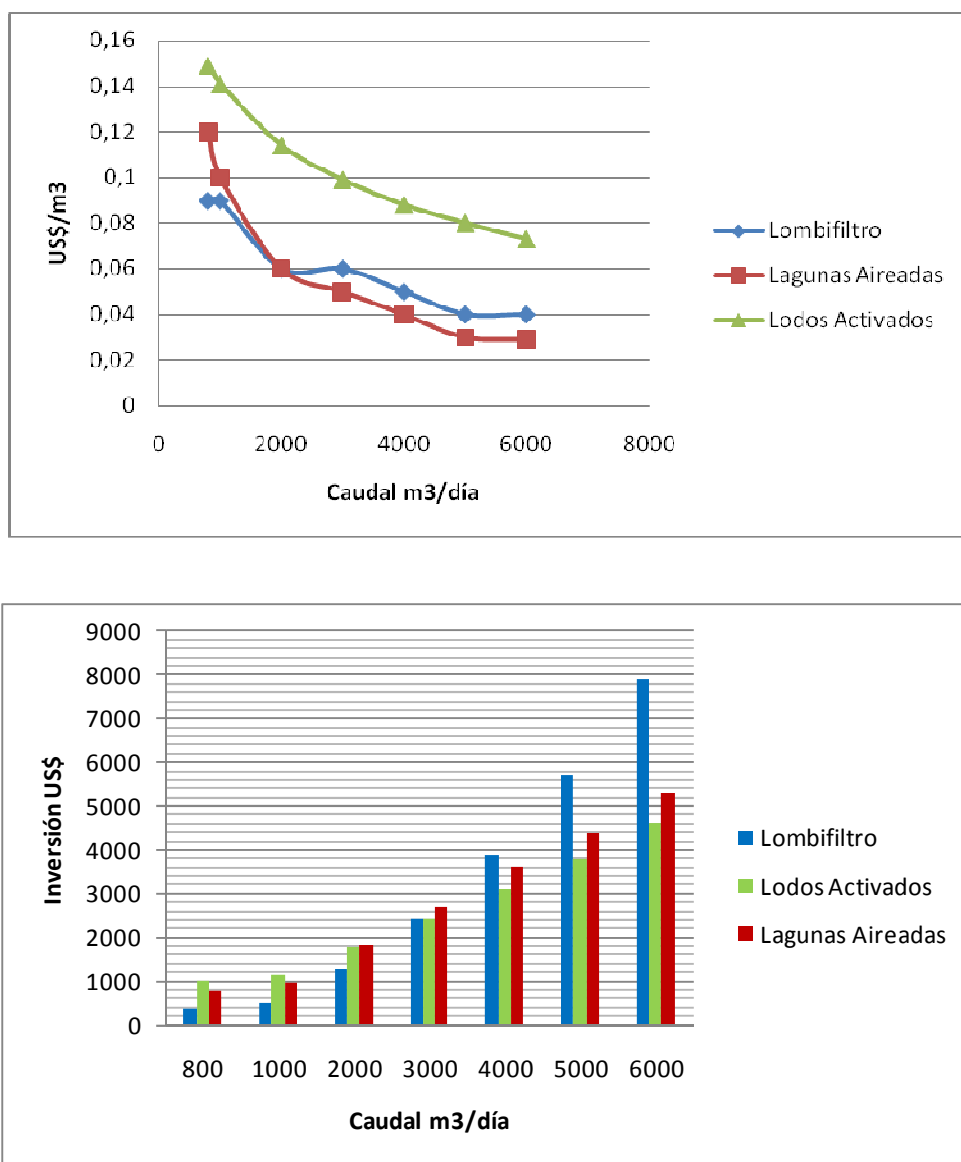


Figura 5.5.4: Gráfico de costos de inversión y costos operacionales para las diferentes alternativas de tratamiento biológico en poblaciones medianas

En poblaciones medianas, los menores costos de operación están dados por la utilización de lagunas aireadas y lombifiltros. Sin embargo, en términos de inversión se invierte la relación para pequeñas poblaciones, ya que la tecnología de lombifiltro arroja costos elevados, no así lodos activados que se convierte en la mejor opción en este rango de caudales.

1.3 Poblaciones hasta 1.000.000 habitantes

Las grandes ciudades del mundo usan la tecnología de lodos activados por su eficiencia de remoción. Si bien, lagunas aireadas es mucho más económica en inversión, dada su menor automatización de equipos, es poco usada debido a la extensa superficie que requiere.

En la figura 5.5.5 se muestran los gráficos obtenidos para inversión y costos operacionales.

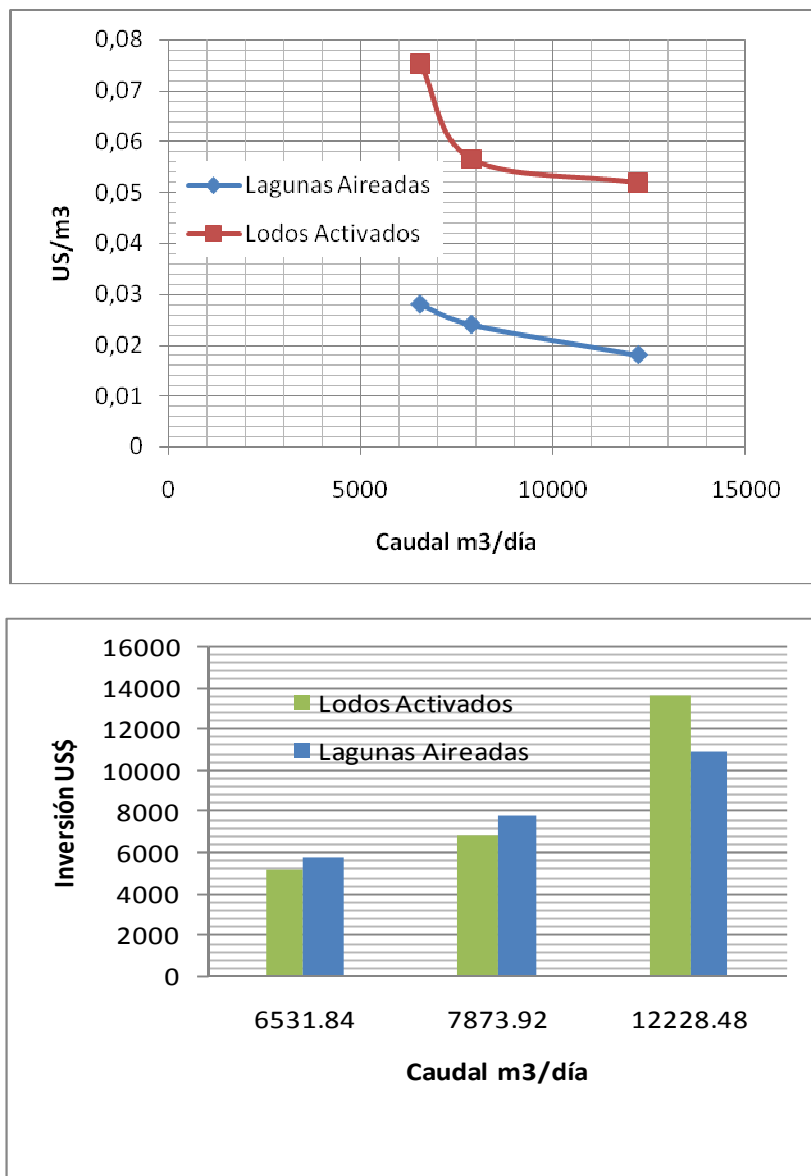


Figura 5.5.5: Gráfico de costos de inversión y costos operacionales para Lagunas Aireadas y Lodos Activados.

Para este rango de caudal combinando el costo de tratamiento y la inversión inicial, lagunas aireadas se presenta como mejor opción. Esto es debido a la simplicidad del tratamiento y la construcción de estas lagunas no significa construcción de equipos sobre el terreno como lo es con lodos activados.

3.- Tratamiento terciario o fisicoquímico

Dentro de las alternativas de tipo de tratamiento fisicoquímico las más usadas son Carbón activado, DAF, filtros AMIAD y las técnicas de membrana.

En general, para tratamiento de aguas servidas no se incluye un tratamiento terciario de osmosis inversa dado sus altos niveles de inversión. En algunas partes del mundo, donde el agua tratada se potabiliza para consumo humano se instalan estas plantas con técnicas de membrana para asegurar la generación de aguas de gran calidad.

En Chile la osmosis inversa y las técnicas de membrana en general se usan para desalación de aguas dulces salobres y aguas de mar.

En la siguiente figura se observa un gráfico que compara los costos de inversión para las tres tecnologías más usadas: Carbón Activado, DAF y Filtros AMIAD.

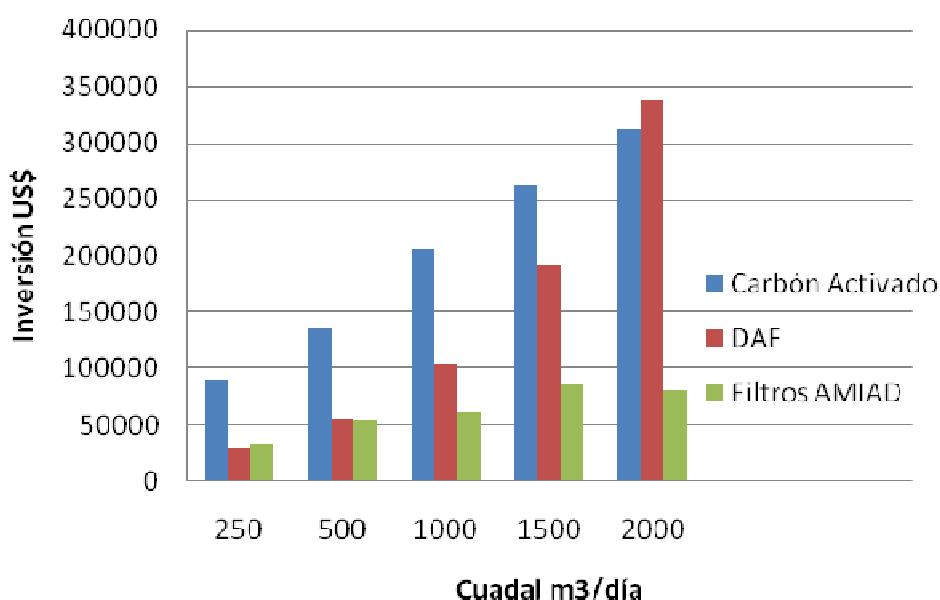


Figura 5.5.6: Gráfico de costos de inversión para Carbón Activado, DAF y Filtros AMIAD

En el gráfico se observa que a bajos caudales las alternativas de menor inversión son DAF y Filtros AMIAD y con una inversión mayor encontramos a carbón activado. A medida que el caudal de tratamiento se hace mayor, filtros AMIAD continúa teniendo bajos costos de inversión. Sin embargo, los costos de inversión de flotación por aire disuelto se incrementan considerablemente, llegando incluso a superar los costos por adsorción con carbón activado.

En la figura 5.5.7, se muestra un gráfico con los costos de tratamiento en US\$/m³ en un rango de caudal de 50 a 2500 m³/día.

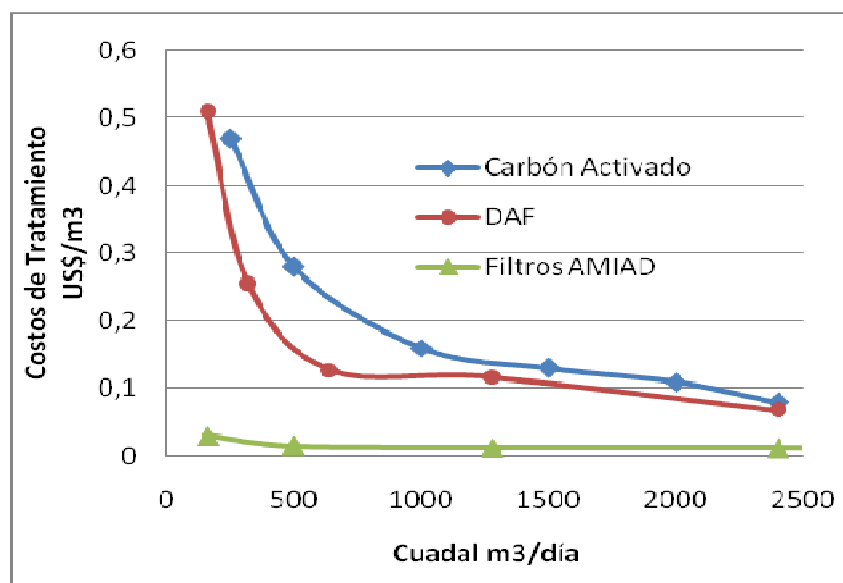


Figura 5.5.7: Gráfico de costos operacionales para DAF, Filtros AMIAD y Carbón Activado

Destacan los bajos costos para filtración AMIAD, esto se debe a que esta tecnología no requiere insumos químicos, la energía eléctrica es mínima y solo es necesaria para el retrolavado de los filtros que también es automático. Estos sistemas son una excelente opción para remoción de sólidos suspendidos totales.

5.6 Tecnologías para Remoción de Aceites y Grasas

Se entiende por Aceites aquellos que están en estado líquido y Grasas las que están en estado sólido. Corresponden a compuestos orgánicos formados por grupos de Ácidos grasos o Ácidos carboxílicos de 14-22 Átomos de C, triglicéridos y lípidos. La presencia de aceites y grasas es frecuente en efluentes industriales principalmente los provenientes de empresas agroalimentarias, aguas servidas, entre otras.

Dependiendo de las características particulares de cada efluente con contenido de Aceites y Grasas se debe seleccionar el tratamiento que resulte ser el mas apto, considerando ventajas técnicas y económicas. Para ello, se debe considerar las características químicas (como su polaridad, biodegradabilidad) y características físicas (como tamaño y aglomeración, entre otras) las que influirán en el tratamiento seleccionado. Por ejemplo, aceites y grasas no polares provenientes del proceso petrolero tenderán a ser no biodegradables y requerirán tratamientos más activos como separación física o degradación fisicoquímica. Por otro lado, aquellas grasas y aceites provenientes de la industria de alimentos tenderán a ser más biodegradables por lo que es posible aplicar técnicas de degradación biológica.

Las Aceites y Grasas en residuos industriales líquidos pueden ser tratados a través de tres procesos: biológico, físico y fisicoquímico. En la tabla se muestra un resumen de las eficiencias, costos y capacidad de tratamiento para todas las tecnologías que remueven, en forma directa, el parámetro aceites y grasas.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) min y máx	Inversión (US\$) min y máx	Costo trat (US\$/m ³) min y máx
Aceites y Grasas	Biológico	Biofiltro / Lombrifiltro	80%	20 - 300	60.000 - 150.000	0,45 - 0,14
		Coalescencia	95 - 99%	50 - 3000	5.500 - 26.600	0,17 - 0,01
	Físico	Skimmer	98%	0,2 - 24	3848 - 8472	2,49 - 0,19
		Flotación por Aire Disuelto	90%	160 - 5200	30.000 - 680.000	0,51 - 0,03
		Bekosplit	90%	0,16 - 3,20	20.300 - 69.700	10,1 - 0,92
	Fisicoquímico	Oxidación, POAS	90%	10 - 5000.	90.500 - 3.800.000	2,6 - 0,6

1.- Tecnologías de tratamiento Biológico:

A través de la biodegradación de los Aceites y Grasas mediante acción microbiológica. Entre las tecnologías mayormente utilizadas para reducir este parámetro se encuentran: Biofiltro/Lombrifiltro; RALFS y Wetlands, pero sólo Lombrifiltro se especializa en la degradación de aceites y grasas provenientes de aguas servidas domésticas. Esta tecnología no es adecuada para la remoción específica de AyG de otras matrices, además esta tecnología es limitada en capacidad de tratamiento.

2.- Tecnologías de tratamiento Físico:

Este tipo de tratamiento es aplicado cuando el contenido de materia grasa separable es considerable, en estos casos se instalan sistemas de separación agua-grasa conocidos como "fat trap", entre ellos destacan

las siguientes tecnologías: Coalescencia, Skimmer, Flotación por aire disuelto (DAF) y Bekosplit, entre otros.

En general, tanto Bekosplit como Skimmer se usan para tratamiento de bajos caudales, máximo 25 m³/día. Ambas tecnologías se usan en propósitos distintos, por ejemplo a escala industrial el sistema Skimmer es usado en el tratamiento de derrames de petróleo, in-situ y en escalas menores se utiliza para piscinas y peceras. Por otra parte el sistema Bekosplit se ocupa para la recuperación de aceites dentro del proceso productivo, por ejemplo en la industria de aceite comestible, es en este tipo de aplicaciones que este sistema se vuelve costo eficiente a través de la recuperación de valor, ya que el costos de estos equipos es considerablemente mayor a los Skimmers.

Para el tratamiento de caudales mayores, son dos las alternativas tecnológicas más utilizadas; Coalescencia y Flotación por aire disuelto (DAF). Coalescencia es un tratamiento altamente específico para la remoción de aceites y grasas con bajos costos de implementación y tratamiento, su mayor eficiencia se logra en concentraciones no diluidas superiores a 50 mg/L. A concentraciones menores que eso su eficiencia de remoción disminuye. Flotación por Aire disuelto (DAF), es una tecnología eficiente, de costos bajos y asegura un alto rendimiento en concentraciones diluidas. Dependiendo de la matriz a tratar se aconseja el uso de una u otra tecnología, ambas son altamente recomendables.

En la Figura 5.6.1: se muestran dos gráficos, el primero que compara los costos de tratamiento en un amplio rango de caudal para Coalescencia y DAF. En el segundo gráfico se muestra la inversión para ambas tecnologías.

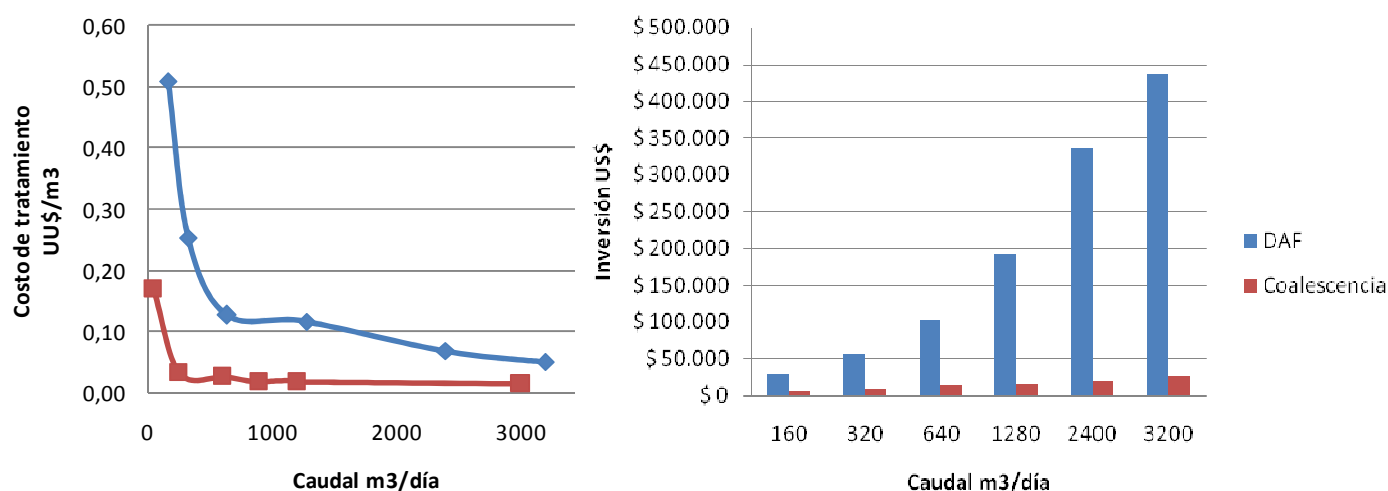


Figura 5.6.1 Gráficos de costos de operación y de inversión para DAF y coalescencia

Al analizar los costos, se observa que la tecnología de Coalescencia posee menores costos operacionales por m³ de tratamiento y además mucha menor inversión inicial. La diferencia de costos se debe principalmente a que la tecnología de Flotación por Aire Disuelto requiere de un burbujeo con aire que incrementa los costos operacionales y también la inversión, pero sin duda esto no debe ser una limitante para la implementación de esta tecnología ya que además de remover AyG es capaz de eliminar Sólidos Suspendidos Totales convirtiéndose en un excelente tratamiento primario.

3.- Tecnologías de tratamiento Físicoquímico

Estos tratamientos tienen diferentes propósitos, las técnicas de oxidación degradan y destruyen física o químicamente las estructuras de las grasas permitiendo un abatimiento completo, mucho más eficiente, pero con mayores costos asociados al uso de reactivos químicos constantes en comparación a los métodos de separación física.

Se utiliza oxidación con Ozono para esta remoción, para lograr una calidad de efluente óptimo y reutilizable. También se logra un lodo estabilizado no tóxico que permite su fácil disposición. El gran nivel de inversión y costos de tratamiento dificultan su implementación a nivel industrial, tal como se observa en la figura 5.6.2.

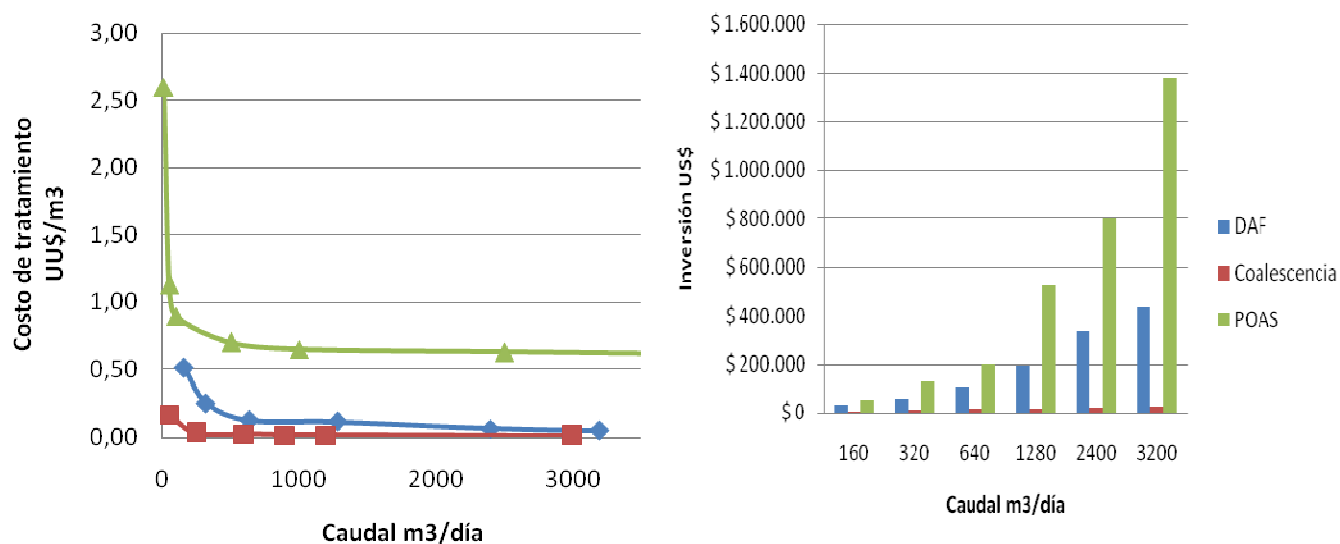


Figura 5.6.2 Gráficos de costos de operación e inversión para DAF, Coalescencia y POAS

5.7 Tecnologías para Remoción de Color Verdadero

La elección de la tecnología más adecuada dependerá directamente de la naturaleza fisicoquímica del o los compuestos generadores de color.

Las tecnologías disponibles a nivel industrial para la remoción de color son:

- Wetland
- Técnicas de membrana: Nanofiltración, Osmosis Inversa, Ultrafiltración, Electrodialisis
- Carbón activado
- Intercambio iónico
- Oxidación
- Coagulación y floculación

En la tabla se muestra el detalle de las eficiencias y costos para las tecnologías capaces de remover color.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) mín y máx	Inversión (US\$) mín y máx	Costo trat (US\$/m ³) mín y máx
Color	Biológico	Wetlands	90%	2 - 100	13.000 - 206.000	0,05 - 0,006
		Nanofiltración	99%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,6 - 0,3
	Físico	Osmosis Inversa	99%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32
		Electrodialisis	90 a 100%	860 - 86000	1.300.000 - 20.000.000	0,51-0,11
		Ultrafiltración	55%	1514 - 378541	1.700.000 - 47.000.000	0,54 - 0,28
		Carbón Activado	95 a 99%	250 - 2000	89.000 - 312.000	0,47 - 0,11
	Fisicoquímico	intercambio iónico	99%	500 - 31000	770.000 - 9.100.000	0,35 - 0,03
		Coagulación y/o Floculación	90%	480 - 16000	48.411 - 800.283	0,018 - 0,014
		oxidación con agua supercritica	90 a 100%	10 - 5000	100.500 - 4.200.000	4 - 0,96

Nuevamente es posible clasificar estas alternativas a través del nivel de inversión. En la figura 5.7.1 se muestra un gráfico comparativo entre todas las alternativas para remoción de color a un caudal establecido, en este caso a 200 m³/día.

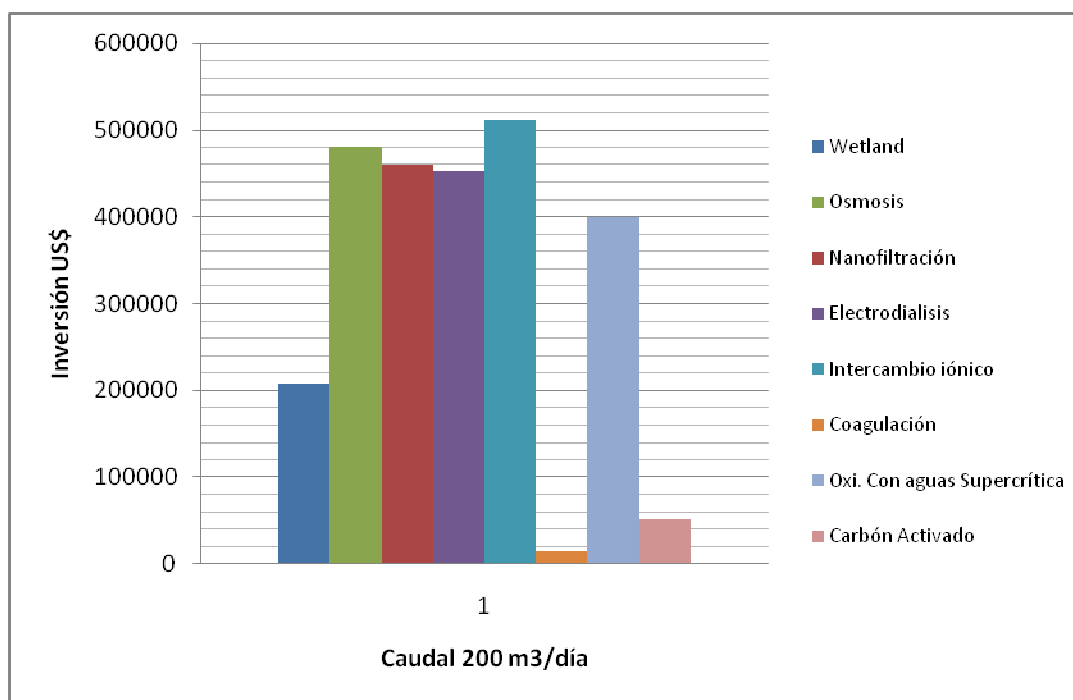


Figura 5.7.1: Gráfico comparativo de inversión para un tratamiento de 200 m³/día para las tecnologías que remueven color

En el gráfico, se observan tecnologías con nivel de inversión bajo, medio y alto. En el nivel alto se encuentran las técnicas de membrana como osmosis, nanofiltración y electrodiálisis y además intercambio iónico y Oxidación con agua Supercrítica, todas por ser tecnologías que requieren de un alto nivel de automatización del proceso y equipos sofisticados. El pro de estas tecnologías es su alta efectividad y capacidad de remoción simultanea de parámetros.

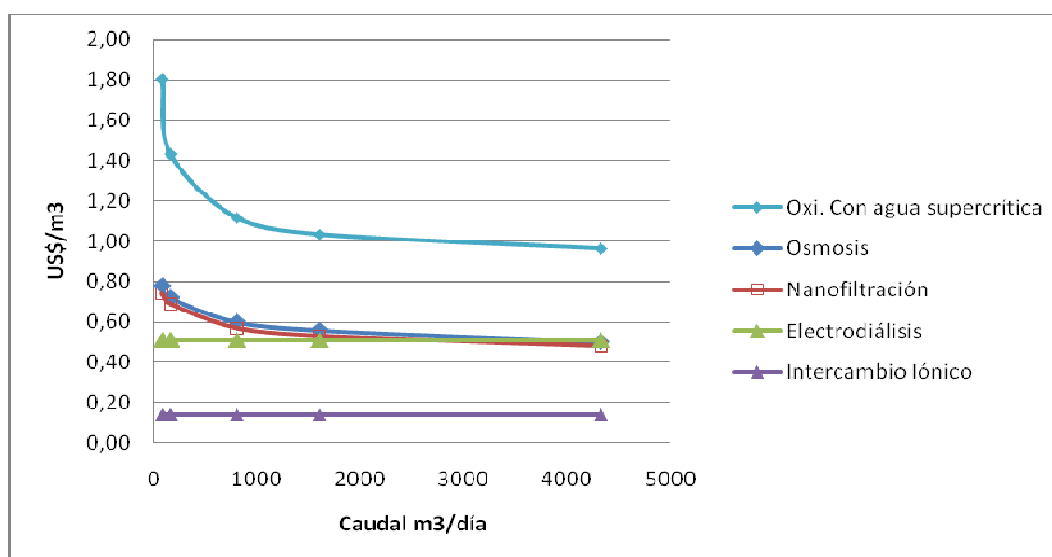


Figura 5.7.2: Gráfico comparativo de costos operacionales para las tecnologías que remueven color

Dentro de las técnicas de membrana, todas las opciones presentan costos en los mismos niveles, sin embargo, destacan nanofiltración como la mejor opción ya que elimina totalmente todo tipo de color y es más económica que la ósmosis. En términos de costos operacionales destaca intercambio iónico.

Es importante considerar que la tecnología de oxidación con agua supercrítica tiene la característica de degradar compuestos orgánicos generadores de color por involucrar un proceso fisicoquímico de oxidación, las demás tecnologías sólo separan el color del efluente.

En el segmento medio se encuentra la tecnología de degradación biológica de color, Wetland. Esta tecnología solo puede ser utilizada en efluentes que contengan color pero un color generado por compuestos orgánicos no tóxicos. Otra limitación para el uso de esta tecnología es el caudal de tratamiento, se recomienda su uso solo hasta 100 m³/día, para caudales mayores los costos de inversión se quintuplican principalmente porque se requieren enormes dimensiones de tierra para su implementación.

Las tecnologías clasificadas en el nivel más bajo de inversión son: carbón activado y coagulación. La tecnología más económica de implementación es coagulación, pero es importante considerar que ni carbón activado ni coagulación degradan los compuestos generadores de color. Además, en el caso de coagulación la toxicidad del efluente es traspasada al lodo, lo que se transforma en una externalidad negativa al tener que disponer estos residuos en un relleno de seguridad incrementándose los costos. Por lo que en este caso es recomendable para ser una unidad de apoyo (tanto en el tratamiento primario como terciario) siempre y cuando se tenga la seguridad que el lodo generado no sea considerado peligroso y se generen volúmenes de fácil disposición.

En general, se recomienda considerar las características fisicoquímicas de él o los compuestos generadores de color, su toxicidad, su reactividad, entre otras. Por ejemplo para compuestos orgánicos de carácter no tóxicos, se recomienda wetland por sus bajos costos de operación, considerando la limitación de capacidad hasta 1000 m³/d.

Para cualquier compuesto generador de color de carácter tóxico (como fenoles, organoclorados, etc) se recomienda el uso de intercambio iónico como opción más económica. Para grandes capacidades de tratamiento entra en competición la tecnología nanofiltración debido a que es más compacta que las demás.

5.8 Tecnologías para Remoción de AOX

Los AOX son sustancias químicas orgánicas que contienen uno ó varios átomos de un elemento halógeno (generalmente cloro, aunque existen compuestos formados con bromo e Yodo). Pueden ser sustancias simples y volátiles, como es el caso del triclorometano (cloroformo), ó moléculas orgánicas complejas como las dioxinas y los furanos, que pueden presentar gran variedad de propiedades físicas.

El foco principal de contaminación de estos compuestos tiene su origen en la industria del papel, dónde se utiliza la clorina para el blanqueo de las fibras de celulosa. Otras fuentes minoritarias de emisión se generan durante la desinfección con cloro del agua potable de las piscinas y de las aguas de proceso en lavaderos.

La mayoría de estos compuestos son tóxicos en concentraciones bajas, ya que son muy persistentes en el medio ambiente y con tendencia a bioacumularse, llegando incluso a transmitirse hasta el ser humano a través de la cadena alimenticia.

En general, las tecnologías disponibles para el tratamiento de efluentes con contenido de AOX son de dos tipos, las físicas que sólo separan los AOX y los tratamientos fisicoquímicos de oxidación que pretenden degradar estos compuestos hasta moléculas más simples y más inocuas. En la siguiente tabla se muestran las tecnologías, su eficiencia, costos y capacidad de tratamiento.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) mín y máx	Inversión (US\$) mín y máx	Costo trat (US\$/m ³) mín y máx
AOX	Físico	Arrastre por Aire	90 a 95%	80 - 16000	15.000-354.000	1,09 - 0,03
		Osmosis Inversa	99%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32
		Ultrafiltración	55%	1514 - 378541	1.700.000 - 47.000.000	0,54 - 0,28
	Fisicoquímico	Carbón Activado	95 a 99%	250 - 2000	89.000 - 312.000	0,47 - 0,11
		Electro-oxidación	90 a 100%	10 - 5000	45.214 - 1.882.151	4,24 - 0,98
		Oxidación Avanzada Catalítica	90 a 100%	10 - 5000	90.500 - 3.800.000	2,6 - 0,6
		Oxidación con Aguas Supercrítica	90 a 100%	10 - 5000	100.500 - 4.200.000	4 - 0,96
		Oxidación con aire húmedo	90 a 100%	10-5000	75000- 3.136.000	3,51-0,81

1.- Arrastre por Aire versus Osmosis Inversa:

Ambas tecnologías separan los AOX del efluente líquido, el arrastre por aire lo hace a través de una contra-corriente de aire aprovechando la volatilidad de dichos compuestos. Por otra parte, lo que hace la osmosis inversa es filtrar y retener en sus membranas a estos compuestos. Ninguna de las dos técnicas degrada los AOX, por lo que en ambos casos se deberá implementar un sistema posterior de tratamiento, en el caso de arrastre por aire se recomienda un sistema de captación y quema, mientras que en el caso de osmosis inversa utilizar un tratamiento al agua de rechazo.

En la siguiente figura se muestran dos gráficos que dan cuenta de los costos operacionales y los costos de inversión para un rango de 0 a 1700 m³/día.

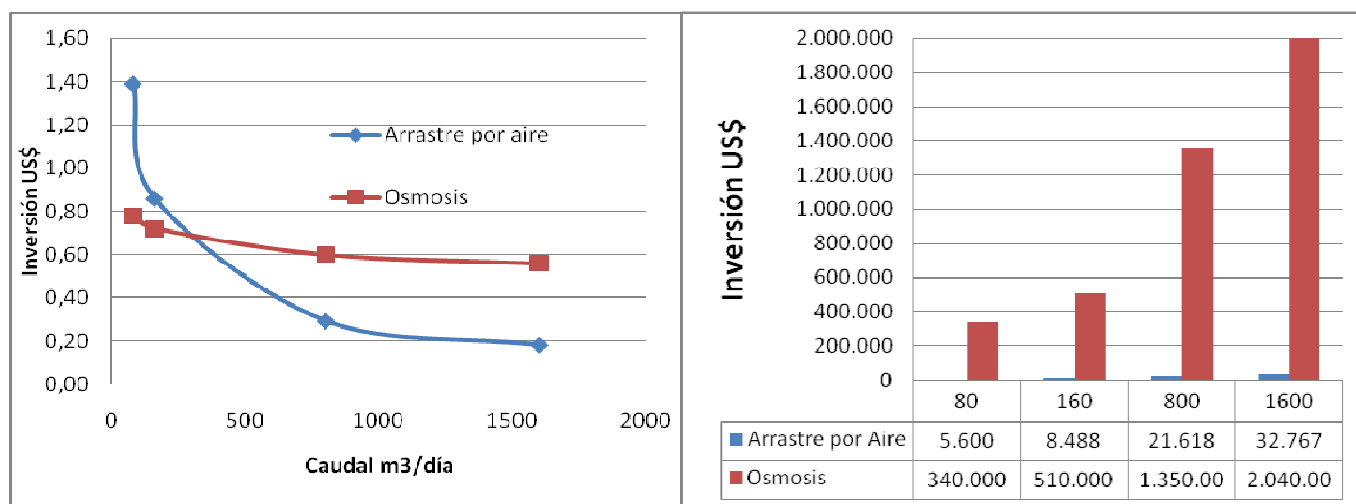


Figura 5.8.1: Gráficos de inversión y costos de tratamiento para Arrastre por Aire y Osmosis

En la figura se observa que los costos asociados al uso de la tecnología de arrastre por aire son menores que al usar la tecnología de osmosis inversa, tanto en los costos de operación como en los de inversión. Por ahora, arrastre por aire se perfila como la opción más económica.

2.- Carbón Activado versus Técnicas de Oxidación

Al considerar las tecnologías de tratamiento fisicoquímico es posible comparar adsorción con carbón activado versus las tecnologías de oxidación, las que incluyen a: oxidación avanzada catalítica, oxidación con agua Supercrítica, electro-oxidación y oxidación con aire húmedo. En la siguiente figura se muestran los costos de inversión para dichas tecnologías.

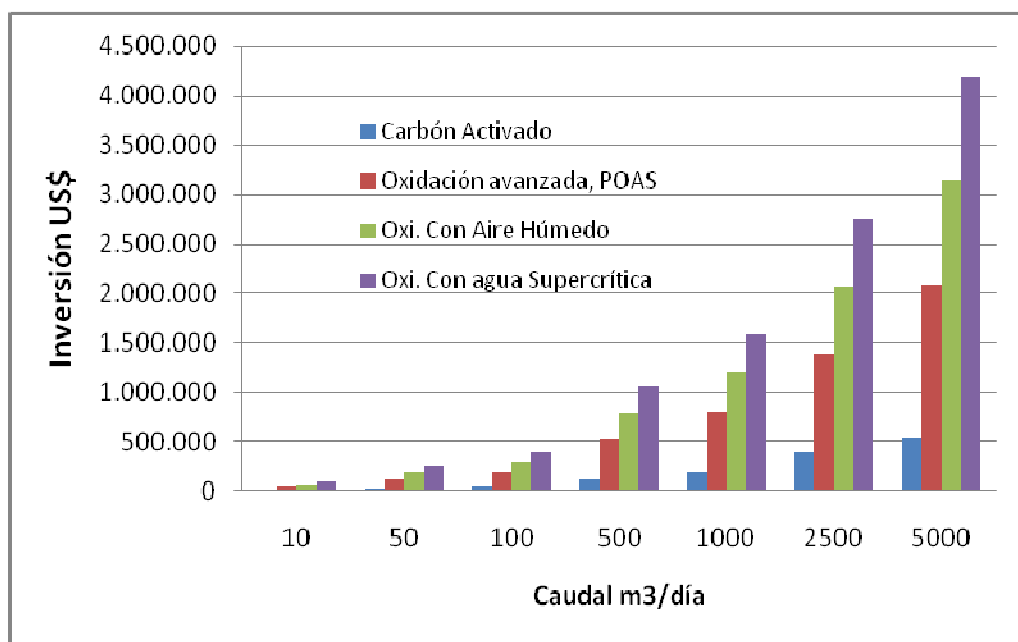


Figura 5.8.2: Gráficos de inversión distintas tecnologías de tratamiento fisicoquímico

Según los resultados mostrados en la figura, se observa una marcada diferencia entre las distintas formas de oxidación versus los costos de inversión obtenidos si se implementara adsorción con carbón activado, siendo ésta última la inversión mas baja. Es relevante considerar además los costos operacionales, los que están graficados en un rango de tratamiento entre 0 a 5000 m³/día.

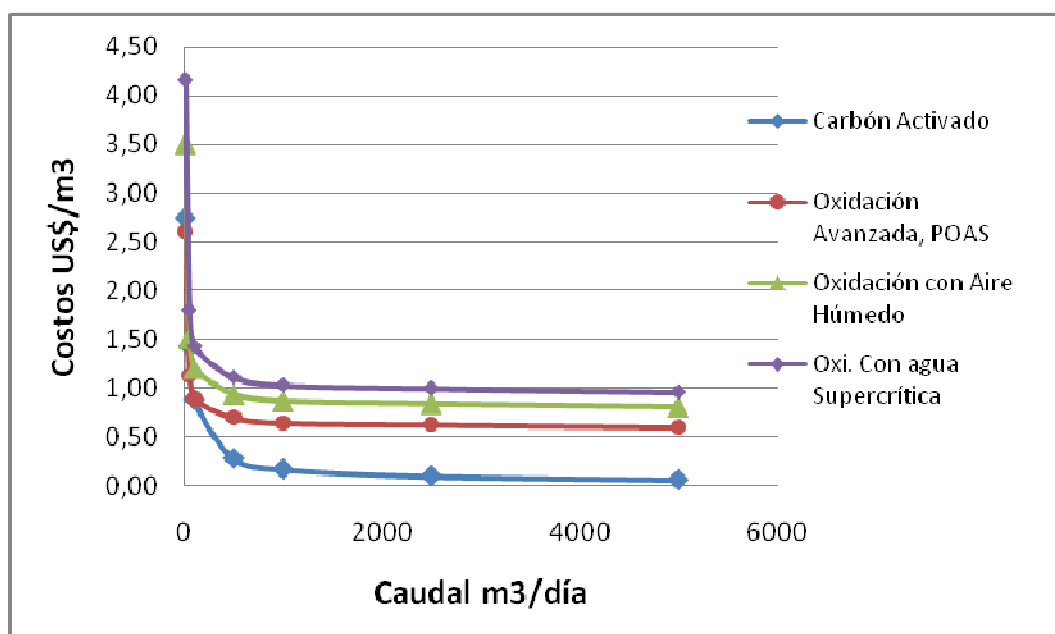


Figura 5.8.3: Gráficos de costos operacionales para distintas tecnologías de tratamiento tipo fisicoquímico

Los resultados mostrados en la figura siguen la misma tendencia que para que los costos de inversión, la tecnología más económica sigue siendo adsorción con carbón activado. Cabe destacar que esta tecnología no degrada los AOX y requiere de un tratamiento posterior de regeneración térmica e incineración de AOX, lo que incrementa los costos. Considerando lo expuesto se recomienda el uso de Oxidación Avanzada catalítica la que puede ser usada con ozono o peróxido + catalizador como oxidante.

5.9 Tecnologías para Remoción de DBO₅

La remoción de DBO₅ o materia orgánica en general es principalmente requerida en efluentes provenientes de la agroindustria y en aguas servidas de origen doméstico. Las alternativas mas usadas son:

- 1.- Tratamiento biológico: Biofiltro/lombifiltro, Lodos Activados, Lagunas Aireadas, SBR, RALFS, Reactor anaeróbico y Wetlands.
- 2.- Tratamiento físico: Técnicas de membrana como osmosis inversa, nanofiltración y ultrafiltración
- 3.- Tratamiento fisicoquímico: Carbón activado y oxidación avanzada catalítica, POAS.

En la siguiente tabla se muestra información relevante sobre las tecnologías, sus costos, eficiencias y capacidad de tratamiento.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) mín y máx	Inversión (US\$) mín y máx	Costo trat (US\$/m ³) mín y máx
DBO	Biológico	Biofiltro / Lombifiltro	95%	20 - 300	60.000 - 150.000	0,45 - 0,14
		Lodos Activados	90 - 95%	19 - 507.000	66.000 - 315.000.000	0,28 - 0,01
		Lagunas Aireadas	hasta un 90%	58 - 57600	88.000 - 50.500.000	0,76 - 0,01
		SBR	85 - 95%	5 - 200	63.000 - 578.000	1,62 - 0,09
		RALFS	80 - 95%	50 - 50000	93.000 - 5.900.000	1,02 - 0,006
		Reactor anaeróbico	hasta 90%	58 - 30000	14000 - 3.872.966	1,25 - 0,018
		Wetlands	90%	2 - 100	13.000 - 206.000	0,05 - 0,006
	Físico	Nanofiltración	99%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,6 - 0,3
		Osmosis Inversa	100%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32
	Fisicoquímico	Ultrafiltración	85 - 95%	1514 - 378.000	1,7 MM a 47 MM	0,549 a 0,281
		Carbón Activado	95 a 99%	250 - 2000	89.000 - 312.000	0,47 - 0,11
		Oxidación Avanzada Catalítica	90 a 100%	10 - 5000	90.500 - 3.800.000	2,6 - 0,6

El análisis que se muestra en las figuras 5.9.1, 5.9.2 y 5.9.3 es según el nivel de inversión de las tecnologías para tres caudales de tratamiento.

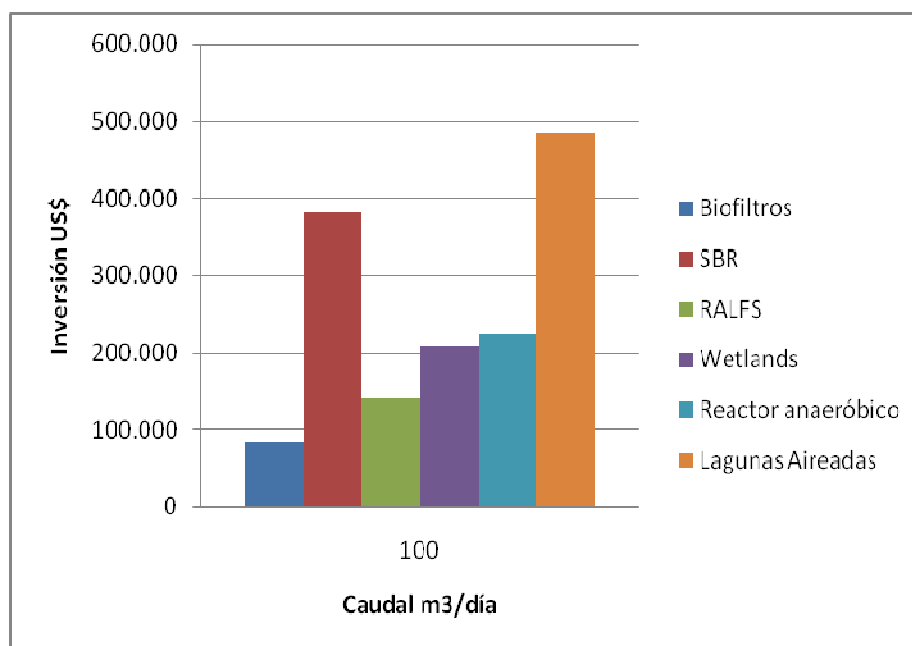


Figura 5.9.1 Gráficos de costos de inversión para Biofiltro, SBR, RALFS, Wetlands, Reactor Anaeróbico y Lagunas Aireadas.

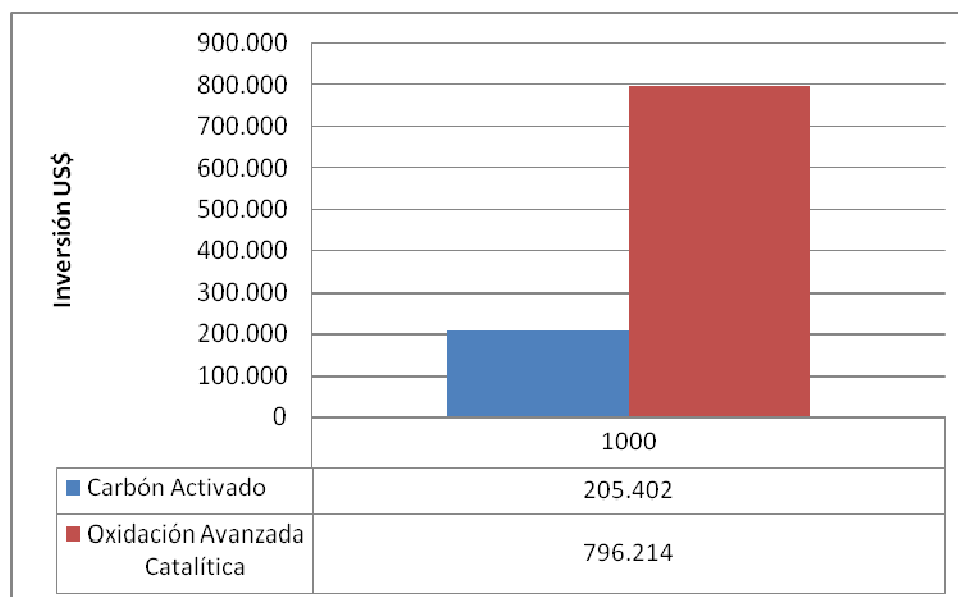


Figura 5.9.2: Gráficos de costos de inversión para Carbón Activado y Oxidación Avanzada Catalítica

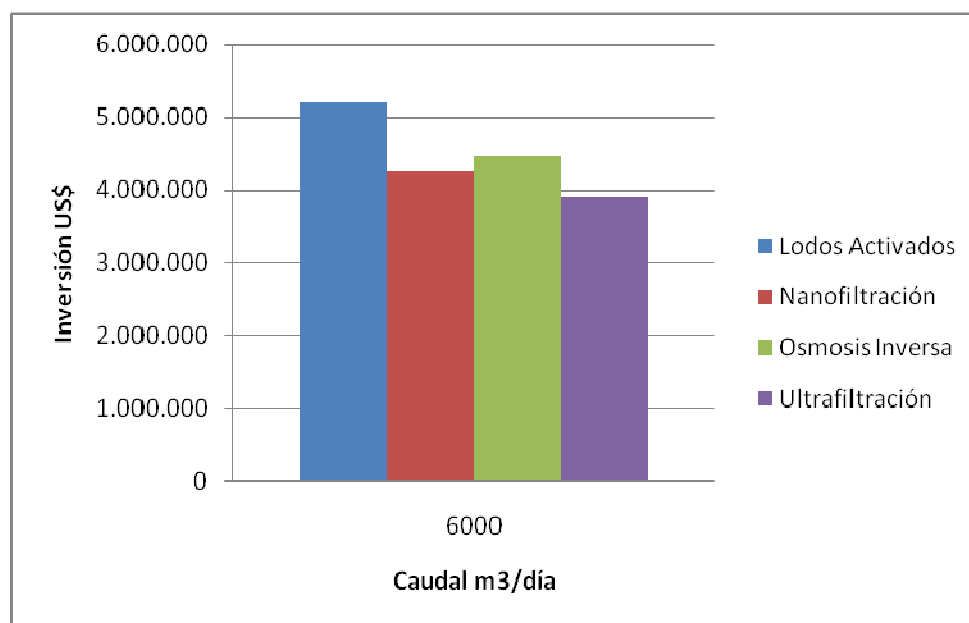


Figura 5.9.3: Gráficos de costos de inversión para Carbón Activado y oxidación avanzada

Tal como se señaló en el análisis técnico económico para las tecnologías que remueven sólidos suspendidos totales, la elección de una u otra tecnología dependerá del nivel de inversión disponible, del caudal de tratamiento y del tipo de efluente a tratar. Se recomienda siempre para la remoción de DBO que el tratamiento principal sea biológico, siempre que la toxicidad del efluente lo permita. Luego, en función de la calidad del efluente que se quiera alcanzar se incorporen otras técnicas.

Adicionalmente para hacer un tratamiento de altísimos caudales y cargas, mayores a los informados anteriormente, la tecnología utilizada es la de Lodos Activados debido a su alta eficiencia de remoción, su flexibilidad de tratamiento y a que la inversión a estos niveles puede ser realizada sin mayores inconvenientes, a comparación a la demás tecnologías. La siguiente tabla y figura muestra la evaluación de inversión respecto a las tres grandes plantas de tratamiento a base de Lodos Activados que existen en Chile, y son utilizados para la potabilización de aguas consumidas por los habitantes de la región metropolitana y en la ciudad de Concepción.

Población Hab	Caudal m3/d	Caudal L/s	Inversión US\$
500.000	103.680	1.200	50.000.000
1.700.000	388.800	4.500	150.000.000
3.200.000	777.600	9.000	300.000.000

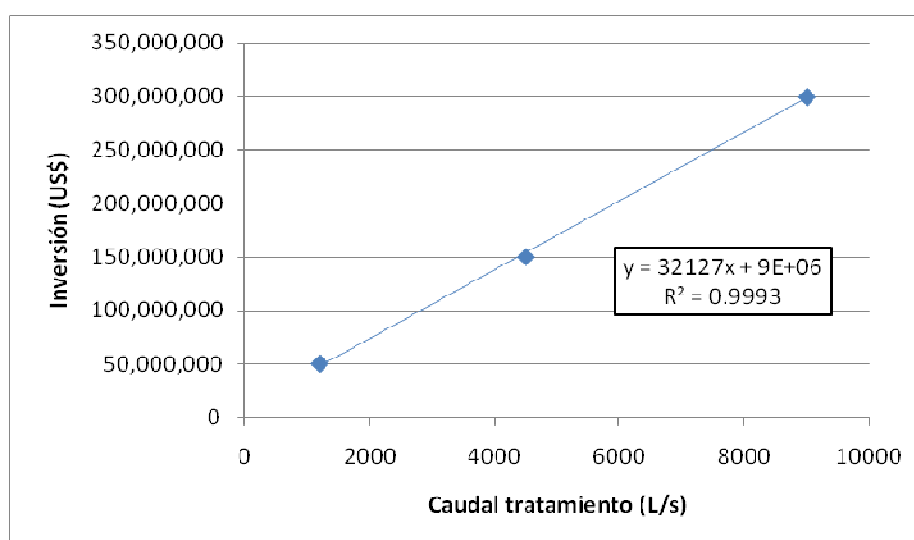


Figura n°27: Evaluación de inversión de la tecnología Lodos Activados para grandes poblaciones

Los costos de tratamiento para este nivel de operación bordean los US\$ 0,05 por metro cúbico. Sin embargo, el costo de operación pueden variar según los contratos adquiridos para los insumos (reactivos químicos) y suministros (electricidad, agua, gas, etc).

5.10 Tecnologías para Remoción de Nitrógeno

La selección de las tecnologías para remoción de nitrógeno total incluyeron la remoción de Nitrógeno orgánico (Amoníaco ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$); Nitritos (NO_2^-) y Nitratos (NO_3^-)).

En la siguiente tabla se muestran todas las alternativas detectadas en este estudio.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Especie	Eficiencias de Remoción	Caudal (m^3/d) min y máx	Inversión (US\$) min y máx	Costo trat (US\$/ m^3) min y máx
Nitrogeno	Biológico	Biofiltro / Lombrifiltro	$\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$	60 a 80%	20 - 300	60.000 - 150.000	0,45 - 0,14
		Lodos Activados	$\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$	70 a 90%	19 - 507.000	66.000 - 315.000.000	0,28 - 0,01
		Lagunas Aireadas	$\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$	50 a 75%	58 - 57600	88.000 - 50.500.000	0,76 - 0,01
		SBR	$\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$	90%	5 - 200	63.000 - 578.000	1,62 - 0,09
		Reactores Anaeróbicos	$\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$	hasta 70%	58 - 30000	14000 - 3.872.966	1,25 - 0,018
		RALFS	$\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$	90%	50 - 50000	93.000 - 5.900.000	1,02 - 0,006
		Wetlands	$\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$	90%	2 - 100	13.000 - 206.000	0,05 - 0,006
	Físico	Arraste por aire	Amoníaco	90 a 95%	80 - 16000	15.000-354.000	1,09 - 0,03
		Osmosis	Nitritos, nitratos y amonio	100%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32
		Nanofiltración	Nitritos, nitratos y amonio	90%	1500 - 379000	1.800.000 - 50.000.000	0,59-0,3
		electrodialisis	Nitritos, nitratos y amonio	90 a 100%	860 - 86000	1.300.000 - 20.000.000	0,51-0,11
	Fisicoquímico	Intercambio iónico	Nitritos, nitratos y amonio	0.99	500 - 31000	770.000 - 9.100.000	0,35 - 0,03
		Coagulación y/o Floculación	Nitritos, nitratos y amonio	90%	30 - 1000	48.411 - 800.284	0,018 - 0,0012
		Electrooxidación	Amoníaco	90 a 100%	10-5000	45000- 1.882.000	4,24-0,98
		oxidación con aire húmedo	Amoníaco	90 a 100%	10-5000	75000- 3.136.000	3,51-0,81

Con respecto a los tratamientos de tipo biológico, es posible decir que a través de un análisis global se pueden reconocer dos grupos, los de baja capacidad y los de alta. En los de baja tenemos SBR, wetland y biofiltro, siendo en términos de eficiencia y costos igualmente competitivos. En este caso, otro tipo de factores serán relevantes en la elección: por ejemplo disponibilidad de espacio, condiciones climáticas, entre otros.

En los de alta capacidad tenemos Lodos, lagunas y RALFS. Se diferencian por su grado de mecanización y por el espacio requerido. Para lagunas y lodos se necesita gran espacio pero baja mecanización. Por otro lado, los RALFs son compactos y altamente mecanizado, lo que influye negativamente en el costo de tratamiento.

Lodos y Lagunas son semejantes en su fundamento de tratamiento, pero lagunas necesitan un área mayor de implementación. A nivel mundial son tecnologías ampliamente utilizadas. En general, Lodos es utilizada para medianas a grandes poblaciones, mientras que Lagunas para bajas a medianas poblaciones.

La remoción total del Nitrógeno no es posible lograrlo solo con una tecnología. Lo más recomendable es aprovechar las características de nutriente y usar un tratamiento biológico de bajo costo. Y a esto sumarle una etapa de tratamiento terciario, que dependiendo de las características del efluente puede ser físico o fisicoquímico.

Considerando los costos operacionales, US\$/ m^3 , en un rango de operación de 1 a 100 $\text{m}^3/\text{día}$, la mejor opción en términos de obtener los costos operacionales más bajos corresponde al uso de la tecnología

Wetland, seguida por Lombifiltro y finalmente SBR. Desde los 30 m³/día SBR y Lombifiltro muestran los mismos costos de operación.

Al considerar la inversión en el mismo rango de caudales aparece que la tecnología de Lombifiltro es la más económica desde los 20 m³/día. La tecnología Wetland posee costos de implementación medios en comparación a SBR y Lombifiltro, pero costos operacionales tendientes a nulo lo que lo hace una excelente alternativa considerando las ventajas adicionales que ofrece como paisajismo, fácil manejo y gran eficiencia de remoción.

La tecnología SBR, si bien técnicamente es altamente eficiente y además más versátil en términos de los parámetros que remueve, es también mas sofisticada, con mayor grado de mecanización y por lo mismo mayor inversión en todo rango de tratamiento.

Otra forma efectiva de analizar las opciones es considerar la especiación de las distintas formas del nitrógeno y comparar las tecnologías afines, por ejemplo para remoción de amoníaco las tecnologías son tres: Arrastre por aire, Oxidación con aire húmedo y electro-oxidación. En la figura 5.10.1 se muestran dos gráficos, el primero con el nivel de inversión para estas tres tecnologías y el segundo con los costos operacionales asociados.

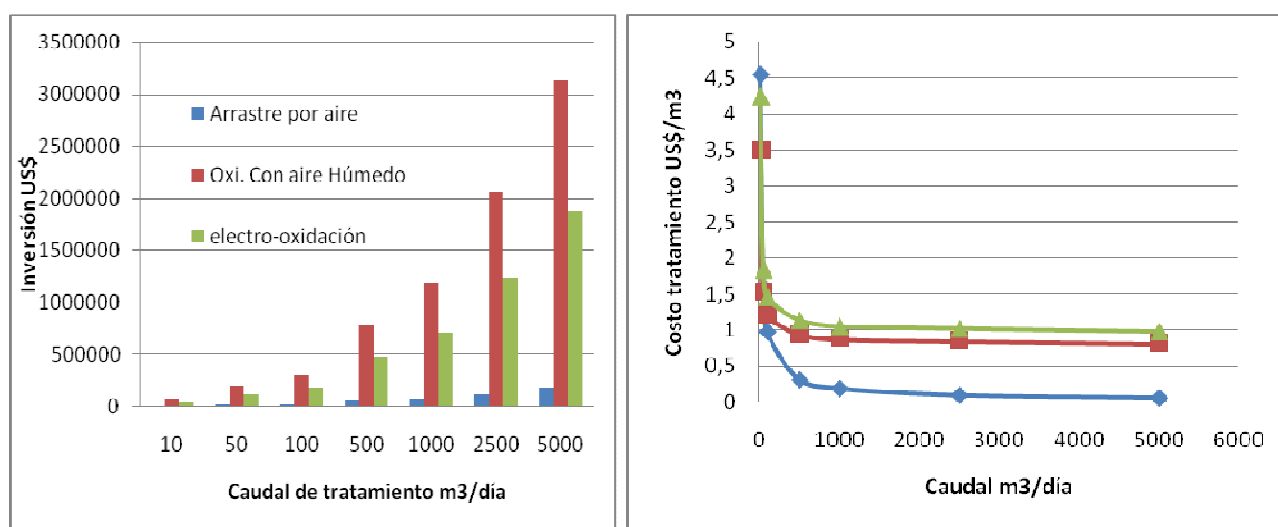


Figura 5.10.1: Gráficos de costos de inversión y operación para Arrastre por aire, oxidación con aire húmedo y electro-oxidación.

En la figura se observa que en ambos casos la tecnología más conveniente es el arrastre por aire. Esta tecnología destaca por su simplicidad y alta efectividad. Puede alcanzar hasta un 99% dependiendo del efluente a tratar. Se han registrado remociones del orden del 90% para compuestos orgánicos volátiles (COV) y 90 a 95% para amoníaco y THM, dependiendo de la concentración inicial y la temperatura ambiental. Si la matriz es concentrada en amoníaco mucho mejor.

Se recomienda el uso de esta técnica en el tratamiento de purines y en la remediación de aguas subterráneas.

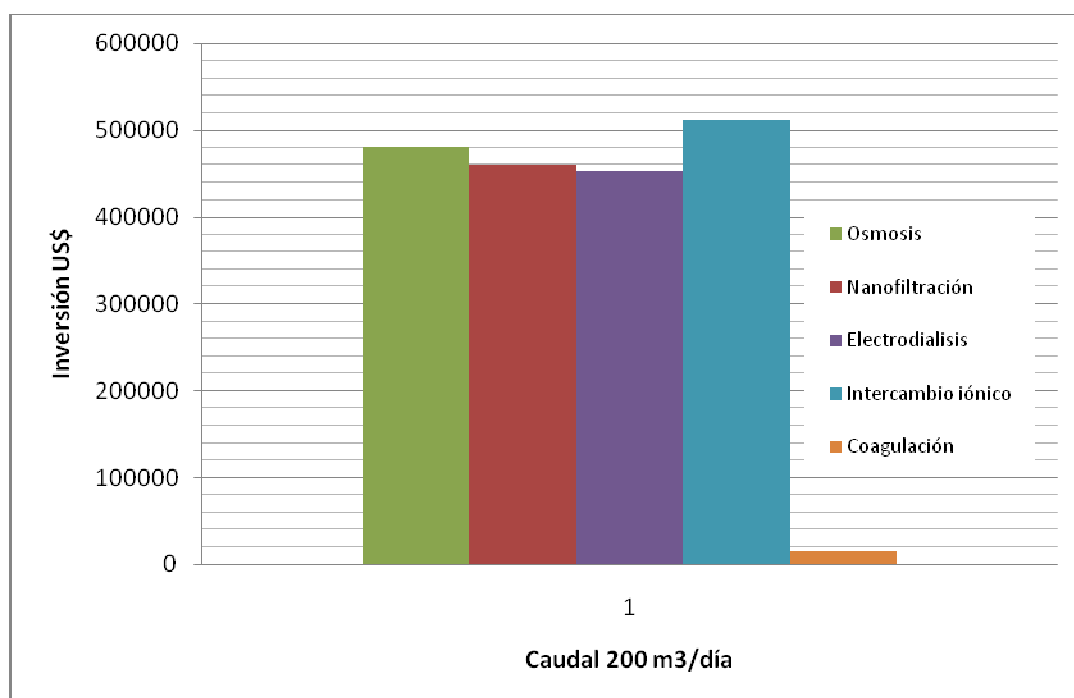


Figura 5.10.2: Gráficos de costos de inversión para tecnologías de intercambio iónico y técnicas de membrana y coagulación

Para la presencia de todo tipo de nitrógeno en sus formas solubles como nitrito y nitrato y compuestos orgánicos nitrogenados se recomienda una etapa de osmosis o nanofiltración o electrodiálisis. Si hay mayor presencia de nitrógeno por compuestos orgánicos nitrogenados, la opción costo efectiva mejor es la nanofiltración. Si lo que se requiere es remoción selectiva, se recomienda el uso de intercambio iónico.

5.11 Tecnologías para Remoción de Fósforo

El fósforo total esta formado por: Fósforo orgánico (Ortofosfatos (PO_4^{-3}) $\approx$ 70% (soluble)); Polifosfatos (P_2O_7). La búsqueda de tecnologías fue orientada a la remoción de fósforo total y en algunos casos para la remoción de sus especies.

En la siguiente tabla se muestran las tecnologías seleccionadas incluyendo información relevante sobre eficiencia, capacidad de tratamiento y costos de inversión y operación.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m^3/d) min y máx	Inversión (US\$) min y máx	Costo trat (US\$/ m^3) min y máx
Fósforo	Biológico	Biofiltro / Lombrifiltro	95%	20 - 300	60.000 - 150.000	0,45 - 0,14
		Lodos Activados	90 - 95%	19 - 507.000	66.000 - 315.000.000	0,28 - 0,01
		SBR	85 - 95%	5 - 200	63.000 - 578.000	1,62 - 0,09
		Wetlands	90%	2 - 100	13.000 - 206.000	0,05 - 0,006
	Físico	Nanofiltración	99%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,6 - 0,3
		Osmosis Inversa	100%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32
		Electrodialisis	90 a 100%	860 - 86000	1.300.000 - 20.000.000	0,51-0,11
	Fisicoquímico	Coagulación	90%	480 - 16000	48.411 - 800.283	0,018 - 0,014
		Intercambio Iónico	99%	9000 - 31334	4.000.000 - 9.100.000	0,057 a 0,114

Como observación general, para la remoción de este parámetro se tiene que el tratamiento biológico comprende el grupo de los de baja capacidad, exceptuando Lodos Activados. Y existe el grupo de alta capacidad, tales como los físicos y los fisicoquímicos.

El grupo de los biológicos presenta una ventaja en cuanto a inversión y costo de tratamiento se refiere, siendo wetlands la mejor opción.

Las tecnologías del grupo de fisicoquímicos representan un tratamiento de muy bajo costo de tratamiento, pero sus principales desventajas son que coagulación es una tecnología de apoyo como tratamiento primario y/o terciario, debido a que no asegura que el lodo generado sea estable medioambientalmente por lo que genera un problema adicional. Por otro lado, intercambio iónico es de alto nivel tecnológico e inversión, pero presenta una alta eficiencia siendo una opción útil para la remoción de este parámetro.

Las tecnologías del grupo de tipo físico permiten operar a un alto rango de caudales y debido a sus semejanzas técnicas la decisión por una de ellas pasa por la especie a remover. La osmosis asegura la remoción de todo tipo de fósforo. Nanofiltración y electrodialisis son eficientes para la remoción de polifosfatos, donde electrodialisis posee menor costo de operación, pero a un mismo nivel de caudales que nanofiltración la inversión es más elevada. Si hay mayor presencia de fósforo por compuestos orgánicos, la opción costo efectiva mejor es la nanofiltración.

5.12 Tecnologías para Remoción de Mercurio

La remoción de mercurio desde efluentes industriales líquidos puede realizarse mediante métodos físicos de separación y métodos fisicoquímicos. Dentro de los métodos físicos se encuentran las técnicas de membrana como osmosis inversa y nanofiltración. Dentro de las alternativas de tratamiento fisicoquímico destacan adsorción e intercambio iónico y coagulación seguida de precipitación química. La adsorción para remoción de mercurio puede ser con: carbón activado y/o otros materiales como ceniza, turba y zeolita natural.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) mín y máx	Inversión (US\$) mín y máx	Costo trat (US\$/m ³) mín y máx
Mercurio	Físico	Osmosis	99%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32
		Nanofiltración	98%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,6 - 0,3
	Fisicoquímico	Intercambio iónico	99%	9000 - 31334	4.000.000 - 9.100.000	0,057 a 0,114
		Coagulación y/o Floculación	90%	480 - 16000	48.411 - 800.283	0,018 - 0,014
		Carbón Activado	95 a 99%	250 - 2000	89.000 - 312.000	0,47 - 0,11
		Adsorción con diferentes materiales	90%	1-20.000	2108 a 917195	2,3 a 0,06

En términos de costos, lo que mas impacta entre una opción tecnológica y otra son los costos de inversión. Para los métodos de separación física la inversión es alta por sobre el US\$1.300.000 a un caudal de 1000 m³/día, mientras que a un caudal similar los costos de adsorción con diferentes materiales corresponde a 1/5 de ese valor. La inversión de intercambio iónico es similar a la de las técnicas de membrana y la de coagulación es la más baja.

En la figura 5.12.1, se muestra el gráfico de la inversión para diferentes técnicas.

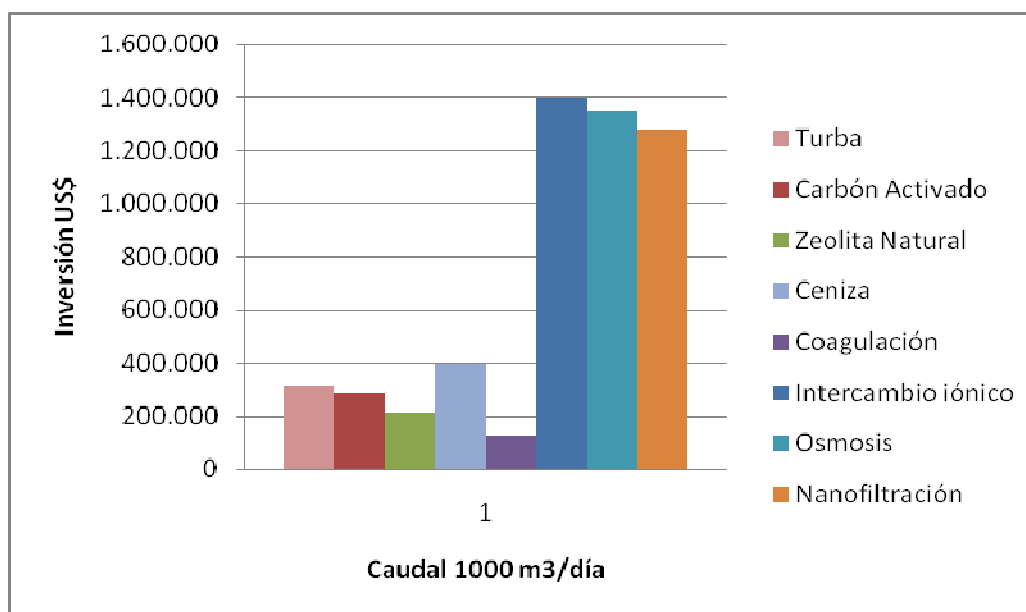


Figura 5.12.1: Gráficos de costos de inversión para distintas tecnologías de tratamiento tipo fisicoquímico

La tendencia mostrada en la figura se repite a los diferentes caudales de operación.

Con respecto a los costos operacionales, en la figura 5.12.2 se muestra un gráfico con estos valores. Se consideraron las tres tecnologías de menores costos de implementación, estas son: Carbón activado, adsorción con zeolitas naturales y coagulación. Coagulación nuevamente destaca por ser la tecnología más económica.

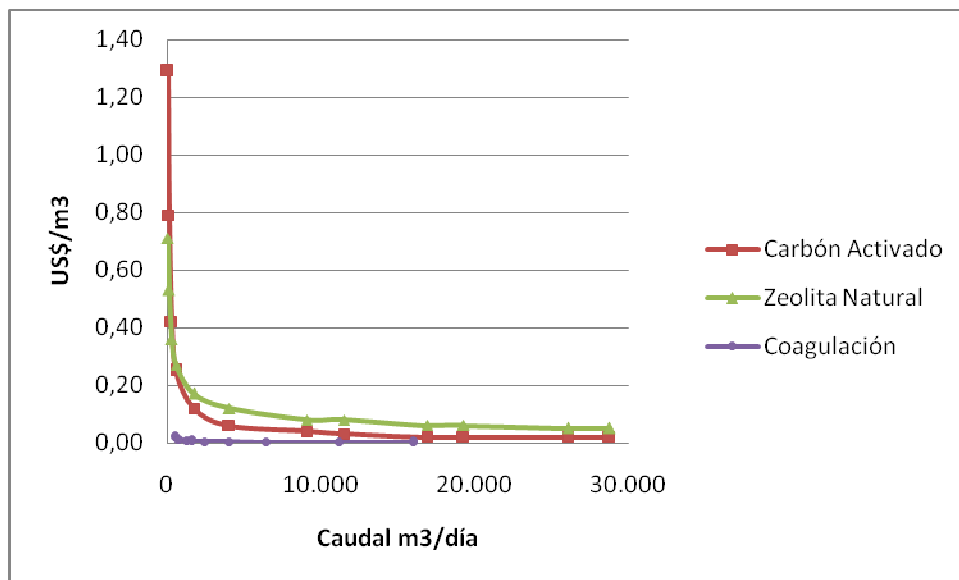


Figura 5.12.2: Gráficos de costos operacionales para distintas tecnologías de tratamiento tipo fisicoquímico

Dentro de la coagulación y precipitación, para el caso del mercurio, la más efectiva es la precipitación con sulfuro, ya que el azufre reacciona con el mercurio formando un sulfuro altamente insoluble y de fácil separación. Esta es una opción ampliamente usada en la minería.

5.13 Tecnologías para Remoción de Índice de Fenol

Para la remoción del parámetro índice de fenol existen variadas alternativas, como se muestra en la tabla.

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) min y máx	Inversión (US\$) min y máx	Costo trat (US\$/m ³) min y máx
Índice de Fenol	Biológico	SBR	85 – 95%	5 - 200	63.000 - 578.000	1,62 - 0,09
		Nanofiltración	98%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,6 - 0,3
	Físico	Osmosis Inversa	99%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32
		Arrastre por aire	90 a 95%	80 - 16000	15.000-354.000	1,09 - 0,03
		Electrooxidación	90 a 100%	10 - 5000	45,214 - 1,882,151	4,24 - 0,98
		intercambio iónico	99%	9000 - 31334	4.000.000 - 9.100.000	0,057 a 0,114
	Fisicoquímico	Coagulación y/o Floculación	90%	480 - 16000	48.411 - 800.283	0,018 - 0,014
		Carbón Activado	95 a 99%	250 - 2000	89.000 - 312.000	0,47 - 0,11
		Extracción por Solvente	80%	2 a 77	328866 - 3,007,838	N/A
		Oxidación, POAS	90%	10 - 5000	90.500 - 3.800.000	2,6 - 0,6
		Oxidación con agua supercrítica	95%	10 - 5000	100.475 - 4,182,558	4,16 - 0,96

En la tabla se muestran clasificadas las tecnologías en tipos de tratamiento, ya sea biológico, físico y fisicoquímico.

Para tratamiento biológico las opciones son reducidas a SBR, reactor secuencial en bandas, debido a que la presencia de compuestos fenólicos en efluentes industriales puede afectar el desempeño de los tratamientos de degradación biológica, al ser afectados por la toxicidad de estos compuestos. Existen referencias bibliográficas que aseguran que es posible aclimatar a los microorganismos y hacerlos mas tolerantes a la presencia de estos compuestos, así mismo la tecnología de reactor secuencial de bandas (SBR) es una de las pocas tecnologías de biodegradación que se hace cargo del fenol en eficiencias que pueden alcanzar el 95% de remoción. La limitante es la capacidad de tratamiento que permite como máximo 200 m³/día.

Las tecnologías físicas de tratamiento como: arrastre por aire, nanofiltración y osmosis, separan los compuestos fenólicos del efluente en un proceso de separación física, no ocurre una degradación del compuesto solo una separación o extracción. De modo similar, algunas técnicas de tratamiento fisicoquímico como: intercambio iónico, coagulación y adsorción con carbón activado tampoco realizan una degradación sólo una extracción.

Existen algunas técnicas fisicoquímicas que sí realizan una degradación de los compuestos fenólicos, entre ellas destacan oxidación con ozono, oxidación con agua supercrítica, electro-oxidación, entre otras.

Para establecer la tecnología más costo efectiva debe considerarse en el análisis las características del efluente, la carga del contaminante, el caudal de tratamiento, el desempeño técnico de cada alternativa tecnología y los costos tanto de operación como los costos de inversión inicial. Además de analizarse variables como condiciones climáticas, logística, espacio, entre otras.

En la figura 5.13.1, se muestra un gráfico para un caudal de 200 m³/día versus los costos de inversión para todas las tecnologías que remueven el parámetro índice de fenol.

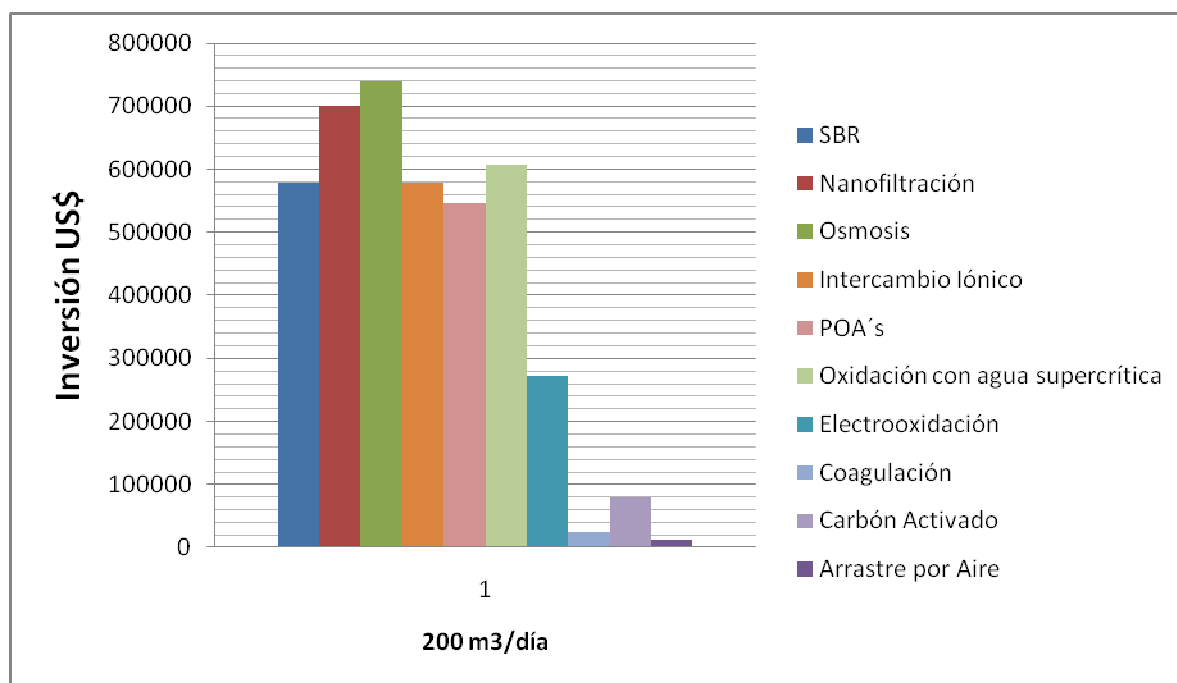


Figura 5.13.1: Gráficos de costos operacionales para distintas tecnologías de tratamiento tipo fisicoquímico

Se distingue claramente tres grupos, el primero considera aquellas tecnologías donde la inversión supera los US\$500.000 como lo son: SBR, nanofiltración, Osmosis, intercambio Iónico, POA's y oxidación con agua Supercrítica. El segundo grupo lo representa la tecnología electro-oxidación que bordea los US\$250.000 de inversión. Finalmente el tercer grupo son aquellas tecnologías que su inversión es menos a US\$100.000 como las tecnologías de coagulación, carbón activado y arrastre por aire.

La decisión de una u otra tecnología debe estar alineada con el objetivo del tratamiento. Por ejemplo, si el efluente es tóxico se recomienda elegir un tratamiento de degradación ya sea biológico o fisicoquímico como la oxidación que disminuirá el efecto tóxico del efluente. No así una tecnología económica como coagulación que transfiere todo el fenol a un lodo de características peligrosas. Si por otro lado, la toxicidad es baja y la concentración de fenol también, se recomienda una tecnología limpia como intercambio iónico, carbón activado o técnicas de membrana.

5.14 Tecnologías para Remoción de Poder Espumógeno

Debido a que el poder espumógeno no es un parámetro específico y de estructura conocida, si no que es la capacidad de una solución de producir espuma, las tecnologías que se listan son aquellas que lo remueve como parte de un conjunto de parámetros en un tratamiento.

La tabla a continuación muestra las tecnologías que informan su capacidad de remoción:

Parámetro	Tipo	Tecnologías	Eficiencias de Remoción	Caudal (m ³ /d) min y máx	Inversión (US\$) min y máx	Costo trat (US\$/m ³) min y máx
Poder espumógeno	Físico	Osmosis Inversa	100%	1500 - 379000	1.900.000 - 53.400.000	0,62 - 0,32
	Fisicoquímico	Coagulación	90%	480 - 16000	48.411 - 800.283	0,018 - 0,014
		Carbón Activado	95 a 99%	250 - 2000	89.000 - 312.000	0,47 - 0,11

Cabe destacar que la tecnología de carbón activado es una de las que remueve este parámetro de forma directa, sin embargo, se debe realizar un estudio preliminar que permita escoger el mejor tipo de carbón activado que sea capaz de entregar la mejor eficiencia, considerando que las soluciones que generan espumas están constituidas por detergentes, aceites, grasa o algún compuesto orgánico similar.

Existen además otras tecnologías que remueven este parámetro de forma indirecta, como coagulación y osmósis, pero de acuerdo a lo señalado anteriormente, se debe considerar el tipo de lodo a obtener para su disposición. Por otro lado, osmósis es un proceso de alto nivel tecnológico, por lo que su elección dependerá de otros factores.

Lo recomendable en este caso es realizar una especiación del fluido a tratar para determinar específicamente el componente que genera esta espuma, pudiendo realizarse una combinación de tecnologías de tratamiento para su eficiente remoción, y si éste es persistente, considerar el carbón activado como un tratamiento terciario.

6 Asesoría Técnica a CONAMA

Parte de las actividades contempló prestar asesoría técnica a CONAMA, la cual se incluyó aspectos técnicos y económicos de las tecnologías, dentro de las cuales se mencionan las siguientes, las que en el capítulo anterior han sido explicadas o en su defecto en las mismas fichas se han señalado.

- ☐ Indicar las diferencias entre un tratamiento primario, secundario y terciario.
- ☐ Indicar diferencias entre tecnologías convencionales y emergentes.
- ☐ Profundizar en las reuniones los aspectos técnicos de las tecnologías, de tal forma que puedan ser de fácil entendimiento.
- ☐ Evaluar por solicitud de la contraparte costos con casos similares a los caudales de celulosas.
- ☐ Evaluar por solicitud de la contraparte el caso de lodos activados a altos caudales.
- ☐ Evaluar por solicitud de la contraparte los costos involucrados en la regulación de la temperatura para el caso de las celulosas.
- ☐ Señalar en el caso de Torres de enfriamiento las recomendaciones para deltas de temperaturas pequeñas.
- ☐ Averiguar qué tan efectiva es la tecnología de lombrifiltros en el sur.
- ☐ Se entrega información del caso de tratamiento de Nitrógeno en un lago de Nueva Zelanda.
<http://www.envbop.govt.nz/Agendas/Lakes-050412-LakeOkaroMinutes.pdf>

7 Fuentes de Información

Algunas de las fuentes más relevantes consideradas en la búsqueda de alternativas tecnologías para el tratamiento de efluentes líquidos.

1. www.Induambiente.cl
2. www.Paginasamarillas.cl
3. www.siss.cl
4. www.conama.cl
5. www.sciencedirect.com
6. <http://www.epa.gov/>
7. www.aguassipara.cl
8. www.innovacionambiental.cl
9. www.fundacionchile.cl
10. www.matheo-software.com/
11. <http://www.holistek.cl/index.php/page/TratamientoPrimario>
12. <http://www.infraplast.cl/separador.htm>
13. <http://www.patentstorm.us/patents/5755980.html>
14. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-106.pdf>
15. <http://event08.ise-online.org/site/files/ise082020.pdf>
16. <http://www.acsmedioambiente.com/>
17. <http://www.neutra-agua.com/prog1.html>
18. www.ayt.cl
19. www.seia.cl
20. www.scielo.cl
21. Mercurio Gravimétrico.
<http://www.patentesonline.cl/patente.pesquisar.do?pesquisa=metodo%20para%20remover%20mercurio>
22. Tratamiento THM: <http://www.trihalometanos.com/index.php>
23. Difusores de burbuja : <http://www.bioaguachile.cl/2009/11/24/difusores-de-burbuja-fina/>
24. Remoción de AOX: <http://profefeliz.blogspot.com/search?updated-min=2007-01-01T00:00:00-08:00&updated-max=2008-01-01T00:00:00-08:00&max-results=18>
25. Evaporación al vacío: <http://www.scribd.com/doc/14819926/ARTICULO-REVISTA-TECNOLOGIA-AGUA>
26. Diplomado de Contaminación de Aguas- Universidad de Chile
27. Ingeniería Sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales, Segunda edición Metcalf and Eddy, INC.
28. Industrial and Hazardous Waste Treatment. Nelson L. Nemorow. Environmental Engineering series. 1991.
29. Allegre, C.; Moulin, P.; Maisseu, M.; Chabrit, F. (2005). Treatment and reuse of reactive dying effluents, J. Memb. Sci., 269, 15-34.
30. Andreozzi, R.; Caprio, V.; Insola, A.; Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery, Catal. Today, 53 (1), 51-59.
31. Bueno, J.L.; Sastre, H. y Lavin, A.G. (1997). Contaminación e Ingeniería Ambiental: Vol III, Contaminación de las Aguas, FICYT. Oviedo.
32. Casey, T.J. (1997). Unit Treatment Processes in Water and Wastewater engineering. Wiley & Sons. Chichester, New York.
33. Cheremisinoff, P.N. (2001). Handbook of Water and Waste Water Treatment Technology, Marcel Dekker, 536.